用传感器测空气相对压力系数 P2
用传感器测空气相对压力系数 298
用传感器测空气相对系数 196
用传感器测空气相对压力系数 278
示波器的原理和使用与声速测量 P11
示波器的原理使用与声速测量 153
塞曼效应实验 P21
用单色仪测定介质的吸收曲线 P33
用单色仪测定介质的吸收曲线 320
直流电桥测电阻 P49
直流电桥测电阻及组装数字温度计 267
直流电桥测电阻及组装数字温度计 287
阻尼振动与受迫振动 P63
阻尼振动与受迫振动 306
灵敏电流计 P76
灵敏电流计 256
迈克耳孙干涉仪测空气折射率 P83
偏振光学实验 P95
偏振光学实验 207
偏振光学实验 418
弦振动实验 P110
弦振动 P122
逸出功的测量 P127
逸出功的测量 228
拉伸法和动力学法测弹性模量 P136
拉伸法和动力学法测弹性模量 339
压电元件导纳圆测量 及
互感耦合电路的特性研究 169
用示波器研究互感耦合电路的特性 177
透镜焦距的测定 182
数字存储示波器与瞬态信号测量 219
数字存储示波器与瞬态信号测量 375
非线性电路的混沌现象 241
光电效应测定普朗克常数 329
霍尔效应实验及磁阻测量 351
准稳态法测不良导体的导热系数和比热 367
分光计的调节和色散曲线的测定 391
液体粘度的测量 406

清华大学实验报告

系别 _____ 班号 精11 姓名 韩盈舟 （同组姓名 _____）

作实验日期 年 月 日 教师评定 9+

用传感器测空气相对压力系数

一、实验目的：

(1) 加深对理想气体状态方程和查理定律的理解

(2) 了解铜电阻温度传感器和硅压阻式差压传感器的工作原理并掌握其使用方法。

(3) 学习用作图法和计算机作直线拟合法处理数据。

二、实验原理：

1. 理想气体的查理定律：

定容条件下：

$$P=\frac{P_0T}{T_0}=P_0\cdot\frac{T_0+t}{T_0}=P_0(1+\alpha_P t)$$

利用查理定律可制定容气体温度计。

2. 铜电阻温度传感器：

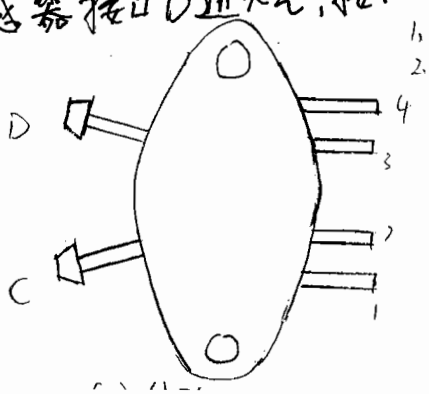
在 $-50^\circ C\sim 100^\circ C$ 内，铜丝满足 $R=R_0(1+\alpha_R t)$ $\alpha_R=4.28\times10^{-3}{}^\circ C^{-1}$

$$t=\frac{U_t}{U_0}\left(\frac{1}{\alpha_R}+t_b\right)-\frac{1}{\alpha_R}$$

3. 扩散硅压阻式差压传感器

压阻式差压传感器利用半导体材料的压阻效应制成。PPT-1型扩散硅压阻式差压传感器结构示意图如图1。在剪切应力作用下，从A和B端会输出一与压差 ΔP 成线性关系的电压 U_P，即：$U_P=U_0+k_P\Delta P$

带传感器接口D通大气，接口C通被测气体，则 $P=P_C+\frac{U_P-U_0}{k_P}$



1,3—电源线（1为正）

2,4—输出线（2为正）

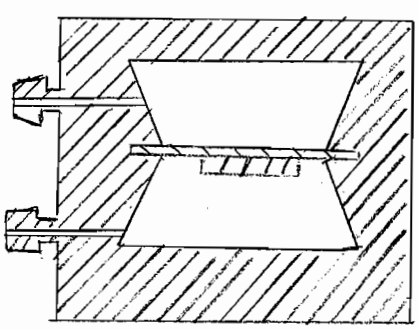


图1

清华大学实验报告

系别 _____ 班号 精11 姓名 钟盈舟 （同组姓名 _____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

4. 注意事项：

(1) 加热时将搅拌器电源开关及加热开关同时接通，并调控温旋钮至所需温度。搅拌器转速不适当。

(2) "热得快"不能干烧。换水要用虹吸方法或直接将玻璃杯内的水倒入塑料桶。

(3) 小心操作以免损坏玻璃仪器。

(4) 停泵后应立即将机械泵抽气口通大气。

(5) 实验完毕，将加热器的调速、温控旋钮旋至最小位置，并断开电源开关和加热开关。

五、系统误差分析：

1. $P=P_0(1+\alpha_p t)$ 仅适用于定容、定质量理想气体。

由于 A泡的容积因热胀冷缩而变且与A泡相连的C管其部分中的气体温不均匀原因，实验中存在明显系统误差。下面分析它们的影响。

气体种类	初态	末态
A泡内气体	V_1, P_1, T_1	$V[1+\beta(T-T_1)], P, T$
V内气体	V_1, P_1, T_1	V_1, P, T_1

∵气体总量不变 ∴ $\frac{P_1V}{T_1}+\frac{P_1V}{T_1}=\frac{PV[1+\beta(T-T_1)]}{T}+\frac{PV}{T_1}$

∴ $P=\frac{P_1T}{T_1}\left[1-\left(\beta+\frac{V}{VT_1}\right)(T-T_1)\right]$

修正：$\delta\alpha_p=\left(0.018+\frac{5V}{V}\right)\times10^{-3}K^{-1}$

2. 福丁气压计的系统误差：

因为水银密度、黄铜标尺长度会随温度变化，修正 ~~$\delta\alpha_p$~~ $\delta_H=-(18.2+1.9)\times10^{-}$

修正后 $P_C=H+\delta_H$

清华大学实验报告

系别 _____ 班号 精11 姓名 [illegible] （同组姓名 _____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

六、实验数据处理：

1. 大气压强及修正：

室温及气压：实验前 $t_1 = 20.0^\circ C$， $H_1 = 100.31$ (10毫巴)

实验后 $t_2 = 22.5^\circ C$ $H_2 = 100.50$

修正：$\delta H = -(18.2 - 1.9) \times 10^{-5} \times \frac{H_1 t_1 + H_2 t_2}{2}$

$= -(18.2 - 1.9) \times 10^{-5} \times \frac{100.31 \times 20.0 + 100.50 \times 22.5}{2}$

$= -0.348$ (10毫巴)

$\therefore P_C = \bar{H} + \delta H = \frac{100.31 + 100.50}{2} - 0.348 = 100.057$ (10毫巴)

$= 1.00057 \times 10^5$ Pa

2. 关于 t_b：

查表有：$P_{C1} = 0.9999 \times 10^5$ Pa， $P_{C2} = 1.0012 \times 10^5$ Pa

$t_{b1} = 99.63^\circ C$. $t_{b2} = 99.67^\circ C$

用线性内插法：$\frac{P_C - P_{C1}}{t_b - t_{b1}} = \frac{P_{C2} - P_{C1}}{t_{b2} - t_{b1}}$

$\therefore t_b = t_{b1} + \frac{(P_C - P_{C1})(t_{b2} - t_{b1})}{P_{C2} - P_{C1}} = 99.63 + \frac{(1.00057 - 0.9999) \times 0.04}{1.0012 - 0.9999} = 99.65^\circ C$

3. 空标和求 k_p 值：

空标时测得 $U_m = 41.30$ mV， $U_0 = 0.02$ mV

$\therefore k_p = \frac{U_m - U_0}{P_C} = \frac{(41.30 - 0.02) \times 10^{-3}}{1.00057 \times 10^5} = 4.126 \times 10^{-7}$ V/Pa

4. U_t、U_p、t、p 的处理

初始时：室温 $t = t_1 = 20.0^\circ C$， $U_b = 110.07$ mV

清华大学实验报告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名 _____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

若要在 20.0 ~ 80.0 间再测七组数据，则 $\Delta t = \frac{80.0-20.0}{7} = 8.57\,^{\circ}C$

∵ $U_t = U_{R_0}(1+\alpha_R t)$，且 $\alpha_R = 4.26\times10^{-3}\,^{\circ}C^{-1}$

∴ $\Delta U_t = U_{R_0}\cdot\alpha_R\cdot\Delta t = \frac{U_t}{1+\alpha_R t_1}\cdot\alpha_R\Delta t = \frac{110.07}{1+4.26\times10^{-3}\times20.0}\times4.26\times10^{-3}\times8.57 = 3.70mV$

∴ 取 $\Delta U_t = 3.70mV$ 可使数据分布较均匀

由教书上公式，$t = \frac{U_t}{U_{t_0}}\left(\frac{1}{\alpha_R}+t_0\right)-\frac{1}{\alpha_R}$，$P = P_c + \frac{U_p-U_0}{k_p}$

可测得 $U_{t_0} = 144.38\,mV$，$k_p = 4.126\times10^{-7}\,V/Pa$.

U_t/mV	$t/^{\circ}C$	U_p/mV	$P/10^5Pa$
110.07	20.0	-0.99	0.9761
112.97	26.90	-0.66	0.9841
116.68	35.49	1.12	1.0272
120.04	43.27	2.16	1.0524
123.35	50.94	3.22	1.0781
127.18	59.81	4.40	1.1087
130.85	68.31	5.55	1.1346
135.64	79.40	7.01	1.1700
沸腾：144.38	99.65	9.66	1.2342

计算机拟合可得：$P = a+bt = 0.9089376 + 0.003269t$. $(P/0.1MPa,\ t/$

相关系数 $r = 0.99997$ $\alpha_p' = \frac{b}{a} = \frac{0.003269}{0.9089376} = 3.60\times10^{-3}K^{-1}$

∵ $\frac{U}{V} = 0.02$

∴ 修正 $\delta\alpha_p = (0.018+\frac{5U}{V})\times10^{-3} = 0.118\times10^{-3}K^{-1}$

清华大学实验报告 J26

系别 _____ 班号 精11 姓名 钟函舟 （同组姓名 2012.10.18）

作实验日期 年 月 日 教师评定

检流计型号 工 编号 2.

1. 观察阻尼运动 检流计外临界冰电阻 R_c = 1110.0 Ω. (自测).

R_2/Ω	阻尼运动的特点	光标自最大标转处至最后停在零点处所需时间/s
约10R_c	振荡着静止	5.3s
约R_c	单向动最终静止	5.4s
约0.1R_c	单向偏转	59s

2. 测检流计内阻 R_g R_0 = 1.00Ω

① 量程 3.000V 准确度等级 0.5 分度值 150 V. 电阻箱等级 0.1

(1) 半偏法

测次	U/V	R_1/Ω	R_2=0时 d/div	偏差时R_2/Ω	调偏2分度时对应$\Delta R'$/Ω
1	2.99	10700.0	52	1660.0	1953-1660=29.3
2	2.99	10710.0	:	164.0	1940-1640=27.0
3	:	10720.0	:	164.20	1725-1642=28.8
4	:	10730.0	:	1637.0	1919-1637=28.2
5	:	10740.0	:	162.10	1920-1621=29.9
6	:	10750.0	:	1644.0	1925-1644=28.1

(2) 全偏法

测次	U/V	R_1/Ω	R_2=0时 d/div	R_1/2/Ω	R_2/Ω	调偏2分度时对应的$\Delta R'$/Ω
1	2.99	10700.0	52	5350.0	1597.0	1719-1597=122
2	:	10710.0	:	5355.0	1603.0	1759-1603=156
3	:	10720.0	:	5360.0	1582.0	1721-1582=139

清华大学实验报告

系别 _____ 班号 精11 姓名 钟嘉舟 （同组姓名 _____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

初始： $t_1 = 20.0^\circ C$ $H_1 = 100.31$

实验后： $t_2 = 22.5^\circ C$ $H_2 = 100.50$

$$\delta H = -(18.2-1.9)\times 10^{-5}\times\left(\frac{100.31+100.50}{2}\times 20 + \frac{100.50\times 22.5}{2}\right) = -0.348$$

$$H = \frac{100.31+100.50}{2} - 0.348 = 100.057$$

$P_c = H\times 10^3 = 100057\times 10^5\ Pa$.

$P_{c_1} = 0.9999\times 10^5\ Pa$ $t_{b_1} = 99.63^\circ C$ $P_{c_2} = 1.0012\times 10^5\ Pa$ $t_{b_2} = 99.67^\circ C$.

$$t_b = 99.63 + \left(\frac{1.0012-0.9999}{0.04}\right)^{-1}\times(1.00057-0.9999) = 99.65^\circ C$$

$U_m = 41.30mV$ $U_0 = 0.02mV$

室温 $U_t = 110.07mV$, $\Delta U_t = U_{R_0}\alpha_R\Delta t = 3.70mV$.

	U_t/mV	U_p/mV
	110.07	−0.99
	112.97	−0.66
	116.68	1.12
	120.04	2.16
	123.35	3.22
	127.18	4.40
	130.85	5.55
	135.64	7.01
沸腾	144.38	9.66

$r = 0.99997$.

直线 $P = 0.9089376 + 0.003269t$

P/0.1MPa, t/°C.

$$\alpha_p = \frac{b}{a} = 3.60\times 10^{-3}K^{-1}$$

$$\delta\alpha_p = (0.018+5\times 0.02)\times 10^{-3} = 0.118\times 10^{-3}K^{-1}$$

$$\therefore \alpha_{标} = \alpha_p + \delta\alpha_p = 3.718\times 10^{-3}K^{-1}$$

清华大学实验报告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名 _____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

$\therefore \alpha_p = \alpha_p' + \delta\alpha_p = (3.60+0.118)\times10^{-3} = 3.72\times10^{-3}\ K^{-1}$

七、思考题：

1. (1) 转动三通活塞使传感器C口与B管连通而与A断开，C通大气。用机械泵从D口抽气，待电压表示数达到最大并稳定后记录数值U_m。停泵，并D口也通大气，此时电压表时示数为U_0，则 $k_p = \frac{U_m - U_0}{P_c}$

(2) 若D口漏气，则抽气后 $\Delta P < P_c$，则U_m偏小，所以k_p偏小。

2. (1) 热平衡时电压示数稳定，读数准确；若控制不好热平衡，则装置内会产生局部温差，使读数不准。

(2) 升温过快，则热量来不及扩散，聚集在局部，导致U_t、U_p读数不准，U_p会随热量的扩散而连续变化，不易读数。

3. (1) 转动时应缓慢，并用另一只手扶住活塞外壳。

(2) 先将加热器电源断开，再用虹吸方法将杯内水吸出。或将玻璃泵连拿下，放在备用杯子上，再将玻璃杯内的水倒入塑料桶。

4. 调节底部旋钮，使水银杯内的水银面与象牙针尖接触，使视线与游标零线保持水平，再调节旋钮，使游标零线与水银凸面相切之后读

5. 用四端接法时电流端的引线电阻和接触电阻折合到电流源回路作其他串联电阻中，不影响电阻上的电流，电压端的引线电阻和接触电阻比电压表内阻小得多，几乎无影响。

6. 仪器漏气。因为沸腾时A泡内气压与大气压差别很大，三通活塞有漏气。此时，A泡内气体减少，气压下降，使U_p单调下降。

八、误差分析与实验总结：

随机误差主要有：仪器漏气、大气压、温度读数误差。

总结：本次实验总体较为顺利。但在三通活塞的使用上出现了问题，主要原因是没有跟上老师的讲解，老师讲得很细致。

加热升温时不易控制，每我每当温度接近时，就会调小电流，防止升温太快，才解决了这个问题。

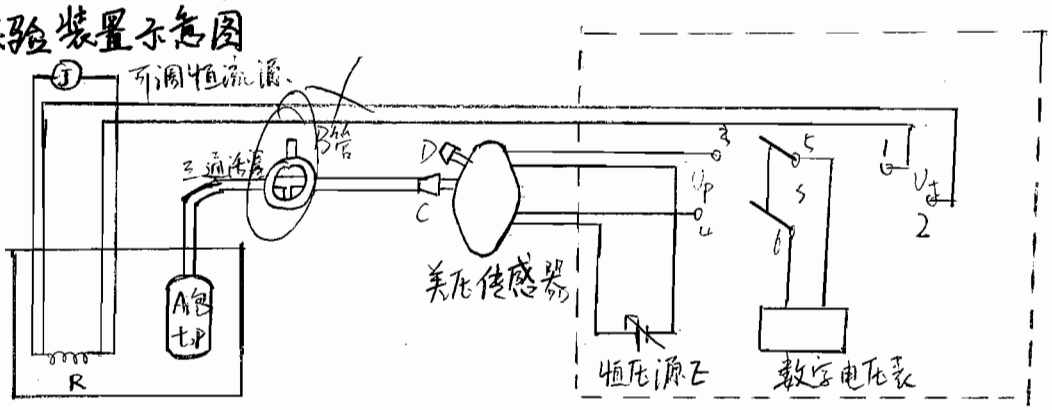
清华大学实验报告

系别 _____ 班号 精11 姓名 钟盈舟 （同组姓名 _____）

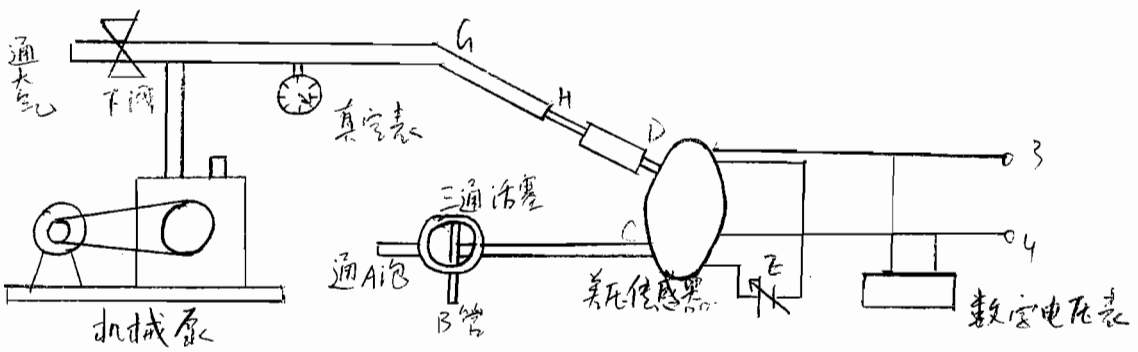
作实验日期 年 月 日 教师评定

三、实验仪器与装置：

1. 实验装置示意图



2. 差压传感器定标装置



四、实验步骤及注意事项：

1. 差压传感器的定标：用图4装置准确测定传感器的U_0和k_p。转三通管使传感器C口与B管相通，并使D口与机械泵相连，用泵从D口抽待真空表示数为760 mm时，压差$\Delta p = P_c$。传感器输出电压为U_m。然停泵。数字表读数为U_0。$k_p = \frac{U_m - U_0}{P_c}$

2. 测若干组(U_t, U_p)值。记室温下铜丝电压值U_t、传感器输出电压U_p。加铜丝电压每增加约0.5mV记一次(U_t, U_p)值。最后记下水沸腾时各电压记为(U_{tb}, U_{pb})

3. 实验前后用大气压各测一次大气压，同时记下室温值。

取两点 A、B

令 $P = a + bt$

$$\therefore b = \frac{y_B - y_A}{x_B - x_A} = \frac{1.1776 - 1.0045}{80.00 - 30.00} = 0.003462$$

$$a = P_A - bt_A = 0.90064$$

$$\therefore P = 0.90064 + 0.003462t$$

P/0.1MPa, t/°C

B (80.00, 1.1776)

A (30.00, 1.0045)

京诚纸品 精益求精
货号1603 17×2公分

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 精11 姓名 钟盈舟 （同组姓名 9— ）

作实验日期 年 月 日 2011010493 教师评定

示波器的原理和使用与声速测量

一、实验目的：

(1) 了解示波器的原理和基本结构。

(2) 学会使用示波器观察波形和进行相关测量。

(3) 了解声波在空气中传播速度与气体状态参量的关系。

(4) 了解超声波产生和接收原理，学习一种测量空气中声速的方法，加深对

二、实验原理：

1. 示波器原理：

示波器就其显示方式主要有阴极射线示波器和液晶显示两种。阴极射线示波器包括图1几个组成部分。

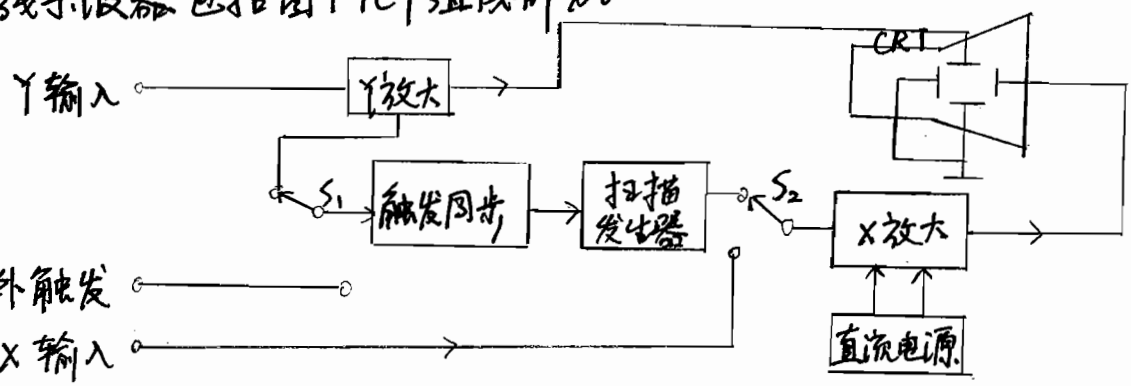


图1

(1) 示波管的基本结构

示波管的基本结构如图2所示，主要包括电子枪、偏转系统和荧光屏三部分，全密封在玻璃外壳内，里面抽成高真空。

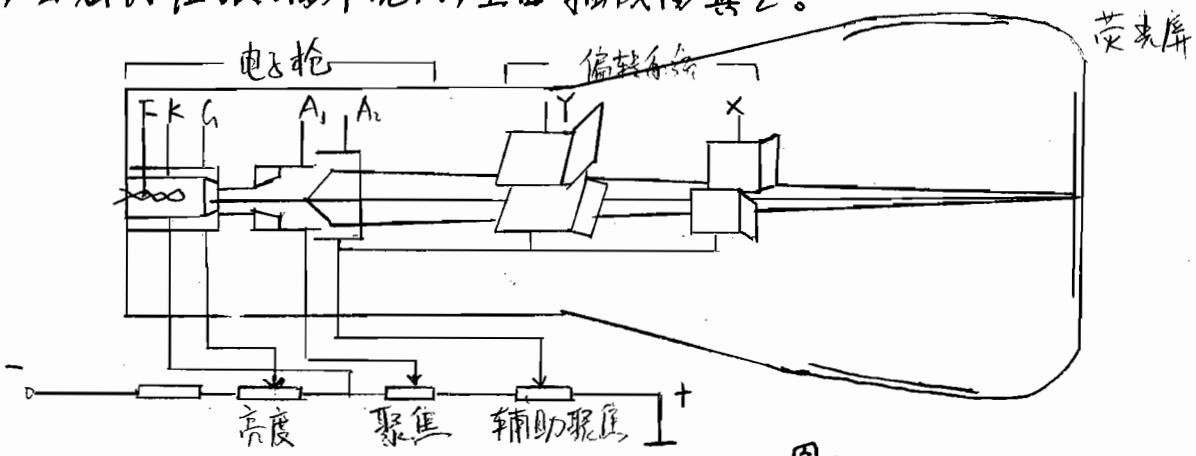


图2

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 精11 姓名 [illegible] （同组姓名 _____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

F-灯丝；K-阳极；G-控制栅极；A_1-第一阳极；A_2-第二阳极；
Y-竖直偏转板；X-水平偏转板

(2) 示波器显示波形的原理：

如果在竖直偏转板上加正弦电压，同时在水平偏转板加锯齿波电压，电子受竖直、水平两个方向的力的作用。若两种电压变化周期相等，则能显示波形图，如图3。

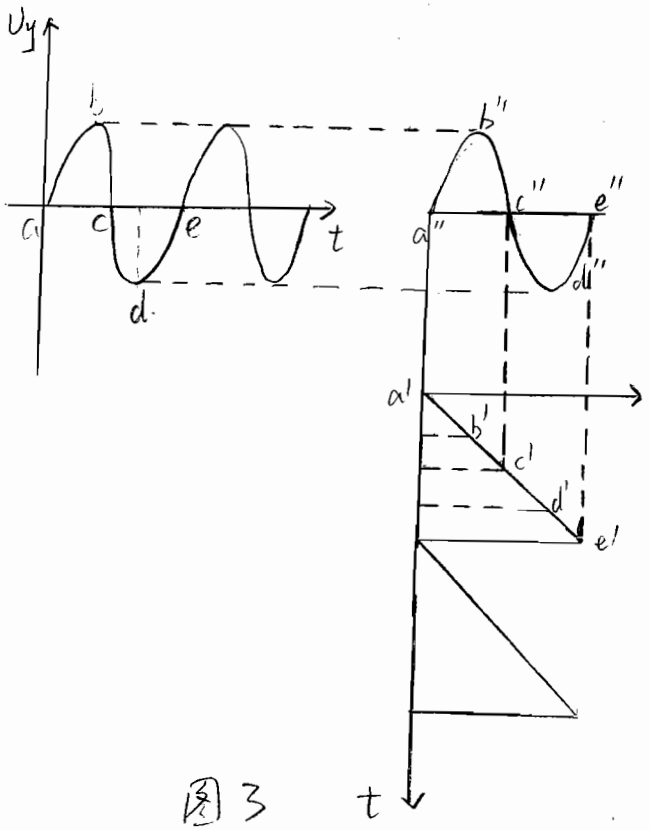


图3

(3) 同步的概念：

如果正弦波和锯齿波电压的周期稍不同，屏上出现的是一移动着的不稳定图形。若锯齿波电压的周期T_x比正弦波电压周期T_y稍小，则好像波形在向右移动。反之向左。

示波器内装有描同步装置，在适当调节后，让锯齿波电压的扫描起点自动跟着被测信号改变，这称为整步。

(4) 利萨如图形的基本原理

若示波器的X和Y输入是频率相同或是简单整数比的两个正弦电压，则屏上将呈现特殊形状的轨迹，这种轨迹图称为利萨如图形。可总结出：描迹的切点数n_x与竖边上的切点数n_y之比恰好等于Y和X输入的两正弦的频率之比，即$f_y : f_x = n_x : n_y$。有端点与假想边框相接时，一个端点计为

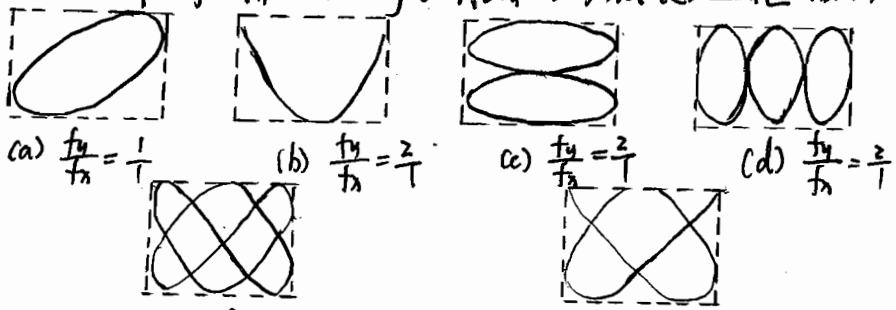


图4

清华大学实验报告

系别 _____ 班号 精11 姓名 钟昌角 （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

2、声速测量：

(1) 声波在空气中传播速度

理想气体中声波传播速度 $U=\sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}$。

在室温t下，干燥空气中声速为 $V=V_0\sqrt{1+\frac{t}{T_0}}$。由于空气中通常含有水蒸气的，对上式修正可得在温度为t，相对湿度为γ的空气中，声速

$V=331.5\sqrt{(1+\frac{t}{T_0})(1+0.31\frac{\gamma P_s}{P})}$。

(2) 测声速的实验方法

声波的波速与波长λ及频率f关系为 $V=f\lambda$，测出f，λ就可以求声速。其中声波频率可通过测声源振动频率得出。

产生和接收超声波用超声波传感器。其中压电陶瓷晶片是传感器的核心。本实验中其振荡频率为40kHz，相应超声波波长为几毫米。由于波长短。定向发射性能好，波长可用相位法测。

为判断相位差和测定波长，可利用双线示波器直接比较发射的信号和接收器的信号，同时沿传播方向移动接收器寻找同相点。可利用利萨如图形，在两电信号同相或反相时椭圆退化为右斜或左直线来判断。

三、实验仪器：

1、SS-7802 示波器

2、GFG-8016G 函数信号发生器

3、自制多波形信号发生器 CDB-87 型）

4、声速测量仪（声波发射器、超声波接收器和数显游标卡尺三部

5、干湿温度计。

四、实验步骤：

1、示波器的使用

(1) 观测波形。测出峰峰值、周期，并计算有效值和频率。

(2) 观测利萨如图

清华大学实验报告

系别 _____ 班号 精11 姓名 [redacted] （同组姓名 _____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

2、声速测量：

(1) 连接电路。频率范围置于100 kHz档。

(2) 将函数信号发生器的频率调到40 kHz左右，然后细调频率，使接收输出信号最大，记下此频率，为超声波频率。

(3) 用相位法测波长。用利萨如图找出同相点。每遇一个同相点，测一次位置x，连续测20个并用逐差法处理。

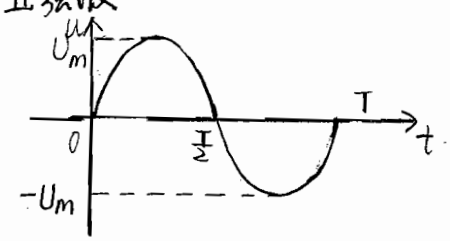
(4) 在测量开始和结束时，先后记录室温t_1和t_2，相对湿度γ_1和γ_2，得到对应的饱和蒸汽压值。并计算出声速理论值。

五、数据处理：

1. 观测波形

	光标法U_{pp}/V	分度法U_{pp}/V	计算有效值U_{eff}/V	周期T/ms	计算频率f/
正弦波	2.690	2.710	0.951	1.068	0.936
方波	11.74	11.72	5.870	1.026	0.974
三角波	3.90	3.92	1.033	1.024	0.976
尖峰波	12.50	12.60		1.025	0.975

正弦波



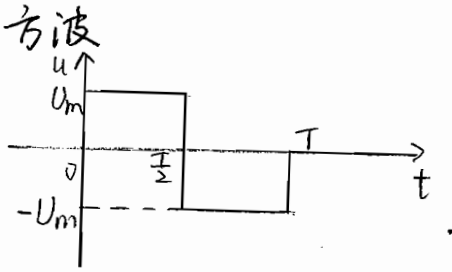
不妨设 $u=U_m\sin\omega t$，U_m为峰值，$U_m=\frac{1}{2}U_{pp}$

有效值 $U=\sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T u^2dt}=\sqrt{\frac{U_m^2}{\omega T}\int_0^{\omega T}\sin^2x\,dx}$

$\because \omega T=2\pi$ $\therefore U=\frac{U_m}{\sqrt{2}}=\frac{U_{pp}}{2\sqrt{2}}\approx 0.951$ V

$\therefore f=\frac{1}{T}=$ ~~1.052 kHz~~ 0.936 kHz

方波



不妨 $u=\begin{cases}U_m & (0<t\le\frac{T}{2})\\ -U_m & (\frac{T}{2}<t\le T)\end{cases}$ $U_m=\frac{1}{2}U_{pp}$

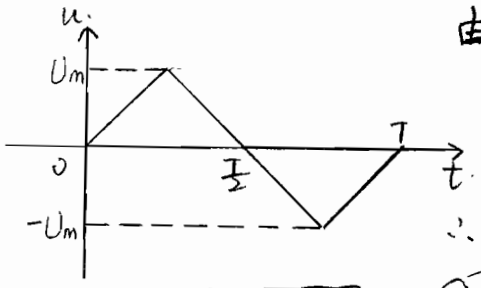
有效值 $U=\sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T u^2dt}=\sqrt{\frac{U_m^2}{T}\int_0^T dt}=U_m=\frac{1}{2}U_{pp}=5.1$

$f=\frac{1}{T}=0.974$ kHz

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 精11 姓名 韩盈舟 （同组姓名 _____ ）

作实验日期 年 月 日 教师评定

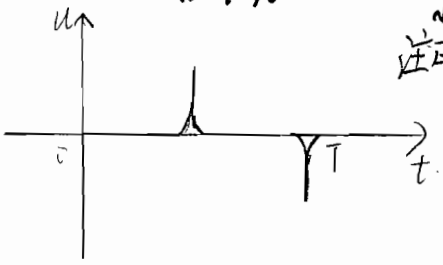


由图可知：$u=\begin{cases}\frac{4U_m}{T}t, & 0<t\le\frac{T}{4}\\ -\frac{4U_m}{T}t+2U_m, & \frac{T}{4}<t\le\frac{3}{4}T\\ \frac{4U_m}{T}t-4U_m, & \frac{3}{4}T<t\le T\end{cases}$ $U_m=\frac{1}{2}U_{PP}$

$\therefore \int_0^T u^2dt=\int_0^{\frac{T}{4}}\left(\frac{4U_m}{T}\right)^2t^2dt+\int_{\frac{T}{4}}^{\frac{3}{4}T}\left(-\frac{4U_m}{T}t+2U_m\right)^2dt+\int_{\frac{3}{4}T}^{T}\left(\frac{4U_m}{T}t-4U_m\right)^2dt$

$=\frac{1}{3}U_m^2T$

有效值 $U=\sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T u^2dt}=\frac{U_m}{\sqrt{3}}=1.033V$, $f=\frac{1}{T}=0.976kHz$



证明 $U_m=\frac{U_{PP}}{2}$

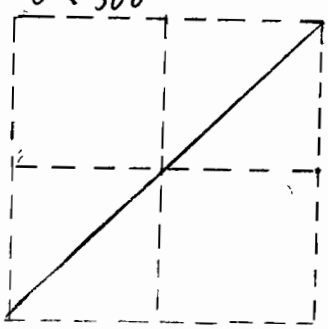
$f=\frac{1}{T}=0.975kHz$

2. 观测到的如图：

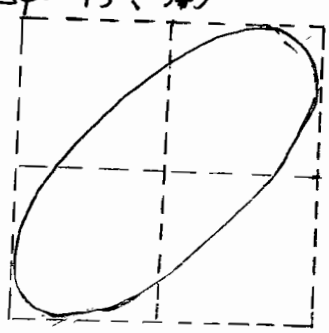
① $f_x=1000.00HZ$, $f_y=1000.00HZ$, $f_x:f_y=1:1$

幅度 A: 1.000 Vpp B: 1.000 Vpp

$\Delta\varphi=0°$、$360°$



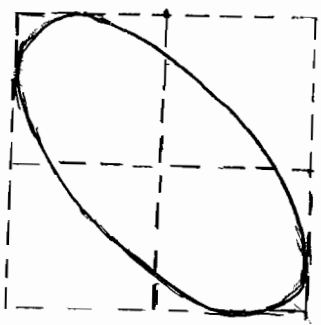
$\Delta\varphi=45°$、$315°$



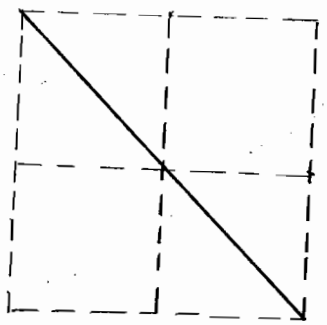
$\Delta\varphi=90°$、$270°$



$\Delta\varphi=135°$、$225°$



$\Delta\varphi=180°$

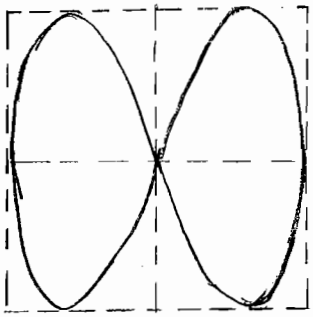


清 华 大 学 实 验 报 告

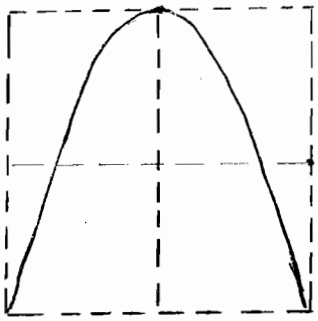
系别 _____ 班号 精11 姓名 钟盈舟 （同组姓名 _____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

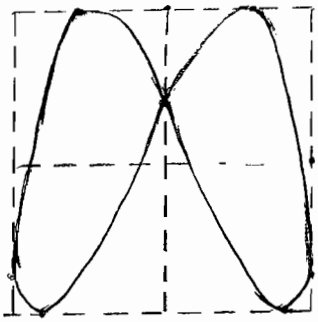
② $f_x = 1000.00\,Hz$, $f_y = 1999.97\,Hz$ $f_x : f_y = 1:2$



$\Delta\varphi = 0°、180°、360°$



$\Delta\varphi = 90°、270°$



$\Delta\varphi = 45°、135°、225°、315°$

3. 测声速： 超声波频率： 40259.94Hz

实验前： 室温 $t_1 = 23.5°C$ 相对湿度 $r_1 = 50.6\%$ 湿球温度：18.1°C

实验后： 室温 $t_2 = 24.6°C$ 相对湿度 $r_2 = 51.9\%$ 湿球温度：19.2°C

i	x_i/mm	x_{i+10}/mm	$\Delta_i = x_{i+10} - x_i$/mm
1	4.23	91.69	87.46
2	13.31	100.33	87.02
3	22.13	109.23	87.10
4	31.01	117.97	86.96
5	39.66	126.10	86.44
6	48.38	134.24	85.86
7	57.09	142.97	85.88
8	65.80	151.53	85.73
9	74.48	160.66	86.18
10	82.87	169.63	86.76

清华大学实验报告

系别 _____ 班号 精11 姓名 [illegible] （同组姓名 _____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

$\bar{l} = \frac{1}{10}\sum l_i = 86.539\ mm$, $S_l = 0.606345$

$\Delta_{l仪} = \sqrt{\Delta_{分仪}^2 + \Delta_{估计0仪}^2} = \sqrt{2}\,\Delta_{仪}$

∵ 数显游标卡尺示值误差限为 0.03mm ∴ $\Delta_{仪} = 0.03\ mm$

∴ $\Delta_l = \sqrt{S_l^2 + (\sqrt{2}\Delta_{仪})^2} = \sqrt{0.606345^2 + 2\times 0.03^2} = 0.607827\ mm$

∵ $l = 10\lambda$ ∴ $\lambda = \frac{1}{10}l = 8.6539\ mm$

$\Delta_\lambda = \frac{1}{10}\Delta_l = 0.061\ mm$

∴ 超声波波长： $\lambda = (8.65 \pm 0.06)\ mm$

$V = \lambda f = 8.65\times10^{-3}\times 40259.94 = 348.248\ m/s$

∵ $\frac{\partial \ln V}{\partial f} = \frac{1}{f}$, $\frac{\partial \ln V}{\partial \lambda} = \frac{1}{\lambda}$

∴ $\frac{\Delta_V}{V} = \sqrt{\left(\frac{\partial \ln V}{\partial f}\cdot\Delta_f\right)^2 + \left(\frac{\partial \ln V}{\partial \lambda}\Delta_\lambda\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{\Delta_f}{f}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_\lambda}{\lambda}\right)^2}$

∵ $\Delta_f = 10\ Hz$

∴ $\frac{\Delta_V}{V} = \sqrt{\left(\frac{10}{40259.94}\right)^2 + \left(\frac{0.06}{8.65}\right)^2} = 6.941\times10^{-3}$

∴ $\Delta_V = \frac{\Delta_V}{V}V = 6.941\times10^{-3}\times 348.248 = 2.42\ m/s$

∴ 声速的测量值为 $V = (348.2 \pm 2.4)\ m/s$

声速理论值： $t = \frac{t_1+t_2}{2} = \frac{23.5+24.6}{2} = 24.05\ ^\circ C$

$\gamma = \frac{\gamma_1+\gamma_2}{2} = \frac{50.6\%+51.9\%}{2} = 51.25\%$

查表可得 $t_1 = 24^\circ C$ 时，$P_{S_1} = 0.0298\times10^5\ Pa$, $t_2 = 25^\circ C$ 时，$P_{S_2} = 0.0317\times10^5\ Pa$

由线性内插法得： $t = 24.05^\circ C$ 时，

$P_S = P_{S_1} + \frac{P_{S_2}-P_{S_1}}{t_2-t_1}(t-t_1) = 10^5\left[0.0298 + \frac{0.0317-0.0298}{25-24}(24.05-24)\right]$

$= 0.029895\times10^5\ Pa$.

清华大学实验报告

系别 _____ 班号 精11 姓名 钟盈舟 （同组姓名 _____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

$\therefore V = 331.5\sqrt{(1+\frac{t}{T_0})(1+0.31\frac{rP_s}{P})} = 331.5\sqrt{(1+\frac{24.05}{273.15})(1+0.31\times\frac{0.5125\times0.29895\times10^{}}{1.013\times10^5}}$

$= 346.6\ m/s$

实验值与理论值的相对偏差：

$\alpha = \frac{348.2-346.6}{346.6}\times100\% = 0.46\%$

相对偏差较小，所以相位法测波长较精确。

二、思考题：

1. ① 亮度不够。调节 Intensity 旋钮

② 可能扫描线或光点超出屏幕范围，调节 X、Y 两个方向的 Position 钮

③ 可能是与信号发生器接触不良，应检查接线。

2. 先按 Source 键来选择正确的触发源，然后调节 X Trig Level 旋钮直至波形稳定。

3. f_y 比 f_x 大很多时，示波器上显示十分密集的波形，像一个高度为两倍峰峰值的条带。小很多时，波形为一条平缓的类似直线的曲线。

4. 在屏幕上看到信号的一部分波形，超出屏幕部分无法显示。

5. 频率差值越大，变化越快；差值越小，变化越慢。

6.(即书1) 逐差法可充分利用实验数据，可以减小测量的随机误差，且也可以减少测量仪器带来的误差。可用作图法或直线合法。~~$Y=Af$~~

7.(书2) 因为测 x_i 和 x_{i+10} 时均有仪器误差，所以 $\Delta_{仪}=\sqrt{(\Delta_{仪x_i})^2+(\Delta_{仪x}$

七、实验中的误差分析：

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 精11 姓名 ~~钟盈舟~~ （同组姓名 _____ ）

作实验日期 年 月 日 教师评定

1、用光标法和分度法时，由于视差，光标无法完全与波峰、波谷重合，且分度法中有读数误差。

2、肉眼难以精确判断共振，超声波频率测量有误差。

3、不易分辨到底如图形完全为直线，时不稳定，造成误差。

八、实验总结与感悟：

此次的实验仪器上按钮与旋钮实在是很多，刚开始虽然认真地听老师的讲解，但是仍然没有记住。导致一开始经常找不到正常的、稳定的波形。后来，经过耐心的调试，最终顺利完成，也熟悉了按钮。

之后的实验就比较顺利了，比以前的都要顺利。还得归功于老师讲得细致。

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定 94

实验名称：

塞曼效应实验

系别 精密仪器与机械学系

班级 精11

姓名 尚恩垚

学号 2011010494

时间 2013-04-01

组别 单双一晚E，3号

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

塞曼效应实验

一.实验目的

1. 学习观察塞曼效应的方法，用法布里-珀罗 F-P 标准具观测汞 546.1 nm 谱线的塞曼分裂；
2. 掌握塞曼分裂谱线裂距的测量方法，并比较理论值，反算某一励磁电流下磁感应强度 B 的大小。

二.实验原理

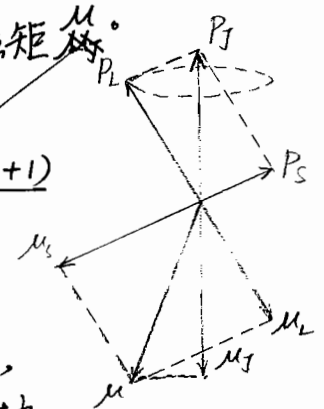
1. 原子总磁矩和总角动量的关系

严格地说，原子的总磁矩由电子磁矩和核磁矩两部分组成，但由于后者比前者小三个数量级以上，所以暂时只考虑电子磁矩

原子中电子具有的轨道角动量 P_L 和轨道磁矩 μ_L 以及自旋角动量 P_S 和自旋磁矩 μ_S，有下列关系

$$\mu_L=\frac{e}{2m}P_L,\quad P_L=\sqrt{L(L+1)}\cdot\frac{h}{2\pi},\quad \mu_S=\frac{e}{m}P_S,\quad P_S=\sqrt{S(S+1)}\frac{h}{2\pi}$$

如图，P_L P_S 合成总角动量 P_J，μ_L μ_S 合成总磁矩 μ。由于 $\frac{\mu_L}{\mu_S}\neq\frac{P_L}{P_S}$，所以 P_J 和 μ 不在同一直线上。



$$\mu_J=g\frac{e}{2m}P_J,\quad g=1+\frac{J(J+1)-L(L+1)+S(S+1)}{2J(J+1)}$$

2. 外磁场对原子能级的影响

原子总磁矩在外磁场中受到力矩 L 的作用，$L=\mu_J\times B$。力矩 L 使角动量发生旋进，引起附加能量为 $\Delta E=-\mu_J B\cos\alpha=g\frac{e}{2m}P_J B\cos\beta$。由于 μ_J 和 P_J 在磁场中取向是量子化的，P_J 的分量也只能是量子化的，即

$$P_J\cos\beta=M\frac{h}{2\pi},\quad M=J,J-1,\cdots,-J \text{ 共有 } 2J+1 \text{ 个值}$$

可得 $\Delta E=Mg\frac{eh}{4\pi m}B$

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

于是，这样无外磁场时的一个能级，在外磁场作用下分裂成 $(2J+1)$ 个子能级，每个能级附加的能量由上式决定。

3. 塞曼能级选择定则

对应于能级 E_2 和 E_1 之间的跃迁，光谱线的频率 ν 满足下式

$$\nu = \frac{1}{h}(E_2 - E_1)$$

分裂谱线的波数差

$$\Delta\tilde{\nu} = (M_2 g_2 - M_1 g_1)\frac{eB}{4\pi mc} = (M_2 g_2 - M_1 g_1)\tilde{L},\quad \tilde{L} = 0.467B$$

式中，$\tilde{L}$ 为洛伦兹单位，若 B 的单位用 T，则 $\tilde{L}$ 的单位为 cm^{-1}。

选择定则 $\Delta M = -1, 0, +1$

当 $\Delta M = 0$，垂直于磁场观察时产生线偏振光，振动方向平行于磁场，称为 π 线；平行于磁场观察时 π 成分不出现。

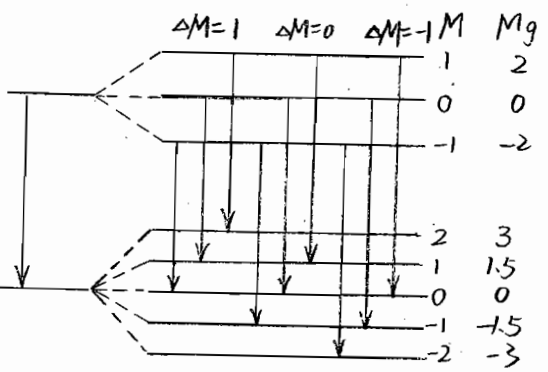
当 $\Delta M = \pm 1$，垂直于磁场观察时产生线偏振光，振动方向垂直于磁场称为 σ 线；平行于磁场观察时产生圆偏振光，圆偏振光的转向依赖于 ΔM 的正负号，磁场方向，以及观察者相对磁场的方向。

$\Delta M = 1$，偏振转向是沿磁场方向前进的螺旋转动方向，磁场指向观察者时，为左旋圆偏振光；$\Delta M = -1$，偏振转向是沿磁场方向倒退的螺旋转动方向，磁场指向观察者时，为右旋圆偏振光。

根据在辐射过程中，原子和发出的光子作为整体的角动量守恒原理，可以解释偏振光现象。

4. 分裂谱线的强度

波长 546.1 nm 的谱线是汞原子从 $\{6s7s\}^3S_1$ 到 $\{6s6p\}^3P_2$ 能级跃迁时产生的。如图，可见汞 546.1 nm 谱线在磁场中分裂成 9 条线（反常塞曼效应），相邻谱线裂距为 $\frac{L}{2}$。



Hg 的 546.1 nm 谱线的塞曼效应

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

5. 塞曼效应的测量公式

①用透镜把F-P标准具的干涉圆环成像在焦平面上，有 $\frac{D}{2}=f\tan\varphi$

F-P标准具产生干涉极大的条件为 $\Delta=2d\cos\varphi=k\lambda$

可得 $2d\left(1-\frac{D^2}{8f^2}\right)=k\lambda$

干涉级次k与D^2成线性关系，随着直径的增大，圆环将越来越密。

②对于同一波长相邻级次k和k-1圆环，有

$$\Delta D^2=D_{k-1}^2-D_k^2=\frac{4\lambda f^2}{d}$$

③对于同一级次，有微小波长差的不同波长λ_a λ_b，有

$$\Delta\lambda_{ab}=\frac{\lambda^2}{2d}\cdot\frac{D_b^2-D_a^2}{D_{k-1}^2-D_k^2}$$

即 $$\Delta\tilde{\nu}=\tilde{\nu}_b-\tilde{\nu}_a=\frac{\Delta D_{ab}^2}{2d\cdot\Delta D^2}$$

三. 实验仪器

笔型汞灯，电磁铁，聚光透镜，偏振片，546 nm滤光片，F-P标准具，凸透镜，成像物镜，测微目镜，漏磁变压器，导轨，稳压稳流电源

四. 实验步骤

调节光路：

1. 打开汞灯开关；把稳流稳压电源的电流调节旋钮反时针旋到头
2. 放下干涉滤光片，反复调节透镜的高度、位置、角度，使光源经透镜后的照明基本均匀（用白纸片观察）且亮度尽可能大；
3. 放上干涉滤光片，使汞灯光斑充满滤光片的孔径；
4. 调节导轨上各光学元件大致共轴；
5. 边观察望远镜中的像，边调整望远镜的方向、高度、位置，使同心的干涉圆环进入视野，圆心居中；沿导轨反复移动，使圆环最清晰为至；固定好各元件位置，避免发生移动；

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名 _____ ）

作实验日期 年 月 日 教师评定

观察图像：

6. 观察零场花样（不加磁场）；打开稳流稳压电源，并逐步增加电流至3.5A，观察此时的塞曼效应图象；

7. 装上偏振片，轻轻拧好固定螺钉；
转动偏振片，使产生3条π线和6条σ线的图像，记录相应的偏振片角度数；

测量：

8. 取下偏振片。调节 $I=3.50A$，选择9条谱线中的第3条和第7条（较明亮、清晰），测量记录 k-1 级第3、7 ~~谱线~~圆环和 k 级第7条圆环的位置，测量5组；

9. 分别测量电流为2.50，3.00，4.00A 时的1组数据；

注意事项

1. F-P标准具、干涉滤光片是精密光学元件，务必要保护好，严禁触摸光学面，切勿摔磕；

2. 磁铁电源开启前必须使电流调节旋钮反时针旋到头，实验结束前必须先使电流调到零之后再关断开关；

3. 笔型汞灯发出强紫外线，不要用眼睛直接观察；

4. 实验在暗室内进行，减小外部光线对汞灯的干扰；

5. 手轮要避免中途反转，注意消空程；

6. 光路调好后，要固定好元件，避免测量中移动；

7. 手表不要电磁铁太近。

五. 数据处理

偏振片的角度：3条 340° 345° 70° 75°

6条 245° 115°

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名 _____ ）

作实验日期 年 月 日 教师评定

I=3.50A		组1	组2	组3	组4	组5
左	k-1,7	1.138	1.456	2.425	1.505	0.720
	k-1,3	1.545	1.855	2.830	1.920	1.110
	k,7	2.230	2.565	3.515	2.590	1.699
右	k,7	6.200	6.535	7.550	6.508	5.889
	k-1,3	6.915	7.220	8.240	7.170	6.605
	k-1,7	7.305	7.620	8.655	7.550	6.960
计算	$D_{k,7}$/mm	3.970	3.970	4.035	3.918	4.190
	$D_{k-1,3}$/mm	5.370	5.365	5.410	5.250	5.495
	$D_{k-1,7}$/mm	6.167	6.164	6.230	6.045	6.240
	ΔD_{ab}^2/mm^2	9.1950	9.2117	9.5448	8.9795	8.7426
	ΔD^2/mm^2	22.2710	22.2340	22.5317	21.1913	21.3815
	$\Delta\tilde{\nu}$/mm^{-1}	0.1032	0.1036	0.1059	0.1059	0.1022
	L/mm^{-1}	0.05160	0.05179	0.05295	0.05297	0.05111
	B/T	1.105	1.109	1.134	1.134	1.094

$$\bar{B} = \frac{\sum_{i=1}^{5} B_i}{5} = 1.1151 \text{ (T)}$$

		I=2.50A	I=3.00A	I=4.00A
左	k-1,7	0.250	0.240	0.205
	k-1,3	0.575	0.585	0.590
	k,7	1.349	1.290	1.250
右	k,7	5.395	5.435	5.460
	k-1,3	6.138	6.140	6.141
	k-1,7	6.475	6.495	6.515
计算	$D_{k,7}$/mm	4.046	4.145	4.210
	$D_{k-1,3}$/mm	5.563	5.555	5.551

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

		I=2.50A	I=3.00A	I=4.00A
计算	$\Delta D_{ab}^2/mm^2$	7.8037	8.2670	9.0025
	$\Delta D^2/mm^2$	22.2710	21.9440	21.6920
	$\Delta\tilde{\nu}/mm^{-1}$	0.0876	0.0942	0.1038
	L/mm^{-1}	0.0438	0.0471	0.0519
	B/T	0.938	1.008	1.111

数据处理主要采用了两个公式：

$$\begin{cases} \Delta\tilde{\nu} = \dfrac{D_b^2 - D_a^2}{2d(D_{k-1}^2 - D_k^2)} & d = 2mm \\ \Delta\tilde{\nu} = (7-3)\dfrac{1}{2} = 2L \end{cases}$$

由 $D_{k,7}$ $D_{k-1,3}$ $D_{k-1,7}$ 算出 $\Delta\tilde{\nu}$，得到 L，把 L 的单位化为 cm^{-1} 后代入 $L = 0.467B$ 即得 B.

分析 B~I 关系：

由于电磁铁是软磁性材料，它的B与H的关系是非线性的，因为H与I成正比，所以B与I的关系是非线性的。

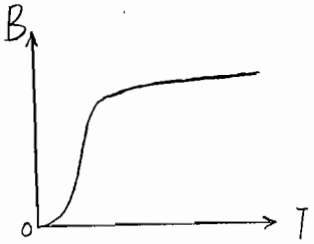
由于数据量少，只有4个点，B与I的关系曲线并不准确。

当I小于3.50A时，B没有达到饱和，B随着I的增加而增大；

当I达到3.50A时，B接近饱和，B的上升趋势逐渐变得平缓。

与硬磁性材料相比，软磁性材料磁滞回线瘦窄，剩磁与矫顽力都很小，B~I关系曲线与基本磁化曲线几乎重合。

根据电磁学知识，在理论上预测B~I完整的关系曲线为：



清华大学实验报告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

六. 误差分析

1. 调节光路时，难以判断此时的光路效果是否是最佳效果。仪器状态不确定，易受人为因素影响。建议反复调节，以讲义上的调节效果为依据，比较不同位置状态的效果，直至最佳；
2. 长期操作观察，易造成视觉疲劳，人为的读数误差大；
3. 数据处理中一步步计算，可能会造成误差积累传递。但这样做思路清晰，不易出错，可以将计算过程的中间数值多取几位；
4. 虽然电磁铁电源处于稳流状态，电磁铁为大电感，但实验前后电流会有变化。建议在每组数据测量前调节一次电流，并记录测量后的电流值，取平均；
5. 视场中圆环具有一定宽度，靠人眼判断测微目镜叉丝的交点是否在环的中间，难以找准。如果时间充裕，可以分别测量圆环的左边沿与右边沿取平均；
6. 估算在推导 $2d\left(1-\frac{D^2}{8f^2}\right)=k\lambda$ 的过程中，$\tan\varphi\approx\sin\varphi$ 造成的误差

实验数据中最大的圆环直径为 4.210mm

测量望远镜物镜的焦距 $f=150\,mm$

所以这项近似产生的最大相对误差为

$$\frac{\tan\varphi-\sin\varphi}{\tan\varphi}=1-\frac{\sin\varphi}{\tan\varphi}=1-\cos\varphi=1-\frac{f}{\sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2+f^2}}=0.0098\%$$

其对测量误差的贡献完全可以忽略不计。

七. 思考题

1. 实验中如何鉴别 π 成分和 σ 成分？如果可以沿磁场方向观测，请问应如何观察和区分 σ 成分中左旋和右旋圆偏振光？如何确定其与 $\Delta M=+1$ 或 $\Delta M=-1$ 的对应关系？

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名 _____ ）

作实验日期 年 月 日 教师评定

答：(1)鉴别π成分和σ成分：

转动偏振片，出现三条圆环的为π成分，出现六条圆环的为σ成分

(2)观察区分σ成分中左旋和右旋圆偏振光：

①从圆环消失方面

已知左旋光满足如下表达式 $Y=\cos(\omega t-\frac{\pi}{2})$

$X=\cos\omega t$

加上Y轴正方向的$\frac{1}{4}$波片，旋转偏振片，找出消光位置。与偏振片

透偏振方向垂直的方向就是出射线偏振光的振动方向，即

左旋光变为一三象限的线偏振光，右旋光变为二四象限的线偏

通过出射线偏振光的偏振方向，即可判断左旋、右旋。

②从圆环半径方面

$\Delta M=-1$ 时，分裂出的谱线能量降低，则波长增大。

由式 $2d\cos\theta=k\lambda$ 可知 λ 增大，$\cos\theta$ 越大，θ 越小，越

所以内侧三道圆环为右旋光，$\Delta M=-1$；

同理，$\Delta M=+1$ 时，对应的是外侧三条圆环，为左旋光。

(3)如何确定左、右旋圆偏振光与 $\Delta M=+1$，$\Delta M=-1$ 的对应关系：

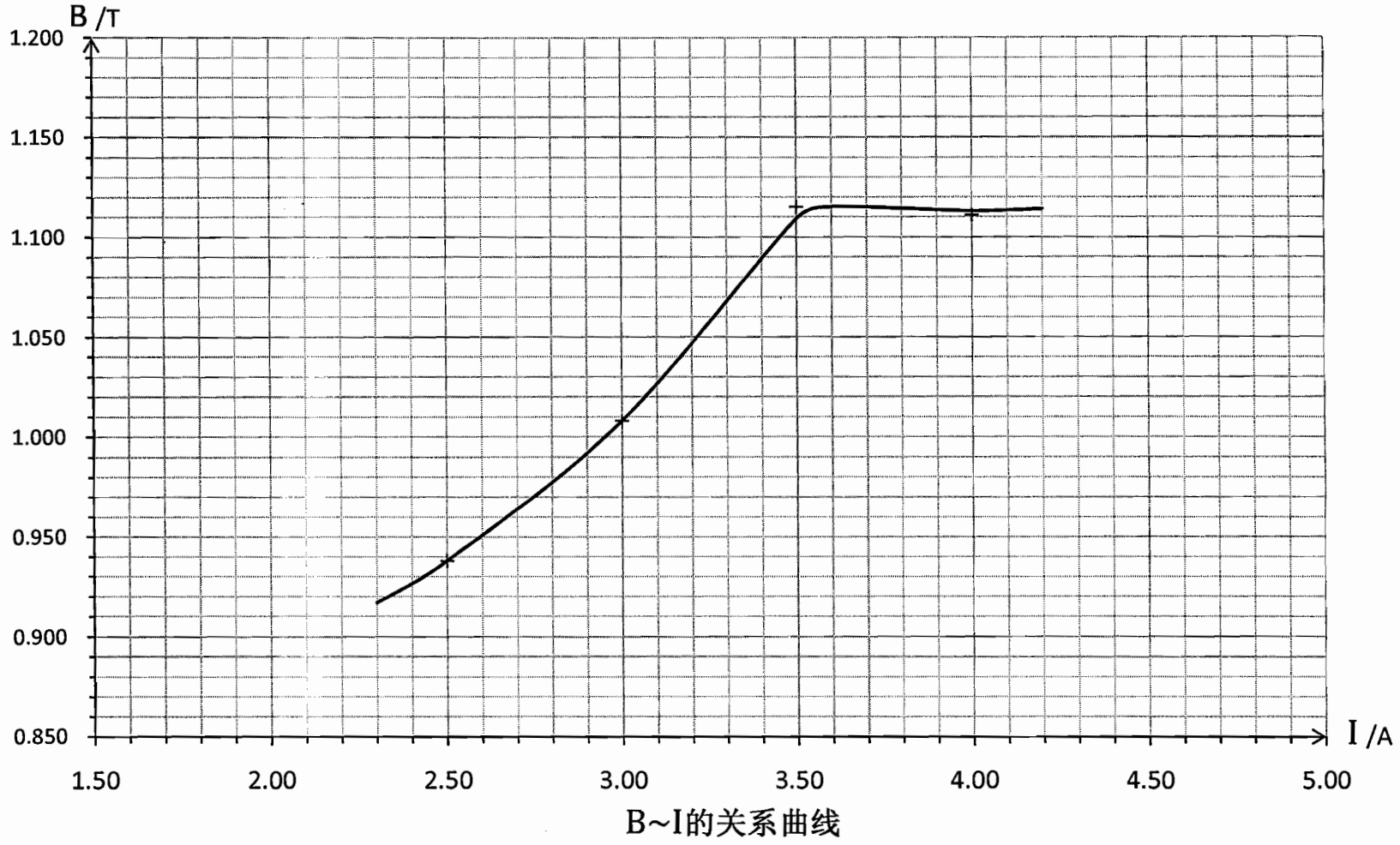
沿着磁场方向观测时，$\Delta M=+1$ 为左旋光，频率增加，

$\Delta M=-1$ 为右旋光，频率减小。

从角动量分析，按角动量守恒，在辐射过程中原子和发射的光子作为整体，总的角动量是守恒的。原子在磁场方向角动量 $(P_J)_z=M\hbar$

当 $\Delta M=+1$ 时，原子在磁场方向角动量减少 $\hbar$，因此光子在磁场方向角动量增加 $\hbar$。当 $\vec{B}$ 指向观察者时，电矢量逆时针转动，为左旋

当 $\Delta M=-1$ 时，原子在磁场方向角动量增加 $\hbar$，因此发射光子必定具有在磁场相反方向上 $\hbar$ 的角动量。当 $\vec{B}$ 指向观察者时，电矢量顺时针转动，为右旋光。


B /T
1.200
1.150
1.100
1.050
1.000
0.950
0.900
0.850
I /A
1.50
2.00
2.50
3.00
3.50
4.00
4.50
5.00

B~I的关系曲线

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

2. 如果将F-P标准具密封，并且使其中的气体压强缓慢增加，试预测干涉花样的变化及其规律

答：通常在温度处于15°C～30°C范围时，空气折射率n有

$$(n-1)_{t,p}=\frac{2.8793p}{1+0.003671t}\times10^{-9}$$

P增大，则n增大。

①当一束单色平行光以小角度φ射入F-P标准具后，相邻两光束的光程差 $\Delta=2nd\cos\varphi$，产生干涉极大的条件为 $2nd\cos\varphi=k\lambda$

对于级次k，n增大，则cosφ减小，φ增大，远离中心。

所以当p缓慢增加时，中心处圆环向外扩大，

干涉圆环从中心"冒"出。

②再考虑相邻两组环的间距

由 $2nd\cos\varphi=k\lambda$，两边微分，可得 $-2nd\sin\varphi\cdot\Delta\varphi=\Delta k\lambda$

令 $\Delta k=1$，可得相邻两环的角间距为 $\varphi_k-\varphi_{k+1}=-\Delta\varphi\approx\frac{\lambda}{2nd\sin\varphi}$

n增大，则 $\varphi_k-\varphi_{k+1}$ 减小，即等倾条纹的角间距变小，因而条纹变密，同一视场中看到的环数越来越多。

八、感想与体会

光学实验的重点在于光路的调节和对所需物理量的精确测量。塞曼效应实验的光路调节比较简单，物理量测量的重复性操作较多。

调节光路需要耐心细致，因为光路的好坏直接影响实验效果和数据的准确性。不过只要做好预习，提前熟悉操作、仪器，实验时一步步按照步骤要求踏踏实实地进行，就能较快地顺利完成实验。操作中我发现，当导轨沿平行于磁场方向移动或以靠近光源的一端旋转时，图象会发生明显的变化；只有在沿垂直于磁场方向时效果最佳。建议以后的同学注意，在调节光路时保持导轨

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

垂直于磁场方向，不要错动。

这次实验所测的物理量（圆环弦长）数据共有8组，重复性操作较多，这就要求我们有严谨认真的态度，不能急躁。在测I=2.50A时，由于我没有把圆环的圆心调到视野中央，结果在测第6个数据时发现手轮已经旋到头了，对应的圆环超出了测量范围，只好重测。

塞曼效应反算磁感应强度B，一个B值需要至少一组6个数据进行计算，不能通过数据一下子比较出磁场的强弱。如果只是定性地判断B与I的关系或实时观察B的变化，那么使用圆柱形探测线圈或特斯拉计会更直观简单。本实验只测出了四个电流下的B值，数据量少，不能充分体现B与I的关系，导致一些同学误以为是简单的线性关系。

关于圆环的选择，我建议选第2、8条。由讲义上“9条分裂谱线的强度随频率增加分别为12.5，37.5，75，75，100，75，75，37.5，12.5可知第2条与第3条的强度相差较大，所以第2条圆环较为明亮且易于区分。第8条也是同样的道理。当然第5条也是不错的选择。

对于望远镜、照相机、微机数据采集等观察方法，通过望远镜可以直观地观测实验现象，手动调节置于培养动手能力，但容易产生视觉疲劳使误差增大。使用照相机，成本较高，如果对曝光时间、焦距、光圈掌握不好，照片可能会不清晰。微机采集快捷准确，但成本高，实验难度低。毕竟，开设大物实验的目的是在实际操作中培养学生的创新思维、物理直觉和实验动手能力，而不是学习软件使用。从这个角度想，用望远镜观察对实验训练来说是最合适的。

感谢刘老师的悉心指导。

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

$I = 3.50\ A$

$D_{k,7}$	3.970	3.970	4.035	3.918	4.190
$D_{k-1,3}$	5.370	5.365	5.410	5.250	5.495
$D_{k-1,7}$	6.167	6.164	6.230	6.045	6.240
ΔD_{ab}^2	9.194989	9.211671	9.5448	8.979525	8.742575
ΔD^2	22.270989	22.233996	22.531675	21.191301	21.3815
$\Delta \bar{D}^2$	0.1032	0.10358	0.10590	0.105934	0.10222
L	0.0516	0.05179	0.05295	0.052967 ~~0.105934~~	0.05111
B	1.1049	1.10899	1.1338	1.134197	1.0944

	$I = 2.50A$	$I = 3.00A$	$I = 4.00A$
$D_{k,7}$	4.046	4.145	4.21
$D_{k-1,3}$	5.4563	5.555	5.551
$D_{k-1,7}$	6.225	6.255	6.31
ΔD_{ab}^2	7.803656	8.267	9.002499
ΔD^2	22.270989	21.944	21.692
$\Delta \bar{D}^2$	0.087599	0.0941829	0.1037537
L	0.04380	0.04709145	0.051877
B	0.9379	1.00838	1.11085

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

9

实验名称：

用单色仪测定介质的吸收曲线

系别：精密仪器与机械学系

班级：精11

姓名：尚恩垚

学号：2011010494

时间：2013-03-18

组别：双一晚E，3号

清 华 大 学 实 验 报 告

系别_____ 班号_____ 姓名_____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

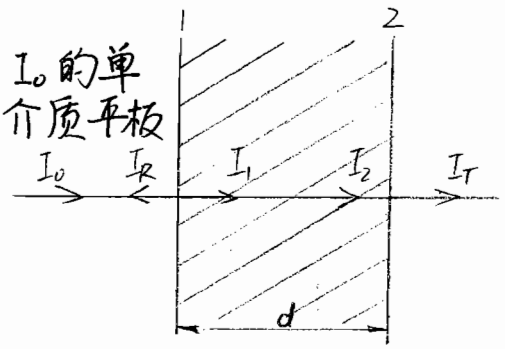
用单色仪测定介质的吸收曲线

一.实验目的

1. 学习掌握单色仪的构造原理和使用方法；
2. 学习了解介质光谱特性，掌握测量介质的吸收曲线或透射曲线的原理方法；
3. 了解光电池的工作原理及其应用.

二.实验原理

1. 一束波长为λ、入射光强为I_0的单色平行光垂直入射到厚度d的介质平板上。定义



光谱外透射率 $T=\frac{I_T}{I_0}$

光谱透射率 $T_i=\frac{I_2}{I_1}$

式中，I_T为从界面2出射的透射光强；

I_1为从界面1向介质内透射的光的光强；

I_2为入射到界面2的光的光强。

2. 介质内部（假定介质内部无散射），有

$$T_i=e^{-\alpha d}$$

式中，α为介质的线性吸收系数。

α不仅与介质有关，而且与入射光波长有关。

T_i与λ的关系曲线称为透射曲线；

α与λ的关系曲线称为吸收曲线.

3. 设光在单一界面上反射率为R，则透射光强I_T：

$$\begin{aligned}I_T &= I_{T1}+I_{T2}+I_{T3}+I_{T4}+\cdots\\ &= I_0(1-R)^2e^{-\alpha d}+I_0(1-R)^2R^2e^{-3\alpha d}+I_0(1-R)^2R^4e^{-5\alpha d}+\cdots\\ &= \frac{I_0(1-R)^2e^{-\alpha d}}{1-R^2e^{-2\alpha d}}\end{aligned}$$

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

所以 $T=\frac{I_T}{I_0}=\frac{(1-R)^2e^{-\alpha d}}{1-R^2e^{-2\alpha d}}$

4. 测量T_i,α

通过测量由同一材料（α相同），表面性质相同（R相同），但厚度不同的两块试样光谱外透射率后计算得。

设其厚度分别为d_1，d_2（$d_2>d_1$），光谱外透射率分别为T_1和T_2

$$\frac{T_2}{T_1}=\frac{e^{-\alpha d_2}(1-R^2e^{-2\alpha d_1})}{e^{-\alpha d_1}(1-R^2e^{-2\alpha d_2})}\approx e^{-\alpha(d_2-d_1)}$$ R和α很小。

故 $\alpha=\frac{\ln T_1-\ln T_2}{d_2-d_1}$

又因 $T_i=e^{-\alpha d}$

故 $T_i=\frac{T_2}{T_1}$

本实验中光电池和微电流放大器测光强，数字表直接显示光电流

则 $T_i=\frac{n_2}{n_1}$ $\alpha=\frac{\ln n_1-\ln n_2}{d_2-d_1}$

式中，n_1,n_2分别为厚度d_1,d_2的试样时数字表示值。

三. 实验仪器

1. WDM1型光栅单色仪

1）入射准直系统：

狭缝S_1，球面反射镜M_1

（产生平行光束）

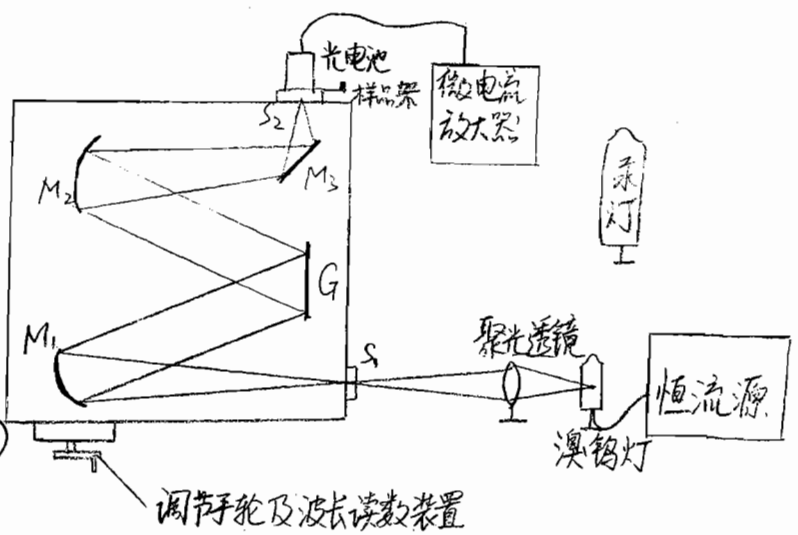
2）色散元件：

反射光栅G

（产生各种波长的单色光）

3）出射聚光系统：

球面反射镜M_2，平面反射镜M_3，出射狭缝S_2



2. 汞灯 GP20Hg

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

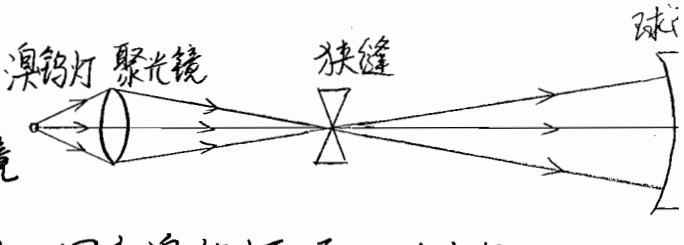
3. 溴钨灯及其电源
4. 聚光透镜
5. 装有薄、厚玻璃的插片（$d_1 = 3.8\,mm$, $d_2 = 0.8\,mm$）

四、实验步骤

1. 校准单色仪波长示值
   ①调节波长鼓轮，使读数在577.0～579.1 nm之间；
   ②把汞灯放在入射狭缝前，用显微镜观察黄色谱线；
   ③调节入射狭缝宽度，使两条黄色谱线分开且最细；
   ④转动手轮，使绿色谱线进入视野；
   ⑤调节出射狭缝，同时微旋手轮，使谱线始终在缝中间，并逐渐减小狭缝宽度，直至恰好夹住该谱线；
   ⑥重复上步，共校准（435.8，546.1，577.0，579.1 nm）谱线，记录示值，并与标准值比较。

2. 调节狭缝宽度
   ①调节波长鼓轮，使读数在577.0～579.1 nm之间；
   ②微调波长鼓轮，使两条黄色谱线大致位于视野中间；
   ③调节入射狭缝，使两条谱线刚好分开；
   ④调节出射狭缝，同时微旋手轮，使其中一条谱线始终在缝中间，并逐渐减小狭缝宽度，直至恰好夹住该谱线。

3. 溴钨灯的光路调节
   ①移动聚光镜距狭缝约18cm，溴钨灯距聚光镜约9cm；



   ②打开电源，缓慢增加电流，调亮溴钨灯，至1.5A左右；
   ③调节波长手轮，使读数为（610.0 nm + 偏差）；
   ④适当调节溴钨灯、聚光镜的高度，移动溴钨灯和聚光镜，使聚焦于狭缝且圆斑大致落在狭缝中间，大小合适，亮度最

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

4. 测量钕玻璃的吸收曲线

①插上试样，使厚玻璃挡住狭缝；

②装上探测器，打开微电流放大器，微动溴钨灯，使微电流放大器的示值最大；

③调节溴钨灯电源的电流，使示值略大于1.700，不超过1.900；

④先定性观察钕玻璃对不同波长的吸收情况，确定吸收峰的大致波长；

⑤波长由大到小，从（610.0+偏差）到（508.0+偏差），每隔1 nm记录一次放大器示值，在吸收峰附近每0.5nm记录一次；

⑥换为薄玻璃，在与厚玻璃片相应的波长进行测量。

注意事项：

①打开溴钨灯电源前，旋转旋钮使电流为0；
调亮溴钨灯要缓慢增加电流，且所加电流不应超过2.5A；

②实验结束后再关闭汞灯，以延长其寿命；

③S_1，S_2宽度不超过3mm，也不完全闭合，防止损坏狭缝；

④波长从大到小调，避免从小到大调时可能出现的电流过大情况。

五 数据处理

1. 波长示值的校准

标准值/Å	4358	5461	5770	5791
测量值/Å	4373	5475	5784	5805
偏差/Å	15	14	14	14

故偏差约为1.4 nm，偏差间的差值≤0.2 nm。
测量的波长应减去1.4 nm作为修正。

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

2. 测量钕玻璃在508.0～610.0 nm范围内的吸收曲线.

λ 为波长，n_1 为 $d_1 = 3.8$ mm 玻璃对应的示值，

n_2 为 $d_2 = 0.8$ mm 玻璃对应的示值，

由 $\alpha = \frac{\ln n_1 - \ln n_2}{d_2 - d_1}$ 可求得 α，并作出相应的吸收曲线。

波长λ/nm	修正波长/nm	厚玻璃 n_1	薄玻璃 n_2	$\ln(\frac{n_1}{n_2})$	吸收系数α/mm^{-1}
611.4	610.0	1.746	1.999	0.13532	0.0451
610.4	609.0	1.766	1.990	0.11942	0.0398
609.4	608.0	1.786	1.982	0.10413	0.0347
607.9	606.5	1.786	1.967	0.09653	0.0322
606.9	605.5	1.775	1.953	0.09557	0.0319
605.8	604.4	1.745	1.935	0.10335	0.0345
604.9	603.5	1.715	1.914	0.10978	0.0366
603.5	602.1	1.648	1.885	0.13437	0.0448
602.9	601.5	1.623	1.867	0.14006	0.0467
601.6	600.2	1.564	1.840	0.16252	0.0542
600.9	599.5	1.538	1.825	0.17110	0.0570
599.4	598.0	1.474	1.793	0.19591	0.0653
598.6	597.2	1.412	1.763	0.22201	0.0740
597.5	596.1	1.294	1.719	0.28400	0.0947
595.8	594.4	1.107	1.650	0.39912	0.1330
594.9	593.5	1.045	1.616	0.43594	0.1453
594.0	592.6	1.019	1.600	0.45118	0.1504
592.9	591.5	1.022	1.593	0.44386	0.1480
591.8	590.4	1.015	1.573	0.43810	0.1460
590.9	589.5	0.965	1.550	0.47388	0.1580
589.8	588.4	0.859	1.500	0.55745	0.1858

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

（续表）

波长λ/nm	修正波长/nm	厚玻璃n_1	薄玻璃n_2	$\ln(\frac{n_1}{n_2})$	吸收系数α/mm^{-1}
588.4	587.0	0.682	1.415	0.72986	0.2433
587.7	586.3	0.624	1.381	0.79441	0.2648
586.7	585.3	0.595	1.358	0.82521	0.2751
586.3	584.9	0.606	1.359	0.80762	0.2692
585.8	584.4	0.634	1.370	0.77052	0.2568
585.3	583.9	0.686	1.385	0.70258	0.2342
585.0	583.6	0.718	1.396	0.66490	0.2216
584.5	583.1	0.783	1.418	0.59387	0.1980
584.0	582.6	0.847	1.440	0.53070	0.1769
583.5	582.1	0.916	1.460	0.46618	0.1554
582.5	581.1	1.004	1.486	0.39210	0.1307
582.0	580.6	1.021	1.486	0.37531	0.1251
581.4	580.0	1.015	1.479	0.37648	0.1255
581.0	579.6	0.992	1.461	0.38715	0.1291
580.5	579.1	0.954	1.447	0.41658	0.1389
580.0	578.6	0.914	1.432	0.44900	0.1497
579.0	577.6	0.825	1.389	0.52096	0.1737
578.0	576.6	0.753	1.352	0.58528	0.1951
577.0	575.6	0.675	1.321	0.67143	0.2238
576.0	574.6	0.617	1.280	0.72975	0.2432
575.0	573.6	0.541	1.227	0.81891	0.2730
574.0	572.6	0.471	1.182	0.92011	0.3067
573.0	571.6	0.459	1.165	0.93143	0.3105
572.5	571.1	0.493	1.176	0.86936	0.2898
572.0	570.6	0.558	1.194	0.76071	0.2536
571.5	570.1	0.636	1.227	0.65713	0.2190

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

（续表）

波长λ/nm	修正波长/nm	厚玻璃n_1	薄玻璃n_2	$\ln(\frac{n_1}{n_2})$	吸收系数α/mm^{-1}
571.0	569.6	0.733	1.270	0.54963	0.1832
570.5	569.1	0.843	1.308	0.43929	0.1464
570.0	568.6	0.945	1.339	0.34849	0.1162
569.5	568.1	1.037	1.376	0.28285	0.0943
569.0	567.6	1.118	1.395	0.22135	0.0738
568.5	567.1	1.178	1.410	0.17977	0.0599
568.0	566.6	1.222	1.416	0.14735	0.0491
567.5	566.1	1.253	1.418	0.12371	0.0412
567.0	565.6	1.274	1.421	0.10920	0.0364
566.5	565.1	1.283	1.420	0.10146	0.0338
566.0	564.6	1.290	1.417	0.09390	0.0313
565.5	564.1	1.297	1.413	0.08566	0.0286
565.0	563.6	1.301	1.407	0.07833	0.0261
564.5	563.1	1.303	1.404	0.07466	0.0249
563.9	562.5	1.303	1.398	0.07037	0.0235
563.5	562.1	1.302	1.392	0.06684	0.0223
563.0	561.6	1.299	1.387	0.06555	0.0218
562.5	561.1	1.296	1.380	0.06280	0.0209
561.9	560.5	1.293	1.373	0.06003	0.0200
561.0	559.6	1.284	1.364	0.06044	0.0201
560.0	558.6	1.277	1.352	0.05707	0.0190
559.0	557.6	1.266	1.336	0.05382	0.0179
558.0	556.6	1.255	1.327	0.05579	0.0186
557.0	555.6	1.245	1.312	0.05242	0.0175
556.0	554.6	1.232	1.300	0.05373	0.0179
555.0	553.6	1.221	1.289	0.05420	0.0181

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

（续表）

波长λ/nm	修正波长/nm	厚玻璃 n_1	薄玻璃 n_2	$\ln\frac{n_1}{n_2}$	吸收系数α/mm⁻¹
554.0	552.6	1.205	1.275	0.05647	0.0188
553.0	551.6	1.193	1.259	0.05385	0.0179
552.0	550.6	1.179	1.244	0.05367	0.0179
550.9	549.5	1.166	1.228	0.05181	0.0173
550.0	548.6	1.156	1.217	0.05142	0.0171
549.0	547.6	1.145	1.202	0.04858	0.0162
548.0	546.6	1.131	1.190	0.05085	0.0170
547.0	545.6	1.116	1.176	0.05237	0.0175
546.0	544.6	1.096	1.164	0.06020	0.0201
545.0	543.6	1.080	1.144	0.05757	0.0192
544.0	542.6	1.062	1.129	0.06118	0.0204
543.0	541.6	1.040	1.112	0.06694	0.0223
542.0	540.6	1.015	1.098	0.07860	0.0262
541.0	539.6	0.983	1.080	0.09411	0.0314
540.0	538.6	0.957	1.064	0.10599	0.0353
539.0	537.6	0.925	1.046	0.12293	0.0410
538.0	536.6	0.884	1.028	0.15091	0.0503
537.0	535.6	0.845	1.005	0.17341	0.0578
536.0	534.6	0.810	0.989	0.19966	0.0666
535.0	533.6	0.793	0.974	0.20559	0.0685
534.0	532.6	0.785	0.962	0.20333	0.0678
532.9	531.5	0.785	0.952	0.19288	0.0643
531.9	530.5	0.785	0.939	0.17913	0.0597
531.0	529.6	0.782	0.931	0.17440	0.0581
530.0	528.6	0.779	0.925	0.17178	0.0573
529.0	527.6	0.777	0.916	0.16458	0.0549

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

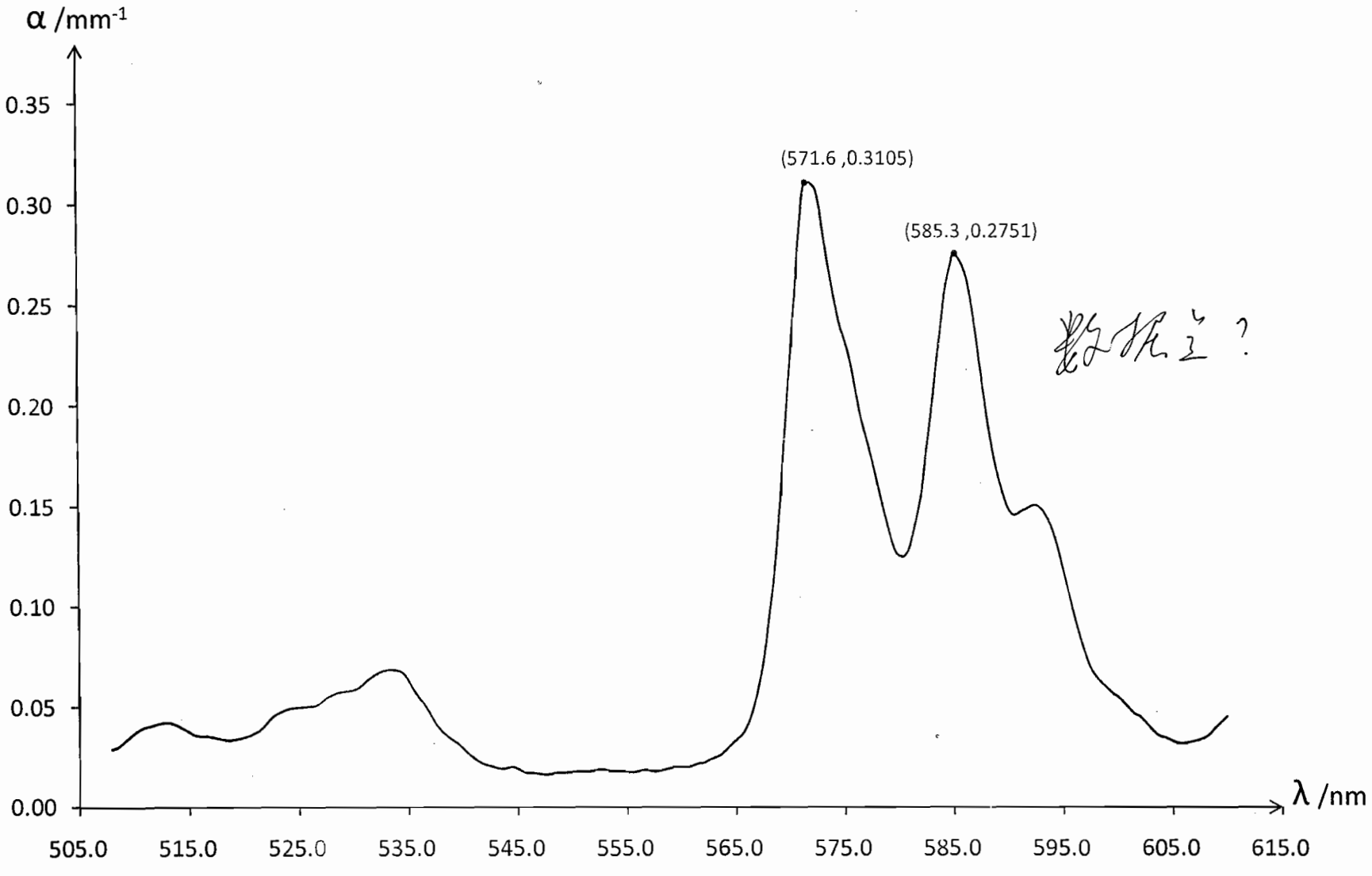
（续表）

波长λ/nm	修正波长/nm	厚玻璃 n_1	薄玻璃 n_2	$\ln(\frac{n_1}{n_2})$	吸收系数α/mm⁻¹
528.0	526.6	0.776	0.904	0.15268	0.0509
527.0	525.6	0.771	0.896	0.15025	0.0501
525.9	524.5	0.761	0.883	0.14869	0.0496
525.0	523.6	0.759	0.877	0.14451	0.0482
524.0	522.6	0.760	0.870	0.13517	0.0451
523.0	521.6	0.763	0.858	0.11735	0.0391
522.0	520.6	0.763	0.850	0.10798	0.0360
521.0	519.6	0.757	0.839	0.10285	0.0343
520.0	518.6	0.749	0.828	0.10027	0.0334
519.0	517.6	0.736	0.816	0.10318	0.0344
518.0	516.6	0.722	0.803	0.10633	0.0354
517.0	515.6	0.705	0.785	0.10749	0.0358
516.0	514.6	0.688	0.773	0.11649	0.0388
514.8	513.4	0.672	0.762	0.12569	0.0419
514.0	512.6	0.662	0.751	0.12614	0.0420
513.0	511.6	0.656	0.741	0.12184	0.0406
512.0	510.6	0.655	0.736	0.11659	0.0389
511.0	509.6	0.654	0.726	0.10444	0.0348
510.0	508.6	0.653	0.715	0.09071	0.0302
509.4	508.0	0.652	0.711	0.08663	0.0289

通过实验数据及吸收曲线，我们可以比较明显地发现钕玻璃的两个吸收峰，分别是

$\lambda_1 = 571.6$ nm $\quad \alpha_1 = 0.3105$

$\lambda_2 = 585.3$ nm $\quad \alpha_2 = 0.2751$



钕玻璃508.0~610.0nm的吸收曲线

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

六、误差分析：

①玻璃表面不洁净，可能影响其光学特性；

②测厚、薄玻璃在同一波长位置的n值时，由于手轮连续转动，两次的波长不完全相同。易出现转至两个相邻示值之间的情况。

③玻璃片可能不垂直于光路。本实验使用玻璃插片，玻璃位置固定，只能通过调整聚光镜和溴钨灯达到共轴的目的。

④电子仪表总存在温度漂移的问题，但影响应该不大。

七、思考题

1. 为什么要进行光源系数与单色仪光学系统的共轴调节？

答：为了获得较强的光强，便于使光源成象在狭缝上；

使透镜与光缝之间的距离应使其相对孔径与仪器的相对孔径相等，这样才可获得最佳照明。

2. 校准单色仪波长示值为什么要用汞灯，而测量吸收曲线为什么要用溴钨灯？

答：校对单色仪波长示值时应当采用有确定辐射可见谱线的光源，汞灯在可见光谱内有确定的407.7nm，435.8nm，546.1nm和577.0579.0nm的可见谱线。因此使用汞灯可以帮助实验者确定偏差。

溴钨灯光效高、寿命长、光色更好，具有很高的输出稳定性，光谱覆盖范围宽，背反射镜设计结构，可以提高50%以上的光使用效率，全谱范围内光谱连续且平滑。

3. 试讨论单色仪的入射狭缝和出射狭缝宽度对出射光单色性的影

答：狭缝的宽度越小则出射光线单色性越好，但是宽度过小也存在着导致光线亮度不够使观察困难的问题。因此要出射狭缝宽度要求恰好可以观察到谱线。

一般单色入射准直系统与出射准直系统的相对孔径是一样的，即在在出射狭缝平面上所成的象的大小等于入射狭缝的大小，放大

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

率1:1。此时，出射光缝宽度应与入射狭缝宽度相等，才能使出射光束相对地有最大的光强及最好的单色性。

八.感想与体会

这次实验的重点在于光学元件的准确校准和对所需物理量的精确测量。

对单色仪的标准和对狭缝宽度的调整需要耐心细致。不过只要一步步严格按照步骤要求进行，就能顺利完成实验。光学元件的调整复杂细致需要做好预习，提前熟悉操作。这也许正是光学实验精的难点和魅力所在。

所测物理量(吸收系数)数据有一百多组，重复性操作较多。这就要求我们有严谨认真的态度，不能焦躁。一开始，我总是控制不好手轮的转速，但随着操作次数的增多，便渐渐掌握了把波长转到相应波长的技巧。

我发现实验过程与课本有一些出入，如选取波长为546.1 nm的绿色谱线（绿色对人眼刺激相对强烈）而不是教材上讲的黄色谱线来调节狭缝宽度；使用装有玻璃的插片，而不是四块散玻璃。

这就要求我们不能墨守成规，领悟实验方法的关键，而不是细枝末节。在实际操作中，有意识地培养创新思维，物理直觉和动手能力。

感谢赵老师的悉心指导。

清华大学实验报告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 3号 教师评定 J24 2013.3.18

校准

标准值Å	4358	5461	5770	5791
测量值Å	4373	5475	5784	5805
偏差Å	15	14	14	14

$d_1 = 3.8$

$d_2 = 0.8$

二. n_1厚 n_2薄

入	n_1	n_2	入	n_1	n_2	入	n_1	n_2
6114	1.746	1.999	5909	0.965	1.550	5780	0.753	1.35
6104	1.766	1.990	5898	0.859	1.508	5770	0.675	1.32
6094	1.786	1.982	5884	0.682	1.415	5760	0.617	1.28
6079	1.786	1.967	5877	0.624	1.381	5750	0.541	1.22
6069	1.775	1.953	5867	0.595	1.358	5740	0.471	1.18
6058	1.745	1.935	5863	0.606	1.359	5730	0.459	1.16
6049	1.715	1.914	5858	0.634	1.370	5725	0.493	1.17
6035	1.648	1.885	5853	0.686	1.385	5720	0.558	1.19
6028	1.623	1.867	5850	0.718	1.396	5715	0.636	1.22
6016	1.564	1.840	5845	0.783	1.418	5710	0.733	1.27
6009	1.538	1.825	5840	0.847	1.440	5705	0.843	1.30
5994	1.474	1.793	5835	0.916	1.460	5700	0.945	1.33
5986	1.412	1.763	5825	1.004	1.486	5695	1.037	1.37
5975	1.294	1.719	5820	1.021	1.486	5690	1.118	1.39
5958	1.107	1.650	5814	1.015	1.479	5685	1.178	1.41
5949	1.045	1.616	5810	0.992	1.461	5680	1.222	1.41
5940	1.019	1.600	5805	0.954	1.447	5675	1.253	1.43
5929	1.022	1.593	5800	0.914	1.432	5670	1.274	1.42
5918	1.015	1.573	5790	0.825	1.389	5665	1.283	1.42

清华大学实验报告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 3号 教师评定

λ	n_1	n_2	λ	n_1	n_2	λ	n_1	n_2
5660	1.290	1.417	5470	1.116	1.178	5250	0.759	0.877
5655	1.297	1.413	5460	1.096	1.164	5240	0.760	0.870
5650	1.301	1.407	5450	1.080	1.144	5230	0.763	0.858
5645	1.303	1.404	5440	1.062	1.129	5220	0.763	0.850
5639	1.303	1.398	5430	1.040	1.112	5210	0.757	0.839
5635	1.302	1.392	5420	1.015	1.098	5200	0.749	0.828
5630	1.299	1.387	5410	0.983	1.080	5190	0.736	0.816
5625	1.296	1.380	5400	0.957	1.064	5180	0.722	0.803
5619	1.293	1.373	5390	0.925	1.046	5170	0.705	0.785
5610	1.284	1.364	5380	0.884	1.028	5160	0.688	0.773
5600	1.278	1.352	5370	0.845	1.005	5148	0.672	0.762
5590	1.266	1.336	5360	0.810	0.989	5140	0.662	0.751
5580	1.255	1.327	5350	0.793	0.974	5130	0.656	0.741
5570	1.245	1.312	5340	0.785	0.962	5120	0.655	0.736
5560	1.232	1.300	5329	0.785	0.952	5110	0.654	0.726
5550	1.221	1.289	5319	0.785	0.939	5100	0.653	0.715
5540	1.205	1.275	5310	0.782	0.931	5094	0.652	0.711
5530	1.193	1.259	5300	0.779	0.925			
5520	1.179	1.244	5290	0.777	0.916			
5509	1.166	1.228	5280	0.776	0.904			
5500	1.156	1.217	5270	0.771	0.896			
5490	1.145	1.202	5259	0.761	0.883			
5480	1.131	1.190						

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 精仪11 班号 11 姓名 耿涛 （同组姓名 ）

作实验日期 年 月 日 教师评定

原始数据

初始室温 $t_1 =$ 16.5°C, $H_1 =$ 1.0043×10^5Pa $\bar{T} =$ 17.15°C

实验后 $t_2 =$ 17.8°C, $H_2 =$ 1.0052×10^5Pa $\bar{H} =$ 1.0047×10^5Pa

$\delta H = -(18.2-1.9)\times10^{-5}\bar{H}\cdot\bar{T} =$ ~~-28.08Pa~~ -280.8Pa

$\therefore P_c = H + \delta H =$ ~~1.00447Pa×10⁵Pa~~ 1.00195×10^5Pa

$t_b =$ ~~$99.74 + \frac{(99.78-99.74)\times(1.0044-1.0039)}{1.0052-1.0039} = 99.758°C$~~ $= 99.67 + \frac{(99.70-99.67)\times(1.0047-1.0012)}{1.0026-1.0012} = 99.686°C$

定标：

$U_m =$ 40.83 mV, $U_0 =$ 0.09 mV

室温下：

$U_t =$ 99.32mV, $t =$ 16.5°C $U_p =$ 0.00mV

序号	1	2	3	4	5	6	7	8
U_t/mV	103.04	106.59	110.00	113.42	116.82	120.26	123.70	
U_p/mV	1.38	2.55	3.74	4.93	3.96	7.14	8.34	

水沸腾时 $U_t =$ 133.26mV $U_p =$ 11.13mV

线性拟合结果 $r = 0.99985$

$p = a+bt = 0.9546178 + 0.003346t$ （单位为0.1MPa）

$\therefore \alpha_p = \frac{b}{a} = 3.505\times10^{-3}K^{-1}$

而 $\delta\alpha_p = (0.018+\frac{5V}{V})\times10^{-3}K^{-1} = 0.118\times10^{-3}K^{-1}$

$\therefore \alpha_p$(校正) $= \alpha_p + \delta\alpha_p = 3.623\times10^{-3}K^{-1}$

王耿涛 丁 7月12.17

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 精仪 班号 11 姓名 耿强 （同组姓名 ）

作实验日期 2012 年 11月 19日 教师评定

9-

直流电桥测电阻

精仪系 11班
耿 强
2011010492

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名 _____ ）

作实验日期 年 月 日 教师评定

一. 实验目的

(1) 了解单电桥测电阻的原理，初步掌握直流单电桥的使用法；

(2) 单电桥测量铜丝的电阻温度系数，学习用作图法和直线拟合处理数据；

(3) 了解双电桥测量低电阻的原理，初步掌握双电桥的使用方法。

二. 实验原理

1. 惠斯通电桥测电阻

惠斯通电桥（单电桥）是常用的直流电桥，如图3.3.1所示，若调节R使检计中电流为零，桥两端的B点和D点电位相等，电桥达到平衡，这时可得

$$I_1R_1 = I_2R_2 \quad , \quad I_1R = I_2R_X$$

两式相除得

$$R_X = \frac{R_2}{R_1} \cdot R$$

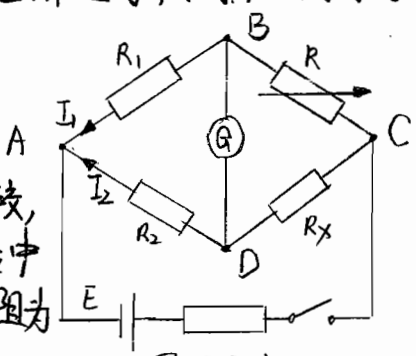


图 3.3.1

这一过程相当于把R_X和标准电阻相比较，因而测量的准确度较高。单电桥的实际线路中将R_2和R_1的做成比值为C的比率臂，则被测电阻为

$$R_X = CR$$

其中$C = R_2/R_1$，共为7个档，0.001～1000，R为测量臂，由4个十进位的电阻组成。

2. 铜丝电阻系数

$$R_t = R_0(1 + \alpha_R t)$$

其中R_t为t°C时铜丝电阻，R_0为0°C时电阻值，α_R为电阻温度系数。

$$\alpha_R = \frac{R_t - R_0}{R_0 t}$$

可制成电阻温度计来测温，铜电阻温度计在-50°C～100°C范围内因线性好，应用也较广泛。

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名 _____ ）

作实验日期 年 月 日 教师评定

3. 非平衡电桥

通过测量两端的电压 U_t 来确定电阻

$$U_t = E\left(\frac{R_1}{R_1+R_2} - \frac{R}{R+R_t}\right)$$

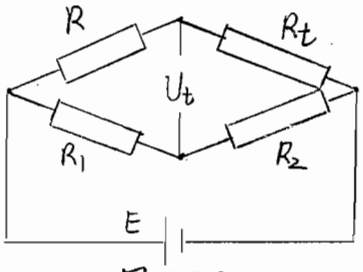


图 3.3.2

4. 互易桥

当阻值配比不合理时可改惠斯通电桥，将电压源 E 和检流计 G 互易位就改成了互易了的非平衡桥，用它测量 U_t 误差就会减小。

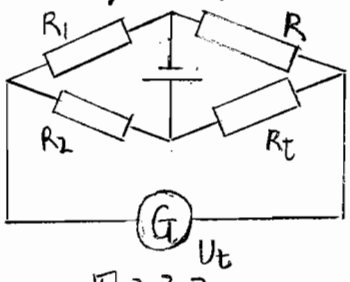


图 3.3.3

5. 线性化设计

欲组装一个温度范围在 0°C - 100°C 的铜电阻数字温度计，必须将 $U_t \sim t$ 的关系线性化，当采用量程为 19.999mV 的 4½ 数字电压表来显示温度值，要求显示值：

$$U_t = \frac{1}{10}t \quad (mV)$$

当温度 $t=0°C$，$U_0 = 0mV$，此时互易桥为平衡桥，有

$$\frac{R_2}{R_1} = C, \quad \frac{R_0}{R} = C$$

由于 $R_t = R_0(1+\alpha t)$，故 $U_t = E\left(\frac{R_1}{R_1+R_2} - \frac{R}{R+R_t}\right)$ 可改写为

$$U_t = E\left(\frac{1}{1+C} - \frac{1}{1+C(1+\alpha t)}\right)$$

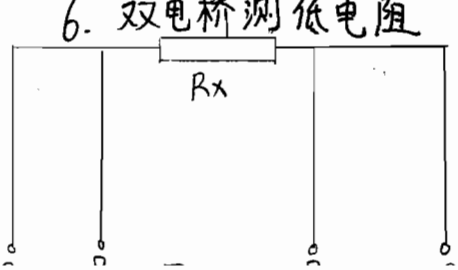
考虑到 $C=0.01 \ll 1$，$\alpha \sim 10^{-3}/°C$

$$\Rightarrow U_t = \frac{EC\alpha}{(1+C)^2}t + \Delta U$$

其中 ΔU 为非线性误差项，忽略 ΔU 后可得

$$E = \frac{(1+C)^2}{10C\alpha}$$

6. 双电桥测低电阻



其中被测电阻采用四端接法，C_1C_2 为电流端电源回路，P_1P_2 为电压端，接高电阻回路或电流的补偿回路。

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名 _____ ）

作实验日期 年 月 日 教师评定

如图3.3.5所示的双电桥中增设了两个臂 R_1' 和 R_2'，其阻值较高，流过检流计G的电流为零时，可得到

$$\begin{cases} I_3 R_x + I_2 R_2' = I_1 R_2 \\ I_3 R + I_2 R_1' = I_1 R_1 \\ I_2 (R_2' + R_1') = (I_3 - I_2) r \end{cases}$$

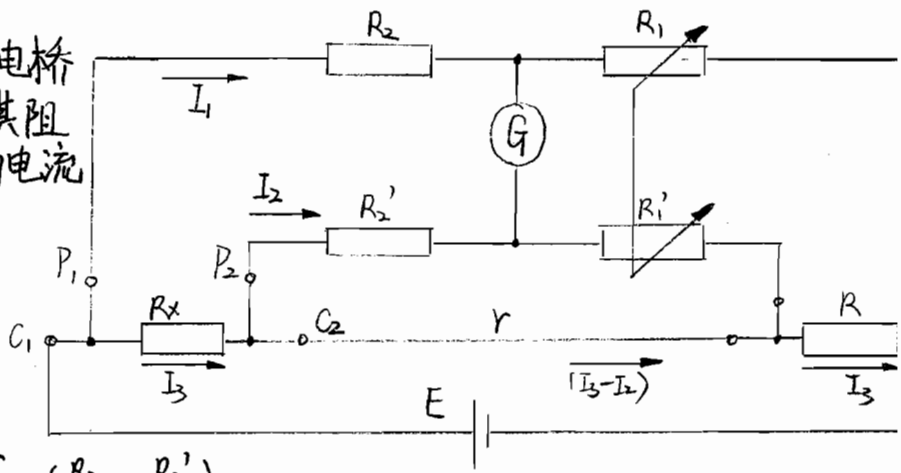


图 3.3.5

解得 $R_x = \frac{R_2}{R_1} \cdot R + \frac{R_1' r}{R_1' + R_2' + r} \left(\frac{R_2}{R_1} - \frac{R_2'}{R_1'} \right)$

由于 $\frac{R_2}{R_1} \approx \frac{R_2'}{R_1'}$，且 r 尽可能的小，于是可得

$$R_x = \frac{R_2}{R_1} \cdot R = CR$$

三. 实验仪器

1. QJ-23型携带式单电桥

B是电源按钮开关，实验中不要将此开关按下锁住，以避免电流热效应引起的阻值改变。G是检流计开关，一般宜跃按，以避免非瞬时过载而引起损坏。

2. 测铜丝电阻温度系数实验装置

待测铜丝电阻是由漆包线绕在一绝缘体上制成，再用绝缘材料封后置于水中，靠近电阻处插有水银温度计。加热用的电热器插在水中，由调压器供电，通过调节它的输出电压来改变加热电功率，进而改变水

3. 双电桥

QJ44型双电桥的注意事项：

(1) 被测电阻要用按四端接法接入，电源E用1.5V；

(2) 测量时应先从低灵敏度开始，达到平衡时逐步将灵敏度调到最大，次检查零位，并随即调节电桥平衡，从而得到测量盘R和比率C读数。

清华大学实验报告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名 _____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

四. 实验步骤

1. 单电桥测电阻

(1) 预调检流计零位。

(2) 测不同量级的待测电阻值（其中200Ω为感性电阻），首先选定比率，预置测量盘，接着调节电桥平衡而得到读数C和R值，然后测出偏离平衡位置Δd分格所需的测量盘示值变化ΔR，以便计算灵敏阈。

(3) 根据记录的数据计算测量值CR，分析误差，最后给出各电阻的测量结果。

2. 单电桥测铜丝电阻温度系数

(1) 测量加热前的水温及铜丝电阻值。

(2) 开始升温，每隔5~6°C测一次温度t及相应的阻值R_t。

(3) 在大致热平衡时测量，注意控制铜丝温度。

(4) 测量后用计算机进行直线拟合来检验数据。

3. 组装数字温度计

(1) 将QJ-23改装成互易桥，E接到原电桥G的外接端，数字电压表接到电桥的B端。

(2) 按所选的电桥参数组装数字温度计，分析α、R_0不准确对实验结果的影响。

(3) 用实验检验组装的数字温度计，每增加4~5°C测5~6组实验点，（温度范围大于20°C，注意热平衡，t<80°C）。

4. 双电桥测低电阻

注意低电阻的四端接法，实验中要记下待测低阻的编号、双电桥的编号、测量范围和准确度等级。

五. 实验数据和分析

1. 单电桥测电阻

仪器组号 5 电桥型号 QJ-23 编号 5

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

电阻标称值/Ω	120	200	1000	11000	360000
比率臂读数C	0.1	0.1	1	10	100
准确度等级指数α	0.2	0.2	0.2	0.5	0.5
平衡时测量盘读数/Ω	1192	1964	990	1096	3598
平衡后检流计偏转格数/格	12.8	8.1	13.8	12.7	3.7
与Δd对应的测量盘示数变化/Ω	2	1	2	9	190
测量值CR/Ω	119.2	196.4	990	10960	3.598×10^5
$\lvert E_{lim}\rvert=(\alpha\%)(CR+500C)$/Ω	0.3384	0.4928	2.98	79.80	2049
$(\Delta_S=0.2C\Delta R/\Delta d)$/Ω	3.125×10^{-3}	2.469×10^{-3}	0.029	1.417	1027
$(\Delta_{Rx}=\sqrt{E_{lim}^2+\Delta_S^2})$/Ω	0.3384	0.4928	2.98	79.81	2292
$(R_X=CR\pm\Delta_{Rx})$/Ω	119.2±0.3	196.4±0.5	990±3	$(1.096\pm0.008)\times10^4$	$(3.60\pm0.02)\times10^5$

误差分析过程

第一组： $R_X=CR=119.2\Omega$

电桥基本误差极限 $|E_{lim}|=\alpha\%)(CR+500C)=0.2\%\times(119.2+50)\Omega=0.3384\Omega$

电桥的灵敏阈 $\Delta_S=0.2C\Delta R/\Delta d=0.2\times0.1\times2/12.85=3.125\times10^{-3}\Omega$

$\therefore \Delta_{RX}=\sqrt{E_{lim}^2+\Delta_S^2}=0.3384\Omega$

$\therefore R_X=119.2\pm0.3\Omega$

第二组： $R_X=CR=196.4\Omega$

$|E_{lim}|=\alpha\%)(CR+500C)=0.2\%\times(196.4+50)\Omega=0.4928\Omega$

$\Delta_S=0.2C\Delta R/\Delta d=0.2\times0.1\times1/8.1\Omega=2.469\times10^{-3}\Omega$

$\therefore \Delta R_X=\sqrt{E_{lim}^2+\Delta_S^2}=0.4928\Omega$

$\therefore R_X=196.4\pm0.5\Omega$

第三组： $R_X=CR=990\Omega$

$|E_{lim}|=(\alpha\%)(CR+500C)=0.2\%\times(990+500)\Omega=2.98\Omega$

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名 _____ ）

作实验日期 年 月 日 教师评定

$\Delta_S = 0.2C\Delta R/\Delta d = 0.2\times1\times2/13.8\Omega = 0.029\Omega$

$\therefore \Delta R_x = \sqrt{E_{lim}^2+\Delta_S^2} = 2.98\Omega$

$\therefore R_x = 990\pm3\Omega$

第四组：$R_x = CR = 10960\Omega$

$E_{lim} = (\alpha\%)(CR+500C) = 0.5\%\times(10960+5000)\Omega = 79.8\Omega$

$\Delta_S = 0.2C\Delta R/\Delta d = 0.2\times10\times9/12.7\Omega = 1.41\Omega$

$\therefore \Delta R_x = \sqrt{E_{lim}^2+\Delta_S^2} = 79.81\Omega$

$\therefore R_x = (1.096\pm0.008)\times10^4\Omega$

第五组：$R_x = CR = 3.598\times10^5\Omega$

$E_{lim} = (\alpha\%)(CR+500C) = 0.5\%\times(3.598\times10^5+5\times10^4)\Omega = 2049\Omega$

$\Delta_S = 0.2C\Delta R/\Delta d = 0.2\times100\times190/3.7 = 1027\Omega$

$\therefore \Delta R_x = \sqrt{E_{lim}^2+\Delta_S^2} = 2292\Omega$

$\therefore R_x = (3.60\pm0.02)\times10^5\Omega$

2. 用电桥测量铜丝电阻温度系数

加热前水温 18.38℃ 加热前铜丝电阻 16.50Ω

水温 t/℃	24.70	30.13	35.63	40.50	46.19	51.29	57.23	62.92	68.18	73.51
铜丝电阻/Ω	16.94	17.30	17.66	17.97	18.35	18.67	19.06	19.44	19.78	20.12

用计算机进行直线拟合

相关系数：$a = 15.33439$ $b = 0.06515$ $r = 0.99999$

拟合直线方程：$R_t = bt + a = 0.06515t + 15.33439$

理论方程：$R_t = R_0(1+\alpha t)$

比较可得 $\begin{cases} R_0 = a\Omega = 15.33439\Omega \\ \alpha = \frac{b}{a}\,℃^{-1} = 4.2486\times10^{-3}℃^{-1} \end{cases}$

清华大学实验报告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名 _____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

4. 双电桥测低电阻

测量结果：

电阻编号：5 双电桥编号：5

$C = 1$ $R = 0.09581\Omega$ $\alpha = 0.2$

误差分析：

$R_X = CR = 0.09581\Omega$

$E_{lin} = (\alpha\%)\left(CR + \frac{CR_N}{10}\right)$ 其中 $R_N = 0.1\Omega$

$= 0.2\% \times \left(0.09581 + \frac{1\times 0.1}{10}\right)\Omega$

$= 2.1162\times 10^{-4}\Omega$

$\therefore \Delta R_X \approx E_{lin} = 2.1162\times 10^{-4}\Omega$

$\therefore R_X = (9.58 \pm 0.02)\times 10^{-2}\Omega$

六. 课后研究与思考题

1. 一般线性化设计由非平衡电桥电压输出 U_t 在温度 t_0 处按泰勒级数展开成温度 t 的线性函数形式，$U_t = a + b(t-t_0) + \Delta U$，计算泰勒级数 $t_0 = 0$ 处展开时的非线性项 ΔU。

解：$U_t = E\left(\frac{R_1}{R_1+R_2} - \frac{R}{R+R_t}\right)$，令 $\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_0}{R_0} = C$ 后

有 $U_t = E\left(\frac{1}{1+C} - \frac{1}{1+C+\alpha t}\right)$

对其求 n 阶导数，有

$U_t^{(n)} = E(-1)^{n+1}\cdot n!\frac{(C\alpha)^n}{(1+C+\alpha t)^{n+1}}$

$\therefore U_t^{(n)}(0) = E\cdot(-1)^{n+1} n!\frac{(C\alpha)^n}{(1+C)^{n+1}}$

由泰勒公式

$U_t = U_t(0) + U_t^{(1)}(0)t + \frac{1}{2}U_t^{(2)}(0)t^2 + \cdots$

$= 0 + \frac{E\alpha}{(1+C)^2}t + E\cdot\sum_{n=2}^{\infty}(-1)^{n+1}\frac{(C\alpha)^n}{(1+C)^{n+1}}t^n$

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

$$= \frac{EC\alpha}{(1+C)^2}t - E\frac{C^2\alpha^2}{(1+C)^3}t^2\sum_{n=0}^{\infty}\frac{(C\alpha)^n}{(1+C)^n}\left(-\frac{C\alpha t}{1+C}\right)^n$$

$$= \frac{EC\alpha}{(1+C)^2}t - E\cdot\frac{C^2\alpha^2t^2}{(1+C)^3}\cdot\frac{1-\left(-\frac{C\alpha t}{1+C}\right)^{\infty}}{1+\frac{C\alpha t}{1+C}} \quad \left(\text{由于}\frac{C\alpha t}{1+C}<1,\text{故}\left(-\frac{C\alpha t}{1+C}\right)^{\infty}\to 0\right)$$

$$= \frac{EC\alpha}{(1+C)^2}t - \frac{EC^2\alpha^2t^2}{(1+C)^2(1+C+C\alpha t)}$$

$$\therefore \quad \Delta U = -\frac{EC^2\alpha^2t^2}{(1+C)^2(1+C+C\alpha t)}$$

2. 为什么用单电桥测电阻一般比伏安法测量的准确度高？单电桥中检流计的准确度对实验中所用的平衡电桥法测量有无影响？

答：被测电阻值 R_x 仅从三个标准电阻的值求得，而与电源电压无关，不会受到电表误差的影响，因而准确度较高。

检流计的灵敏度和准确度要求都很高，否则会对测量结果造成一定影响。

3. 如果用单电桥测一微安表的内阻，应怎样才能保证被测微安表不超量程？

答：可以在电桥接电源的"+""−"之间串联一个电阻箱来控制流过电路的电流。

4. 用电桥测量电感线圈的直流电阻时，为防止通断瞬间产生大电流损伤检流计或干扰测量，接通时和断开时应怎样按开关？

答：接通时应先按 B 再按 G，断开时应先断 G 再断 B。

因为含有感性电阻的支路电流变化需要一个过程，故应先接 B 达到稳态后再按 G 进行测量。

5. 直流双电桥和单电桥在结构上有什么不同？为什么前者适合于低值电阻的测量？

答：双电桥被测电阻和测量臂电阻均采用四端接法，双电桥设了两个阻值较高的臂 R_1'、R_2'。

因为测低电阻时，接触电阻和引线电阻便不能忽略，双电

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名 _____ ）

作实验日期 年 月 日 教师评定

设高阻率臂，使得这两部分电阻影响减小，则双电桥更适合测低值电

6. 试从式 $E_{lim} = \pm(\alpha\%)(CR + \frac{CR_N}{10})$ 说明为什么选取比率臂时一般应使电桥 ×1000Ω 的测量盘尽可能用上？

答：尽量使单电桥 ×1000Ω 的测量盘用上可使R尽量大，则所需的C尽量小，虽然对CR的影响很小，但对 α 和 $\frac{CR_N}{10}$ 有较大影响，以使E减小，保证测量尽量准确。

七. 实验总结

通过这次有趣的实验，我学到了一个非常有意义的电学测量方法——电桥法。它巧妙地利用检流计判断平衡而达到精确测量。而在前不久我刚完成了灵敏电流计的实验，里面的一个选做环节是用检流计测量 1MΩ 的高阻，我当时尝试了若干种方法，效果都不是很好，最后用检流计与一个预置电阻 R_2 并联的方式才得到了较好的工作环，而今天实验之后我发现电桥法则可以较准确地测出高阻，将比率臂 C 调到 1000 即可测量。

同时，组装数字温度计也很有意思。在热平衡测铜丝电值时，为了保证稳定测量，可以先调大加热功率，在接近预温度时减小功率并不断搅拌水，同时应根据预期温度预置 R_2 样在示数稳定时可以快速调好R读数，防止温度又发生改变。功组装好数字温度计后，看到非常线性的示值还是蛮有成感的。

愉快的实验很快便接近了尾声，在这个充实的下

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 精仪 班号 11 姓名 耿飚 （同组姓名 ）

作实验日期 2012 年 11 月 19 日 教师评定

原始数据

1. 单电桥测电阻 仪器组号 5；电桥型号 QJ23；编号 5

电阻标称值/Ω	120欧	200	1000	11000	360000	
比率臂读数C	0.1	0.1	1	10	100	
准确度等级指数α	0.2	0.2	0.2	0.5	0.5	
平衡时测量盘读数R/Ω	119.2欧	1964	990	1096	3598	
平衡后调偏④Δd/分格	12.8	8.1	13.8	12.7	3.7	
5Δd对应示数变化ΔR/Ω	2	1	2	9	190	

2. 单电桥测铜丝电阻温度系数

加热前水温 18.38°C 加热前铜丝电阻 16.50Ω

水温t/°C	24.70	30.13	35.63	40.50	46.19	51.29	57.23	62.92	68.18	73.51
铜丝电阻/Ω	16.94	17.30	17.66	17.97	18.35	18.67	19.06	19.44	19.78	20.12

直线拟合：$a =$ 15.33439 $b =$ 0.06515 $r =$ 0.99999

$\alpha_R =$ 4.2486×10^{-3}

J28建 11.1P

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

3. 组装数字温度计

由测得 $R_0 = 15.\overset{33439}{\cancel{30}25}\ \Omega$，$\alpha = 4.\cancel{24}88\times10^{-3}/^{\circ}C$，$E = \overset{2401}{\cancel{2390}}\ mV$，$K = 15.30\ \Omega$

温度/°C	57.53	62.94	66.69	71.15	75.16	79.05
电压/mV	5.76	6.31	6.67	7.12	7.52	7.90

4. 编号：5　　双电桥编号：5

C = 001　　R = 0.09581 Ω

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

组装数字温度计并进行检验

由实验2测得的数据

$R_0 = 15.33395\Omega$ ， $\alpha = 4.2486\times10^{-3}/^\circ C$

设计参数为

$R = \frac{R_0}{C} = 1533\Omega$

$E = \frac{(1+C)^2}{10C\cdot\alpha} = \frac{(1+0.01)^2}{10\times0.01\times4.2486}\times10^3\ mV = 2.401\ V$

由此条件配置下所测得的 $U_t - t$ 实验数据

$t/^\circ C$	57.53	62.94	66.69	71.15	75.16	79.05
表/mV	5.76	6.31	6.67	7.12	7.52	7.90

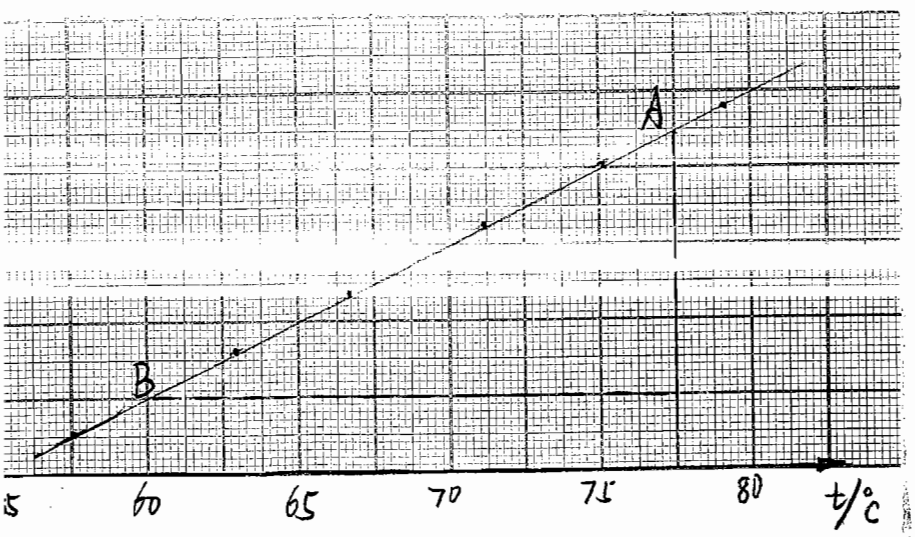
用计算机进行直线拟合

相关系数： $a = 0.045358$， $b = 0.099408$， $r = 0.99958$

$\therefore U_t = 0.0994t + 0.0454$

近似满足 $U_t = \frac{1}{10}t + \Delta U$

用作图法



取点 A (77.50, 7.74)

B (60.08, 6.00)

斜率 $k = \frac{7.74-6.00}{77.50-60.08} = 0.099885$

∴直线方程为

$(U-6.00) = 0.099885(t-60.08)$

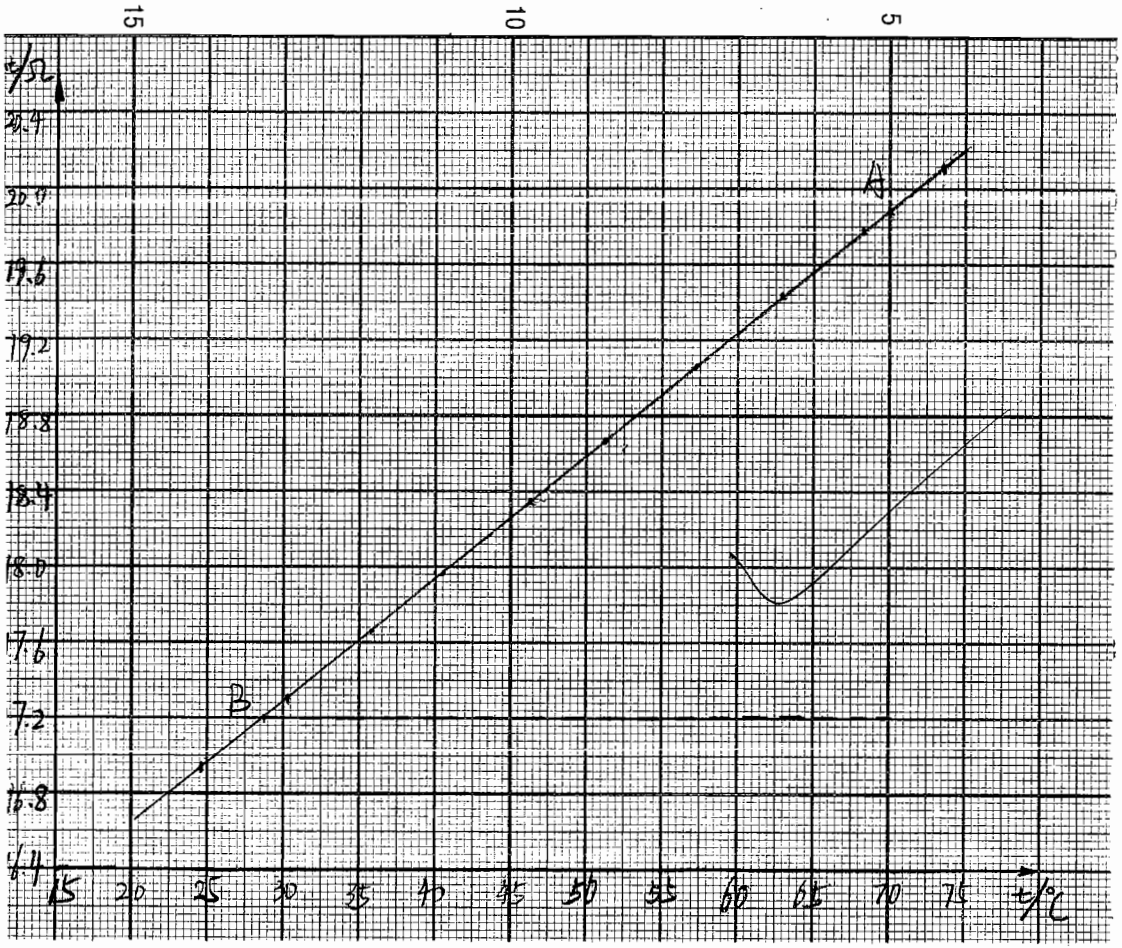
$U = 0.099885t - 0.0011$

通过两种检验方法可以看出，这种数字温度计还是相当精准的

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 文本 教师评定



在直线上取两点 A (70.0, 19.89)，B (28.7, 17.20)

斜率 $k = \frac{19.89 - 17.20}{70.0 - 28.7} \approx 0.06513$

∴直线方程为

$$R_t - 28\ 17.20 = 0.06513(t - 28.7)$$

即 $$R_t = 0.06513t + 15.33077$$

$$\therefore \begin{cases} R_0 = R_t(0) = 15.33077\Omega \\ \alpha = \frac{k}{R_0} = 4.2483 \times 10^{-3}\,^{\circ}C^{-1} \end{cases}$$

比较这两种方法，发现结果较为相近，说明测量结果还是较准确的。

清华大学实验报告

系别 _____ 班号 精11 姓名 钟逸舟 (同组姓名 _____)

作实验日期 年 月 日 2011010493 教师评定

阻尼振动与受迫振动

一、实验目的：

1. 观测阻尼振动，学习测量振动系统基本参数的方法。
2. 研究受迫振动的幅频特性和相频特性。
3. 观测不同阻尼对受迫振动的影响。

二、实验原理：

1. 有粘滞阻尼的阻尼振动。

弹簧与摆轮组成一振动系统，转角θ的运动方程：

$$J\cdot\frac{d^2\theta}{dt^2}+\gamma\frac{d\theta}{dt}+k\theta=0$$

当$\beta^2-\omega_0^2<0$时，阻尼振动运动方程解为

$$\theta(t)=\theta_i\exp(-\beta t)\cdot\cos(\sqrt{\omega_0^2-\beta^2}t+\phi_i)$$

阻尼振动角频率 $\omega_d=\sqrt{\omega_0^2-\beta^2}$，阻尼振动 $T_d=2\pi/\sqrt{\omega_0^2-\beta^2}$

2. 周期外力矩作用下的受迫振动。

在周期外力矩 $M\cos\omega t$ 激励下的运动方程和方程通解分别为

$$J\frac{d^2\theta}{dt^2}+\gamma\frac{d\theta}{dt}+k\theta=M\cos\omega t.$$

$$\theta(t)=\theta_i\exp(-\beta t)\cos(\sqrt{\omega_0^2-\beta^2}t+\phi_i)+\theta_m\cos(\omega t-\phi) \quad ①$$

当$t\gg T$之后，有稳态解 $\theta(t)=\theta_m\cos(\omega t-\phi)$ ②

稳态解的振幅和相位差为：

$$\theta_m=\frac{M/J}{\sqrt{(\omega_0^2-\omega^2)^2+4\beta^2\omega^2}} \qquad \phi=\arctan\frac{2\beta\omega}{\omega_0^2-\omega^2}\quad(0<\phi<\pi) \quad ③$$

摆轮振动总是滞后于激励源支座的振动。

3. 电机运动时的受迫振动运动方程及解

当连杆E的长度和摇杆M的长度远大于偏心轮的偏心半径r时，则摆轮转角θ的运动方程

$$J\frac{d^2\theta}{dt^2}+\gamma\frac{d\theta}{dt}+k\theta=k\alpha_m\cos\omega t$$

清华大学实验报告

系别 _____ 班号 精11 姓名 [redacted] （同组姓名 _____）

作实验日期 年 月 日 2011010493 教师评定

方程的通解与稳态解和①、②相同。

稳态解的相位差为θ，振幅为

$$\theta_m = \frac{\alpha_m \omega_0^2}{\sqrt{(\omega_0^2-\omega^2)^2+4\beta^2\omega^2}}$$

由 θ_m 的极大值条件 $\partial\theta_m/\partial\omega=0$ 时，当外激励角频率 $\omega=\sqrt{\omega_0^2-2\beta^2}$ 系统发生共振，θ_m 有极大值 $\frac{\alpha_m\omega_0^2}{2\beta\sqrt{\omega_0^2-\beta^2}}$

引入参数 $\zeta=\frac{\beta}{\omega_0}=\gamma/(2\sqrt{kJ})$ 称为阻尼比

4. 描述阻尼振动的常用参量：

转动惯量 J　　动度系数 k　　阻尼力矩系数 γ

固有角频率 $\omega_0=\sqrt{k/J}$　　外激励角频率 ω

阻尼系数 $\beta=\gamma/(2J)$　阻尼比 $\zeta=\gamma/2\sqrt{kJ}=\beta/\omega_0$　阻尼振动周期 $T_d=2\pi/$

时间常数 $\tau=2J/\gamma=1/\beta$　品质因素 $Q=1/(2\zeta)$　对数减缩率 $\Lambda=T_d/\tau=2\pi\zeta/$

三、实验仪器：

波耳共振仪

闪光灯只有在测量受迫振动的相位差才允许使用。

四、实验任务和步骤：

1. 调整仪器使波耳共振仪处于工作状态，并检查摆轮的自由摆动

2. 测量最小阻尼时的阻尼比ζ和固有角频率 ω_0。

① 用逐差法计算阻尼比ζ，读取振幅值 $\theta_1, \theta_2, \cdots \theta_n$

$$b=\ln\theta_j-\ln\theta_{j+1}=-\beta T_d=-\beta\cdot\frac{2\pi}{\sqrt{\omega_0^2-\beta^2}}=-2\pi(\zeta^{-2}-1)^{-0.5}$$

$$\therefore b=\frac{1}{I^2}\bar{D}=\frac{1}{I^2}\sum_{j=1}^{I}(y_{j+I}-y_j)$$

$$S_b=\frac{1}{I}\sqrt{\Sigma(D_j-\bar{D})^2/(I-1)}$$

② 用阻尼比ζ和振动周期 T_d 计算固有角频率 ω_0。

3. 测量其他2种或3种阻尼状态的振幅，仿照上述方法求ζ。

4. 测定受迫振动的幅频特性和相频特性曲线。

① 将用此法测定的 ω_0 与已有的结果作比较。

清华大学实验报告

系别 _____ 班号 精11 姓名 [illegible] (同组姓名 _____)

作实验日期 年 月 日 2011010493 教师评定

② 逐点求实测相位差 φ 曲与由③计算值的相对偏差。

五、注意事项：

1. 为避免剩磁影响，阻尼开关不要随便拨动。
2. 只有测受迫振动相频特性时才开启仪器面板上的闪光灯开，读完数据后迅即关闭。
3. 相频特性与幅频特性测量要在振动稳定后再进行，可根据测量数据计算 T 值和达到稳定状态（$e^{-t/\tau}<0.01$）所需时间。
4. 在共振点附近要注意随时调节 W 勿使振幅过大（$A_{max}<220°$）以免损坏玻耳共振仪，尤其是阻尼较小时。
5. 几种阻尼状态下的幅频特性与相频特性曲线画同一张纸上。

六、数据处理：1. 阻尼振动 (1) 无电磁阻尼：

序号 i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
θ_i/°	119	118	117	116	115	114	113	112	112	110	110	108	108
θ_{i+25}/°	96	95	94	94	92	92	91	90	90	89	88	88	87
$y_i=\ln\theta_i$	4.779	4.771	4.762	4.754	4.745	4.736	4.727	4.718	4.718	4.700	4.700	4.682	4.682
$y_{i+25}=\ln\theta_{i+25}$	4.564	4.554	4.543	4.543	4.522	4.522	4.511	4.500	4.500	4.489	4.477	4.477	4.466
$D_i=y_{i+25}-y_i$	-0.215	-0.217	-0.219	-0.211	-0.223	-0.214	-0.216	-0.218	-0.218	-0.211	-0.223	-0.205	-0.216

序号 i	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	
θ_i/°	106	106	105	104	103	102	101	100	99	98	98	96	
θ_{i+25}/°	86	85	84	84	83	82	82	81	80	80	79	78	
$y_i=\ln\theta_i$	4.663	4.663	4.654	4.644	4.635	4.625	4.615	4.605	4.595	4.585	4.585	4.564	
$y_{i+25}=\ln\theta_{i+25}$	4.466	4.443	4.431	4.431	4.419	4.407	4.407	4.394	4.382	4.382	4.369	4.357	
$D_i=y_{i+25}-y_i$	-0.197	-0.220	-0.223	-0.213	-0.216	-0.218	-0.208	-0.211	-0.213	-0.203	-0.216	-0.207	

清华大学实验报告

系别 _____ 班号 精11 姓名 [redacted] (同组姓名 _____)

作实验日期 年 月 日 2011010493 教师评定

序号	1	2	3	4	5
$10\bar{T}_d$/s	14.944	14.943	14.941	14.939	14.939

令 $x_i = 1, 2, \cdots, 50$. 则 y_i 与 x_i 直线拟合

$y = -0.0086x + 4.7877$ 即 $b = -0.0086$

$\Delta_b = S_b = \frac{1}{n}\sqrt{\frac{\sum(D_i - \bar{D})^2}{n-1}} = \frac{1}{25}S_D = \frac{1}{25} \times 0.00627044 = 2.51 \times 10^{-4}$

$\therefore b = -0.0086 \pm 0.0003 = +(-0.86 \pm 0.03) \times 10^{-3}$

$\because b = -\frac{2\pi}{\sqrt{\zeta^2 - 1}}$

$\therefore \zeta = \left[\left(\frac{2\pi}{b}\right)^2 + 1\right]^{-\frac{1}{2}} = \left[\left(\frac{2\pi}{-0.0086}\right)^2 + 1\right]^{-\frac{1}{2}} = 0.00137$

$\because \frac{d\zeta}{db} = \frac{4\pi^2}{b^3}\left[\left(\frac{2\pi}{b}\right)^2 + 1\right]^{-\frac{3}{2}}$

$\therefore \Delta_\zeta = \left|\frac{d\zeta}{db}\right|\Delta_b = \frac{4\pi^2}{(-0.0086)^3} \times \left[\left(\frac{2\pi}{-0.0086}\right)^2 + 1\right]^{-\frac{3}{2}} \times 0.00025 = 4 \times 10^{-5}$

$\therefore \zeta = (1.37 \pm 0.04) \times 10^{-3}$

$T_d = \frac{1}{50}\sum \bar{T}_{di} = 1.4941\ s$

$S_{10\bar{T}_d} = \sqrt{\frac{\sum(\bar{T}_{di} - \bar{T}_d)^2}{n-1}} = 0.00228$ $\because \Delta_{12} = 0.001\ s$

$\therefore \Delta_{10\bar{T}_d} = \sqrt{S_{10\bar{T}_d}^2 + \Delta_{12}^2} = \sqrt{0.001^2 + 0.00228^2} = 2.49 \times 10^{-3}$

$\therefore \Delta_{T_d} = \frac{1}{10}\Delta_{10\bar{T}_d} = 0.00025$

$\therefore T_d = (1.4941 \pm 0.0003)\ s$

$\therefore W_0 = \frac{2\pi}{T_d\sqrt{1-\zeta^2}} = \frac{2\pi}{1.4941 \cdot \sqrt{1 - 0.00137^2}} = 4.20534\ s^{-1}$

$\therefore \frac{\Delta_{W_0}}{W_0} = \sqrt{\left(\frac{\Delta_{T_d}}{T_d}\right)^2 + \left(\frac{\zeta\Delta_\zeta}{1-\zeta}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{0.00025}{1.4941}\right)^2 + \left(\frac{1.37 \times 0.04 \times 10^{-3}}{1 - 0.00137^2}\right)^2} = 0.00017$

$\therefore \Delta_{W_0} = \frac{\Delta_{W_0}}{W_0} \cdot W_0 = 0.00017 \times 4.20534 = 0.0007\ s^{-1}$

$\therefore W_0 = (4.2053 \pm 0.0007)\ s^{-1}$

清华大学实验报告

系别 _____ 班号 精11 姓名 钟盛舟 （同组姓名 _____）

作实验日期 年 月 日 2011010493 教师评定

(2) 电磁阻尼3摆时：

序号	1	2	3	4	5	6
θ_i	98	87	76	68	60	52
θ_{i+6}	46	41	36	32	28	24
$y_i=\ln\theta_i$	4.585	4.466	4.331	4.219	4.094	3.951
$y_{i+6}=\ln\theta_{i+6}$	3.829	3.714	3.584	3.466	3.332	3.178
$D_i=y_{i+6}-y_i$	-0.756	-0.752	-0.747	-0.754	-0.762	-0.773

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
周期 T_{di}/s	1.497	1.497	1.497	1.497	1.496	1.498	1.498	1.500	1.499	1.500	1.500	1.500

y_i 与 $x_i=1,2,\cdots 12$ 经过直线拟合得

$y=$ ~~$-0.5594x$~~ $-0.1265x+4.718$ 即 $b=-0.1265$

$\therefore \Delta_b=\frac{1}{n}\sqrt{\frac{\sum(D_i-\bar{D})^2}{n-1}}=\frac{0.00911526}{6}=0.0015$

$\therefore b=$ ~~-0.1265 ± 0.0015~~ (-0.127 ± 0.002)

$\zeta=\left[\left(\frac{2\pi}{b}\right)^2+1\right]^{-\frac{1}{2}}=\left[\left(\frac{2\pi}{-0.127}\right)^2+1\right]^{-\frac{1}{2}}=0.0202$

$\Delta_\zeta=\frac{4\pi^2}{-b^3}\left[\left(\frac{2\pi}{b}\right)^2+1\right]^{-\frac{3}{2}}\cdot\Delta_b=\frac{4\pi^2}{0.127^3}(0.0202)^3\times0.0015=0.00024$

$\therefore \zeta=0.0202\pm0.0002=(2.02\pm0.02)\times10^{-2}$

$T_d=\frac{1}{12}\sum T_{di}=1.4983\,s$ $S_{T_d}=0.001485\,s$

$\Delta_{T_d}=\sqrt{S_{T_d}^2+\Delta_{\text{仪}}^2}=0.00178\,s$

$\therefore T_d=(1.498\pm0.002)\,s$

$\omega_0=\frac{2\pi}{T_d\sqrt{1-\zeta^2}}=\frac{2\pi}{1.498\sqrt{1-0.0202^2}}=4.19524\,s^{-1}$

清华大学实验报告

系别 _____ 班号 精11 姓名 [redacted] (同组姓名 _____)

作实验日期 年 月 日 2011010493 教师评定

$$\frac{\Delta w_0}{w_0} = \sqrt{\left(\frac{\Delta T_d}{T_d}\right)^2 + \left(\frac{\zeta \Delta \zeta}{1-\zeta^2}\right)^2} = 0.0012$$

$$\therefore \Delta w_0 = \frac{\Delta w_0}{w_0} \cdot w_0 = 0.0012 \times 4.1954 = 0.005\ s^{-1}$$

$$\therefore w_0 = (4.195 \pm 0.005)\ s^{-1}$$

(3) 电磁阻尼5槽时：

序号	1	2	3	4	5	6
θ_i/°	84	67	53	42	34	26
θ_{i+6}/°	20	16	12	9	7	5
$y_i = \ln\theta_i$	4.431	4.205	3.970	3.738	3.526	3.258
$y_{i+6} = \ln\theta_{i+6}$	2.996	2.773	2.485	2.197	1.946	1.609
$D_i = y_{i+6} - y_i$	-1.435	-1.432	-1.485	-1.540	-1.580	-1.648

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
周期 T_d/s	1.497	1.498	1.500	1.500	1.499	1.498	1.497	1.496	1.493	1.491	1.491	1.487

同前两次，直线拟合可得 $y = -0.2537x + 4.7436$

$b = -0.2537$

$$\Delta_b = \frac{1}{6}\sqrt{\frac{\sum (D_i - \bar{D})^2}{5}} = \frac{0.08574}{6} = 0.0143$$

$$\therefore b = -0.254 \pm 0.014$$

$$\zeta = \left[\left(\frac{2\pi}{b}\right)^2 + 1\right]^{-\frac{1}{2}} = 0.0404$$

$$\Delta\zeta = \frac{4\pi^2}{-b^3}\left[\left(\frac{2\pi}{b}\right)^2 + 1\right]^{-\frac{3}{2}} \cdot \Delta_b = 0.0023$$

$$\therefore \zeta = (4.04 \pm 0.23) \times 10^{-2}$$

$$\bar{T}_d = \frac{1}{12}\sum T_{di} = 1.496\ s$$

清华大学实验报告

系别 _____ 班号 精11 姓名 [illegible] (同组姓名 _____)

作实验日期 年 月 日 2011010493 教师评定

∵ $S_{Td} = 0.004144\ s$

∴ $\Delta_{Td} = \sqrt{S_{Td}^2 + \Delta_{仪}^2} = 0.0043\ s$

∴ $Td = (1.496 \pm 0.004)\ s$

$W_0 = \frac{2\pi}{Td\sqrt{1-\zeta^2}} = 4.2034\ s^{-1}$

$\frac{\Delta w_0}{W_0} = \sqrt{\left(\frac{\Delta_{Td}}{Td}\right)^2 + \left(\frac{\zeta \Delta_\zeta}{1-\zeta^2}\right)^2} = 0.00287$

∴ $\Delta w_0 = \frac{\Delta w_0}{w_0} \cdot W_0 = 0.0121\ s^{-1}$

∴ $W_0 = (4.203 \pm 0.012)\ s^{-1}$

2. 受迫振动：① 电磁阻尼3档：

T/s	w/w₀	θ/°	φ₁/°	φ₂/°	$\phi=\frac{\phi_1+\phi_2}{2}$/°	$\phi_{理论}$/°	$\frac{\phi-\phi_{理论}}{\phi_{理论}} \times 100\%$
1.389	1.076	24	164	162	163	164.6	−0.97%
1.399	1.068	28	162	161	161.5	162.9	−0.89%
1.425	1.048	36	159	158	158.5	156.7	1.15%
1.439	1.038	46	154	154	154	151.6	1.61%
1.458	1.024	60	142	141	141.5	139.6	1.38%
1.478	1.011	82	123	122	122.5	118.4	3.43%
1.483	1.007	89	111	110	110.5	109.1	1.33%
1.487	1.005	100	107	106	106.5	103.9	2.53%
1.494	1.000	106	95	94	94.5	90	5.00%
~~1.515~~ 1.496	0.999	109	89	88	88.5	87.2	1.53%
1.499	0.997	108	82	81	81.5	81.5	−0.05%
1.515	0.986	94	58	57	57.5	55.1	4.38%
1.532	0.975	74	42	41	41.5	38.6	7.56%
1.555	0.961	56	28	27	27.5	26.9	2.18%
1.608	0.929	32	10	9	9.5	15.3	−38.01%

清华大学实验报告

系别 _____ 班号 精11 姓名 钟嘉舟 (同组姓名 _____)

作实验日期 年 月 日 2011010493 教师评定

8

上述计算中：$\phi_{理}=\arctan\frac{2\zeta(w/w_0)}{1-(w/w_0)^2}$，$w_0$、$\zeta$取对应值（3指

幅频曲线与相频曲线见附页。

(2) 电磁阻尼5挡

T/s	w/w_0	θ1°	$\phi_1$1°	$\phi_2$1°	$\phi=\frac{\phi_1+\phi_2}{2}$/°	$\phi_{理论}$/°	$\frac{\phi-\phi_{理}}{\phi_{理}}\times100\%$
1.381	1.082	21	154	153	153.5	153.0	0.31%
1.414	1.057	28	147	146	146.5	144.0	1.71%
1.441	1.037	38	139	138	138.5	132.3	4.69%
1.458	1.025	46	129	128	128.5	121.8	5.53%
1.478	1.011	54	114	113	113.5	105.7	7.34%
1.488	1.004	58	99	98	98.5	96.6	2.01%
1.491	1.003	59	99	98	98.5	93.7	5.09%
1.497	0.999	60	92	91	91.5	88.0	3.93%
1.501	0.996	60	90	89	89.5	84.3	6.20%
1.510	0.990	59	79	78	78.5	76.1	3.21%
1.531	0.976	54	61	59	60	59.5	0.93%
1.551	0.964	46	47	46	46.5	47.6	-2.41%
1.582	0.945	36	33	32	32.5	35.5	-8.45%
1.606	0.931	30	27	26	26.5	29.4	-9.83%
1.624	0.921	27	24	23	23.5	26.0	-9.54%

w_0，ζ取5挡对应值，其余同3挡

清华大学实验报告

系别 _____ 班号 精11 姓名 钟盈升 （同组姓名 _____）

作实验日期 年 月 日 2011010493 教师评定

七、思考题：

问：比较 T_0（固有振动周期）、T_d（阻尼振动周期）和 T_R（共振周期）的大小

答：理论上：$T_0=\frac{2\pi}{\omega_0}$，$T_d=\frac{2\pi}{\sqrt{\omega_0^2-\beta^2}}$，$T_R=\frac{2\pi}{\sqrt{\omega_0^2-2\beta^2}}$

其中 $\beta=\frac{r}{2J}=\frac{1}{5}\omega_0$。从表达式可知，$T_0<T_d<T_R$

实际中：

(1) 电磁阻尼3档：

$T_0=\frac{2\pi}{\omega_0}=1.4977s$，$T_d=1.4983s$，$T_R=\frac{2\pi}{\sqrt{\omega_0^2-2\beta^2}}=\frac{2\pi}{\sqrt{4.1952^2-2\times0.0202^2\times}}$

$=1.4983s$

$\therefore T_0<T_d<T_R$ 与理论相符

(2) 电磁阻尼5档：

$T_0=\frac{2\pi}{\omega_0}=\frac{2\pi}{4.2053}=1.4941s$。$T_d=1.496s$

$T_R=\frac{2\pi}{\sqrt{\omega_0^2-2\beta^2}}=1.497s$ $\therefore T_0<T_d<T_R$ 与理论相符

由上述可以看出 T_0、T_d、T_R 差别不大，近似相等。原因是阻尼较小时，可以忽略。

八、数据汇总：

①无阻尼：

$b=(-0.006\pm0.003)\times10^{-3}$，$\gamma=(1.37\pm0.04)\times10^{-3}$，$T_d=(1.4941\pm0.0003)s$，$\omega_0=(4.205\pm$

②3档：

$b=(-0.127\pm0.002)$，$\gamma=(2.02\pm0.02)\times10^{-2}$，$T_d=(1.498\pm0.002)s$，$\omega_0=(4.195\pm0.005)s^{-1}$

③5档：

$b=-0.254\pm0.014$，$\gamma=(4.04\pm0.23)\times10^{-2}$，$T_d=(1.496\pm0.004)s$，$\omega_0=(4.203\pm0.012)s^{-1}$

清华大学实验报告

系别 _____ 班号 精11 姓名 韩盈舟 （同组姓名 _____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

1. 无阻尼

θ \ i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	10 $\bar{T}_d$/s
θ_i/°	119	118	117	116	115	114	113	112	112	110	14.944
θ_{i+10}/°	110	108	108	106	106	105	104	103	102	101	14.943
θ_{i+20}/°	100	99	98	98	96	96	95	94	94	92	14.941
θ_{i+30}/°	92	91	90	90	89	88	88	87	86	85	14.939
θ_{i+40}/°	84	84	83	82	82	81	80	80	79	78	14.939

2. 阻尼振动 3.5 $b = -0.01242$

3

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
振幅/°	98	87	~~76~~	~~68~~	~~60~~	52	46	41	36	32	28	24
周期 T_d/s	1.497	1.497	1.497	1.497	1.498	1.498	1.498	1.500	1.499	1.500	1.500	1.500

5.

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
振幅/°	84	67	53	42	34	26	20	16	12	9	7	5
周期 T_d/s	1.497	1.498	1.500	1.500	1.499	1.498	1.497	1.496	1.493	1.491	1.491	1.487

JL04
11.22 8

清华大学实验报告

系别 _____ 班号 未知1 姓名 钱多舟 （同组姓名 _____ ）

作实验日期 年 月 日 教师评定

3. 受迫振动：

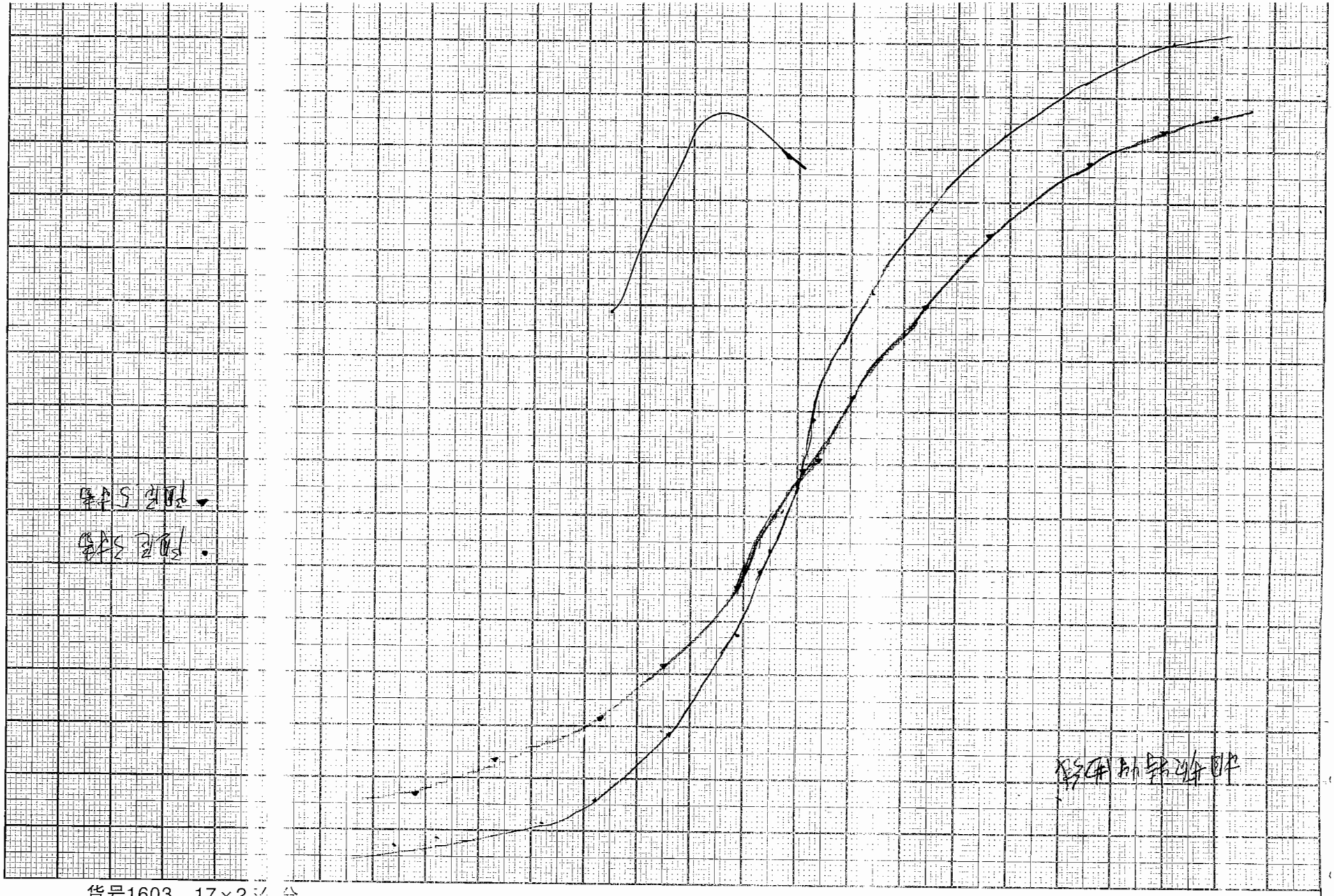
序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	1
周期T/s	1.494	1.389	1.399	1.425	1.439	1.458	1.478	1.483	1.487	1.499	1.515	1.532	1.555	1.608	1.497	1.
振幅θ/°	106	24	28	36	46	60	82	89	100	108	93	74	56	32	110	10
相位 ϕ_1/°	95	164	162	159	154	142	123	111	107	82	58	42	28	10	88	8
相位 ϕ_2/°	94	162	161	158	154	141	122	110	106	81	57	41	27	9	87	8

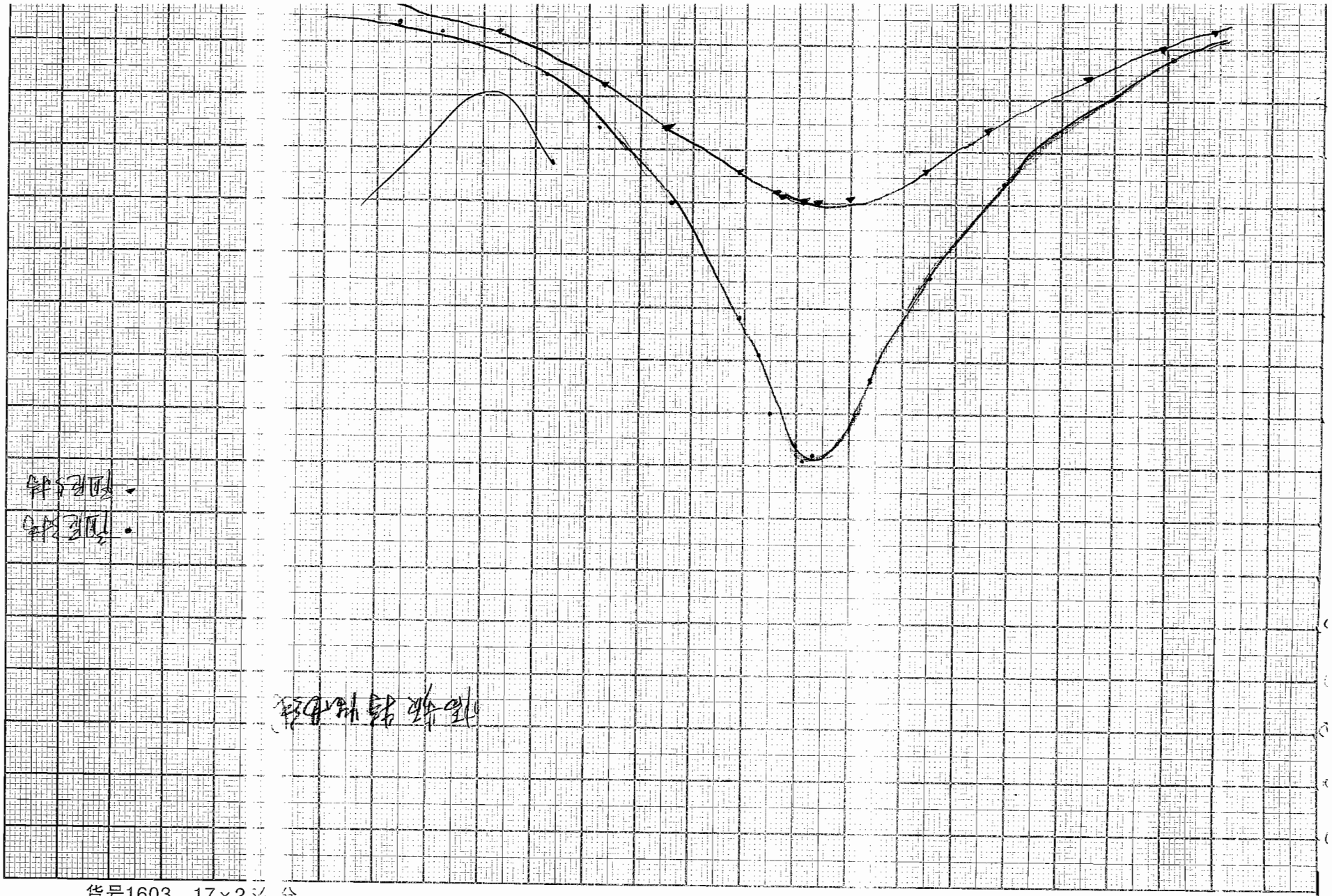
序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
周期T/s	1.488	1.38	1.414	1.441	1.458	1.478	1.491	1.497	1.50	1.510	1.531	1.55	1.582	1.606	1.624	
振幅θ/°	58	21	28	38	46	54	59	60	60	59	54	46	36	30	27	
相位 ϕ_1/°	99	154	147	139	129	114	99	92	90	79	59	47	33	27	24	
相位 ϕ_2/°	98	153	146	138	128	113	98	91	89	78	61	46	32	26	23	

J604

11.22

8





货号1603 17×2公分

京诚纸品 精益求精

清华大学实验报告

系别 2011010493 班号 精11 姓名 钟[illegible] （同组姓名 ）

作实验日期 年 月 日 教师评定 9-

灵敏电流计

J26、11.3

一、实验目的：

1. 了解检流计的工作原理及其线圈的阻尼运动规律。
2. 测量检流计分度值及内阻，学习误差分析的方法。
3. 学习正确使用和保护检流计

二、实验原理：

1. 检流计的工作原理及其线圈的阻尼运动特性。

检流计的基本结构如图 5.2.1 所示，(a)是正视图，(b)是俯视图。线圈处在水平的、径向的均匀磁场 B 中。若通以电流 I_g，在磁场作用下它就会产生转动。设线圈的转动惯量为 J，它在转动时受到三种力矩：

1) 载流线圈在磁场 B 中所受力矩为 M_1，匝数 N，面积 S，则 $M_1 = BNSI_g$，

2) 与悬丝扭转系数和线圈偏转角 α 成正比的悬丝反抗力矩 $M_2 = -W\alpha$

3) 与线圈角速度 $d\alpha/dt$ 成正比的阻尼力矩 $M_3 = -(\rho_1+\rho_2)\frac{d\alpha}{dt}$，$\rho_1$ 为线圈的空气阻尼系数，ρ_2 为线圈的电磁阻尼系数。

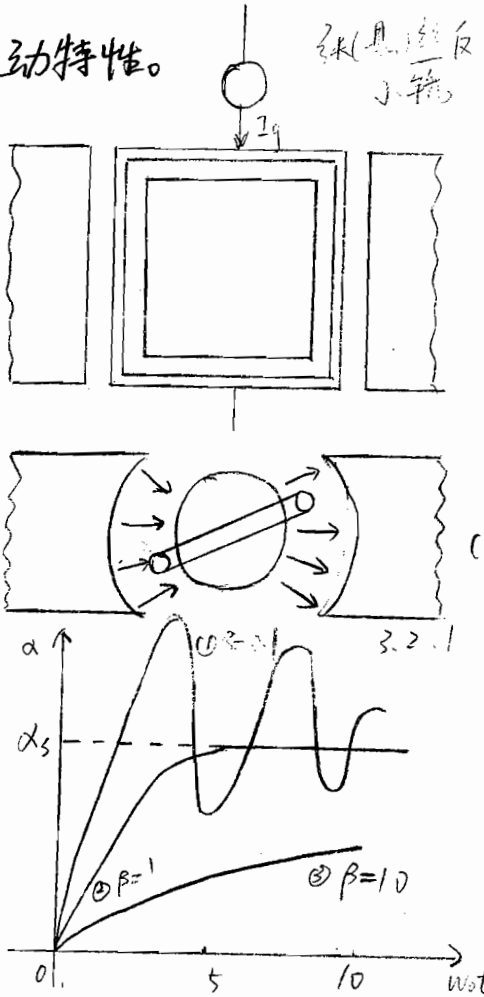


图 5.2.2

解运动方程得：

1) 当 $\beta < 1$ 即外电路电阻 R_2 很大时，方程的解为

$$\alpha = \alpha_s\left[1 - \frac{e^{-\beta W_0 t}}{\sqrt{1-\beta^2}}\sin\left(\sqrt{1-\beta^2}\,W_0 t + \phi\right)\right]$$

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 精11 姓名 [illegible] （同组姓名 _____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

式中 $\varphi = \arctan(\sqrt{1-\beta^2}/\beta)$

此式表明，线圈做振荡运动，其振幅随着时间 t 的增大而衰减。最后线圈达到稳定偏转 α_s。此时线圈的运动叫欠阻尼运动。其运动特性曲线与图 5.2.2 中曲线 ① 类似。振幅衰减很慢的欠阻尼运动对测量是不利的，因为它达到平衡的时间太长。

(2) 当 $\beta=1$ 时，解为 $\alpha = \alpha_s[1 - e^{-\omega_0 t}(1+\omega_0 t)]$

此式表明线圈作单方向偏转运动，刚好不振荡，可用图 5.2.2 中曲线 ② 描绘，它较快达到稳定偏转 α_s。$\beta=1$ 时的运动叫临界阻尼运动，此时外电路电阻用 R_2 用 R_c 表示，R_c 为外临界电阻。这种运动对测量较为有利，因为它达到平衡的时间较短。

(3) 当 $\beta>1$ 时，即 R_2 很小，解为

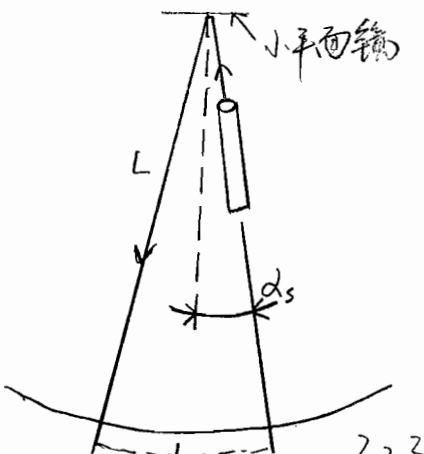
$$\alpha = \alpha_s\left[1 - \frac{e^{-\beta\omega_0 t}}{\sqrt{\beta^2-1}}\sinh\left(\sqrt{\beta^2-1}\,\omega_0 t + \theta\right)\right]$$

式中 $\theta = \operatorname{arctanh}(\sqrt{\beta^2-1}/\beta)$。此式表明这时线圈作单向偏转，曲线类似图 5.2.2 中的 ③。此时 $R_2 < R_c$，此运动叫过阻尼运动。它对测量因为它达到平衡的时间长，且不易判断线圈是否达平衡。

$\beta=0.8\sim0.9$ 时是电流计的理想工作状态，达平衡所用时间最

2、测检流计的电流分度值

为测 α_s，常用如图 5.2.3 的装置。从射光筒发出的光经线圈上方的小镜反射后形成带标记线的光斑投射到标尺上，偏转角 α_s 可用光斑标记线在标尺上的位置读数 d 表示。由图可知 $d = 2L\alpha_s$。



5.2.3

$\therefore C_1 = \frac{I_g}{d} = \frac{W}{2LBNS}$，$C_1$ 是检流计的电流分度值。

清 华 大 学 实 验 报 告

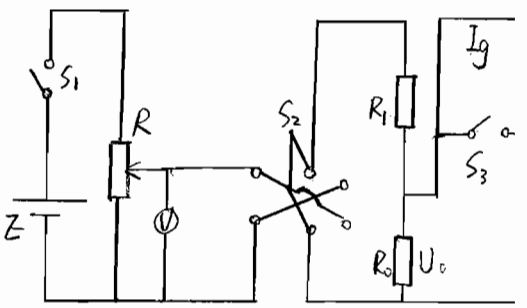
系别 _____ 班号 精11 姓名 [illegible] （同组姓名 _____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

测电流分度值的线路如图3.2.4

$$I_g = \frac{U_0}{R_2 + R_g} = \frac{U}{(R_1 + R_2 + R_g) + (R_2 + R_g)R_1/R_0}$$

式中 U 是电压表 V 的读数。



3.2.4

3、测检流计的内阻

(1) 半偏法：

线路与图3.2.4一样。先令 $R_2=0$，调节 I_g，使电流计偏转为 d，然后 R_2 直至电流计的偏转为原来的一半即 d/2，此时认为 R_2 近似为 R_g。测量中 U_0 不变。但 U_0 很小，实际测量时是监视电压表示值不变，并使它尽量用到满量程。

(2) 全偏法：

仍用图3.2.4的线路。先令 $R_2=0$，调 R_1 使检流计满偏。预置 R_2 为某值，再减小 R_1 到原来值的一半，此时逐渐减小 R_2 到检流计再次满偏，这时 R_2 值即为 R_g。测量时仍保持电压表读数不变。

三、实验内容：

1、观察电流计阻尼运动特性

(1) 按图3.2.4接线，注意各级分压电路的安全位置。老师检查后可接通

(2) 通过改变 R_2，观察图3.2.2所示的三种阻尼运动并记录现象，在逐步改变 R_2 时找出外临界电阻 R_c。

2、用半偏法和全偏法测定检流计的内阻 R_g

半偏法中，要在相同的实验条件下，对 R_2 测量6次，分析和估计用半偏测量的 Δ_{R_g}

3、测电流分度值 C_I

取 $R_2 = R_c$，使检流计工作在临界阻尼状态，分别测出左右两侧光标指在20，40，60分度处的电流分度值，求出平均电流分度值 C_I 及 Δ_{C_I}

清华大学实验报告

系别 _____ 班号 精11 姓名 钟嘉舟 （同组姓名 _____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

四、使用检流计的注意事项：

(1) 注意保护检流计悬丝，因剧烈振动或严重过载会损坏悬丝。

① 使用检流计时光标偏移不得超出标尺，多分度值档的检流计从灵敏度最低的档用起，逐步提高灵敏度。

② 不用时，检流计输入端必须短路。

③ 少搬动检流计，必须搬动时先检查是否短路，再轻拿轻放。

(2) 经常注意检流计零点有无变化，如有变动，及时调整。调节检计的机械零点，应在断路时进行。

(3) 注意选取适当外电阻，一般使检流计工作在稍欠阻尼状态或临界阻尼状

五、数据处理：

检流计型号 7 编号 7.

1、观察检流计的阻尼运动特性

检流计外临界电阻 R_c = 1110.0 Ω.

R_2/Ω	阻尼运动的特点	光标自最大偏转处至最后停在零点所需时间/s
约 $10R_c$	振荡运动，振幅随时间增大而衰减，最后稳定	53.0
约 R_c	单方向偏转运动	5.4
约 $0.1R_c$	单向偏转	39.0

2、测用检流计内阻 R_g.

电压表量程 3.000 V 准确度等级 0.5 分度值 0.020 V

电阻箱准确等级 0.1， R_0 = 1.00±0.01 Ω

清华大学实验报告

系别 _____ 班号 精11 姓名 [illegible] （同组姓名 _____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

半偏法

测次	U/V	R/Ω	$R_2=0$时, d/div	偏转时R_2/Ω	调偏2分度时对应$\Delta R'$/Ω
1	2.990	10700.0	52	166.00	28.30
2	2.990	10710.0	52	164.00	27.00
3	2.990	10720.0	52	164.20	27.80
4	2.990	10730.0	52	163.70	28.20
5	2.990	10740.0	52	162.10	29.90
6	2.990	10750.0	52	164.40	28.10

由表可知 $\overline{R_2}=\frac{\sum R_2}{6}=164.10\Omega$.

① 修正系统误差 $R_g \approx \overline{R_2}-R_0=163.1\Omega$.

② 由检流计灵敏阈阈决定的误差 Δ_1：

$\because \overline{R'}=\frac{\sum R'}{6}=28.38\Omega$. $\therefore \Delta_1=\pm 0.1R'=\pm 2.84\Omega$.

③ 电压波动引起的误差 Δ_2：

$\Delta_2=\pm$[illegible]$R_g\times$(0.2分度的电压值)/电压表示值 $=\pm 0.92\Omega$

④ 电阻箱误差 Δ_3：

$\Delta_3=\pm[0.1\%\,\overline{R_2}+0.005(N+1)]=\pm 0.20\Omega$

⑤ R_2的标准偏差：$S_{R_2}=1.25$.

$\therefore \Delta_{R_g}=\sqrt{\Delta_1^2+\Delta_2^2+\Delta_3^2+S_{R_2}^2}=3.24\Omega$.

$\therefore R_g=$ ~~163.10±3.24~~ $(163\pm3)\Omega$

(2) 全偏法

清华大学实验报告

系别 _____ 班号 精11 姓名 [illegible] （同组姓名 _____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

测次	U/V	R_1/Ω	$R_2=0$时, d/div	R_2/Ω	R_2/Ω	调偏2分度时 $\Delta R'/\Omega$
1	2.990	10780.0	52	5350.00	159.70	12.2
2	2.990	10710.0	52	5355.00	160.30	15.1
3	2.990	10720.0	52.	5360.00	158.20	13.9.

处理方法同半偏法：

$R_g \approx \bar{R}_2 - R_0 = 158.4\Omega$

$\Delta_1 = \pm 0.9\overline{\Delta R'} = \pm 1.37$

$\Delta_2 = \pm\sqrt{2} R_g \times$(0.2分度电压值)/电压表示值 $= 0.90$

$\Delta_3 = \pm [0.1\% \bar{R}_2 + 0.005(N+1)] = 0.18$

$S_{R_2} = \sqrt{\frac{\Sigma(R_2-\bar{R})^2}{n-1}} = 1.08$

$\therefore \Delta_{R_g} = \sqrt{\Delta_1^2 + \Delta_2^2 + \Delta_3^2 + \delta R_0^2} = 1.97.$

$\therefore R_g = (158 \pm 2)\Omega.$

3. 测检流计分度值 C_1

测次	U/V	R_1/Ω	R_2/Ω.	d/div		I_g/A	$C_1/(A/dN)$	
				左	右		左	右
1	2.990	3360.0	1110.0	19.0	20.0	6.59×10^{-7}	3.47×10^{-8}	3.30×10^{-8}
2	2.990	1752.0	1110.0	39.2	40.0	1.34×10^{-6}	3.42×10^{-8}	3.35×10^{-8}
3	2.990	1155.8	1110.0	59.9.	60.0	2.03×10^{-6}	3.39×10^{-8}	3.38×10^{-8}

$\bar{C}_1 = \frac{\Sigma C_1}{6} = 3.39\times10^{-8}$

$\therefore \left(\frac{\Delta_{C_1}}{C_1}\right)^2 = \left(\frac{\Delta_U}{U}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_{R_g}}{R_g+R_2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_d}{d}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_{R_0}}{R_0}\right)^2$

$= \left(\frac{0.5\%\times3}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{2}{\quad}\right)^2 + \left(\frac{0.5}{\quad}\right)^2 + \left(\frac{1}{\quad}\right)^2 = 1.97\times10^{-4}$

清华大学实验报告

系别 _____ 班号 精11 姓名 韩盈舟 （同组姓名 _____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

2、 $\Delta_4 = 4.75\times10^{-10}$

2、 $C_4 = (4.39\pm0.05)\times10^{-8}$ (A/dV)

2、误差分析：

1、书中要求的误差分析见数据处理

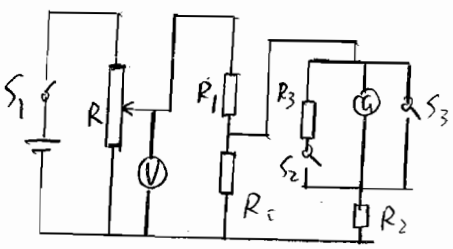
2、双刀双掷开关，正反接入电路时读数不对称，是因为开关上电阻的各个接触点有接触电阻，才使得正、反接时读数不同。

七、思考题：

1、①光标将作过阻尼运动逐渐回到原点。

②光标突然减速，然后基本停下来慢慢回到原点。因为合上S_3后，光标为过阻尼运动，合上S_3前光标速度越大则合上后阻尼越大。

2、①如右图，$R_1 \gg R_0$，$R_2 \gg R_g$，



②闭合S_3、S_1，将R和R_1调为合适数值，R_2为最大

③断开S_3，调R_2使G偏转d

④闭合S_2，保持R_2，R不变，调R_3使G偏d，则$R_3 = R_g$

3、不行，变阻器难以精确调节，且全偏法需用R_1

4、易知，Δ_1影响最大，Δ_2，Δ_3可忽略不计

优点：①无检流计非线性误差，Δ_1也较小。②读数大，更准确。

八、实验总结：

此次实验学会了使用半偏法和全偏法测电阻。很有收获。

实验过程中，仪器出现了故障，经常不知所以的指针就回0，导致我的数据重测了多次。还要多谢老师帮我检查电路是否有虚接触不良。最后，我推断，是双刀双掷开关上的下方导线接触不良。

由于重测了几次，导致完成很慢，就没有作选作实验。以后做实验时候我一定会注意线路接触问题，减少故障发生。

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名 _____ ）

作实验日期 年 月 日 教师评定

实验名称：

迈克耳孙干涉仪测空气折射率

系别 精密仪器与机械学系

班级 精11班

姓名 尚恩垚

学号 2011010494

时间 2013-04-22

编号 1号

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

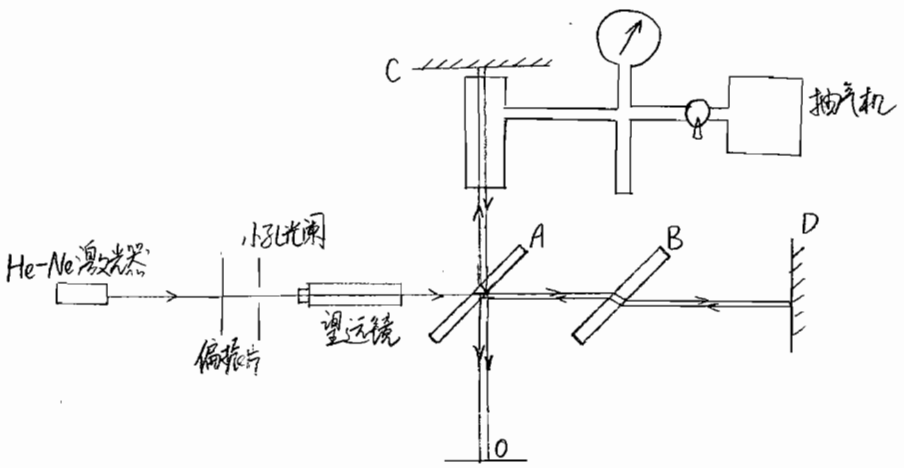
一.实验目的

1.学习一种测量气体折射率的方法；

2.进一步了解光的干涉现象及其形成条件；

3.学习调节光路的方法。

二.实验原理



1.迈克耳孙干涉仪：

迈克耳孙干涉仪是分振幅双光束的干涉仪。

当光束垂直入射至C、D镜时两光束的光程差δ满足

$$\delta = 2(n_1L_1 - n_2L_2)$$

式中，n_1 n_2分别是路程L_1 L_2上介质的折射率。

单色光产生相长干涉的条件为

$$\delta = K\lambda_0, \quad K = 0, 1, 2, \cdots$$

故有 $2(n_1L_1 - n_2L_2) = K\lambda_0$

$$2\Delta n_1 \cdot L_1 = \Delta K \cdot \lambda_0$$

$$\therefore \quad \Delta n_1 = \frac{\Delta K \lambda_0}{2L_1}$$

当L_1支路介质的折射率改变Δn_1时，干涉条纹变化数为ΔK。

2.测量方法

通常在温度处于15℃～30℃范围时，空气折射率n满足

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

$$(n-1)_{t,p}=\frac{2.8793p}{1+0.003671t}\times10^{-9}$$

式中，温度t单位为℃，压强p单位为Pa。

故在温度变化不大的情况下，$(n-1)$与p成线性关系。

又因为 $n-1=\frac{m\lambda_0}{2L}$，可知m与p成线性关系。

有 $m=\frac{m_2-m_1}{p_2-p_1}\cdot p$

代入上式，有 $n-1=\frac{\lambda_0}{2L}\cdot\frac{m_2-m_1}{p_2-p_1}\cdot p$

实验时$\Delta m=m_2-m_1=60$，故 $n=1+\frac{\lambda_0}{2L}\cdot\frac{60}{p_p}\cdot p_b$

式中，p_p为移动60个条纹所对应的管内压强的变化值p_2-p_1的6次平均值

p_b为实验时的大气压强。

三.实验仪器

He-Ne激光器，偏振片F和小孔光阑H，望远镜T，迈克耳孙干涉仪

抽气机密封玻璃管真空表，毛玻璃

四.实验步骤

1.光路调整

(1)要求目标：{ C、D镜相互垂直
入射光、经C镜反射的反射光，经D镜反射的反射光三线
经过扩束和准直后的光束应垂直入射到C、D镜的中心部

(2)粗调：①F、H、T不放入光路；

②调节激光管支架的俯仰角和位置，使光束基本水平，射

C镜的光束不粘壁，且尽量入射在C、D反射镜中心部

(3)细调：①放入F、H，使激光束正好通过小孔；

②在光源和干涉仪之间沿光束移动小孔，缓慢调整激光

方向，直至光束在移动小孔时总能正好通过小孔；

③用小纸片挡一挡C镜，观察C镜所对应光斑的位置；

④稍稍调节光束方向，使光斑中最亮的一个正好进入小孔

清华大学实验报告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

⑤用小纸片挡一挡D镜，观察D镜对应光斑的位置；

⑥调节D镜后面的三个螺钉，使最亮的光斑正好进入小孔

⑦放入望远镜，调节望远镜方位使扩束后的光斑能落在毛玻璃的中；

⑧调节D镜的垂直和水平拉簧螺丝，使条纹变粗变疏，易观察计数；

2.测量：①按下抽气机开关，使管内压强与大气压之差大于0.09 MPa，松手，读出真空表示值P_1，取对应的$m_1=0$；

②盯住毛玻璃的上一点，稍稍转动滚轮，向管内放气，此时可以观察到条纹移动，开始计数；

③当移过30个条纹时，立即停止放气，记录真空表示值P_2；

④重复以上两步，共测量6组数据，求出P_2-P_1的6次平均值，并求S_P，计算出n；

3.经老师检查数据合格后，整理实验仪器，离开实验室。

注意事项：

1.点燃激光管需要用几千伏直流高压，调节时注意不要碰到激光管上的电极，以免触电。

2.真空管抽气时要关闭真空阀。非常缓慢地转动真空阀，刚刚转不动时，立即停止。放气时反方向转过，转动的多少可控制放气速度，也就是可以控制干涉条纹的移动速度。

五.数据处理

室温$t=21.5°C$；大气压$P_0=757.4\ mmHg$；$L=189.9\pm0.1\ mm$；$\lambda_0=633.0\ nm$；$m=30$

i	1	2	3	4	5	6
P_i/MPa	-0.0946	-0.0932	-0.0925	-0.0926	-0.0938	-0.0924

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名 _____ ）

作实验日期 年 月 日 教师评定

P_2/MPa	-0.0759	-0.0752	-0.0731	-0.0732	-0.0746	-0.0728
P_2-P_1/MPa	0.0187	0.0186	0.0194	0.0194	0.0192	0.0196
平均P_p/MPa	0.01915					

首先对大气压进行温度修正：

$\Delta H = -(18.2-1.9)\times10^{-6}\times757.4\times21.5 = -0.27$ (mmHg)

$\therefore H = H_0+\Delta H = 757.4-0.27 = 757.1$ (mmHg)

$\therefore P_b = \rho gh = 13.6\times10^3\times9.81\times0.7571 = 101009.2$ (Pa)

$\therefore n-1 = \frac{\lambda_0}{2L}\cdot\frac{m}{P_p}\cdot P_b = \frac{633\times10^{-9}}{2\times189.9\times10^{-3}}\times\frac{30}{0.01915\times10^6}\times101009.2 = 2.64\times10^{-4}$

误差估算：(1) $S_p = \sqrt{\frac{\sum(x_i-\bar{x})^2}{n-1}} = 4.08\times10^{-4}$ (MPa)

$\Delta = \sqrt{2}\times0.25\%\times0.1 = 3.536\times10^{-4}$ (MPa)

$\therefore \Delta_{P_p} = \sqrt{S_p^2+\Delta^2} = \sqrt{(4.08)^2+(3.536)^2}\times10^{-4} = 5.40\times10^{-4}$ (M

又∵ $\Delta_m = 0.2$, $\Delta_L = 0.1$ mm, $\Delta_{P_b} = 0.1$ mmHg

$\therefore \frac{\Delta_{n-1}}{n-1} = \sqrt{(\frac{\Delta_L}{L})^2+(\frac{\Delta_m}{m})^2+(\frac{\Delta_{P_p}}{P_p})^2+(\frac{\Delta_{P_b}}{P_b})^2}$

$= \sqrt{(\frac{0.1}{189.9})^2+(\frac{0.2}{30})^2+(\frac{5.40\times10^{-4}}{0.01915})^2+(\frac{0.1}{757.4})^2}$

$= 0.0290$

$\therefore \Delta_{n-1} = (n-1)\cdot\frac{\Delta_{n-1}}{n-1} = 2.64\times10^{-4}\times0.0290 = 7.7\times10^{-6}$

∴最终结果 $n-1 = (2.64\pm0.08)\times10^{-4}$

(2)计算公式的理论值

$(n-1)_{理论} = \frac{2.8793\times101009.2}{1+0.003671\times21.5}\times10^{-9} = 2.70\times10^{-4}$

相对误差 $= \frac{(2.70-2.64)\times10^{-4}}{2.70\times10^{-4}}\times100\% = 2.2\%$

测量值与理论值的相对误差较大，不能很好地体现理论公式。

清华大学实验报告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

误差分析：

①从m的计数误差和真空表的读数误差。

$\frac{\Delta_L}{L}$	$\frac{\Delta_m}{m}$	$\frac{\Delta_{P_P}}{P_P}$	$\frac{\Delta_{P_b}}{P_b}$
5.27×10^{-4}	6.67×10^{-3}	0.0282	1.32×10^{-4}

比较以上数据可知，Δ_m和Δ_{P_P}对总不确定度的贡献最大，而$\Delta_{P_P}=\sqrt{S_P^2+\Delta^2}$，所以m的计数误差、真空表的读数误差是限制实验精度的主要因素。

真空表指针往往停在小格刻线之间，需要估读，Δ和S_P较大，说明对于这个实验而言，真空表的精度还不够高。要精确测量m=30的P_b值，关键在于条纹移动恰好30条。对此我有几点建议：

1）盯住屏上一点，计数通过该点的条纹数，该点可以选择暗纹与亮纹的边界，并注意开始前观察条纹的形状和移动

2）条纹的移动速度越慢越容易数清。不要在移动过程中转动真空阀，否则速度突然变化，容易数错；

3）在条纹接近30个时，要提前停止，因为人脑和动作都需要一定的反应时间。如果差一点不到30个，就不要再移动了，或重测。

②空气折射率不同于测量玻璃折射率，要其数值小，易受环境影响。空气折射率与气压，温度、湿度以及大气成分都有关系。大气温度每变化0.01°C，气压每变化3Pa，相对湿度每变化1%，都会引起折射率产生10^{-8}的变化。周围环境气压、温度、湿度的波动，会使空气折射率在一个范围内不断变化，由于我们的测量方案不能实时自动地得到n值，所以测量得到的折射率也只可能是落在这个变化范围内的一个值。具体表现是，即使不抽气放气，条纹也会有缓慢移动，但这个移动对于m的计数误差而言

清华大学实验报告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名 _____ ）

作实验日期 年 月 日 教师评定

要小很多，不是误差的主要来源。对于高精度的测量，实验条件允许的情况下，可以进行零点补偿。

③温度的测量误差。理论上假设环境是均匀一致的且变化缓慢的，测得某一点的环境数据来代表整个环境，但实际的测量环境并非均匀一致。由于空气、玻璃、光学元件的热导率不高，使温度计处的温度与管内空气不完全一致。而且不断地抽气放气也会对管内温度产生影响。建议使用类似空调的装置，使通入管中的空气保证恒温恒湿，而不要直接通入实验室外的空气，或采用多点测控的技术降低温度的测量误差。

④空气成分的改变主要是CO_2含量的变化和粉尘颗粒的影响，而且空气成分因时因地而异，难以修正。不过影响应该不大。

⑤经验公式本身的不准确性。相对误差<0.3%，很接近真值。

⑥抽气后，玻璃管内外产生压强差，两端的管壁会因压力产生微小变形。不过影响应该不大。

六. 思考题

1. 比较4.7节和4.8节两个实验的光源、两束相干性光光程差产生的原因、反射镜C和D的相对位置，条纹出现的位置等有何不同特点。

答：光源：4.7节钠光灯和白光灯，4.8节使用的是He-Ne激光器。

1）钠光灯产生线光谱，发出的光在可见光范围内有两条强谱线589.0和589.6 nm，因两条谱线很接近，可以为较好的单色光源，通常取平均值589.3 nm作为波长。由于发光效率高，强度大，光色单纯，是实验室最常用的单色光源。正常使用前需要预先点燃5～6 min。

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

2) He-Ne激光器光束发射角小、亮度高、单色性和相干性
它是很好的定向光源和单色光源。预先点燃经20min
光强才较稳定。

产生光程差的原因：1) 4.7节通过改变C、D'镜之间的距离d
和加入玻璃介质的方法产生光程差。
2) 4.8节通过改变玻璃管中空气的密度(抽气、放
来改变空气折射率，产生光程差。

C、D的相对位置：考虑D镜的像D'与镜C的位置关系
1) 4.7节等倾干涉要求CD'平行
等厚干涉要求C、D'形成一很小夹角，在CD'间产生楔形
2) 4.8节C、D'相距较远，理论上要求CD'平行，但实际测量
时D'与C成微小角度，形成一组干涉条纹，方便测量。

2. 实验中抽气后，在向管内充气的同时可看到在屏上某一点处有条纹移过，这表明在该点处的光强是怎样变化的？

答：条纹移动是屏上各点处光强变化的视觉效果。若本身为暗条
则光强先增大再减小；若本身为亮条纹，则光强先减小再增大。

3. 本实验是否可用钠光灯？

答：不能。原因主要有两个，①钠光源波长不唯一，无法在实验过程中
观察到清晰可辨的干涉条纹，无法通过调节调节消除钠双
不同波长光产生的条纹重叠。②钠光源方向性差，光强小且不
稳定。

七. 感想与体会

光学实验的重点在于光学元件的调节和对所需物理量的精
测量。

光学元件的调整复杂精细，需要耐心细致地反复调节，才能
达到最佳效果。实验时我只是通过不断尝试，以期达到三线合

清华大学实验报告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

的效果，书上也没有太明确的方法。课下我通过对实验过程和实验现象的反思，并查阅相关资料，有几点体会：

①光学实验开始调节时不要直接就进行大范围的调整，可以先观察光路质量，在此基础上进行微调；

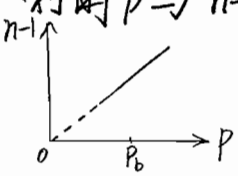
②如果激光器光束能始终通过小孔，由于小孔的高度一定，说明激光器已经基本水平，由C镜反射回来的光斑应该与小孔相距不远。如果偏离较远，则可能是C镜镜面不垂直造成的。实验时C镜可能不完全垂直，那么根据C镜反射光斑进行调节的激光器也会不水平，根据激光器进行调节的D镜也会倾斜。这样虽然也可以得到干涉条纹，但干涉条纹位置较偏，说明光路不水平，那么光在玻璃管中距离会略大于L。

③加上望远镜打束后，如果干涉条纹不在视场中央，看到的是部分圆弧，可能是由于C镜的角度和位置不是很好。可见C镜的重要性

④理论上要求CD'平行，会得到等倾干涉圆环，但实际操作中CD'不垂直得到的一组条纹反而便于记数和测量。条纹越密，说明CD'夹角越大。

迈克尔孙干涉仪是精密的光学仪器，在调节实验中首先要了解它的光路与原理，边调节边观察并认真分析，在理论指导下针对出现的异常现象进行分析并采取正确的措施进行调节，直到得到理想的观察条纹为止。

空气折射率的测量可分为直接测量和间接测量两种。直接测量利用p与n-1的线性关系，建立p与n-1的简单的一一对应关系，



代入P_b即可得n-1。而实验内容就是测量$\frac{n-1}{p}$，即(n-1)~p图上直线的斜率。因为理想的真空状况p=0难以达到，测$\frac{\Delta(n-1)}{\Delta p}$即可，又由于$\Delta(n-1)=\Delta m\cdot\frac{\lambda}{2L}$，问题就转化为测$\frac{\Delta m}{\Delta p}$。间接测量法，是利用理论公式$n-1=\frac{2.8793P}{1+0.003671t}\times$代入当时的p、t，间接地计算出n-1。本次实验我们使用了这2种方

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

异比较了两种方法的结果。结果相差较大，这应该不是偶然，说明直接测量法的精度不够高。直接测量法易受环境波动的干扰，无法实时得到折射率，且 α_m 在实际操作中很难固定为30，因而误差较大。间接测量法利用现已有公式，如果使用计算机采集温度、气压传感器的数据，就可以实时、连续、自动地计算出折射率，且相对误差 $<0.3\%$。单纯从测量方法的角度，一个好的测量方案应当尽量减小随机误差，包括人为的读数误差。但开设大物实验的课程的目的，是在操作和调整中培养创新意识、物理直觉、实验动手能力，熟悉仪器操作，而不是利用现成的计算机软件得到高精度的实验结果。从这个角度看，虽然使用迈克尔孙干涉仪未必是测最好的测空气折射率的方法，但却是一个合适的学习干涉仪使用的实验训练。

感谢郭老师的耐心讲解和悉心指导。

清华大学实验报告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

~~$P_b = 100953\ Pa$~~. $L = 189.9 \pm 0.1\ mm$. $\Delta P_b = 0.1\ mmHg$ $m = 30$ ~~$t = 21.5$~~

i	1	2	3	4	5	6
P_1	-0.0946	-0.0938	-0.0925	-0.0926	-0.0938	-0.0924
P_2	-0.0759	-0.0752	-0.0731	-0.0732	-0.0746	-0.0728
$P_2 - P_1$	0.0187	~~0.0180~~ 0.0186	0.0194	0.0194	0.0192	0.0196
P_p			~~0.01965~~ 0.01945			

~~$S_p = 4.08 \times 10^{-4}\ MPa$~~

~~$\Delta n = n - 1 =$~~ $\frac{633 \times 10^{-9}}{2 \times 189.9 \times 10^{-3}} \times \frac{30}{0.01915 \times 10^6} \times 101009.2 = 2.64 \times 10^{-4}$

$P_b = \frac{\text{~~760.4~~}}{757.4}\ mm\ Hg = \text{~~100953 Pa~~}\ 101009.2\ Pa$.

$\Delta = 256 \times 0.1\ MPa$

(3)

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名 _____ ）

作实验日期 年 月 日 教师评定

3条 ~~240°~~ 70°

6条 ~~245°~~ 145°

焦距 150 mm

孔径 40 mm

$I = 3.5A$

k-1	87	1.138	1.456	2.425	1.505	0.720
k-1	3	1.545	1.855	2.830	1.920	1.110
k	7	2.230	2.565	3.~~8~~515	2.5~~8~~70	1.699
k	7	6.200	6.535	7.5~~8~~50	6.508	5.88~~9~~
k-1	3	6.915	7.220	8.240	7.170	6.605
k-1	7	7.305	7.620	8.655	7.550	6.960

$I = 2.50A$	$I = 3.00A$	$I = 4.00A$
~~2.595~~ 0.250	0.240	0.205
2.940 0.575	0.585	0.590
3.709 1.349	1.290	1.250
4.688 5.395	5.435	5.460
8.470 6.138	6.140	6.14~~6~~
6.475	6.495	6.515

1/28 刘子华

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定 9+

实验名称：

偏振光学实验

系别 精密仪器与机械学系

班级 精11班

姓名 尚恩垚

学号 2011010494

时间 2013-04-29

组别 双一晚E，3号

清华大学实验报告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名 _____ ）

作实验日期 年 月 日 教师评定

偏振光学实验

一. 实验目的

1. 理解偏振光的基本概念，偏振光的起偏与检偏方法；
2. 学习偏振片与波片的工作原理与使用方法。

二. 实验原理

1. 光波偏振态

一单色偏振光可分解为两个偏振方向相互垂直的线偏振光的叠加，即 $\begin{cases} E_x = a_1 \cos \omega t \\ E_y = a_2 \cos(\omega t + \delta) \end{cases}$

式中 δ 为 x 方向偏振分量相对于 y 方向偏振分量的位相延迟量，a_1，a_2 分别是两偏振分量的振幅，ω 为光波的圆频率。

除了 $\delta = 0, \pi, \pm\frac{\pi}{2}$，上式表示的是椭圆偏振光。一般来说椭圆偏振光的描述需要光强、椭圆长轴方位角、椭圆短半轴与长半轴之比、椭圆的旋向四个参量。

2. 偏振片

偏振片主要有主透射率和消光比两个性能指标。

对于一个实际的偏振器，沿透射方向振动的光波的光强透射率和沿消光轴方向振动的光波的光强透射率被称为主透射率，分别记为 T_1，T_2。

消光比 $e = \frac{T_2}{T_1}$

振动方向和透射轴方向成 θ 角的线偏振光经过偏振片后透射率 $T_\theta = (T_1 - T_2)\cos^2\theta + T_2 = T_1\cos^2\theta + T_2\sin^2\theta$（马吕斯定律）。

完全非偏振光经过两个透射轴成 θ 角且主透射率相同的偏振器后，总的透射率 $T_\theta = \frac{1}{2}(T_1^2 + T_2^2)\cos^2\theta + T_1 T_2 \sin^2\theta$

实验中测出 $\theta = 0$ 和 $\theta = \frac{\pi}{2}$ 时的总透射率 $T_{//}$ 和 $T_\perp$ 之比，即测出透射光强极值之比 I_{min}/I_{max}，就可以算出偏振器的消光比

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

$$\frac{I_{min}}{I_{max}}=\frac{T_{\perp}}{T_{//}}=\frac{T_1T_2}{\frac{T_1^2+T_2^2}{2}}=\frac{2e}{1+e^2}\approx 2e$$

3. 延迟器和波片

延迟器有两个互相垂直的特定方向，慢轴和快轴。

传播过程中，慢轴分量相对于快轴分量将会产生位相延迟 δ_r

$$\delta_r=\frac{2\pi(n_s-n_f)d}{\lambda_0}=\frac{\omega(n_s-n_f)d}{c_0}$$

式中，d 为位相延迟器的厚度；n_s、n_f 分别为快慢轴方向振动的线偏振光的折射率；c_0、λ_0 分别为真空中的光速和波长；ω 为光波圆频率。

$\frac{1}{4}$ 波片的相延 $\delta_r=2\pi N+\frac{\pi}{2}$；$\frac{1}{2}$ 波片或半波片的相延 $\delta_r=(2N+1)\pi$；

全波片的相延 $\delta_r=2\pi N$

波片在使用时首先要定出快慢轴方向，将待测波片C放在已正交消光的偏振器P和A之间，旋转波片C使三者仍保持消光状态，这时波片的一个轴就已经平行于P的投射轴方向。

将待测 $\frac{1}{4}$ 波片的轴和另一个 $\frac{1}{4}$ 波片的已知快轴方向平行，这两个波片合成了一个半波片或全波长。如果经过测量操作判断出了合成波片的类型，就可以判断出待测波片的快轴方向。

4. 反射和折射时的起偏现象

平面电磁波以入射角 θ_i 由空气射到折射率为 n 的无吸收介质表面，将发生折射和反射。

反射角 $\theta_r=\theta_i$ 折射角 θ_t 满足 $\sin\theta_t=\frac{\sin\theta_i}{n}$

将入射波分解为电矢量分别平行或垂直于入射面的两个分量P和S，把P和S分量的振幅反射率 r_p，r_s 平方可得相应的光强折射率 R_p，R_s

$$R_p=r_p^2=\left[\frac{\tan(\theta_i-\theta_t)}{\tan(\theta_i+\theta_t)}\right]^2,\quad T_p=1-R_p$$

$$R_s=r_s^2=\left[\frac{\sin(\theta_i-\theta_t)}{\sin(\theta_i+\theta_t)}\right]^2,\quad T_s=1-R_s$$

当 $\theta_i+\theta_t=\frac{\pi}{2}$ 即 $\theta_i=\arctan n=\theta_B$ 时，$R_p=0$，这一特征角 θ_B

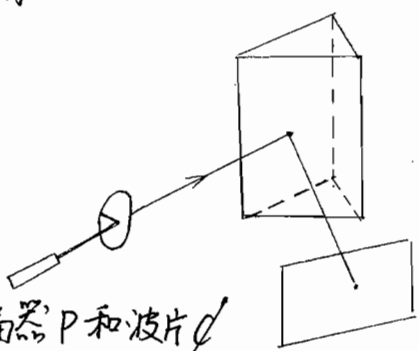
清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名 _____ ）

作实验日期 年 月 日 教师评定

5. 根据布儒斯特角的性质判断偏振器的透射轴方向：

经过偏振器P的光入射到折射率 $n \approx 1.6$ 的玻璃棱镜表面，先预置入射角 $\theta_i \approx 58°$，旋转P到某一位置可看到反射光点很暗。再反复微调入射角 θ_i 及P的方位角使光点最暗。此时 $\theta_i = \theta_B$，P的透射轴方向平行于入射面。



6. 椭偏法测 $\frac{1}{4}$ 波片相延

PCSA系统的测量原理是由起偏器P和波片C产生一束椭圆偏振光，然后调节P的方位角改变该椭圆偏振光x方向和y方向偏振分量的相延使得光波通过样品S后变成线偏振光，即x方向和y方向的总相延为0或π，从而计算出样品S的 ψ_s 和 δ_s。

PCSA系统（起偏器P，$\frac{1}{4}$ 波片C，样品S，检偏器A）是一种典型的椭偏测量光路。

三. 实验仪器

分光计，氦氖激光器，起偏器，检偏器；两个 $\frac{1}{4}$ 波片，C_0 C_x；光强探测器（硅光电池，毫伏表），电阻箱；棱镜。

四. 实验内容

[准备]

1. 提前开启激光电源，20min左右光强才较稳定；
2. 粗调起偏器和检偏器的轴线，小平台基本水平且与分光计主轴垂
3. 调节电阻箱阻值200Ω；调节平行光管的位置和方向，使光束通起偏管中心附近，由检偏管中心射出，且毫伏表 I_{max} 大于1mV。

[观测布儒斯特角]

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

4. 将棱镜放在小平台上

1）先确定 $\alpha_{i=0}$：

用小纸片扎一小孔放在激光器出射光束处，通过调整使棱镜表面反射光束在纸屏上的亮点与小孔重合，记录方位角 $\alpha_{i=0}$；

2）测 α_B：

旋转棱镜使光束入射角约为57°；旋转至某一位置可看到白屏上的反射光点较暗；边调节起偏器P盘，边旋转棱镜，在该位置附近转动，可看到光点由明到暗，再由暗到明；反复微调P盘和棱镜使光点最暗，记录此时棱镜的方位角 α_B。

[测定P盘透射轴方向]

5. 测量布儒斯特角时使光点最暗的P盘方向 $P_{\leftrightarrow}$；重复调节6次，计算平均值；将P盘置于平均值位置。

移去棱镜；转动检偏器A盘，使毫伏表示值为最小值，记下A盘度盘的读数 α：

[消光比的测量]

6. P盘不动，转动A盘，取 $R_1=R_2=200\Omega$，依次交替测量透射光强的最大值 I_{max} 和最小值 I_{min}，并测量挡住光源时的 I_0.

[测量透射光强 I_m 和两偏振器夹角 θ 的关系]

7. 转A盘使 $\alpha=\alpha_{\updownarrow}+90°+\theta$，测量 θ 分别为0°，15°，30°，45°，60°，75°，80°，84°，87°，90°，180°时的 I_m.

[定波片 C_0 的快轴方向]

8. 调节 $\alpha=\alpha_{\updownarrow}$，把波片 C_0 轻轻安装到P盘所在侧的度盘上；C_0 快轴的大致方向已用白点标出，使快轴大致在竖直方向，旋转 C_0 使毫伏表示值最小，记录 C_0 靠近中心的游标盘读数。

[线偏振光经过 $\frac{1}{4}$ 波片]

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名 _____ ）

作实验日期 年 月 日 教师评定

9. 在上步实验的基础上，C_0 慢轴已处于水平方向；
旋转 P盘，使 P透射轴与水平夹角 $P-P_{\leftrightarrow}$ 分别为 0°，22.5°，45.0°，67.5°，43.0°，测量每个角度时毫伏表的最大最小值及毫伏表最大时 A盘示值 a_i，具体操作：
旋转 P盘，使 $P=P_{\leftrightarrow}+\beta$；旋转 A盘，使毫伏表示值在最大值附近，反复调节找到最大值位置，记录毫伏表最大值和 A盘示值 a_i；旋转 A盘使毫伏表示值最小，记录毫伏表的最小值。

[定待测波片 C_x 的轴方向]

10. 取下 C_x，旋转 C_x 使毫伏表示值最小，此时 C_x 某轴已垂直于 P 的透射即达到竖直方向，记录度盘示值。

[观测偏振光通过 $\frac{1}{2}$ 波片或全波片]

11. 调节 C_0 快轴在垂直方向，C_x 某轴在垂直方向；分别调节 $P-P_{\leftrightarrow}$ 为 0，15.0°，30.0°，45.0°，测量毫伏表示值最小时的 A盘读数 a_i；计算 $a_{\updownarrow}-a_i$

12. 调节 C_0 快轴在水平方向，C_x 某轴保持在垂直方向；分别调节 $P-P_{\leftrightarrow}$ 为 0，15.0°，30.0°，45.0°，测量毫伏表示值最小时的 A盘读数 a_i；计算 $a_{\updownarrow}-a_i$。

13. 经老师检查数据合格后，整理仪器，离开实验室。

注意事项：

1. 光学元件轻拿轻放，切忌用手触摸光学表面；
2. 强光会灼伤眼睛，不要用眼直视激光光束。

五. 数据处理

4. 观测布儒斯特角

光束正入射棱镜表面时平台方位角 $2_{i=0}=$ 347°46′

入射角为布儒斯特角时平台方位角 $2_B=$ 45°05′

布儒斯特角 $\theta_B=2_B-2_{i=0}+360°=$ 57°19′ $n=\tan\theta_B=$ 1.56

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

n的相对误差为 $\frac{1.56-1.54}{1.54}\times 100\% = 1.21\%$

引起误差的因素：

①棱镜表面可能并不平直，存在散射等原因。

②棱镜在布氏角附近一个小范围内转动时，光点均比较暗淡，通过目测难以判断光强最小时的准确角度。理论分析可以发现，在 $R_P-\theta_i$ 关系图上，$\theta_i=\theta_B$ 时 $\frac{\partial R_P}{\partial \theta_i}=0$，$\theta_B$ 附近 R_P 变化缓慢，即布氏角处光亮度对 θ_i 的变化不敏感。

③测量时的光路可能不完全水平或垂直，与理论情况不完全一致。

④分光计未考虑偏心的消除，只读了一个表盘，但影响应该很小，不是主因素。

该方法简便易行，可以半定量地测定布儒斯特角，但作为间接测定折射率的方法，其准确度不高。因为 n 与 θ_B 之间存在 $n=\tan\theta_B$ 的定关系，只要能准确测出其中一个，就可以推算出另一个。

5. 定偏振器的透射轴方向

序号	1	2	3	4	5	6	标准差	$\overline{P_{\leftrightarrow}}$	$a_{\updownarrow}$
$P_{\leftrightarrow}$	262.6	264.5	263.4	264.3	264.0	264.2	0.71	263.8	174.4

$$\overline{P_{\leftrightarrow}}=\frac{\sum P_{\leftrightarrow}}{6}=263.8^\circ$$

$$S=\sqrt{\frac{\sum(P_{\leftrightarrow i}-\overline{P_{\leftrightarrow}})^2}{5}}=0.71^\circ$$

本实验在上一步骤观测到布儒斯特角后来测定。$P_{\leftrightarrow}$ 是后续实验的基准。测量 P 透射轴水平时的度盘示值，仍用肉眼来观察光强，在反复调节 P 的转角以确定消光态。人眼对光亮区分的极限对应的度数在 1° 左右，就其精确度对后续实验而言已经足够了。

$a_{\updownarrow}$ 只测定了一次，可能存在随机误差，但考虑到反射面的偏斜，仪器本身的精度，实验的要求，其测量也可认为是较准确的。

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名 _____ ）

作实验日期 年 月 日 教师评定

6. 测消光比e

$R_2=200\Omega$	I_{max}（单位mV）	$I_1=6.445$	$I_3=6.426$	$I_5=6.436$	$I_7=6.438$
$R_1=200\Omega$	I_{min}（单位mV）	$I_2=-0.002$	$I_4=0.000$	$I_6=-0.001$	挡住光源时 $I_0=-0.003$

消光比 $e=\frac{R_2}{R_1}\cdot\frac{(I_4+I_6-2I_0)}{4I_5}=\frac{200}{200}\cdot\frac{[0-0.001-2\times(-0.003)]}{4\times6.436}=1.94\times10^{-4}$

这个测量结果并不准确：

1）如果认为 $\Delta_I=0.001$ mV，则两次测量之差 $\Delta_{(I_{min}-I_0)}=\sqrt{2}\times0.001$ mV，这样的不确定度，对于约为0.001的 I_{min} 来说，就已经相当大了。

2）由于周围环境影响，仪器状态的波动，毫伏表的灵敏度等原因，毫伏表示值并不稳定，对最小光强表现为在一个范围内上下波动。

①因为最小光强难以测准，而且在e的算式中对结果影响较大，所以只能认为消光比e的数量级在 $10^{-4}\sim10^{-5}$。建议使用量程更小的电压表，或改用在更大范围内呈线性的光电池。

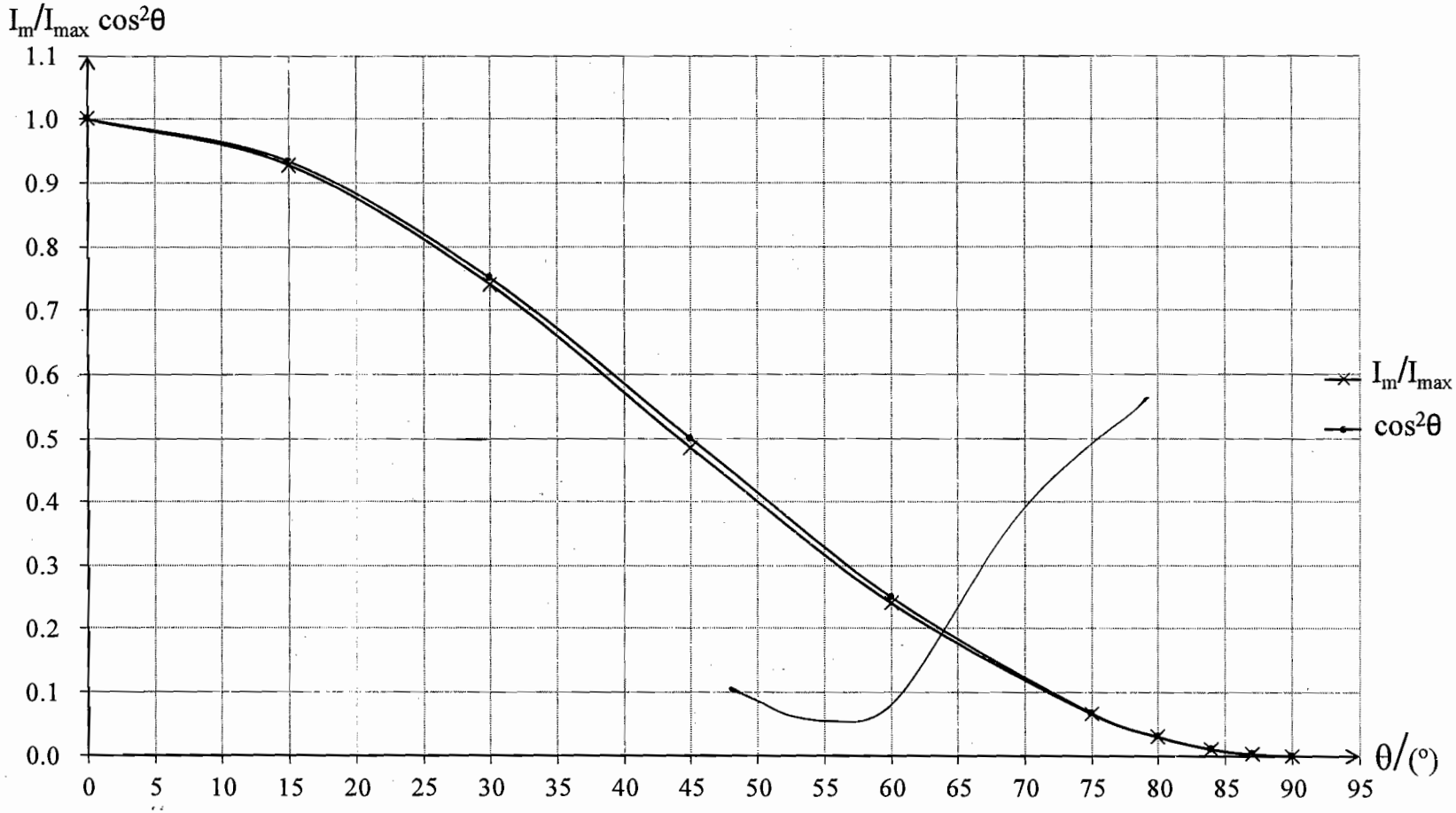
②R的选择也会影响结果的准确和性。测最小光强时电流较小，若R值过小，则所测的电压表偏小，难以测准；若R值过大，则在测最大光强时光强与电流的线性程度下降（因为光电池内阻随光强增加而减小，负载电阻R越大，光电池的线性范围越小），所以说在测 I_{max} 时R值应较小些，在测 I_{min} 时R值应较大些。

③需要注意的是，在测 I_{max} I_{min} 等一系列光强时，应当将分光计上的望远镜平行光管锁紧，以防滑动，因为光方向的改变也会影响接收的光强。

7. 测量透射光强 I_m 与两偏振器夹角θ的关系

电阻箱示值 $R=$ 200 Ω，$P=$ 263.8°，$\alpha_{\downarrow}=$ 174.4°，$I_{max}=I_m(\theta=0°$ $I_{min}=I_m(\theta=9$

夹角θ/度	0	15.0	30.0	45.0	60.0	75.0	80.0	84.0	87.0	90.0	
鼓$\alpha=\alpha_{\downarrow}+8°+\theta$	264.4	279.4	294.4	309.4	324.4	339.4	344.4	348.4	351.4	354.4	8
I_m/mV	6.330	5.872	4.687	3.070	1.523	0.417	0.187	0.065	0.015	0.000	6.



I_m/I_{max}~θ 与 $\cos^2\theta$~θ的关系曲线

清华大学实验报告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

（续表） 作实验日期 年 月 日 教师评定

$\approx I_{max}\cos^2\theta + I_{min}$	—	5.906	4.748	3.165	1.583	0.424	0.191	0.069	0.017	0
$\frac{\lvert I_c - I_m\rvert}{I_m}$	—	0.58%	1.3%	3.1%	3.9%	1.7%	2.1%	6.1%	13.3%	0

$\theta = 84°$ 时 $\frac{|I_c - I_m|}{|I_m - I_0|} = \frac{|0.069 - 0.065|}{|0.065 - (-0.003|} \times 100\% = 6.1\%$

$\theta = 87°$ 时 $\frac{|I_c - I_m|}{|I_m - I_0|} = \frac{|0.017 - 0.015|}{|0.015 - (-0.003)|} \times 100\% = 13.3\%$

$\theta = 90°$ 时 $\frac{|I_c - I_m|}{|I_m - I_0|} = \frac{|0 - 0|}{|0 - (-0.003)|} \times 100\% = 0$.

由图可以看出，$\frac{I_m}{I_{max}} \sim \theta$ 和 $\cos^2\theta \sim \theta$ 两条曲线重合得很好；并用 Excel 对 I_m 与 $\cos^2\theta$ 两组数据进行线性拟合，相关性 $r^2 = 0.9998$，这都验证了马吕斯定律的正确性。

从表中数据可以看出，相对误差 $\frac{|I_c - I_m|}{I_m}$ 或 $\frac{|I_c - I_m|}{|I_m - I_0|}$ 随 θ 的增大有显著的增大趋势。但比较 I_c 和 I_m，发现在 θ 较大处绝对误差 $|I_c - I_m|$ 并不大。说明是因为测量值减小，引起相对误差增大的；并不能说明测量随 θ 增大而越来越不准了。

转过 180°，所测得 I_{max} 并不相同。测量时 $\theta = 0° \sim 90°$ 应在同一个 90° 范围内测量，并利用该范围内的 $I_{max}(\theta = 0°)$ 计算理论值。

由马吕斯定律的准确性，可以利用已知的最大光强和最小光强及其角度进行其他角度的标定。此时只需测得该角度下的透射光强即可。

8. 定波片 C_0 快轴方向.

$P = P_{\leftrightarrow} =$ 263.8°，$a_{\updownarrow} =$ 174.4°，波片 C_0 快轴在垂直方向时度盘示值

$C_0 =$ 71.4°

当偏线偏振光经过 $\frac{1}{4}$ 波片时，其振动在波片的快轴与慢轴方向的分振动受到不同的滞后，相位差为 $\frac{\pi}{2}$，一般情况会变为椭圆偏振光只有当 P 盘的偏振方向与 C_0 某轴平行时，可以得到线偏振光，此时通过检偏器与未加波片时相同，都会发生消光。因为 P 盘透射轴水平，

清华大学实验报告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名 _____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

则 C_0 的一轴也水平，那么 C_0 的另一轴就竖直了。实验时先使 C_0 标有白点的快轴方向大致竖直，在该位置附近旋转 C_0 使毫伏表示值最小。误差的主要来源还是光强最小值的确定。

由于每个人安装 C_0 时的角度都不同，所以 C_0 快轴竖直时的角度本身没有意义，为后续实验作为基准。

9. 线偏振光通过 $\frac{1}{4}$ 波片

$\beta=p-P_{\leftrightarrow}$ /度	0.0	22.5	45.0	67.5	43.0
P盘 $p=\beta+P_{\leftrightarrow}$	263.8	286.3	308.8	331.3	306.8
a_i	263.1	260.3	221.3	172.7	231.9
$\psi=a_{\updownarrow}+90°-a_i$	1.3	4.1	43.4	91.7	32.5
I_{max}	4.022	5.630	4.468	4.740	4.560
I_{min}	0.001	0.890	3.452	0.759	3.246
$\frac{b^2}{a^2}\approx\frac{I_{min}}{I_{max}}$	0.0002	0.1581	0.7726	0.1601	0.7118
用式(11)计算 δ_r	—	76.2°	82.6°	77.3°	81.2°
用式(2)计算 ψ	—	6.71°	无解	83.8°	32.7°

总的来说，测量值与理论情况相差较大，其中波片 C_0 的相延 δ_r 并不准确地等于 $\frac{\pi}{2}$。

理论上，假设 $\delta_r=\frac{\pi}{2}$，当P轴与 C_0 慢轴夹角 $<45°$ 时，为椭圆偏振光，入射线偏振光在慢轴上的分量大于在快轴上的分量，$\psi=0$，$\frac{b^2}{a^2}=\tan^2\beta$；当 $\beta=45°$ 时，快轴慢轴上的振动振幅相等，近似为圆偏振光；当 $\beta>45°$ 时，为椭圆偏振光，方位角 $\psi=90°$，$\frac{b^2}{a^2}=\cot^2\beta$；当 $\beta=0$ 或 $90°$ 时，为线偏振光。

实际测量中，$\delta_r\neq\frac{\pi}{2}$。

$\beta=0.0°$ 时，$\psi=1.3°$ 接近于0，引起误差的可能原因是 $a_{\updownarrow}$ 的测量和光强最大值处 a_i 的测量不十分准确，造成误差积累；$I_{min}=0.0$ 接近于0，与理论符合，I_{min} 不为0的可能是因为外部光源的干扰

清华大学实验报告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

P盘A盘消光比不为0，两者偏振方向不完全垂直。

$\beta=22.5°$时，$\psi=4.1°$与$0°$存在不小的偏差，$\frac{b^2}{a^2}$与$\tan^2 22.5$接近，引起误差的可能原因：①由于制造工艺、生产成本等原因，$\frac{1}{4}$波片的相延很难做到准确等于$\frac{\pi}{2}$；②实验中角度测量造成误差积累。

$\beta=45.0°$时，理论上应为圆偏振光，实际测量时A盘转动，光强变化不明显，这样所测得的$\frac{I_{min}}{I_{max}}$会不准确。通常取β略小于45°（如43.0）来计算δ_r。由于$\delta_r\neq\frac{\pi}{2}$，$\beta=45.0°$只能说是近似圆偏振光。

$\beta=67.5°$时，ψ与$90°$较接近，$\frac{b^2}{a^2}$与$\cot^2 67.5°$较接近，与理论符合。

$\beta=43.0°$时，与$\beta=45.0°$的情形类似，可利用公式$|\sin\delta_r|=\frac{2\sqrt{\frac{I_{min}}{I_{max}}}}{\sin(2\beta)\left(1+\frac{I_{min}}{I_{max}}\right)}$来计算波片的相延。

10. 定波片C_x的轴方向.

$P=$ 263.8° $a_{\updownarrow}=$ 174.4°

波片C_x的一个轴在垂直方向时度盘示值$C_x=$ 187.5°

该步操作与第8步类似，不同之处在于没有快轴大致方向的标识，只能通过后续步骤才能区分快慢轴。

C_0已在光路，因为其快轴方向与P透射轴垂直，所以通过C_0的后仍是线偏振光。C_0的存在不会影响C_x轴向的确定。

11. 线偏振光通过$\frac{1}{2}$波片或全波片

C_x某轴在垂直方向，度盘示值 $C_x=$ 187.5°

C_0快轴在垂直方向，度盘示值 $C_0=$ 71.4°

$P-P_{\leftrightarrow}$	0.0	15.0	30.0	45.0
P	263.8	278.8	293.8	308.8
消光时A盘$a_{\updownarrow}$	174.8	193.4	206.4	222.9
$a_{\updownarrow}-a_{\updownarrow}$	-0.4	-19	-32	-48.5

两个$\frac{1}{4}$波片叠放时，若快轴方向相同，则组成$\frac{1}{2}$波片，且$\frac{1}{2}$波片的快轴方向与两个$\frac{1}{4}$波片相同；若快轴方向垂直，则组成全波片。

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名 _____ ）

作实验日期 年 月 日 教师评定

线偏振光透过$\frac{1}{2}$波片后，振动方向为原方向相对快轴的镜像方向，旋转入射光，透射光反方向旋转；透过全波片时振动方向不变。

由表中数据可知，此时两波片组成$\frac{1}{2}$波片；C_x快轴方向竖直，示值187.

12. 线偏振光通过$\frac{1}{2}$波片或全波片

C_x某轴在垂直方向，度盘示值 C_x = 187.5°

C_0快轴在水平方向，度盘示值 C_0 = 161.4°

$P-P_{\leftrightarrow}$	0.0	15.0	30.0	45.0
P	263.8	278.8	293.8	308.8
消光时A盘a_i	173.9	156.8	142.8	126.7
a_0-a_i	0.5	17.6	31.6	47.7

分析同步骤11，此时两波片组成全波片；C_x快轴方向竖直，示值187.

六. 思考题

1. 如何由几个相同的$\frac{1}{4}$波片构成$\frac{1}{2}$波片和全波片？如何判断某光学器件是$\frac{1}{2}$波片还是全波片？

答：1）当2个$\frac{1}{4}$波片，快轴与快轴平行时，构成$\frac{1}{2}$波片；

当2个$\frac{1}{4}$波片，快轴相互垂直时，构成全波片。

2）线偏振光透过$\frac{1}{2}$波片后，振动方向为原方向相对快轴的镜像方向。

线偏振光透过全波片后，振动方向不变。

可以旋转入射线偏振光，若透射光同方向旋转，则为全波片，

若透射光反方向旋转，则为$\frac{1}{2}$波片。

2. 讨论光隔离器中波片快慢轴与P透射轴应满足的位置关系及光隔离器的原理。

答：波片快慢轴应与P透射轴夹角应为45°.

$\frac{1}{4}$波片型光隔离器的原理：

光通过偏振片P，成为振动方向与P透射轴平行的线偏振光；

再通过夹角为45°的$\frac{1}{4}$波片，变为左旋（或右旋）圆偏振光；

清 华 大 学 实 验 报 告

系别_____ 班号_____ 姓名_____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

在光学表面M发生反射，由于存在半波损失，反射后旋向改变，变为右旋（或左旋）圆偏振光；
旋向改变了的圆偏振光反向通过$\frac{1}{4}$波片，成为线偏振光，但其偏振方向与入射线偏振光垂直，所以无法通过偏振片P，从而实现隔离反向光的作用。

七. 感想与体会

此次实验为半定量测量，一些测量值与理想情况存在不小的偏差，但可以定性地体现偏振现象，并较准确地验证了马吕斯定律。

马吕斯定律，布儒斯特定律，双折射现象都是光偏振的重要内容。光的偏振特性清楚地体现了光的横波性，让我们通过实验进一步加深了对课本内容的理解。

感谢田老师的耐心讲解和悉心指导。

偏振光学表格每人只发一张　姓名尚思士 学号2011010494 班号精11 座位号3 日期＿＿＿＿

(注意：仪器娇贵，手下留情；报告中要有数据分析、讨论和结论。)

4. 观测布儒斯特角： 光束正入射棱镜表面时平台方位角$\alpha_{i=0}$= 347°46′；入射角为布儒斯特角时平台方位角α_B = 45°05′；布氏角的测量值$\theta_B = \alpha_B - \alpha_{i=0}$ = 57°19′；由此算出的折射率 $n=\tan\theta_B$ = 1.56；n的相对偏差 $(n-1.54)/1.54$= 1.21 %。

5. 测定偏振器透射轴方向： 布氏角时起偏器P的透射轴在水平方向，方位角为$p_{\leftrightarrow}$；检偏器A和P正交时（P盘置于平均值$\overline{p_{\leftrightarrow}}$，A盘转至消光状态），A的方位角记作 $a_{\updownarrow}$。

序号	1	2	3	4	5	6	标准差	平均值$\overline{p_{\leftrightarrow}}$	$a_{\updownarrow}$
$p_{\leftrightarrow}$	262.6	264.5	263.4	264.3	264.0	264.2	0.71	263.8	174.4

6. 测消光比 e ： 当 $p=\overline{p_{\leftrightarrow}}$ 时，交替测量透射光强极值 I_{max} 和 I_{min} (直接记录毫伏表读数)。

※提示：检查仪器，数字毫伏表显示的 I_{max} 值大于 1mV 才能开始实验。

$$e=\frac{R_2}{R_1}\cdot\frac{(I_4+I_6-2I_0)}{4\cdot I_5}$$

R_2=200Ω	I_{max} (单位mV)	I_1=6.445	I_3= 6.426	I_5= 6.436	I_7= 6.438
R_1= 200 Ω	I_{min} (单位mV)	I_2= -0.002	I_4= -0.000	I_6= -0.001	挡住光源时I_0= -0.003 (参见表7后注)

7. 测量透射光强I_m与两偏振器夹角θ 间的关系：

电阻箱示值R= 200 Ω，$p=\overline{p_{\leftrightarrow}}$ = 263.8°；$a_{\updownarrow}$ = 174.4°；

$I_{min}=I_m$ ($\theta=90°$)

$I_{max}=I_m$ (夹角θ=0度时)

夹角θ (度)	0	15.0	30.0	45.0	60.0	75.0	80.0	84.0	87.0	90.0	0
A盘 $a=a_{\updownarrow}+90°+\theta$	264.4	279.4	294.4	309.4	324.4	339.4	344.4	348.4	351.4	354.4	84.4
I_m (mV) 测量值	6.330	5.872	4.687	3.070	1.523	0.417	0.187	0.065	0.015	0.000	6.430
$I_c\approx I_{max}(\cos\theta)^2+I_{min}$	※	5.906	4.748	3.165	1.583	0.426	0.191	0.069	0.017	0	※
$\lvert I_c-I_m\rvert/I_m$ (%)	※	0.58%	1.3%	3.1%	3.9%	1.7%	2.1%	6.1%	13.3%	0	※

注：(1)$I_c\approx I_{max}(\cos\theta)^2+I_{min}$为计算值；$|I_c-I_m|/I_m$为相对偏差。(2)用$|I_c-I_m|/|I_m-I_0|$计算 84、87、90°时的相对偏差，式中 I_0为挡住光源时的值（包含背景光、光电池暗电流、噪声、寄生电势和电表零点漂移等综合影响）。

8.定波片C_0快轴方向(大致方向已知) $\overline{p_{\leftrightarrow}}$ = 263.8，$a_{\updownarrow}$ = 174.4，波片C_0快轴在垂直方向时度盘示值C_0= 71.4°

9. 线偏振光通过1/4波片，C_0度盘示值C_0= 71.4°

$\beta=p-p_{\leftrightarrow}$ (度)	0.0	22.5	45.0	67.5	43.0
P盘方位角 $p=\beta+p_{\leftrightarrow}$	263.8	286.3	308.8	331.3	306.8
A盘透射轴在长轴方向时读数 a_i	263.1	280.3	221.3	112.1	231.9
长轴方位角 $\psi=a_{\updownarrow}+90-a_i$	1.3	4.1	43.4	91.7	32.5
I_{max}(最大光强)	4.022	5.630	4.468	4.740	4.560
I_{min}(最小光强)	0.001	0.890	3.452	0.759	3.246
$b^2/a^2\approx I_{min}/I_{max}$	0.0002	0.1581	0.7726	0.1601	0.7118
用(11)式计算所得的δ_r	※	76.2°	82.6°	77.3°	81.2°
用(2)式计算所得的ψ	※	6.71°	无解	83.8°	32.7°

注：由于测量误差等原因，δ_r、ψ 计算结果可能无解

10. 定波片C_x 的轴方向 $\overline{p_{\leftrightarrow}}$ = 263.8，$a_{\updownarrow}$ = 174.4

波片C_x的一个轴在垂直方向时度盘示值C_x= 187.5

11. 线偏振光通过1/2波片或全波片：

C_x某轴在垂直方向，度盘示值C_x= 187.5

Co快轴在垂直方向，度盘示值Co= 71.4

$p-p_{\leftrightarrow}$	0.0	15.0	30.0	45.0
p	263.8	278.8	293.8	308.8
消光时A盘读数a_i	174.8	159.4	206.6	222.9
$a_{\updownarrow}-a_i$	-0.4	-1.9	-3.2	-4.85

12. 线偏振光通过1/2波片或全波片：

C_x某轴在垂直方向，度盘示值C_x= 187.5

C_0快轴在水平方向，度盘示值Co= 161.4

$p-p_{\leftrightarrow}$	0.0	15.0	30.0	45.0
p	263.8	278.8	293.8	308.8
消光时A盘读数a_i	174.8	156.8	142.8	126.4
$a_{\updownarrow}-a_i$	0.5	17.6	31.6	47.7

报告中要求分析步骤11,12中 C_x快轴的方向。

结论：

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名 _____ ）

作实验日期 年 月 日 教师评定

弦振动实验

精仪系精11
尚恩垚
2011010494

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名 _____ ）

作实验日期 年 月 日 教师评定

弦振动实验

一、实验目的

1. 观察弦振动形成的驻波
2. 用实验确定弦线振动时的共振频率与实验参数的关系
3. 学习用一元线性回归和对数作图法处理数据

二、实验原理

一根柔软均匀的弦线两端被拉紧时，加以初始激励之后，弦不再受外加激励，将以一定频率自由振动，在弦上将产生驻波。自由振动的频率称为固有频率，最小的固有频率称为基

由于弦的两端分别由弦码A、弦码B支撑，此支撑点为波节又由于相邻两波节的距离为 $\frac{\lambda}{2}$，所以当弦上出现稳定驻波时，弦长L的距离必为 $\frac{\lambda}{2}$ 的整数倍。

$$\lambda = \frac{2L}{N} \quad (N=1, 2 \cdots)$$

当给定张力T、弦密度ρ、弦长L时，频率f只有满足

$$f = \frac{N}{2L}\sqrt{\frac{T}{\rho}} \quad V = \lambda f = \sqrt{\frac{T}{\rho}}$$

弦上才出现稳定驻波。

为此，调节信号发生器的频率，使之与这些f相当时，弦线共

三、实验装置

1. 弦振动实验仪

（包括驱动线圈和接收线圈，两个弦码，6根弦，200g的砝码5个加上一个200g的砝码钩。标尺固定在基座上，驱动线圈接收线圈和弦码均能以磁性固定在基座上）

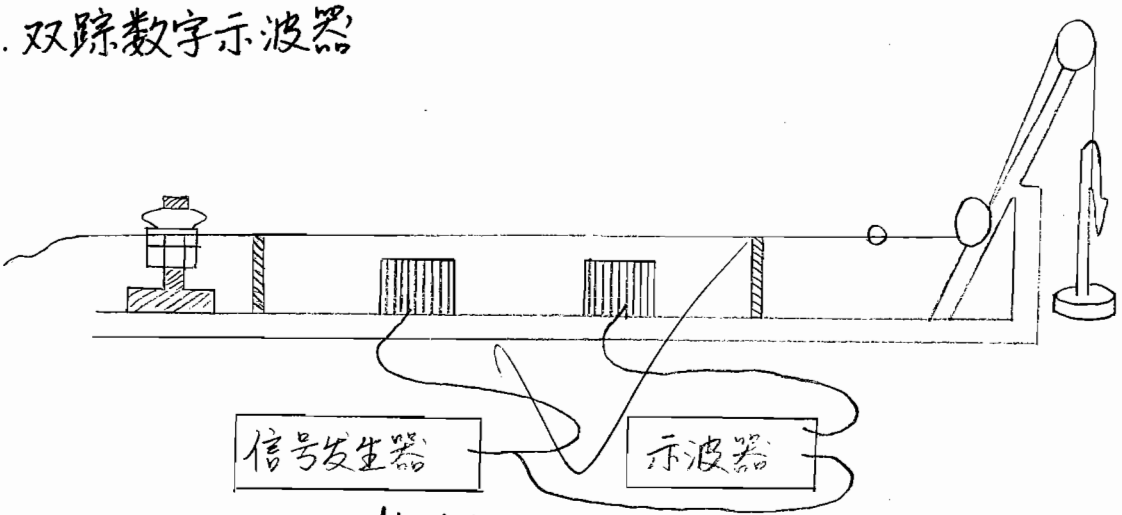
清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

2. 函数信号发生器.

3. 双踪数字示波器



整体仪器结构图

四. 实验内容.

1. 定性观察弦振动，研究 $f \sim N$

条件：5#弦，$L = 50\ cm$，$T = 9.8N$

① 用信号发生器和电磁起振器对弦策动，估计基频大小.

② 调节频率，观察 $N=1, 2, 3$ 的情况，并记录相应的频率 f.

2. 定性观察弦振动，研究 $f \sim L$ 关系.

条件：3#弦，$N=1$，$T = 9.80N$

① 调节频率，观察 $N=1$，$L = 30\ cm$ 的驻波，记录相应的基频 f.

② 在 $30\ cm \sim 55\ cm$ 范围内间隔 5cm 改变一次弦长，测量记录相应的基频 f

3. 研究 $f \sim T$ 关系.

条件：1#弦，$N=1$，$L = 50\ cm$

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名 _____ ）

作实验日期 年 月 日 教师评定

T在1.96N～11.76N之间改变弦上张力，测量相应的基频f

4. 研究f～P关系

条件：N=1，L=50cm，T=9.80N

分别测量2#、4#、6#弦在上述条件下的基频f.

注意事项：

1. 驱动线圈与接收线圈至少保持10cm距离.
2. 驱动线圈距一个弦码大约5cm的位置上，接收线圈放置在两个弦码中间附近（N不为1时，根据需要调整位置）
3. 砝码钩必须垂直悬空，且不能与仪器支架有接触.
4. 弦线的定位柱不能穿过滑轮.
5. 改变砝码位置时，要使砝码静止后再进行测量.
6. 由于一定的滞后性，要等波形稳定后再记录数据.

五. 数据处理.

1. f～N关系

条件：5#弦，L=50cm，T=9.8N

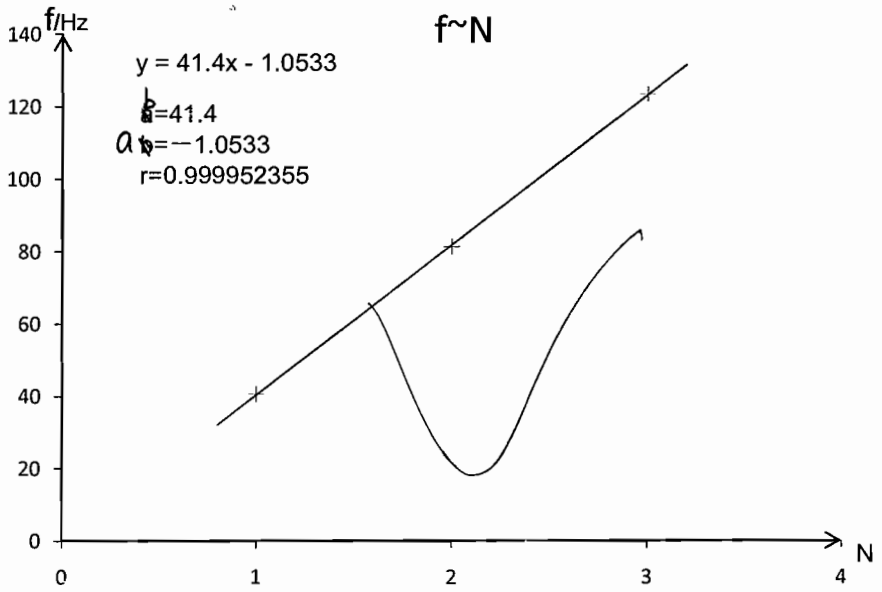
N	1	2	3
f/Hz	40.58	81.28	123.38

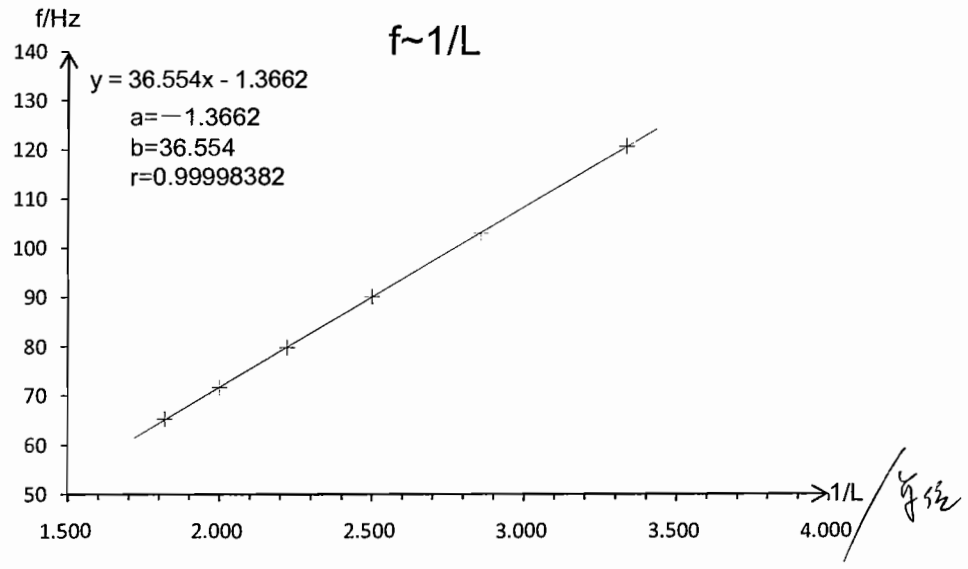
用最小二乘法，Excel拟合可得

$$f = 41.4x - 1.0533$$

$r = 0.999952355$ 接近于1，且截距 $a = -1.0533$ 接近于0

所以 在误差允许的范围内，f与N成正比.


f~N
f/Hz
y = 41.4x - 1.0533
b=41.4
a=—1.0533
r=0.999952355
140
120
100
80
60
40
20
0
0
1
2
3
4
N


f~1/L
f/Hz
y = 36.554x - 1.3662
a=—1.3662
b=36.554
r=0.99998382
140
130
120
110
100
90
80
70
60
50
1.500
2.000
2.500
3.000
3.500
4.000
1/L

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名 _____ ）

作实验日期 年 月 日 教师评定

2. $f \sim L$ 关系

条件：$N=1$，3#弦，$T=9.80\,N$

L/m	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55
$\frac{1}{L}$	3.333	2.857	2.5	2.222	2	1.818
f/Hz	120.58	102.96	90.06	79.76	71.66	65.26

① 最小二乘法，用 Excel 拟合可得

$$f = 36.554\frac{1}{L} - 1.3662$$

② $r = 0.99998382$ 接近于 1，说明符近线性关系

而且截距 $a = -1.3662$ 接近于 0，所以

在误差允许的范围内 f 与 $\frac{1}{L}$ 成正比

③ 由理论公式 $f = \frac{N}{2L}\sqrt{\frac{T}{\rho}} = \frac{N}{2}\sqrt{\frac{T}{\rho}}\cdot\frac{1}{L}$

斜率 b 的理论值为 $b = \frac{N}{2}\sqrt{\frac{T}{\rho}}$，代入 $N=1$，$T=9.8N$，$\rho=0.001911$（参考

可得 $b = 35.806$

与实验数据所得 $b = 36.554$ 相比，相对误差为 $\frac{|36.554-35.806|}{35.806} = 2.$

考虑到 ρ 值为参考值，这样的误差是可以接受的。

所以在误差允许的范围内，f 与 $\frac{1}{L}$ 成正比。比例系数与 $\frac{N}{2}\sqrt{\frac{T}{\rho}}$ 接近。

3. $f \sim T$ 关系

条件：$N=1$，$L=50\,cm$，1#弦

清 华 大 学 实 验 报 告

系别_____ 班号_____ 姓名_____ （同组姓名_____）

作实验日期　　年　　月　　日　　教师评定

T/N	1.96	3.92	5.88	7.84	9.80	11.76
f/Hz	59.76	85.53	104.56	119.56	133.96	143.76
lnT	0.67294	1.36609	1.77156	2.05924	2.28238	2.46470
lnf	4.0903	4.4489	4.6498	4.7838	4.8975	4.9681

①最小二乘法，用Excel拟合可得

$$\ln f = 0.4927 \ln T + 3.7679$$

②$r = 0.999574441$ 接近于1，说明较符近线性关系

③其中设 $f = kT^p$，则 $\ln f = p \cdot \ln T + \ln k$

比较系数，$p = 0.4927$

$\ln k = 3.7679$　　$k = 43.2887$

④比较p与0.5

$$|p - 0.5| = 0.0073$$

$$\text{相对误差} = \frac{|p-0.5|}{0.5} \times 100\% = 1.46\%$$

⑤k反求ρ

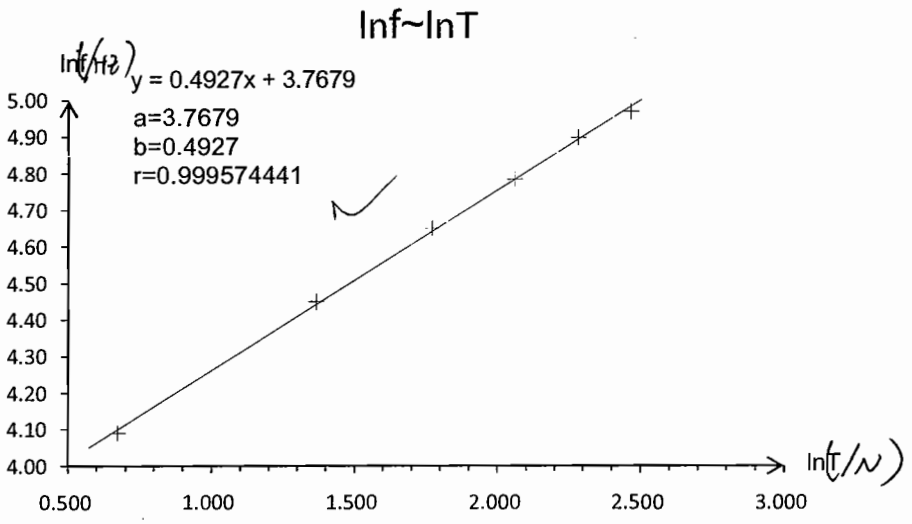
$$k = \frac{N}{2L\sqrt{\rho}}$$

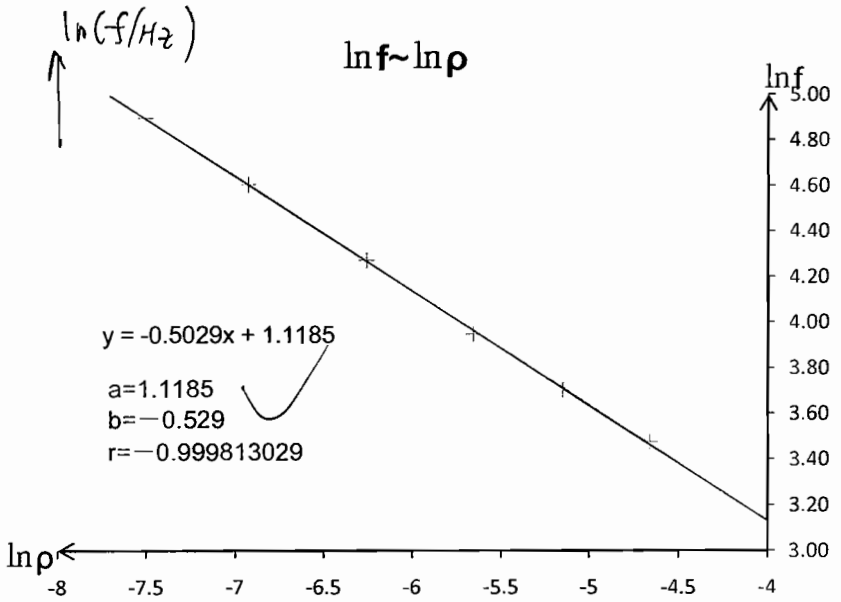
$$\rho = \left(\frac{N}{2Lk}\right)^2 = \left(\frac{1}{2 \times 0.5 \times 43.2887}\right)^2 = 0.000534$$

$$\text{与参考值的相对误差} = \frac{|0.000534 - 0.000549|}{0.000534} \times 100\% = 2.9$$

⑥在误差允许的范围内，lnf与lnT成线性关系，

故f与T成正比


lnf~lnT
ln(f/Hz)
y = 0.4927x + 3.7679
a=3.7679
b=0.4927
r=0.999574441
5.00
4.90
4.80
4.70
4.60
4.50
4.40
4.30
4.20
4.10
4.00
0.500
1.000
1.500
2.000
2.500
3.000
ln(T/N)


ln(f/Hz)
lnf~lnρ
lnf
y = -0.5029x + 1.1185
a=1.1185
b=—0.529
r=—0.999813029
5.00
4.80
4.60
4.40
4.20
4.00
3.80
3.60
3.40
3.20
3.00
lnρ
-8
-7.5
-7
-6.5
-6
-5.5
-5
-4.5
-4

清 华 大 学 实 验 报 告

系别_____ 班号_____ 姓名_____ （同组姓名_____）

作实验日期　　年　　月　　日　　教师评定

4. $f \sim \rho$ 关系

条件：$N=1$，$T=9.8N$，$L=50\,cm$

$\rho/kg\cdot m^{-1}$	0.00947	0.005791	0.00349	0.001911	0.000979	0.000549
f/Hz	32.32	40.58	51.78	71.66	99.94	133.96
$\ln\rho$	-4.6596	-5.1515	-5.6579	-6.2601	-6.9290	-7.5074
$\ln f$	3.4757	3.7033	3.9470	4.2719	4.6046	4.8975

① 最小二乘法，Excel 拟合可得

$$\ln f = -0.5029 \ln\rho + 1.1185$$

② $r = -0.999813029$ 接近于1，说明线性性较好.

③ 设 $f = m\rho^n$，则 $\ln f = n\cdot\ln\rho + \ln m$

比较系数，可得 $n = -0.5029$

$\ln m = 1.1185$　　$m = 3.0602$

④ 比较 n 与 -0.5

$$|n-(-0.5)| = 0.0029$$

$$\text{相对误差} = \left|\frac{n-(-0.5)}{-0.5}\right| = 0.59\%$$

⑤ 在误差允许的范围内，$\ln f$ 与 $\ln\rho$ 成线性关系，f 与 ρ 成正比。

5、研究 ρ、L、T、f 与 V 的关系.

组号	T/N	$\rho/kg\cdot m^{-1}$	f/Hz	L/m	$V=\lambda f$ (m/s)	$V=\sqrt{\frac{T}{\rho}}$ (m/s)	相对偏差
1	9.80	0.000549	133.96	0.50	133.96	133.61	2.6%
2	9.80	0.001911	65.26	0.55	71.79	71.61	2.5%
3	1.96	0.000549	59.76	0.50	59.76	59.75	0.02%
4	9.80	0.001911	71.66	0.50	71.66	71.61	0.07%

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名 _____ ）

作实验日期 年 月 日 教师评定

在误差允许的范围内，v的实验值等于理论值，$v = \lambda f = \sqrt{\frac{T}{\rho}}$

6. 误差分析

① $L = 30\,cm$ 时，金属弦码、驱动线圈、接收线圈距离较近，电磁
相互干扰

②由于线圈存在剩磁现象，无法反复调节，读取的频率在真值
近，但无法验证

六、思考题

1. 为了尽快激发和测定弦振动，激励线圈和探测线圈应如何放

答：①接收线圈应放在波腹处，使接收的信号最强。

②驱动线圈与接收线圈至少应距离10 cm。

③驱动线圈与弦码大约距离5cm。

2. 如何尽快找出一定条件下弦振动的基频 f_0？

答：①可以将已知条件代入理论公式，求出理论值，获得 f_0 的约值。
也可以在不给予激励的前提下，拨动弦，从示波器CH2中读出
大致频率。

②先粗调接近预期值后，逐渐缓慢增大频率。调节时发现信号
幅度有增大趋势时，每次调节频率后等待波形大致稳定，再继续
调节

③当有下降趋势时，先记录下降前的频率，等待波形稳定，继续
节，观察是否还会下降。

3. ①调 $f_{C'} = 261\ Hz$，需要条件 $L = 25.6cm$，1#弦，$T = 9.8\ N$

该条件下的基频 $= \frac{1}{2L}\sqrt{\frac{T}{\rho}} = \frac{1}{2\times 0.256}\times\sqrt{\frac{9.8}{0.000549}} = 260.95\ Hz$
$\approx 261\ Hz$

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

②调 $f_{a'} = 440\,Hz$

需要条件：$N=2$，$L=24.9cm$，$T=11.76N$，2并弦

$$f = \frac{N}{2L}\sqrt{\frac{T}{\rho}} = \frac{2}{2\times0.249}\times\sqrt{\frac{11.76}{0.000979}} = 440.16\,Hz \simeq 440\,Hz$$

4. 4个参量至少需要5组数据

组号	N	L/m	T/N	ρ/kgm⁻¹
1	1	0.50	9.80	0.000549
2	1	0.35	9.80	0.000549 ~~0.001911~~
3	1	0.50	1.96	0.000549
4	1	0.50	9.80	0.001911
5	2	0.50	9.80	0.000549 ~~0.005171~~

组1、5 研究 $f\sim N$ 关系

组1、2 研究 $f\sim L$ 关系

组1、3 研究 $f\sim T$ 关系

组1、4 研究 $f\sim\rho$ 关系

七. 实验小结

这次实验是一次验证性实验，通过控制变量法逐一研究 f 与各参量的关系。其中多次用到直线拟合，最小二乘法。

顶

清华大学实验报告

系别 精仪系 班号 精11 姓名 尚恩赫 （同组姓名 ）

作实验日期 年 月 日 教师评定

$f \sim N$: $L = 50.0\ cm$ $T = 9.8N$ $(M = 1kg)$

N	1	2	3
5#	40.58	81.28	123.38

$f \sim L$: $N = 1$ $T = 9.8N$ $(M = 1kg)$

L	30.0	35.0	40.0	45.0	50.0	55.0
3#	120.58	102.96	~~89.56~~ 90.06	79.76	71.66	65.26

$f \sim T$: $N = 1$ $L = 50.0cm$.

T	1.96	3.92	5.88	7.84	9.80	11.76
1#	~~59.76~~	85.53	104.56	119.56	133.96	143.76

$f \sim \rho$: $N = 1$ $T = 9.8N$ $L = 50.0\ cm$.

	6#	5#	4#	3#	2#	1#
f	32.32	40.58	51.78	71.66	~~71.66~~ 99.94	133.96

顾 J21

2012.10.25 晚-5

清华大学实验报告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名 _____ ）

作实验日期 年 月 日 教师评定

弦振动实验

一、实验目的

1. 观察弦振动形成的驻波并用实验确定弦线振动时共振频率与实验参数的关系
2. 学习用一元线性回归和对数作图法处理数据.

二、实验原理

1. 弦振动的物理本质是力学的弹性振动。驻波指同频率的同类自由行波互相干涉而形成的空间分布固定的周期波，其特征是波节、半波节、波腹在空间的位置固定不变。

2. 一根柔软均匀的弦线两端被拉紧时，加以初始激励之后，弦不再受外加激励，将以一定频率自由振动，在弦上将产生驻波。自由振动的频率称为固有频率，最小的固有频率称为基频。

3. 如果对弦外加连续周期性激励，当外激励频率等于固有频率或为弦基频的2倍、3倍或整数倍时，弦上形成不同的弦波

4. 弦振动的驻波可看作是两列频率、振幅相同而传播方向相的行波叠加而成。反射波有半波损失。距波节 $\frac{\lambda}{4}$ 处，入射波与反射波相位相同，此处合位移最大，即振幅最大，形成波腹。相邻波节或波腹之间的距离为半波长。

5. 两端固定的弦能以其固有频率的整数倍振动，因此

$$\lambda = \frac{2L}{N} \quad (N=1, 2, \cdots)$$

式中 L 为弦长，N 为正整数

$$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{N}{2L} \cdot v$$

由波动方程可得 $f = \frac{N}{2L}\sqrt{\frac{T}{\rho}}$ $v = \lambda f = \sqrt{\frac{T}{\rho}}$

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

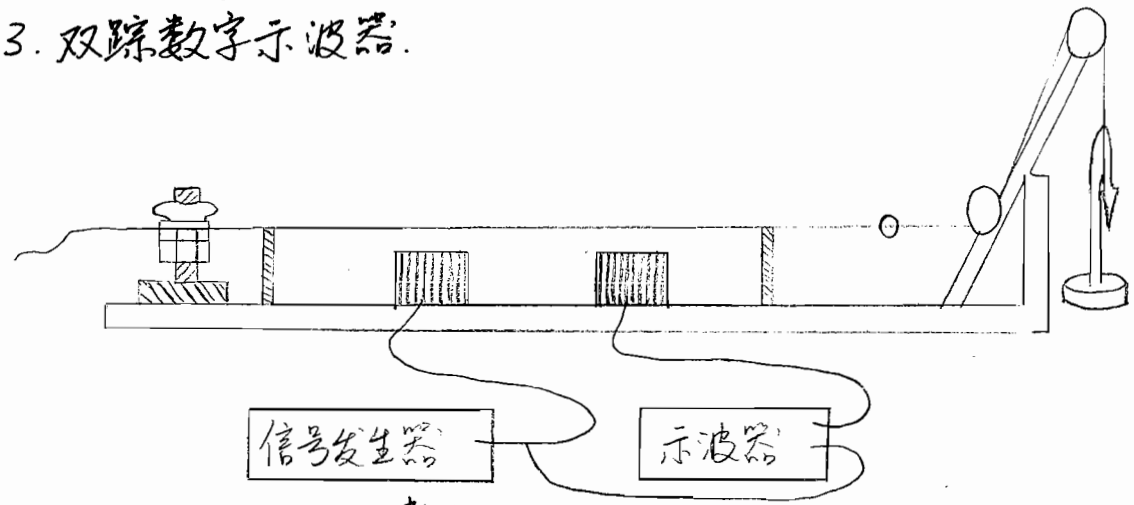
三. 实验装置

1. 弦振动实验仪

（包括驱动线圈和接收线圈，两个弦码，6根弦，200g的砝码5个加上一个200g的砝码钩。标尺固定在基座上，驱动线圈，接收线圈和弦码均能以磁性固定在基座上）

2. 函数信号发生器

3. 双踪数字示波器.



整体仪器结构图.

四. 实验内容.

1. 定性观察弦振动，研究 $f \sim N$ 关系.

条件：粗弦（5#、6#弦），弦长 $L = 50.0\,cm$，张力 $T = 9.80\,N$

用信号发生器和电磁起振器对弦 策动，了解振动弦的特征，观察 $N=1, 2, 3\cdots$ 驻波的情况，并测量共振频率 f，分析 f 与 N 的关系.

2. 定性观察弦的振动，研究 $f \sim L$ 关系.

条件：粗弦（3#、4#弦），张力 $T = 9.80\,N$，$N=1$

用信号发生器和电磁起振器对弦进行策动，观察形成 $N=1$ 驻波的情况，在 30.0 cm 到 55.0 cm 范围内间隔 5.0 cm 改变弦长测量振

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

的基频频率 f，用最小二乘法拟合 $f \sim \frac{1}{L}$ 直线关系，并与理论公式比较给出结论。

3. 测量 $f \sim T$ 关系

条件：细弦（1#、2#），保持 L 不变，$N=1$

T 在 1.96N ~ 11.76N 之间改变弦上张力，测量相应的基频频率 f.

设 $f = kT^p$，根据实验数据用最小二乘法拟合求 k、p.

比较 p 与理论值 0.5 之间的相对偏差，同时由 k 反推求弦线密度的大小并与参考值做比较。

4. 测量 $f \sim \rho$ 关系

条件：$N=1$，L，T 不变，

分别测量 1#~6# 弦的基频振动频率 f

设 $f = m\rho^n$，用最小二乘法拟合求 m、n，比较 n 与理论值 -0.5 的相对偏差.

5. 研究弦线的线密度、弦长、张力、基频与波速的关系

选取 1~4 所得的部分实验数据，计算弦上波的传播速度实验值 $v = \lambda f = \frac{2L}{N} f$ 及理论预测 $v = \sqrt{\frac{T}{\rho}}$ 并比较两者的相对偏差。

操作说明：

1. 驱动线圈与接收线圈至少保持 10 cm 距离
2. 驱动线圈距一个弦码大约 5cm 的位置上，接收线圈放置在两个弦码中间附近（研究 N 不为 1 的振动时，可以根据需要调整位置）
3. 共振时，应看到①弦的振动形成的明显驻波
   ②听到弦的振动引发的声音达到最大
   ③示波器上接收到的波形应当是清晰的正弦波且幅最
4. 如果看不到振动或听不到声音，稍稍增大输出振幅或改变一下

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名 _____ ）

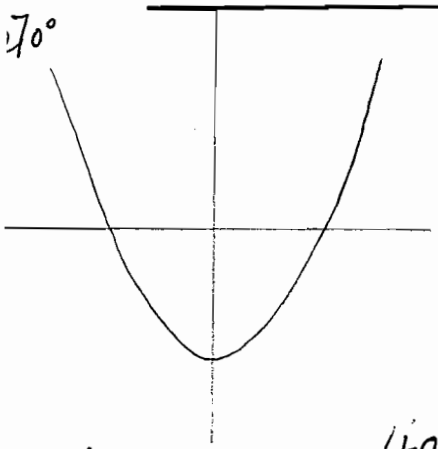
作实验日期 年 月 日 教师评定

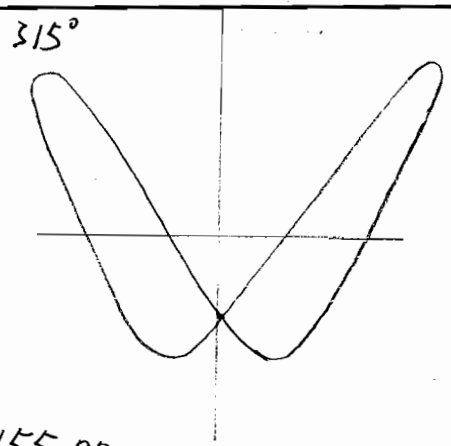
5. 砝码钩必须垂直悬空且不能与仪器支架有接触.
6. 弦线的定位柱不能穿过滑轮
7. 改变砝码质量时，要使有砝码静止后再进行测量
8. 改变实验条件，接收线圈不能处于波节处，且要等波形稳定后，再记录数据.

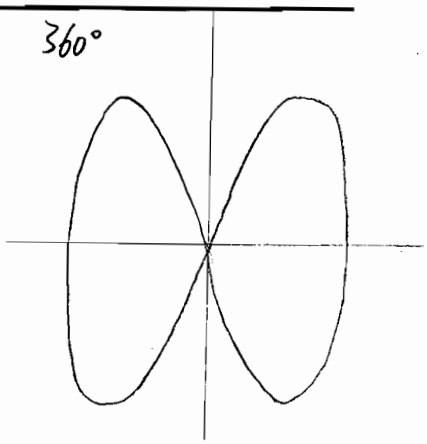
清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名 _____ ）

作实验日期 年 月 日 教师评定







3. 超声波频率 f = ~~41516.00~~ 40155.00 Hz

测前室温 t_1 = ~~25~~ 24.5°C

湿球 t_1' = 23.5°C

测后室温 t_2 = 25.5°C

湿球 t_2' = 24°C

相对湿度 r_1 = 88%

相对湿度 r_2 = 86%

X_1	0
X_2	9.09
X_3	17.96
X_4	26.84
X_5	35.45
X_6	44.20
X_7	52.77
X_8	61.28
X_9	69.98
X_{10}	78.87
X_{11}	87.32
X_{12}	95.44
X_{13}	103.87
X_{14}	112.62
X_{15}	121.54
X_{16}	130.52
X_{17}	139.34
X_{18}	148.33
X_{19}	156.94
X_{20}	165.82

$\bar{\lambda}$ 347
11.8
5

清华大学实验报告

系别 精仪系 班号 11 姓名 韩国升 (同组姓名)

作实验日期 年 月 日 2011010493 教师评定 9+

逸出功的测量

运 6.14

perfect!

一、实验目的:

1. 学习里查孙直线法
2. 了解热电子发射规律和现象
3. 掌握阴极材料电子逸出功的测量方法
4. 学习面对难以测定或无法测量的物理量的处理方法

二、实验原理:

1. 电子逸出功:

电子在金属内部所具有的能量低于在外部所具有的能量。电子逸出金属表面所需的能量即为逸出功。

2. 热电子发射:

真空玻璃管中 ① 通电流加热阴极 ② 阳极加正电位,则在连接这两极的外电路中会有电流通过,说明有电子从加热的金属丝中射出。通过加热使电子能量升高,克服逸出功,从金属表面逸出。

3. 金属中电子的能量分布规律

① 自由电子能量量子化

② 电子全同性

③ 符合泡利不相容原理

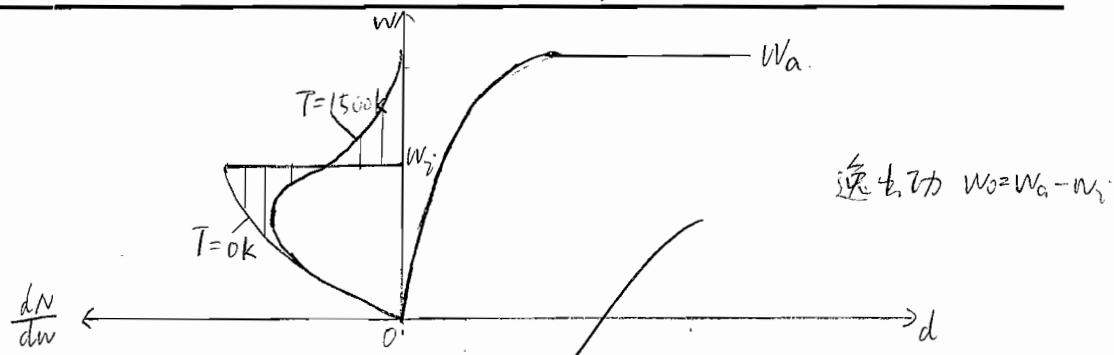
④ 能量分布服从费密-狄喇克分布

4. 电子能量分布图与位能壁垒图

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 精11 姓名 [redacted] （同组姓名 _____）

作实验日期 年 月 日 2011010493 教师评定



5. 热电子发射的里查孙－德西曼公式

$$J_e = 2(1-R_e)A_1T^2e^{-\frac{W_a-W_i}{kT}}$$

式中，J_e为单位面积的发射电流；$W_a-W_i=e_0\phi$为该金属的逸出功；T为热力学温度；$A_1=60.09\ A/(cm\cdot K^2)$；$R_e$为金属表面对发射电子的反射系数。

令 $2(1-R_e)A_1=A$，则上式可改为 $J_e=AT^2e^{-\frac{W_a-W_i}{kT}}$

故有 $J_e=AST^2e^{-\frac{e_0\phi}{kT}}$

6、里查孙直线法

由于A、S难以测量，对上式做如下处理：

除以T^2再取以10为底的常用对数，得 $\lg\frac{J_e}{T^2}=\lg(AS)-\frac{1}{2.303}\cdot\frac{e_0\phi}{kT}$

代入e_0、k，得 $\lg\frac{J_e}{T^2}=\lg(AS)-5.039\times10^3\frac{\phi}{T}$

在$\lg\frac{J_e}{T^2}\sim\frac{1}{T}$图上，由直线斜率可求出$\phi$

7、发射电流J_e的测量

为消除空间电荷对后续电子的阻碍，需要外加电场E_a、E_a的存在产生肖特基效应，此时有 $J_e'=J_e e^{\frac{4.39\sqrt{E_a}}{T}}$，$\lg J_e'=\lg J_e+\frac{4.39}{2.303T}\sqrt{E_a}$

把阳极做成圆柱形，并与阴极共轴，并忽略接触电位差，有

$$\lg J_e'=\lg J_e+\frac{4.39}{2.303T\sqrt{r_1\ln\frac{r_2}{r_1}}}\sqrt{U_a}$$

在$\lg J_e'\sim\sqrt{U_a}$图上，由截距$\lg J_e$即可得J_e

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 精11 姓名 [redacted] （同组姓名 _____）

作实验日期 年 月 日 2011010493 教师评定

8、温度T的测量

本实验通过测量阴极加热电流来确定阴极温度。$T_1 = \frac{I_f}{(a_k)^{\frac{1}{4}}}$

三、实验仪器

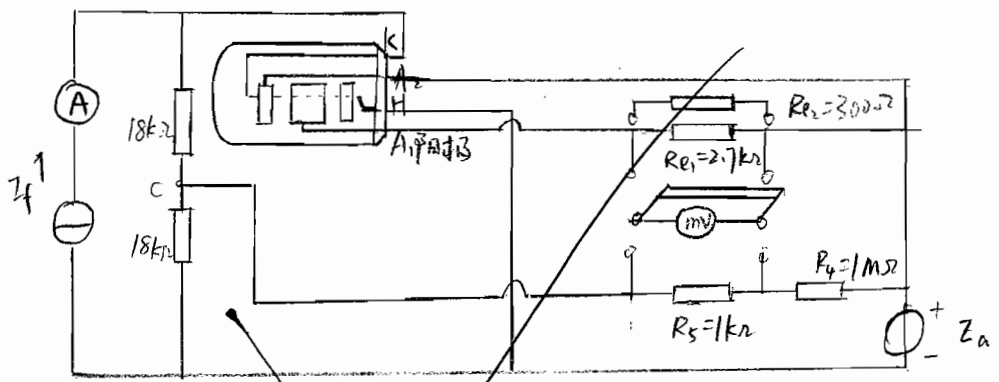
数字电压表（量程200mV）；恒压恒流的双路电源；电流表（量程1A）；

实验板甲（直热式2极管，2个18kΩ电阻）；

实验板乙（2.7kΩ 300Ω电阻，换向开关，1kΩ 1MΩ电阻）.

四. 实验任务

1. 根据2极管结构和测量I_e的原理，设计完整的实验线路图。



2. 经老师检查合格后，开始测量

打开电源和数字电压表，旋转恒流电源按钮，同时观察电流表读数，使之（I_f）分别为0.500A，0.540A，0.580A，0.620A，0.660A，0.700A。

在I_f为上述值时，测不同U_a下的U_e'值。具体做法：

① 调节I_f为指定值，稳定2~3min；

② 转向开关拨到R_5，调节恒压电源按钮，使数字电压表读数为36V；

转向开关拨到R_{e1}端，记录数字电压表示值；

③ 重复上步，快速测量出U_a=36，49，64，81，100，121，144V时的U_e'值。

3、使用计算机或计算器进行线性拟合，计算ϕ值（4.4~4.9V）

4. 整理仪器

清华大学实验报告

系别 _____ 班号 精11 姓名 [redacted] （同组姓名 _____）

作实验日期 年 月 日 2011010493 教师评定

注意事项：

① 实验前将恒压恒流双路电源的旋钮逆时针旋到底。

② 调节时灯丝电流取值在 0.510A～0.710A之间，不能超过0.710A。

③ 每次调节I_f后，先稳定2～3分钟（因为灯丝加热具有滞后性，需耐待阴极达到热平衡），再快速测量U_a=36.49,…,144V下的U_e'值。

五、数据处理：

1. 由实验室给出表格，用线性内插法算得电流I_f与温度T关系。

I_f/A	0.500	0.540	0.580	0.620	0.660	0.700
T/K	1726	1792.4	1864.2	1930.6	1991.8	2059

2. Excel拟合处理：

① 不同温度下T下的 $\lg U_e' \sim \sqrt{U_a}$ 拟合

I_f/A	T/K	截距=lgU_e	斜率	r	U_e/V	$\frac{U_e}{T^2}$/(V·K^{-2})
0.500	1726	0.7572	0.0075	0.9970	5.718	1.9194×10^{-6}
0.540	1792.4	1.3477	0.0067	0.9944	22.27	6.9318×10^{-6}
0.580	1864.4	1.8381	0.0060	0.9996	68.89	1.9822×10^{-5}
0.620	1930.6	2.2781	0.0058	0.9998	189.72	5.0902×10^{-5}
0.660	1991.8	2.6824	0.0058	0.9998	481.24	1.2130×10^{-4}
0.700	2059.	3.0722	0.0058	0.9999	1180.9	2.7857×10^{-4}

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 精11 班号 _____ 姓名 韩嘉舟 （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 2011010493 教师评定

② 对 $\lg\frac{I_e}{T^2} \sim \frac{1}{T}$ 进行线性拟合

$\frac{1}{T}/K^{-1}$	5.794×10^{-4}	5.579×10^{-4}	5.364×10^{-4}	5.180×10^{-4}	5.021×10^{-4}	4.857×10^{-4}
$\lg\frac{I_e}{T^2}$	-5.7168	-5.1592	-4.7029	-4.2933	-3.9161	-3.5551

Excel 拟合可知：

$$\lg\frac{I_e}{T^2} = -22853.5\frac{1}{T} + 7.5521$$

$$r^2 = 0.9992$$

$|r|$ 接近 1，直线拟合程度较好。

③ 计算逸出功 ϕ

$\because \lg\frac{I_e}{T^2} = \lg AS - 5.039\times10^3\frac{\phi}{T}$

$\therefore \lg\frac{I_e}{T^2} = \lg\frac{I_e R}{T^2} = \lg\frac{I_e}{T^2} + \lg R = \lg AS + \lg R - 5039\frac{\phi}{T}$

$\therefore \lg\frac{I_e}{T^2} \sim \frac{1}{T}$ 图中直线斜率为 $k = -5039\phi$

$\therefore \phi = \frac{k}{-5039} = \frac{-22853.5}{-5039} = 4.535(V)$

$\therefore$ 逸出功 $W = e\phi = 4.546(eV)$

3、半对数坐标纸作图处理数据

① 分别作阳极加热电流 $I_f = 0.500, 0.540, 0.580, 0.620, 0.660, 0.700A$ 的 $I_e' \sim \sqrt{U_a}$ 图．（见附页）

② 将 6 组直线延伸至 $U_a = 0$，此时 I_e' 即为 I_e

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 物2011 姓名 李嘉舟 （同组姓名 _____ ）

作实验日期 年 月 日 2013.02.28 教师评定

I_f/A	T/K	U_e/V	$\frac{U_e}{T^2}$/($\times10^{-6}$)	$\frac{1}{T}$/($\times10^{-4}$K^{-1})
0.500	1726	4.95	1.66	5.794
0.540	1792.4	20.6	6.41	5.579
0.580	1864.2	64	18.41	5.364
0.620	1930.6	183	49.10	5.180
0.660	1991.8	461	116.22	5.021
0.700	2059	1015	239.44	4.857

③ 在对数坐标纸上作出 $\frac{U_e}{T^2}$ ~ $\frac{1}{T}$ 图

取点 $(4.857\times10^{-4}, 500\times10^{-6})$，$(5.779\times10^{-4}, 2\times10^{-6})$ 来计算

$$-5039\phi = \frac{\lg(2\times10^{-6}) - \lg(300\times10^{-6})}{5.779\times10^{-4} - 4.857\times10^{-4}} = -2310.1$$

$$\therefore \phi = \frac{-2310.1}{-5039} = 4.58(V)$$

$$\therefore W = e\phi = 4.58(eV)$$

4. 实验结果：

① 计算机拟合：$\phi = 4.54V$，$W = 4.54eV$

② 半对数坐标纸作图：$\phi = 4.58V$，$W = 4.58eV$

5. 对比两种实验方法：

① 最小二乘法：

优点：1) 严密，处理数据准确

2) 对计算结果可进行统计分析，给出 γ

清华大学实验报告

系别 精11 班号 _____ 姓名 [illegible] (同组姓名 _____)

作实验日期 年 月 日 2016.10.13 教师评定

缺点：1) 不直观

2) 算法复杂，需借用计算机

②作图法：

优点：1) 直观

2) 易发现测量出现错误的点，方便纠偏。

缺点：1) 方法粗糙，有效数字受图纸限制

2) 引入作图误差

3) 无法给出线性程度定量评价

六、误差分析：

1. 关于温度T。线性内插法只是一个误差允许内的简便算法。实际中，T与I_f的关系应该是连续变化的曲线。会有一定误差。不同的电子管在同一个I_f下可能为不同的温度，也带来误差。

2. 实验要求测量U_{a1}=36、49、…144时的U_c'值。但实际上，U_{a1}很难被调为正整数，经常有0.1V的偏差。但二极管工作在饱和区，发射的电子几乎可被全吸收，所以影响不大。

3. 数字电压表示数波动。而且仅凭直观感觉，很难判断灯丝是否达到热平衡。

4. 作图法中，存在人为作图误差和读数误差。

七、思考题：

1. I_f系统误差修正的必要性

答：I_f的系统误差值很小，可以忽略，无需修正。两个18kΩ电阻

清华大学实验报告

系别 精11 班号 _____ 姓名 钟盈舟 （同组姓名 _____）

作实验日期 年 月 日 2012010493 教师评定

串联，阻值远大于灯丝电阻，经流经该支路的电流远小于电流表的仪器误差。

2. U_a 系统误差修正的必要性

答：不需要。$\frac{R_4}{R_5}=1000$，U_a 的测量系统误差为千分之一，可简化。

3. U_e' 是否要化为 I_e' 再处理？

答：不需要。$U_e'=I_e'R$，所以 U_e' 可看为 I_e' 放大 R 倍。

且 $\lg\frac{U_e'}{U_a}=\lg(AS)+\lg R-$ 5059 单，即 $\lg\frac{U_e'}{U_a}$ 与 $\frac{1}{T}$ 斜率仍为 -5039 单。只改变了截距，无需化为 I_e'。且化成 I_e' 更繁琐，还会引入有效数字带来的误差。

八、感想与体会：

这次实验中体会到了里查逊直线法的巧妙，熟练掌握了如何使用 Excel 处理数据。

里查逊直线法让我明白了在求解物理问题时，先要看看在数学上有没有可以使之简化的办法。说不定通过一些变换，就可以不用再测难以测量的量。

实验过程中，把课本上的分压电路换为恒压源。可能是这么做更加稳定。

实验要测的数据还是不少的，需要细心以及耐心，我旁边的同学就因不够细心，没调整 U_a 就测了下一组 I_f，导致重测。而且实验开始时我使用蛇形测法，被老师告知不行。仔细想一下，这个实验是与灯丝温度相关，不可以蛇形测，因为降温较慢。

感谢老师和各位助教

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 5号 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

修	T_4	T_0	$\sqrt{U_0}$						
U_0			6	7	8	9	10	11	12
X_1 不修	0.500	1726	6.35	6.46	6.56	6.65	6.77	6.90	7.06
X_1	0.540	1792.4	24.47	24.80	25.20	25.60	25.86	26.28	26.95
X_1	0.580	1864.2	74.85	75.95	76.95	78.13	79.16	80.14	81.44
X_{10}	0.620	1930.6	20.56	20.85	21.12	21.44	21.71	21.98	22.30
X_{10}	0.660	1991.8	52.10	52.81	53.50	54.29	54.93	55.66	56.44
X_{10}	0.700	2059	127.96	129.74	131.48	133.40	135.10	136.88	138.70

斜率 -22853.5

ϕ +4.53533

-0.99961

T_4 0.500 0.550

T_0 1726 1809 1901 1975 2059 2130

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名 _____ ）

作实验日期 年 月 日 教师评定 9

拉伸法和动力学法测弹性模量



系别 精仪系

班级 精11

学号 2011010494

姓名 尚恩垚

时间 12月6日周四晚

清华大学实验报告

系别 精仪系 班号 精11 姓名 尚恩赴 （同组姓名 ）

作实验日期 年 月 日 教师评定

拉伸法和动力学法测弹性模量

一. 实验目的

1. 学习用拉伸法和用更实用、更准确的动力学法测量弹性模量的方法.
2. 掌握螺旋测微计和读数显微镜的使用.
3. 学习用逐差法处理数据.
4. 学习用实验方法研究与修正系统误差.

二. 实验原理

1. 胡克定律与弹性模量

设有一长为L、截面积为S的均匀金属丝，沿长度方向受一外力F后伸长δL. 单位截面积上的垂直作用力F/S称为正应力，金属丝的相对伸长$\frac{\delta L}{L}$为线应变。实验表明，在弹性限度内，正应力与线应变成正比，即

$$\frac{F}{S}=E\cdot\frac{\delta L}{L}$$

此即胡克定律。式中比例系数$E=\frac{F/S}{\delta L/L}$称作材料的弹性模量，它表征材料本身的性质，单位为Pa.

2. 拉伸法及用逐差法处理数据.

若欲测钢丝的弹性模量，如果能测出其直径D，则由$E=\frac{F/S}{\delta L/L}$可

$$E=\frac{4FL}{\pi D^2\cdot\delta L}$$

具体方法是将钢丝悬挂于支架上，上端固定，下端加砝码对钢丝施力F，测出钢丝相应伸长量δL即可求出E.

δL一般很小，需用读数显微镜测量。且为减少随机误差，应采测多个δL的方法，即在钢丝下端每加一个砝码测一次伸长位置，通过数据处理求出δL.

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

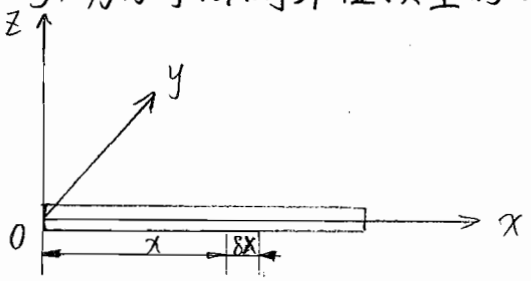
作实验日期 年 月 日 教师评定

若用此法测量10次得到相应位置 $y_1, y_2, \cdots, y_{10}$，可先把前后数据分成两组，$y_1 \sim y_5$ 为一组，$y_6 \sim y_{10}$ 为一组。将两组中相应数据相减得5个 l_i，$l_i = 5\delta L$，则

$$\delta L = \frac{(y_6 - y_1) + (y_7 - y_2) + (y_8 - y_3) + (y_9 - y_4) + (y_{10} - y_5)}{5 \times 5}$$

这种数据处理法即逐差法，它可以充分利用所测数据，减小测量的随机误差和仪器测量带来的误差。

3. 动力学法测弹性模量的公式推导



如图，一细长棒的横振动满足动力学方程 $\frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} + \frac{EI}{\rho S} \cdot \frac{\partial^4 \eta}{\partial x^4} = 0$

棒轴线沿x方向，式上 η 为棒上距左端x处截面的z向位移，E为棒的弹性模量，ρ 为材料密度，S为棒的横截面积，$I = \iint_S z^2 dS$ 为某一截面的惯性矩.

用分离变量法求解此方程。令 $\eta(x,t) = X(t) \cdot T(t)$ 并带入原方程，得

$$\frac{1}{X} \cdot \frac{d^4X}{dx} = -\frac{\rho S}{EI} \cdot \frac{1}{T} \cdot \frac{d^2T}{dt^2}$$

等式两边是两独立变量 x，t 的函数，只有在两端都等于同一个常 K^4 时才可能成立。于是

$$\frac{d^4X}{dx^4} - K^4X = 0, \quad \frac{d^2T}{dt^2} + \frac{K^4EI}{\rho S} \cdot T = 0$$

设棒中每点都作简谐振动，则这两个方程通解分别为

$$X(x) = B_1 ch Kx + B_2 sh Kx + B_3 \cos Kx + B_4 \sin Kx$$

$$T(t) = A\cos(\omega t + \varphi)$$

故原方程通解为 $\eta(x,t) = (B_1 ch Kx + B_2 sh Kx + B_3 \cos Kx + B_4 \sin Kx) A \cos$

式中 $\omega = \left(\frac{K^4EI}{\rho S}\right)^{\frac{1}{2}}$

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名 _____ ）

作实验日期 年 月 日 教师评定

对于用细线悬挂起来的棒，若悬线位于棒作横振动的节点如J，J1点附近，且棒两端均处于自由状态，则在两端面上，横向力F与弯矩均为0. 横向力 $F=\frac{\partial M}{\partial x}=-EI\cdot\frac{\partial^3 \eta}{\partial x^3}$，弯矩 $M=-EI\cdot\frac{\partial^2}{\partial x}$

则对应4个边界条件，

$$\left.\frac{d^3X}{dx^3}\right|_{x=0}=0,\quad \left.\frac{d^3X}{dx^3}\right|_{x=l}=0,\quad \left.\frac{d^2X}{dx^2}\right|_{x=0}=0,\quad \left.\frac{d^2X}{dx^2}\right|_{x=l}=0$$

l为棒长。将通解代入边界条件得

$$\cos Kl\cdot ch\,Kl=1$$

用数值解法可求得满足此式的一系列根 $K_n l=4.730,\ 7.853,\ 10.996$

其中，$K_1 l=4.730$ 对应的振动频率为基振频率，此时棒的振幅分布如图所示。试样基频振动时，有2个节点，由计算可得它们的位置分别距端面 0.224l 和 0.776l 处。



将 $K=K_1=\frac{4.730}{l}$ 代入 $\omega=\left(\frac{K^4EI}{\rho S}\right)^{\frac{1}{2}}$，得棒作基频振动的固有

$$\omega=\left[\frac{4.730^4EI}{\rho l^4 S}\right]^{\frac{1}{2}}$$

解出弹性模量

$$E=1.9978\times10^{-3}\cdot\frac{\rho l^4 S}{I}\cdot\omega^2=7.8870\times10^{-2}\cdot\frac{l^3 m}{I}\cdot f^2$$

上式中 $m=\rho l S$ 为棒的质量，$f=\frac{\omega}{2\pi}$ 为棒的基振频率。对于直径的圆棒，$I=\iint_S z^2\,dS=\frac{\pi d^4}{64}$，代入上式得

$$E=1.6067\,\frac{l^3 m}{d^4}f^2$$

实际测量时，由于无法满足 $d\ll l$，上式应乘一修正系数 T_1，即

$$E=1.6067\,\frac{l^3 m}{d^4}f^2T_1$$

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

三. 实验仪器

1. 支架、底座
2. 读数显微镜
3. 钢尺、螺旋测微计
4. 信号发生器
5. 激振器和拾振器
6. 示波器
7. 游标卡尺

四. 实验步骤及注意事项

1. 拉伸法测弹性模量

(1)调整钢丝竖直。钢丝下夹具上挂上砝码钩拉直钢丝，调整底座螺钉使钢丝夹具不与周围支架碰蹭。

(2)调节读数显微镜。先粗调其高度，再细调，细调时注意消视差

(3)测量。测钢丝长L及其伸长量δL。先读出只挂砝码钩（质量0.200 时钢丝夹具标记线的位置，然后在砝码钩上每加一砝码（质量均为0.200 kg），读一次位置Y_i。先从0.200kg逐步增加到0.200×10 kg 再从0.200×10 kg逐渐减小至0.200kg，各测一组数据。

再用螺旋测微计在钢丝的不同地方测量其直径D，测6次，并在测量前后记录螺旋测微计的零点d各3次。

注意事项：①调节显微镜要轻、慢，不用手触摸物镜、目镜的光学表面调好后不要再碰动显微镜。

②测量时注意消除测微目镜丝杠空程带来的误差。

③增减砝码动作轻、慢，等钢丝不晃动并且形变稳定之后再测量。

2. 动力学法测弹性模量

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名 _____ ）

作实验日期 年 月 日 教师评定

(1)连接线路

(2)测量被测样品长度、直径（在不同部位测6次取平均值）及质量

(3)测样品的弯曲振动基频频率。采用下述方法：在基频节点处左右各30 mm范围内同时改变两悬线位置，每隔5～10 mm测一次共振频率。画出共振频率与悬线位置关系曲线。由图可准确求出悬线在节点位置的基频共振频率。

注意事项：①不用力拉悬线。悬挂样品、移动悬线时不给悬线冲力，轻放轻动。

②接线时注意将信号发生器的地与示波器的地接在一起，即共地。

③给激振器加正弦信号，幅度限制在3V～4V内。

④寻找共振点时，调节信号发生器频率应极其缓慢，到共振频率附近时应用频率微调旋钮调节。调节时还要注意判断假共振信号。当样品棒达到共振时，用手指触摸样品会有麻酥感，且手一碰样品，输出信号会马上小下来。共振时注意观察相位关系。

五.数据处理

1. 拉伸法

(1)测钢丝直径D

测定螺旋测微计零点 d（单位mm）

测量前 -0.008 -0.009 -0.008

测量后 -0.007 -0.009 -0.009

平均值 $\bar{d}=\frac{\sum_{i=1}^{6} d_i}{6}=-0.0083$ mm

在不同位置测量六次钢丝直径

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名 _____ ）

作实验日期 年 月 日 教师评定

测量序号	1	2	3	4	5	6
$D_{测i}$/mm	0.210	0.211	0.212	0.210	0.209	0.209
$D_i=D_{测i}-\bar{d}$/mm	0.218	0.219	0.220	0.218	0.217	0.217

钢丝的平均直径 $\bar{D}=\frac{\sum_1^6 D_i}{6}=0.21817$ mm

$S_D=\sqrt{\frac{\sum(D_i-\bar{D})^2}{5}}=0.001169$ mm

螺旋测微计示值误差 $\Delta_{仪}=0.004$ mm

故 $\Delta_D=\sqrt{(S_D)^2+(\Delta_{仪})^2}=\sqrt{0.001169^2+0.004^2}\approx 0.004$ (mm)

最终结果为 $D=(0.218\pm 0.004)$ mm

(2)测钢丝长度L及其伸长量δL

钢丝长度 L = 99.9 cm

测量序号	F_i ($F_i=mg$)/N	y_i/mm 增砝码	y_i/mm 减砝码	l_i' ($l_i'=y_{i+5}-y_i$)/mm 增砝码	l_i' ($l_i'=y_{i+5}-y_i$)/mm 减砝码
1	0.200×1×9.80	0.840	0.768	1.232	1.318
2	0.200×2×9.80	1.022	1.036	1.275	1.344
3	0.200×3×9.80	1.261	1.318	1.314	1.271
4	0.200×4×9.80	1.511	1.580	1.345	1.300
5	0.200×5×9.80	1.817	1.851	1.292	1.269
6	0.200×6×9.80	2.072	2.086		
7	0.200×7×9.80	2.297	2.380		
8	0.200×8×9.80	2.575	2.589		
9	0.200×9×9.80	2.856	2.880		
10	0.200×10×9.80	3.109	3.120		

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名 _____ ）

作实验日期 年 月 日 教师评定

$\bar{l} = \frac{\sum l_i}{10} = 1.2960$ mm

$S_l = \sqrt{\frac{\sum (l_i - \bar{l})^2}{9}} = 0.0356$ mm ✓

读数显微镜测某一位置误差为 0.01 mm，因此用它测一段伸长量 $l_i = y_{i+5} - y_i$ 的不确定度：

$\Delta_{l仪} = \sqrt{2} \times 0.01$ mm.

故 $\Delta_l = \sqrt{S_l^2 + (\Delta_{l仪})^2} = \sqrt{0.0356^2 + (\sqrt{2} \times 0.01)^2} = 0.038$ (mm)

又由于 $l = 5\delta L$

故 $\delta L = \frac{\bar{l}}{5} = \frac{1}{5} \times 1.2960 = 0.2592$ (mm)

$\Delta_{\delta L} = \frac{\Delta_l}{5} = \frac{1}{5} \times 0.038 = 0.008$ (mm)

最终结果

$\delta L = (0.259 \pm 0.008)$ mm ✓

(3)钢丝弹性模量

对钢丝施的力 $F = mg = 0.200 \times 9.80 = 1.96$ (N)

由实验原理可知，

$E = \frac{4FL}{\pi D^2 \cdot \delta L} = \frac{4 \times 1.96 \times 0.999}{\pi \times (0.218 \times 10^{-3})^2 \times 0.259 \times 10^{-3}} = 2.0254 \times 10^{11}$ (Pa)

实验室给出 $\frac{\Delta_F}{F} = 0.5\%$，$\Delta_L \approx 3$ mm，故而

$$\frac{\Delta_E}{E} = \sqrt{\left(\frac{\Delta_F}{F}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_L}{L}\right)^2 + \left(\frac{2\Delta_D}{D}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_{\delta L}}{\delta L}\right)^2}$$

$$= \sqrt{0.005^2 + \left(\frac{3}{999}\right)^2 + \left(\frac{2 \times 0.004}{0.218}\right)^2 + \left(\frac{0.008}{0.259}\right)^2}$$

$$= 0.0483$$

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

$\Delta_E = E \cdot \frac{\Delta_E}{E} = 2.0254 \times 10^{11} \times 0.0483 = 1.0 \times 10^{10}$ (Pa)

故 $E = (2.03 \pm 0.10) \times 10^{11}$ Pa $= (203 \pm 10)$ GPa ✓

(4) 用直线拟合法处理数据

由 $E = \frac{4FL}{\pi D^2 \delta L}$，$\delta L = \frac{4FL}{\pi D^2 E}$

又 $\delta L = y - y_0$，故 $y = y_0 + \frac{4L}{\pi D^2 E} \cdot F = y_0 + \frac{4L}{\pi D^2 E} \times 0.200 \times 9.80 \times N$

最使用 Excel 最小二乘法拟合得（使用增砝码时的数据）

$a = 0.00052127$

$b = 0.00013124$

$r = 0.9993$

r 接近于 1，说明直线拟合程度较好

$b = \frac{4L}{\pi D^2 E}$

故 $E = \frac{4L}{\pi D^2 b} = \frac{4 \times 0.999}{\pi \times (0.218 \times 10^{-3})^2 \times 0.00013124} = 2.03937 \times 10^{11}$ (Pa)

$= 204$ (GPa) ✓

2. 动力学法

(1) 测棒的长度 l 和质量 m.

游标卡尺零点为 0.00 mm。

游标卡尺测样品长度为 $l =$ 209.12 mm

数显电子天平得样品质量 $m =$ 35.89 g ✓

(2) 测棒的直径 d_0（单位：mm）

螺旋测微计零点 测前 −0.012 −0.010 −0.013

测后 −0.008 −0.009 −0.009

$\bar{d}_0 = \frac{\sum d_{0i}}{6} = -0.010$ mm

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

在不同位置测量六次样品直径

测量序号	1	2	3	4	5	6
$d_{测量i}$/mm	4.940	4.945	4.937	4.944	4.936	4.942
$d_i=d_{测量i}-\bar{d}$/mm	4.950	4.955	4.947	4.954	4.946	4.952

样本的平均直径 $\bar{d}=\frac{\sum_1^6 d_i}{6}=4.941$ mm

$$S_d=\sqrt{\frac{\sum_1^6(d_i-\bar{d})^2}{5}}=0.00367\ \text{mm}$$

螺旋测微计示值误差 $\Delta_{仪}=0.004$ mm，

故 $\Delta_d=\sqrt{(S_d)^2+(\Delta_{仪})^2}=\sqrt{(0.00367)^2+(0.004)^2}=0.005$(mm)

最终结果 $d=(4.941\pm0.005)$ mm

(3) 被测样品的共振频率

节点位置 $x_1=0.224l=46.84$ mm，$x_2=0.776l=162.28$ mm

悬线位置/mm	20	30	40	55	65	75
共振频率/Hz	372.95	369.69	368.70	368.89	370.51	375.41

使用 Excel 进行多项式拟合

可得 $f=5.49524\times10^{-6}x^4-0.0009973x^3+0.07095x^2$

$-2.3363x+398.3959$ （拟合系数 0.9999975 接近于1）

代入 $X=46.84$ (mm)

得 $f=368.59$ Hz

(4) 计算 E 及其不确定度 Δ_E

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名 _____ ）

作实验日期 年 月 日 教师评定

$$E = 1.6067\frac{l^3 m}{d^4} f^2 T_1$$

$$= 1.6067 \times \frac{(209.12\times10^{-3})^3 \times (35.89\times10^{-3})}{(4.941\times10^{-3})^4} \times 368.59^2 \times 1.0031$$

$$= 1.2058\times10^{11}\ (Pa) = 120.58\ (GPa)$$

由于 $E = 1.6067\cdot\frac{l^3 m}{d^4} f^2\cdot T_1$

$$\ln E = \ln(1.6067T_1) + 3\ln l + \ln m + 2\ln f - 4\ln d$$

则 $\frac{\partial \ln E}{\partial l} = \frac{3}{l}$，$\frac{\partial \ln E}{\partial m} = \frac{1}{m}$，$\frac{\partial \ln E}{\partial f} = \frac{2}{f}$，$\frac{\partial \ln E}{\partial d} = -\frac{4}{d}$

故 $\frac{\Delta_E}{E} = \sqrt{\left(\frac{\partial \ln E}{\partial l}\Delta_l\right)^2 + \left(\frac{\partial \ln E}{\partial m}\Delta_m\right)^2 + \left(\frac{\partial \ln E}{\partial f}\Delta_f\right)^2 + \left(\frac{\partial \ln E}{\partial d}\Delta_d\right)^2}$

$$= \sqrt{\left(\frac{3\cdot\Delta_l}{l}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_m}{m}\right)^2 + \left(\frac{2\cdot\Delta_f}{f}\right)^2 + \left(\frac{4\cdot\Delta_d}{d}\right)^2}$$

$$= \sqrt{\left(\frac{3\times0.02}{209.12}\right)^2 + \left(\frac{0.05}{35.89}\right)^2 + \left(\frac{2\times0.10}{368.59}\right)^2 + \left(\frac{4\times0.005}{4.941}\right)^2}$$

$$= 0.004325$$

$$\Delta_E = \frac{\Delta_E}{E}\cdot E = 0.004325\times120.58 \approx 0.5\ (GPa)$$

最终结果 $E = (120.6 \pm 0.5)\ GPa$

六、思考题

1. 螺旋测微计使用注意事项是什么？棘轮如何使用？测微计用毕后应作何处置？

答：①螺旋测微计在使用前后都应检查零点，零点修正有正负之分.

②测量时手应握在螺旋测微计的绝热板部分，并且尽量少接触被测工件，以免热胀冷缩影响测量精度

③测量时必须使用棘轮.

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

④当测微螺杆端面将要接触到被测物之前，应旋转棘轮，直至接触上被测物时，棘轮自动打滑，听到三声"咯"的声音后应停止旋转棘轮，进行读数。

⑤螺旋测微计用毕须将螺杆回转几圈，留出空隙，防止热胀使螺杆变形

2. 在本实验中读数显微镜作测量时哪些情况下会产生空程误差？应如何消除它？

答：当手轮改变转动方向时会产生一段空程，如果在连续测量的过程中反转手轮，便会产生空程误差。

消除的办法是：在增(减)砝码的测量过程中始终按一个方向转动手轮，从增砝码变为减砝码的时候，在开始读取减砝码数据之前应保证手轮已经往减砝码方向转过几圈。

3. 从E的不确定度计算式分析哪个量的测量对E的结果的准确度影响最大？测量中应注意哪些问题？

答：$\frac{\Delta E}{E}=\sqrt{\left(\frac{\Delta F}{F}\right)^2+\left(\frac{\Delta L}{L}\right)^2+\left(\frac{2\Delta D}{D}\right)^2+\left(\frac{\Delta \delta L}{\delta L}\right)^2}$，计算如下

$\frac{\Delta F}{F}$	$\frac{\Delta L}{L}$	$\frac{2\Delta D}{D}$	$\frac{\Delta \delta L}{\delta L}$
0.005	0.003	0.037	0.031

可以看出，钢丝直径D的测量对E的结果的准确度影响最大。

测量钢丝直径时，必须正确使用螺旋测微计的棘轮，并且要选定多个测量点进行测量。同时，也不可过于鲁莽，以免弄弯钢丝，导致伸长量测量不准。

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

其次，伸长量 δL 的测量对 E 的结果的准确度影响也较大，这就需要测量时足够细心，选准一个参考点来读数，保证数据的准确性。

4. 本实验能否用作图法或直线拟合法处理数据？

答：可以。无论作图法还是直线拟合法都可以通过作出 $F\sim\delta L$ 图，求出斜率以得到 $\frac{F}{\delta L}$ 的值，再用同样的方法测出 L 和 D，代入公式 $E=\frac{4FL}{\pi D^2\delta L}$ 即可求出 E。具体见"数据处理"，其结果 204 GPa 与逐差法所得的 203 GPa 相差不大。 ✓

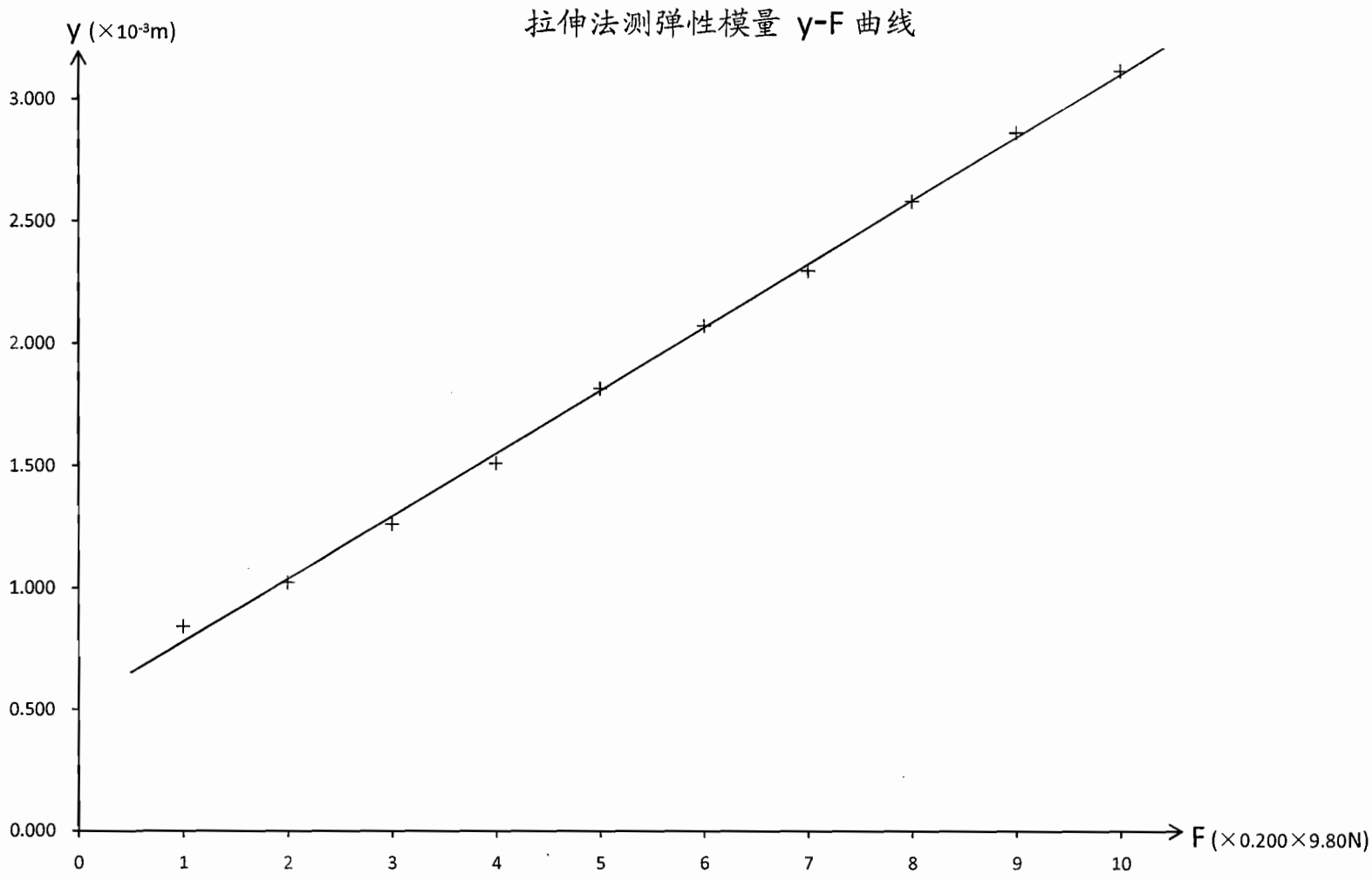
5. 本实验如果改用光杠杆法测量微小伸长量，实验装置应作何考虑

答：光杠杆的平面镜两个前尖足应放在支架平台上，后尖足应放在待测钢丝的下夹具平台上，这样便可通过望远镜和标尺观察平面镜的微小变化以测量钢丝的微小伸长量。 ✓

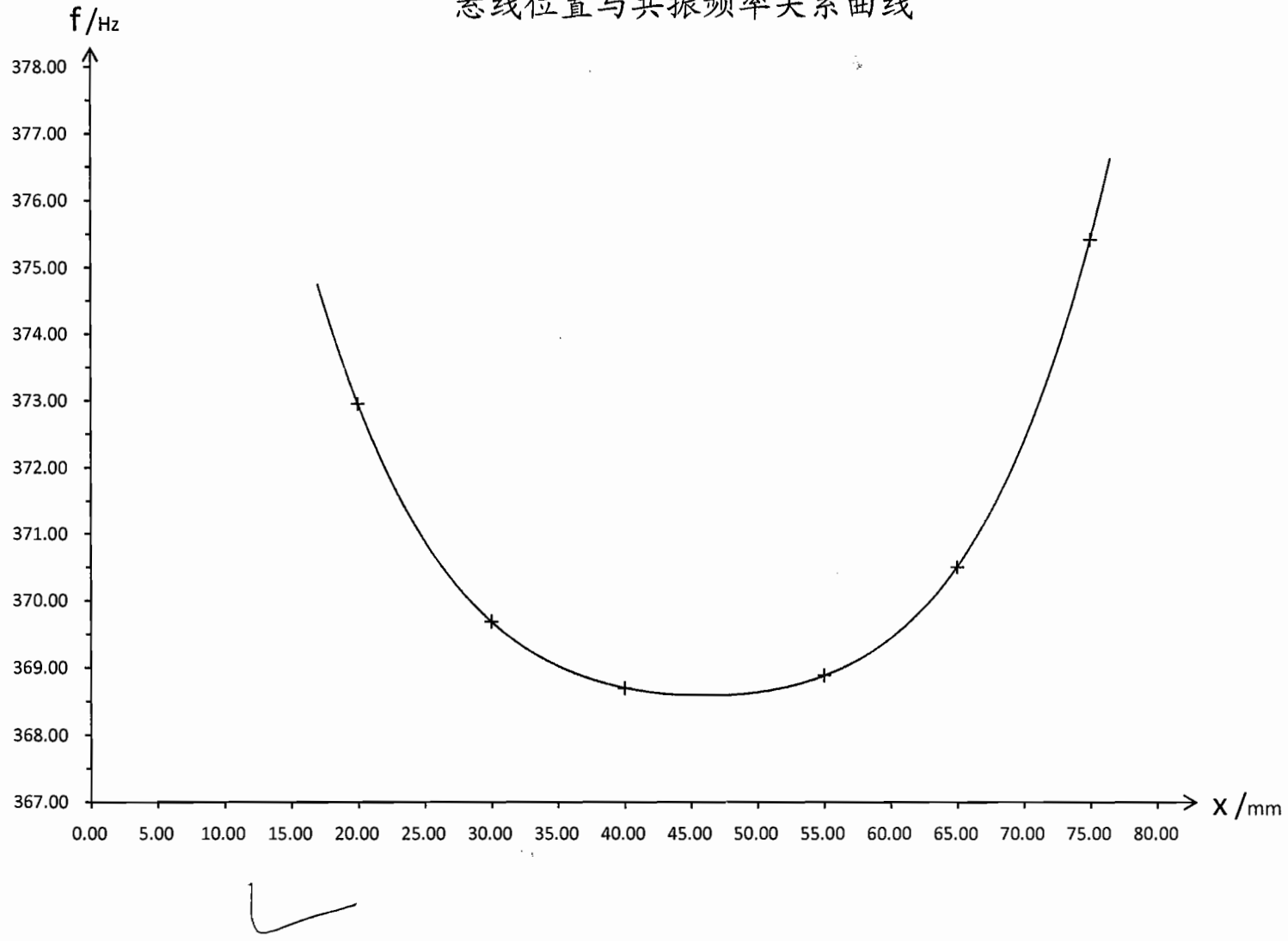
七. 感想

弹性模量是固体材料的重要物理参量，反映了材料形变与应力关的物理量。拉伸法研究拉伸正应力与线应变之间的关系，是最基本的测量方法。动力学法将棒状样品用细线悬挂起来，用声学方法测出它作弯曲振动时的共振频率，更实用，更准确。

感谢老师的帮助指导。 ✓


拉伸法测弹性模量 y-F 曲线
y (×10⁻³m)
3.000
2.500
2.000
1.500
1.000
0.500
0.000
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
F (×0.200×9.80N)

悬线位置与共振频率关系曲线



清华大学实验报告

系别 精仪系 班号 精11 姓名 尚恩赫 （同组姓名 ）

作实验日期 年 月 日 教师评定

1. 仪器编号 5 ；钢丝长度 $L=$ 99.9 cm

测量序号	砝码数	y_i/mm 增砝码	y_i/mm 减砝码	$l_i=y_{i+5}-y_i$/mm 增砝码时 l_-	$l_i=y_{i+5}-y_i$/mm 减砝码时 l_-
1	1	~~1.052~~ 0.840	0.768	1.232	1.318
2	2	~~1.295~~ 1.022	1.036	1.275	1.344
3	3	1.261	1.318	1.314	1.271
4	4	1.511	1.580	1.345	1.300
5	5	1.817	1.851	1.292	1.269
6	6	2.072	2.086		
7	7	2.297	2.380		
8	8	2.575	2.589		
9	9	2.856	2.880		
10	10	3.109	3.120		

$\bar{l}=1.296$ mm. $\delta l=\frac{\bar{l}}{5}$ $E=\frac{4FL}{\pi D^2 \delta L}=\frac{4\times 0.2\times 9.8\times 0.999}{\pi\times(0.218\times10^{-3})^2\times\frac{1.296\times10^{-3}}{5}}=$ ~~2.0054~~ 2.0254 $\times$

则钢丝直径：

螺旋测微计零点 d 测前 −0.008 −0.009 −0.008

测后 −0.007 −0.009 −0.009

$\bar{d}=$ ~~−0.8~~ −0.008

测量序号	1	2	3	4	5	6
d_i/mm	0.210	0.211	0.212	0.218	0.209	0.209
$d_i-\bar{d}$	0.218	0.219	0.220	0.218	0.217	0.217

~~$\bar{D}_{测}=0.218$ mm~~

$D=\bar{D}_{测}-\bar{d}=0.21$

$D=0.218$ mm

游标卡尺零点 0.00

样品长度 209.12 mm，样品质量 35.89 g

申J35

$T_1=1.0031$

$\Delta_L=0.02$ mm $\Delta_f=0.10$ Hz $\Delta_m=0.05$ g $\Delta_{仪}=0.004$ mm

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 精仪系 班号 精11 姓名 尚思远 （同组姓名 ）

作实验日期 年 月 日 编号：5 教师评定

螺旋测微计零点 测前 -0.012 -0.010 -0.013

测后 -0.008 -0.009 -0.009

$\bar{d} = -0.010$

样品直径

测量序号	1	2	3	4	5	6
D_i/mm	4.940	4.945	4.937	4.944	4.936	4.942

基频频率

测量序号	1	2	3	4	5	6
换能器与端面的距离 X/mm	20	30	40	55	65	75
频率振频率 f/Hz	372.95	369.69	368.70	368.89	370.51	375.41

申J3

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定 94

示波器的原理使用与声速测量

2011010494
精11 尚恩垚

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名 _____ ）

作实验日期 年 月 日 教师评定

示波器原理使用与声速测量

一、实验目的

(1) 了解示波器的原理和基本结构

(2) 学会使用示波器观察波形和进行测量

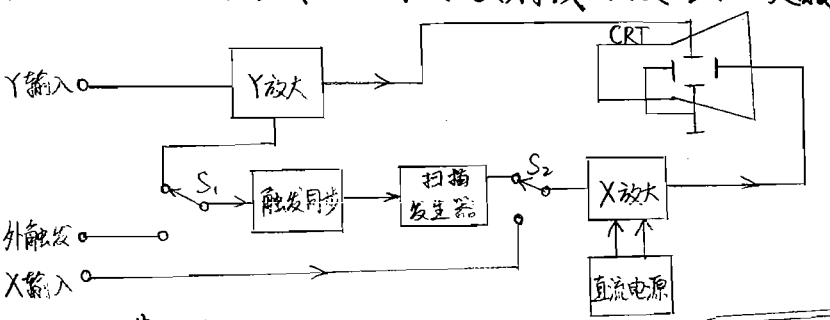
(3) 了解声波在空气中传播速度与气体状态参量的关系

(4) 了解超声波产生和接收的原理，学习一种测量空气中声速的方法，加深相位的概念。

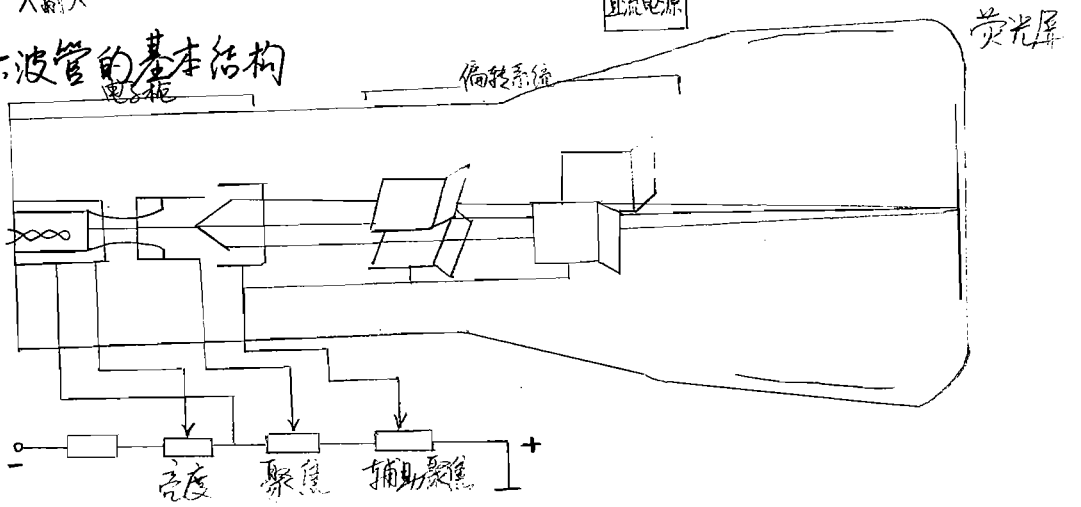
二、实验原理

1. 示波器原理

示波器就其显示方式主要有阴极射线示波器和液晶显示两种。



(1) 示波管的基本结构



清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名 _____ ）

作实验日期 年 月 日 教师评定

(2)示波器显示波形的原理

电子运动是竖直方向、水平方向运动的合成。当水平方向的锯齿波电压与竖直方向电压变化周期相等时，在荧光屏上将能显示出完整周期的波形图。

(3)同步的概念

当扫描电压的周期与被测信号的周期不是整数倍时，每次扫描开始时波形曲线上起点均不一样，屏上出现移动着的不稳定图形。

为此，示波器内装有扫描同步装置，在适当调节后，让锯齿波电压的扫描起点自动跟着被测信号改变，这就称为整步(或同

(4)利萨如图的基本原理

当示波器 X、Y 输入是频率相同或是简单整数比的两个正弦电压，则屏上光点将呈现特殊的轨迹，称利萨如图。

$$f_y : f_x = n_x : n_y$$

2. 声速测量

(1)声波在空气中的传播速度

① 理想气体中声波传播速度 $V=\sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}$

其中 γ 比热容比，M 气体摩尔质量，T 绝对温度，$R=8.31441\ J$

②正常情况下，干燥空气平均摩尔质量 $M_a=28.964\times10^{-3}\ kg/mol$

在标准状况下，干燥空气声速 $V_0=331.5\ m/s$。在室温 t 下，干燥空气声速

$$V=V_0\sqrt{1+\frac{t}{T_0}}$$

③温度为 t，相对湿度为 γ 的空气中，声速为

$$V=331.5\sqrt{\left(1+\frac{t}{T_0}\right)\left(1+0.31\frac{\gamma\cdot P_s}{P}\right)}$$

式中 P_s 室温时空气的饱和蒸气压，查表得；$P=1.013\times10^5\ Pa$

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名 _____ ）

作实验日期 年 月 日 教师评定

(2)测量声速的实验方法

声波 $v=f\lambda$，测出 f 和 λ，求以声速。

波是相位的传播，相邻同相点间距 $l=n\lambda$。

为判断相位差并测定波长，可利用利萨如图在两电信号同相或反相时椭圆退化成左斜或右斜直线来判断，其优点是斜直线情况判断相位差最为敏锐

三. 实验仪器

1. SS-7802示波器
2. GFG-8016G函数信号发生器
3. 自制多波形信号发生器（DB-87型）
4. 声速测量仪（有声波发射器、超声波接收器、数显游标卡三部
5. 干湿温度计

四. 实验步骤

1. 示波器的使用

(1)观测波形。用示波器测出各种波形的峰峰值（光标法和分度法两种方法）、周期，并计算有效值和频率。

(2)观测利萨如图。将函数信号发生器两个通道的正弦信号分别输入到示波器的两输入端，调整两正弦信号频率比为1:1和1:2记下相应利萨如图的形状及 f_x f_y 值

2. 声速测量

(1)连接电路。函数信号发生器置于正弦波输出，频率范围置于100 kHz档，输出幅度调到峰值10V左右。

(2)先将函数信号发生器的频率调节到 40 kHz 左右，然后细调频率，使接收器输出信号最大，并记下此频率即超声波频率

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

(3)用相位法测波长。利用利萨如图找出同相点。每遇一个同相点，测一次接收器位置x，连续测20个数据并用逐差法加以处理。

(4)在测量开始和结束时，先后记录室温t_1和t_2，以及相对湿度γ_1和γ_2，得到对应的饱和蒸气压值。然后用"实验原理"部分相应公式计算出声速理论值，与实验测得的声速值比较。

五.数据处理

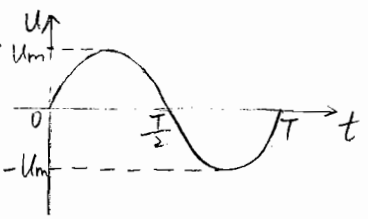
1.观测波形

用示波器以相应方法测得的各量值整理如下页表格。

表格后给出了有效值的计算过程。

	光标法U_{pp}/V	分度法U_{pp}/V	周期T/ms	计算U_{eff}/V	计算频率f/kHz
正弦波	2.515	2.5	0.648	0.889	1.543
方波	11.96	12	0.646	5.980	1.547
三角波	3.86	3.8	0.640	1.114	1.562
尖峰波	15.05	15	0.640		1.562

①正弦波



不妨设$U=U_m\sin\omega t$，U_m为峰值，$U_m=\frac{1}{2}U_{pp}$

有效值$U=\sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T u^2dt}=\sqrt{\frac{U_m^2}{T}\int_0^T\sin^2\omega t\,dt}=\sqrt{\frac{U_m^2}{\omega T}\int_0^{\omega T}\sin^2x\,dx}\xrightarrow{\omega T=2\pi}\sqrt{\frac{U_m^2}{2\pi}\int_0^{2\pi}\frac{1-\cos}{2}}$

$=\frac{U_m}{\sqrt{2}}=\frac{U_{pp}}{2\sqrt{2}}=\frac{2.515}{2\sqrt{2}}=0.889$ V

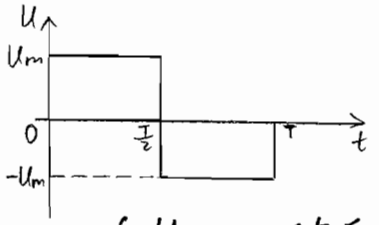
$f=\frac{1}{T}=\frac{1}{0.648}=1.543$ kHz

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

②方波

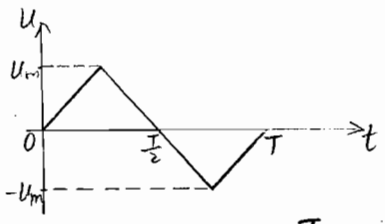


不妨设 $u=\begin{cases} U_m & 0<t\le\frac{T}{2} \\ -U_m & \frac{T}{2}<t\le T \end{cases}$ $U_m=\frac{1}{2}U_{pp}$

有效值 $U=\sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T u^2dt}=\sqrt{\frac{U_m^2}{T}\int_0^T dt}=U_m=\frac{U_{pp}}{2}=\frac{11.96}{2}=5.980\ V$

$f=\frac{1}{T}=\frac{1}{0.646}=1.547\ kHz$

③三角波



波形特殊点：$(0,0)$ $(\frac{T}{4},U_m)$ $(\frac{3T}{4},-U_m)$ $(\frac{T}{2},0)$ $(T,0)$

$u=\begin{cases} \frac{4U_m}{T}\cdot t & 0<t\le\frac{T}{4} \\ -\frac{4U_m}{T}t+2U_m & \frac{T}{4}<t\le\frac{3}{4}T \\ \frac{4U_m}{T}t-4U_m & \frac{3}{4}T<t\le T \end{cases}$ $U_m=\frac{1}{2}U_{pp}$

$\int_0^T u^2dt=\int_0^{\frac{T}{4}}(\frac{4U_m}{T}t)^2dt+\int_{\frac{T}{4}}^{\frac{3T}{4}}(-\frac{4U_m}{T}t+2U_m)^2dt+\int_{\frac{3T}{4}}^{T}(\frac{4U_m}{T}t-4U_m)^2dt$

$=(\frac{4U_m}{T})^2\int_0^{\frac{T}{4}}t^2dt-\frac{T}{4U_m}\int_{U_m}^{-U_m}X^2dX+\frac{T}{4U_m}\int_{-U_m}^{0}X^2dX$

$=\frac{1}{3}U_m^2T$

有效值 $U=\sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T u^2dt}=\frac{U_m}{\sqrt{3}}=\frac{U_{pp}}{2\sqrt{3}}=\frac{3.86}{2\sqrt{3}}=1.114\ V$

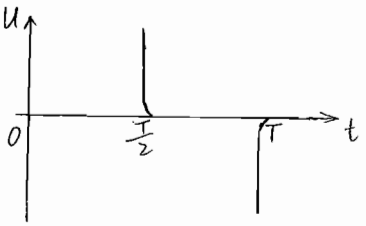
$f=\frac{1}{T}=\frac{1}{0.640}=1.562$

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

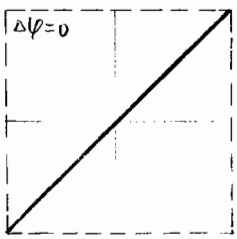
④尖峰波

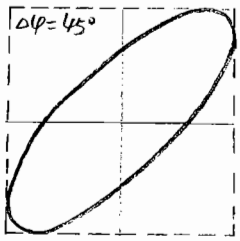


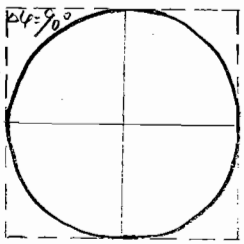
$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0.640} = 1.562\ kHz$

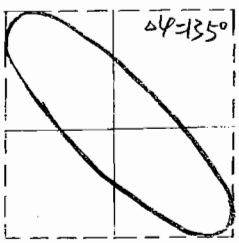
2. 观测利萨如图

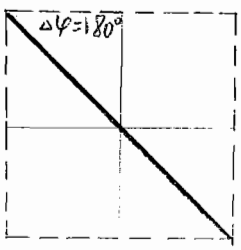
① $f_x = 1000.00\ Hz$ $f_y = 1000.01\ Hz$ $f_x : f_y \approx 1:1$

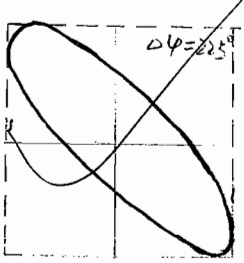


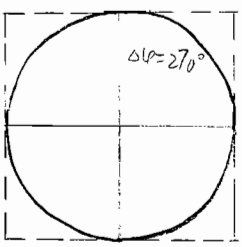


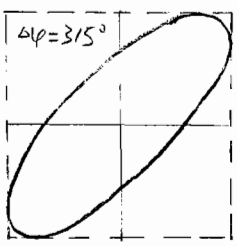


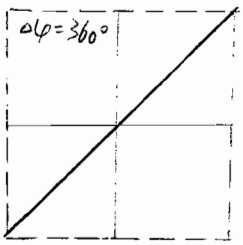










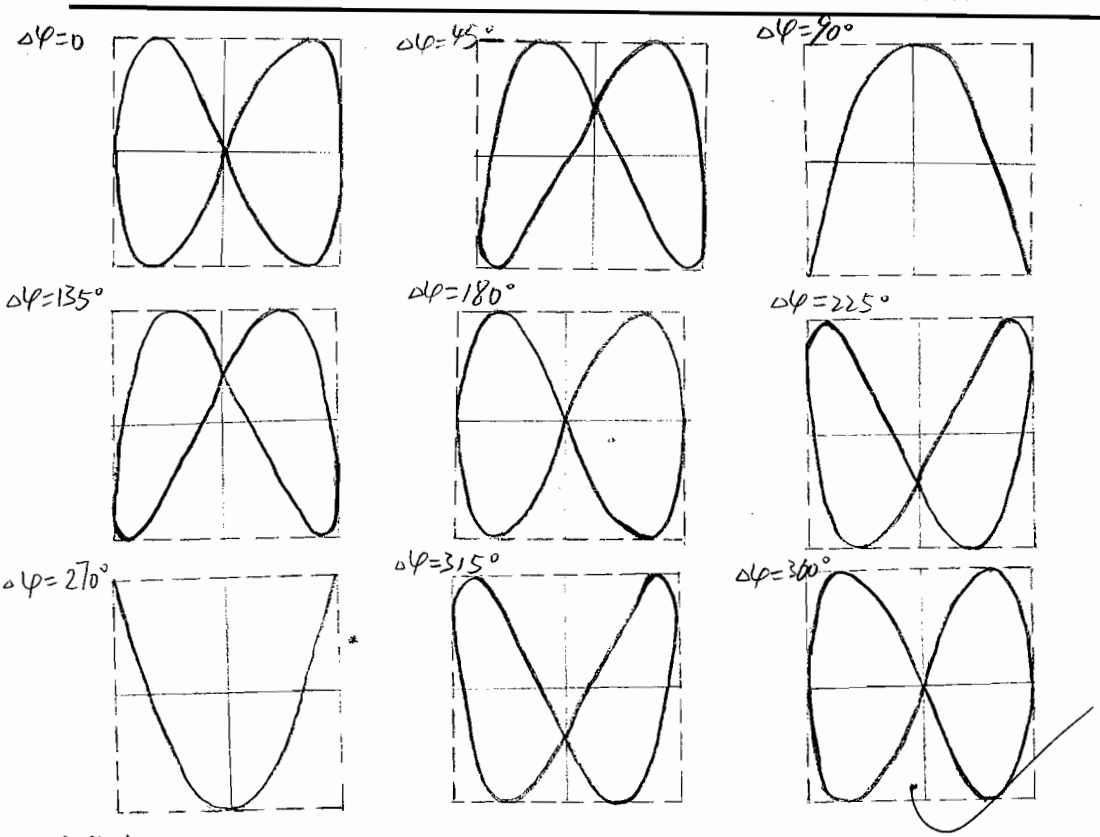


② $f_x = 1000.00\ Hz$ $f_y = 1999.99\ Hz$ $f_x : f_y \approx 1:2$

清 华 大 学 实 验 报 告

系别_____ 班号_____ 姓名_____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定



3. 测声速

超声波频率 $f = 40155.00$ Hz

测前室温 $t_1 = 24.5$ °C　　相对湿度 $r_1 = 88\%$

湿球 $t_1' = 23.5$ °C

测后室温 $t_2 = 25.5$ °C　　相对湿度 $r_2 = 86\%$

湿球 $t_2' = 24$ °C

序号 i	X_i /mm	X_{i+10} /mm	$L_i = X_{i+10} - X_i$ /mm
1	0	87.32	87.32
2	9.09	95.44	86.35
3	17.96	103.87	85.91
4	26.81	112.62	85.81

清 华 大 学 实 验 报 告

系别_____ 班号_____ 姓名_____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

5	35.45	121.54	86.09
6	44.20	130.52	86.32
7	52.77	139.34	86.57
8	61.28	148.33	87.05
9	69.98	156.94	86.96
10	78.87	165.82	86.95

① $\bar{l} = \frac{\sum l_i}{10} = 86.533$ mm

② 标准偏差 $S_{10\lambda} = 0.5196377$

数显游标卡尺示值误差限为 0.03 mm，故

$\Delta_{10\lambda} = \sqrt{(S_{10\lambda})^2 + (\sqrt{2}\Delta_{仪})^2}$

$= \sqrt{(0.5196377)^2 + (\sqrt{2}\times 0.03)^2} = 0.521367$ mm

③ 由于 $l = 10\lambda$，故

$\bar{\lambda} = \frac{1}{10}\bar{l} = \frac{1}{10}\times 86.533 = 8.6533$ mm

$\Delta_\lambda = \frac{1}{10}\cdot\Delta_{10\lambda} = \frac{1}{10}\times 0.521367 = 0.05$ mm

$\therefore \lambda = \bar{\lambda} \pm \Delta\lambda$

$= (8.65 \pm 0.05)$ mm

④ $v = f\lambda = 40155.00 \times 8.65 \times 10^{-3} = 347.34075$ m/s

⑤ $\because v = f\lambda \quad \therefore \ln v = \ln f + \ln\lambda$

$\frac{\partial \ln v}{\partial f} = \frac{1}{f} \quad \frac{\partial \ln v}{\partial \lambda} = \frac{1}{\lambda}$

故 $\frac{\Delta v}{v} = \sqrt{(\frac{\partial \ln v}{\partial f}\cdot\Delta_f)^2 + (\frac{\partial \ln v}{\partial \lambda}\cdot\Delta_\lambda)^2} = \sqrt{(\frac{\Delta_f}{f})^2 + (\frac{\Delta_\lambda}{\lambda})^2}$

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

$$\Delta_v = v\sqrt{\left(\frac{\Delta f}{f}\right)^2+\left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda}\right)^2}$$

⑥ $\frac{\Delta v}{v} = \sqrt{\left(\frac{\Delta f}{f}\right)^2+\left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{10}{40155}\right)^2+\left(\frac{0.05}{8.65}\right)^2} = 0.0057857$

$\Delta_v = v\cdot\frac{\Delta v}{v} = 347.34075 \times 0.0057857 = 2 \ m/s$

⑦ $v = (347 \pm 2)\ m/s$

⑧计算理论值

$t = \frac{t_1+t_2}{2} = \frac{24.5+25.5}{2} = 25.0\ ^\circ C$

$r = \frac{r_1+r_2}{2} = \frac{88\%+86\%}{2} = 87\%$

查表知 $t = 25.0^\circ C$，$P_s = 0.0317\times10^5\ Pa$

因而 $v = 331.5\sqrt{(1+\frac{t}{T_0})(1+0.31\frac{rP_s}{P})} = 331.5\times\sqrt{(1+\frac{25.0}{273.15})(1+0.31\times\frac{87\%\times0.}{1.013}}$

$= 347.8 \ m/s$

实验值与理论值的相对偏差

$$2 = \frac{347.8-347}{347.8}\times100\% = 0.23\%$$

此相对偏差很小，可见用相位法测波长进而得出声速的实验方法准确程度很高，是一种精确的测声速的方法。

六、思考题

1. 若打开示波器开关后，屏幕上既看不到扫描线又看不到光点，可能有哪些原因？应分别作怎样的调节？

答：①可能是亮度不够。调节亮度（INTENSITY）旋钮；

②可能是扫描线或光点超出了屏幕范围，此时应调节X、Y两个的POSITION按钮

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

2. 若图形不稳定，总是左移或右移，应如何调节？

答：首先应选择正确的触发源（按SOURCE键），然后调节TRIG LEVEL旋钮，直至波形稳定。

3. 若Y轴信号频率 f_y 比X轴信号频率 f_x 大很多，示波器上看到什么情形？相反 f_y 比 f_x 小很多，又会看到什么情形？

答：f_y 比 f_x 大很多时，示波器上显示十分密集的波形，乍看上去像一个高度为信号峰峰值的条带；f_y 比 f_x 小很多时，示波器上显示的波形应为一条平缓的类似直线的曲线。

4. 若被测信号幅度太大，则在屏上看到什么图形？

答：在屏幕上看到信号的一部分波形，超出屏幕部分无法显示。

5. 观察利萨如图时，若图形不稳定，且是一形状不断变化的椭圆，则图形变化快慢与两信号频率差有何关系？

答：频率差值越大，变化越快；差值越小，变化越慢。

6. 用逐差法处理数据的优点是什么？还有没有别的合适的数据处理方法，能通过测量用它得到入值吗？

答：逐差法的优点在于它充分利用了所测数据，可减小测量的随机误差，也可以减小测量仪器带来的误差。也可以用作图法或直线拟合法处理数据，两种方法中直线的斜率与入存在定量关系，通过斜率即可得到入。

7. 课本上式（2.10.6）中 $\Delta_{仪}$ 前为何有系数 $\sqrt{2}$？

答：因为l0入的数值按下式得出：

$$l0入 = l_i = X_{i+10} - X_i$$

这里包括了两个测量的量 X_i 和 X_{i+10}，因此仪器导致的总误差

$$\Delta_{仪} = \sqrt{\Delta_{X_{i+10}}^2 + \Delta_{X_i}^2} = \sqrt{\Delta_{仪}^2 + \Delta_{仪}^2} = \sqrt{2}\Delta_{仪}$$

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

七. 实验小结

示波器是一种用途广泛的电子测量仪器，用它既能直接观察电信号的波形，也能测定电压信号的幅度、周期和频率等参数。用双踪示波器还可以测量两个信号之间的时间差或相位差。凡是能转化为电压信号的电学量和非电学量都可以用示波器测量。

声波是一种在弹性媒质中传播的纵波。声波的波长、强度、传播速度等是声波的重要性质。测量声速最简单的方法之一是利用声速 v 与振动频率 f 和波长 λ 之间的关系（即 $v=f\lambda$）求

感谢老师的帮助指导。

清华大学实验报告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名 _____ ）

作实验日期 年 月 日 教师评定

示波器的原理使用与声速测量

一. 实验目的

1. 了解示波器的原理和基本结构
2. 学会使用示波器观察波形和进行相关测量
3. 了解声波在空气中传播速度与气体状态参量的关系
4. 了解超声波产生和接收的原理，学习一种测量空气中声速的方法，加深相位的概念。

二. 实验仪器

1. SS-7802示波器
2. GFG-8016G函数信号发生器
3. 自制多波形信号发生器（DB-8T型）
4. 声速测量仪
5. 干湿温度计

三. 实验步骤

1. 示波器的使用

(1) 观察波形。用示波器测出各种波形的峰峰值（用光标法和分度法），周期。

(2) 观察利萨如图形。将函数信号发生器两个通道的正弦信号分别输入到示波器两端。

调整两正弦信号频率比为1:1和1:2，记下相应的利萨如图的形状及 f_x f_y 值.

2. 声速测量

(1) 连接电路。函数信号发生器置于正弦波输出，频率范围置

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

于100kHz档，输出幅度调到峰值10V左右。

(2)先将函数信号发生器频率调节到40kHz左右，然后细调频率，使接收器输出信号最大，并记下此频率，即为超声波频率

(3)用相位法测波长。利用利萨如图找出同相点，每遇到一个同相点，测一次接收器位置X，连续测出20个数据并用逐差法加以处理

(4)在测量开始和结束时，先后记录室温t_1和t_2，以及相对湿度r_1和r_2，得到对应的饱和蒸气压值。然后用"实验原理"部分相应公式计算出声速理论值，与实验测得的声速值比较。

清华大学实验报告

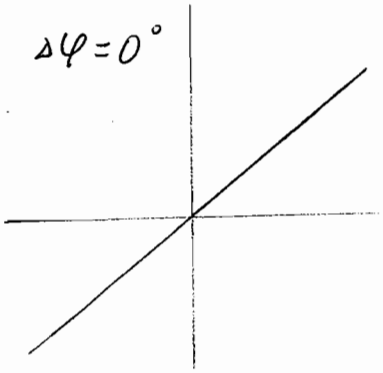
系别 精仪系 班号 精11 姓名 尚恩彦 （同组姓名 ）

作实验日期 年 月 日 教师评定

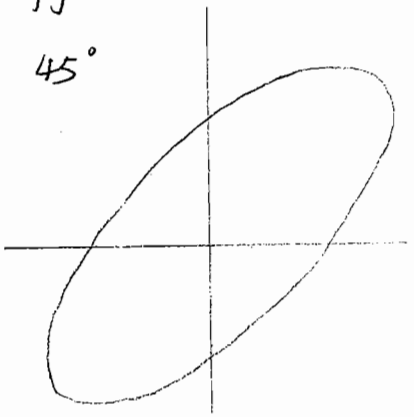
	光标法/V	分度法/V	T/ms	f
正弦波	2.515	2.5	0.648	1.543
方波	11.96	12	~~0.640~~ 0.646	~~1.562~~ 1.547
三角波	3.86	3.8	0.640	1.562
尖峰波	15.05	15	0.640	1.562

2. ① $f_x = 1000.00\,Hz$ $f_y = 1000.01\,Hz$ A路

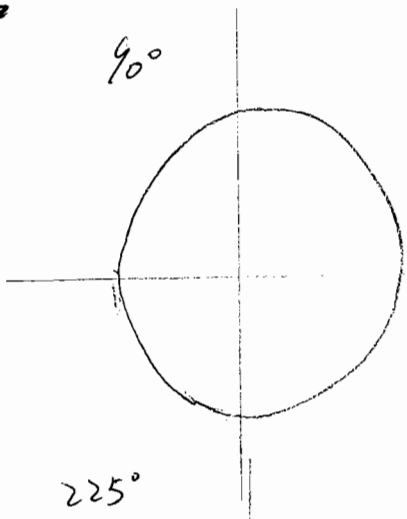
$\Delta\varphi = 0°$



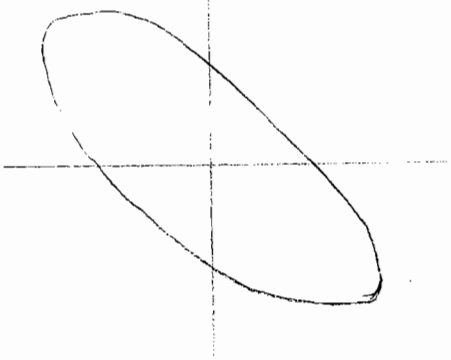
45°



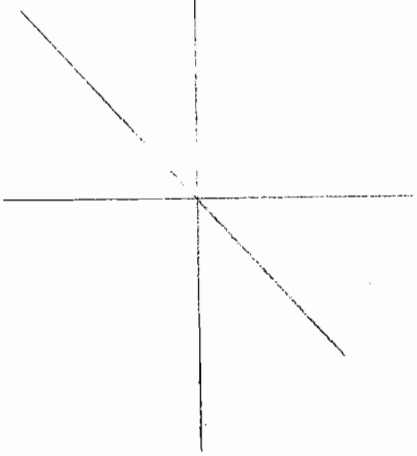
90°



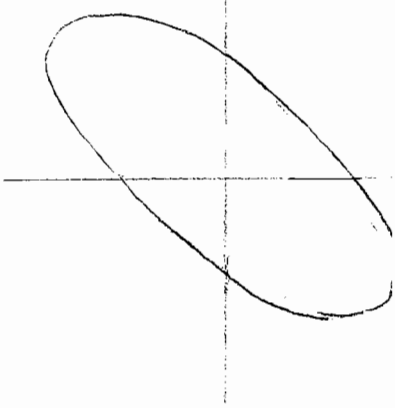
135°



180°



225°

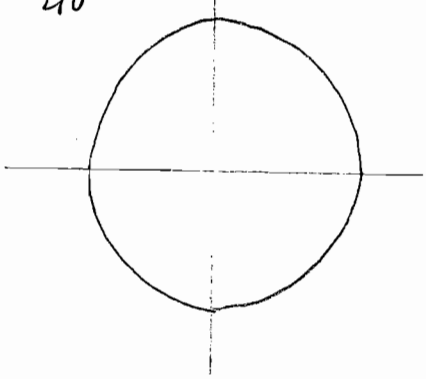


清 华 大 学 实 验 报 告

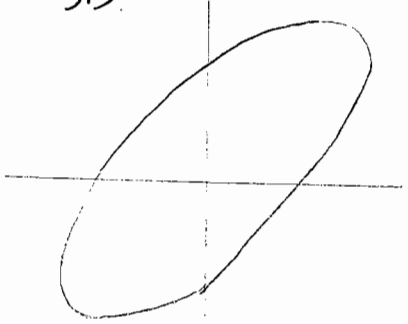
系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

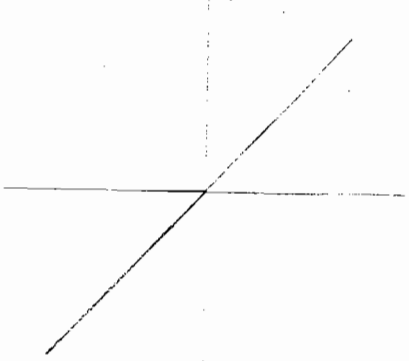
270°



315°

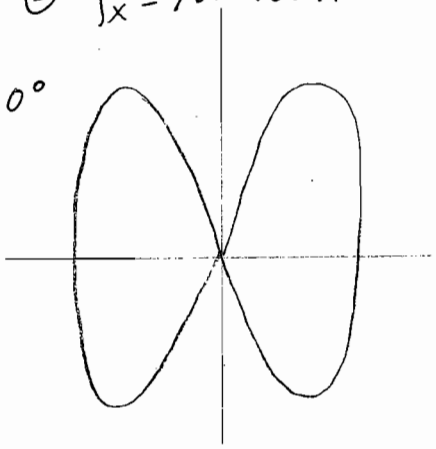


360°

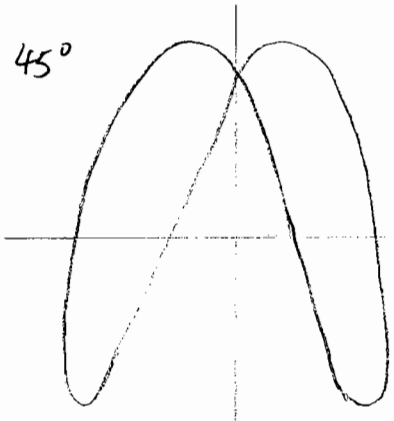


② $f_x = 1000.00\,Hz$ $f_y = 1999.99\,Hz$

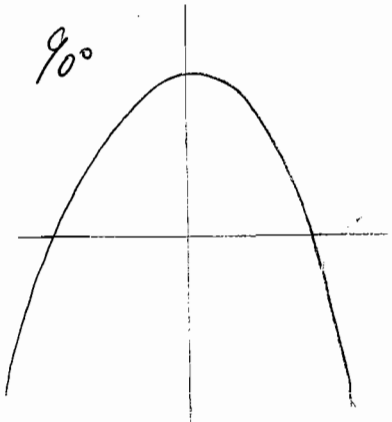
0°



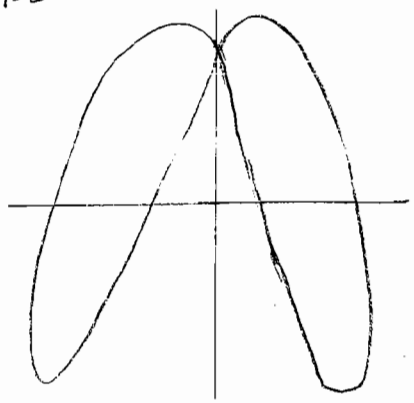
45°



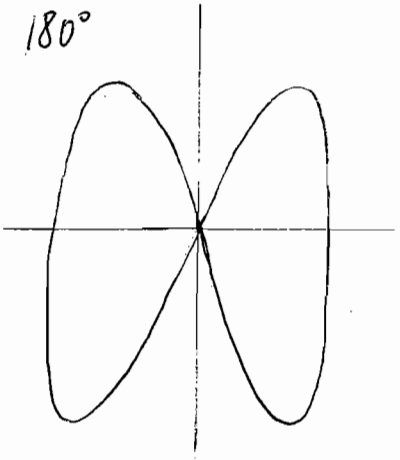
90°



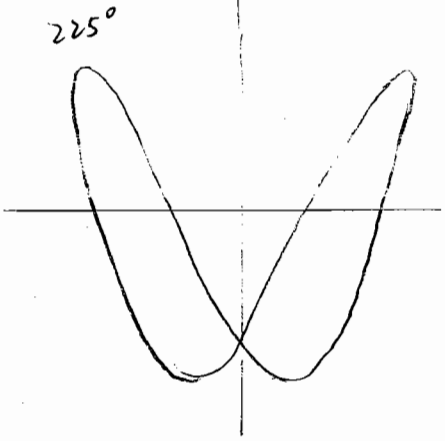
135°



180°



225°



清 华 大 学 实 验 报 告

系别 精仪 班号 11班 姓名 耿强 （同组姓名 ）

作实验日期 年 月 日 教师评定

压电元件导纳圆测量

及

互感耦合电路的特性研究

精仪系
11 班
耿 强
2011010492

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

一. 实验目的

1. 测量压电元件的导纳，即测量阻抗，可提供该元件与所在电路之间的阻抗匹配数据。

2. 通过测量压电元件或压电换能器的导纳圆可以得到其发射效率。

3. 学习利用示波器测量交流阻抗的方法。

二. 实验原理

1. 压电效应

没有电场作用，由机械应力的作用而使电介质晶体产生极化并形成晶体表面电荷的现象称为压电效应。其电荷密度与应力成正比，当机械应力由压应力变为拉应力时，电荷符号也改变。

与之相反，将具有压电效应的电介质晶体置于电场中，电场的作用会使晶体发生形变，此为逆压电效应。形变大小与外加电场强度成正比，电场反向时，形变也改变符号。

凡有压电效应的晶体称为压电晶体。

2. 压电元件

我们根据需要，将压电陶瓷做成一定的形状。压电元件在声学中是一个振动元件。作为发射声波元件时，在压电元件两极加上交变电压，当此电压频率与压电元件某一振动模式的固有频率一致时，发生共振，振幅最大。这种元件工作时一般都和某一电子线路连在一起，为了研究它的工作状态及在电路中的作用，通常用一等效电路模拟它的机电动特性。

3. 压电元件的等效电路

压电元件在静态时若忽略电损耗则可看作一纯电容 C_0，压电元件振动并幅射能量时，还存在一与 C_0 并联的动态阻抗，可用串联的电感 L_1、电容 C_1 及电阻 R_1 表示。在元件机械品质较高时，某共振频率附近 L_1、C_1

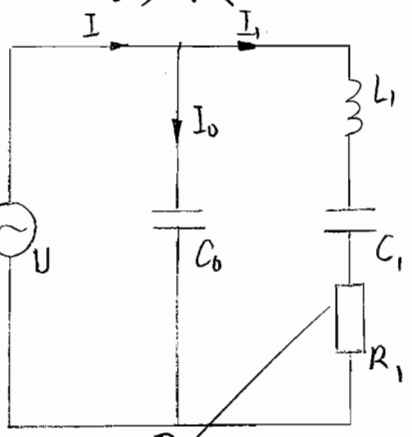
清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名 _____ ）

作实验日期 年 月 日 教师评定

认为是常数，R_1 大小和机械损耗及辐射机械能多少有关

如图：电路总导纳



图一

$$Y = \frac{I}{U} = \frac{I_0+I_1}{U} = \frac{I_0}{U} + \frac{I_1}{U} = y_0 + y_1 \quad (1)$$

$$y_0 = j\omega C_0 = jb_0 \quad (2)$$

$$y_1 = y \cdot \frac{1}{R_1 + j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega C_1}} = g_1 + jb_1 \quad (3)$$

其中

$$g_1 = \frac{R_1}{R_1^2 + (\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1})^2} \quad \text{动态电导} \quad (4)$$

$$b_1 = \frac{-(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1})}{R_1^2 + (\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1})^2} \quad \text{动态电纳} \quad (5)$$

代入

$$Y = \frac{R_1}{R_1^2 + (\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1})^2} + j\left[\omega C_0 - \frac{(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1})}{R_1^2 + (\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1})^2}\right] \quad (6)$$

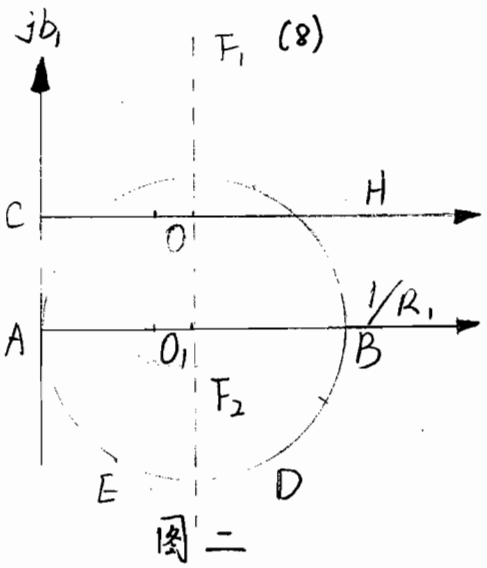
由(4)、(5)式：

$$g_1 = \frac{R_1}{R_1^2 + \frac{b^2 R_1^2}{g_1^2}}, \quad g_1^2 - \frac{g_1}{R_1} + b_1^2 = 0 \quad (7)$$

$$\Rightarrow \left(g_1 - \frac{1}{2R_1}\right)^2 + b_1^2 = \left(\frac{1}{2R_1}\right)^2 \quad (8)$$

取横坐标为电导 g_1，纵坐标电纳 jb_1。

上式为一圆心 $O_1(\frac{1}{2R_1}, 0)$，半径为 $\frac{1}{2R_1}$ 的一个圆，如图中圆 ABDE，当 $b_1=0$ 时解出 $g_1=0$（舍去），$g_1=\frac{1}{R_1}$，从而由(4)式得



图二

$$\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1} = 0$$

即 $\omega = \omega_S = 1/\sqrt{L_1 C_1}$，图上 $(1/R_1, 0)$ 点，的频率即是 ω_S，称为串联共振频率或机械共振频率。

当压电元件机械品质因素较高时，$y_0 \approx j\omega_S C_0$ 近似为一常数，得 Y 的相矢端随频率变化轨迹圆，如图中圆 O，即所谓的导纳

圆点的频率即为机械共振频率 ω_S $R_1 = \frac{1}{r}$ (9)

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

D为导纳圆直径，过圆心O作平行于电纳轴的直线交圆于F_1，F_2，这

其频率为f_1，f_2，由这两点的坐标g_1，b_1及g_2，b_2可得

$$L_1 = \frac{R_1}{w_2 - w_1} \tag{10}$$

$$C_1 = \frac{1}{w_1 w_2 L_1} = \frac{1}{w_s^2 L_1} \tag{11}$$

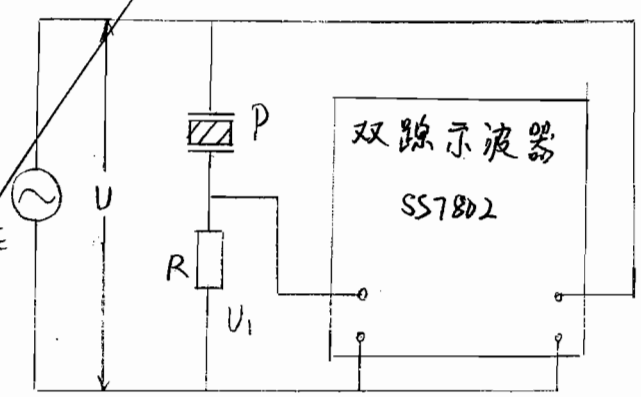
$$C_0 \approx \frac{AC}{w_s} \tag{12}$$

还可求得机械品质因素，

$$Q_m = \frac{w_s L_1}{R_1} = \frac{1}{w_s L_1 R_1} = \frac{1}{R_1}\sqrt{\frac{L_1}{C_1}} \tag{13}$$

4. 测量电路及测量仪器

如图，E为函数信号发生器。P为被测压电元件。R为无感电阻。用示波器测得U，U_1及U与U_1间的相位差φ即可求得压电元件总导纳或总阻抗。



图三

$$Y = g + jb \qquad |Y| = \frac{I}{U} = \frac{U_1}{UR}$$

总电导 $g = |Y|\cos\varphi = \frac{U_1}{UR}\cos\frac{2\pi t}{T}$

总电纳 $b = |Y|\sin\varphi = \frac{U_1}{UR}\sin\frac{2\pi t}{T}$

T为信号的周期，t为U_1与U在示波器上的时间差，导纳，导电导和电纳的单位均为S。

在压电元件某一共振频率附近改变信号频率，测得若干组g、b即可测得导纳圆。由于电路中加入了采样小电阻R，压电元件等效电路参路替为L_1、C_1、$R+R_1$、C_0/(H各)，因此式(9)和(10)修正为

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

$$R_1 + R = 1/D \quad (14)$$

$$L_1 = \frac{R+R_1}{\omega_2-\omega_1} \quad (15)$$

$$C_0 \approx \frac{\Delta t}{\omega_s}\left(1+\frac{R}{R_1}\right) \quad (16)$$

三. 实验内容

1. 熟悉函数信号发生器上各旋钮的功能，观察信号的形状

2. 在压电元件某一共振频率附近，缓慢改变信号频率。定性观察电压 U, U_1 的大小及两个电压的相位差变化情况，做简单纪录。

3. 测导纳圆。在非共振频率处。U取峰峰值约 10V。在共振最明显处的一共振频率附近调节频率，从小于共振频率调到大于共振频率。测量每一共振频率下的 f, U, U_1, t，算出 g, b 画导纳圆

4. 从 g-f 图上查出 F_1、F_2 点的频率 f_1, f_2，算出 R_1、L_1、C_1 及 Q_m

四. 实验数据处理分析

数据整理见下页，导纳圆图见附录的打印图

由图可以得出

center: (11.702, 0.971) ms

diameter: 23.404 ms

即 D = 23.404 ms

f_1 = 148.68 KHz

f_2 = 149.64 KHz

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

函数信号发生器 $V = 8V$， $R = 3.08\Omega$（峰峰值）

频率(kHz)	相差(us)	U(V)	UI(V)	g(ms)	b(ms)
148.00	1.41	6.36	0.183	2.398	9.028
148.43	1.20	5.28	0.226	6.065	12.503
148.61	1.01	4.66	0.237	9.697	13.364
148.77	0.80	4.16	0.241	13.79	12.79
148.89	0.62	3.86	0.242	17.026	11.155
148.98	0.42	3.68	0.243	19.803	8.213
149.04	0.21	3.62	0.244	21.421	4.476
149.11	~~0.20~~ 0.01	3.56	0.247	22.525	0.211
149.22	~~-0.41~~ -0.20	3.56	0.148	22.221	~~-4.217~~
149.34	-0.41	3.73	0.245	19.767	-8.004
149.48	-0.595	4.07	0.243	16.435	-10.278
149.61	-0.80	4.48	0.2415	12.781	-11.956
149.77	-0.985	5.03	0.207	7.919	-10.762
150.05	-1.165	5.77	0.1935	4.954	-9.696
150.85	-1.375	6.93	0.133	1.647	-6.01

计算 R_1、L_1、C_1 及 Q_m

由于 $R + R_1 = \frac{1}{D}$，且 $D = 23.404\,ms$，$R = 3.08\Omega$

故 $R_1 = \frac{1}{D} - R = \frac{1}{23.404\times10^{-3}} - 3.08 = 39.65\Omega$

而 $L_1 = \frac{R+R_1}{W_2 - W_1} = \frac{1}{D(2\pi f_2 - 2\pi f_1)}$，其中 $f_1 = 148.68\,kHz$，$f_2 = 149.64\,kHz$

故 $L_1 = \frac{1}{2\pi D(f_2 - f_1)} = \frac{1}{2\pi\times23.404\times10^{-3}\times(149.64-148.68)\times10^3} = 7.084\times10^{-3}\,H = 7.08$

$C_1 = \frac{1}{W_1 W_2 L_1} = \frac{1}{4\pi^2 f_1 f_2 L_1}$，代入上述数据，有

$C_1 = \frac{1}{4\pi^2\times149.64\times148.68\times10^6\times7.084\times10^{-3}} = 1.607\times10^{-10}\,F = 160.7\,PF$

机械品质因素

$Q = \frac{1}{R_1}\sqrt{\frac{L_1}{C_1}} = \frac{1}{39.65}\cdot\sqrt{\frac{7.084\times10^{-3}}{1.607\times10^{-10}}} = 167.45$

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

五. 思考题

1. 什么是压电元件的共振？如何判断共振？

答：压电元件的共振即压电元件两端电压频率与压电元件某一固有频率相等使元件的振动振幅达到最大。本实验中判断是否共振的方法：① U 和 U_1 同相 ② U_1 幅值最大

2. 从示波器屏幕上 U_1 与 U 两波形出现先后的时间关系，如何确定(13)式中的 τ 的正负？

答：设 $\dot{U}=|U|\angle\varphi_U$，$\dot{I}=|I|\angle\varphi_{UI}$，$\dot{Y}=|Y|\angle\varphi_Y$

则 $\dot{Y}=\frac{\dot{I}}{\dot{U}}=\frac{|I|}{|U|}\angle(\varphi_{UI}-\varphi_U)$

$\therefore \varphi_Y=\varphi_{UI}-\varphi_U$

由 $\varphi_Y=\frac{2\pi\tau}{T}$ 可知 $\tau=\frac{T}{2\pi}(\varphi_{UI}-\varphi_U)$

故，当 U_I 波形先出现时，$\varphi_{UI}-\varphi_U>0$，$\tau>0$

当 U 波形先出现时，$\varphi_U-\varphi_{UI}>0$，$\tau>0$

3. 当 $b=wC_0$ 与 $1/R_1$ 相比足够小时，导纳圆图中的两个圆将几乎重合。在这种情况下，如果实验中从 w_s 起减小（或增加）频率 w 时是使(13)式中的 U_1 与 U 的时间差 τ 为一等差级数，则得到的实验点将均匀分布在导纳圆上。试论上述结论。

答：由于两个圆几乎重合

故此时 $g_1=g=|Y|\cos\varphi=\frac{U_I}{U_R}\cos\frac{2\pi\tau}{T}$

$b_1=b=|Y|\sin\varphi=\frac{U_I}{U_R}\sin\frac{2\pi\tau}{T}$

τ 为等差级数，$\Delta\varphi$ 为定值，故均匀分布

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

4. 图三中的R值应怎样考虑？R取大了有何问题？

答：R不能太大也不能太小；

若R取得太小，则 $U_1 = I \cdot R$，会显得很小，用示波器测量时误差会很大

若R取得太大，被测压电元件P分压小，压电效应不明显。

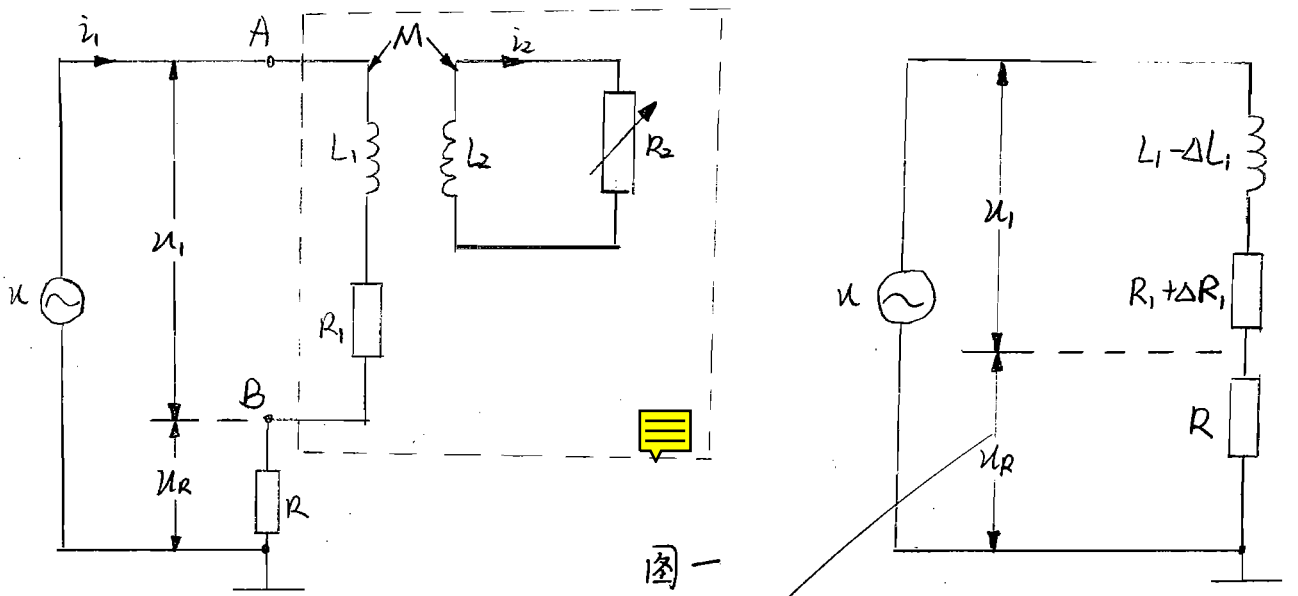
清 华 大 学 实 验 报 告

系别_____ 班号_____ 姓名_____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

用示波器研究互感耦合电路的特性

一. 实验原理



图一

如上图所示的互感电路中，原边线圈（自感为L_1，线圈电阻为R_1）和副边线圈（自感为L_2）之间通过互感M联系，在一起组成耦合电路，副边回路的电阻为R_2，它是线圈导线电阻和外接电阻之和。原、副边回路的微分方程如下：

$$u_1 = R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} - M\frac{di_2}{dt}$$

$$-M\frac{di_1}{dt} + L_2\frac{di_2}{dt} + R_2 i_2 = 0$$

设原边电流为$i_1 = I_{1m}\sin\omega t$，I_{1m}为i_1的幅值，i_1可由测R上的电压得出。从微分方程组求u_1的稳态解可得

$$u_1 = (R_1 + \Delta R_1) I_{1m}\sin\omega t + \omega(L_1 - \Delta L_1) I_{1m}\cos\omega t \qquad (1)$$

$$\Delta R_1 = \frac{M^2\omega^2 R_2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2} \qquad \Delta L_1 = \frac{M^2\omega^2 L_2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2} \qquad (2)$$

等效电路见右图 从(1)可以看出，副边回路对原边的影响可等效

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

原边电阻增加ΔR_1，同时电感减小ΔL_1。从(2)中可以看出，当$R_2=\infty$，即副边开路时，ΔR_1和ΔL_1均为0；当ω一定，且$R_2=\omega L_2$时，ΔR_1达最大值

$$\Delta R_{1max}=\frac{\omega M^2}{2L_2} \qquad (3)$$

二. 实验任务

1. 研究副边电路R_2改变时原边等效电阻增量ΔR_1的变化

按图一接线，A接示波器Y_1，B接示波器Y_{II}，R取15.0Ω固定电阻，用一个电阻箱。信号发生器输出频率为5kHz左右。输出幅度调到峰峰值6V左右。

由(1)式知，当$\sin\omega t=1$时，i_1达到最大值。($u_R=Ri_1$也为极大值U_{Rm})，此时刻$\cos\omega t=0$，故$u_1=(R_1+\Delta R_1)I_{1m}$，测出$U_{1t}$，$U_{Rm}$，则：

$$R+\Delta R_1=\frac{U_{1t}}{I_{1m}}=\frac{U_{1t}}{U_{Rm}}\cdot R \qquad (4)$$

由于示波器多通道"地"端已在机内短接，不能同时测u_1，u_R，只能先测出u_1、u_R该时刻的值u_t、u_{Rm}，从而有：

$$R+\Delta R_1=\frac{U_t-U_{Rm}}{U_{Rm}}R=\left(\frac{U_t}{U_{Rm}}-1\right)R \qquad (5)$$

实验中R_2分别取0Ω，10Ω，20Ω…100Ω，最后再测$R_2=\infty$时的数值。测量时注意寻找极值点，可在附近多测一两个点。课后画出$\Delta R_1\sim R_2$曲线，从曲线上求出等效电阻增量极大值ΔR_{1max}，与理论值比较。M、L_2数值见仪器上的标注。

清华大学实验报告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名 _____ ）

作实验日期 年 月 日 教师评定

三. 实验数据及处理

$R = 16\Omega$ ，$M = 1.006 \pm 0.010\ mH$ ，$L_1 = 1.065 \pm 0.005 mH$

$L_2 = 1.070 \pm 0.005\ mH$ ，$f = 5kHz$ ，$w = 2\pi f = 3.1416 \times 10^4\ rad/s$

由 $R_1 + \Delta R_1 = (\frac{U_t}{U_{Rm}} - 1)R$ 可得出 $R_1 + \Delta R_1$ 的值，当 $R_2 = \infty$ 时，副边开路，$\Delta R_1 = 0$，从而得出 R_1 的值

R_2/Ω	U_{Rm}/V	U_t/V	$(R_1+\Delta R_1)/\Omega$	$\Delta R_1/\Omega$
0	0.540	0.960	12.44	8.21
10	0.518	1.030	15.81	11.58
20	0.480	1.110	21.00	16.77
30	0.468	1.160	23.66	19.43
40	0.490	1.075	19.10	14.87
50	0.502	0.982	15.30	11.07
60	0.508	0.893	12.13	7.90
70	0.514	0.831	9.87	5.64
80	0.516	0.791	8.53	4.30
90	0.518	0.765	7.67	3.40
100	0.519	0.741	6.39	2.16
∞	0.540	0.682	4.237	0

其中 $R_1 = 4.237\Omega$

从图中观察到 $\Delta R_{1max} = 19.143\Omega$

清华大学实验报告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

经理论计算

$$\Delta R_{1max} = \frac{2\pi f \cdot M^2}{2L_2} = 14.857\Omega$$

相对偏差 $\frac{19.43 - 14.857}{14.857} \times 100\% = 30.8\%$

$\Delta R_1 \sim R_2$ 曲线见附录

四. 小结与讨论

本次的两个实验均为用示波器测量电路参数特性的实验，由于我上学期修了电工电子技术，做过一些用示波器观察RLC串联电路谐振状态与、RC电路过渡过程之类的实验，对于互感线圈也有一定的了解，所以在做实验时不免有些毛糙，出现了一些读电压看反量程，抄数据抄串行之类的情况，虽然实验完成的比较快，但是看到东改西改的数据表，发觉自己还是很需要细心和耐心的。

而选修实验中测量结果与计算结果相差较大，我觉得可能的原因如下两点：

① 我是通过示波器上的黑线对准 U_{2M}，读出黑线与U的交点处电压值，即为 U_{2t}，这样必然存在一点的误差，同时示波器的精度也有限，此为误差在所难免。

② 仪器参数不一定准，同时线圈之间的互感不一定稳定，周围带导线比较密集，都会产生干扰。

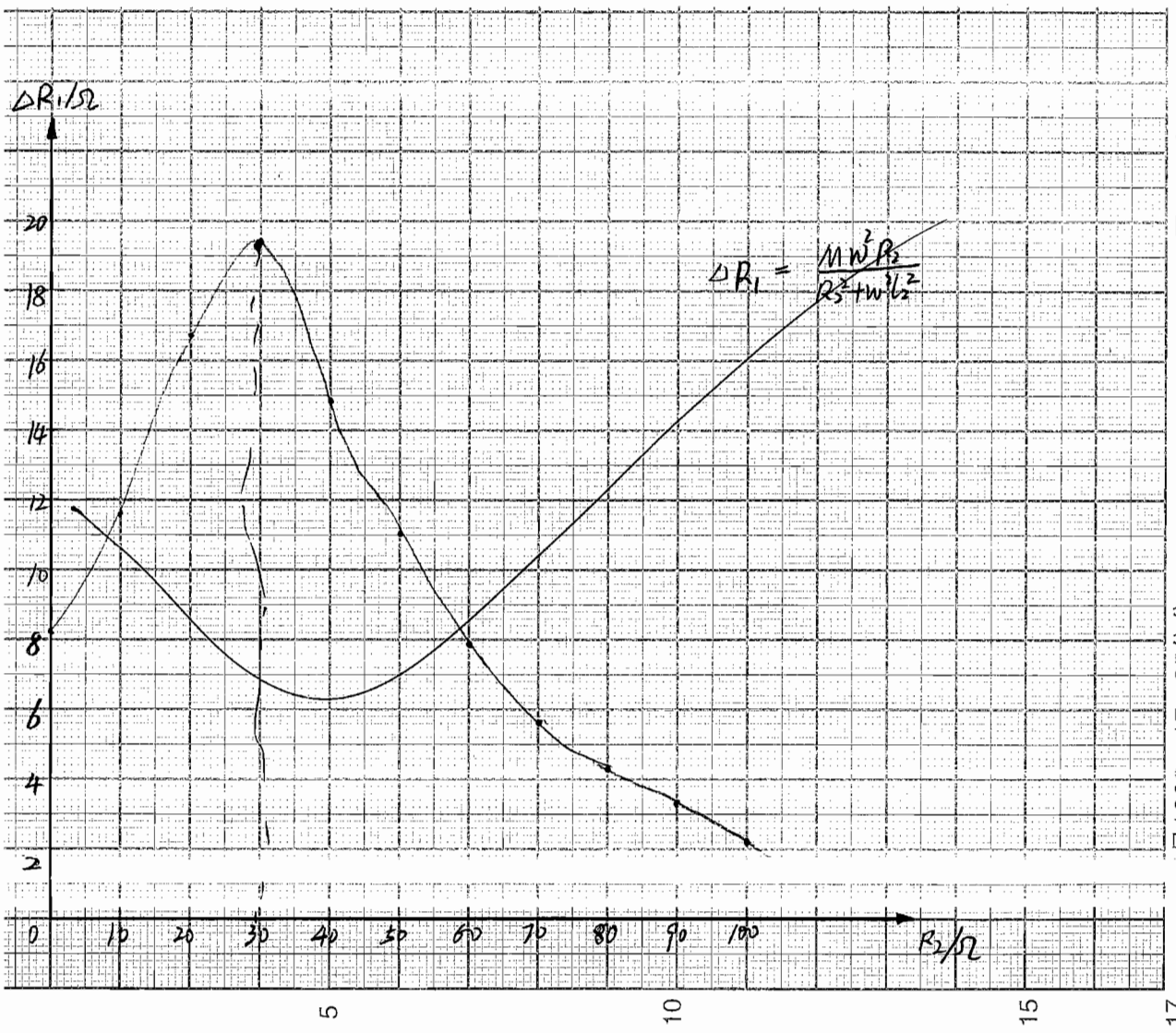
清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

附录

$\Delta R_1 - R_2$ 曲线



号1603 17×25公分

清 华 大 学 实 验 报 告

9

系别 精仪系 班号 11 姓名 耿强 （同组姓名 ）

作实验日期 2012年 10月 22日 教师评定 很认真！很

10.29

透镜焦距的测定



精仪 11 耿强
2011010492

清 华 大 学 实 验 报 告

系别_____ 班号_____ 姓名_____ （同组姓名_____）

作实验日期　　年　　月　　日　　教师评定

4.1.1 实验目的

(1) 加深理解薄透镜的成像规律；
(2) 学习简单光路的分析和调节技术；
(3) 学习几种测量透镜焦距的方法。

4.1.2 实验原理

薄透镜是指透镜中央厚度 d 比透镜焦距 f 小很多的透镜，我们在实验中就可以认为是透镜。

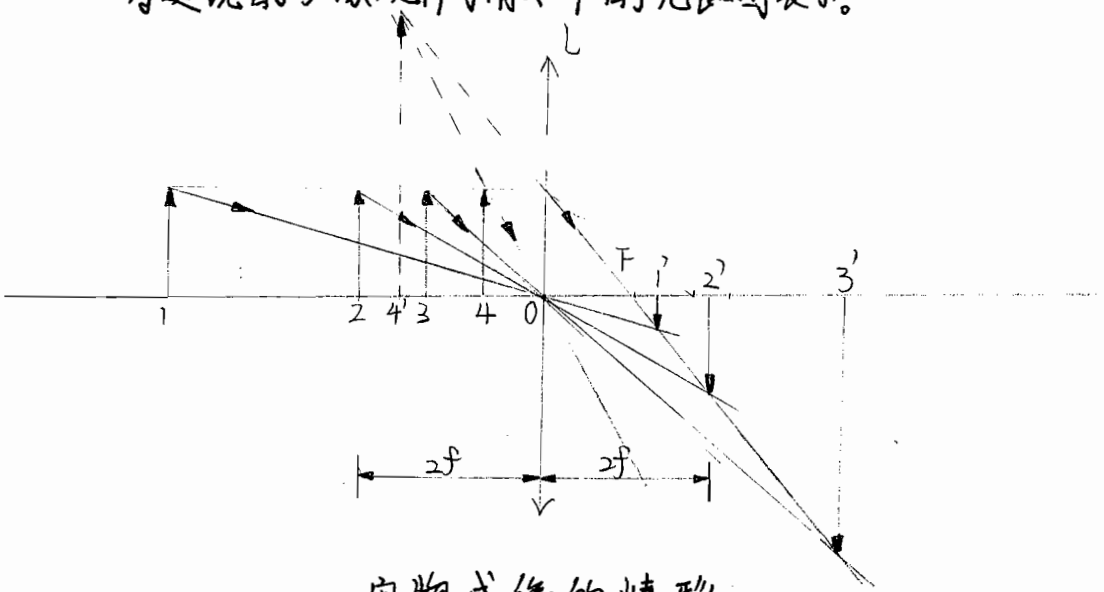
在近轴光线的条件下，薄透镜的成像规律可以用下列公式表示：

$$\begin{cases} \frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{q} \\ \beta = \frac{y'}{y} = -\frac{q}{p} \end{cases}$$

其中，p 为物距，实物为正，虚物为负；q 为像距，实物为正，虚像为负；f 为焦距，凸透镜为正，凹透镜为负；y 和 y' 分别为物的大小和像的大小，光轴之上为正，光轴之下为负；β 为线放大率。

实验中，为尽可能满足近轴光线的条件，常采用两个措施：①在透镜加一光阑以挡住边缘光线；②调节各元件使之共轴。

薄透镜的成像规律可用如下的光路图表示。

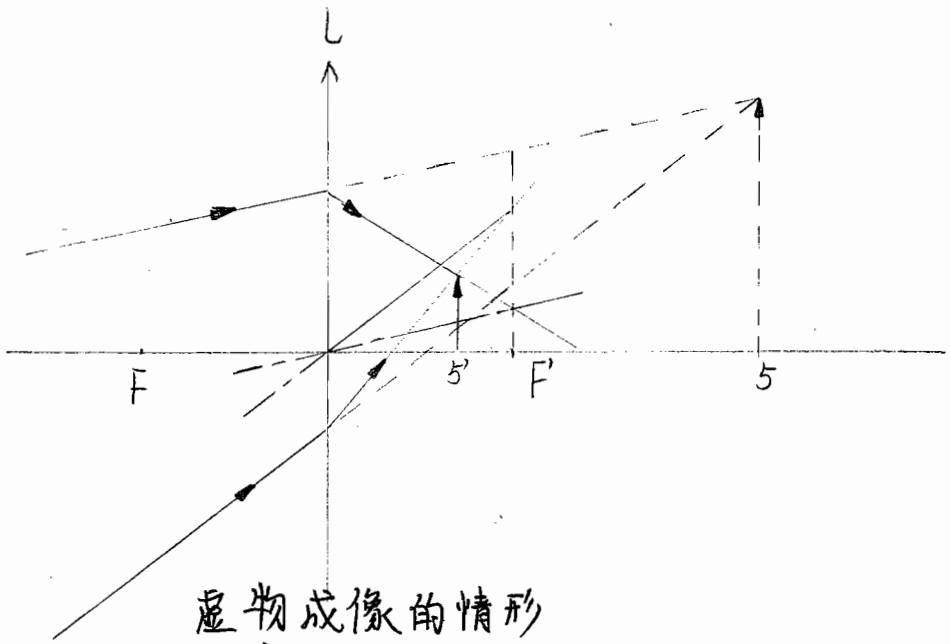


实物成像的情形

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定



虚物成像的情形

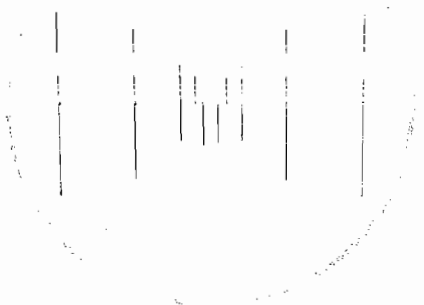
4.1.3 实验仪器

1. 导轨、滑块

2. 焦距仪，平行光管

平行光管内的玻罗板位于平行光管物镜的焦平面上，其上刻有与对平

如下图所示。



3. 测微目镜

测微目镜由目镜、固定分划板，活动分划板和鼓轮组成。测

使被测物成像于分划板上，用叉丝依次对准被测点，测出它们的

被测点位置的整数部分由固定分划板上的毫米刻尺读出，小数部

鼓轮上的刻度读出，估读到 0.001 mm。

清 华 大 学 实 验 报 告

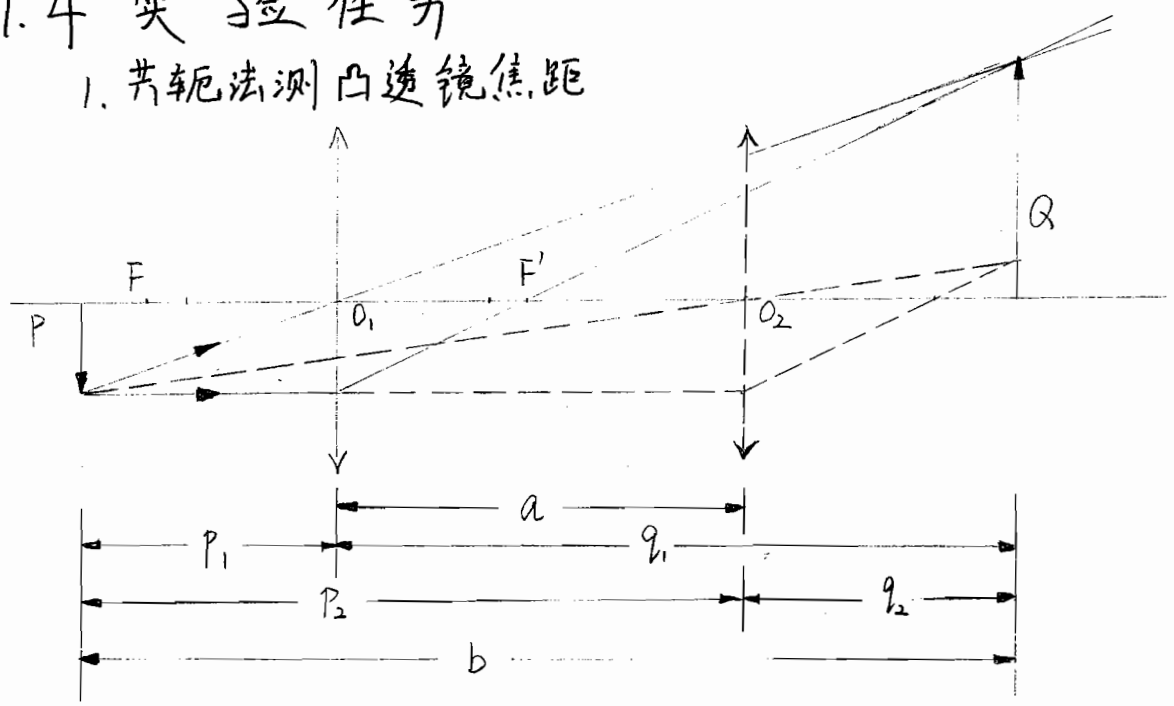
系别_____ 班号_____ 姓名_____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

4. 物屏、像屏、凸透镜、凹透镜、平面镜等.

4.1.4 实验任务

1. 共轭法测凸透镜焦距



如图，使物与屏间距离 $b>4f$ 并保持不变。当凸透镜在 O_1 处屏上呈放大实像，再将凸透镜移到 O_2 处，屏上呈缩小实像

设PQ间距为 b，O_1O_2 相距为 a，由成像规律：

$$\frac{1}{x}+\frac{1}{b-x}=\frac{1}{f}$$

当 $b>4f$ 时有两个解 x_1、x_2 对应于 O_1、O_2 位置，又 $x_2-x_1=a$

解得 $f=\frac{b^2-a^2}{4b}$

操作要点：

(1) 粗测凸透镜焦距

(2) 取 b 略大于 $4f$

(3) 等高共轴调节

(4) 测6组数据取平均值

2. 焦距仪测凸透镜焦距

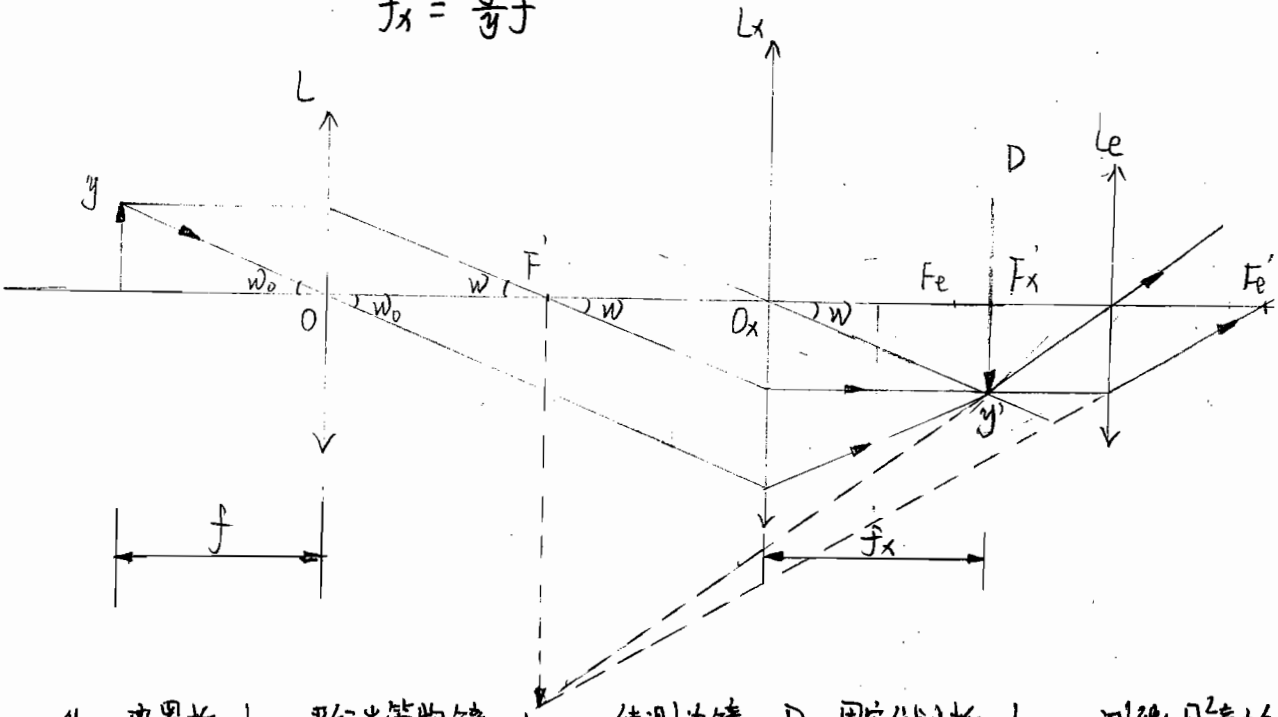
焦距仪的光路如图所示，由物（物高为 y）发出的光经平行光管 L_1 后成为平行光，再经待测透镜 L_x 后成像在其焦平面上，像高为 y'，由可知 $\tan w=y/f_1'$，$\tan w=y'/f_x'$，且 $\tan w=\tan w_0$，所以

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

$f_x = \frac{y'}{y} f$



y—视标板；L—平行光管物镜；L_x—待测透镜；D—固定分划板；Le—测微目镜的

操作要点，及注意事项：

(1)"等高共轴"调节

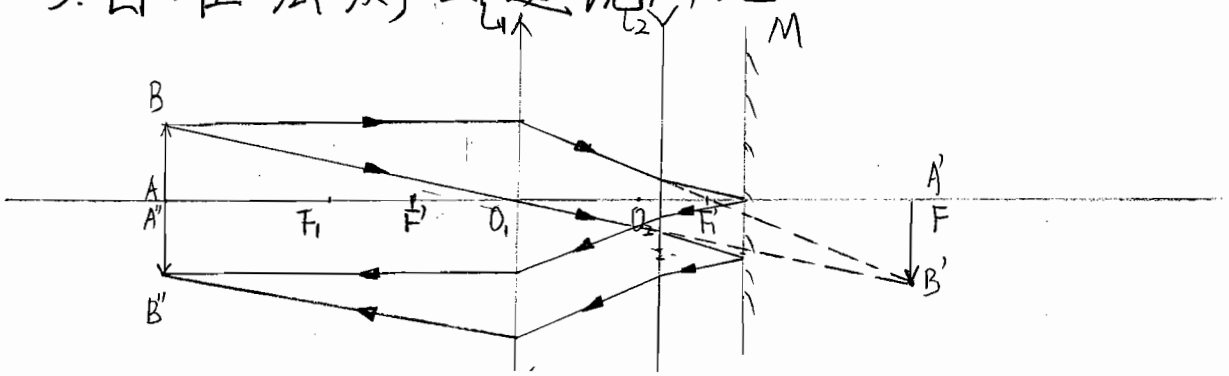
(2)测微目镜的调节与读数

(3)为减小误差，使像位于视场中央，同时注意消除视差与空程，重测量6次，取平均值

(4)估算y'的不确定度$\Delta y'$，最后估算出f_x的不确定度Δf_x

已知 $\frac{\Delta f}{f} = 0.3\%$，$\frac{\Delta y}{y} = 0.02\%$（可略）

3. 自准法测凹透镜焦距



清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

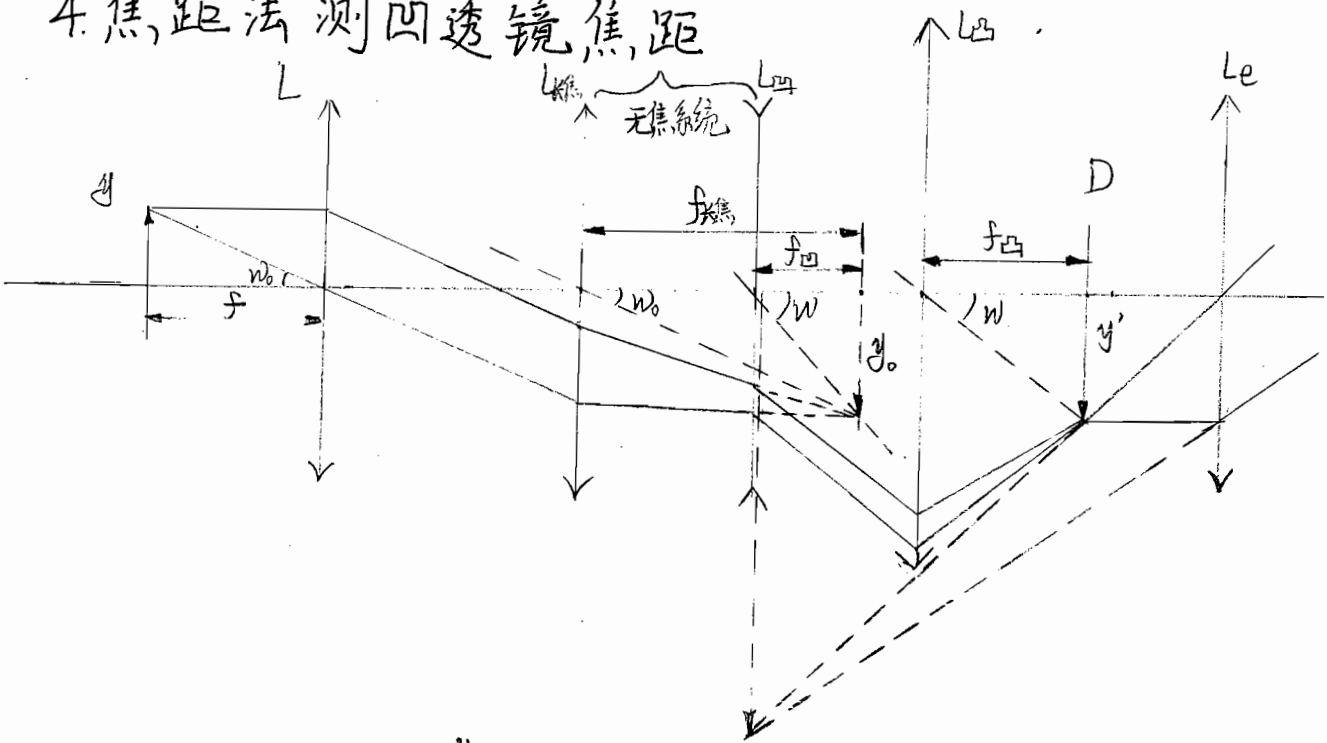
作实验日期 年 月 日 教师评定

如图，AB 经 L_1 折射成像 A'B' 在 L_2 焦平面上，从 L_2 发散成平行光，经平镜 M 反射，根据光路对称性，将在物屏上形成和 AB 等大倒立的实像 A

由图可知，O_2F' 就是待测凹透镜的焦距 f。

注意事项：
(1) AB 和 O_1 间距略小于 $2f_1$
(2) B 点，L_1 L_2 的"等高共轴"调节
(3) 将凹透镜转 180° 后重复测量，取平均值
(4) 位置 O_2 与 F 的测量各重复 3-6 次，取平均值

4. 焦距法测凹透镜焦距



如图，在实验 2 基础上，用长焦透镜 $L_{凸焦}$ 和待测凹透镜 $L_{凹}$ 构无焦系统，则在测微目镜上仍然可以看到之前的清晰实像。

由图中的几何关系可知

$$\begin{cases} \frac{y}{f} = \tan w_0 = \frac{y_0}{f_{凸焦}} \\ \frac{y'}{f} = \tan w = \frac{y_0}{f_{凹}} \end{cases}$$

消去 y_0，有 $\frac{y}{y'} \cdot \frac{f_{凸}}{f} = \frac{f_{凹}}{f_{凸焦}} \Rightarrow f_{凹} = \frac{y}{y'} \frac{f_{凸焦} \cdot f_{凸}}{f}$

清华大学实验报告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名 _____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

4.1.5 数据处理

1. 共轭法测凸透镜焦距

测量序号	1	2	3	4	5	6
凸透镜位置 O_1/cm	83.41	83.30	83.31	83.33	83.46	83.49
凸透镜位置 O_2/cm	45.48	45.39	45.37	45.52	45.60	45.38
$a(a=\lvert O_2-O_1\rvert)$/cm	37.93	37.91	37.94	37.81	37.86	38.11

物屏位置 $P=$ 108.13 cm 像屏位置 $Q=$ 28.12 cm

$b=$ 80.01 cm，$\bar{a}=$ 37.93 cm，$f=\frac{b^2-a^2}{4b}=$ 15.51 cm

分析不确定度：

实验室给出不确定度 $\Delta_a=0.25$ cm 和 $\Delta_b=0.20$ cm

$\ln f=\ln\frac{b^2-a^2}{4b}=\ln(b^2-a^2)-\ln b-2\ln 2$，$\frac{\partial \ln f}{\partial a}=\frac{-2a}{b^2-a^2}$，$\frac{\partial \ln f}{\partial b}=\frac{2b}{b^2-a^2}-\frac{1}{b}$

$\therefore \frac{\Delta f}{f}=\sqrt{\left(\frac{\partial \ln f}{\partial a}\Delta a\right)^2+\left(\frac{\partial \ln f}{\partial b}\Delta_b\right)^2}=\sqrt{\left(\frac{-2a\Delta a}{b^2-a^2}\right)^2+\left(\frac{2b}{b^2-a^2}-\frac{1}{b}\right)^2(\Delta_b)^2}=5.495\times10^{-3}$

$\therefore \Delta f=f\cdot\frac{\Delta f}{f}=0.09$ cm

故 $f=(15.51\pm0.09)$ cm

2. 焦距仪法测凸透镜焦距

平行光管物镜焦距 $f=$ 550 mm

玻罗板上所选的某一对平行线的线距 $y=$ 10.0000 mm

测量序号	1	2	3	4	5	6
y_1'/mm	1.309	1.312	1.330	1.307	1.308	1.312
y_2'/mm	4.138	4.128	4.129	4.118	4.109	4.128
$y'(y'=\lvert y_1'-y_2'\rvert)$/mm	2.829	2.816	2.799	2.811	2.801	2.816

$\bar{y'}=$ 2.812 mm $f_x=\frac{y'}{y}f=$ 15.47 cm

清华大学实验报告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

已知测量平行间距过程中，$\Delta_{仪} = \sqrt{5} \times 0.004$ mm

$$S_{y'} = \sqrt{\frac{\sum (y_i' - \bar{y}')^2}{6}} = 0.0101 \text{ mm}$$

$$\Delta_{y'} = \sqrt{S_{y'}^2 + \Delta_{仪}^2} = 0.0116 \text{ mm}$$

$$\Rightarrow \frac{\Delta f_x}{f_x} = \sqrt{\left(\frac{\partial \ln f_x}{\partial y'}\Delta y'\right)^2 + \left(\frac{\partial \ln f(x)}{\partial y}\cdot \Delta y\right)^2 + \left(\frac{\partial \ln f(x)}{\partial f}\Delta_f\right)^2}$$

$$= \sqrt{\left(\frac{\Delta y'}{y'}\right)^2 + \left(\frac{\Delta y}{y}\right)^2 + \left(\frac{\Delta f}{f}\right)^2}$$

$$= 0.0051$$

$$\therefore \Delta f_x = f_x \cdot \frac{\Delta f_x}{f_x} = 0.08 \text{ cm}$$

故 $f_x = (15.47 \pm 0.08)$ cm

3. 自准法测凹透镜焦距

物屏位置 $P =$ 108.13 cm　　凸透镜位置 $O_1 =$ 74.55 cm

测量序号	1	2	3	4	5	6
凹透镜位置 O_2'/cm	68.71	68.63	68.53	68.62	68.63	68.50
凹透镜位置 O_2''/cm	68.68	68.67	68.81	68.91	68.84	68.81
$O_2 (O_2 = \frac{O_2' + O_2''}{2})$/cm	68.70	68.65	68.67	68.77	68.74	68.66
虚物位置 F/cm	45.43	45.69	45.47	45.36	45.64	45.52

$$f = -|\bar{F} - \bar{O}_2| = -23.18 \text{ cm}$$

推导不确定度

$$S_{O_2} = \sqrt{\frac{\sum (O_{2i} - \bar{O}_2)^2}{6}} = 0.048 \text{ cm}$$

$$S_F = \sqrt{\frac{\sum (F_i - \bar{F})^2}{6}} = 0.126 \text{ cm}$$

$$\Rightarrow \Delta_f = \sqrt{\Delta_{O_2}^2 + \Delta_F^2 + 2\Delta_{仪}^2}$$

$$= \sqrt{S_{O_2}^2 + S_F^2 + 2 \times (0.05)^2}$$

$$= \sqrt{0.048^2 + 0.126^2 + 2 \times (0.05)^2}$$

O_2 测两次（转180°）

F 测1次

} $3\Delta_{仪}$

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名 _____ ）

作实验日期 年 月 日 教师评定

故 $f = (-23.18 \pm 0.15)$ cm

4. 焦距法测凹透镜焦距

平行光管物镜焦距 $f =$ 550 mm　　长焦透镜焦距 $f_{长焦} =$ 37.0

所选平行线线距 $y =$ 10.0000 mm　　凸透镜焦距 $f_{凸} =$ 15.4 c

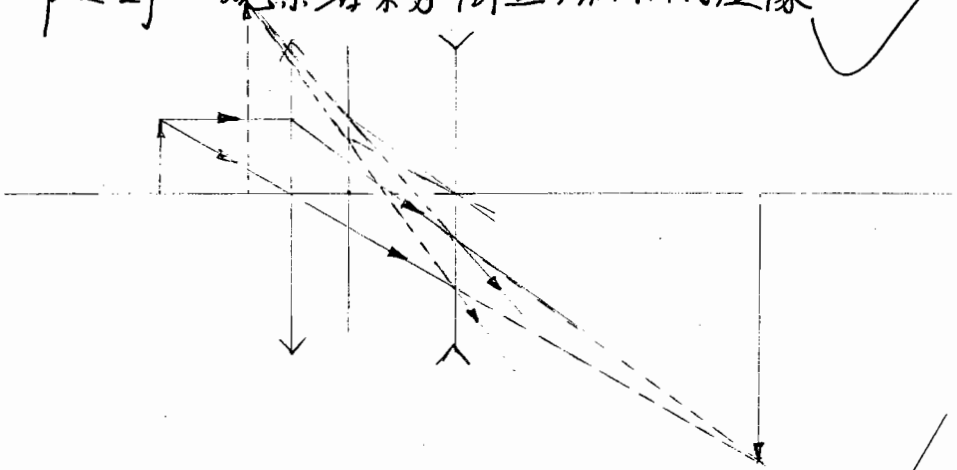
测量序号	1	2	3	4	5	6
y_1'/mm	1.859	1.853	1.862	1.882	1.885	1.872
y_2'/mm	5.812	5.796	5.789	5.827	5.806	5.801
$y'(y'=\lvert y_1'-y_2'\rvert)$/mm	3.953	3.943	3.927	3.945	3.921	3.929

$$f_{凹} = -\frac{y}{y'} \cdot \frac{f_{长焦} \cdot f_{凸}}{f} = -22.15 \text{ cm}$$

推导不确定度（此实验不要求推导）

5. 薄凹透镜成像规律的研究

① $p < 2f$ 观察结果为倒立，缩小的虚像

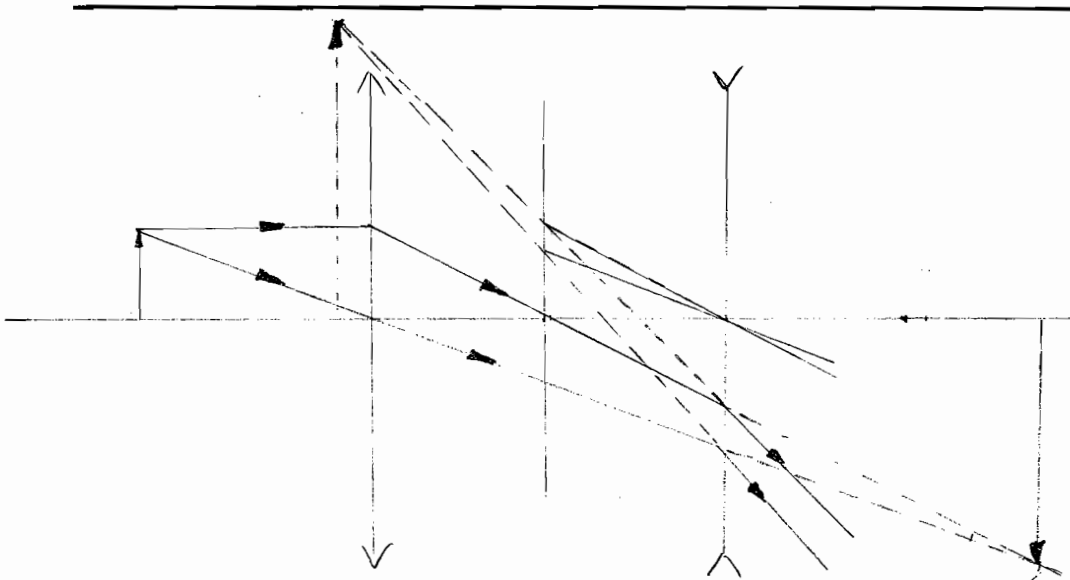


② $2f < p < f$ 观察结果呈倒立，放大的虚像

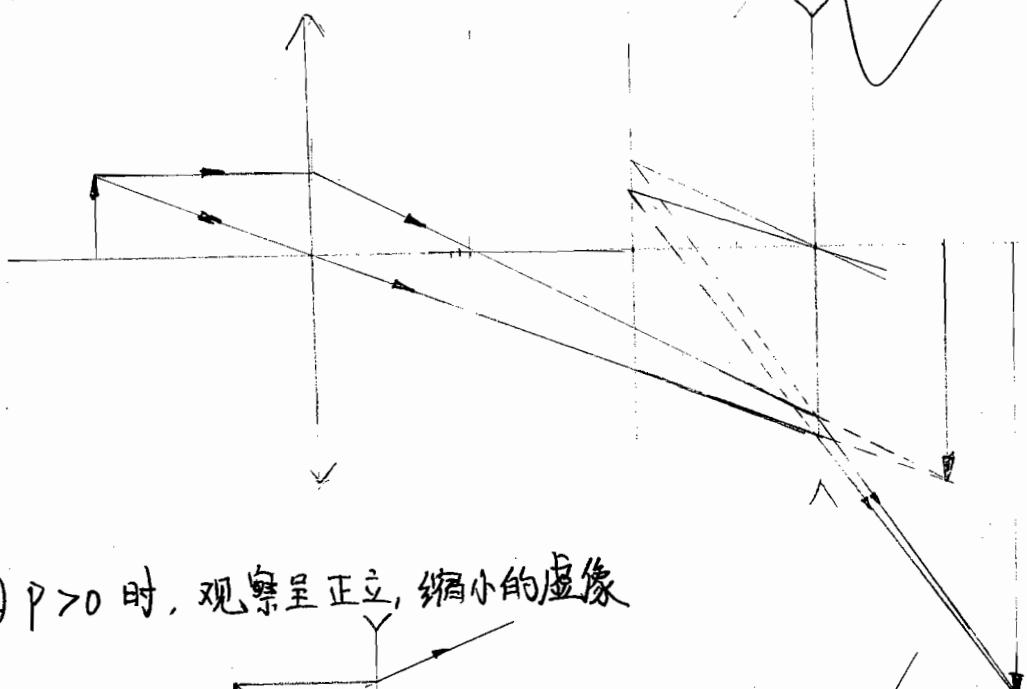
清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名 _____ ）

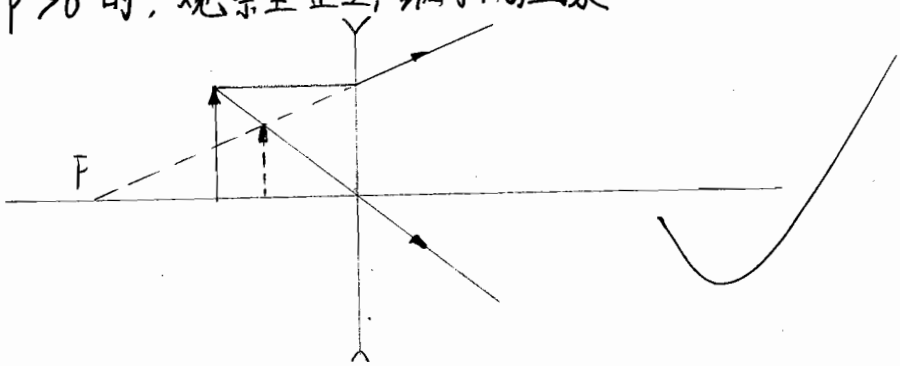
作实验日期 年 月 日 教师评定



③ $f<p<0$ 时，观察呈正立，放大的实像



④ $p>0$ 时，观察呈正立，缩小的虚像

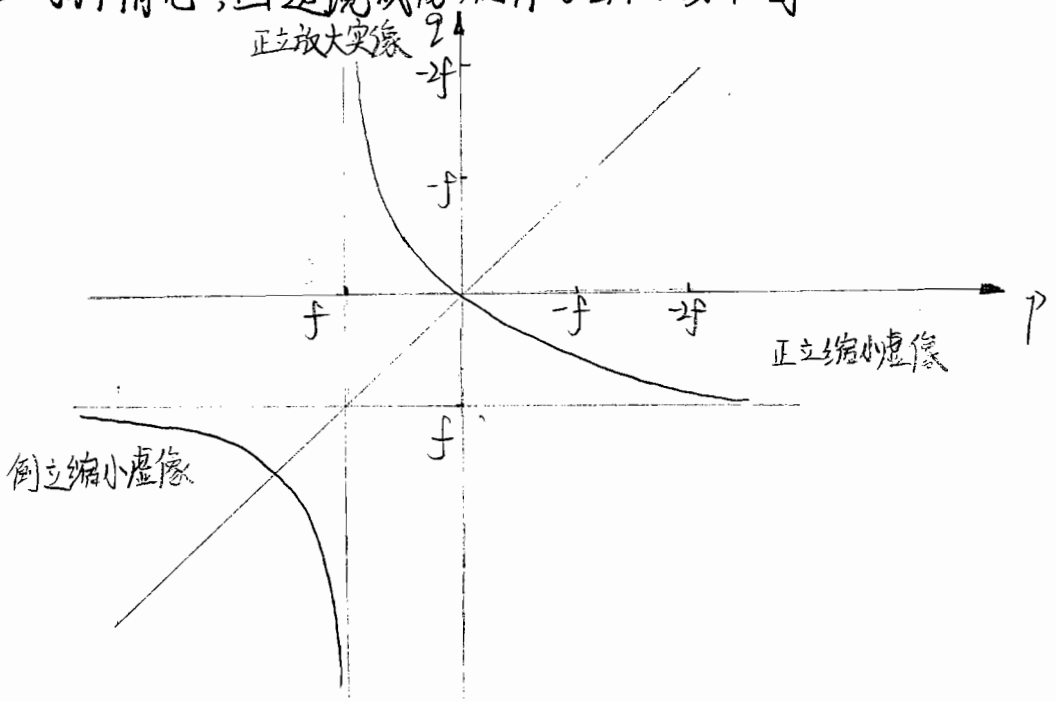


清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

以上四种情况，凹透镜成像规律可由P.Q成下图



4.1.6 思考题

1. 为什么要调节共轴？调节共轴的主要步骤如何？怎样判断光
的某一点，已调至透镜的光轴上了？依据的原理是什么？

答：透镜成像公式中的物距，像距都是沿主光轴计算长度的，为了测
准确，必须使透镜的主光轴与导轨平行，获得质量好的像。

调节步骤：①首先通过眼睛观察粗调使物、透镜和光屏在同一高
②通过在O_1，O_2位置反复几次细调使物上的某一点在透镜
光轴上。

当此点B的大像点B_1与小像点B_2重合时，此点已调至透镜的光轴上
因为沿主光轴的光方向不会改变，所以B如果在光轴上，它的像也在
上固定不变。

2. 共轭法测凸透镜焦距时，为什么b应略大于4f？

答：由透镜成像规律知 $\frac{1}{p}+\frac{1}{q}=\frac{1}{f}$

故 $b=p+q=f(p+q)\left(\frac{1}{p}+\frac{1}{q}\right)=f\left(2+\frac{q}{p}+\frac{p}{q}\right)\geq 4f$

所以b应略大于4f

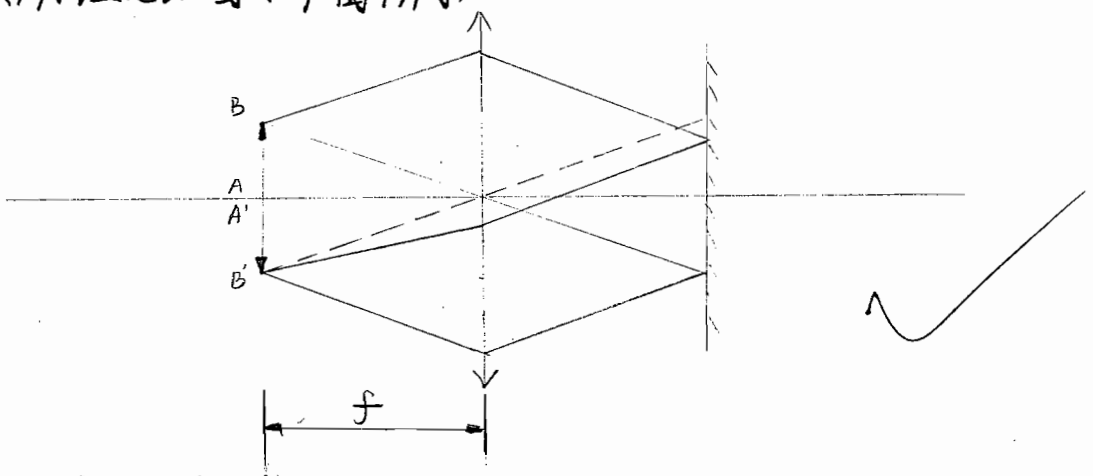
清 华 大 学 实 验 报 告

系别_____ 班号_____ 姓名_____ （同组姓名_____）

作实验日期　　年　　月　　日　　教师评定

3. 能否用自准法测凸透镜焦距？若可用，请画出原理光路图

可以，原理光路图如下图所示



4. 1. 7 实验总结

焦距仪法误差分析：

1. 用测微目镜读数时会存在或多或少的视差
2. 调整鼓轮时会使目镜左右微微摇动，带来误差
3. 实验用仪器本身误差及读数误差

感想：

总结而言，由于预习充分，这次实验还算比较顺利的，三点，五十就完成了必做的实验，进行了很有收获的"凹透镜成性质"选做实验。我以前一直认为凹透镜也就是我带的近视眼只能呈缩小、正立的虚像，这次实验中我猛然意识到可以用凸透事先产生虚物，从而测量物距小于0时的成像情况。而认真的测后，我发现凹透镜的成像规律恰好和凸透镜是共轭对应的，和谐。回去后我又用像距v和物距u的关系进行了理论分析和绘和实验结果完全一致，在欣赏了物理的对称美后，我也体会到很多实验的乐趣。

清华大学实验报告

系别 精仪系 班号 11 姓名 耿强 （同组姓名 ）

作实验日期 年 月 日 教师评定

透镜焦距的测定 5号

原始数据

1. 共轭法测凸透镜焦距

物屏位置 P = 108.13 cm，像屏位置 Q = 28.12 cm

测量序号	1	2	3	4	5	6
凸透镜位置 O_1/cm	83.41	83.30	83.31	83.33	83.46	83.49
凸透镜位置 O_2/cm	45.48	45.39	45.37	45.52	45.60	45.38
$a(a=\lvert O_2-O_1\rvert)$/cm	37.93	37.91	37.94	37.81	37.86	38.11

b = 80.01 cm　　$f = \frac{b^2-a^2}{4b}$ = 15.51 cm

2. 焦距仪法测凸透镜焦距

平行光管物镜焦距 f' = 550 mm

玻罗板上所选的某一对平行线的线距 y = 10.0000 mm

测量序号	1	2	3	4	5	6
y_1'/mm	1.309	1.312	1.330	1.307	1.308	1.312
y_2'/mm	4.138	4.128	4.129	4.118	4.109	4.128
$y'(y'=\lvert y_1'-y_2'\rvert)$/mm	2.829	2.816	2.799	2.811	2.801	2.816

$\overline{y'}$ = 2.812 mm　　$f_x = \frac{\overline{y'}}{y} f'$ = 15.47 cm

3. 自准法测凹透镜焦距

物屏位置 P = 108.13 cm　　凸透镜位置 O_1 = 74.55 cm

J13

10.22.

清华大学实验报告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名 _____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

测量序号	1	2	3	4	5	6
凹透镜位置 O_2'/cm	68.71	68.63	68.53	68.62	68.63	68.50
凹透镜位置 O_2''/cm	68.68	68.67	68.81	68.91	68.84	68.81
$O_2(O_2=\frac{O_2'+O_2''}{2})$/cm	68.70	68.65	68.67	68.77	68.74	68.66
虚物位置 F/cm	45.43	45.69	45.47	45.36	45.64	45.52

$f = -|F - \bar{O}_2| =$ -23.18 cm

4. 焦距法测凹透镜焦距 —— 无焦系统

平行光管物镜焦距 $f =$ 650 mm　　长焦透镜焦距 $f_{长焦} =$ 31.0 cm

所选平行线线距 $y =$ 10.0000 mm　　凸透镜焦距 $f_{凸} =$ 15.47 cm

测量序号	1	2	3	4	5	6
y_1'/mm	1.859	1.853	1.862	1.882	1.885	1.872
y_2'/mm	5.812	5.796	5.789	5.827	5.806	5.801
$y'(y'=\|y_1'-y_2'\|)$/mm	3.953	3.943	3.927	3.945	3.921	3.929

5. 薄凹透镜成像规律研究

箭矢 AB 位置 107.19 cm

L_1 的位置 O_1 = ~~79.49~~ 84.85 cm

L_2 的位置 O_2 = _____ cm

A'B' 的位置 P = 35.72 cm

物的大小 A'B' = _____ cm

物距 P = _____ cm

L_1 的焦距 f_1 = _____ cm

L_2 的焦距 f_2 = _____ cm

A''B'' 的位置 Q = _____ cm

像的大小 A''B'' = _____ cm

像距 Q = _____ cm

当 $0 > P > f$ 时，成 正立 放大 实像

当 $P > f$ 时 成 倒立 放大 ~~实像~~ 虚像

~~$P < f$~~ $P < f$ 时，成 倒立 缩小 虚像

J13

10.22.

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 精仪系11 班号 11 姓名 耿强 （同组姓名 ）

作实验日期 2012年 12 月 3 日 教师评定

用传感器测空气相对系数

精仪系11
耿 强
2011010492

清华大学实验报告

系别_____ 班号_____ 姓名_____ （同组姓名_____）

作实验日期　　年　　月　　日　　教师评定

一. 实验目的

1. 加深对理想气体状态方程和查理定律的理解；

2. 初步了解铜电阻温度传感器和硅压阻式差压传感器的工作原理并掌握其使用方法；

3. 学习用作图法和计算机作直线拟合法处理实验数据。

二. 实验原理

1. 理想气体的查理定律

理想气体状态方程在定容条件下简化为查理定律

$$P = \frac{P_0 T}{T_0} = P_0 \frac{T_0 + t}{T_0} = P_0 (1 + \alpha_P t)$$

α_P 为相对压力系数，定义为 $\alpha_P = \frac{\Delta P}{P_0 \Delta t}$，对于理想气体，$\alpha_P = \frac{1}{T_0} = 3.66 \times$

实际气体（如空气）可近似看作理想气体。

根据查理定律可制作定容气体温度计，高准确度和灵敏度的定容气体温度计可用于检定其他类型的温度计。

2. 铜电阻温度传感器

在 $-50°C \sim 100°C$ 范围内，铜丝的电阻值 R 与温度 t 有良好的线性关系

$$R = R_0 (1 + \alpha_R t)$$

α_R 称为电阻温度系数。本实验中使用的铜丝电阻的 $\alpha_R = 4.26 \times 10^{-3} °C^{-1}$。当铜丝电阻中通以恒定的电流 I 时，

$$U_t = U_{R_0} (1 + \alpha_R t)$$

U_{R_0} 为 $0°C$ 时的电压，$U_{R_0} = IR_0$。若测出了在纯水沸点时铜丝电阻的电压 U_b 和沸点 t_b，有

$$t = \frac{U_t}{U_b} \left(\frac{1}{\alpha_R} + t_b \right) - \frac{1}{\alpha_R}$$

3. 扩散硅压阻式差压传感器

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

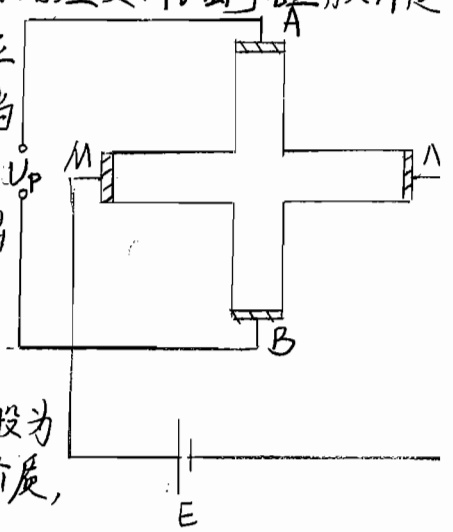
的变化而导致电阻率发生变化的现象称为压阻效应。压阻式差压传感的核心是硅膜片，这种膜片是利用制作集成电路的方法，在单晶硅基片通过硼的扩散从形成如图一所示的十字形四端应变片。由于硅膜片是向异性的，十字形四端应变片应设置在剪切应力最大的位置和剪切压阻系数最大的方向上。当膜片受应力时，若将一恒定电压E加在M和N两端上，在剪切应力作用下，从A和B两端会输出一与压值ΔP成线性关系的电压U_P，即

$$U_P = U_0 + k_\rho \Delta P$$

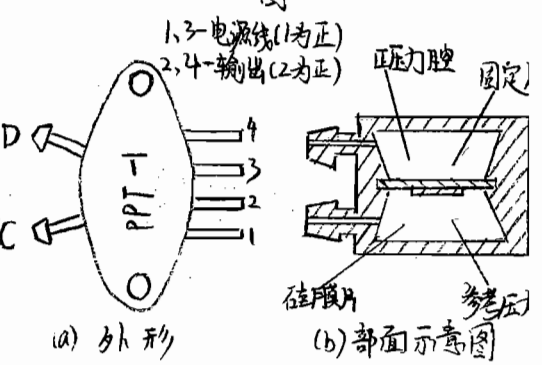
式中U_0为压差为0时的输出电压，系数k_ρ一般为一常数。若传感器接口D通大气，接口C通被测介质，则

$$P = P_C + \frac{U_P - U_0}{k_\rho}$$

式中P_C为大气压强。该压阻式差压传感器测量范围为0～10^5Pa，综合精度为0.3%。它具有体积小，灵敏度高、稳定性好等优点。



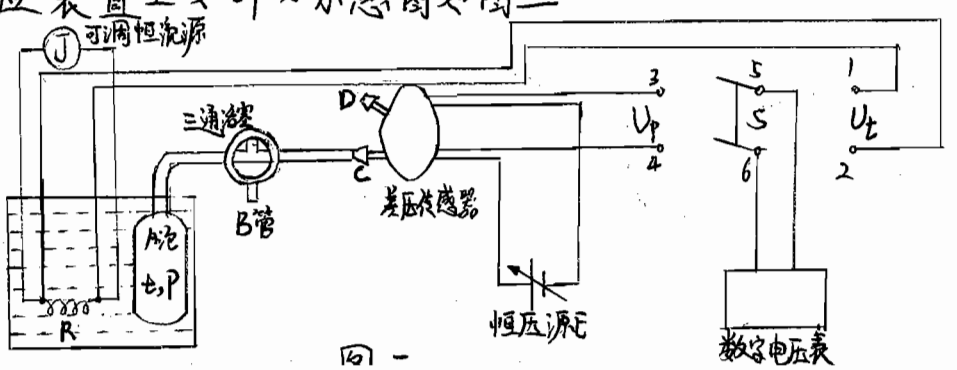
图一



图二

三、实验仪器

1. 实验装置主要部分示意图如图三



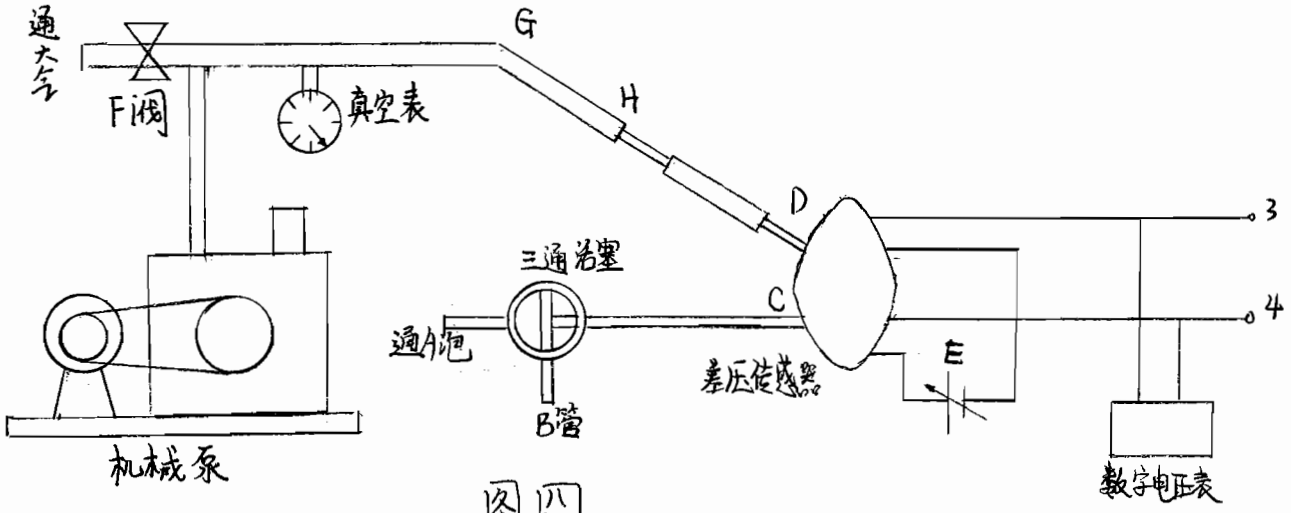
图三

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

2.差压传感器定标装置



图四

3.福丁气压计

测量时，先调节底部的调节钮，使水银杯内的水银面刚好与象牙针尖触，此时杯中的水银面就是标尺的零位。然后眼睛与游标零线保持水平节游标旋钮，使游标下移至游标零线与水银凸面相切，读出H值。

同时要对H值进行矫正

$$\delta H = -(18.2-1.9)\times 10^{-5} Ht$$

修正后的大气压强为

$$P_0 = H + \delta H$$

四. 实 验 步 骤

1.差压传感器的定标。用图四所示定标装置准确测定传感器 U_0 和 K_P。先转动三通管使传感器C口与B管相通，并使D口与机械泵相连，用泵从D口抽气。待真空表示数为760mm不动时，压差 $\Delta P=$ 传感器输出电压记为 U_m。然后停泵，使D口也通大气，此时 $\Delta P_0=0$，数表读数即为 U_0，$K_P = \frac{U_m - U_0}{P_0}$

二.测差压组 (U_1, U_0) 值 按图二接使差压传感器C与A泡相通，调节恒流

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

使电流约为 2mA。记下室温下铜丝电压值 U_t 和传感器输出电压值 U_p。热，铜丝电压每增加约 0.5mV 记一次 (U_t, U_p) 值；最后记下水沸腾时各电压记为 (U_{tb}, U_{pb})。

3. 实验前后用大气压计各测一次大气压，同时记下室温值。

4. 实验注意事项

(1) 加热时将搅拌器电源开关及加热开关同时接通，并调控温旋钮至需温度。搅拌器转速应适当。

(2) "热得快"不能干烧。换水应用虹吸方法或直接将玻璃杯内的水入塑料桶。

(3) 小心操作以免损坏玻璃仪器。

(4) 停泵后立即将机械泵抽气口通大气。

(5) 实验完毕，将加热器的调速，温控旋钮旋至最小位置，并断开电开关和热加热开关。

五. 误差分析

1. 式 $P = P_0(1+\alpha_p t)$ 仅适用于定容，定质量理想气体。由于①空气只近似为理想气体；②A泡壁上气体吸附量随温度而变，且泡内可能混入水蒸③A泡容积因热胀冷缩而变；④与A泡相连的C管等部分中的气体温度均匀等原因，实验中存在较明显的系统误差。下面分析③和④的影响。

设A泡至C口内细管部分体积为 V，A泡体积为 V，并假定体积 V 内气体的温度近似为室温 T_1。列出气体初、末态参量如下：

气体种类	初态	末态
A泡内气体	V, P_1, T_1	$V[1+\beta(T-T_1)], P, T$
V内气体	V, P_1, T_1	V, P, T_1

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

其中，β为A泡玻璃的体膨胀系数，约$1.2\times10^{-5}K^{-1}$。由于气体总量不变，有

$$\frac{P_1V}{T_1}+\frac{P_1V}{T_1}=\frac{PV[1+\beta(T-T_1)]}{T}+\frac{pV}{T_1}$$

即

$$\frac{PV}{T}=\frac{P_1V}{T_1}\left(1+\frac{v}{V}\right)\left\{1+\frac{T}{V}\left[\frac{v}{T_1}+\frac{V\beta(T-T_1)}{T}\right]\right\}^{-1}$$

由于$v/V\ll1$，$\beta(T-T_1)\leq1$，将右式展开略去高阶小量后得

$$P=\frac{P_1T}{T_1}\left[1-\left(\beta+\frac{v}{VT_1}\right)(T-T_1)\right]$$

可见P与T之间不是严格的线性关系。因而本实验中在20℃左右时，以下经验公式对α_p的测得值进行修正：

$$\delta\alpha_p=\left(0.018+\frac{\delta v}{V}\right)\times10^{-3}K^{-1}$$

六、数据处理

1. 大气压强及其修正

实验前 $t_1=16.5^\circ C$，$H_1=1.0043\times10^5Pa$

实验后 $t_2=17.8^\circ C$，$H_2=1.0052\times10^5Pa$

$$\bar{t}=\frac{t_1+t_2}{2}=17.15^\circ C,\quad \bar{H}=\frac{H_1+H_2}{2}=1.00475\times10^5Pa$$

修正项

$$\delta H=-(18.2-1.9)\times10^{-5}\bar{H}\bar{t}$$
$$=-16.3\times10^{-5}\times1.00475\times10^5\times17.15$$
$$=-280.8\ Pa$$

$$\therefore P_0=\bar{H}+\delta H=1.00475\times10^5-280.8=1.00196\times10^5Pa$$

2. t_b的计算

查表知 $P=1.0012\times10^5Pa$时，$t_b=99.67^\circ C$；$P=1.0026\times10^5Pa$时，$t_b=99.70$

由线性内插法 $t_b=99.67+\frac{(99.70-99.67)\times(1.00195-1.0012)}{$

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

$= 99.686^{\circ}C$

3. 定标与 k_P 的值

定标时测得 $U_m = 40.83mV$, $U_0 = 0.09\ mV$

又由前面测得 $P_c = 1.00195 \times 10^5 Pa$

$\therefore k_P = \frac{U_m - U_0}{P_c} = \frac{40.83 - 0.09}{1.00195 \times 10^5} = 4.066 \times 10^{-4}\ mV/Pa$

4. (U_t, U_P) 与 P, t 的数据表格

实验开始时室温 $t = t_1 = 16.5^{\circ}C$, $U_t = 99.31mV$

要以此为起点，到 $80^{\circ}C$ 为止共测 8 组数据（含起点）

则 $\Delta t = \frac{80 - 16.5}{7} = 9.0714^{\circ}C$

又 $U_t = U_{R_0}(1 + \alpha_R t)$，其中 $\alpha_R = 4.26 \times 10^{-3}\ ^{\circ}C^{-1}$

故 $\Delta U_t = U_{R_0} \alpha_R \Delta t$

$= \frac{U_t(室温)}{1 + \alpha_R t_1} \alpha_R \Delta t$

$\approx 3.59\ mV$

故实验时应取 ΔU_t 约为 3.59 mV，这样可使测出的数据分布较为

将实验测得的 (U_t, U_P) 及计算出的 t, P 整理如下表

其中，$t = \frac{U_t}{U_{tb}}\left(\frac{1}{\alpha_R} + t_b\right) - \frac{1}{\alpha_R}$

$P = P_c + \frac{U_P - U_0}{k_P}$

实验测得 $U_{tb} = 133.26\ mV$

$k_P = 4.066 \times 10^{-4}\ mV/Pa$

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名 _____ ）

作实验日期 年 月 日 教师评定

U_t/mV	t/°C	U_P/mV	$P/10^5$ Pa
99.31	16.50 (t_1)	0.00	0.9997
103.04	23.85	1.28	1.0312
106.59	32.76	2.55	1.0625
110.00	41.31	3.74	1.0917
113.42	49.90	4.93	1.1210
116.82	58.43	5.96	1.1463
120.26	67.06	7.14	1.1753
123.70	75.69	8.34	1.2049
133.26 (U_{t_2})	99.69 (t_2)	11.13 (U_{P_2})	1.2735

实验时用计算机线性拟合结果

$P = a + bt = 0.9546178 + 0.003346\,t$ （单位为0.1MPa）

相关系数 $r = 0.99985$，符合要求

$\alpha_P^* = \frac{b}{a} = 3.505 \times 10^{-3} K^{-1}$

而已知 $\frac{\nu}{V} = 0.02$

$\therefore \delta\alpha_P = (0.018 + \frac{\nu}{V}) \times 10^{-3} K^{-1} = 0.118 \times 10^{-3} K^{-1}$

故 $\alpha_P = \alpha_P^* + \delta\alpha_P = 3.623 \times 10^{-3} K^{-1}$

下面通过作图法绘制 P-t 图线（图纸见前页）

在直线取点 A(20.00, 1.0206)，B(80.00, 1.2164)，得

斜率 $K = \frac{1.2164 - 1.0206}{80.00 - 20.00} = 3.263 \times 10^{-3}$

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名 _____ ）

作实验日期 年 月 日 教师评定

又 $P = P_0(1+\alpha_p t)$

$\therefore \alpha_p^* = \frac{3.263\times10^{-3}}{0.95533} = 3.416\times10^{-3}\ K^{-1}$

修正项 $\delta\alpha_p = (0.018+\frac{5}{9})\times10^{-3}K^{-1} = 0.118\times10^{-2}K^{-1}$

$\therefore \alpha_p = \alpha_p^* + \delta\alpha_p = 3.534\times10^{-3}K^{-1}$

和计算机拟合结果较为吻合

七. 思考题

1. 差压传感器定标时，若先测 U_0 后测 k_p 应如何操作？若D口漏气定标结果有何影响？

答：(1)应先转动三通活塞使传感器C口与B管连通而与A断开，即C通大气。然后用机械泵从D口抽气，电压表读数达最大并稳定后记录值，即为 U_m；然后停泵，并使D口也通大气，此时电压表读数即 U_0，由 $k_p = \frac{U_m - U_0}{P_c}$ 便可得 k_p。

(2)若D口漏气，则用机械泵抽气后 $\Delta p < P_c$，则 U_m 偏小，故 k_p 偏小。

2. 对水加热时，为什么要控制好热平衡？升温过快有什么问题？

答：热平衡时电压表示值稳定，读数才准确；若不控制热平衡，则装置内可能有局部温差，导致读数不准。若升温过快，热量来不及扩散而聚集在局部，导致读出的 U_t 和 U_p 不准确，且 U_t 和 U_p 会随着热量的扩散而不断变化，不易读数。

3. 转动三通活塞应注意什么？换水应如何操作？

答：(1)三通活塞属玻璃制品易损坏，故转动时应缓慢，并用一只手扶住活塞外壳；(2)换水要先将加热器电源断开，再用虹吸

清 华 大 学 实 验 报 告

系别_____ 班号_____ 姓名_____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

法将杯内水吸出。或将玻璃系统拿下放在备用杯子上，再将玻璃杯内的水直接倒入塑料桶。

4. 用大气压强计测大气压的步骤是怎样的？

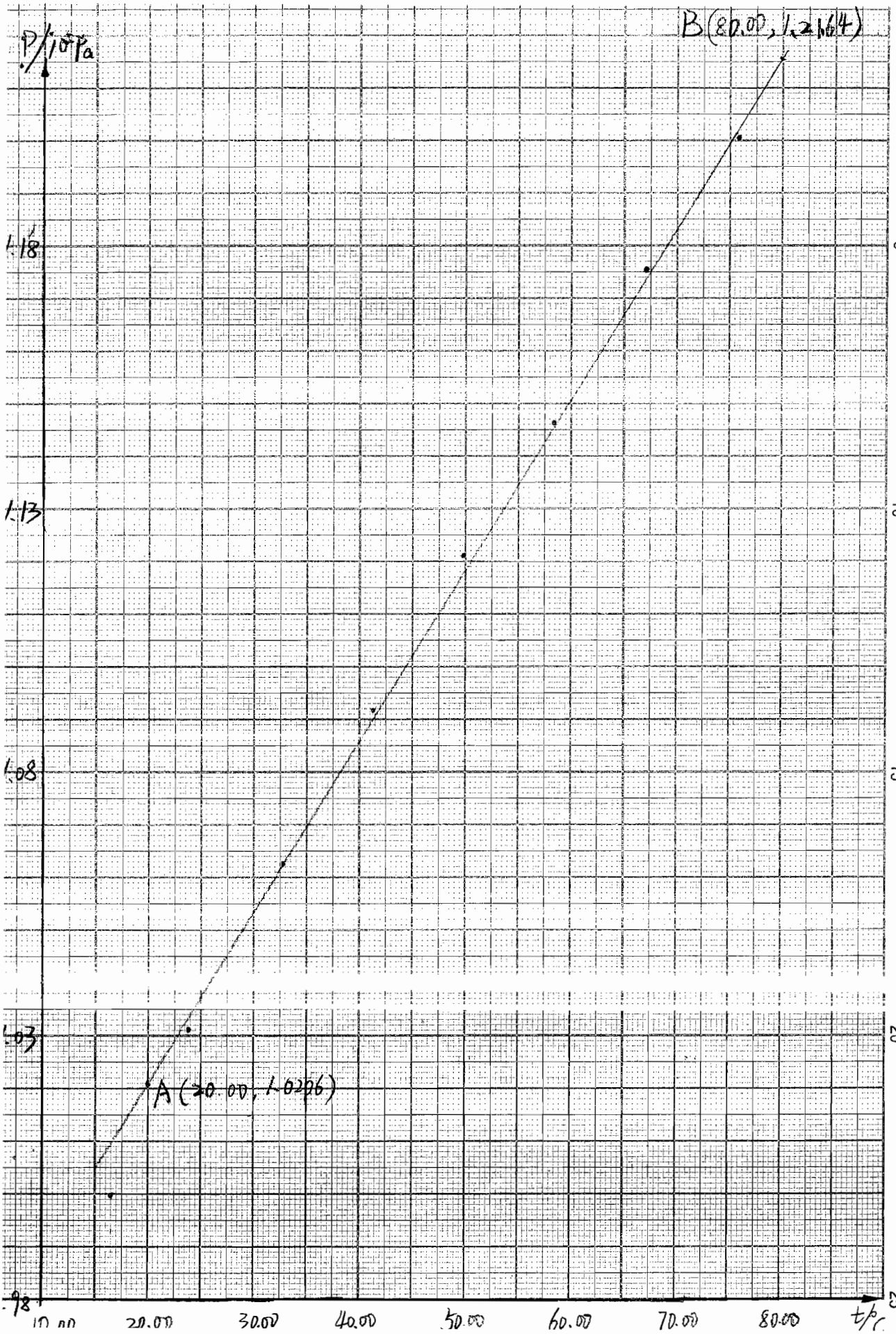
答：首先调节底部旋钮，使水银杯内的水银面刚好和象头针接触；然后使视线与游标零线水平，再调节旋钮，使游标零线与水银凸面相切，读数。

5. 为何铜电阻温度传感器采用四端接法，可减少引线电阻对测量的影响？

答：采用四端接法时，电流端的引线电阻和接触电阻折合到电源回路的其他串联电阻中，不会影响到电阻上的电流。

6. 实验中保持水沸腾时，若数字仪表 U_p 单调下降，可能是什么问题？

答：可能是由于仪器漏气。由于沸腾时A泡内气压与大气压差别较大，三通活塞很可能漏气，从而使A泡内气体减少，气压下降，从而导致 U_p 单调下降。


P/10⁵Pa
B(80.00, 1.2164)
A(20.00, 1.0206)
1.18
1.13
1.08
1.03
.98
10.00
20.00
30.00
40.00
50.00
60.00
70.00
80.00
t/℃
5
10
15
20
25

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 精仪 班号 精11 姓名 耿涛 （同组姓名 ）

作实验日期 2013 年 5 月 20 日 教师评定

偏振光学实验

一. 实验目的

1. 理解偏振光的基本概念，偏振光的起偏和检偏方法；
2. 学习偏振片与波片的工作原理和使用方法。

二. 实验原理

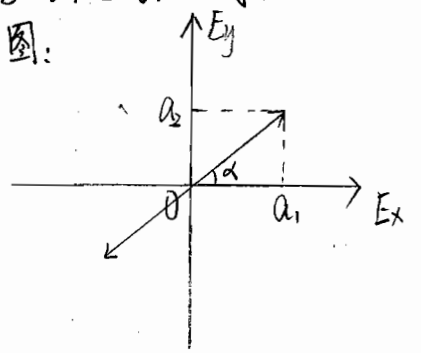
1. 光波偏振态的描述：

一般用光波的电矢量的振动状态来描述光波的偏振。一个单色偏振光可分为两个偏振方向相互垂直的线偏振光的叠加，即

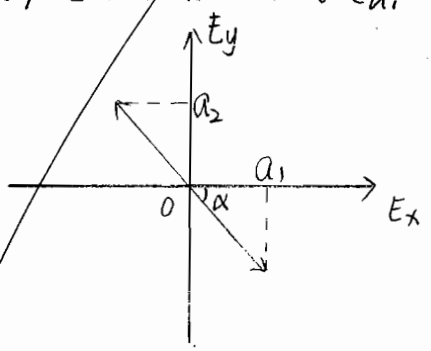
$$\begin{cases} E_x = a_1 \cos \omega t \\ E_y = a_2 \cos(\omega t + \delta) \end{cases}$$

当 $\delta = 0, \pi$ 时，上式描述的是一个线偏振光，方位角 $\alpha = \arctan(\frac{a_2}{a_1}\cos\delta)$

如图：



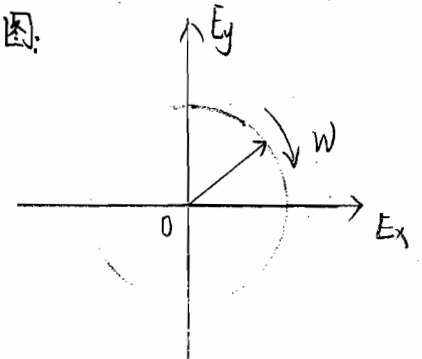
($\delta = 0$)



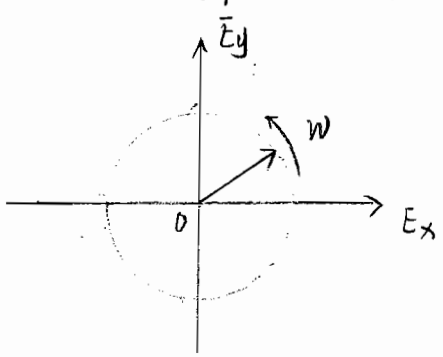
($\delta = \pi$)

当 $\delta = \frac{\pi}{2}, -\frac{\pi}{2}$ 且 $a_1 = a_2$ 时，上式描述的是一个圆偏振光。$\delta > 0$，右旋；$\delta < 0$，左旋

如图：



($\delta = \frac{\pi}{2}$)



($\delta = -\frac{\pi}{2}$)

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名 _____ ）

作实验日期 年 月 日 教师评定

除上述特殊情况外，上式表示的是椭圆偏振光，描述椭圆偏振光需利用光
长轴方位角 ψ，长和方向 ψ 与 $\frac{b^2}{a^2}$ 和 a_1、a_2、δ 的关系。

$$\begin{cases} \psi = \frac{1}{2}\arctan(\tan 2\beta \cdot \cos\delta) \\ \frac{b^2}{a^2} = \frac{2}{1+\sqrt{1-(\sin\delta\cdot\sin 2\beta)^2}} - 1 \end{cases}$$

其中，定义辅角 $\beta = \arctan(\frac{a_2}{a_1})$

2. 偏振片

主透射率：沿透射轴方向的光强透射率 T_1 和沿消光轴方向的光强透射

消光比：$\rho = \frac{T_2}{T_1}$

马吕斯定律：$T_\theta = (T_1 - T_2)\cos^2\theta + T_2$

完全非偏振光经过两个主透射率相同的偏振器后，总透射率为

$$T_\theta = \frac{1}{2}(T_1^2 + T_2^2)\cos^2\theta + T_1T_2\sin^2\theta$$

实验中只要测出 $\theta=0$ 和 $\theta=\frac{\pi}{2}$ 时的总透射率 $T_{//}$ 和 $T_\perp$ 之比，即测出透射光强
之比 I_{min}/I_{max}，就可以算出偏振器的消光比 ρ

$$\frac{I_{min}}{I_{max}} = \frac{T_\perp}{T_{//}} = \frac{T_1T_2}{(T_1^2+T_2^2)/2} = \frac{2\rho}{1+\rho^2} \approx 2\rho$$

3. 延迟器和波片

常用线性延迟器是由双折射材料制成的，设位相延迟器厚度为 d，快
轴方向振动的线偏振光折射率分别为 n_f，n_s，则

$$\delta_r = 2\pi(n_s - n_f)d/\lambda_0 = \omega(n_s - n_f)d/c_0$$

其中 c_0 和 λ_0 分别为真空中的光速和波长，ω 为光波圆频率。

相延 δ_r 为 $2\pi N \pm \pi/2$ 的延迟器叫 1/4 波片，相延 δ_r 为 $(2N+1)\pi$ 的延迟器叫 1/2 波
或半波片，相延 δ_r 为 $2\pi N$ 的延迟器叫全波片。

入射一束方位角为 β 的线偏振光，经相延为 δ_r 的波片后，有如下关系

$$|\sin\delta_r| = \frac{2\sqrt{I_{min}/I_{max}}}{\sin(2\beta)(1+I_{min}/I_{max})}$$

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

4. 反射和折射时的起偏现象

平面电磁波以入射角 θ_i 由空气射到折射率为 n 的无吸收介质表面，将发生折射和反射。

反射角 $\theta_r = \theta_i$，折射角 θ_t 满足 $\sin\theta_t = \frac{\sin\theta_i}{n}$

将入射波分解为电矢量分别平行或垂直于入射面的两个分量 P 和 S。把 P、S 分量的振幅反射率 r_p, r_s 平方可得相应的光强折射率 R_p, R_s

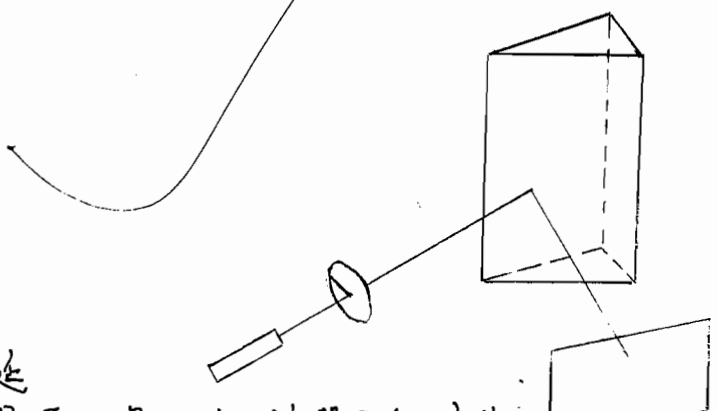
$$R_p = r_p^2 = \left[\frac{\tan(\theta_i - \theta_t)}{\tan(\theta_i + \theta_t)}\right]^2, \quad T_p = 1 - R_p$$

$$R_s = r_s^2 = \left[\frac{\sin(\theta_i - \theta_t)}{\sin(\theta_i + \theta_t)}\right]^2, \quad T_s = 1 - R_s$$

当 $\theta_i + \theta_t = \frac{\pi}{2}$ 即 $\theta_i = \arctan n = \theta_B$ 时，$R_p = 0$，这一特征角 θ_B 叫布儒斯特角

5. 根据布儒斯特角的性质判断偏振器的透射轴方向：

经过偏振器 P 的光入射到折射率 $n \approx 1.6$ 的玻璃棱镜表面，先预置入射角 $\theta_i \approx 58°$，旋转 P 到某一位置可看到反射光点很暗。再反复微调入射角 θ_i 及 P 的方位角使光点最暗。此时 $\theta_i = \theta_B$，P 的透射轴方向平行入射面。



6. 椭圆法测 $\frac{1}{4}$ 波片相延

PCSA 系统的测量原理是由起偏器 P 和波片 C 产生一束椭圆偏振光，然后调节 P 的方位角改变该椭圆偏振光 x 方向和 y 方向偏振分量的相延使得光波通过样品 S 后变成线偏振光，即 x 方向和 y 方向的总相延为 0 或 π，从而计算出样品 S 的 ψ_s 和 δ_s。

PCSA 系统（起偏器 P、$\frac{1}{4}$ 波片、样品 S、检偏器 A）是一种典型的椭偏测量光路。

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

三. 实验仪器

分光计，氦氖激光器，起偏器，检偏器；两个本波片，C_0 C_x；

光强探测器（硅光电池，毫伏表），电阻箱；棱镜。

四. 实验内容

[准备]

1. 提前开启激光电源，20 min左右光强才较稳定；

2. 粗调起偏器和检偏器的轴线，小平台基本水平且与分光计主轴垂直；

3. 调节电阻箱阻值200Ω，调节平行光管的位置和方向，使光束通过起偏
中心附近，由检偏管中心射出，且毫伏表 I_{max} 大于1mV。

[观测布儒斯特角]

4. 将棱镜放在小平台上

1) 先确定 $\alpha_{i=0}$；

用小纸片扎一小孔放在激光器出射光束处，通过调整使棱镜表面反射光
纸屏上的亮点与小孔重合，记录方位角 $\alpha_{i=0}$；

2) 测 α_B：

旋转棱镜使光束入射角约为57°，旋转至某一位置可看到白屏上的反射光
较暗；边调节起偏器P盘，边旋转棱镜，在该位置附近转动，可看到光
由明到暗，再由暗到明；反复调P盘和棱镜，使光点最暗，记录方位角 α_B。

[测定P盘透射轴方向]

5. 测量布儒斯特角时使光点最暗的P盘方向 $P_{\leftrightarrow}$；重复调节6次，计算平均值
将P盘置于平均值位置。移去棱镜；转动检偏器A盘，使毫伏表示值为最小值，
下A盘度盘的读数 α。

[消光比的测量]

6. P盘不动，转动A盘，取 $R_1=R_2=200\Omega$，依次交替测量透射光强的最大值 I_{max}
和最小值 I_{min}，并测量挡住光源时的 I_0。

[测量透射光强 I_m 和两偏振器夹角 θ 的关系]

7. 转A盘使 $\alpha=\alpha_B+90°+\theta$，测量 θ 分别为 0°，15°，30°，45°，60°，75°，80°，84°，87°，90°
时的 I_m。

[定波片 C_0 的快轴方向]

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

8. 调节 $\alpha=\alpha_{\updownarrow}$，把波片 C_0 轻轻安装到P盘所在侧的度盘上；C_0 快轴的大致方向已用白点标出，使快轴大致在竖直方向，旋转 C_0 使毫伏表示值最小、记录 C_0 靠近中心的游标盘读数。

[线偏振光经过1/4波片]

9. 旋转P盘，使P透射轴与水平夹角 $P-P_{\leftrightarrow}$ 分别为 0°，22.5°，45.0°，67.5°，43.0°，测量每个角度时毫伏表的最大最小值及毫伏表最大时A盘示值 α_i。

[定待测波片 C_x 的轴方向]

10. 放上 C_x，旋转 C_x 使毫伏表示值最小，此时 C_x 某轴已垂直于P的透射轴，即处竖直方向，记录度盘示值。

[观测偏振光通过1/4波片或全波片]

11. 调节 C_0 快轴在垂直方向，C_x 某轴在垂直方向；分别调节 $P-P_{\leftrightarrow}$ 为0，15.0°，30.0°，45.0°，测量毫伏表示值最小时的A盘读数 α_i；计算 $\alpha_p-\alpha_i$。

12. 调节 C_0 快轴在水平方向，C_x 某轴保持在垂直方向；分别调节 $P-P_{\leftrightarrow}$ 为0，15.0°，30.0°，45.0°，测量毫伏表示值最小时的A盘读数 α_i；计算 $\alpha_{\updownarrow}-\alpha_i$。

五、数据处理

1. 观测布儒斯特角

光束正入射棱镜表面时平台方位角 $\alpha_{i=0}=106°37'$

入射角为布儒斯特角时平台方位角 $\alpha_B=163°23'$

布儒斯特角 $\theta_B=\alpha_B-\alpha_{i=0}=56°46'$，$n=\tan\theta_B=1.526$，相对偏差 $\frac{|n-1.54|}{1.54}=0.8$

误差分析：

①棱镜表面被许多同学触摸过，尤其在夏季，会有汗渍使得棱镜表面不是很干净。同时棱镜表面可能并不平直。这些因素会产生散射造成误差。

②棱镜在布氏角附近一个小范围内转动时，光点均比较暗淡，通过目测难判断光强最小时的准确角度。

③P盘的放置位置可能不能使光路完全水平。

2. 定偏振器的透射轴方向

序号	1	2	3	4	5	6	标准差	平均值 $\overline{\alpha_{\updownarrow}}$	$\alpha_{\updownarrow}$
P	22.2°	22.1°	21.9°	22.4°	22.2°	22.4°	0.18°	22.4°	157.2°

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

其中 $\overline{P_{\theta}} = \frac{\sum_{i=1}^{6} P_{\theta i}}{6} = 273.4°$

$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{6}(P_{\theta i} - \overline{P_{\theta}})^2}{6-1}} = 0.28°$

3. 测消光比 e

$R_2 = 100\Omega$	I_{max}/mV	$I_1 = 4.220$	$I_3 = 4.124$	$I_5 = 4.225$	$I_7 = 4.119$
$R_1 = 200\Omega$	I_{min}/mV	$I_2 = -0.001$	$I_4 = -0.001$	$I_6 = -0.002$	挡住光源时 $I_0 = -0.002$

$e = \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{(I_4 + I_6 - 2I_0)}{4I_5} = \frac{100}{200} \cdot \frac{-0.001 - 0.002 + 2\times 0.002}{4\times 4.225} = 2.959\times 10^{-5}$

这种方法测得的消光比一点也不准：

① 如果认为 $\Delta_I = 0.001$ mV，则两次测量之差 $\Delta_{(I_{min} - I_0)} = \sqrt{2}\times 0.001$ mV，这样的不确定度，对本身就不大的 I_{min} 来说，已经相当大了。同时，$e \approx \frac{I_{min}}{2I_{max}}$，$I_{min}$ 在 e 的算式中影响很大，由于最小光强难以测准，所以只能认为消光比 e 的数量级在 $10^{-4}\sim 10^{-5}$；

② R 的选择也会影响结果的准确性。测 I_{min} 时电流较小，R 值应该较大，才能减小误差；测 I_{max} 时，由于光电池内阻随光强增大而减小，R 值应该较小，才能保证光强与电流的线性程度。

4. 测量透射光强 I_m 与两偏振器夹角 θ 间的关系

电阻箱示值 $R = 200\Omega$，$P = \overline{P_{\theta}} = 273.4$；$a_0 = 182.2$；$I_{max} = I_m$（夹角 θ = 0 度时）

夹角 θ/度	0	15.0	30.0	45.0	60.0	75.0	80.0	84.0	87.0	90.0	0
偏角 $a = a_0 + 90° + \theta$	272.2	287.2	302.2	317.2	332.2	347.2	352.2	356.2	359.2	2.2	92.2
I_m(mV) 测量值	8.219	7.639	6.114	4.066	2.021	0.531	0.237	0.083	0.020	-0.001	8.029
$I_c \approx I_{max}(\cos\theta)^2 + I_{min}$		7.579	6.092	4.061	2.030	0.543	0.244	0.088	0.021	-0.001	
$\lvert I_c - I_m\rvert / I_m$ (%)		0.79	0.36	0.12	0.09	2.26	2.95	6.02	5.00	0	

其中 $I_m = \frac{1}{2}(8.219 + 8.029) = 8.124$ mV，$I_m = -0.001$ mV，从而计算 I_c

$I_m/I_{max} \sim \theta$ 和 $\cos\theta \sim \theta$ 的关系曲线见下页，可以看出，这两条曲线重合得很好；我还用 Excel 对 I_m/I_{max} 与 $\cos^2\theta$ 这两组数据进行了线性拟合，相关性 $r = 0.99995$，这都验证了马吕斯定律的正确性。

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名 _____ ）

作实验日期 年 月 日 教师评定

而从表中数据可以看出，相对误差 $\frac{|I_c-I_m|}{I_m}$ 或 $\frac{|I_c-I_m|}{|I_m-I_0|}$ 随β的增大有显著的增大趋势。但比较 I_c 和 I_m，发现在β较大处绝对误差 $|I_c-I_m|$ 并不大。说明是因为测量值减小，引起相对误差增大的；并不能说明测量随β增大而越来越不准了。

总体而言，由图表观测到的结果而言，测量结果还是高度符合理论预期的。

5. 定波片 C_0 快轴方向

$\overline{P_{\leftrightarrow}}=273.4$，$\alpha_{\updownarrow}=182.2$，波片 C_0 快轴在垂直方向时度盘示值 $C_0=136.7°$

6. 线偏振光通过 1/4 波片

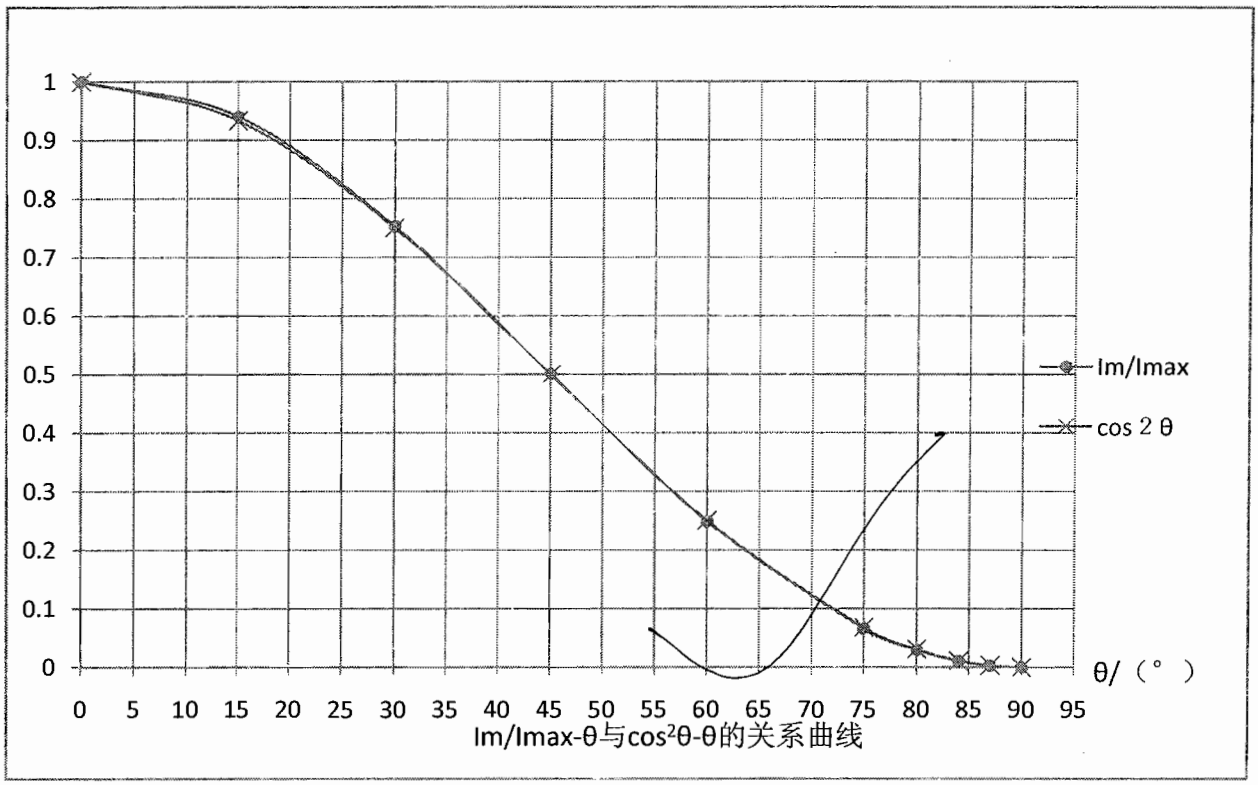
$\beta=P-P_{\leftrightarrow}$（度）	0.0	22.5	45.0	67.5	43.0
P盘方位角 $P=\beta+P_{\leftrightarrow}$	273.4	295.9	318.4	340.9	316.4
A盘透射轴在长轴时读数 α_i	272.8	265.8	242.3	189.8	248.2
长轴方位角 $\psi=\alpha_{\updownarrow}+90-\alpha_i$	359.4	6.4	29.9	82.4	24
I_{max}（最大光强）	3.131	1.351	0.081	0.575	0.127
I_{min}（最小光强）	0.000	0.192	0.040	0.015	0.085
$b^2/a^2\approx I_{min}/I_{max}$	3.19×10^{-4}	0.142	0.494	0.173	0.691
$\delta_r=\arcsin\left[\frac{2\sqrt{I_{min}/I_{max}}}{\sin(2\beta)(1+I_{min}/I_{max})}\right]$		68.96	70.20	无解	80.25
$\psi=\pm\arctan(\tan2\beta\cos\delta_r)$		9.81	无解	无解	33.78

（注，β=67.5°时，$\sin\delta_r=1.0029$，故 δ_r 和后面的ψ无

总的来说，测量值与理论值情况相差较大，其中波片 C_0 的相延 δ_r 并不准确地等于 $\frac{\pi}{2}$。

理论上，假设 $\delta_r=\frac{\pi}{2}$，当P轴与 C_0 慢轴夹角<45°时，为椭圆偏振光，$\psi=0$，$\frac{b^2}{a^2}=\tan^2\beta$；当β=45°时，快轴慢轴上的分振动振幅相等，近似为圆偏振光；当β>45°时，为椭圆偏振光，方位角 $\psi=90°$，$\frac{b^2}{a^2}=\cot^2\beta$；当β=0或90°时，为线偏振光。

而实际测量中，β=22.5°时，$\psi=6.4°$，$\frac{b^2}{a^2}=0.142$（$\tan^2\beta=0.172$），符合得一般；


1
0.9
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0
0 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 60 65 70 75 80 85 90 95
θ/（°）
Im/Imax
cos 2 θ
Im/Imax-θ与cos²θ-θ的关系曲线

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

$\beta=45°$时，$\frac{A_2^2}{A_1^2}=0.494$和理论预期相差较大，并不为圆偏振光；

$\beta=43°$时，测量结果较准确一些，可利用 $|\sin\delta_r|=\frac{2\sqrt{I_{min}/I_{max}}}{\sin(2\beta)(1+\frac{I_{min}}{I_{max}})}$ 计算波片的相延；

$\beta=67.5°$时，β与90°较接近，$\frac{A_2^2}{A_1^2}$与$\cot^2 67.5°$较接近。

7. 定波片C_x的轴方向

$\overline{P_{\leftrightarrow}}=273.4$，$\alpha_{\updownarrow}=182.2$

波片C_x的一个轴在垂直方向时度盘示值$C_x=294$

该步操作与第5步类似，不同之处在于没有快慢轴大致方向的标识。

C_0已在光路，因为其快轴方向与P透射轴垂直，所以通过C_0后仍是线偏振光。C_0的存在不会影响C_x轴向的确定。

8. 线偏振光通过1/2波片或全波片

(1) C_x某轴在垂直方向，度盘示值$C_x=294°$；C_0快轴在垂直方向，度盘示值$C_0=136.7°$

$P-P_{\leftrightarrow}$	0.0	15.0	30.0	45.0
P	273.4	288.4	303.4	318.4
消光时A盘读数α_i	181.4	196.7	212.2	227.9
$\alpha_{\updownarrow}-\alpha_i$	0.8	-14.5	-30.0	-45.7

(2) C_x某轴在垂直方向，度盘示值$C_x=294°$；C_0快轴在水平方向，度盘示值$C_0=46.7°$

$P-P_{\leftrightarrow}$	0.0	15.0	30.0	45.0
P	273.4	288.4	303.4	318.4
消光时A盘读数α_i	181.1	166.9	151.3	134.5
$\alpha_{\updownarrow}-\alpha_i$	1.1	15.3	30.9	47.7

两个半波片叠放时，若快轴方向相同，则组成全波片，且全波片快轴方向与两个半波片相同；若快轴方向垂直，则组成全波片。

线偏振光透过全波片后，振动方向为原方向相对快轴的镜像方向，与

清华大学实验报告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名 _____ ）

作实验日期 年 月 日 教师评定

转入射光，透射光反方向旋转；而偏振光透过全波片时振动方向不变。

由表中数据可以看出，(1)中旋转入射光，透射光反方向旋转，此时两波片组成$\frac{1}{2}$波片；(2)中旋转入射光，透射光同方向旋转，此时两波片组成全波片。

据此，可以得出，Gx快轴方向竖直，示值为294°

六. 误差分析

本次实验涉及到马吕斯定律、布儒斯特定律、双折射现象等光偏振内容，整个实验较为综合和连贯，每一步的测量都为后续实验提供相应的基准数据。

与此同时，必然会带来误差的累加，在第6步"线偏振光通过1/4波片"中可以看出测量值与理论预期相差较大。

这一方面是由于制造工艺、生产成本等原因，本波片的相延很难做到恰确等于$\frac{\pi}{2}$；以及在45°、67.5°、43°时，I_{max}与I_{min}都不到1mV，不确定度相对真值会比较大，产生一定误差；但同时我认为，由于之前测得的$P_{\leftrightarrow}$和$\alpha_{\updownarrow}$本身就存在一定误差，再加上度盘存在空程，此时的两个偏振片并不一定正交，同时β的值也不严格等于我们预定的值，这些都会给测量结果带来累计性误差。

七. 思考题

1. 如何由几个相同的$\frac{1}{4}$波片构成$\frac{1}{2}$波长和全波长？如何判断某光学器件是$\frac{1}{4}$波片还是全波片？

答：(1)当2个$\frac{1}{4}$波片，快轴与快轴平行时，构成$\frac{1}{2}$波片；

当2个$\frac{1}{4}$波片，快轴与快轴相互垂直时，构成全波片。

(2)线偏振光透过$\frac{1}{2}$波片后，振动方向为原方向相对快轴的镜像方向。

线偏振光透过全波片后，振动方向不变。

可以旋转入射线偏振光，若透射光同方向旋转，则为全波片；若透射光反方向旋转，则为$\frac{1}{2}$波片。

2. 讨论光隔离器中波片快慢轴与P透射轴应满足的位置关系及光隔离器的原理。

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

答：波片快慢轴与P透射轴夹角应为45°

本波片型光隔离器的原理：

光通过偏振片P，成为振动方向与P透射轴平行的线偏振光；再通过夹角为45°的本波片，变为左旋（或右旋）圆偏振光；在光学表面M发生反射，由于存在半波损失，反射后旋向改变，变为右旋（或左旋）圆偏振光；

旋向改变了的圆偏振光反向通过本波片，成为线偏振光，但其偏振方向与入射线偏振光垂直，所以无法通过偏振片P，从而实现隔离反向光的作用。

八. 实验感想

本次实验进展地较为顺利，我在实际动手测量的过程中进一步加深了对光偏振内容的理解。

而测量结果都很符合理论预期，较好地验证了我们学到的知识，除了消光比e和后来的1/4波片实验存在一定的误差。其误差分析我在之前已经写过，这里就不再重复了，不过这些误差并不妨碍我去直观地认识光学来现象，同时还使我更加深入地认识了实验测量方法的局限性和误差来源。

感谢田老师的悉心指导。

偏振光学表格每人只发一张　姓名 耿强　学号 2011010492　班号 精11　座位号 02　日期 5.20

(注意：仪器娇贵，手下留情；报告中要有数据分析、讨论和结论。)

4. 观测布儒斯特角： 光束正入射棱镜表面时平台方位角$\alpha_{i=0}$= 106°37′；入射角为布儒斯特角时平台方位角α_B = 163°23′；布氏角的测量值$\theta_B = \alpha_B - \alpha_{i=0}$= 56°46′；由此算出的折射率 $n=\tan\theta_B$ = 1.536；n的相对偏差 $(n-1.54)/1.54$= 0.89 %。

5. 测定偏振器透射轴方向： 布氏角时起偏器P的透射轴在水平方向，方位角为$p_{\leftrightarrow}$；检偏器A和P正交时（P盘置于平均值$\overline{p_{\leftrightarrow}}$，A盘转至消光状态），A的方位角记作 $a_{\updownarrow}$。

序号	1	2	3	4	5	6	标准差	平均值$\overline{p_{\leftrightarrow}}$	$a_{\updownarrow}$
$p_{\leftrightarrow}$	273.3°	273.1°	274.0°	273.4°	273.3°	273.5°	0.28°	273.4°	182.2°

6. 测消光比 e ： 当 $p = p_{\leftrightarrow}$ 时，交替测量透射光强极值 I_{max} 和 I_{min} (直接记录毫伏表读数)。

※提示：检查仪器，数字毫伏表显示的 I_{max} 值大于 1mV 才能开始实验。

$$e = \frac{R_2}{R_1}\cdot\frac{(I_4 + I_6 - 2I_0)}{4\cdot I_5}$$

R_2=100Ω	I_{max} (单位mV)	I_1= 4.220	I_3= 4.224	I_5= 4.225	I_7= 4.119	
R_1= 260Ω	I_{min} (单位mV)	I_2= -0.001	I_4= -0.001	I_6= -0.002	挡住光源时I_0= -0.002	(参见表7后注)

7. 测量透射光强I_m与两偏振器夹角θ 间的关系：

电阻箱示值R= 200 Ω，$p=\overline{p_{\leftrightarrow}}$ = 273.4；$a_{\updownarrow}$ = 182.2；$I_{max}=I_m$ (夹角θ=0度时)

夹角θ (度)	0	15.0	30.0	45.0	60.0	75.0	80.0	84.0	87.0	90.0	0
A盘 $a = a_{\updownarrow} + 90° + \theta$	272.2	287.2	302.2	317.2	332.2	347.2	352.2	356.2	359.2	2.2	92.2
I_m (mV) 测量值	8.029	7.869	6.814	4.066	2.021	0.531	0.237	0.083	0.020	-0.001	8.029
$I_c \approx I_{max}(\cos\theta)^2 + I_{min}$	※	7.579	6.092	4.066	2.030	0.543	0.244	0.088	0.021	-0.001	※
$\lvert I_c - I_m\rvert / I_m$ (%)	※	0.79	0.36	0.12	0.49	2.26	2.95	6.02	5.00	0	※

注：**(1)**$I_c \approx I_{max}(\cos\theta)^2 + I_{min}$为计算值；$\lvert I_c - I_m\rvert / I_m$为相对偏差。**(2)**用$\lvert I_c - I_m\rvert / \lvert I_m - I_0\rvert$计算 84、87、90°时的相对偏差，式中 I_0为挡住光源时的值（包含背景光、光电池暗电流、噪声、寄生电势和电表零点漂移等综合影响）。

8.定波片C_0快轴方向(大致方向已知) $\overline{p_{\leftrightarrow}}$ = 273.4，$a_{\updownarrow}$ = 182.2，波片C_0快轴在垂直方向时度盘示值C_0= 136.8°

9. 线偏振光通过1/4波片，C_0度盘示值C_0= 136.8°

$\beta = p - p_{\leftrightarrow}$ (度)	0.0	22.5	45.0	67.5	43.0
P盘方位角 $p=\beta+p_{\leftrightarrow}$	273.4	295.9	318.4	340.9	316.4
A盘透射轴在长轴方向时读数 a_i	272.6	295.8	318.4	189.8	316.4
长轴方位角 $\psi = a_{\updownarrow} + 90 - a_i$	359.4	276.4	29.9	82.4	24
I_{max}(最大光强)	3.131	2.780	0.083	0.375	0.127
I_{min}(最小光强)	-0.000	0.192	0.040	0.085	0.085
$b^2/a^2 \approx I_{min}/I_{max}$	3.19×10^{-4}	0.142	0.494	0.173	0.681
用(11)式计算所得的δ_r	※	68.96	70.20	无解	80.25
用(2)式计算所得的ψ	※	9.87	无解	无解	33.78

注：由于测量误差等原因，δ_r、ψ 计算结果可能无解

10. 定波片C_x 的轴方向 $\overline{p_{\leftrightarrow}}$ = 273.43，$a_{\updownarrow}$ = 182.2

波片C_x的一个轴在垂直方向时度盘示值C_x= 294°

11. 线偏振光通过1/2波片或全波片：

C_x某轴在垂直方向，度盘示值C_x= 294°

Co快轴在垂直方向，度盘示值Co= 136.7°

$p - p_{\leftrightarrow}$	0.0	15.0	30.0	45.0
p	273.4	288.4	303.4	318.4
消光时A盘读数a_i	181.4	196.7	212.2	227.9
$a_{\updownarrow} - a_i$	0.8	-14.5	-30.0	-45.7

12. 线偏振光通过1/2波片或全波片：

C_x某轴在垂直方向，度盘示值C_x= 294°

C_0快轴在水平方向，度盘示值Co= 46.7°

$p - p_{\leftrightarrow}$	0.0	15.0	30.0	45.0
p	273.4	288.4	303.4	318.4
消光时A盘读数a_i	181.1	166.9	153.3	134.5
$a_{\updownarrow} - a_i$	1.1	15.3	30.9	47.7

报告中要求分析步骤11,12中 C_x快轴的方向。

结论：C_x 快轴 C_x = 294°

清华大学实验报告

系别 精仪 班号 11 姓名 耿强 （同组者 [redacted] ）

作实验日期 年 月 日 教师评定 [redacted]

数字存储示波器与瞬态信号测量

一. 实验目的

1. 学习使用数字存储示波器
2. 学习捕获和记录瞬时信号
3. 了解超声波探伤的原理

二. 实验仪器

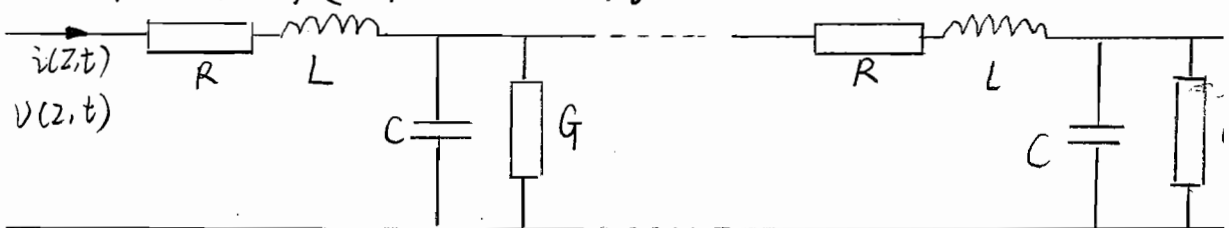
1. TDS 210、TDS1002，TDS 2002 数字存储示波器
2. QW-I 型瞬态信号测量实验仪

三. 实验原理

1. 传输线中脉冲信号反射波的测量和应用

电磁波在同轴电缆的中心导体和屏蔽层之间传输，是一封闭回路。高频信号具有集肤效应，电流只在中心导体的表面流动，因此电磁场不会向外泄漏，不会影响外界，外界干扰信号也不会渗入内部，有良好的屏蔽性。

传输线为一对相隔均匀距离的平行导线或同轴电缆线，其上电信号存在随长度变化的空间分布。



上图中，R、L、C、G分别为单位长度传输线的电阻、电感、电容和导，v(z,t)，i(z,t)为沿传输线长度方向的电压，电流信号。为分析单一率w的信号，用傅立叶分析和合成的方法，令

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组[redacted]）

作实验日期 年 月 日 教师评定

$$v(z,t)=Re[V(z)e^{jwt}],\ i(z,t)=Re[I(z)e^{jwt}]$$

可得

$$\frac{d^2V(z)}{dz^2}=\gamma^2V(z),\quad \frac{d^2I(z)}{dz^2}=\gamma^2I(z)$$

其中 $\gamma=\alpha+j\beta=\sqrt{(R+jwL)(G+jwC)}$ 为传播常数，其中α为线的衰减常数，β是线的相位常数，它们都是和w相关的伪常数

微分方程的解

$$V(z)=V^+(z)+V^-(z)=V_0^+e^{-\gamma z}+V_0^-e^{\gamma z}$$

$$I(z)=I^+(z)+I^-(z)=I_0^+e^{-\gamma z}+I_0^-e^{\gamma z}$$

正和负的上角标分别表示向$+z$和$-z$方向行进的行波

有 $$\frac{V_0^+}{I_0^+}=-\frac{V_0^-}{I_0^-}=\frac{R+jwL}{\gamma}$$

则传输线上任何z处的电流电压之比与z无关

令 $$Z_0=\frac{R+jwL}{\gamma}=\sqrt{\frac{R+jwL}{G+jwC}}=R_0+jX_0$$，Z_0为特性阻抗，R_0、X_0为单位长度电阻性负载和电感性负载。

当$R=0$，$G=0$时，$\gamma=jw\sqrt{LC}$，$Z_0=\sqrt{\frac{L}{C}}$，为无损耗线

当$\frac{R}{L}=\frac{G}{C}$，$\gamma=\sqrt{\frac{C}{L}}(R+jwL)$，$Z_0=\sqrt{\frac{L}{C}}$，为无失真线

对长为l的传输线，在终端$z=l$处外加的负载为Z_L，$Z_L=\frac{V_L}{I_L}$，V_L，I_L为负载Z_L上的电压、电流。由微分方程的解和两端的边界条件可在线上任一点处：

$$V(z)=\frac{I_L}{2}[(Z_L+Z_0)e^{\gamma(l-z)}+(Z_L-Z_0)e^{-\gamma(l-z)}]$$

$$I(z)=\frac{I_L}{2Z_0}[(Z_L+Z_0)e^{\gamma(l-z)}-(Z_L-Z_0)e^{-\gamma(l-z)}]$$

式中第一项表示沿z的入射波，第二项表示沿$-z$方向的反射波

$$V(z)=\frac{I_L}{2}(Z_L+Z_0)e^{\gamma(l-z)}[1+\Gamma e^{-2\gamma(l-z)}]$$

其中 $\Gamma=\frac{Z_L-Z_0}{Z_L+Z_0}=|\Gamma|e^{j\theta}$，是在负载端电压反射波与入射波振幅之比，称负载$Z_L$的电压反射系数。对于无损线$Z_0=R_0$，当负载$Z_L$也为纯电阻性

清华大学实验报告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名 _____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

① 开路时，$Z_L = R_L = \infty$，$\Gamma = 1$

$$\begin{cases} V(z) = V_L \cos\dfrac{2\pi(l-z)}{\lambda} \\ I(z) = \dfrac{V_L}{R_0} \sin\dfrac{2\pi(l-z)}{\lambda} \end{cases}$$

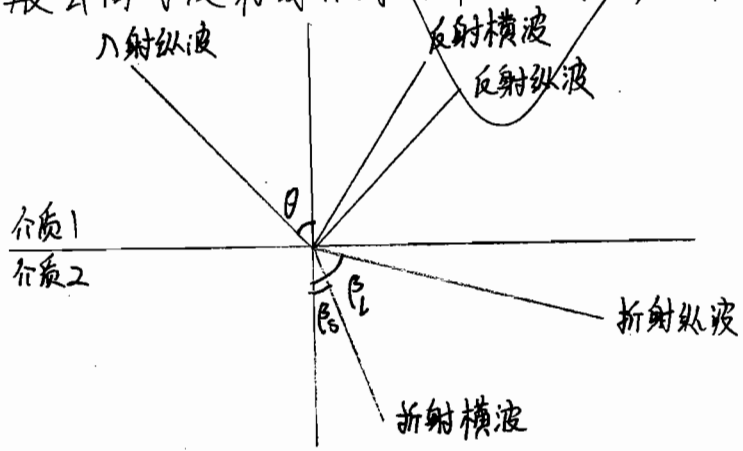
此时电压反射系数最大，$z=l$ 处电压最大，电流最小。

② 短路时，$Z_L = R_L = 0$，$\Gamma = -1$，反射波为反相，电压，电流驻波分布与开路情况反。

③ 负载匹配时，$Z_L = R_L = R_0$，$\Gamma = 0$，此时没有反射波，只有沿 $+z$ 方向的行波

2. 超声波的产生原理

超声波在介质中传播通常有纵波、横波、表面波三种形成。当超声纵或横波入射到介质界面上时，若介质都是固体或其中之一是固体时，在发射折射时，一般会同时反射或折射出另一种波形，这种现象称为波型转换



C_1 为介质1中的波速，C_{2l}，C_{2s} 分别为介质2中纵，横波的波速，则

$$\frac{\sin\theta}{C_1} = \frac{\sin\beta_l}{C_{2l}} = \frac{\sin\beta_s}{C_{2s}}$$

若 $C_1 < C_{2l}$，当入射角 $\theta > \theta_l = \sin^{-1}\dfrac{C_1}{C_{2l}}$ 时发生全反射，介质2中纵波消失；若 $C_1 < C_{2s}$，当入射角 $\theta > \theta_s = \sin^{-1}\dfrac{C_1}{C_{2s}}$ 时，介质2中横波也消失，若 $\theta > \theta_s$ 时，在表面条适合时将产生沿固体表面传播的表面波。

在超声波为析测试中，利用超声波探头产生脉冲超声波，常用的有

清华大学实验报告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名 _____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

探头、斜探头和可变角探头。实验中使用的探头工作方式主要为单探头方

四. 实验内容

1. 用数字存储示波器观测连续或单脉冲信号

要求测量波形参数：单脉冲的电压幅度U_{max}，上升、下降沿时间t_r，脉冲宽度t_w，记录"衰减器"数值，描出完整的信号波形。

2. 传输线中脉冲信号反射波的测量和应用

如瞬态信号测量实验仪所示，"反射信号检测"的"输入端"、"输出之间已连接60～70米的同轴电缆。用"检波"输出信号接到"输出端"，信号度用"超声探头"的衰减器调节至脉宽较小。"输出端"分别选择开路，短路和匹配电阻三种测试方式，分别测出"输入端"，"输出端"之间的信号形和相对延时τ_1，τ_2，计算实验仪中的电缆长度和吸收系数α，α的定为，电压信号U_0经过长为l的电缆后$U_l = U_0 e^{-\alpha l}$。

3. 利用直探头测量试样中纵波声速C_L，探测$C_{\text{Ⅲ}_3}$钻孔深度h

将直探头置于试样上合适位置，用示波器显示试样底面或小孔的反射在探头和试样表面涂上耦合剂，保持探头与试样表面接触良好，反复移探头直至反射回波信号最大。调整示波器的显示方式，使时间测量处于最的状态。测量起始波与回波的时间间隔t_1，t_2，求出纵波声速或小孔深并计算不确定度。

五. 实验数据处理

1. 观察和测量脉冲信号

$\Delta V_{示波器} = 100\,mV$，$\Delta_{t示波器} = 25.0\,ns$

	U_{max}(V)	频率f(kHz)	上升时间t_r(ns)	下降时间t_f(ns)	脉冲宽度t_w(ns)	衰减器1Ⅱ(dB)	存储通道A/B
连续脉冲	2.16	2.40000	240	430	370	85	A
单脉冲	2.12		252	412	388	85	B

清华大学实验报告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名 _____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

负载短路时

$$\overline{T_2} = \frac{670+660+650}{3} = 660\,ns$$

$$S_{T_2} = \sqrt{\frac{\Sigma(T_2-\overline{T_2})^2}{3-1}} = 10\,ns$$

故 $\Delta_{T_2} = \sqrt{S_{T_2}^2+\Delta_{标波器}^2} = 26.926\,ns$

$$\overline{l} = \frac{1}{2}\overline{T_2}\cdot v = \frac{1}{2}\times 660\times 10^{-9}\times 2\times 10^8 = 66\,m$$

$$\Delta_l = \frac{1}{2}\Delta_{T_2}\cdot v = \frac{1}{2}\times 26.926\times 10^{-9}\times 2\times 10^8 = 2.6926\,m$$

$\therefore l = (66.0\pm 2.7)\,m$

匹配负载时

$\overline{T_1} = 320\,ns$

$\Delta_{T_1} = 25\,ns$

$$\therefore \overline{l} = \overline{T_1}\cdot v = 320\times 10^{-9}\times 2\times 10^8 = 64\,m$$

$$\Delta_l = \Delta_{T_1}\cdot v = 25\times 10^{-9}\times 2\times 10^8 = 5\,m$$

$\therefore l = (64\pm 5)\,m$

3. 超声波测量

$D = 39.40\,mm$，$R_1 = 30.00\,mm$，$R_2 = H = 60.10\,mm$，$\Delta H = \Delta D = \Delta R_1 = \Delta R_2 = 0.02\,mm$，$\rho = 2700\,kg/m$

$\Delta_{标波器} = 1.0\,\mu s$

直探头		斜探头	可变探头		
$T_H/\mu s$	$T_q/\mu s$	$\Delta T_{\Delta R}/\mu s$	L/mm	角度/°	$\Delta_{tb}/\mu s$
19.00	14.30	18.60	30	65.0	21.0
18.80		18.80			
19.00		18.80			

1）测纵波声速 C_L 和钻孔深度 h

清华大学实验报告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名 _____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

$\bar{T}_H = \frac{19.00+18.80+19.00}{3} = 18.93\,\mu s$，$S_{TH} = \sqrt{\frac{\sum(T_H-\bar{T}_H)^2}{3-1}} = 0.1155\,\mu s$

$\Delta_{TH} = \sqrt{S_{TH}^2 + \Delta t_{示波器}^2} = 1.0066\,\mu s$

$\therefore C_L = 2H/\bar{T}_H = 2\times 60.10\times 10^{-3}/(18.93\times 10^{-6}) = 6349.7\ m/s$

$\frac{\Delta C_L}{C_L} = \sqrt{(\frac{\Delta H}{H})^2+(\frac{\Delta_{TH}}{T_H})^2}$

$\Rightarrow \Delta_{CL} = C_L\sqrt{(\frac{\Delta H}{H})^2+(\frac{\Delta_{TH}}{T_H})^2} = 6349.7\times\sqrt{(\frac{0.02}{60.10})^2+(\frac{1.0066}{18.93})^2} = 337.65\ m/s$

$\therefore C_L = (6.3\pm 0.3)\times 10^3\ m/s$

$\therefore h = C_L\frac{T_H-T_0}{2} = 6349.7\times\frac{18.93-14.30}{2}\times 10^{-6} = 0.0147\,m = 14.7\,mm$

$\frac{\Delta h}{h} = \sqrt{(\frac{\Delta C_L}{C_L})^2+(\frac{\Delta T_H}{T_H-T_0})^2+(\frac{\Delta T_0}{T_H-T_0})^2} = \sqrt{(\frac{337.65}{6349.7})^2+(\frac{1.0066}{4.23})^2+(\frac{1}{14.23})^2} = 0.3396$

$\therefore \Delta h = h\cdot\frac{\Delta h}{h} = 14.7\times 0.3396 = 4.99\,mm$

即 $h = (15\pm 5)\,mm$

(2) 斜探头测横波声速 C_S

$\bar{T}_{\Delta R} = \frac{18.60+18.80+18.80}{3} = 18.73\,\mu s$，$S_{T\Delta R} = \sqrt{\frac{\sum(T_{\Delta R}-\bar{T}_{\Delta R})^2}{3-1}} = 0.1155\,\mu s$

$\Delta_{T\Delta R} = \sqrt{S_{T\Delta R}^2+\Delta_{示波器}^2} = 1.4889\,\mu s$

$\therefore C_S = \frac{2(R_2-R_1)}{T_{\Delta R}} = \frac{2(60.10-30.08)}{18.73}\times 10^{-3}\times 10^6 = 3214.1\ m/s$

$\frac{\Delta C_S}{C_S} = \sqrt{(\frac{\Delta T_{\Delta R}}{T_{\Delta R}})^2+(\frac{\Delta R_1}{R_2-R_1})^2+(\frac{\Delta R_2}{R_2-R_1})^2} = \sqrt{(\frac{1.4889}{18.73})^2+(\frac{0.02}{30.10})^2+(\frac{0.02}{30.10})^2} = 0.0757$

$\therefore \Delta C_S = C_S\cdot\frac{\Delta C_S}{C_S} = 3214.1\times 0.0757 = 243.5$

即 $C_S = (3.21\pm 0.24)\times 10^3\ m/s$

(3) 计算试样块的杨氏模量和泊松系数

$T = \frac{C_L}{C_S} = \frac{6349.7}{3214.1} = 1.9756$

$\therefore E = \frac{\rho C_S^2(3T^2-4)}{T^2-1} = \frac{2700\times 3214.1^2(3\times 1.9756^2-4)}{(1.9756^2-1)} = 7.407\times 10^{10}\,Pa = 74.07\,GPa$

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名 _____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

$$\sigma = \frac{T^2-2}{2(T^2-1)} = \frac{1.9756^2-2}{2(1.9756^2-1)} = 0.328$$

(4) 表面波声速

角度为 69.0° 时出现明显表面波

采用移动法

$\Delta L = 30mm$, $\Delta T_b = 21\mu s$

$$\therefore C_b = \frac{2\Delta L}{\Delta T_b} = \frac{2\times 30\times 10^{-3}}{21\times 10^{-6}} = 2857.1 m/s$$

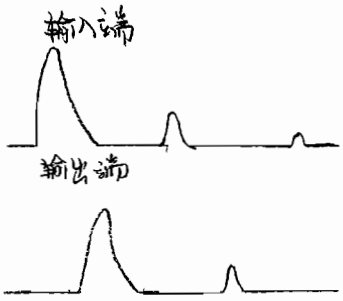
六. 思考题

若 Z_L 略大于或略小于 R_0 时，波形如何，为什么？并画出波形

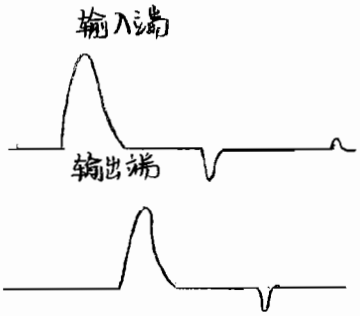
答：$V(z) = \frac{E_0}{2}(Z_L+Z_0)e^{\gamma(l-z)}\left[1+\Gamma e^{-2\gamma(l-z)}\right]$，$\Gamma = \frac{Z_L-Z_0}{Z_L+Z_0}$

当 Z_L 略大于或略小于 R_0 时，Γ 很小，反射系数很小，从输出端返回的波大大减小；当 Z_L 略小于 R_0 时，反射波为正向，略小于 R_0 时，反射波为反向。

Z_L 略大于 R_0



Z_L 略小于 R_0



七. 实验感想

今天的实验比较有趣，老师给我们非常细致地讲解了瞬态信号的触发、扫描和测量过程，并且用其比较精确地测量了许多实用物理量。

开始使用数字示波器时还不是很熟，得到的波形质量不高，扫描时间控制得不很熟练。很快，随着实验的深入，我欣发地掌握了操作的要领，实验进行得比较顺利，达到了预期的效果。

感谢老师的悉心指导。

清华大学实验报告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 耿[illegible] （同组姓名 [illegible]）

作实验日期 年 月 日 教师评定

原始数据

1. 观察和测量脉冲信号 $\Delta V_{示波器}$ = ~~[illegible]~~ 100mV $\Delta t_{示波器}$ = 250 ns

	V_{max}(V)	频率 f(kHz)	上升时间 t_r(ns)	下降时间 t_f(ns)	t_w(ns)	工区(dB)
连续脉冲	2.16	2.40000	240	430	370	85
单脉冲	2.12	\	252	412	388	83

2. $\Delta t_{示波器}$ = 250 ns

输出端开路

波形示意	V/mV	t_2/ns	t_1/ns
输入端	V_1: 208	650	320
	V_2: 172	660	320
	V_3: 128	670	320
输出端	V_1: 276	650	330
	V_2: 208	660	
	V_3: 152	670	

短路负载

波形示意	T_2/ns
输入端	670
	660
	650

匹配负载

波形示意	T_1/n
输入端	320
输出端	

3. $\Delta t_{示波器}$ = 1.0 MS

直探头

点	T_H/ms	T_Q/ms
1	19.0	14.3
2	18.8	
3	19.0	

斜探头

T_{AR}/ms	T_{R1}/ms	T_{R2}/ms
18.60	[illegible]	
18.80		
18.80		

表面波

L/mm	幅度/	ΔT
30	65	2

[illegible]

第3 [illegible]，5.6 [illegible]

2

清华大学实验报告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名 _____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

2. 传输线中脉冲信号传输和反射的观测

$\Delta t_{示波器} = 25ns$

输出端开路				短路负载		匹配负载	
波形示意	V/mV	T_2/ns	T_1/ns	波形示意	T_2/ns	波形示意	T_1/ns
输入端 	V_1: 228 V_2: 172 V_3: 128 ...	650 660 670 ...	320 320 320 330 ...	输入端 	670 660 650 ...	输入端 	320
输出端 	V_1: 276 V_2: 208 V_3: 152	650 660 670		输出端 		输出端 	

开路时

$$\overline{T_2} = \frac{650+660+670}{3} = 660\,ns \quad , \quad \overline{T_1} = \frac{320+320+320+330}{4} = 322.5\,ns$$

$$\overline{L_1} = \overline{T_1} \cdot V = 322.5\times10^{-9}\times 2\times10^{8} = 64.5\,m \quad , \quad \overline{L_2} = \frac{1}{2}\overline{T_2}\cdot V = \frac{1}{2}\times660\times10^{-9}\times2\times10^{8} = 66\,m$$

而 $\Delta_{T_1} = \sqrt{S_{T_1}^2 + \Delta_{t_{示波器}}^2} = \sqrt{5^2+25^2} = 25.50\,ns$, $\Delta_{T_2} = \sqrt{S_{T_2}^2 + \Delta_{t_{示波器}}^2} = \sqrt{10^2+25^2} = 26.93\,ns$

$\therefore \Delta_{L_1} = \Delta_{T_1}\cdot V = 25.50\times10^{-9}\times2\times10^{8} = 5.1\,m$, $\Delta_{L_2} = \frac{1}{2}\Delta_{T_2}\cdot V = \frac{1}{2}\times26.93\times10^{-9}\times2\times10^{8} = 2.69\,m$

$\therefore L = \frac{1}{2}(\overline{L_1}+\overline{L_2}) = 65.25\,m$

$\Delta_L = \frac{1}{2}\sqrt{\Delta_{L_1}^2+\Delta_{L_2}^2} = \frac{1}{2}\sqrt{5.1^2+2.69^2} = 2.88\,m$

$\therefore L = (65\pm3)\,m$

衰减系数

$$V_n/V_n' = e^{-\alpha L}$$

得 $\alpha = \frac{1}{L}\ln V_n'/V_n = \frac{1}{65.25}\ln 276/228 = 2.928\times10^{-3}\,m^{-1}$

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

逸出功的测量

精11班

耿 强

2011010492

清华大学实验报告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 耿阳 （同组姓名 _____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

逸出功的测量

一. 实验目的

1. 学习里查孙直线法；
2. 了解热电子发射规律和现象；
3. 掌握阴极材料电子逸出功的测量方法；
4. 学习面对难以测定或无法测量的物理量(如本实验A，S)的处理方法

二. 实验原理

1. 电子逸出功

电子在金属内部所具有的能量低于在外部所具有的能量。电子逸出金属表面所需的能量即为逸出功。

2. 热电子发射

真空玻璃管中，①通电流加热阴极 ②阳极加正电位，则在连接这两极的外电路中会有电流通过，说明有电子从加热的金属丝中射出。通过加热，电子能量升高，克服逸出功，从金属表面逸出。

3. 金属中电子的能量分布规律

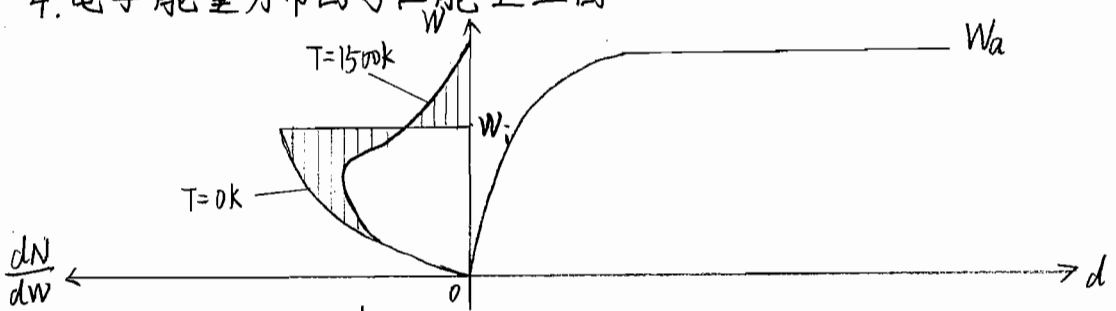
①电子能量量子化；

②电子全同性；

③符合泡利不相容原理；

④能量分布服从费密—狄喇克分布。

4. 电子能量分布图与位能壁垒图



5. 热电子发射的里查孙—德西曼公式

$$J_e = A(1-R_e)AT^2 e^{-\frac{W_a-W_i}{kT}}$$

式中 J_e 为单位面积的发射电流，$W_a - W_i = 0$ 时为逸出区从左边出去

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

(e_0为电子电量，ϕ为逸出电位)；T为热力学温度；

普适常数 $A_1 = 60.09\ A/(cm\cdot K)^2$；Re为金属表面对发射电子的反射系数。

令 $2(1-Re)A_1 = A$，则上式可改写为

$$J_e = AT^2 e^{-\frac{W_a - W_i}{kT}}$$

故有

$$I_e = AST^2 e^{-\frac{e_0\phi}{kT}}$$

6. 里查孙直线法

由于A、S难以测量，故上式作如下处理：

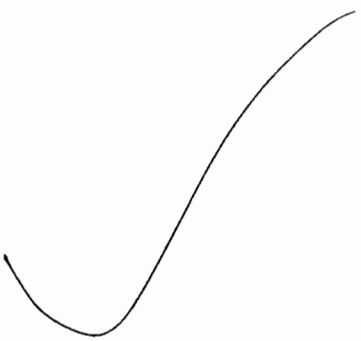
除以T^2再取以10为底的常用对数，得

$$\lg\frac{I_e}{T^2} = \lg(AS) - \frac{1}{2.303}\cdot\frac{e_0\phi}{kT}$$

若用国际单位制并代入e_0、k，得

$$\lg\frac{I_e}{T^2} = \lg(AS) - 5.039\times10^3\cdot\frac{\phi}{T}$$

在$\lg\frac{I_e}{T^2}\sim\frac{1}{T}$图上，由直线斜率即可求出$\phi$



7. 发射电流I_e的测量

为消除空间电荷对后续电子的阻碍，需要外加电场E_a。E_a的存在产生肖基效应，此时有

$$I_e' = I_e\cdot e^{\frac{4.39\sqrt{E_a}}{T}},\quad \lg I_e' = \lg I_e + \frac{4.39}{2.303T}\sqrt{E_a}$$

式中，I_e' I_e分别为在加速场E_a及$E_a=0$时的发射电流。

把阳极作成圆柱形，并与阴极共轴，并忽略接触电位差，有

$$\lg I_e' = \lg I_e + \frac{4.39}{2.303T}\frac{1}{\sqrt{r_1 I_n(r_2/r_1)}}\sqrt{U_a}$$

在$\lg I_e'\sim\sqrt{U_a}$图上，由截距$\lg I_e$即可得I_e

8. 温度T的测量

本实验通过测量阴极加热电流来确定阴极温度。

$I_1 = \frac{I_f}{cd_k^{1.5}}$，$I_f$为阴极加热电流，$d_k$为阴极钨丝直径。

I_1与阴极温度的关系由表查出。

三. 实验仪器

数字电压表（量程200mV）；恒压恒流的双路电源；电流表（量程1A）；

清 华 大 学 实 验 报 告

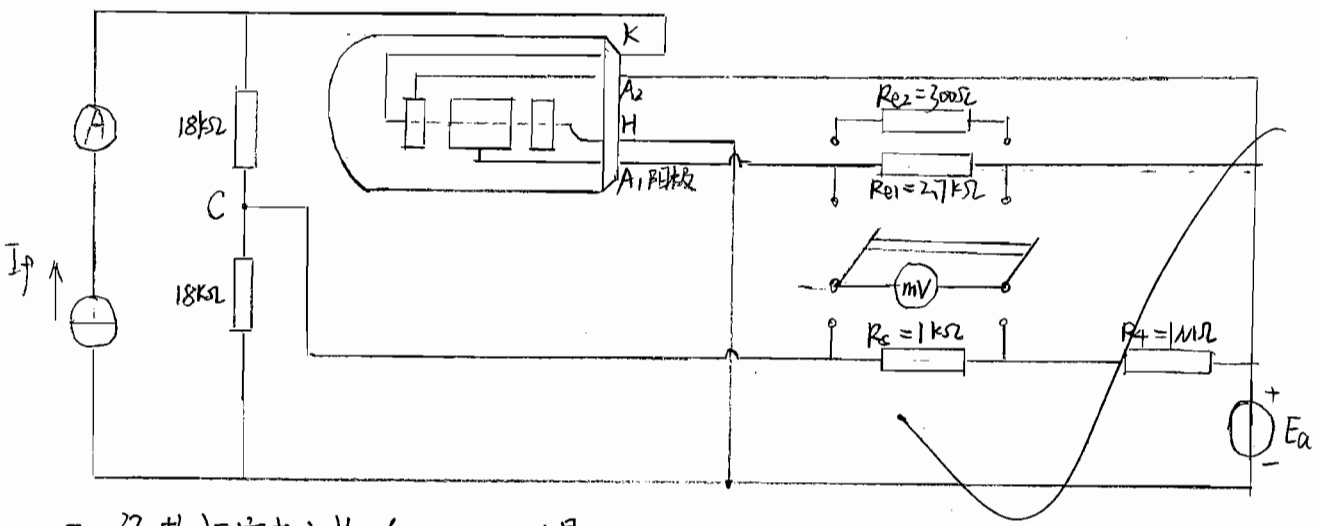
系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

实验板2（2.7kΩ 300Ω电阻，换向开关，1kΩ 1MΩ电阻）

四. 实验任务

1. 根据二极管结构和测量I_e的原理，设计完整的实验线路图



2. 经老师审查合格后，开始测量

打开电源和数字电压表，旋转恒流电源旋钮，同时观察电流表读数，电流表读数（I_f）分别为0.500A，0.540A，0.580A，0.620A，0.660A，0.700A。在I_f上述各值时，测量不同U_a下的U_e'值，具体做法：

①调节I_f为指定值，稳定2~3min；

②转向开关扳到R_5，调节恒压电源旋钮，使数字电压表读数约为36V；转开关扳到R_{e1}端，记录数字电压表示值；

③重复上步，快速测量出$U_a=36, 49, 64, 81, 100, 121, 144$V时的$U_e'$值。

3. 使用计算机或计算器进行线性拟合，计算ϕ值（4.4~4.9eV）

五. 数据处理

1. 实验室给出灯丝电流I_f与温度T的关系：

I_f/A	0.500	0.550	0.600	0.650	0.700	0.750
T/K	1726	1809	1901	1975	2059	2136

使用线性内插法，可计算出I_f对应的T如下表

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

I_F/A	0.502	0.539	0.580	0.621	0.661	0.702
T/K	1729.32	1790.74	1864.20	1932.08	1993.48	2062.08

2. Excel 拟合处理

①对不同温度下的 $\lg V_e' \sim \sqrt{V_a}$ 拟合

相关参数整理如下

I_F/A	T/K	截距 $\lg V_e$	斜率	r	V_a/V	$\frac{V_e}{T^2}$
0.502	1729.32	0.7462	0.0059	0.9990	5.574	1.864×10^{-6}
0.539	1790.74	1.2754	0.0056	0.9993	18.854	5.879×10^{-6}
0.580	1864.20	1.7844	0.0051	0.9989	60.870	1.752×10^{-5}
0.621	1932.08	2.2460	0.0049	0.9983	176.198	4.720×10^{-5}
0.661	1993.48	2.6584	0.0047	0.9986	455.467	1.146×10^{-4}
0.702	2062.08	3.0434	0.0045	0.9999	1105.096	2.599×10^{-4}

②对 $\lg\frac{V_e}{T^2} \sim \frac{1}{T}$ 进行线性拟合

$\frac{1}{T}/K^{-1}$	4.849×10^{-4}	5.176×10^{-4}	5.364×10^{-4}	5.584×10^{-4}	5.788×10^{-4}
$\lg\frac{V_e}{T^2}$	-3.585	-3.941	-4.326	-4.757	-5.231	-5.730

拟合得 $\lg\frac{V_e}{T^2} = -2290.8\frac{1}{T} + 7.5362$

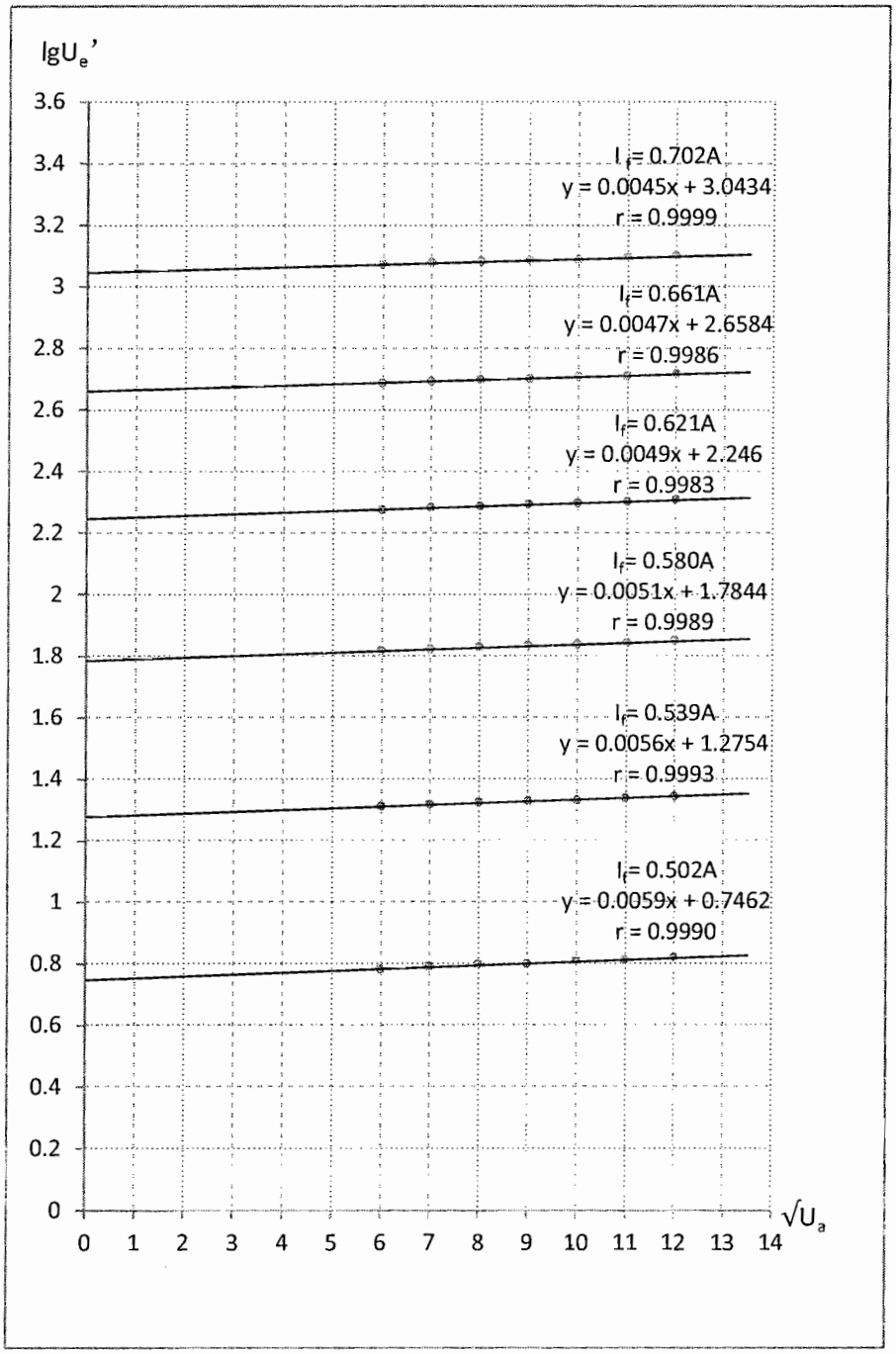
$r = 0.9998$

③计算 ϕ

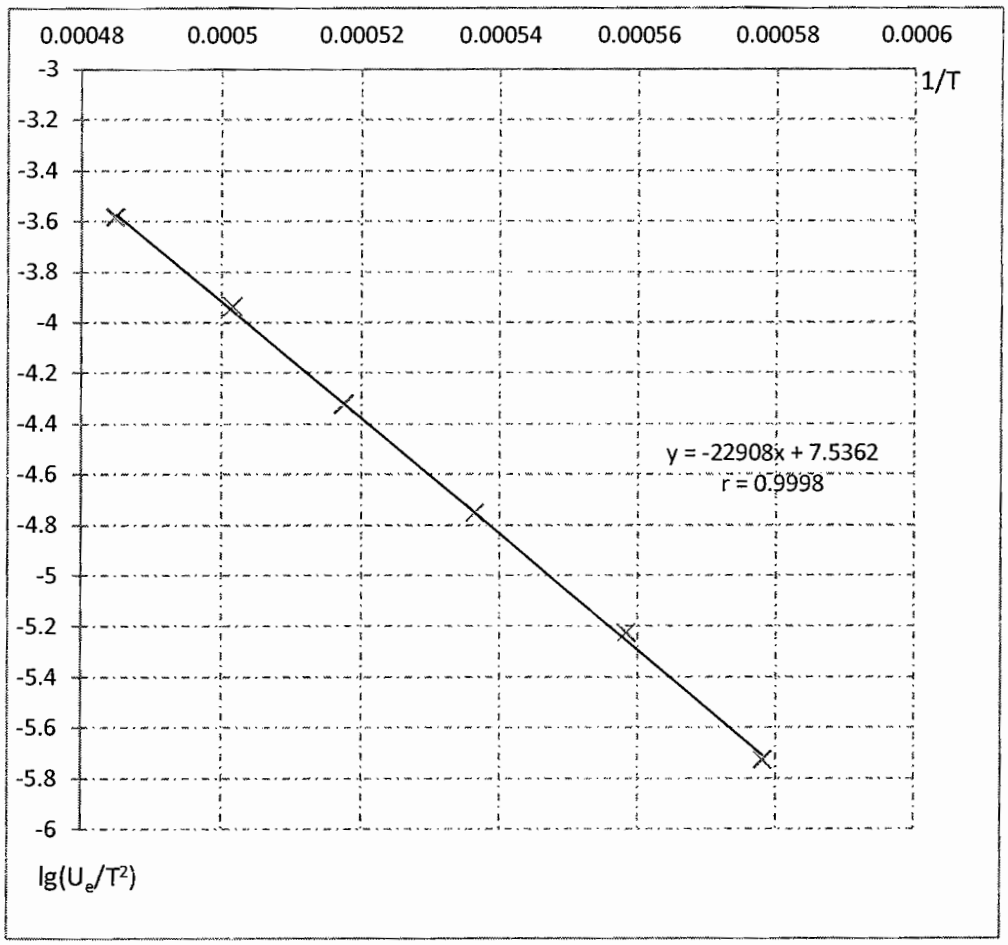
$\because \lg\frac{I_P}{T^2} = \lg AS - 5.039\times10^{-2}\frac{\phi}{T}$

$\therefore \lg\frac{V_e}{T^2} = \lg\frac{I_P R}{T^2} = \lg\frac{I_P}{T^2} + \lg R = \lg AS - 5.039\times10^{-2}\frac{\phi}{T}$

而 $\lg\frac{V_e}{T^2} \sim \frac{1}{T}$ 的直线斜率 $k = -5039\phi$



不同温度下 lgU$_e$'与√U$_a$ 的拟合曲线



$lg(U_e/T^2)$与 1/T 的拟合曲线

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名 _____ ）

作实验日期 年 月 日 教师评定

$\therefore \phi = -\frac{k}{5039} = -\frac{22908}{5039} = 4.546\ V$

$\therefore$ 逸出功 $W = e\phi = 4.546\ eV$

3. 半对数坐标纸作图

①分别作阴极加热电流 $I_f = 0.502, 0.539, 0.580, 0.621, 0.661, 0.702\ A$ 时的 $U_e' \sim U_a$

②将6组直线外推至 $U_a = 0$，此时的 U_e' 即为 U_e

I_f/A	T/K	U_e/V	$\frac{U_e}{T^2}(\times 10^{-6})$	$\frac{1}{T}/(\times 10^{-4} K^{-1})$
0.502	1729.32	5.5	1.839	5.783
0.539	1790.74	18.2	5.676	5.584
0.580	1864.20	59.1	17.006	5.364
0.621	1932.08	173	46.344	5.176
0.661	1993.48	458	115.250	5.016
0.702	2062.08	1107	258.691	4.849

③在对数坐标纸上作出 $\frac{U_e}{T^2} \sim \frac{1}{T}$ 图

在所得直线上取两点 $(4.824\times10^{-4}, 300\times10^{-6})$ 与 $(5.857\times10^{-4}, 1.3\times10^{-6})$

则 $-5039\phi = \frac{\lg(1.3\times10^{-6}) - \lg(300\times10^{-6})}{5.857\times10^{-4} - 4.824\times10^{-4}} = -22876.84$

$\therefore \phi = -\frac{22876.84}{-5039} = 4.540V$，$W = e\phi = 4.540eV$

4. 比较两种处理方法

	计算机拟合	作图法
结果	$\phi = 4.546\ V$ $W = 4.546\ eV$	$W\phi = 4.540V$ $W = 4.546eV$
特点	(1)方法严密，数据处理准确 (2)可对计算结果进行统计	(1)简单直观 (2)可发现某些明显偏离直线

清华大学实验报告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

六、误差分析

理论上给出的钨的逸出功为4.54eV，与本次实验最终拟合出的W=4.54非常吻合。但在测量读数的过程中，以及后续处理的思考中，我还是发现不少会造成误差的因素，按影响从大到小总结为三条：

1. 在最终的线性拟合 $\lg\frac{U_{ec}}{T} \sim \frac{1}{T}$ 中，温度T占了很大的影响地位，而灯丝的流T对温度T影响很大，改变0.01A就会变化1.2度，从而对拟合出的斜率产影响。虽然本次实验所用的恒流源稳定性还不错，没有出现过同一状态下测 $U_e' \sim U_a$ 前后示数发生变化的情况，但是它的显示最小精度就是0.01A，我们不保证它不会出现0.01A以下的变化。

2. 在测量时我就发现了 U_a 与 U_e' 的示数不稳定，其中 U_a 还好，波动在±0.02V U_e' 当 $\frac{U_a}{T}$ 较大了后（尤其是 ~~U_a=1.1V和1.4V~~ $T=0.702A$ 时），U_e' 的波动比较大，一般要改变一次 U_a，都要等待1分钟左右示数才能相对稳定。但是在处理数据时，我发现 U_a 与 U_e' 对结果的响并不大，U_a 取根号和 U_e' 取对数后，不确定度立马缩小了很多，在后续的处理中，们只需用到拟合到的截距 $\lg U_e$，所以它们产生的误差是要小于T的。

3. 实验仪器本身会存在一定系统误差，比如电子仪器的温漂现象、钨丝中不同位置表面状况、纯度不同，会有逸出功小的部分先发射电子等等。

七、思考题

1. T系统误差修正的必要性

答：不需要，两个18kΩ电阻串联，其阻值远大于灯丝电阻，流经该支路的电流于电流表的仪器误差，电流表示值可视为T。

2. U_a 系统误差修正的必要性

答：不需要，本实验的电路中，$R_0/R_5=1000$，这是一个非常巧妙的设计，U_a 量的系统误差仅为加速电压恒压源的千分之一，完全可以忽略不计。

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

3. U_e' 是否要化成 I_e' 再进行数据处理？

答：不需要

$$\lg I_{P2} = \lg(AS) - \frac{1}{2.303}\frac{e_0\alpha}{kT}$$，其中 $I_e = \frac{U_e}{R}$

则 $\lg \frac{U_{P2}}{R} = \lg R + \lg(AS) - \frac{1}{2.303}\frac{e_0\alpha}{kT}$

我们所求的是斜率而不是截距，$\lg R$ 为无关量，所以直接用 $\lg U_{P2}'$ 进行拟合就行。

八. 实验感想

本次实验是大二大物实验里的最后一次实验，总体上还是很顺利愉快的。在预习时我就惊叹于此次实验设计的巧妙性与集成性，用如有限的仪器就测精确地测出了钨的逸出功这一精确量，在后续的数据处理中更是体会到了里查逊直线法的巧妙。

不得不说，这是一次很充实的实验，不仅更加熟练地掌握了用 Excel 处理若干系列数的技巧，还见识到了充满了智慧的设计性实验。

感谢孙老师的悉心指导。

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 [illegible] （同组姓名 _____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

测电流倍率	I_e/A	T/K	V_a/V: 36.00	49.00	64.00	81.00	100.00	121.00	144.00
			$\sqrt{V_a}$: 6.00	7.00	8.00	9.00	10.00	11.00	12.00
×1	0.502	1729.32	6.04	6.14	6.23	6.30	6.39	6.47	6.58
×1	0.539 0.540	1790.74	20.33	20.65	20.89	21.18	21.42	21.69	21.99
×1	0.580	1854.2	65.27	66.20	67.02	67.77	68.42	69.31	70.22
×10	0.621	1932.08	18.82	19.10	19.34	19.52	19.73	19.95	20.19
×10	0.661	1993.48	48.48	49.14	49.71	50.16	50.69	51.19	51.80
×10	0.702	2062.08	117.63	118.89	120.16	121.36	122.68	123.90	125.28

$\lg I_e$	$\lg \frac{I_e}{T^2}$	$\lg I_e$	$\lg \frac{I_e}{T^2}$
-0.00552	-6.4813	-2.685	-9.161
-0.0018	-6.5079	-2.513	-9.019
-0.00606	-6.5470	-2.002	-8.543
-0.01533	-6.5879	-1.557	-8.129
-0.05178	-6.6510	-1.141	-7.740
-0.24965	-6.8783	-0.769	-7.398

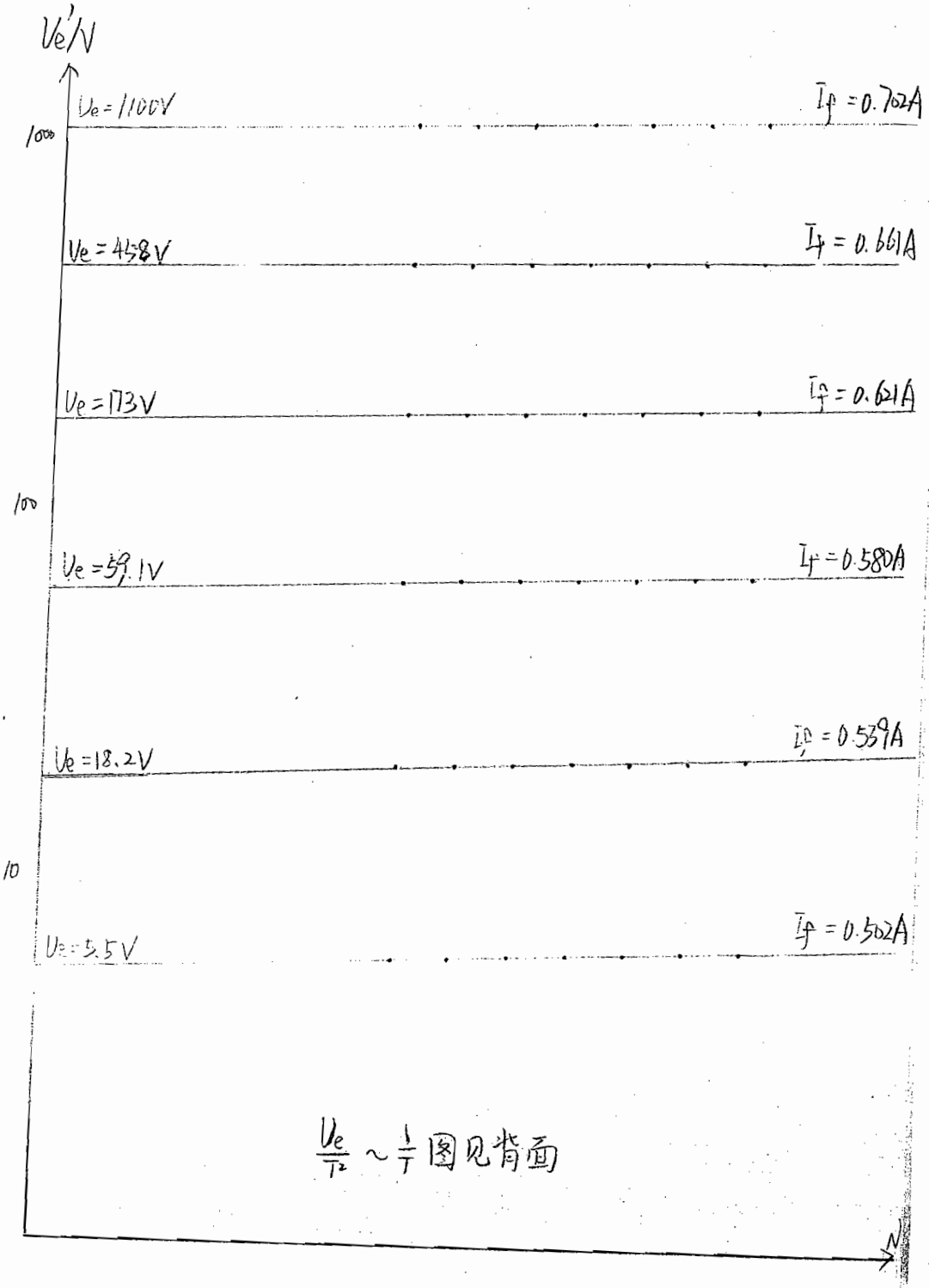
$\lg Y = 2135.7X - 7.7049$, $R^2 = 0.9584$

$\phi = \frac{2135.7}{5.039 \times 10^3}$

$Y = 2224.2X + 3.3992$, $R^2 = 0.99131$

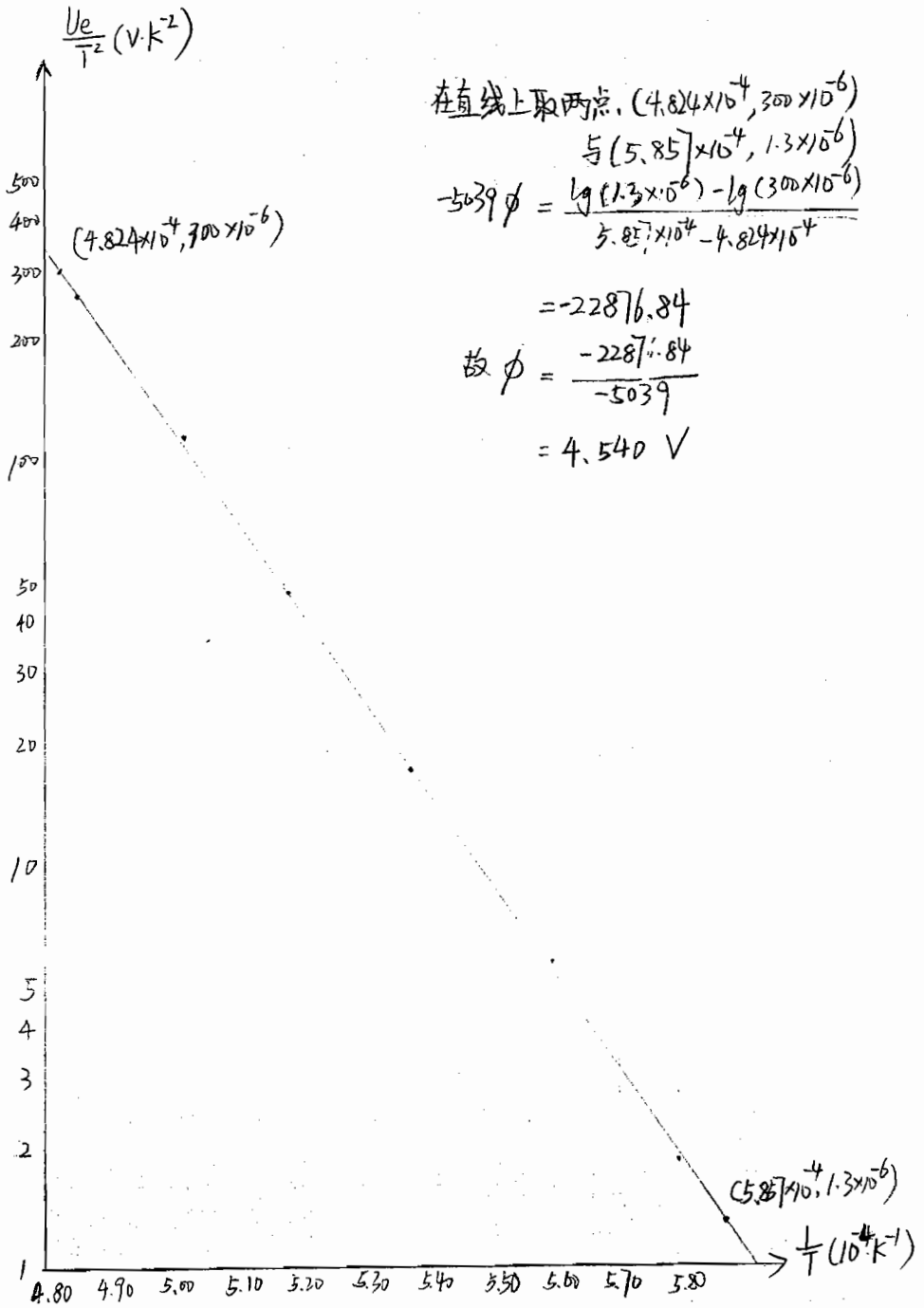
$\phi = \frac{2224.2}{5.039 \times 10^3} = 4.415$

不同温度下 U_e'~$\sqrt{U_a}$ 图



$\frac{U_e}{T^2}$~$\frac{1}{T}$ 图见背面

$\frac{U_e}{T^2} \sim \frac{1}{T}$ 图



在直线上取两点，$(4.824\times10^{-4}, 300\times10^{-6})$ 与 $(5.85\times10^{-4}, 1.3\times10^{-6})$

$$-5039\phi = \frac{\lg(1.3\times10^{-6}) - \lg(300\times10^{-6})}{5.85\times10^{-4} - 4.824\times10^{-4}}$$

$$= -22876.84$$

故 $$\phi = \frac{-22876.84}{-5039}$$

$$= 4.540\ V$$

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

9+

非线性电路的混沌现象

精仪11
耿 强
2011010492

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

一. 实验目的

本实验研究一个简单的非线性电路，分析其电路特性和产生周期与非周期振荡的条件，从而对电路中混沌现象的基本性质和混沌产生的方法有初步了解。

二. 实验原理

1. 非线性电路方程.

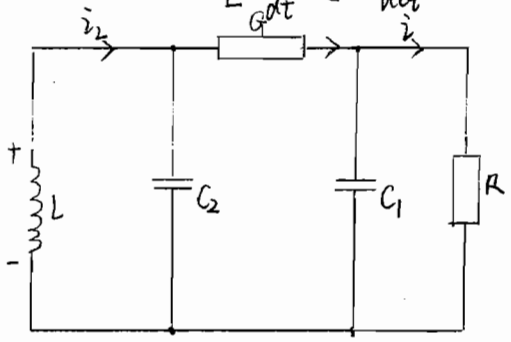
一个简单的典型非线性电路如图一所示，它又称蔡氏电路，即三阶互易非线性自治电路，其中唯一的非线性元件是电阻R，其特性为分段线性，且呈现负阻性，如图二所示。L和C_2组成无损耗振荡电路作为振荡源。耦合电阻G_1(实际上是电导)呈现正阻性，它将振荡电路与非线性电阻R和电容C_1组成的电路耦合起来并且消耗能量，以防止由于非线性电路的负阻效应使电路中的电压、电流不断增大。

电路的状态方程式(即电路中节点或支路的电流、电压关系式)为

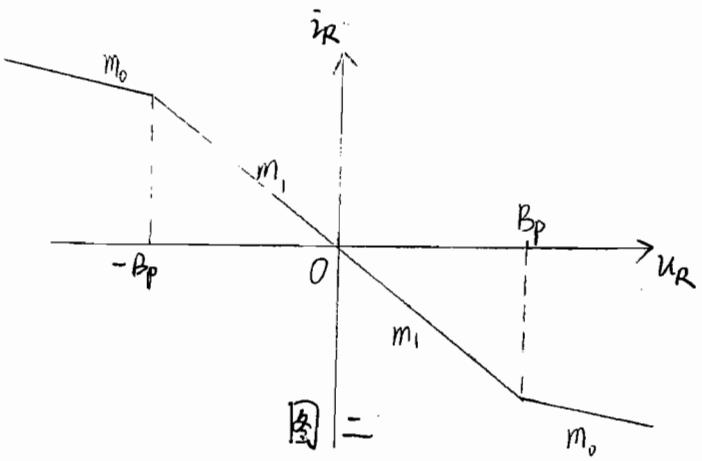
$$C_1\frac{dU_{C1}}{dt} = G_1(U_{C2}-U_{C1}) - g(U_{C1})$$

$$C_2\frac{dU_{C2}}{dt} = G_1(U_{C1}-U_{C2}) + i_2$$

$$L\frac{di_2}{dt} = -U_{C1}$$



图一



图二

其中g是R的电导，U_{C1}、U_{C2}分别为C_1、C_2上的电压，函数$g(U_{C1})$是非线性电阻R的特征函数，它的分段表达式为

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

$$g(u_{C1}) = \begin{cases} m_0 u_{C1} + (m_1 - m_0) B_p & , u_{C1} \geq B_p \\ m_1 u_{C1} & |u_{C1}| \leq B_p \\ m_0 u_{C1} - (m_1 - m_0) B_p & , u_{C1} \leq -B_p \end{cases}$$

设 $x = \frac{u_{C1}}{B_p}$ ，$y = \frac{u_{C2}}{B_p}$ ，$z = \frac{i_L}{B_p G}$ ，因为 $g(u_{C1})$ 是逐段线性函数，故相空间 (x, y, z) 分为三个子空间：

$$D_1 = \{(x, y, z) \mid x \geq 1\}$$

$$D_0 = \{(x, y, z) \mid |x| \leq 1\}$$

$$D_{-1} = \{(x, y, z) \mid x \leq -1\}$$

每个区域内状态方程呈线性，而且各具有一个平衡点：

$$P^+ = (k, 0, -k) \in D_1$$

$$\theta = (0, 0, 0) \in D_0$$

$$P^- = (-k, 0, k) \in D_{-1}$$

2. 非线性电阻R的特性

非线性元件是产生混沌现象的必要条件，图一的电路只有一个非线性元件，即负阻R，其特性见图二，数学表达式为：

$$g(u_{C1}) = m_0 u_{C1} + \frac{1}{2}(m_1 - m_0)|u_{C1} + B_p| + \frac{1}{2}(m_0 - m_1)|u_{C1} - B_p|$$

实验中用于产生非线性电阻的方法很多，如单结晶体管，变容二极管以及运算放大电路等。本实验采用图三中所示的一个运算放大电路作为产生非线性元件的电路，其伏安特性如图四所示。

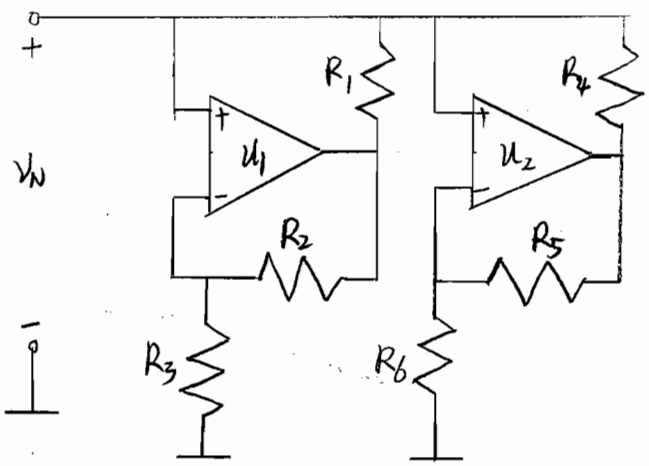


图 三

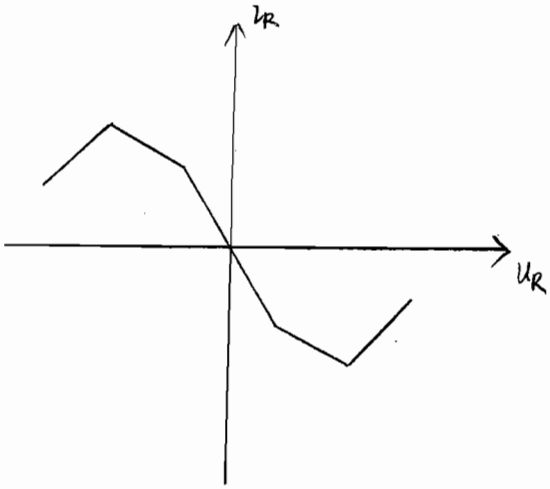


图 四

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名 _____ ）

作实验日期 年 月 日 教师评定

$$g(u_{c1}) = \begin{cases} m_0 u_{c1} + (m_1 - m_0) B_p, & u_{c1} \geq B_p \\ m_1 u_{c1}, & |u_{c1}| \leq B_p \\ m_0 u_{c1} - (m_1 - m_0) B_p, & u_{c1} \leq -B_p \end{cases}$$

设 $x = \frac{u_{c1}}{B_p}$，$y = \frac{u_{c1}}{B_p}$，$z = \frac{i_L}{B_p G}$，因为 $g(u_{c1})$ 是逐段线性函数，故相空间 $D(x,y,z)$ 分为三个子空间：

$$D_1 = \{(x,y,z) | x \geq 1\}$$

$$D_0 = \{(x,y,z) | |x| \leq 1\}$$

$$D_1 = \{(x,y,z) | x \leq -1\}$$

蔡氏电路在一定条件下，呈现出两个无限多次循环的层状结构以螺旋形式相互卷在一起，称为双旋结构，具有双旋结构的吸引子称为双旋吸引子。本实验研究蔡氏电路从稳态进入混沌状态的过程，即从单调振荡过渡到双旋吸引子的过程。只要改变电路的 G、L、C 其中一个元件的参数，电路即可通过倍周期分岔等过程进入双旋吸引子的混沌态，它是蔡氏电路进入混沌状态的主要依据。

三. 实 验 仪 器

1. 双路稳压电源（混沌电路中放大器电源）DH1718D-2，0-30V，0-2A

2. 双踪示波器

3. 非线性混沌电路板及元件，电路参数如下：$L = 22mH$，$C_1 = 10nF$；$C_2 = 100nF$，$1/G = 1.5 \sim 2k\Omega$，R_L 0～2200Ω，测量 i_L 的采样电位器

4. 信号发生器 DF1643，0～1MHz

四. 实 验 内 容

1. 练习使用稳压电源，数字表、插件板等仪器；学习实验室混沌课件，熟悉混沌的相关知识：

(1) 非线性电阻伏安特性的测量（外接电源 ±15V 不能互换，否则会烧毁组件），用两块万用表分别测量电压和电流，电压表量程根据实验数值自行确定，给电路图标出测量时电表极性，自拟表格记录实验数据

清 华 大 学 实 验 报 告

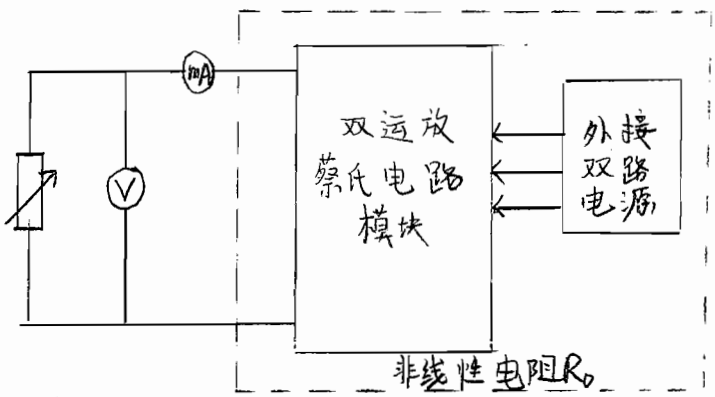
系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

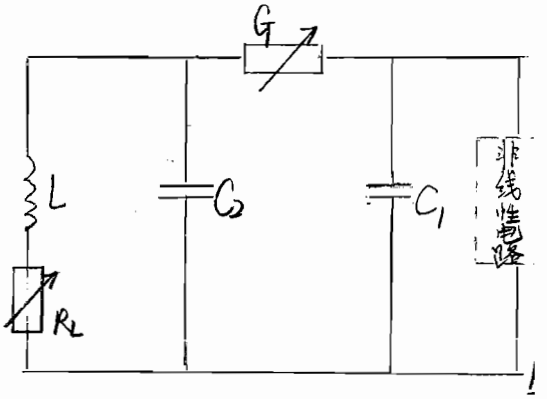
作实验日期 年 月 日 教师评定

要求实验数据分布均匀合理。课后绘制非线性电阻的伏安特性曲线，各段数据分别进行直线拟合。

(2)实验电路按图三接线，R_L调零后，缓慢调节G电位器，观察V_{C_1}.V_{C_2}的相图和波形(x-y方式，y-t方式)，记录产生单周期P、2倍周期2P、4倍周期4P…混沌…3周期3P…单涡旋…双涡旋时G的数值和简单波形图。

4.研究采样电阻R_L对相图结构的影响





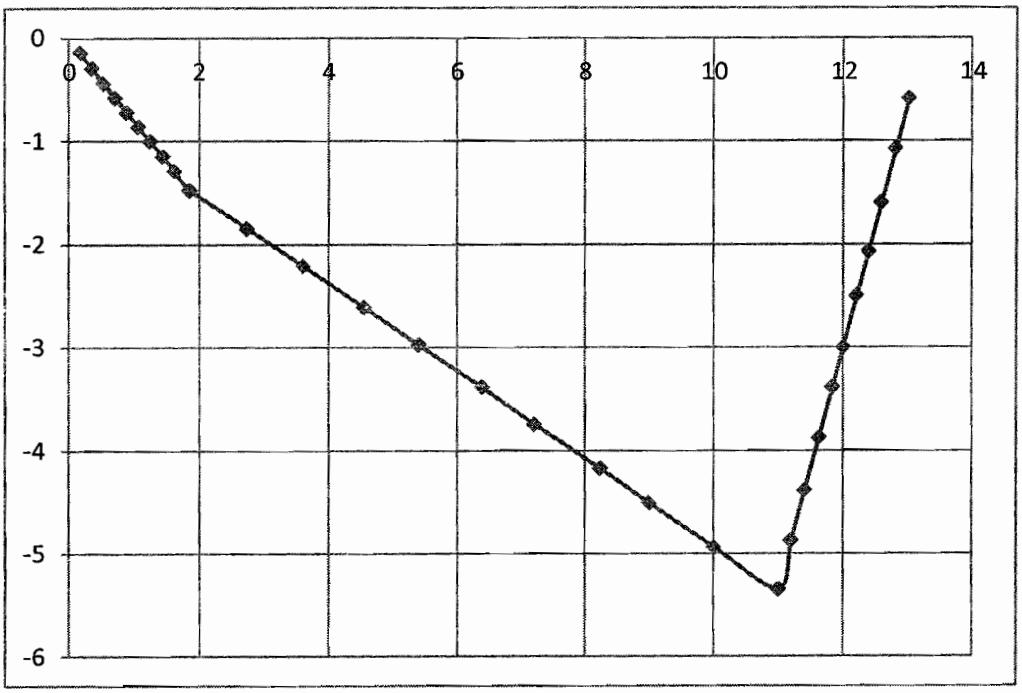
五.数据处理

1. 双运放电路的伏安特性

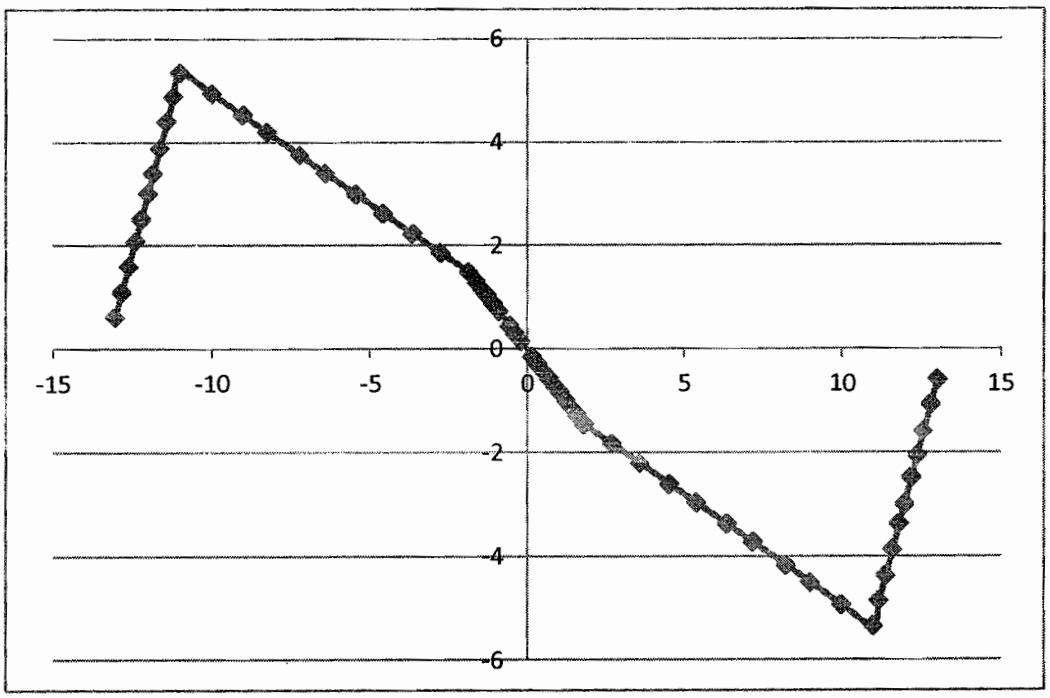
U/V	0.181	0.359	0.539	0.720	0.898	1.079	1.261	1.442	1.625	1.863
I/mA	-0.147	-0.298	-0.444	-0.585	-0.723	-0.865	-1.006	-1.148	-1.289	-1.473

U/V	2.746	3.614	4.568	5.409	6.394	7.215	8.254	9.012	10.001	10.999
I/mA	-1.846	-2.214	-2.614	-2.978	-3.389	-3.745	-4.180	-4.513	-4.936	-5.346

U/V	11.201	11.407	11.626	11.838	12.002	12.220	12.404	12.606	12.830	13.037
I/mA	-4.875	-4.392	-3.880	-3.386	-3.004	-2.497	-2.069	-1.598	-1.080	-0.597



实验 U-I 曲线



双运放电路的伏安特性

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

对电压处在 0~1.8V，1.8~11.0V、11.0~13.0V 这三段的点，分别进行拟合得

0~1.8V: $I=-0.7847U-0.0157$, $r^2=0.9999$

1.8~11.0V: $I=-0.4251U-0.6763$, $r^2=1$

11.0~13.0V: $I=2.3289U-30.957$, $r^2=1$

转折点为：(1.8370, -1.4572)

和 (10.9952, -5.3503)

关于原点对称后，可得到非线性电阻完整的伏安特性曲线

2. 相图观察

通过调节 G，可依次观察到 1P→2P→4P→混沌→3P→单漩→双漩

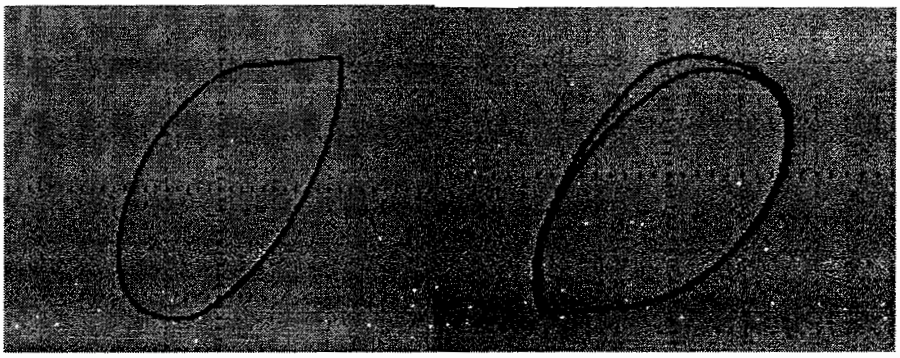
	$\frac{1}{G}$/KΩ
单周期 P	1.9091
双周期 2P	1.9041
四周期 4P	1.9030
混 沌	1.9018
三周期 3P	1.8989
单 漩	1.8928
双 漩	1.8662

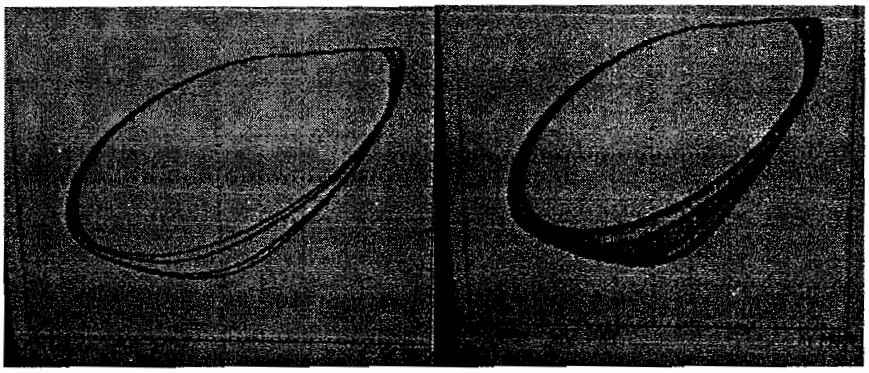
误差分析：

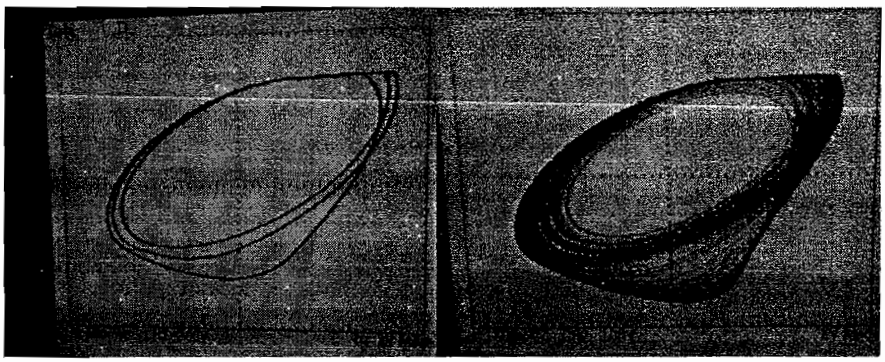
1. 测量非线性电阻的伏安特性时，并未考虑电流表的内阻，且用万用表电流档的不同量程具有不同内阻。如果要更加准确，可以对电压作修正。

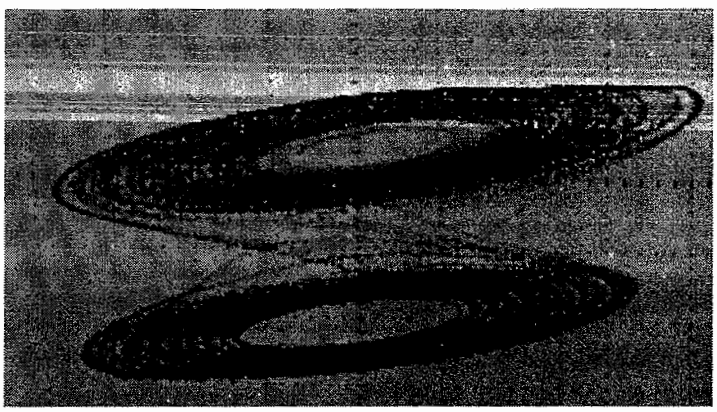
2. 电子仪器普遍存在温漂现象，但影响较小，可以忽略不计。

3. 观察混沌、单漩、双漩现象，这些现象存在于一个区间，所得到的只是该范围内的一个值。









清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

六. 思考题

研究迭代方程 $x_{n+1}=kx_n^2-1$，叠代次数 n（n>100）比较大时的结果所表达的特征：

1. 设 $k=2$，研究 x 的初始值略有不同时对最终值的影响：

① $x=0.54321$ ② $x=0.54322$

2. 研究 k 对结果的影响：

① $0<k<0.75$ ② $0.75<k<1.25$

③ $k=1.310$ ④ $k=1.4011$

研究的方程 $x_{n+1}=kx_n^2-1$ 与课本上许多资料上的方程 $x_{n+1}=1-kx_n^2$ 形式上不同，但其实是一样的。

考虑，数列 $\{y_n\}$，$\forall n$ 有 $y_n=-x_n$ 时，则 $y_{n+1}=-x_{n+1}=-(kx_n^2-1)=1-kx_n^2=1-ky_n^2$

即 $y_{n+1}=1-ky_n^2$

也就是说，只要将 $\{x_n\}$ 中每一项都加上一个负号，便可以拿到许多资料里所研究的典型的虫口方程。所以，很容易地可以把 $x_{n+1}=1-kx_n^2$ 已有的结论和研究方法搬过来。

对任意的抛物线方程 $y=ax^2+bx+c=a(x+h)^2+C_0$，对应的迭代方程 $x_{n+1}=ax_n^2+bx_n+c$ 总可以通过线性变换化为 $x_{n+1}=1-kx_n^2$ 的形式

$$x_{n+1}=ax_n^2+bx_n+c=a(x_n+h)^2+C_0$$

$$\frac{x_{n+1}+h}{C_0+h}=\frac{a}{C_0+h}(x_n+h)^2+1=a(C_0+h)\left(\frac{x_n+h}{C_0+h}\right)^2+1$$

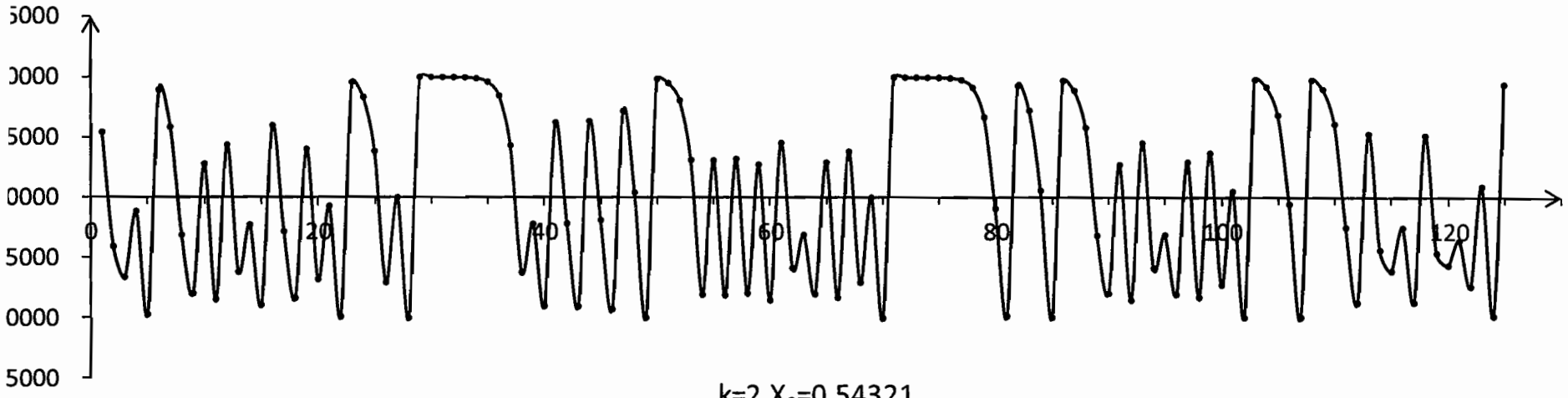
$$=1-(-a)(C_0+h)\left(\frac{x_n+h}{C_0+h}\right)^2$$

令 $y_n=\frac{x_n+h}{C_0+h}$ 线性变换

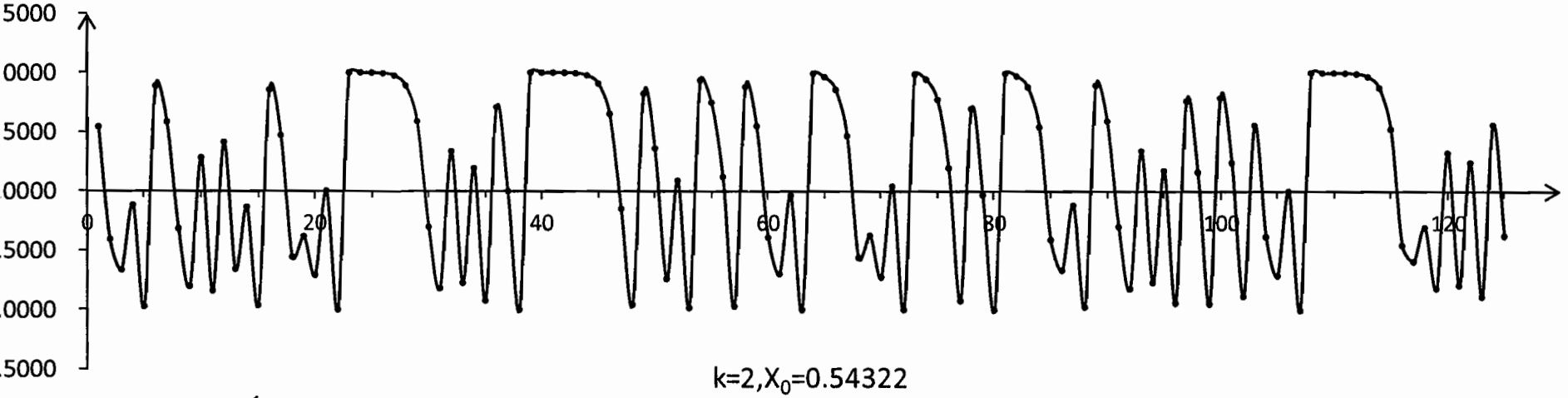
$$y_{n+1}=1-(-a)(C_0+h)\cdot y_n^2$$

$$=1-ky_n^2 \text{，其中 } k=(-a)(C_0+h)$$

所以说，迭代方程 $x_{n+1}=ax_n^2+bx_n+c$ 与 $x_{n+1}=1-kx_n^2$ 本质上是一样的，本次实验是电路的混沌现象，而迭代方程是数学方面的混沌现象。



$k=2, X_0=0.54321$



$k=2, X_0=0.54322$

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

1. 由图可见，$k=2$ 时，即使 x 的初值只有 0.0001 的差值，所得的数列也几乎完全不同。这体现了混沌状态下的初值敏感性

2. 研究 k 的影响：

$x_{n+1}=kx_n^2-1$，用纵坐标表示数列 $\{x_n\}$ 的值，以横坐标表示参量 k，对每一个固定的参量 k，取一个迭代初值，开始迭代，为了不画过渡过程，舍去最初的 800 个迭代值，再把后继的 200 个迭代值都画到对应的所选参量的纵方向，这样扫过全部参量范围，便得到了倍周期分岔图。

代码：

```
x(1) = 0.5432;
hold on;
for k= 0:0.002:2
    for i=1:1000
        x(i+1) = k* x(i)* x(i)-1
        if(i+1) > 800%
            plot (k, x(i+1);'k');
        end;
    end;
end;
```

由图可知，当 $0<k<0.75$ 时，每个参量只对应一个值，这是不动点；

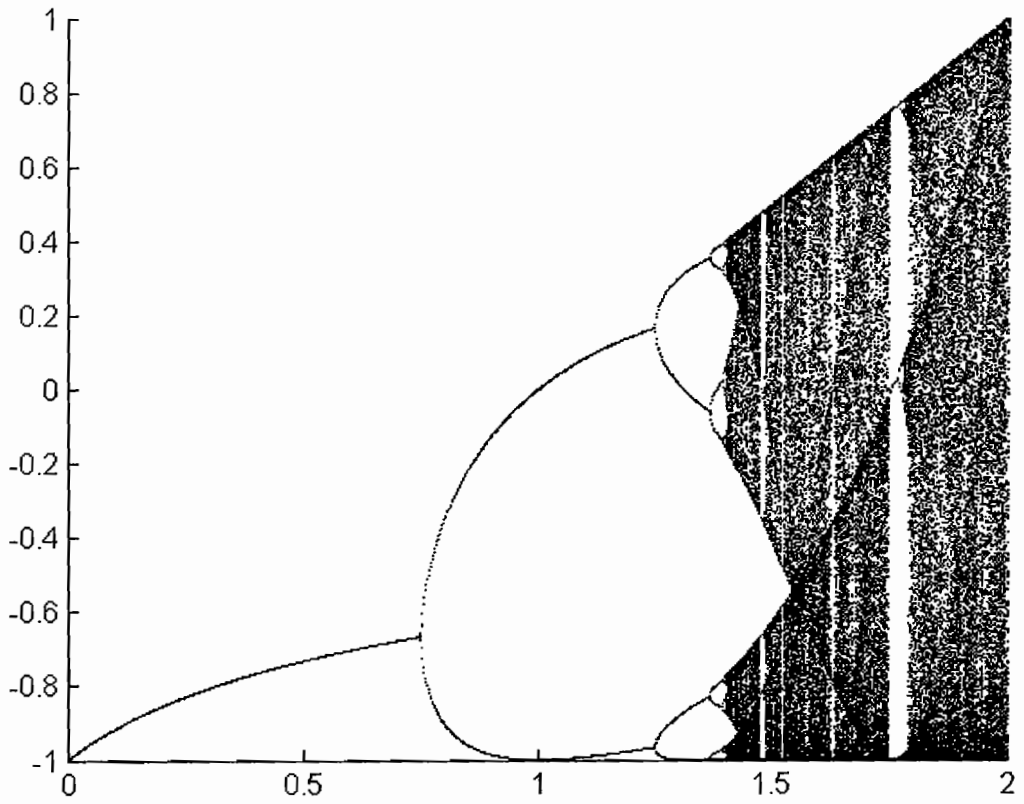
$k=0.75$ 处发生第一次分岔，变为周期 2，分岔图中一个点分为上下交替的两个点；

$0.75<k<1.25$ 为周期 2 的情况；

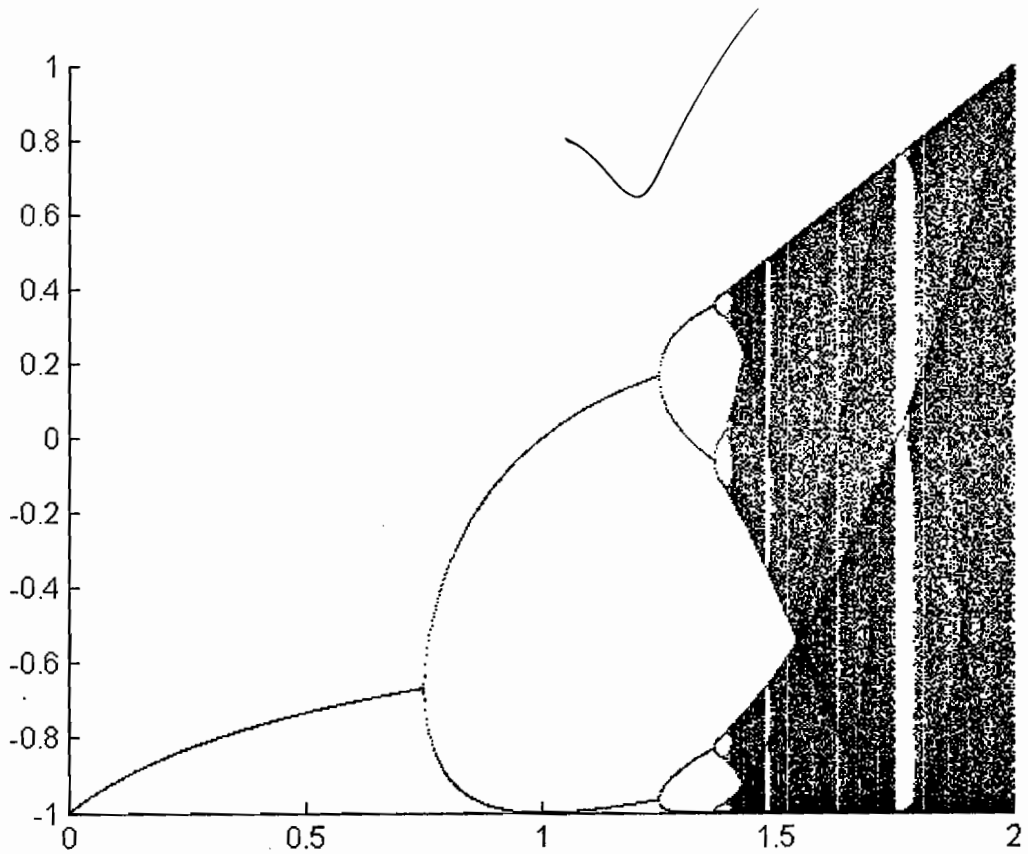
$k=1.25$ 处发生第二次分岔，周期 2 轨道失稳，产生稳定的周期 4 轨道。

$1.25<k<1.368$ 为周期 4 的情况，稳定范围变窄；

由周期 2^n 到周期 2^{n+1} 的分岔过程，稳定范围越来越窄，最终在 $k_\infty=1.4011\ldots$ 处周期达到无穷大。于是，从 $k=0$ 到 $k=k_\infty$ 存在一个倍周期分岔序列，其周期为



初值为 0.54321 的倍周期分岔图



初值为 0.20000 的倍周期分岔图

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

$1 \to 2 \to 4 \to 8 \to 16 \to \cdots \to 2^n \to \cdots +\infty$

更改初值为0.300000，可以得到另一个倍周期分岔图，对比两幅分岔图，发现不同初值下的分岔点相同，在未进入混沌状态前，两图的曲线完全相同，与初值无关。

求分岔图曲线的参数方程：

①若已知 $0<k<0.75$ 为周期1的情况

设 $a=\lim\limits_{n\to\infty} x_n$，对 $x_{n+1}=kx_n^2-1$ 两边取极限，可得 $a=ka^2-1$，即 $ka^2-a-1=0$

$a_1=\frac{1-\sqrt{1+4k}}{2k}$（稳定）；$a_2=\frac{1+\sqrt{1+4k}}{2k}$（不稳定）

当 $a=\frac{1+\sqrt{1+4k}}{2k}$ 时，$a=\frac{1+\sqrt{1+4k}}{2k}>\frac{1+\sqrt{1+0}}{2k}=\frac{1}{k}$，即 $ka>1$

令 $\{\varepsilon_n\}$ 满足 $\varepsilon_n=x_n-a$，则 $a+\varepsilon_{n+1}=k(a+\varepsilon_n)^2-1$

$$a+\varepsilon_{n+1}=k(a^2+2a\varepsilon_n+\varepsilon_n^2)-1$$

又由于 $a=ka^2-1$，故 $\varepsilon_{n+1}=2ak\varepsilon_n+k\varepsilon_n^2>2ak\varepsilon_n>2\varepsilon_n$

故 $\{\varepsilon_n\}$ 越来越大，x_n 偏离 a 越来越远

所以 $a_2=\frac{1+\sqrt{1+4k}}{2k}$ 不稳定

综上，分岔图上 $a=\frac{1-\sqrt{1+4k}}{2k}$ $(0<k<0.75)$

②若已知 $0.75<k<1.25$ 为周期2的情况

设稳定的周期值为 a_1, a_2

则 $\begin{cases} a_2=ka_1^2-1 \\ a_1=ka_2^2-1 \end{cases}$

即 $a_1=k(ka_1^2-1)^2-1$

令 $f(x)=kx^2-1$，$g(x)=f(f(x))$，则 a_1 为 $g(x)$ 的不动点，

同理，a_2 也为 $g(x)$ 的不动点，

③若已知 $1.25<k<1.3681$ 为周期4的情况

设稳定的周期值为 a_1, a_2, a_3, a_4

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

则 $\begin{cases} a_2 = ka_1^2 - 1 \\ a_3 = ka_2^2 - 1 \\ a_4 = ka_3^2 - 1 \\ a_1 = ka_4^2 - 1 \end{cases}$

联立可得

$$a_1 = k\{k[k(k a_1^2 - 1)^2 - 1]^2 - 1\}^2 - 1$$

令 $f(x) = kx^2 - 1$，$g(x) = f(f(f(f(x))))$

则 a_1 为 $g(x)$ 的不动点，

同理，a_2，a_3，a_4 也为 $g(x)$ 的不动点。

九. 实验感想

这一次的实验极大地拓宽了我的知识面，让我们认识到物理与数学的一个新领域——混沌，它从科学地方面解释了"蝴蝶效应"。当然，更多的影响是对我的科学观念，以前只在量子阶层认识到了不确定性，而实际上这种不确定性与我们生活息息相关，虫子的繁殖一系列现象都体现了这一点。

科学并不是确定的，科学是有规律的，科学也是没有规律的，科学的世界等待我们去发现。

清华大学实验报告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 耿强 （同组姓名 _____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

U/V	I/mA	R/Ω
0.000	-0.022	0
0.181	-0.163	1107
0.359		
~~0.360~~	~~-0.30~~ -0.298	1189.5
0.539	-0.444	1223
0.720	-0.585	
0.898	-0.723	
1.079	-0.865	
1.261	-1.006	
1.442	-1.148	
1.625	-1.289	
1.863	-1.473	
2.746	-1.846	
3.614	-2.214	
5.409	-2.978	
7.215	-3.745	
9.012	-4.513	
10.999	-5.346	
11.201	-4.875	
11.468	-4.392	
12.626	-3.880	
11.838	-3.386	
12.002	-3.004	
12.220	-2.497	
12.404	-2.069	
12.606	-1.898	
12.830	-1.080	
13.037	-0.597	

单周期 R = 1924.1Ω

双周期 R = 1919.6Ω

四周期 R = 1904.8Ω

混沌 R = 1901.6Ω

二周期 R = 1900.9Ω

单滴 R = 1896.3Ω

双滴 R = 1887.1Ω

申丁35

2013.5.27晚

1号

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 精仪 班号 11 姓名 耿强 （同组姓名 ）

作实验日期 2012年 11 月 12 日 教师评定

灵敏电流计

精仪 11
耿 强
2011010492

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定 9-

一. 实 验 目 的

1. 了解检流计的工作原理及其线圈的阻尼运动规律。
2. 测量检流计分度值及内阻，学习误差分析的方法。
3. 学习正确使用和保护检流计。

二. 实 验 原 理

1. 检流计的工作原理及其线圈的阻尼运动特性

检流计的基本结构如图3.2.1所示，(a)是正视图，(b)是俯视图。线圈处在水平的径向均匀磁场B中，若通以电流I_g，在磁场作用下它就会产生转动。设线圈的转动惯量为J，它在转动中受到三种力矩

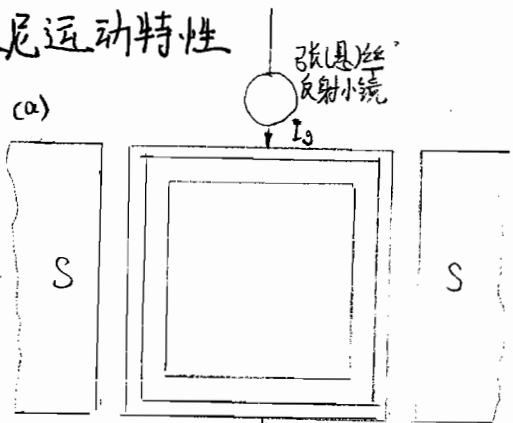


图 3.2.1

(1) 通电线圈在磁场B中所受力矩

$$M_1 = BNSI_g$$

其中N为匝数，S为面积。

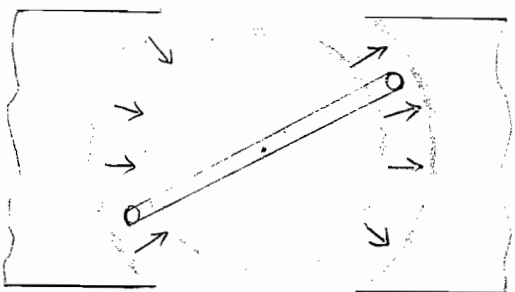
(2) 与线圈偏转角为α的悬丝反抗力矩

$$M_2 = -W\alpha$$，其中W为扭转系数

(3) 阻尼力矩

$$M_3 = -(\rho_1+\rho_2)\cdot\frac{d\alpha}{dt}$$

其中ρ_1为线圈的空气阻尼系数，ρ_2为线圈的电磁阻尼系数，$\rho_2 = \frac{B^2N^2S^2}{R_g+R_2}$



线圈在三种力矩共同作用下的运动方程

$$J\frac{d^2\alpha}{dt^2} + (\rho_1+\rho_2)\frac{d\alpha}{dt} + W\alpha = BNSI_g$$

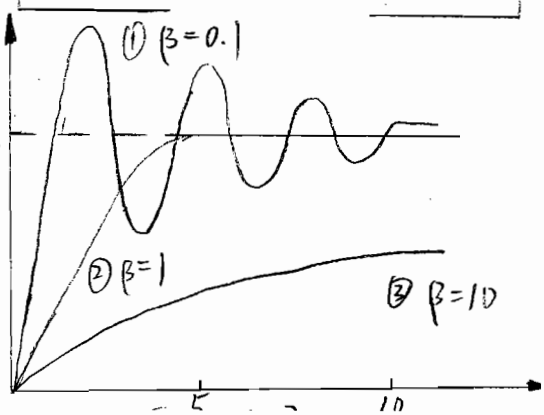
引入参量 $\beta = \frac{\rho_1+\rho_2}{2\sqrt{JW}}$，$\omega_0 = \sqrt{\frac{W}{J}}$，可化为

$$\frac{d^2\alpha}{dt^2} + 2\beta\omega_0\frac{d\alpha}{dt} + \omega_0^2\alpha = \omega_0^2\alpha_s$$

解运动方程得：

(1) 当$\beta < 1$即外电路电阻R_2很大时

$$\alpha = \alpha_s\left[1 - \frac{e^{-\beta\omega_0 t}}{\sqrt{1-\beta^2}}\sin(\sqrt{1-\beta^2}\omega_0 t + \varphi)\right]$$



清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名 _____ ）

作实验日期 年 月 日 教师评定

式中 $\phi = \arctan(\sqrt{1-\beta^2}/\beta)$

此式表明线圈作振荡运动，也叫欠阻尼运动，其运动特性曲线与图3.2.2中曲线①类似。振幅衰减很慢（即β值很小时）对测量是不利的，因为达到平衡的时间太长。

(2) 当β=1时，解为 $\alpha = \alpha_S[1 - e^{-W_0 t}(1+W_0 t)]$

此式表明，线圈作单方向偏转运动，刚好不振荡，可用图3.2.2中曲线②描绘，也叫临界阻尼运动，可以很快达到稳定偏转。此时外电路电阻用R_c表示，R_c为外临界。这种运动测量较为有利，因为它达到平衡的时间短。

(3) 当β>1时，解为

$$\alpha = \alpha_S\left[1 - \frac{e^{-\beta W_0 t}}{\sqrt{\beta^2-1}}\sin\left(\sqrt{\beta^2-1}\,W_0 t + \theta\right)\right]$$

式中 $\theta = \arctan(\sqrt{\beta^2-1}/\beta)$

此式表明这时线圈作单向偏转，曲线类似图3.2.2中的③。此时$R_2 < R_c$，运动称为过阻尼运动。它对测量不利，因为它达到平衡的时间长，且不易判断线圈是否达到平衡。

β=0.8～0.9时是电流计的理想工作状态，达平衡所用时间最短。

2. 测检流计的电流分度值

为测α_S，常用如图3.2.3的装置。从射光筒发出的光经线圈上方的小镜反射后形成带标记线的光斑投射到标尺上，偏转角α_S可用光斑标记线在标尺上的位置读数d表示，由图可知 $d = 2L\alpha_S$

$\therefore C_1 = \frac{I_g}{d} = \frac{W}{2LBNS}$，$C_1$是检流计的电流分度值。

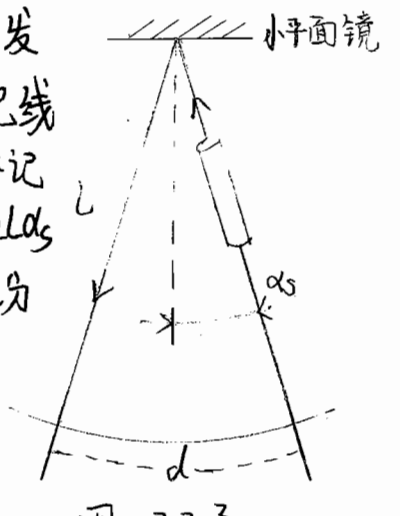


图 3.2.3

测电流分度值的线路如图3.2.4

$$I_g = \frac{U_0}{R_2+R_g} = \frac{U}{(R_1+R_2+R_g) + (R_2+R_g)R_1/R_0}$$

式中U是电压表V的读数。

清华大学实验报告

系别_____ 班号_____ 姓名_____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

3. 测检流计的内阻

(1) 半偏法：

线路与图3.2.4一样，先令$R_2=0$，调节I_g，使电流计偏转为d，然后加大R_2直至电流计的偏转为原来的一半即$d/2$，此时认为R_2近似为R_g。两次测量中U_0不变。但U_0很小，实际测量时监视电压表示值不变，并使它尽量用到满量程。

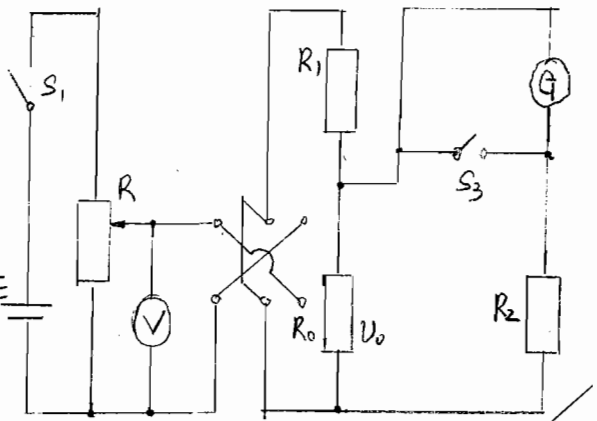


图3.2.4

(2) 全偏法：

仍用图3.2.4的线路。先令$R_2=0$，调R_1使检流计满偏。预置R_2为较值，再减小R_1到原来值的一半，此时逐渐减小R_2到检流计再次满偏这时R_2值即为R_g。测量时仍保持电压表读数不变。

三、实验内容

1. 观察电流计阻尼运动特性

(1) 按图3.2.4接线，注意各级分压电路的安全位置。老师检查接电源。

(2) 通过改变R_2，观察图3.2.2所示的三种阻尼运动并记录现象。逐步改变R_2时找出外临界电阻R_c。

2. 用半偏法和全偏法测定检流计的内阻R_g

半偏法中，要在相同的实验条件下，对R_2测量6次，分析和估计用半法测量的Δ_{R_g}。

3. 测电流分度值C_i

取$R_2=R_c$，使检流计工作在临界阻尼状态，分别测出左右两侧光标在20，40，60分度处的电流分度值，求出平均电流分度值C_i及Δ_{C_i}

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

四. 注意事项

(1) 注意保护检流计悬丝，因剧烈振动或严重过载会损坏悬

①使用检流计时光标偏移不得超出标尺，多分度值档的检流计从灵敏度最低的档用起，逐步提高灵敏度。

②不用时，检流计输入端必须短路。

③少搬动检流计，必须搬动时先检查是否短路，再轻拿轻放。

(2) 经常注意检流计零点有无变化，如有变动，及时调整。调节检流计的机械零点，应在断路时进行。

(3) 注意选取适当外电阻，一般使检流计工作在稍欠阻尼状态或临界阻尼状态。

五. 数据处理

检流计型号 5 编号 5

1. 观察检流计的阻尼运动特性

检流计外临界电阻 $R_c =$ 820.0 Ω

R_2/Ω	阻尼运动的特点，快慢？	光标自最大标转处至最后停在零点处所需时间/s
约 $10R_c$	振荡运动	16.1
约 R_c	单方向摆动	5.4
约 $0.1R_c$	单方向慢摆	18.7

2. 测量检流计内阻 R_g

电压表量程 3.000 V，准确度等级 0.5，分度值 0.020 V

电阻箱准确度等级 0.1，$R_0 =$ 1.00±0.01 Ω

(1) 半偏法

原始数据（见下页）

清华大学实验报告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

测次	U/V	R_1/Ω	$R_2=0$时 d/div	偏d/2时 R_2/Ω	调偏2分度时对应的$\Delta R/\Omega$（向上调偏）
1	2.304	6710.0	54.0	154.0	20.0
2	2.304	6790.0	54.0	151.0	19.0
3	2.304	6740.0	54.0	152.0	23.0
4	2.304	6710.0	54.0	153.0	21.0
5	2.304	6770.0	54.0	151.0	21.0
6	2.304	6680.0	54.0	155.0	20.0

由表可知 $\overline{R_2}=\frac{\sum R_2}{6}=152.67\Omega$

① 修正系统误差

$R_g \approx \overline{R_2}-R_0=151.67\Omega$

② 由检流计灵敏阈所决定的误差Δ_1

$\overline{\Delta R'}=\frac{\sum \Delta R'}{6}=20.67\Omega$

$\therefore \Delta_1=\pm 0.1\overline{\Delta R'}=\pm 2.07\Omega$

③ 由电压U波动所引起的误差Δ_2

$\Delta_2=\pm$[R_g×(0.2分度的电压值)/电压表示值]

$=\pm 0.37\Omega$

④ 电阻箱误差Δ_3

$\Delta_3=\pm[0.1\%\overline{R_2}+0.005(N+1)]=\pm 0.19\Omega$

⑤ R_2的标准偏差S_R^2

$S_R^2=\sqrt{\frac{\sum(R_2-\overline{R_2})^2}{6-1}}=1.63\Omega$

$\therefore \Delta_{Rg}=\sqrt{\Delta_1^2+\Delta_2^2+\Delta_3^2+S_R^2}=2.67\Omega$

$\therefore R_g=(151.7\pm 2.7)\Omega$

(2) 全偏法

清华大学实验报告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名 _____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

测次	U/V	R_1/Ω	$R_2=0$ 时 d/div	$R_1/2/\Omega$	R_2/Ω	调偏2分度时对应的$\Delta R/\Omega$ (向下调偏
1	2.308	6080.0	60.0	3040.0	146.0	8.0
2	2.516	6570.0	60.0	3285.0	148.0	9.0

$\overline{R_2} = \frac{\sum R_2}{2} = 147.0\Omega$

修正系统误差

$R_g = \overline{R_2} - R_0 = 146.0\Omega$ ✓

3. 测检流计分度值 C_1

$\overline{R_g} = \frac{151.67}{}\ \Omega$ (~~利用半偏法的~~)

测次	U/V	R_1/Ω	R_2/Ω	d/div 左	d/div 右	I_g/A	C_1 (A/div) 左	C_1 (A/div) 右
1	2.538	3110.0	820.0	20.0	18.2	8.361×10^{-7}	4.194×10^{-8}	4.608×10^{-8}
2	2.518	1447.0	820.0	41.8	40.0	1.788×10^{-6}	4.278×10^{-8}	4.470×10^{-8}
3	2.500	1008.0	820.0	60.0	58.0	2.567×10^{-6}	4.296×10^{-8}	4.392×10^{-8}

$\overline{C_1} = \frac{\sum C_1}{6} = 4.365\times10^{-8}$ A/div

$\left(\frac{\Delta C_1}{C_1}\right)^2 = \left(\frac{\Delta U}{U}\right)^2 + \left(\frac{\Delta R_g}{R_g+R_2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta d}{d}\right)^2 + \left(\frac{\Delta R_0}{R_0}\right)^2$

$= \left(\frac{0.5\%\times3}{2.500}\right)^2 + \left(\frac{2.67}{151.67+820}\right)^2 + \left(\frac{0.5}{60}\right)^2 + \left(\frac{1}{1000}\right)^2$

$= 2.13\times10^{-4}$

$\therefore \Delta C_1 = 6.372\times10^{-10}$ A/div

$\therefore C_1 = (4.37\pm0.06)\times10^{-8}$ A/div ✓

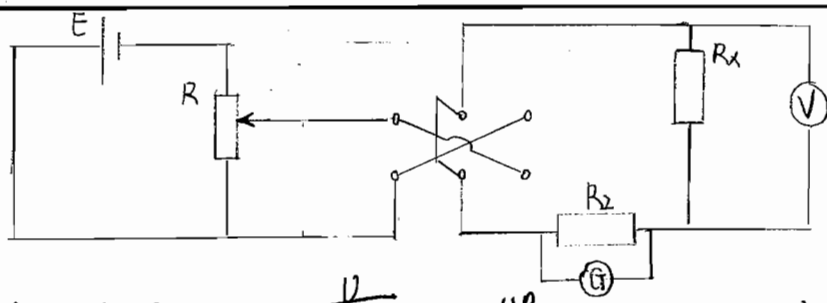
4. 用检流计测一阻值约为 $10^6\Omega$ 的未知高阻

测量电路图如下：

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名 _____ ）

作实验日期 年 月 日 教师评定



采用1.5V量程

由电路分析可知 $R_x = \frac{U}{\frac{I_g}{R_2}(R_2+R_g)} = \frac{UR_2}{I_g(R_2+R_g)}$

原始数据

U/V	d(左)/div	I_g/A	R_2/Ω
1.372	30	1.2718×10^{-6}	2420.0

$\therefore R_x = \frac{UR_2}{I_g(R_2+R_g)} = 1.015\ M\Omega$

误差分析

$\Delta R_2 = \pm[0.1\%R_2 + 0.05(N+1)] = \pm 2.77\Omega$

$\Delta U = \pm 0.5\%U_{量} = \pm 7.5\times10^{-3}\ V$

$\Delta C_1 = 6.371\times10^{-10}\ A/div$，$\Delta R_g = 2.67\Omega$，$\Delta d = 0.5\ div$

$\therefore \left(\frac{\Delta R_x}{R_x}\right)^2 = \left(\frac{\Delta U}{U}\right)^2 + \left(\frac{\Delta R_2}{R_2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta R_2 \cdot R_g}{R_2(R_2+R_g)}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C_1}{C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta d}{d}\right)^2 + \left(\frac{\Delta R_g}{R_2+R_g}\right)^2$

$= \left(\frac{7.5\times10^{-3}}{1.372}\right)^2 + \left(\frac{2.77\times2420\times151.67}{2420\times(2420+151.67)}\right)^2 + \left(\frac{6.371\times10^{-10}}{4.239\times10^{-8}}\right)^2 + \left(\frac{0.5}{30}\right)^2 + \left(\frac{2.67}{2420+151.67}\right)^2$

$= 5.346\times10^{-6}$

$\therefore \Delta R_x = 0.023\ M\Omega$

$\therefore R_x = (1.015\pm0.023)\ M\Omega$

六. 思考题

1. ① 光标将从原偏转处开始向零点移动，然后作振荡运动，幅度随着时间t的增大而衰减。因为断开R_2后，相当于检流计开路，电阻无限大，$\beta<1$，光标振荡。

② 光标将迅速停止振荡，停在零点处。因为检流计被

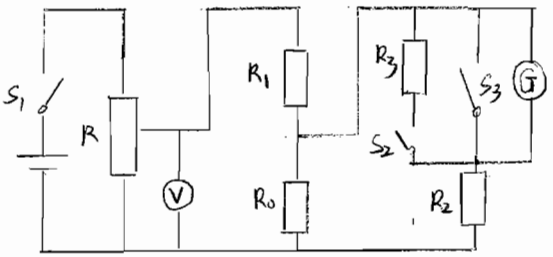
清华大学实验报告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名 _____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

短路，其外电路电阻约等于0，$\beta>1$，光标应单向偏转。

2. 如右图，$R_1 \gg R_0$，$R_2 \gg R_g$



① 闭合S_1，S_3，将Ⓥ调为合适数值，R_2预置S_1到较高值

② 断开S_2，调R_0使G偏转d

③ 闭合S_2，保持R_2不变，Ⓥ不变，调R_3使Ⓖ偏转$\frac{d}{2}$，则$R_g \approx R_3$

3. 不行，因为灵敏电流计所能通过的安全电流极小，只有通过二次压，才能得到足够小的安全电压，并且便于监控和调节。

4. Δ_1影响最大，Δ_2与Δ_3可忽略不计。

方法二优点：无检流计线性误差，Δ_1也较小，结果更为精确。

七. 实验总结

通过这次实验，我学习和收获了很多，调节滑动变阻器、R_1和R非常锻炼基本的实验判断和预置安全意识和能力。给我留下印象的是测高阻电阻。开始时我觉得这个非常容易，直接将R_1与R_x并联等成原电路反解不就可以了吗。但是结果并没有我想象的那么乐观，但由在0～99999.9Ω之间，也就是最多0.1MΩ，而R_x在1MΩ到2MΩ之间，并联之后R_x的效果非常小了，求解公式$R_x = \frac{R_1 R_1'}{R_1 - R_1'}$中分母较小，会造成很大的误差，几次测量结$R_x$都在0.2～0.5MΩ之间。我随后又用直接串联$R_x$与G的方式，但$R_x$太大，G的摆针处于极度欠阻尼状态，很难稳定下来，给读数带来了非常大的虽然而小心地等待摆针相对稳定后模糊地读出了d，并算得R_x约为1.077M结果也通过了查校验，但还是觉得不够理想。随后在老师的建议下我采G与R_2并联的方式调节了外电路电阻，使检流计处于一个比较理想的环境之下，最终效果非常好，我顺利地结束了这次有趣的选修实

阅

清华大学实验报告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 耿涵 （同组姓名 _____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

原始数据

检流计型号 5 编号 5

1. 观察检流计的阻尼运动特性

检流计外临界电阻 R_c = 820.0 Ω

R_2/Ω	阻尼运动的特点	光标自最大标格处至最后停在零点处所需时间/s
约 $10R_c$	振荡运动	16.1
约 R_c	单方向摆动	5.4
约 $0.1R_c$	单方向慢摆	18.7

2. 测量检流计内阻 R_g

电压表量程 3 V，准确度等级 0.5，分度值 0.020 V

电阻箱准确度等级 0.1，R_0 = 1.00±0.01Ω Ω。

(1) 半偏法

(向上调偏)

测次	U/V	R_1/Ω	R_2=0时 d/div	偏 d/2 时 R_2/Ω	调偏2分度时对应的 $\Delta R'$/Ω
1	2.304	6710.0	54.0	164.0	20.0
2	2.304	~~6732.0~~ 6790.0	54.0	151.0	19.0
3	2.304	6740.0	54.0	152.0	23.0
4	2.304	6710.0	54.0	153.0	21.0
5	2.304	6778.0	54.0	151.0	21.0
6	2.304	6680.0	54.0	155.0	20.0

(2) 全偏法

(向下调偏)

测次	U/V	R_1/Ω	R_2=0时 d/div	$R_1/2$/Ω	R_2/Ω	调偏2分度时对应的 $\Delta R'$/Ω
1	2.308	6080.0	60.0	3040.0	146.0	8.0
2	2.316	6570.0	60.0	3285.0	148.0	9.0

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名 _____ ）

作实验日期 年 月 日 教师评定

测检流分度值 C_1 $\overline{R_g} = 149.8\ \Omega$

次	U/V	R_1/Ω	R_2/Ω	d/div 左	d/div 右	I_g/A	C_1(A/div) 左	C_1(A/div) 右
	2.538	3110.0	820.0	20.0	18.2	8.163×10^{-7}	4.20×10^{-8}	4.62×10^{-8}
	2.518	1447.0	820.0	42.8	40.0	1.791×10^{-6}	4.28×10^{-8}	4.48×10^{-8}
	2.500	1008.0	820.0	60.0	58.0	2.552×10^{-6}	4.25×10^{-8}	4.40×10^{-8}

则阻值约为 $10^6\ \Omega$ 的高阻电阻

沿用3.2.4的电路图，将 R_x 与 R_1 并联，形成新的 R_1'

次	U/V	R_1/Ω	R_2/Ω	d(左)/div	I_g/A
	2.976	1826.0	820.0	40.0	1.697×10^{-6}
	2.514	1128.0	820.0	54.0	2.291×10^{-6}
	2.862	7370.0	820.0	10.0	4.243×10^{-7}
	2.866	12400.0	820	6.0	2.546×10^{-7}

其中 $I_g = C_1 \cdot d$ 算得 I_g

$\overline{C_1(左)} = 4.28\times10^{-8}$ A/div

$\frac{R_0+R_2+R_g}{R_0} \cdot R_1' + R_2 + R_g = \frac{U}{I_g}$ 得

$R_1' = \frac{R_0\left(\frac{U}{I_g} - R_2 - R_g\right)}{R_0+R_2+R_g}$，同时 $R_1' = \frac{R_1R_x}{R_1+R_x} \Rightarrow R_x = \frac{R_1R_1'}{R_1-R_1'}$

次 $R_1' = 1805.432\ \Omega$；

~~R_x~~

傅J03 12/11

)/V	d(左)/div	I_g/A	R_2/Ω	R_x/Ω
372	30	1.273×10^{-6}	2420.0	1.078M

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 精仪系 班号 精11 姓名 周祥 (2011010495) (同组姓名)

作实验日期 2012 年 12 月 6 日 教师评定 9-

直流电桥测电阻及组装数字温度计

一、实验目的

(1) 了解单电桥测电阻的原理，初步掌握直流单电桥的使用方法；

(2) 单电桥测量铜丝的电阻温度系数，学习用作图法和直线拟合法处理数据；

(3) 了解双电桥测量低电阻的原理，初步掌握双电桥的使用方法。

二、实验原理

1. 惠斯通电桥测电阻

惠斯通电桥(单电桥)原理如图1。其中R_1、R_2和R是已知阻值的标准电阻，它们与被测电阻R_x连成一四边形，每一条边称作电桥的一个臂。A和C之间接电源E；对角B和D之间接有检流计G，它像桥一样。若调节R使检流计中电流为零，桥两端B、D点电位相等，电桥达到平衡，此时有 $I_1R = I_2R_x$，$I_1R_1 = I_2R_2$

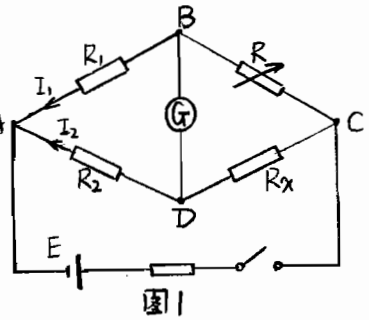


图1

两式相除，有

$$R_x = \frac{R_2}{R_1} \cdot R$$

只要检流计足够灵敏，上式就能很好成立，被测电阻值R_x可仅从三个标准电阻的值求得，而与电源电压无关。

单电桥的实际线路中将R_2和R_1做成比值为C的比率臂，则被测电阻为

$$R_x = CR$$

其中$C = R_2/R_1$，共分7个档，0.001～1000，R为测量臂，由4个十进位的电阻盘组成。

2. 铜丝的电阻温度系数

多数金属的电阻随温度升高而增大，有如下关系式

$$R_t = R_0(1 + \alpha_R t)$$

式中R_t、R_0分别为t、0℃时金属的电阻值；α_R为电阻温度系数，单位是$℃^{-1}$。α_R一般与温度有关，但本实验所用纯铜材料在-50℃～100℃的范围内α_R可视为常数，即R_t与t呈线性关系。于是

$$\alpha_R = \frac{R_t - R_0}{R_0 t}$$

利用金属电阻随温度变化的性质，可制成电阻温度计来测温。

3. 双电桥测低电阻

单电桥测电阻时，被测臂上引线和接点等处都有一定电阻，约为$10^{-2}\Omega$～$10^{-1}\Omega$量级。这些引线电阻和接触电阻与待测的R_x串联在一起，对低值电阻的测量影响很大。为减小它们的影响，在双电桥中作了两处明显改进：

(1) 被测电阻与测量盘电阻均采用四端接法，如图2。其中C_1、C_2是电流端，接电源回路，从而将两端的引线电阻和接触电阻折合到电源回路的其他串联电阻中；P_1、P_2为电压端，通常接测量用的高电阻回路或电流为零的补偿回路，从而使

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名 _____ ）

作实验日期 年 月 日 教师评定

这两端的引线电阻和接接触电阻对测量的影响相对减小了。

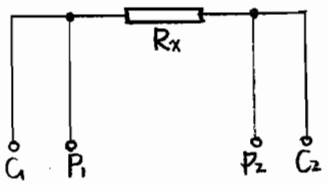


图2

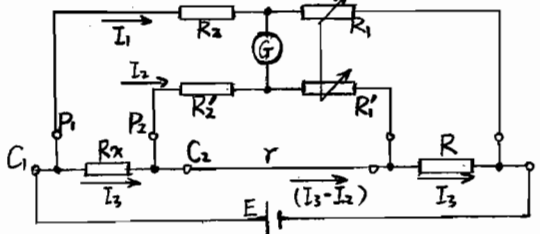


图3

(2) 如图3所示双电桥中增设了两个臂 R_1' 和 R_2'，其阻值较高。流过检流计G的电流为零时，电桥达到平衡，于是可得以下三个方程

$$I_3R_x + I_2R_2' = I_1R_2$$

$$I_3R + I_2R_1' = I_1R_1$$

$$I_2(R_2' + R_1') = (I_3 - I_2)r$$

上式中各量的意义如图3。解上列方程可得

$$R_x = \frac{R_2}{R_1}R + \frac{R_1'r}{R_1'+R_1'+r}\left(\frac{R_2}{R_1} - \frac{R_2'}{R_1'}\right)$$

双电桥在结构设计上尽量做到 $R_2/R_1 = R_2'/R_1'$，并尽量减小电阻 r，因此可得

$$R_x = \frac{R_2}{R_1}R$$

同样，在仪器中将 $R_2/R_1 = C$ 做成比率臂，则

$$R_x = CR$$

这样，电阻R和Rx的电压端附加电阻由于和高阻值臂串联，其影响减小了；两个外侧电流端的附加电阻串联在电源回路中，其影响可忽略；两个内侧电流端的附加电阻和小电阻 r 相串联，相当于增大了 r，其影响也可忽略。于是只要将被测低电阻接四端法接入双电桥进行测量，就可像单电桥那样用式 $R_x = CR$ 来计算了。

4. 非平衡电桥

非平衡电桥将检流计G去掉，通过测其两端电压 U_t 来确定电阻，如图4。若电源E一定，当某桥臂待测电阻 R_t 发生变化时，非平衡电桥的输出电压 U_t 也发生变化，其公式为 $U_t = E\left(\frac{R_1}{R_1+R_2} - \frac{R}{R+R_t}\right)$

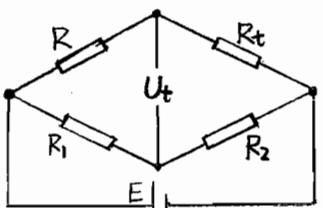


图4

一般 U_t 与 t 的关系不是线性的，为组装数字温度计，适当选择电桥参数（R_1、R_2、R和E），使其非线性误差很小，在一定温度范围内呈近似线性关系。这就是线性化设计。

5. 互易桥

利用现有的QJ-23型惠斯通电桥改装为非平衡桥，用铜丝电阻作感温元件，阻值约20Ω。用惠斯通电桥测量时一般选 $C=0.01$，将R置于2000Ω，由该电桥线路，此时 $R_2 \approx 10\Omega$，$R_1 \approx 1000\Omega$，这种阻值配比 U_t 测量误差较大。现巧改惠斯通电桥，将电源E与检流计G互易位置（图5与图6等效），这样桥臂阻值间的关系较合理（R_1 与R同数量级，R_2 与 R_t 同数量级）。将这种电源E，检流计G互换的惠斯通电桥称为互易

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

桥。将G再换成mV表，就改成了易了的非平衡桥，用它测量U_t误差就会减小。

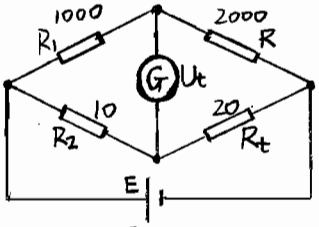


图5

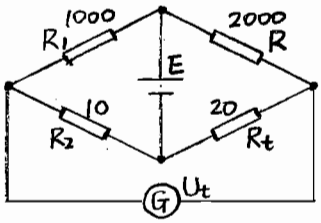


图6

6、线性化设计

欲组装一个温度范围在0~100℃的铜电阻数字温度计，必须将U_t~t的关系线性化，当满量程为19.999mV的4$\frac{1}{2}$数字电压表来显示温度值时，要求显示值：$U_t=\frac{1}{10}t$（mV）

当温度t=0℃时，U_0=0mV，此时电桥为平衡桥有：

$$\frac{R_2}{R_1}=C,\quad \frac{R_0}{R}=C \text{ 或 } R=\frac{R_0}{C}$$

式中R_0为0℃是铜丝电阻值，R为测量臂电阻，对铜电阻来说，在0~100℃范围内R_t与t是线性关系：$R_t=R_0(1+\alpha t)$，这样式$U_t=E\left(\frac{R_1}{R_1+R_2}-\frac{R}{R+R_t}\right)$可改写为：

$$U_t=E\left[\frac{1}{1+C}-\frac{1}{1+C(1+\alpha t)}\right]$$

考虑到本实验中选$C=0.01\ll 1$，铜电阻温度系数$\alpha\sim 10^{-3}/℃$，则上式还可进一步简化为：

$$U_t=\frac{EC\alpha}{(1+C)^2}t+\Delta U$$

ΔU为非线性误差项。忽略ΔU后，有

$$E=\frac{(1+C)^2}{10C\alpha}$$

至此，已完成了线性化设计，选择电桥参数$C=0.01$，$R=\frac{R_0}{C}$，$E=\frac{(1+C)^2}{10C\alpha}$就能用非平衡桥组装成数字温度计，$U_t=\frac{1}{10}t+\Delta U$（mV）。

三、实验仪器

1. QJ-23型携带式单电桥

2. 测铜丝电阻温度系数的实验装置

由调压器、电加热器、温度计、直流电机、铜丝电阻、稳压电源、单电桥、搅拌器构成。

3. QJ44型双电桥

四、电桥的测量误差简析

1. QJ-23型单电桥不确定度计算

使用QJ-23型单电桥在一定参考条件下，电桥的基本误差极限E_{um}可表示为

$$E_{um}=\pm(\alpha\%)\left(CR+\frac{CR_N}{10}\right)$$

上式中C为比率值，R为测量盘示值。R_N为基准值，皆取为5000Ω。等级指数α主要反映

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

了电桥中各标准电阻准确度。对于QJ-23电桥，当测量范围在10Ω~9999Ω时，$\alpha=0.2$（电源电压E=4.5V）；10Ω以下，$\alpha=2$（E=4.5V）；在10kΩ~999.9kΩ时，$\alpha=0.5$（E=6V）；1MΩ以上，$\alpha=2$（E=15V以上）。

若测量范围或电源、检流计条件不符合等级指数对应的要求时，电桥平衡后再改变R_x，检测计未现偏转。将检流计灵敏阈（0.2分格）对应的被测电阻的变化量Δ_S叫电桥的灵敏阈，则Δ_S可这样测得：平衡时，将R人为调偏到R+ΔR，使检流计偏转Δd分格，则

$$\Delta_S = 0.2C\Delta R/\Delta d$$

Δ_S反映了平衡判断中可能包含的误差。Δ_S愈大，电桥愈不灵敏。要减小Δ_S，可适当提高电源电压或外接更灵敏的检流计。当测量范围及条件符合仪表说明书规定的要求时，Δ_S的影响可忽略；若不然，则应由下式得出测量结果的不确定度：

$$\Delta_{Rx}=\sqrt{E_{lim}^2+\Delta_S^2}$$

2. QJ44型双电桥不确定度计算

QJ44型双电桥在环境温度（20.0±1.5）℃、相对湿度40%~60%等条件下，电桥基本误差极限也写成

$$E_{lim}=(\alpha\%)\left(CR+\frac{CR_N}{10}\right)$$

其中R_N取0.1Ω。α为等级指数，当测量范围在0.01Ω~11Ω时，$\alpha=0.2$；在0.001Ω~0.91Ω时，$\alpha=0.5$；在0.0001Ω~0.0011Ω时，$\alpha=1$。测量"不灵敏"引起的误差忽略。

故电阻测量结果的不确定度为

$$\Delta_{Rx}=(\alpha\%)\left(CR+\frac{C}{100}\right)$$

五、实验任务及步骤

1. 惠斯通电桥测电阻

(1) 熟悉电桥结构，预调检测计零位。

(2) 测不同量级的待测电阻，根据电阻标称值选定C并预置测量盘；接着调节电桥平衡而得读数C和R值；然后测出偏离平衡位置Δd分格所需的测量盘示值变化ΔR。

(3) 计算CR，分析误差，给出测量结果。

2. 单电桥测铜丝的电阻温度系数

(1) 测量加热前的水温及铜丝电阻值。

(2) 从起始温度升温，每隔5℃~6℃左右测一次温度t及相应阻值R_t。要求在大致热平衡时进行测量。

(3) 测量后用计算机直线拟合检验数据，作t与R_t直线拟合相关系数r应在0.999以上。

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名 _____ ）

作实验日期 年 月 日 教师评定

3. 组装数字温度计

(1) 将 QJ-23 型惠斯通电桥改装成互易桥。电源E接原电桥G的"外接"端，数字电压表接到原电桥的B端。

(2) 按所选电桥参数组装数字温度计，即 $C=0.01$，$R=\frac{R_0}{C}$，$E=\frac{(1+C)^2}{10C\alpha}$。

(3) 用实验检验组装的数字温度计。检验 $U_t \sim t$ 线性关系。

六、数据处理

1. 惠斯通电桥测电阻

仪器组号 9，电桥型号 QJ23.

电阻标称值/Ω	120	200	1k	11k	360k
比率臂读数C	0.1	0.1	1	10	1000
准确度等级指数α	0.2	0.2	0.2	0.5	0.5
平衡时测量盘读数R/Ω	1193	1913	996	1098	360
平衡后检流计偏转Δd/格	4.5	8	9.5	1.5	1.5
与Δd对应的ΔR/Ω	1	1	1	1	9
测量值CR/Ω	119.3	191.3	996	10980	360000
$\lvert E_{lim}\rvert$/Ω	0.3386	0.4826	2.992	79.90	4300
Δ_S/Ω	0.004444	0.002500	0.02105	1.333	1200
Δ_{Rx}/Ω	0.3	0.5	3	80	4×10^3
$(R_X=CR\pm\Delta_{Rx})$/Ω	119.3 ± 0.3	191.3 ± 0.5	996 ± 3	$(1.098\pm0.008)\times10^4$	$(3.60\pm0.04)\times10^5$

上表中，$|E_{lim}|=(\alpha\%)(CR+500C)$，$\Delta_S=0.2C\Delta R/\Delta d$，$\Delta_{Rx}=\sqrt{E_{lim}^2+\Delta_S^2}$

2. 单电桥测铜丝的电阻温度系数

实验中测得的数据整理如下表，其中第一组数据为加热前的水温及铜丝电阻值。

t/℃	15.01	20.36	25.98	31.64	36.63	42.00	48.44	53.55	58.48	63.79
R_t/Ω	16.22	16.58	16.94	17.32	17.65	18.00	18.42	18.76	19.08	19.42

实验时用计算机拟合得

$R_t = 15.24005 + 0.06564t$，$r = 0.99999$

$\alpha_R = \frac{0.06569}{15.24005} = 4.30694531\times10^{-3} = 4.31\times10^{-3}\ ℃^{-1}$

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

根据测得的数据绘制的 $R_t - t$ 曲线见附页，由此曲线

$$R_t = 15.240052 + 0.065650t \quad , \quad r^2 = 0.999981$$

$$\alpha_R = \frac{0.065650}{15.240052} = 0.0043077280\text{8} = 4.31\times10^{-3}\ ^\circ C^{-1}$$

这与实验时测得的 α_R 非常接近，取近似以后两者相等。

3. 组装数字温度计

实验时，用2中测量的 α_R 计算得

$$E = \frac{(1+C)^2}{10C\alpha_R} = \frac{(1+0.01)^2}{10\times0.01\times4.306945\times10^{-3}} = 2368\ mV$$

同时 $R = \frac{R_0}{C} = \frac{15.24005}{0.01} = 1524\ \Omega$

检验所装数字温度计的数据整理如下：

$t/^\circ C$	49.25	53.83	59.12	64.26	70.04	75.21
U_t/mV	4.91	5.34	5.90	6.41	6.98	7.49

对这组数据进行拟合的曲线见附页。此曲线方程为

$$U_t = 0.099858t - 0.014715 .$$

$a = -0.01475$, $b = 0.099858$, $r^2 = 0.999857$

这表明组装的数字温度计较好地满足了 $U_t = \frac{1}{10}t\ mV$ 的设计要求。

下面分析 α_R、R_0 不准确对实验结果的影响。

由于E按公式 $E = \frac{(1+C)^2}{10C\alpha_R}$ 求出，若 α_R 的测量结果偏大，则求出的E偏小，使用电压较小的电源使各次测得的 U_t 也偏小，从而导致组装的数字温度计示值偏小；若 α_R 测量结果偏小，对实验结果的影响相反。

若 R_0 测量结果偏大，则由式 $R = \frac{R_0}{C}$ 算出的R较大。由此较大的电阻组装温度计时，由于 $U_t = E\left(\frac{R_1}{R_1+R_2} - \frac{R}{R+R_t}\right)$，R偏大则实际测得的 U_t 偏小，故 R_0 偏大也会使实验中组装的温度计的示值偏小。

按照拟合出的直线公式，当 $U_t = 5mV$ 时，相应的温度

$$t = \frac{U_t - a}{b} = \frac{5 + 0.014715}{0.099858} = 50.09\ ^\circ C$$

若按 $U_t = \frac{1}{10}t$ 的关系，$t = 10U_t = 50\ ^\circ C$，相对误差仅为

$$\beta = \frac{50.09 - 50}{50}\times100\% = 0.18\%$$

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

七、思考题

1. 计算秦勒级数在 $t_0=0$ 处展开时的非线性项 ΔU.

答: $U_t = \frac{E}{1+C} - \frac{E}{1+C(1+\alpha t)}$

故 $U_t' = \frac{E\alpha C}{(1+C+\alpha C t)^2}$, $U_t'' = -2\frac{E(\alpha C)^2}{(1+C+\alpha C t)^3}$, $U_t''' = 2\times 3\cdot\frac{E(\alpha C)^3}{(1+C+\alpha C t)^4}$, ...,

$$U_t^{(n)} = (-1)^{n-1} n! \frac{E\cdot(\alpha C)^n}{(1+C+\alpha C t)^{n+1}}$$

故 $t_0=0$ 处 U_t 的展开式为

$$U_t = \sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{n!}U_t^{(n)}\Big|_{t=0} t^n = \sum_{n=1}^{\infty}(-1)^{n-1}\frac{E\cdot(\alpha C)^n}{(1+C)^{n+1}}\cdot t^n = \frac{E\alpha C}{(1+C)^2}t + \sum_{n=2}^{\infty}(-1)^{n-1}\frac{E\cdot(\alpha C)^n}{(1+C)^{n+1}}t^n$$

故非线性项

$$\Delta U = \sum_{n=2}^{\infty}(-1)^{n-1}\frac{E\cdot(\alpha C)^n}{(1+C)^{n+1}}\cdot t^n.$$

2. 惠斯通电桥E、G互易的实验方法有何启示。

答: 实验中通过巧妙地互换E、G的位置，达到了减小 U_t 测量误差的目的，满足了线性化设计的要求。通过比较改动前后的电路图可以发现，两种电路有高度的对称性，实际上它们也是等效的。这启示我们在进行物理研究和实验时可以多留意这种对称性，善于用等效的体系从不同的角度研究问题。另外在遇到 U_t 测量不准确的问题时，并没有完全推翻之前的实验方案，而是在原有方案基础上进行了巧妙改动，这启示我们不要轻易放弃原有的研究思路，并善于对原有方案进行创造性的改进。

3. 总结由平衡桥→非平衡桥→数字温度计演变的物理思想。

答: 平衡桥是一种精确测电阻的方法，但在实际操作中，由于G是否偏转还需要人为地进行判断，因此需要调整电源电压以满足更高的对精确的要求。但若从另一种角度思维，直接将G的偏转与否量化，即直接测量 U_t 也可以达到测电阻的目的，平衡桥与非平衡本质上是一回事，都服从基尔霍夫定律，但后者在测量上一定程度上减少了人为因素的影响。这与物理学严谨的风格一致。

测电阻只是电桥应用的一个方面，电桥的原理还可用于组装温度计从而测温。物理学的研究也正是如此，要善于发现物理规律的各种应用，从而造福人类。另外，在组装数字温度计的过程中，采用了将原电桥改装成互易桥的方法，这体现了对称与等效的思想。

4. 为何用单电桥测电阻一般比伏安法测量的准确度高？单电桥中检流计的准确度对实验中所用的平衡桥法测量有无影响？

答: 只要检流计足够灵敏，式 $R_x = \frac{R_2}{R_1}R$ 就能相当好地成立，被测电阻值 R_x 可

清华大学实验报告

系别_____ 班号_____ 姓名_____ （同组姓名_____）

作实验日期　　年　　月　　日　　教师评定

仅从标准电阻的值求得，与电源电压无关，也没有由内、外接带来的误差。这一过程相当于将R_x与标准电阻相比较，故准确度高。由于检流计G不偏转是电桥平衡的标志，故G的灵敏度影响着测量精确度。

5. 若用单电桥测一微安表内阻，应怎样保证被测微安表不超过量程？

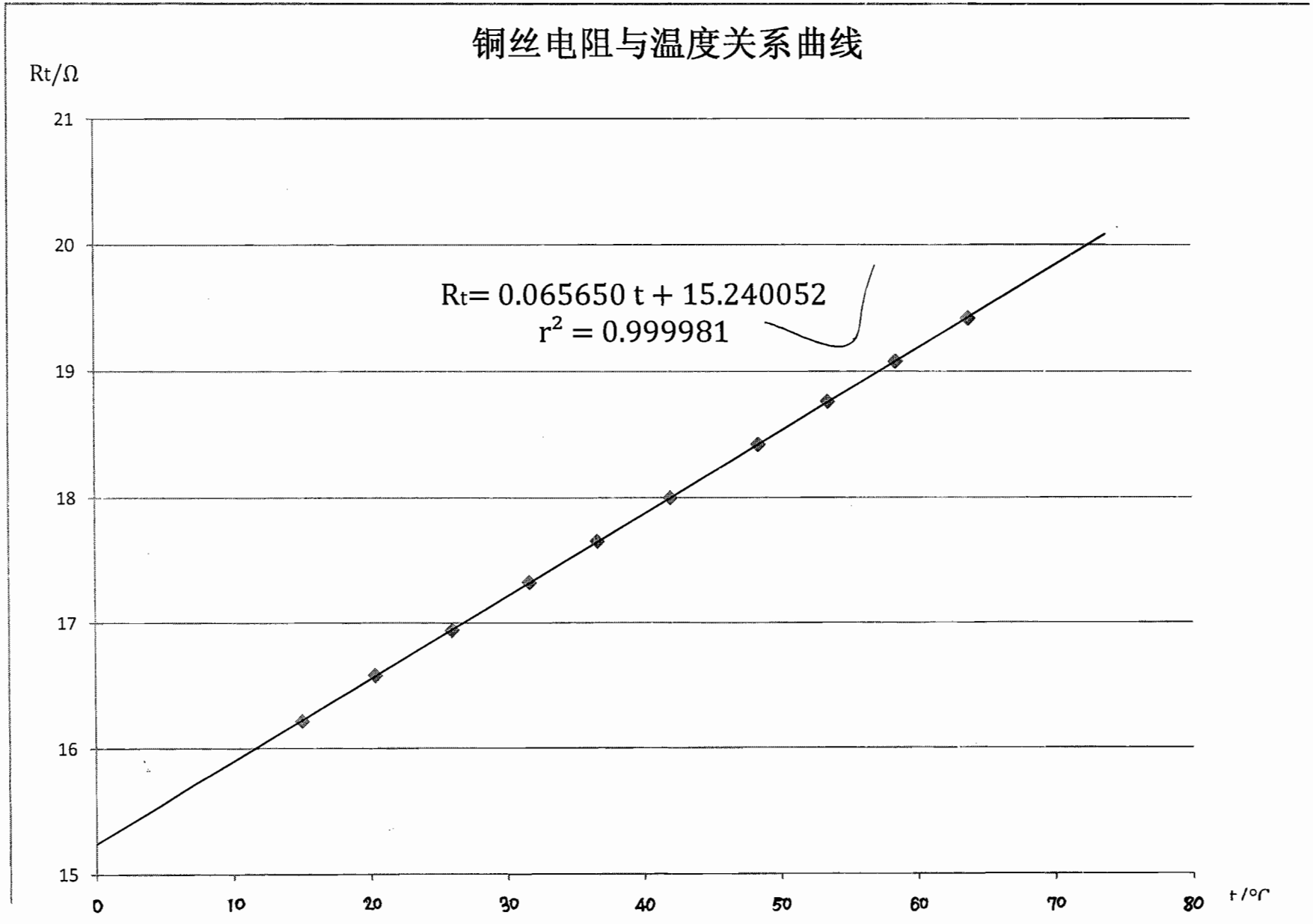
答：可使用较高的比率臂，这样相当于在微安表支路上串接了一个较大阻值的电阻。在保证精度的前提下，选用尽可能大的比率臂的同时，可采用电压较小的外接电源。

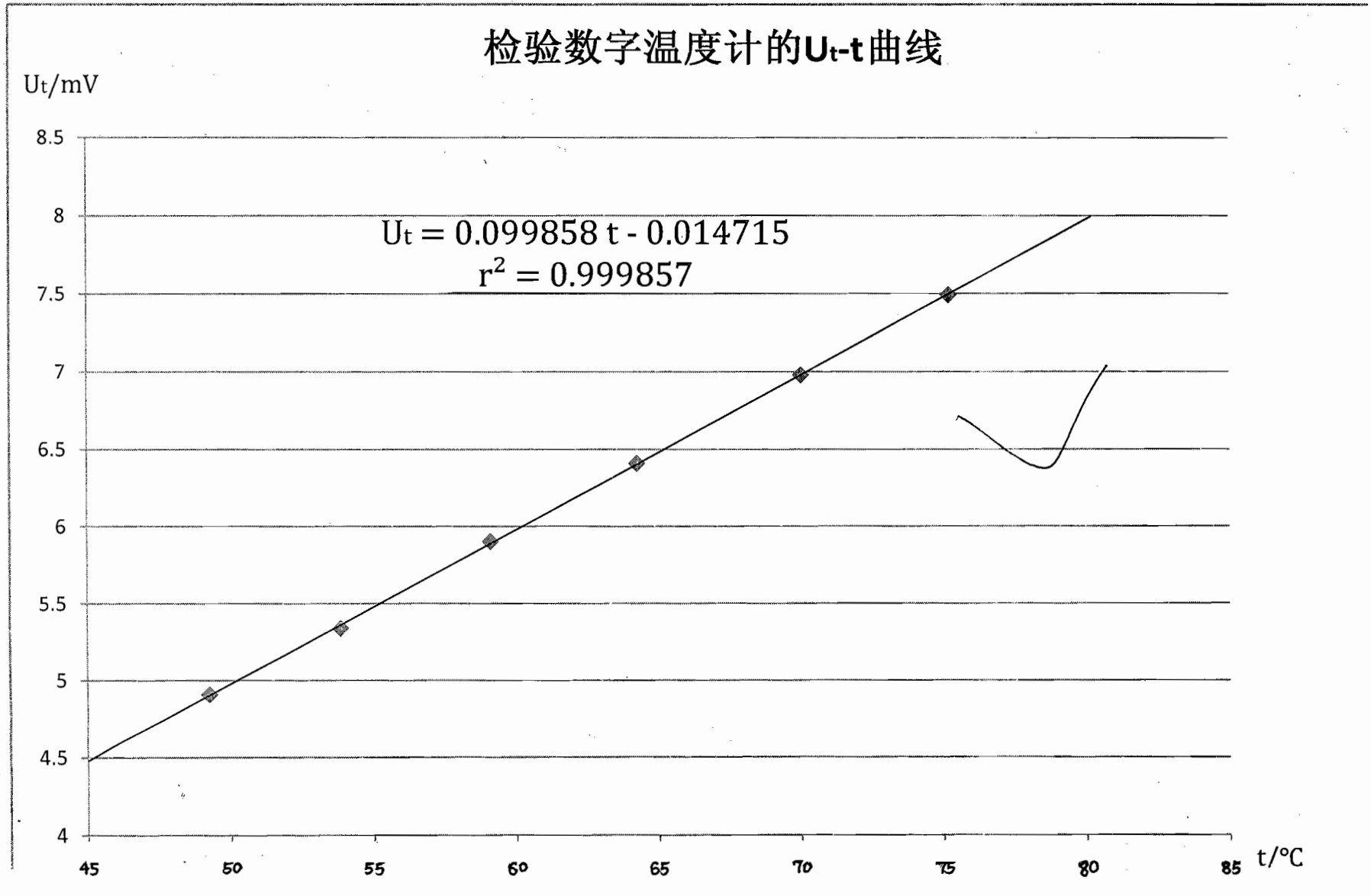
6. 用电桥测电感线圈的直流电阻时，为防止通断瞬间产生大电流损伤检流计或干扰测量，接通时应先按B、后按合G，断开时应先断G后断B，为什么？

答：因为电路中有电感线圈时，在电路通、断的瞬间，电感上将产生较大的感应电动势，从而在电路中引起感应电流，从而可能损坏检流计或干扰测量。

7. 试从E_{lim}计算式说明为什么选取比率臂时一般应使电桥×1000Ω的测量盘尽可能用上？

答：由于$E_{lim} = \pm(\alpha\%)(CR + \frac{CR_N}{10})$，对于同一被测电阻，选不同比率臂时CR值基本相等，R_N为定值，α也是确定的，这样，选取尽可能小的比率臂C可使E_{lim}的值减小，所以选尽量小的C值，也即尽可能使用×1000Ω的测量盘是为减小测量时电桥的基本误差极限，从而减小电阻测量值的不确定度，提高电阻测量的精确度。


铜丝电阻与温度关系曲线
Rt/Ω
21
20
19
18
17
16
15
Rt= 0.065650 t + 15.240052
r² = 0.999981
0
10
20
30
40
50
60
70
80
t/°C


检验数字温度计的Ut-t曲线
Ut/mV
8.5
8
7.5
7
6.5
6
5.5
5
4.5
4
Ut = 0.099858 t - 0.014715
r2 = 0.999857
45
50
55
60
65
70
75
80
85
t/°C

清华大学实验报告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 闫禅 （同组姓名 _____）

作实验日期 2012 年 12 月 6 日 教师评定

1. 惠斯通电桥测电阻 仪器组号 9，电桥型号 QJ23

标称值/Ω	120	200	1k	11k	360k
比率臂C	0.1	0.1	1	10	1000
平衡时R/Ω	1193	1913	996	1098	360
Δd	4.5	8	9.5	1.5	1.5
ΔR/Ω	1	1	1	1	9

2. 电阻温度系数

t/°C	15.01	20.36	25.98	31.64	36.63
Rt/Ω	16.22	16.58	16.94	17.32	17.65

t/°C	42.00	48.44	53.55	58.48	63.79
Rt/Ω	18.00	18.42	18.76	19.08	19.42

拟合：r=0.99999，a=15.24005，b=0.06564

$R_0 = 15.24005\ \Omega$，$\alpha_R = \frac{b}{a} = \frac{0.06564}{15.24005} = 0.004306945\ ^\circ C$

3. 组装数字温度计

$E = 2.368\ V$

t/°C	49.25	53.83	59.12	64.26	70.04	75.21
Ue/mV	4.91	5.34	5.90	6.41	6.98	7.49

12/19

陈瑞姓 134 12/

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 精仪器 班号 精11 姓名 周祥(2011010495)（同组姓名 ）

作实验日期 2012 年 11 月 8 日 教师评定 9十

用传感器测空气相对压力系数

一. 实验目的

(1) 加深对理想气体状态方程和查理定律的理解；
(2) 初步了解铜电阻温度传感器和硅压阻式差压传感器的工作原理并掌握其使用方法。
(3) 学习用作图法和计算机作直线拟合法处理实验数据。

二. 实验原理

1. 理想气体的查理定律

对于理想气体，定容条件下，有

$$p = \frac{p_0 T}{T_0} = p_0 \frac{T_0 + t}{T_0} = p_0(1 + \alpha_p t)$$

式中，t 为气体摄氏温度，$T_0 = 273.15\ K$，p_0 和 p 分别为气体在 0℃ 和温度 t 时的压强；α_p 为相对压力系数，定义为 $\alpha_p = \frac{\Delta p}{p_0 \Delta t}$。对理想气体，$\alpha_p = \frac{1}{T_0} = 3.66 \times 10^{-3} K^{-1}(℃^{-1})$。实际气体相对压力系数与理想气体差[illegible]差甚小。

利用查理定律可制作定容气体温度计。

2. 铜电阻温度传感器

在 −50 ℃～100 ℃ 范围内，铜丝电阻值 R 与温度 t 有良好的线性关系

$$R = R_0(1 + \alpha_R t)$$

式中，R_0 为 0℃ 时的电阻值，α_R 称为电阻温度系数。本实验中使用的电阻的 $\alpha_R = 4.26 \times 10^{-3}℃^{-1}$。当铜丝电阻中通以恒定电流 I 时，铜丝电阻两端电压 U_t 与温度 t 有如下关系：

$$U_t = U_{R0}(1 + \alpha_R t)$$

U_{R0} 为 0 ℃ 时的电压，$U_{R0} = IR_0$。若测出纯水沸点处铜丝电阻的电压 U_b 并查出沸点温度，则利用上式可得

$$t = \frac{U_t}{U_b}\left(\frac{1}{\alpha_R} + t_b\right) - \frac{1}{\alpha_R}$$

3. 扩散硅压阻式差压传感器

压阻式差压传感器利用半导体材料的压阻效应制成。PDT-1型扩散硅压阻式差压传感器结构示意图如图1。其核心为硅膜片，此膜片是用特殊方法得到的十字形四端应变片(如图2)。当膜片受应力时，若将一恒定电压 E 加在 M 和 N 两端上，在剪切应力作用下，从 A 和 B 两端会输出一与压差 Δp 成线性关系的电压 U_p，即

$$U_p = U_0 + k_p \Delta p$$

式中 U_0 为压差为 0 时的输出电压，系数 k_p 一般为一常数。若传感器接口 D 通大气，接口 C 通被测介质，则

$$p = p_c + \frac{U_p - U_0}{k_p}$$

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名 _____ ）

作实验日期 年 月 日 教师评定

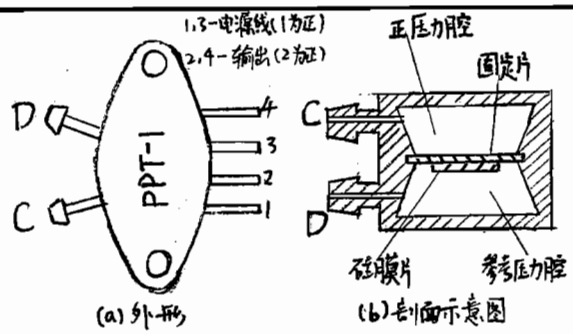


图1 差压传感器结构示意图

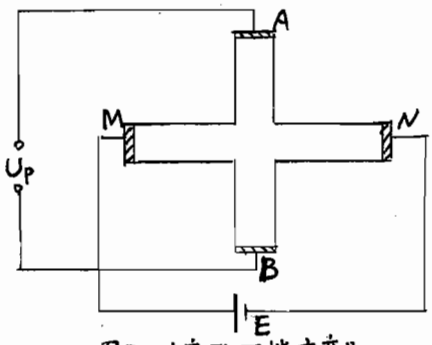


图2 十字形四端应变片

式中P_0为大气压强。该压阻式差压传感器测量范围为$0\sim10^5$Pa，综合精度为0.3%。它具有体积小、灵敏度高、稳定性好等优点。

三、实验仪器与实验装置

1. 实验装置主要部分示意图如图3。

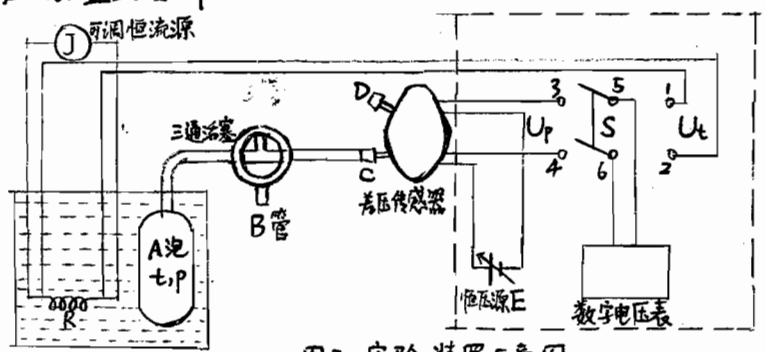


图3 实验装置示意图

2. 差压传感器定标装置

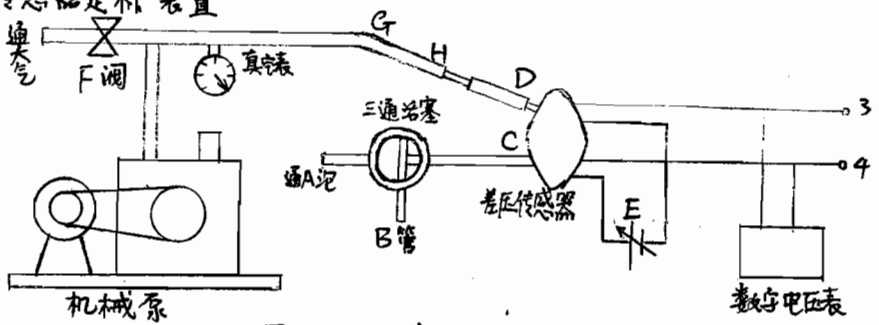


图4 差压传感器定标装置示意图

3. 福丁气压计

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名 _____ ）

作实验日期 年 月 日 教师评定

四、实验步骤及注意事项

1. 差压传感器的定标。用图4所示定标装置准确测定传感器的U_0和k_P。先转动三通管使传感器C口与B管相通，并使D口与机械泵相连，用泵从D口抽气。待真空表示数为760 mm不动时，压差$\Delta P = P_C$，传感器输出电压记为U_m。然后停泵，使D口也通大气，此时$\Delta P_0 = 0$，数字表读数即为U_0，$k_P = \dfrac{U_m - U_0}{P_C}$。

2. 测若干组(U_t, U_P)值。按图3接线并令C与A泡相通。调节恒流源I使电流约为2mA。记下室温下铜丝电压值U_t和传感器输出电压值U_P。加热，铜丝电压每增加约0.5 mV记一次(U_t, U_P)值；最后记下水沸腾时各电压值，记为(U_{tb}, U_{Pb})。

3. 实验前后用大气压计各测一次大气压，同时记下室温值。

4. 实验注意事项

(1) 加热时将搅拌器电源开关及加热开关同时接通，并调控温旋钮至所需温度。搅拌器转速应适当。

(2) "热得快"不能干烧。换水应用虹吸方法或直接将玻璃杯内的水倒入塑料桶。

(3) 小心操作以免损坏玻璃仪器。

(4) 停泵后应立即将机械泵抽气口通大气。

(5) 实验完毕，将加热器的调速、温控旋钮旋至最小位置，并断开电源开关和加热开关。

五、系统误差分析

1. 式$P = P_0(1+\alpha_P t)$仅适用于定容、定质量理想气体。由于①空气只近似为理想气体；②A泡壁上气体吸附量随温度而变，且泡内可能混入水蒸气；③A泡容积因热胀冷缩而变；④与A泡相连的C管等部分中的气体温度不均匀等原因，实验中存在较明显的系统误差。下面分析③和④的影响。

设A泡至C口间细管部分体积为v，A泡体积为V，并假定体积v内气体的温度近似为室温T_1。列出气体初、末态参量如下：

气体种类	初 态	末 态
A泡内气体	V, P_1, T_1	$V[1+\beta(T-T_1)], P, T$
v内气体	v, P_1, T_1	v, P, T_1

其中，β为A泡玻璃的体膨胀系数，约$1.2\times10^{-5}\,K^{-1}$。由于气体总量不变，有

$$\frac{P_1 V}{T_1} + \frac{P_1 v}{T_1} = \frac{PV[1+\beta(T-T_1)]}{T} + \frac{Pv}{T_1}$$

即

$$\frac{PV}{T} = \frac{P_1 V}{T_1}\left(1+\frac{v}{V}\right)\left\{1+\frac{T}{V}\left[\frac{v}{T_1} + \frac{V\beta(T-T_1)}{T}\right]\right\}^{-1}$$

由于$v/V \ll 1$，$\beta(T-T_1) \ll 1$，将右式展开并略去高阶小量后得

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

$$p=\frac{p_1T}{T_1}\left[1-\left(\beta+\frac{\gamma}{VT_1}\right)(T-T_1)\right]$$

可见p与T之间不是严格的线性关系。因而本实验中在20°C左右时，按以下经验公式对α_p的测得值进行修正：

$$\delta\alpha_p=\left(0.018+\frac{5\gamma}{V}\right)\times10^{-3}\,K^{-1}$$

2. 福丁气压计的系统误差

由于气压计在0°C下标定，水银密度、黄铜标尺长度会随温度变化，从而引起系统误差，故应对气压计示值H进行修正。其修正值为

$$\delta H=-(18.2-1.9)\times10^{-5}Ht$$

式中，t为测量时的大气温度(°C)，由黄铜管上的水银温度计读出。$18.2\times10^{-5}°C^{-1}$是水银的体积膨胀系数，$1.9\times10^{-5}°C^{-1}$是黄铜的线胀系数。修正后的大气压强为

$$p_c=H+\delta H$$

这里的p_c是用托(Torr)作单位的，1 Torr = 1 mmHg = 133.32 Pa。

六、数据处理

1. 大气压强及其修正

实验前室温 $t_1=20.0°C$，$H_1=100.31$（10毫巴）

实验后室温 $t_2=22.5°C$，$H_2=100.27$（10毫巴）

修正项 $\delta H=-(18.2-1.9)\times10^{-5}\times\frac{H_1t_1+H_2t_2}{2}$

$=-(18.2-1.9)\times10^{-5}\times\frac{100.31\times20.0+100.27\times22.5}{2}$

$=-0.3474$（10毫巴）

故 $p_c=H+\delta H=\frac{100.31+100.27}{2}-0.3474=99.94$（10毫巴）

$=99.94\times10^3\,Pa=0.9994\times10^5\,Pa$.

2. t_b的计算

查表，得 $p_{c1}=0.9986\times10^5\,Pa$时，$t_{b1}=99.59°C$；

$p_{c2}=0.9999\times10^5\,Pa$时，$t_{b2}=99.63°C$.

由线性内插法 $\frac{p_c-p_{c1}}{t_b-t_{b1}}=\frac{p_{c2}-p_{c1}}{t_{b2}-t_{b1}}$

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名 _____ ）

作实验日期 年 月 日 教师评定

故 $t_b = t_{b1} + \frac{(p_c - p_{c1})(t_{b2} - t_{b1})}{p_{c2} - p_{c1}} = 99.59 + \frac{(0.9994 - 0.9986) \times (99.63 - 99.59)}{0.9999 - 0.9986}$

$= 99.61\,^{\circ}C$

3. 定标与 k_p 的值.

定标时测得 $U_m = 40.70\,mV$，$U_0 = 0.03\,mV$

又由前面计算 $p_c = 0.9994 \times 10^5\,Pa$

故 $k_p = \frac{U_m - U_0}{p_c} = \frac{40.70 - 0.03}{0.9994 \times 10^5} = 4.06944 \times 10^{-4}\ mV/Pa$

4. (U_t, U_p) 与 p、t 的数据表格

实验开始时室温 $t = t_1 = 20.0\,^{\circ}C$，$U_t = 95.44\,mV$

要以此为起点到 $80\,^{\circ}C$ 为止共测 8 组数据（含起点），

则 $\Delta t = \frac{80 - 20.0}{7} = 8.5714\,^{\circ}C$

又 $U_t = U_{R0}(1 + \alpha_R t)$，其中 $\alpha_R = 4.26 \times 10^{-3}\,^{\circ}C^{-1}$

故 $\Delta U_t = U_{R0}\alpha_R \Delta t = \frac{U_{t(室温)}}{1 + \alpha_R t_1}\alpha_R \Delta t$

$= \frac{95.44 \times 4.26 \times 10^{-3} \times 8.5714}{1 + 4.26 \times 10^{-3} \times 20.0} \approx 3.21\,mV$

故实验时应取 ΔU_t 约为 $3.21\,mV$，这样可使测出的数据分布较为均匀。

将实验测得的 (U_t, U_p) 及计算出的 t、p 整理如下表，

其中，$t = \frac{U_t}{U_{tb}}\left(\frac{1}{\alpha_R} + t_b\right) - \frac{1}{\alpha_R}$，

$p = p_c + \frac{U_p - U_0}{k_p}$

实验测得 $U_{tb} = 126.14\,mV$，$k_p = 4.06944 \times 10^{-4}\,mV/Pa$

已知 $\alpha_R = 4.26 \times 10^{-3}\,^{\circ}C^{-1}$

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名 _____ ）

作实验日期 年 月 日 教师评定

U_t/mV	t /°C	U_p/mV	P/10^5Pa
95.44	20.0	-1.84	0.9534
98.64	26.72	-0.75	0.9802
101.88	35.31	0.33	1.0068
105.07	43.76	1.40	1.0331
108.30	53.32	2.47	1.0594
111.49	60.78	3.54	1.0857
114.69	69.26	4.59	1.1115
117.89	77.74	5.62	1.1368
126.14(U_{tb})	99.61(t_b)	8.21(U_{pb})	1.2004

实验时用计算机进行拟合时，

$p = a+bt = 0.9007428 + 0.003093\,t$

（p单位为0.1MPa，t单位为°C）

相关系数 $r = 0.99998$，符合要求

$\alpha_p^* = \frac{b}{a} = \frac{0.003093}{0.9007428} = 3.43\times10^{-3}\ K^{-1}$

由已知 $\frac{U}{V} = 0.02$，故修正项

$\delta\alpha_p = (0.018+\frac{5U}{V})\times10^{-3} = (0.018+5\times0.02)\times10^{-3} = 0.118\times10^{-3}\ K^{-1}$

故 $\alpha_p = \alpha_p^* + \delta\alpha_p = (3.43+0.118)\times10^{-3}\ K^{-1} = 3.55\times10^{-3}\ K^{-1}$

下用坐标纸绘制 P-t 图线（图线见附页）.

通过在直线上取点得直线方程 $p = 0.904007 + 0.003012t$

（p单位0.1MPa，t单位°C）

又 $p = p_0(1+\alpha_p t)$（p_0为0°C气体压强）对比，得

$\alpha_p^* = \frac{b}{a} = \frac{0.003012}{0.904007} = 3.33\times10^{-3}\ K^{-1}$

修正项 $\delta\alpha_p = (0.018+\frac{5U}{V})\times10^{-3} = (0.018+5\times0.02)\times10^{-3} = 0.118\times10^{-3}\ K^{-1}$

故最终结果 $\alpha_p = \alpha_p^* + \delta\alpha_p = (3.33+0.118)\times10^{-3} = 3.45\times10^{-3}\ K^{-1}$

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名 _____ ）

作实验日期 年 月 日 教师评定

七、思考题

1. 差压传感器定标时，若先测 U_0 后测 k_P 应如何操作？若D口漏气对定标结果有何影响？

答：(1) 应先转动三通活塞使传感器C口与B管连通而与A断开，此时C通大气。然后用机械泵从D口抽气，电压表读数达最大并稳定后记录值，即为 U_m；后停泵并使D口也通大气，此时电压表读数即为 U_0，由 $k_P = \frac{U_m - U_0}{P_C}$ 便可得 k_P。

(2) 若D口漏气，则用机械泵抽气后 $\Delta p < P_C$，则 U_m 偏小，故 k_P 偏小。

2. 对水加热时，为什么要控制好热平衡？升温过快有什么问题？

答：热平衡时电压表示值稳定，读数才准确；若不控制热平衡，装置内可能有局部温差，导致读数不准。若升温过快，热量来不及扩散，聚集在局部，导致读出的 U_t 和 U_P 不准确，且 U_t 和 U_P 会随着热量的扩散而不断变化，不易读数。

3. 转动三通活塞应注意什么？换水应如何操作？

答：(1) 三通活塞属玻璃制品易损坏，故转动时应缓慢，并用另一只手扶住活塞外壳；(2) 换水要先将加热器电源断开，再用虹吸方法将杯内水吸出。或将玻璃系统拿下放在备用杯子上，再将玻璃杯内的水直接倒入塑料桶。

4. 用大气压强计测大气压的步骤是怎样的？

答：首先调节底部旋钮，使水银杯内的水银面刚好和象尖针尖接触；然后使视线与游标零线水平，再调节旋钮，使游标零线与水银凸面相切，读数。

5. 为何铜电阻温度传感器采用四端接法可减少引线电阻对测量的影响？

答：采用四端接法时，电流端的引线电阻和接触电阻折合到电源回路的其他串联电阻中，不会影响到电阻上的电流，电压端的引线电阻和接触电阻由于与电压表内阻相比甚小，影响也不大。

6. 实验中保持水沸腾时，若数字仪表 U_P 单调下降，可能是什么问题？

答：可能是由于仪器漏气。由于沸腾时A泡内气压与大气压差别较大，三通活塞很可能漏气，从而使A泡内气体减少，气压下降，从而导致 U_P 单调下降。

$P/10^5Pa$

在直线上取两点，

A(20.25, 0.9650) 和 B(85.00, 1.1600)

设 $P = a + bt$

则 $b = \frac{P_B - P_A}{t_B - t_A} = \frac{1.1600 - 0.9650}{85.00 - 20.25} = 0.003012$

$a = P_A - bt_A = 0.9650 - 0.003012 \times 20.25$

$= 0.904007$

故直线方程为

$P = 0.904007 + 0.003012t$

P的单位为0.1MPa，t的单位为℃

B(85.00, 1.1600)

A(20.25, 0.9650)

A 泡中气压 P 与温度 t 关系曲线图

清华大学实验报告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 周祥 （同组姓名 _____）

作实验日期 2012年 11月 8日 教师评定

初始室温 $t_1 = 20.0°C$, $H_1 = 100.31$

实验后 $t_2 = 22.5°C$, $H_2 = 100.27$

$\Delta H = -(18.2 - 1.9)\times10^{-5} \times \frac{100.31\times20.0 + 100.27\times22.5}{2} = -0.3474$

$H = \frac{100.31 + 100.27}{2} - 0.3474 = 99.94$

$P_c = H\times10^3 = 0.9994\times10^5\ Pa$

$P_{a1} = 0.9986\times10^5 Pa$, $t_{b1} = 99.59°C$; $P_{a2} = 0.9999\times10^5 Pa$, $t_{b2} = 99.63°C$

$t_b = 99.59 + \left(\frac{0.9999 - 0.9986}{0.04}\right)^{-1}\times(0.9994 - 0.9986) = 99.61°C$.

定标：
$U_m = 40.70mV$, $U_0 = 0.03mV$

室温下：$U_t = 95.44\ mV$, $t = 20.0°C$. $U_t = 95.44\ mV$.

$\Delta t = \frac{80-20}{7}$. $\Delta U_t = U_{t0}\alpha_R\Delta t = \frac{95.44\times4.26\times10^{-3}}{1+4.26\times10^{-3}\times20.0}\times\frac{60.}{7} = 3.21\ mV$

序号	U_t/mV	U_p/mV
1	95.44	-1.84
2	98.64	-0.75
3	101.88	0.33
4	105.07	1.40
5	108.30	2.47
6	111.49	3.54
7	114.69	4.59
8	117.89	5.62

电脑拟合
$r = 0.99998$

直线
$P = a + bt = 0.9007428 + 0.0030938t$
P — 0.1MPa, t — °C.

由 $U_{tb} = 126.14$ $U_{pb} = 8.24$

$\alpha_p = \frac{b}{a} = \frac{0.003093}{0.9007428} = 3.43\times10^{-3}\ K^{-1}$

$\delta\alpha_p = (0.018 + 5\times0.02)\times10^{-3} = 0.118\times10^{-3}\ K^{-1}$

$\therefore \alpha_{铂铑} = \alpha_p + \delta\alpha_p = 3.55\times10^{-3}\ K^{-1}$

李昕瑜

清华大学实验报告

系别 精仪系 班号 精11 姓名 周祥 (2011010495) (同组姓名)

作实验日期 2012年 12月 6日 教师评定 9-

直流电桥测电阻及组装数字温度计

一、实验目的

(1)了解单电桥测电阻的原理，初步掌握直流单电桥的使用方法；

(2)单电桥测量铜丝的电阻温度系数，学习用作图法和直线拟合法处理数据；

(3)了解双电桥测量低电阻的原理，初步掌握双电桥的使用方法。

二、实验原理

1. 惠斯通电桥测电阻

惠斯通电桥(单电桥)原理如图1。其中R_1、R_2和R是已知阻值的标准电阻，它们与被测电阻R_X连成一四边形，每一条边称作电桥的一个臂。A和C之间接电源E；对角B和D之间接有检流计G，它像桥一样。若调节R使检流计中电流为零，桥两端B、D点电位相等电桥达到平衡，此时有 $I_1R = I_2R_X$，$I_1R_1 = I_2R_2$

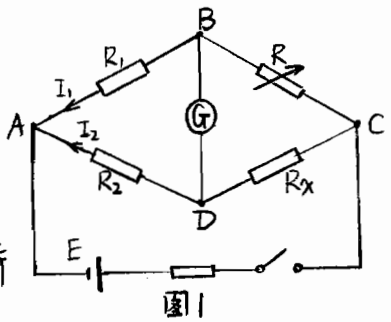


图1

两式相除，有

$$R_X = \frac{R_2}{R_1} \cdot R$$

只要检流计足够灵敏，上式就能很好成立，被测电阻值R_X可仅从三个标准电阻的值求得，而与电源电压无关。

单电桥的实际线路中将R_2和R_1做成比值为C的比率臂，则被测电阻为

$$R_X = CR$$

其中$C = R_2/R_1$，共分7个档，0.001～1000，R为测量臂，由4个十进位的电阻盘组成。

2. 铜丝的电阻温度系数

多数金属的电阻随温度升高而增大，有如下关系式

$$R_t = R_0(1+\alpha_R t)$$

式中R_t、R_0分别为t、0℃时金属的电阻值；α_R为电阻温度系数，单位是$℃^{-1}$。α_R一般与温度有关，但本实验所用纯铜材料在-50℃～100℃的范围内α_R可视为常数，即R_t与t呈线性关系。于是

$$\alpha_R = \frac{R_t - R_0}{R_0 t}$$

利用金属电阻随温度变化的性质，可制成电阻温度计来测温。

3. 双电桥测低电阻

单电桥测电阻时，被测臂上引线和接点等处都有一定电阻，约为$10^{-2}\Omega$～$10^{-4}\Omega$量级。这些引线电阻和接触电阻与待测的R_X串联在一起，对低值电阻的测量影响很大。为减小它们的影响，在双电桥中作了两处明显改进：

(1)被测电阻与测量盘电阻均采用四端接法，如图2。其中C_1、C_2是电流端，接电源回路，从而将两端的引线电阻和接触电阻折合到电源回路的其他串联电阻中；P_1、P_2为电压端，通常接测量用的高电阻回路或电流为零的补偿回路，从而使

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

这两端的引线电阻和接触电阻对测量的影响相对减小了。

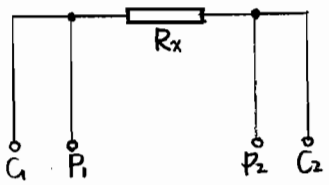


图2

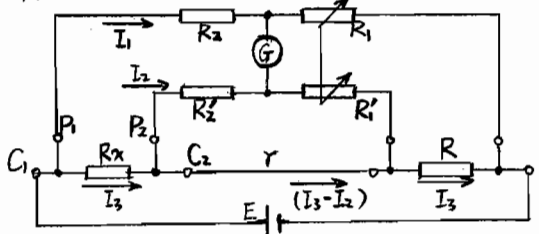


图3

(2) 如图3所示双电桥中增设了两个臂R_1'和R_2'，其阻值较高。流过检流计G的电流为零时，电桥达到平衡，于是可得以下三个方程

$$I_3R_x + I_2R_2' = I_1R_2$$

$$I_3R + I_2R_1' = I_1R_1$$

$$I_2(R_2' + R_1') = (I_3 - I_2)r$$

上式中各量的意义如图3。解上列方程可得

$$R_x = \frac{R_2}{R_1}R + \frac{R_1'r}{R_1'+R_2'+r}\left(\frac{R_2}{R_1} - \frac{R_2'}{R_1'}\right)$$

双电桥在结构设计上尽量做到 $R_2/R_1 = R_2'/R_1'$，并尽量减小电阻r，因此可得

$$R_x = \frac{R_2}{R_1}R$$

同样，在仪器中将$R_2/R_1 = C$做成比率臂，则

$$R_x = CR$$

这样，电阻R和R_x的电压端附加电阻由于和高阻值臂串联，其影响减小了；两个外侧电流端的附加电阻串联在电源回路中，其影响可忽略；两个内侧电流端的附加电阻和小电阻r相串联，相当于增大了r，其影响也可忽略。于是只要将被测低电阻接四端法接入双电桥进行测量，就可像单电桥那样用式 $R_x = CR$ 来计算了。

4、非平衡电桥

非平衡电桥将检流计G去掉，通过测其两端电压U_t来确定电阻，如图4。若电源E一定，当某桥臂待测电阻R_t发生变化时，非平衡电桥的输出电压U_t也发生变化，其公式为 $U_t = E\left(\frac{R_1}{R_1+R_2} - \frac{R}{R+R_t}\right)$

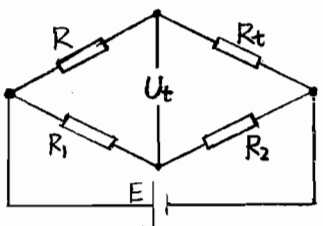


图4

一般U_t与t的关系不是线性的，为组装数字温度计，适当选择电桥参数(R_1、R_2、R和E)，使其非线性项误差很小，在一定温度范围内呈近似线性关系。这就是线性化设计。

5、互易桥

利用现有的QJ-23型惠斯通电桥改装为非平衡桥，用铜丝电阻作感温元件，阻值约20Ω。用惠斯通电桥测量时一般选C=0.01，将R置于2000Ω，由该电桥线路，此时$R_2 \approx 10\Omega$，$R_1 \approx 1000\Omega$，这种阻值配比U_t测量误差较大。现巧改惠斯通电桥，将电源E与检流计G互易位置（图5与图6等效），这样桥臂阻值间的关系较合理（R_1与R同数量级，R_2与R_t同数量级）。将这种电源E，检流计G互换的惠斯通电桥称为互易

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

桥。将G再换成mV表，就改成至易了的非平衡桥，用它测量U_t误差就会减小。

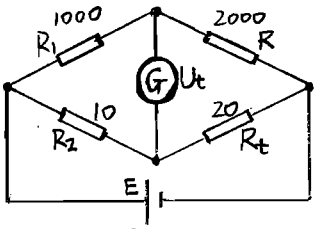


图5

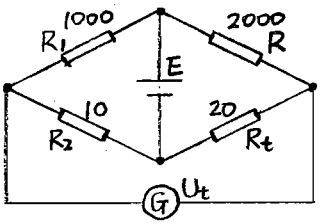


图6

6、线性化设计

欲组装一个温度范围在0~100℃的铜电阻数字温度计，必须将U_t~t的关系线性化，当满量程为19.999mV的4$\frac{1}{2}$数字电压表来显示温度值时，要求显示值：$U_t=\frac{1}{10}t$（mV）

当温度t=0℃时，U_0=0mV，此时至易桥为平衡桥有：

$$\frac{R_2}{R_1}=C,\quad \frac{R_0}{R}=C \text{ 或 } R=\frac{R_0}{C}$$

式中R_0为0℃是铜丝电阻值，R为测量臂电阻，对铜电阻来说，在0~100℃范围内R_t与t是线性关系：$R_t=R_0(1+\alpha t)$，这样式$U_t=E\left(\frac{R_1}{R_1+R_2}-\frac{R}{R+R_t}\right)$可改写为：

$$U_t=E\left[\frac{1}{1+C}-\frac{1}{1+C(1+\alpha t)}\right]$$

考虑到本实验中选C=0.01≪1，铜电阻温度系数$\alpha\sim10^{-3}/℃$，则上式还可进一步简化为：

$$U_t=\frac{EC\alpha}{(1+C)^2}t+\Delta U$$

ΔU为非线性误差项。忽略ΔU后，有

$$E=\frac{(1+C)^2}{10C\alpha}$$

至此，已完成了线性化设计，选择电桥参数C=0.01，$R=\frac{R_0}{C}$，$E=\frac{(1+C)^2}{10C\alpha}$就能用非平衡桥组装成数字温度计，$U_t=\frac{1}{10}t+\Delta U$（mV）。

三、实验仪器

1. QJ-23型携带式单电桥

2. 测铜丝电阻温度系数的实验装置

由调压器、电加热器、温度计、直流电机、铜丝电阻、稳压电源、单电桥、搅拌器构成。

3. QJ44型双电桥

四、电桥的测量误差简析

1. QJ-23型单电桥不确定度计算

使用QJ-23型单电桥在一定参考条件下，电桥的基本误差极限E_{um}可表示为

$$E_{um}=\pm[\alpha\%]\left(CR+\frac{CR_N}{10}\right)$$

上式中C为比率值，R为测量盘示值。R_N为基准值，普取为5000Ω。等级指数α主要反映

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

了电桥中各标准电阻准确度。对于QJ-23电桥，当测量范围在10Ω~9999Ω时，$\alpha=0.2$（电源电压E=4.5V）；10Ω以下，$\alpha=2$（E=4.5V）；在10kΩ~999.9kΩ时，$\alpha=0.5$（E=6V）；1MΩ以上，$\alpha=2$（E=15V以上）。

若测量范围或电源、检流计条件不符合等级指数对应的要求时，电桥平衡后再改变R_x，检测计未见偏转。将检流计灵敏阈（0.2分格）对应的被测电阻的变化量Δ_S叫电桥的灵敏阈，则Δ_S可这样测得：平衡时，将R人为调偏到R+ΔR，使检流计偏转Δd分格，则

$$\Delta_S = 0.2C\Delta R/\Delta d$$

Δ_S反映了平衡判断中可能包含的误差。Δ_S愈大，电桥愈不灵敏。要减小Δ_S，可适当提高电源电压或外接更灵敏的检流计。当测量范围及条件符合仪表说明书规定的要求时，Δ_S的影响可忽略；若不然，则应由下式得出测量结果的不确定度：

$$\Delta_{Rx}=\sqrt{E_{lim}^2+\Delta_S^2}$$

2. QJ44型双电桥不确定度计算

QJ44型双电桥在环境温度（20.0±1.5）℃、相对湿度40%~60%等条件下，电桥基本误差极限也写成

$$E_{lim}=(\alpha\%)\left(CR+\frac{CR_N}{10}\right)$$

其中R_N取0.1Ω。α为等级指数，当测量范围在0.01Ω~11Ω时，$\alpha=0.2$；在0.001Ω~0.91Ω时，$\alpha=0.5$；在0.0001Ω~0.0091Ω时，$\alpha=1$。测量"不灵敏"引起的误差忽略。

故电阻测量结果的不确定度为

$$\Delta_{Rx}=(\alpha\%)\left(CR+\frac{C}{100}\right)$$

五、实验任务及步骤

1. 惠斯通电桥测电阻

(1) 熟悉电桥结构，预调检测计零位。

(2) 测不同量级的待测电阻，根据电阻标称值选定C并预置测量盘；接着调节电桥平衡而得读数C和R值；然后测出偏离平衡位置Δd分格所需的测量盘示值变化ΔR。

(3) 计算CR，分析误差，给出测量结果。

2. 单电桥测铜丝的电阻温度系数

(1) 测量加热前的水温及铜丝电阻值。

(2) 从起始温度升温，每隔5℃~6℃左右测一次温度t及相应阻值R_t。要求在大致热平衡时进行测量。

(3) 测量后用计算机直线拟合检验数据，作t与R_t直线拟合相关系数r应在0.999以上。

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名 _____ ）

作实验日期 年 月 日 教师评定

3.组装数字温度计

(1) 将 QJ-23 型惠斯通电桥改装成互易桥。电源E接原电桥G的"外接"端，数字电压表接到原电桥的B端。

(2) 按所选电桥参数组装数字温度计，即 $C=0.01$，$R=\frac{R_0}{C}$，$E=\frac{(1+C)^2}{10C\alpha}$。

(3) 用实验检验组装的数字温度计。检验 $U_t \sim t$ 线性关系。

六、数据处理

1. 惠斯通电桥测电阻

仪器组号 9，电桥型号 QJ23.

电阻标称值/Ω	120	200	1k	11k	360k
比率臂读数C	0.1	0.1	1	10	1000
准确度等级指数α	0.2	0.2	0.2	0.5	0.5
平衡时测量盘读数R/Ω	1193	1913	996	1098	360
平衡后检流计偏Δd/格	4.5	8	9.5	1.5	1.5
与Δd对应的ΔR/Ω	1	1	1	1	9
测量值CR/Ω	119.3	191.3	996	10980	360000
$\lvert E_{lim}\rvert$/Ω	0.3386	0.4826	2.992	79.90	4300
Δ_s/Ω	0.004444	0.002500	0.02105	1.333	1200
Δ_{Rx}/Ω	0.3	0.5	3	80	4×10^3
$(R_X=CR\pm\Delta_{Rx})$/Ω	119.3 ± 0.3	191.3 ± 0.5	996 ± 3	$(1.098\pm0.008)\times10^4$	$(3.60\pm0.04)\times10^5$

上表中，$|E_{lim}|=(\alpha\%)(CR+500C)$，$\Delta_s=0.2C\Delta R/\Delta d$，$\Delta_{Rx}=\sqrt{E_{lim}^2+\Delta_s^2}$

2. 单电桥测铜丝的电阻温度系数

实验中测得的数据整理如下表其中第一组数据为加热前的水温及铜丝电阻值。

t/℃	15.01	20.36	25.98	31.64	36.63	42.00	48.44	53.55	58.48	63.79
R_t/Ω	16.22	16.58	16.94	17.32	17.65	18.00	18.42	18.76	19.08	19.42

实验时用计算机拟合得

$R_t = 15.24005 + 0.06564t$，$r = 0.99999$

$\alpha_R = \frac{0.06564}{15.24005} = 4.30694531\times10^{-3} = 4.31\times10^{-3}\ ℃^{-1}$

清 华 大 学 实 验 报 告

系别_____ 班号_____ 姓名_____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

根据测得的数据绘制的 $R_t - t$ 曲线见附页，由此曲线

$$R_t = 15.240052 + 0.065650t \quad , \quad r^2 = 0.999981$$

$$\alpha_R = \frac{0.065650}{15.240052} = 0.0043077280\text{8} = 4.31\times10^{-3}\ ^\circ C^{-1}$$

这与实验时测得的 α_R 非常接近，取近似以后两者相等。

3. 组装数字温度计

实验时，用 2 中测量的 α_R 计算得

$$E = \frac{(1+C)^2}{10C\alpha_R} = \frac{(1+0.01)^2}{10\times0.01\times4.3069453\times10^{-3}} = 2368\ mV$$

同时 $R = \frac{R_0}{C} = \frac{15.24005}{0.01} = 1524\ \Omega$

检验所装数字温度计的数据整理如下：

$t/^\circ C$	49.25	53.83	59.12	64.26	70.04	75.21
U_t/mV	4.91	5.34	5.90	6.41	6.98	7.49

对这组数据进行拟合的曲线见附页。此曲线方程为

$$U_t = 0.099858t - 0.014715 .$$

$a = -0.01475$，$b = 0.099858$，$r^2 = 0.999857$

这表明组装的数字温度计较好地满足了 $U_t = \frac{1}{10}t\ mV$ 的设计要求。

下面分析 α_R、R_0 不准确对实验结果的影响。

由于 E 按公式 $E = \frac{(1+C)^2}{10C\alpha_R}$ 求出，若 α_R 的测量结果偏大，则求出的 E 偏小，使用电压较小的电源使各次测得的 U_t 也偏小，从而导致组装的数字温度计示值偏小；若 α_R 测量结果偏小，对实验结果的影响相反。

若 R_0 测量结果偏大，则由式 $R = \frac{R_0}{C}$ 算出的 R 较大。由此较大的电阻组装温度计时，由于 $U_t = E\left(\frac{R_1}{R_1+R_2} - \frac{R}{R+R_t}\right)$，R 偏大则实际测得的 U_t 偏小，故 R_0 偏大也会使实验中组装的温度计的示值偏小。

按照拟合出的直线公式，当 $U_t = 5mV$ 时，相应的温度

$$t = \frac{U_t - a}{b} = \frac{5 + 0.014715}{0.099858} = 50.09\ ^\circ C$$

若按 $U_t = \frac{1}{10}t$ 的关系，$t = 10U_t = 50\ ^\circ C$，相对误差仅为

$$\beta = \frac{50.09 - 50}{50}\times100\% = 0.18\%$$

清华大学实验报告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名 _____ ）

作实验日期 年 月 日 教师评定

七、思考题

1. 计算索勒级数在 $t_0=0$ 处展开时的非线性项 ΔU.

答: $U_t = \frac{E}{1+C} - \frac{E}{1+C(1+\alpha t)}$

故 $U_t' = \frac{E\alpha C}{(1+C+\alpha C t)^2}$, $U_t'' = -2\frac{E(\alpha C)^2}{(1+C+\alpha C t)^3}$, $U_t''' = 2\times 3\cdot\frac{E(\alpha C)^3}{(1+C+\alpha C t)^4}$, ...,

$$U_t^{(n)} = (-1)^{n-1} n! \frac{E\cdot(\alpha C)^n}{(1+C+\alpha C t)^{n+1}}$$

故 $t_0=0$ 处 U_t 的展开式为

$$U_t = \sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{n!}U_t^{(n)}\Big|_{t=0} t^n = \sum_{n=1}^{\infty}(-1)^{n-1}\frac{E\cdot(\alpha C)^n}{(1+C)^{n+1}}\cdot t^n = \frac{E\alpha C}{(1+C)^2}t + \sum_{n=2}^{\infty}(-1)^{n-1}\frac{E\cdot(\alpha C)^n}{(1+C)^{n+1}}t^n$$

故非线性项

$$\Delta U = \sum_{n=2}^{\infty}(-1)^{n-1}\frac{E\cdot(\alpha C)^n}{(1+C)^{n+1}}\cdot t^n.$$

2. 惠斯通电桥E、G互易的实验方法有何启示。

答: 实验中通过巧妙地互换E、G的位置，达到了减小 U_t 测量误差的目的，满足了线性化设计的要求。通过比较改动前后的电路图可以发现，两种电路有高度的对称性，实际上它们也是等效的。这启示我们在进行物理研究和实验时可以多留意这种对称性，善于用等效的体系从不同的角度研究问题。另外在遇到 U_t 测量不准确的问题时，并没有完全推翻之前的实验方案，而是在原有方案基础上进行了巧妙改动，这启示我们不要轻易放弃原有的研究思路，并善于对原有方案进行创造性的改进。

3. 总结由平衡桥→非平衡桥→数字温度计演变的物理思想。

答: 平衡桥是一种精确测电阻的方法，但在实际操作中，由于G是否偏转还需要人为地进行判断，因此需要调整电源电压以满足更高的对精确的要求。但若从另一种角度思维，直接将G的偏转与否量化，即直接测量 U_t 也可以达到测电阻的目的，平衡桥与非平衡本质上是一回事，都服从基尔霍夫定律，但后者在测量上一定程度上减少了人为因素的影响。这与物理学严谨的风格一致。

测电阻只是电桥应用的一个方面，电桥的原理还可用于组装温度计从而测温。物理学的研究也正是如此，要善于发现物理规律的各种应用，从而造福人类。另外，在组装数字温度计的过程中，采用了将原电桥改装成互易桥的方法，这体现了对称与等效的思想。

4. 为何用单电桥测电阻一般比伏安法测量的准确度高？单电桥中检流计的准确度对实验中所用的平衡桥法测量有无影响？

答: 只要检流计足够灵敏，式 $R_x = \frac{R_2}{R_1}R$ 就能相当好地成立，被测电阻值 R_x 可

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

仅从标准电阻的值求得，与电源电压无关，也没有由内、外接带来的误差。这一过程相当于将R_x与标准电阻相比较，故准确度高。由于检流计G不偏转是电桥平衡的标志，故G的灵敏度影响着测量精确度。

5. 若用单电桥测一微安表内阻，应怎样保证被测微安表不超过量程？

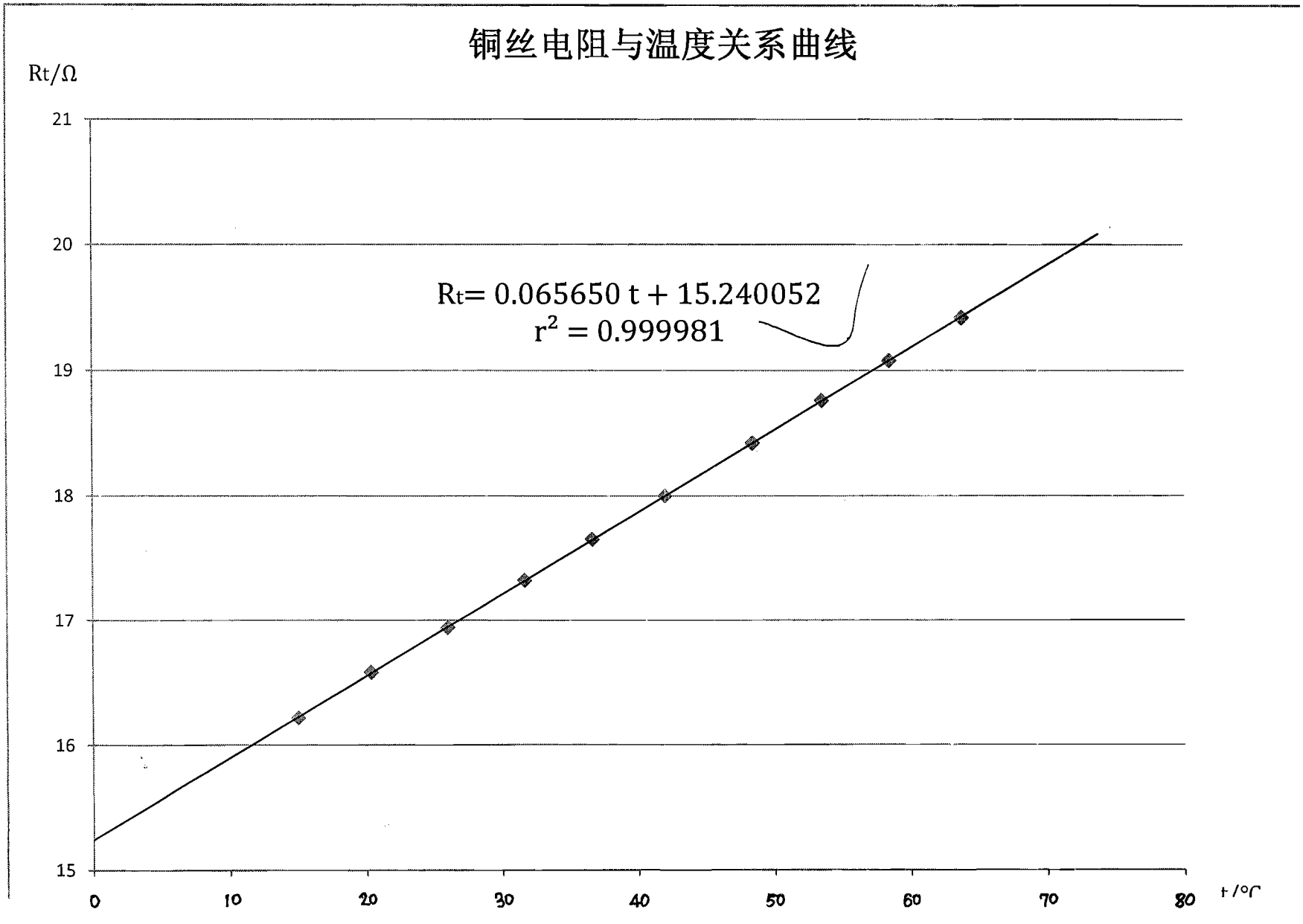
答：可使用较高的比率臂，这样相当于在微安表支路上串接了一个较大阻值的电阻。在保证精度的前提下，选用尽可能大的比率臂的同时，可采用电压较小的外接电源。

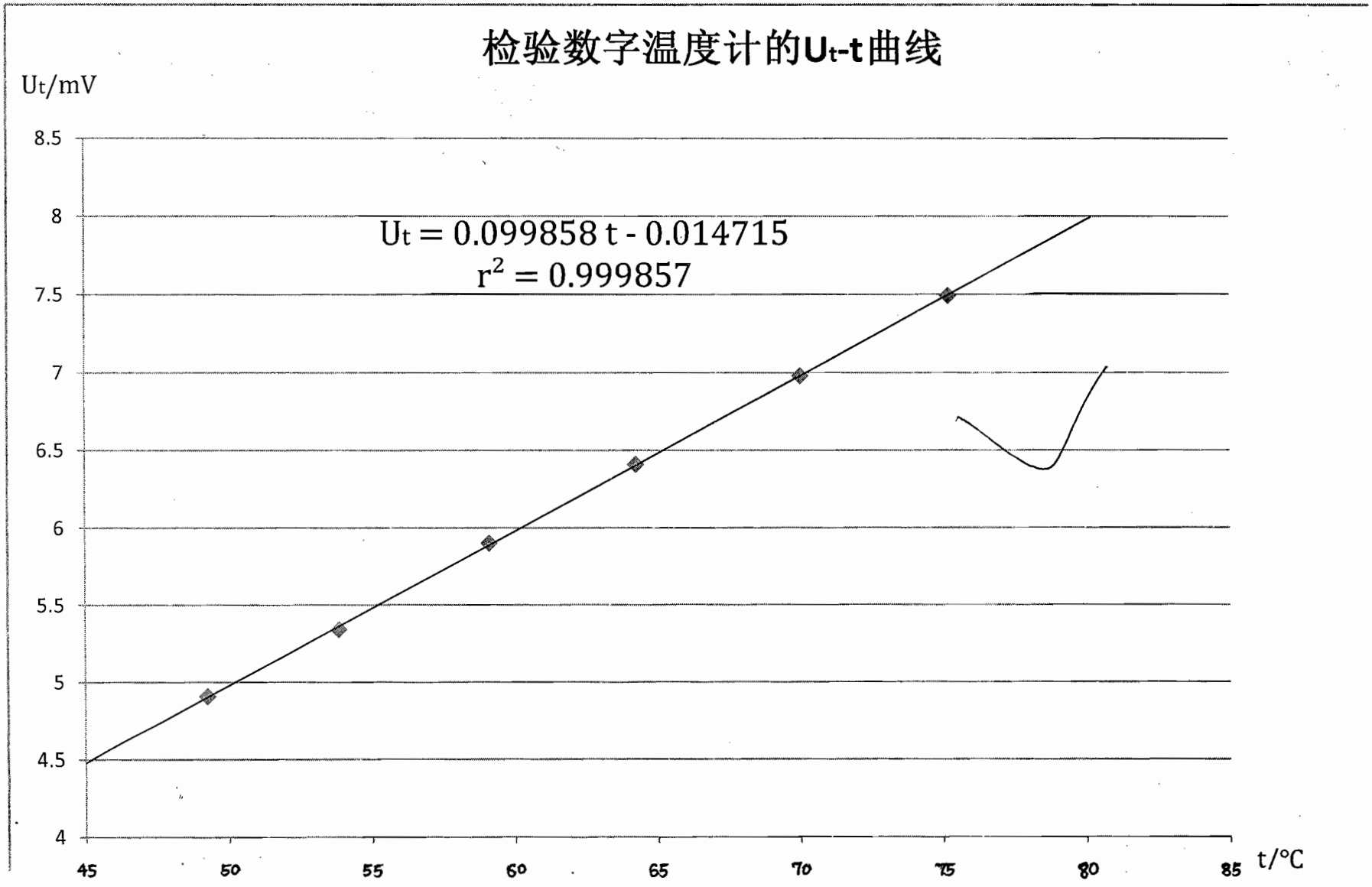
6. 用电桥测电感线圈的直流电阻时，为防止通断瞬间产生大电流损伤检流计或干扰测量，接通时应先按B、后按合G，断开时应先断G后断B，为什么？

答：因为电路中有电感线圈时，在电路通、断的瞬间，电感上将产生较大的感应电动势，从而在电路中引起感应电流，从而可能损坏检流计或干扰测量。

7. 试从E_{lim}计算式说明为什么选取比率臂时一般应使电桥×1000Ω的测量盘尽可能用上？

答：由于$E_{lim}=\pm(\alpha\%)(CR+\frac{CR_N}{10})$，对于同一被测电阻，选不同比率臂时CR值基本相等，R_N为定值，α也是确定的，这样，选取尽可能小的比率臂C可使E_{lim}的值减小，所以选尽量小的C值，也即尽可能使用×1000Ω的测量盘是为减小测量时电桥的基本误差极限，从而减小电阻测量值的不确定度，提高电阻测量的精确度。


铜丝电阻与温度关系曲线
Rt/Ω
21
20
19
18
17
16
15
Rt= 0.065650 t + 15.240052
r² = 0.999981
0
10
20
30
40
50
60
70
80
t/°C


检验数字温度计的Ut-t曲线
Ut/mV
8.5
8
7.5
7
6.5
6
5.5
5
4.5
4
Ut = 0.099858 t - 0.014715
r2 = 0.999857
45
50
55
60
65
70
75
80
85
t/°C

清华大学实验报告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 闫禅 （同组姓名 _____）

作实验日期 2012 年 12 月 6 日 教师评定

1. 惠斯通电桥测电阻 仪器组号 9，电桥型号 QJ23

标称值/Ω	120	200	1k	11k	360k
比率臂C	0.1	0.1	1	10	1000
平衡时R/Ω	1193	1913	996	1098	360
Δd	4.5	8	9.5	1.5	1.5
ΔR/Ω	1	1	1	1	9

2. 电阻温度系数

t/°C	15.01	20.36	25.98	31.64	36.63
Rt/Ω	16.22	16.58	16.94	17.32	17.65

t/°C	42.00	48.44	53.55	58.48	63.79
Rt/Ω	18.00	18.42	18.76	19.08	19.42

拟合：r=0.99999，a=15.24005，b=0.06564

$R_0 = 15.24005\ \Omega$，$\alpha_R = \frac{b}{a} = \frac{0.06564}{15.24005} = 0.004306945\ 3\ ^\circ C$

3. 组装数字温度计

$E = 2.368\ V$

t/°C	49.25	53.83	59.12	64.26	70.04	75.21
Ux/mV	4.91	5.34	5.90	6.41	6.98	7.49

12/19 陈浩然 134 12/

清华大学实验报告

系别 精仪器 班号 精11 姓名 周祥(2011010495)（同组姓名 ）

作实验日期 2012年 11月 8日 教师评定 9十

用传感器测空气相对压力系数

一. 实验目的

(1) 加深对理想气体状态方程和查理定律的理解；
(2) 初步了解铜电阻温度传感器和硅压阻式差压传感器的工作原理并掌握其使用方法。
(3) 学习用作图法和计算机作直线拟合法处理实验数据。

二. 实验原理

1. 理想气体的查理定律

对于理想气体，定容条件下，有

$$p = \frac{p_0 T}{T_0} = p_0 \frac{T_0 + t}{T_0} = p_0(1 + \alpha_p t)$$

式中，t 为气体摄氏温度，$T_0 = 273.15\ K$，p_0 和 p 分别为气体在 0℃ 和温度 t 时的压强；α_p 为相对压力系数，定义为 $\alpha_p = \frac{\Delta p}{p_0 \Delta t}$。对理想气体，$\alpha_p = \frac{1}{T_0} = 3.66 \times 10^{-3} K^{-1}(℃^{-1})$。实际气体相对压力系数与理想气体差甚小。

利用查理定律可制作定容气体温度计。

2. 铜电阻温度传感器

在 −50℃～100℃ 范围内，铜丝电阻值 R 与温度 t 有良好的线性关系

$$R = R_0(1 + \alpha_R t)$$

式中，R_0 为 0℃ 时的电阻值，α_R 称为电阻温度系数。本实验中使用的电阻的 $\alpha_R = 4.26 \times 10^{-3}℃^{-1}$。当铜丝电阻中通以恒定电流 I 时，铜丝电阻两端电压 U_t 与温度 t 有如下关系：

$$U_t = U_{R0}(1 + \alpha_R t)$$

U_{R0} 为 0℃ 时的电压，$U_{R0} = IR_0$。若测出纯水沸点处铜丝电阻的电压 U_b 并查出沸点温度，则利用上式可得

$$t = \frac{U_t}{U_b}\left(\frac{1}{\alpha_R} + t_b\right) - \frac{1}{\alpha_R}$$

3. 扩散硅压阻式差压传感器

压阻式差压传感器利用半导体材料的压阻效应制成。PPT-1型扩散硅压阻式差压传感器结构示意图如图1。其核心为硅膜片，此膜片是用特殊方法得到的十字形四端应变片(如图2)。当膜片受应力时，若将一恒定电压 E 加在 M 和 N 两端上，在剪切应力作用下，从 A 和 B 两端会输出一与压差 Δp 成线性关系的电压 U_p，即

$$U_p = U_0 + k_p \Delta p$$

式中 U_0 为压差为 0 时的输出电压，系数 k_p 一般为一常数。若传感器接口 D 通大气，接口 C 通被测介质，则

$$p = p_C + \frac{U_p - U_0}{k_p}$$

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

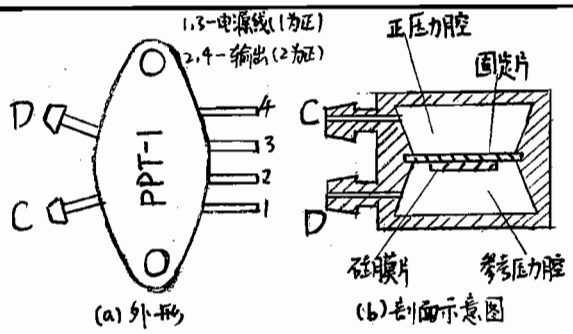


图1 差压传感器结构示意图

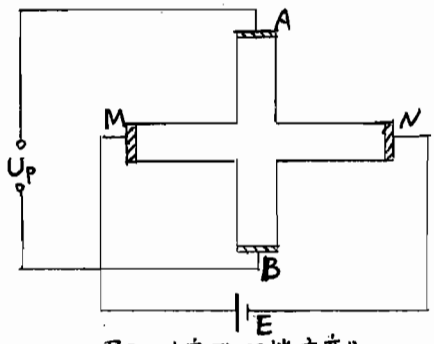


图2 十字形四端应变片

式中P_0为大气压强。该压阻式差压传感器测量范围为$0\sim10^5$Pa，综合精度为0.3%。它具有体积小、灵敏度高、稳定性好等优点。

三、实验仪器与实验装置

1. 实验装置主要部分示意图如图3。

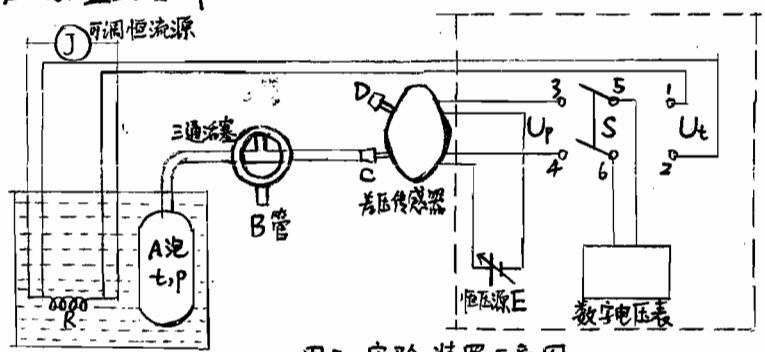


图3 实验装置示意图

2. 差压传感器定标装置

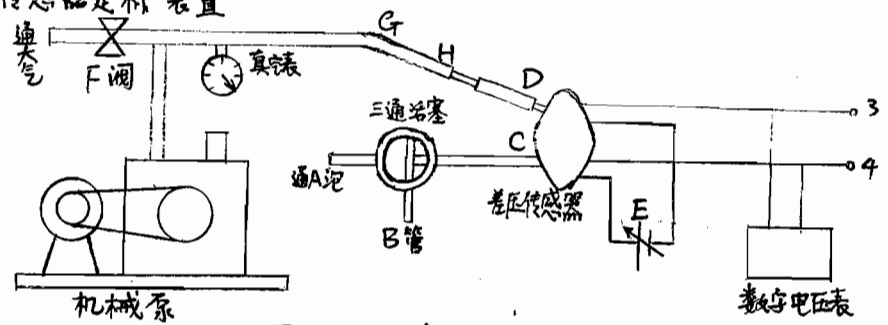


图4 差压传感器定标装置示意图

3. 福丁气压计

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名 _____ ）

作实验日期 年 月 日 教师评定

四、实验步骤及注意事项

1. 差压传感器的定标。用图4所示定标装置准确测定传感器的U_0和k_P。先转动三通管使传感器C口与B管相通，并使D口与机械泵相连，用泵从D口抽气。待真空表示数为760 mm不动时，压差$\Delta p = p_c$，传感器输出电压记为U_m。然后停泵，使D口也通大气，此时$\Delta p_0 = 0$，数字表读数即为U_0，$k_P = \dfrac{U_m - U_0}{p_c}$。

2. 测若干组(U_t, U_P)值。按图3接线并令C与A泡相通。调节恒流源，使电流约为2mA。记下室温下铜丝电压值U_t和传感器输出电压值U_P。加热，铜丝电压每增加约0.5 mV记一次(U_t, U_P)值；最后记下水沸腾时各电压值，记为(U_{tb}, U_{pb})。

3. 实验前后用大气压计各测一次大气压，同时记下室温值。

4. 实验注意事项

(1) 加热时将搅拌器电源开关及加热开关同时接通，并调控温旋钮至所需温度。搅拌器转速应适当。

(2) "热得快"不能干烧。换水应用虹吸方法或直接将玻璃杯内的水倒入塑料桶。

(3) 小心操作以免损坏玻璃仪器。

(4) 停泵后应立即将机械泵抽气口通大气。

(5) 实验完毕，将加热器的调速、温控旋钮旋至最小位置，并断开电源开关和加热开关。

五、系统误差分析

1. 式$p = p_0(1+\alpha_p t)$仅适用于定容、定质量理想气体。由于①空气只近似为理想气体；②A泡壁上气体吸附量随温度而变，且泡内可能混入水蒸气；③A泡容积因热胀冷缩而变；④与A泡相连的C管等部分中的气体温度不均匀等原因，实验中存在较明显的系统误差。下面分析③和④的影响。

设A泡至C口间细管部分体积为v，A泡体积为V，并假定体积v内气体的温度近似为室温T_1。列出气体初、末态参量如下：

气体种类	初态	末态
A泡内气体	V, p_1, T_1	$V[1+\beta(T-T_1)], p, T$
v内气体	v, p_1, T_1	v, p, T_1

其中，β为A泡玻璃的体膨胀系数，约$1.2\times10^{-5}\,K^{-1}$。由于气体总量不变，有

$$\frac{p_1 V}{T_1} + \frac{p_1 v}{T_1} = \frac{pV[1+\beta(T-T_1)]}{T} + \frac{pv}{T_1}$$

即

$$\frac{pV}{T} = \frac{p_1 V}{T_1}\left(1+\frac{v}{V}\right)\left\{1+\frac{T}{V}\left[\frac{v}{T_1} + \frac{V\beta(T-T_1)}{T}\right]\right\}^{-1}$$

由于$v/V \ll 1$，$\beta(T-T_1) \ll 1$，将右式展开并略去高阶小量后得

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

$$p=\frac{p_1T}{T_1}\left[1-\left(\beta+\frac{\gamma}{VT_1}\right)(T-T_1)\right]$$

可见p与T之间不是严格的线性关系。因而本实验中在20℃左右时，按以下经验公式对α_p的测得值进行修正：

$$\delta\alpha_p=\left(0.018+\frac{5\gamma}{V}\right)\times10^{-3}\ K^{-1}$$

2. 福丁气压计的系统误差

由于气压计在0℃下标定，水银密度、黄铜标尺长度会随温度变化，从而引起系统误差，故应对气压计示值H进行修正。其修正值为

$$\delta H=-(18.2-1.9)\times10^{-5}Ht$$

式中，t为测量时的大气温度(℃)，由黄铜管上的水银温度计读出。$18.2\times10^{-5}℃^{-1}$是水银的体积膨胀系数，$1.9\times10^{-5}℃^{-1}$是黄铜的线胀系数。修正后的大气压强为

$$p_c=H+\delta H$$

这里的p_c是用托(Torr)作单位的，1 Torr = 1 mmHg = 133.32 Pa。

六、数据处理

1. 大气压强及其修正

实验前室温 $t_1=20.0℃$，$H_1=100.31$（10毫巴）

实验后室温 $t_2=22.5℃$，$H_2=100.27$（10毫巴）

修正项 $\delta H=-(18.2-1.9)\times10^{-5}\times\frac{H_1t_1+H_2t_2}{2}$

$$=-(18.2-1.9)\times10^{-5}\times\frac{100.31\times20.0+100.27\times22.5}{2}$$

$$=-0.3474\ (10毫巴)$$

故 $p_c=H+\delta H=\frac{100.31+100.27}{2}-0.3474=99.94$（10毫巴）

$$=99.94\times10^3\ Pa=0.9994\times10^5\ Pa.$$

2. t_b的计算

查表，得 $p_{c1}=0.9986\times10^5$ Pa时，$t_{b1}=99.59℃$；

$p_{c2}=0.9999\times10^5$ Pa时，$t_{b2}=99.63℃$.

由线性内插法 $\frac{p_c-p_{c1}}{t_b-t_{b1}}=\frac{p_{c2}-p_{c1}}{t_{b2}-t_{b1}}$

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

故 $t_b = t_{b1} + \frac{(p_c - p_{c1})(t_{b2} - t_{b1})}{p_{c2} - p_{c1}} = 99.59 + \frac{(0.9994 - 0.9986) \times (99.63 - 99.59)}{0.9999 - 0.9986}$

$= 99.61\,^{\circ}C$

3. 定标与 k_p 的值.

定标时测得 $U_m = 40.70\,mV$，$U_0 = 0.03\,mV$

又由前面计算 $p_c = 0.9994 \times 10^5\,Pa$

故 $k_p = \frac{U_m - U_0}{p_c} = \frac{40.70 - 0.03}{0.9994 \times 10^5} = 4.06944 \times 10^{-4}\,mV/Pa$

4. (U_t, U_p) 与 p、t 的数据表格

实验开始时室温 $t = t_1 = 20.0\,^{\circ}C$，$U_t = 95.44\,mV$

要以此为起点到 $80\,^{\circ}C$ 为止共测 8 组数据（含起点），

则 $\Delta t = \frac{80 - 20.0}{7} = 8.5714\,^{\circ}C$

又 $U_t = U_{R0}(1 + \alpha_R t)$，其中 $\alpha_R = 4.26 \times 10^{-3}\,^{\circ}C^{-1}$

故 $\Delta U_t = U_{R0}\alpha_R \Delta t = \frac{U_{t(室温)}}{1 + \alpha_R t_1}\alpha_R \Delta t$

$= \frac{95.44 \times 4.26 \times 10^{-3} \times 8.5714}{1 + 4.26 \times 10^{-3} \times 20.0} \approx 3.21\,mV$

故实验时应取 ΔU_t 约为 $3.21\,mV$，这样可使测出的数据分布较为均匀。

将实验测得的 (U_t, U_p) 及计算出的 t、p 整理如下表，

其中，$t = \frac{U_t}{U_{tb}}\left(\frac{1}{\alpha_R} + t_b\right) - \frac{1}{\alpha_R}$，

$p = p_c + \frac{U_p - U_0}{k_p}$

实验测得 $U_{tb} = 126.14\,mV$，$k_p = 4.06944 \times 10^{-4}\,mV/Pa$

已知 $\alpha_R = 4.26 \times 10^{-3}\,^{\circ}C^{-1}$

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

U_t/mV	t /°C	U_p/mV	P/10^6Pa
95.44	20.0	-1.84	0.9534
98.64	26.72	-0.75	0.9802
101.88	35.31	0.33	1.0068
105.07	43.76	1.40	1.0331
108.30	53.32	2.47	1.0594
111.49	60.78	3.54	1.0857
114.69	69.26	4.59	1.1115
117.89	77.74	5.62	1.1368
126.14(U_{tb})	99.61(t_b)	8.21(U_{pb})	1.2004

实验时用计算机进行拟合时，

$p = a+bt = 0.9007428 + 0.003093\,t$

（P单位为0.1MPa，t单位为°C）

相关系数 $r = 0.99998$，符合要求

$\alpha_p^* = \frac{b}{a} = \frac{0.003093}{0.9007428} = 3.43\times10^{-3}\ K^{-1}$

由已知 $\frac{\Delta V}{V} = 0.02$，故修正项

$\delta\alpha_p = (0.018+\frac{5\Delta V}{V})\times10^{-3} = (0.018+5\times0.02)\times10^{-3} = 0.118\times10^{-3}\ K^{-1}$

故 $\alpha_p = \alpha_p^* + \delta\alpha_p = (3.43+0.118)\times10^{-3}\ K^{-1} = 3.55\times10^{-3}\ K^{-1}$

下用坐标纸绘制 P-t 图线（图线见附页）.

通过在直线上取点得直线方程 $p = 0.904007 + 0.003012t$

（p单位0.1MPa，t单位°C）

又 $p = p_0(1+\alpha_p t)$（p_0为0°C气体压强）对比，得

$\alpha_p^* = \frac{b}{a} = \frac{0.003012}{0.904007} = 3.33\times10^{-3}\ K^{-1}$

修正项 $\delta\alpha_p = (0.018+\frac{5\Delta V}{V})\times10^{-3} = (0.018+5\times0.02)\times10^{-3} = 0.118\times10^{-3}\ K^{-1}$

故最终结果 $\alpha_p = \alpha_p^* + \delta\alpha_p = (3.33+0.118)\times10^{-3} = 3.45\times10^{-3}\ K^{-1}$

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

七、思考题

1. 差压传感器定标时，若先测 U_0 后测 k_p 应如何操作？若D口漏气对定标结果有何影响？

答：(1)应先转动三通活塞使传感器C口与B管连通而与A断开，此时C通大气。然后用机械泵从D口抽气，电压表读数达最大并稳定后记录值，即为 U_m；后停泵并使D口也通大气，此时电压表读数即为 U_0，由 $k_p = \frac{U_m - U_0}{p_c}$ 便可得 k_p。

(2)若D口漏气，则用机械泵抽气后 $\Delta p < p_c$，则 U_m 偏小，故 k_p 偏小。

2. 对水加热时，为什么要控制好热平衡？升温过快有什么问题？

答：热平衡时电压表示值稳定，读数才准确；若不控制热平衡装置内可能有局部温差，导致读数不准。若升温过快，热量来不及扩散，聚集在局部，导致读出的 U_t 和 U_p 不准确，且 U_t 和 U_p 会随着热量的扩散而不断变化，不易读数。

3. 转动三通活塞应注意什么？换水应如何操作？

答：(1)三通活塞属玻璃制品易损坏，故转动时应缓慢，并用另一只手扶住活塞外壳；(2)换水要先将加热器电源断开，再用虹吸方法将杯内水吸出。或将玻璃系统拿下放在备用杯子上，再将玻璃杯内的水直接倒入塑料桶。

4. 用大气压强计测大气压的步骤是怎样的？

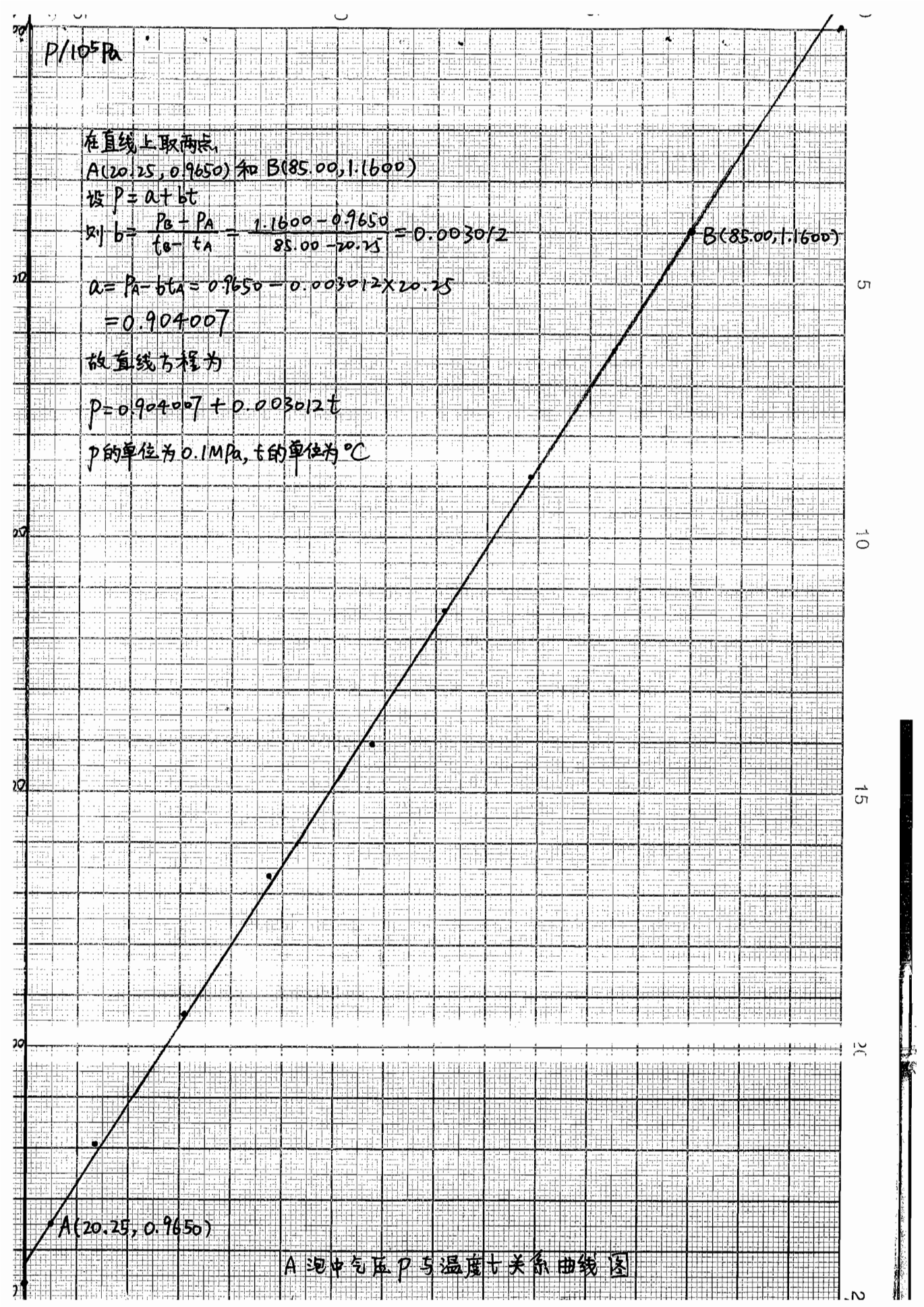
答：首先调节底部旋钮，使水银杯内的水银面刚好和象牙针尖接触；然后使视线与游标零线水平，再调节旋钮，使游标零线与水银凸面相切，读数。

5. 为何铜电阻温度传感器采用四端接法可减少引线电阻对测量的影响？

答：采用四端接法时，电流端的引线电阻和接触电阻折合到电流源回路的其他串联电阻中，不会影响到电阻上的电流，电压端的引线电阻和接触电阻由于与电压表内阻相比甚小，影响也不大。

6. 实验中保持水沸腾时，若数字仪表 U_p 单调下降，可能是什么问题？

答：可能是由于仪器漏气。由于沸腾时A泡内气压与大气压差别较大，三通活塞很可能漏气，从而使A泡内气体减少，气压下降，从而导致 U_p 单调下降。


P/10⁵Pa
在直线上取两点，
A(20.25, 0.9650) 和 B(85.00, 1.1600)
设 P = a + bt
则 b = (P_B − P_A)/(t_B − t_A) = (1.1600 − 0.9650)/(85.00 − 20.25) = 0.003012
a = P_A − bt_A = 0.9650 − 0.003012 × 20.25
= 0.904007
故直线方程为
P = 0.904007 + 0.003012t
P的单位为0.1MPa，t的单位为°C
B(85.00, 1.1600)
A(20.25, 0.9650)
A 泡中气压 P 与温度 t 关系曲线 图

清华大学实验报告

系别 固祥 班号 精11 姓名 _____ （同组姓名 _____）

作实验日期 年 月 日 教师评定 9+

阻尼振动与受迫振动 9.2.5

一、实验目的

(1) 观测阻尼振动，学习测量振动系统基本参数的方法；

(2) 研究受迫振动的幅频特性和相频特性，观察共振现象；

(3) 观测不同阻尼对受迫振动的影响。

二、实验原理

1. 有粘滞阻尼的阻尼振动

弹簧与摆轮组成一振动系统，设摆轮转动惯量为 J，阻尼力矩系数 γ，弹簧动度系数为 k，则阻尼力矩大小为 $\gamma\frac{d\theta}{dt}$，弹簧反抗力矩为 $-k\theta$，忽略弹簧等效转动惯量可得 θ 的运动方程

$$J\frac{d^2\theta}{dt^2}+\gamma\frac{d\theta}{dt}+k\theta=0 \tag{1}$$

记 $\omega_0=\sqrt{k/J}$ 为固有角频率，设阻尼系数 $\beta=\gamma/(2J)$，则上式变为

$$\frac{d^2\theta}{dt^2}+2\beta\frac{d\theta}{dt}+\omega_0^2\theta=0 \tag{2}$$

小阻尼即 $\beta^2-\omega_0^2<0$ 时，方程解为

$$\theta(t)=\theta_i\exp(-\beta t)\cos(\sqrt{\omega_0^2-\beta^2}\,t+\phi_i) \tag{3}$$

可见，阻尼振动的角频率 $\omega_d=\sqrt{\omega_0^2-\beta^2}$，周期 $T_d=2\pi/\sqrt{\omega_0^2-\beta^2}$.

2. 周期外力矩作用下的受迫振动

周期外力矩 $M\cos\omega t$ 激励下运动方程及其通解为

$$J\frac{d^2\theta}{dt^2}+\gamma\frac{d\theta}{dt}+k\theta=M\cos\omega t \tag{4}$$

$$\theta(t)=\theta_i\exp(-\beta t)\cos(\sqrt{\omega_0^2-\beta^2}\,t+\phi_i)+\theta_m\cos(\omega t-\phi) \tag{5}$$

此式为阻尼振动和频率同激励源的简谐振动之叠加。$t\to\infty$ 时，阻尼振动项为 0。一般 $t\gg T$ 之后就有稳态解

$$\theta(t)=\theta_m\cos(\omega t-\phi) \tag{6}$$

稳态解的振幅和相位差分别为

$$\theta_m=\frac{M/J}{\sqrt{(\omega_0^2-\omega^2)^2+4\beta^2\omega^2}} \tag{7}$$

$$\phi=\arctan\frac{2\beta\omega}{\omega_0^2-\omega^2}\quad(0<\phi<\pi) \tag{8}$$

3. 匀速转动时的受迫振动方程及解

共振仪连杆 E 的长度和摇杆 M 长度远大于偏心轮偏心半径 r 时，若偏心轮角速度 ω 匀速旋转，则弹簧 B 的支座偏转角的一阶近似为

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名 _____ ）

作实验日期 年 月 日 教师评定

$$\alpha(t)=\alpha_m\cos\omega t=\frac{r}{R}\cos\omega t \tag{9}$$

式中α_m为摇杆摆幅，R是E与M接点到转轴中心的距离。弹簧总转角为$\theta-\alpha(t)=\theta-\alpha_m\cos\omega t$，在固定坐标系中摆轮转角$\theta$的运动方程为

$$J\frac{d^2\theta}{dt^2}+\gamma\frac{d\theta}{dt}+k(\theta-\alpha_m\cos\omega t)=0, \tag{10}$$

即

$$J\frac{d^2\theta}{dt^2}+\gamma\frac{d\theta}{dt}+k\theta=k\alpha_m\cos\omega t \tag{11}$$

它与弹簧支座固定、摆轮受周期外力矩$k\alpha_m\cos\omega t$作用时运动方程形式上一致，等效外激励力矩的振幅为$k\alpha_m$。其稳态解相位差仍为(8)式，而振幅变为

$$\theta_m=\frac{\alpha_m\omega_0^2}{\sqrt{(\omega_0^2-\omega^2)^2+4\beta^2\omega^2}} \tag{12}$$

由θ_m极大值条件$\partial\theta_m/\partial\omega=0$得，外激励角频率$\omega=\sqrt{\omega_0^2-2\beta^2}$时，系统共振，$\theta_m$有极大值$\frac{\alpha_m\omega_0^2}{2\beta\sqrt{\omega_0^2-\beta^2}}$。

引入参数$\zeta=\beta/\omega_0=\gamma/(2\sqrt{kJ})$，称阻尼比。振幅$\theta_m$和相位差$\phi$是支座振幅$\alpha_m$、阻尼比$\zeta$和频率比$\omega/\omega_0$的函数，函数关系如下

$$\theta_m=\frac{\alpha_m}{\sqrt{[1-(\omega/\omega_0)^2]^2+4\zeta^2(\omega/\omega_0)^2}} \tag{13}$$

$$\phi=\arctan\frac{2\zeta(\omega/\omega_0)}{1-(\omega/\omega_0)^2} \tag{14}$$

θ_m、ϕ随频率比变化的曲线为幅频、相频曲线。

4. 描述阻尼振动的常用参量

转动惯量-J，动度系数-k，阻尼力矩系数-γ，固有角频率-$\omega_0=\sqrt{k/J}$，外激励角频率-ω.

则一些常用参量计算公式如下：

① 阻尼系数：$\beta=\gamma/(2J)$

② 阻尼比：$\zeta=\gamma/2\sqrt{kJ}=\beta/\omega_0$

③ 阻尼振动周期：$T_d=2\pi/\sqrt{\omega_0^2-\beta^2}$

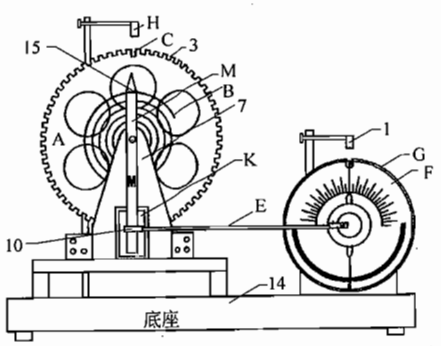
④ 时间常数：$\tau=2J/\gamma=1/\beta$

⑤ 品质因素：$Q=1/(2\zeta)$

⑥ 对数减缩率：$\Lambda=T_d/\tau=2\pi\zeta/\sqrt{1-\zeta^2}$

三. 实验仪器

波耳共振仪



清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

铜质圆形摆轮A与弹簧B构成待测振动系统，光电门H通过测定缺口移动个数记录振幅，长缺口C为平衡位置标志。外激励由转速稳定且可调的电机的偏心轴通过连杆E和摇杆F加到振动系统上。由阻尼线圈K产生电磁阻尼作用于摆轮。

四、实验步骤及注意事项

(1)调整仪器使波耳共振仪处于工作状态。打开电源开关，关闭电机、闪光灯开关，阻尼开关置于"0"档，光电门H、I可手动微调。手动调整电机偏心轮使有机玻璃转盘下上的0位标志线指示0°，然后拨动摆轮使偏离平衡位置150°~200°，松开手后，检查摆轮自由摆动情况。

(2)测量最小阻尼时(阻尼开关置0)的阻尼比ζ和固有角频率ω_0。

实测量为振幅θ_j和周期$\overline{T}_0$。方法：开关置于"摆轮"，拨动摆轮使偏离平衡位置150°~200°后摆动，由大到小依次读取显示窗中振幅值θ_1，θ_2，θ_3，…，θ_j，…，θ_n；周期选择置于"10"位置，按复位钮启动周期测量，停止时读数($10\overline{T}_0$)，并立即再次按复位钮启动周期测量，记录每次的($10\overline{T}_0$)值。

(3)测量其他2种或3种阻尼状态的振幅。由于振动次数较少，要求振动次数大于10次，需测每次振动的周期，周期选择置于"1"位置。

(4)测定受迫振动的幅频特性和相频特性曲线。开启电机开关，开关置于"强迫力"，周期选择置"1"，调节强迫激励周期旋钮，选择2或3个不同阻尼比(与(3)中一致)测定幅频与相频曲线。每条曲线至少测12个数据点，包括共振点，即$\phi=\pi/2$的点。

注意事项：

(1) 阻尼开关不要随便拨动；

(2) 只有测受迫振动相频特性时才开启仪器面板上的闪光灯开关，读完数据后迅即关闭；

(3) 相频特性与幅频特性测量要在振动稳定后进行；

(4) 在共振点附近要注意调节ω勿使振幅过大；

(5) 几种阻尼下的幅频、相频特性曲线应画在同一张坐标纸上。

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

五、数据处理

1. 阻尼振动

(1) 无电磁阻尼时，相关数据整理如下：

序号 i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
θ_i/°	109	107	107	105	105	103	102	101	100	99	97	97	95
θ_{i+25}/°	83	83	81	81	79	79	78	77	77	75	75	73	73
$y_i=\ln\theta_i$	4.6913	4.6728	4.6728	4.6540	4.6540	4.6347	4.6250	4.6151	4.6052	4.5951	4.5747	4.5747	4.5539
$y_{i+25}=\ln\theta_{i+25}$	4.4188	4.4188	4.3944	4.3944	4.3694	4.3694	4.3567	4.3438	4.3438	4.3175	4.3175	4.2905	4.2905
$D_i=y_{i+25}-y_i$	-0.2725	-0.2540	-0.2784	-0.2596	-0.2846	-0.2653	-0.2683	-0.2713	-0.2614	-0.2776	-0.2572	-0.2842	-0.2634
序号 i	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	
θ_i/°	95	93	93	92	91	90	89	88	87	87	85	85	
θ_{i+25}/°	72	71	71	70	69	69	68	67	67	66	65	65	
$y_i=\ln\theta_i$	4.5539	4.5326	4.5326	4.5218	4.5109	4.4998	4.4886	4.4773	4.4659	4.4659	4.4427	4.4427	
$y_{i+25}=\ln\theta_{i+25}$	4.2767	4.2627	4.2627	4.2485	4.2341	4.2341	4.2195	4.2046	4.2046	4.1896	4.1743	4.1743	
$D_i=y_{i+25}-y_i$	-0.2772	-0.2699	-0.2699	-0.2733	-0.2768	-0.2657	-0.2691	-0.2727	-0.2613	-0.2763	-0.2684	-0.2684	

序号	1	2	3	4	5
$10\bar{T}_0$/s	15.607	15.607	15.597	15.593	15.585

直线拟合 y_i 与 x_i（$x_i=1,2,3,\cdots,50$）的关系如下：

$$y=-0.010722x+4.700804$$

故 $b=-0.010722$

$$\Delta_b \doteq S_b=\frac{1}{25}\sqrt{\frac{\sum(D_i-\bar{D})^2}{25-1}}=\frac{1}{25}S_D=\frac{1}{25}\times 0.007845\approx 3\times10^{-4}$$

故 $b=-0.0107\pm0.0003=(-1.07\pm0.03)\times10^{-2}$

又 $b=-\frac{2\pi}{\sqrt{\zeta^{-2}-1}}$.

故 $\zeta=\left[\left(\frac{2\pi}{b}\right)^2+1\right]^{-\frac{1}{2}}=\left[\left(\frac{2\pi}{-0.0107}\right)^2+1\right]^{-\frac{1}{2}}=0.001703$

$$\frac{d\zeta}{db}=-\frac{1}{2}\left[\left(\frac{2\pi}{b}\right)^2+1\right]^{-\frac{3}{2}}\cdot 2\left(\frac{2\pi}{b}\right)\cdot\left(-\frac{2\pi}{b^2}\right)=\frac{4\pi^2}{b^3}\left[\left(\frac{2\pi}{b}\right)^2+1\right]^{-3/2}$$

故 $\Delta_\zeta=\left|\frac{d\zeta}{db}\right|\Delta_b=\frac{4\pi^2}{b^3}\left[\left(\frac{2\pi}{b}\right)^2+1\right]^{-3/2}\Delta_b=\frac{4\pi^2}{(0.0107)^3}\times\left[\left(\frac{2\pi}{0.0107}\right)^2+1\right]^{-3/2}\times0.0003$

$=0.00005$

清 华 大 学 实 验 报 告

系别_____ 班号_____ 姓名_____ （同组姓名_____）

作实验日期　　年　　月　　日　　教师评定

故 $\zeta = 0.00170 \pm 0.00005 = (1.70 \pm 0.05) \times 10^{-3}$

$T_d = \frac{1}{10} \times \frac{1}{5} \sum_{i=1}^{5} 10\overline{T_{di}} = 1.55978\,s$

$S_{10\overline{T_d}} = 0.0094446\,s$，又仪器示值误差 $\Delta_{仪} = 1ms = 0.001s$

故 $\Delta_{10\overline{T_d}} = \sqrt{S_{10\overline{T_d}}^2 + \Delta_{仪}^2} = \sqrt{0.0094446^2 + 0.001^2} = 0.0094975$

$\Delta_{T_d} = \frac{1}{10}\Delta_{10\overline{T_d}} = 0.0009s$

所以 $T_d = (1.5598 \pm 0.0009)s$

从而 $\omega_0 = \frac{2\pi}{T_d\sqrt{1-\zeta^2}} = \frac{2\pi}{1.5598 \times \sqrt{1-0.0107^2}} = 4.028430\ s^{-1}$

$\ln\omega_0 = \ln 2\pi - \ln T_d - \frac{1}{2}\ln(1-\zeta^2)$，$\frac{\partial \ln\omega_0}{\partial T_d} = -\frac{1}{T_d}$，$\frac{\partial \ln\omega_0}{\partial \zeta} = \frac{\zeta}{1-\zeta^2}$

故 $\frac{\Delta\omega_0}{\omega_0} = \sqrt{\left(\frac{\Delta T_d}{T_d}\right)^2 + \left(\frac{\zeta\Delta_\zeta}{1-\zeta^2}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{0.0009}{1.5598}\right)^2 + \left(\frac{0.00170 \times 0.00005}{1-0.00170^2}\right)^2}$

$= 0.000057\,70$

$\Delta\omega_0 = \omega_0 \frac{\Delta\omega_0}{\omega_0} = 4.028430 \times 0.000057\,70 = 0.0023\ s^{-1}$

所以 $\omega_0 = (4.0284 \pm 0.0023)s^{-1}$

(2) 电磁阻尼3档时，数据整理如下：

序号 i	1	2	3	4	5	6
θ_i/°	98	89	79	71	65	58
θ_{i+6}/°	52	47	41	37	33	29
$y_i = \ln\theta_i$	4.5850	4.4886	4.3694	4.2627	4.1744	4.0604
$y_{i+6} = \ln\theta_{i+6}$	3.9512	3.8501	3.7136	3.6109	3.4965	3.3673
$D_i = y_{i+6} - y_i$	-0.6338	-0.6385	-0.6558	-0.6518	-0.6779	-0.6931

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
周期 T_d/s	1.560	1.560	1.559	1.559	1.559	1.558	1.558	1.557	1.557	1.557	1.557	1.557

直线拟合 y_i 与 x_i ($x_i = 1, 2, 3, \cdots, 12$) 的关系为

$$y = -0.110002x + 4.709203$$

故 $b = -0.110002$

$\Delta_b \doteq S_b = \frac{1}{6}\sqrt{\frac{\sum(D_i - \bar{D})^2}{6-1}} = \frac{1}{6} \times 0.022990 = 0.004$

所以 $b = -0.110 \pm 0.004$

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名 _____ ）

作实验日期 年 月 日 教师评定

$\zeta = \left[\left(\frac{2\pi}{b}\right)^2+1\right]^{-1/2} = \left[\left(\frac{2\pi}{0.110}\right)^2+1\right]^{-\frac{1}{2}} = 0.017504$

$\Delta_\zeta = \frac{4\pi^2}{b^3}\left[\left(\frac{2\pi}{b}\right)^2+1\right]^{-3/2}\Delta_b = \frac{4\pi^2}{0.110^3}\times\left[\left(\frac{2\pi}{0.110}\right)^2+1\right]^{-3/2}\times 0.004 = 0.0006$

故 $\zeta = 0.0175 \pm 0.0006 = (1.75\pm 0.06)\times 10^{-2}$

$T_d = \frac{1}{12}\sum_{i=1}^{12} T_{di} = 1.558167\ s$, $S_{T_d} = 0.001193\ s$

$\Delta_{T_d} = \sqrt{S_{T_d}^2+\Delta_{仪}^2} = \sqrt{0.001193^2+0.001^2} = 0.0016\ s$

所以 $T_d = (1.5582\pm 0.0016)s$

$\omega_0 = \frac{2\pi}{T_d\sqrt{1-\zeta^2}} = \frac{2\pi}{1.5582\times\sqrt{1-0.0175^2}} = 4.032953\ s^{-1}$

$\frac{\Delta\omega_0}{\omega_0} = \sqrt{\left(\frac{\Delta_{T_d}}{T_d}\right)^2+\left(\frac{\zeta\Delta_\zeta}{1-\zeta^2}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{0.0016}{1.5582}\right)^2+\left(\frac{0.0175\times 0.0006}{1-0.0175^2}\right)^2} = 0.00102688$

$\Delta\omega_0 = \omega_0\cdot\frac{\Delta\omega_0}{\omega_0} = 4.032953\times 0.00102688 = 0.004\ s^{-1}$

所以 $\omega_0 = (4.033\pm 0.004)\ s^{-1}$

(3) 电磁阻尼 5 档时，数据整理如下

序号 i	1	2	3	4	5	6
θ_i / °	97	81	69	57	48	40
θ_{i+6} / °	33	28	24	20	18	14
$y_i = \ln\theta_i$	4.5747	4.3944	4.2341	4.0431	3.8712	3.6889
$y_{i+6} = \ln\theta_{i+6}$	3.4965	3.3322	3.1781	2.9957	2.8904	2.6391
$D_i = y_{i+6} - y_i$	-1.0782	-1.0622	-1.0561	-1.0473	-0.9808	-1.0498

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
周期 T_d / s	1.560	1.559	1.559	1.557	1.558	1.556	1.556	1.556	1.554	1.554	1.553	1.552

直线拟合公式： $y = -0.173538x + 4.739524$

故 $b = -0.173538$

$\Delta_b \doteq S_b = \frac{1}{6}\sqrt{\frac{\sum(D_i-\bar{D})^2}{6-1}} = \frac{1}{6}\times 0.033661 = 0.006$

故 $b = -0.174 \pm 0.006$

$\zeta = \left[\left(\frac{2\pi}{b}\right)^2+1\right]^{-1/2} = \left[\left(\frac{2\pi}{0.174}\right)^2+1\right]^{-\frac{1}{2}} = 0.027682$

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

$\Delta_\zeta = \frac{4\pi^2}{-b^3}\left[\left(\frac{2\pi}{b}\right)^2+1\right]^{-3/2}\Delta_b = \frac{4\pi^2}{0.174^3}\times\left[\left(\frac{2\pi}{0.174}\right)^2+1\right]^{-3/2}\times 0.006 = 0.0010$

故 $\zeta = 0.0277 \pm 0.0010 = (2.77 \pm 0.10)\times 10^{-2}$

$T_d = \frac{1}{12}\sum T_{di} = 1.556167\,s$, $S_{Td} = 0.002552\,s$

$\Delta_{Td} = \sqrt{S_{Td}^2+\Delta_{仪}^2} = \sqrt{0.002552^2+0.001^2} = 0.0027\,s$

所以 $T_d = (1.5562 \pm 0.0027)\,s$

$\omega_0 = \frac{2\pi}{T_d\sqrt{1-\zeta^2}} = \frac{2\pi}{1.5562\times\sqrt{1-0.0277^2}} = 4.039068\ s^{-1}$

$\frac{\Delta\omega_0}{\omega_0} = \sqrt{\left(\frac{\Delta_{Td}}{T_d}\right)^2+\left(\frac{\zeta\Delta_\zeta}{1-\zeta^2}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{0.0027}{1.5562}\right)^2+\left(\frac{0.0277\times 0.0010}{1-0.0277^2}\right)^2} = 0.00173522$

$\Delta\omega_0 = \omega_0\cdot\frac{\Delta\omega_0}{\omega_0} = 4.039068\times 0.00173522 = 0.007\ s^{-1}$

故 $\omega_0 = (4.039 \pm 0.007)\,s^{-1}$

将三种阻尼状态的结果整理、汇总如下：

无电磁阻尼时：

$b = (-1.07 \pm 0.03)\times 10^{-2}$

$\zeta = (1.70 \pm 0.05)\times 10^{-3}$

$\omega_0 = (4.0284 \pm 0.0023)\,s^{-1}$

电磁阻尼3档：

$b = -0.110 \pm 0.004$

$\zeta = (1.75 \pm 0.06)\times 10^{-2}$

$\omega_0 = (4.033 \pm 0.004)\,s^{-1}$

电磁阻尼5档：

$b = -0.174 \pm 0.006$

$\zeta = (2.77 \pm 0.10)\times 10^{-2}$

$\omega_0 = (4.039 \pm 0.007)\,s^{-1}$

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名 _____ ）

作实验日期 年 月 日 教师评定

2. 受迫振动

① 电磁阻尼3档的数据整理并计算如下表：

T/s	ω/ω_0	θ/°	ϕ_1/°	ϕ_2/°	$\phi=\frac{\phi_1+\phi_2}{2}$/°	$\phi_{理论}$/°	$\frac{\phi-\phi_{理论}}{\phi_{理论}}$
1.692	0.921	30	10	11	10.5	11.992	-12.44%
1.661	0.937	37	13	14	13.5	15.042	-10.25%
1.642	0.949	43	18	19	18.5	18.477	0.12%
1.611	0.967	67	26	27	26.5	27.538	3.77%
1.596	0.976	81	37	38	37.5	35.766	4.85%
1.580	0.986	111	55	56	55.5	51.142	8.52%
1.564	0.996	122	75	77	76.0	77.100	-1.43%
1.560	0.999	128	89	91	90.0	86.728	3.77%
1.557	1.001	126	96	97	96.5	93.269	3.46%
1.550	1.005	120	105	106	105.5	105.908	-0.39%
1.543	1.010	108	122	124	123.0	119.623	2.82%
1.529	1.019	83	140	142	141.0	137.086	2.86%
1.519	1.026	69	147	148	147.5	145.717	1.22%
1.503	1.037	55	155	156	155.5	154.286	0.79%
1.483	1.051	41	160	161	160.5	160.625	0.08%
1.470	1.060	35	164	165	164.5	163.292	0.74%
1.445	1.078	26	166	167	166.5	166.896	-0.24%

各量计算过程：ω_0 取 4.033s^{-1}，$\omega/\omega_0=\frac{2\pi}{T\omega_0}$

$\phi_{理论}=\arctan\frac{2\zeta(\omega/\omega_0)}{1-(\omega/\omega_0)^2}$

其中 $\zeta=1.75\times10^{-2}$

根据表中数据作幅频特性曲线（$\theta-\omega/\omega_0$ 曲线）和相频特性曲线（$\phi-\omega/\omega_0$ 曲线）所作曲线见附页

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名 _____ ）

作实验日期 年 月 日 教师评定

②电磁阻尼5档数据的整理、计算：

T/s	ω/ω_0	$\theta/^\circ$	$\phi_1/^\circ$	$\phi_2/^\circ$	$\phi=\frac{\phi_1+\phi_2}{2}/^\circ$	$\phi_{理论}/^\circ$	$\frac{\phi-\phi_{理论}}{\phi_{理论}}\times 100\%$
1.717	0.906	25	13	15	14.0	15.650	-10.54%
1.661	0.937	35	22	24	23.0	23.044	-0.19%
1.645	0.946	39	26	27	26.5	26.507	-0.03%
1.616	0.963	51	36	38	37.0	36.299	1.93%
1.588	0.980	69	56	58	57.0	53.893	5.77%
1.570	0.991	81	77	79	78.0	71.924	8.45%
1.564	0.995	83	85	87	86.0	79.743	7.85%
1.560	0.997	82	90	92	91.0	83.810	8.58%
1.558	0.998	82	93	95	94.0	85.866	9.47%
1.544	1.008	77	111	113	112.0	106.049	5.61%
1.528	1.018	64	126	129	127.5	122.785	3.84%
1.514	1.027	54	137	139	138.0	133.888	3.07%
1.496	1.040	44	146	147	146.5	144.775	1.19%
1.476	1.054	35	152	154	153.0	152.235	0.50%

$\omega/\omega_0=\frac{2\pi}{T\omega_0}$，$\omega_0=4.039\ s^{-1}$

$\phi_{理论}=\arctan\frac{2\zeta(\omega/\omega_0)}{1-(\omega/\omega_0)^2}$，

其中 $\zeta=2.77\times10^{-2}$。

所作幅频、相频特性曲线见附页。

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

六. 思考题

比较 T_0（固有振动周期）、T_d（阻尼振动周期）和 T_R（共振点周期）之间的关系。

答：理论上，T_0、T_d 和 T_R 分别由下面几式决定：

$$T_0=\frac{2\pi}{\omega_0}\ ,\quad T_d=\frac{2\pi}{\sqrt{\omega_0^2-\beta^2}}\ ,\quad T_R=\frac{2\pi}{\sqrt{\omega_0^2-2\beta^2}}$$

其中 $\beta=\frac{\gamma}{2J}=\zeta\omega_0$ 为阻尼系数，ζ 为阻尼比，J 为转动惯量，

由这三个表达式可得理论上应有 $T_0<T_d<T_R$.

在实际测量时，对于电磁阻尼3档，有

$T_0=\frac{2\pi}{\omega_0}=\frac{2\pi}{4.033}=1.5579\,s$，$T_d=1.5582\,s$

T_R 对应于相位差 $\phi=90°$ 时的周期，由记录的数据，$T_R=1.560\,s$

从而 $T_0<T_d<T_R$，实测结果与理论相符。

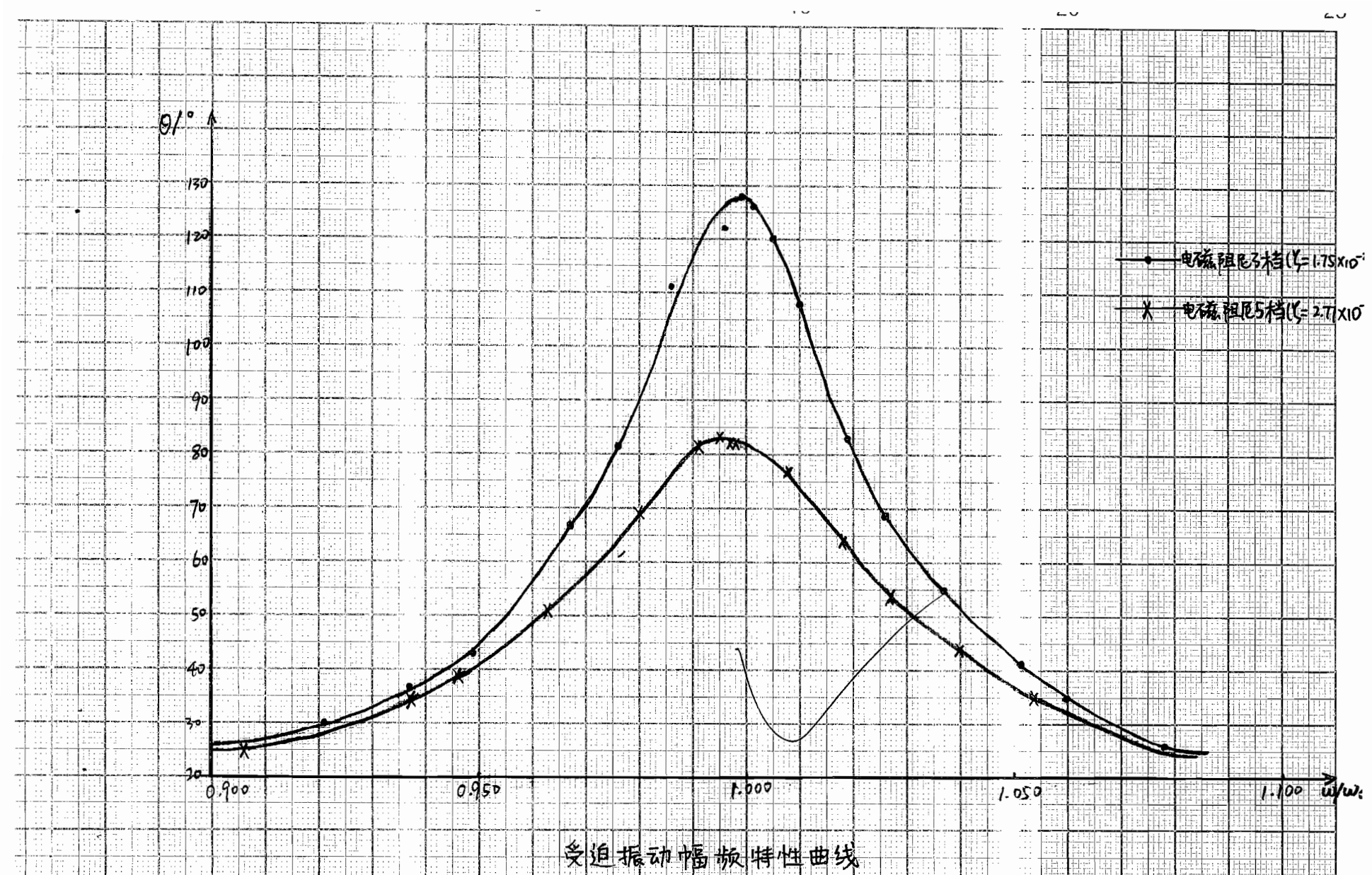
对于电磁阻尼5档，有

$T_0=\frac{2\pi}{\omega_0}=\frac{2\pi}{4.039}=1.5556\,s$，$T_d=1.5562\,s$，$T_R$ 约为 $1.560\,s$

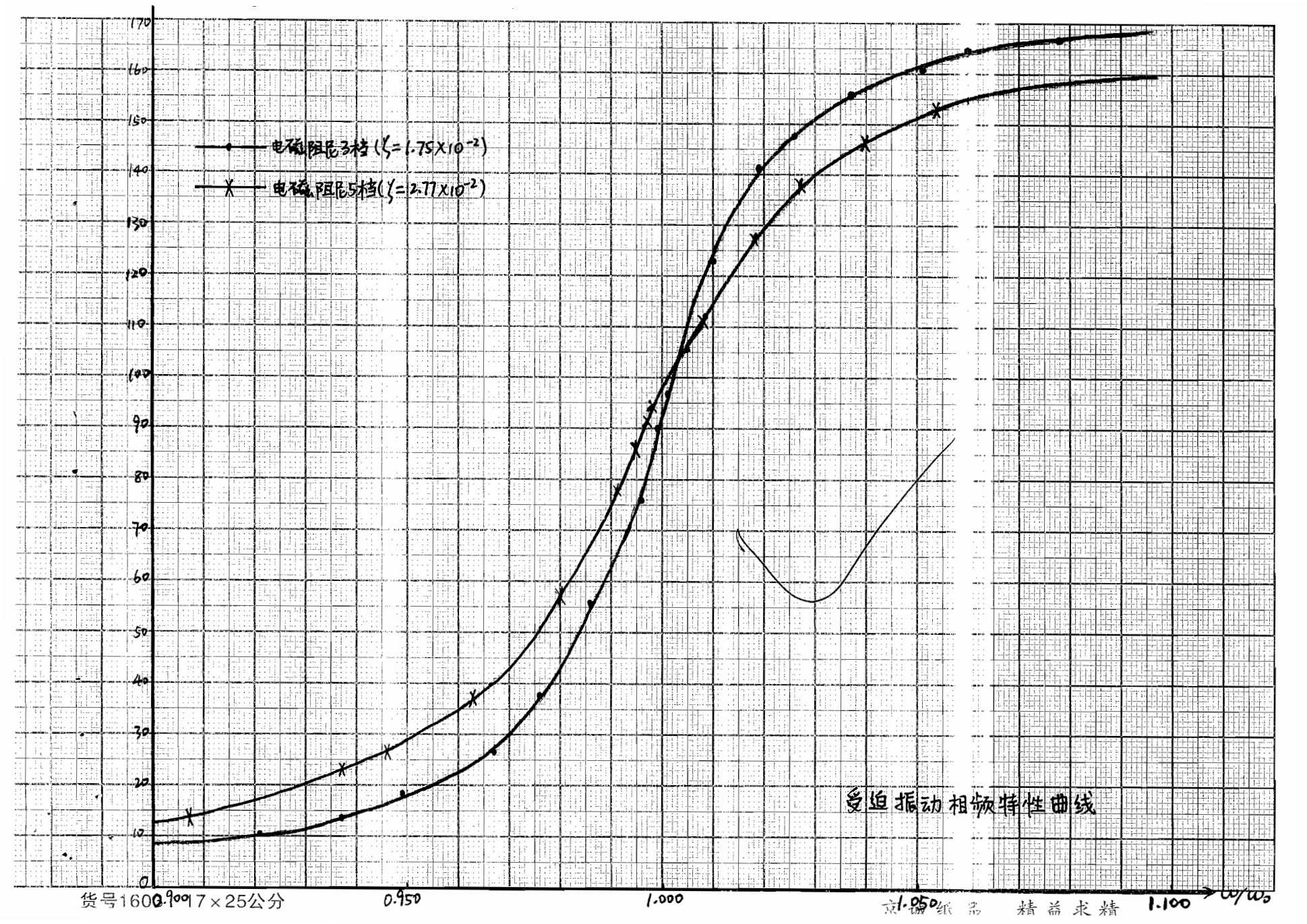
同样有 $T_0<T_d<T_R$，实测结果与理论也是相符的。

实际上，T_0、T_d、T_R 这三者虽然满足 $T_0<T_d<T_R$ 的关系，但它们在大小上相差得并不大，三者近似相等。两个档位均是如此。

考虑到两档的阻尼比分别为 1.75×10^{-2} 和 2.77×10^{-2}，阻尼比较小。在小阻尼情况下，T_0、T_d、T_R 这三者可以近似相等，这在它们的表达式中也能反映出来，因为小阻尼情况下，β^2 与 ω_0^2 相比可以略去，从而 $T_d\approx\frac{2\pi}{\omega_0}=T_0$，$T_R\approx\frac{2\pi}{\omega_0}=T_0$.


θ/°
130
120
110
100
90
80
70
60
50
40
30
20
0.900
0.950
1.000
1.050
1.100
ω/ω
电磁阻尼3档(ζ=1.75×10
电磁阻尼5档(ζ=2.7×10

受迫振动幅频特性曲线



受迫振动相频特性曲线

货号1600 17×25公分 京1.050纸品 精益求精

清华大学实验报告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名 _____ ）

作实验日期 2012 年 11 月 22 日 原始数据 1 教师评定

1. 无阻尼

θ \ i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	$10\bar{T}_d$/s
θ_i/°	109	107	107	105	105	103	102	101	100	99	15.607
θ_{i+10}/°	97	97	95	95	93	93	92	91	90	89	15.607
θ_{i+20}/°	88	87	87	85	85	83	83	81	81	79	15.597
θ_{i+30}/°	79	78	77	77	75	75	73	73	72	71	15.593
θ_{i+40}/°	71	70	69	69	68	67	67	66	65	65	15.585

2. 阻尼振动 $b=\frac{1}{25^2}\sum_{j=1}^{25}(\ln\theta_{j+25}-\ln\theta_j)=-0.01079$

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
振幅/°	98	89	79	71	65	58	52	47	41	37	33	29
周期T_d/s	1.560	1.560	1.559	1.559	1.559	1.558	1.558	1.557	1.557	1.557	1.557	1.557

（3档）

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
振幅/°	97	81	69	57	98	40	33	28	24	20	18	14
周期T_d/s	1.560	1.559	1.559	1.557	1.558	1.556	1.556	1.556	1.554	1.554	1.553	1.552

5档

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
振幅/°												
周期T_d/s												

J09
11.22
9

清华大学实验报告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 原始数据2 教师评定

3受迫振动 5档

序号		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
周期T/s		1.705	1.717	1.688	1.688	1.679	1.671	1.661									
振幅θ/°		26	25	27	30	30	32	35									
相位	ϕ_1/°	14	13	16	17	19	20	22									
	ϕ_2/°	17	15	18	19	21	22	24									

5档

序号		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
周期T/s		1.717	1.661	1.695	1.616	1.588	1.570	1.558	1.564	1.560	1.544	1.528	1.514	1.496	1.476	
振幅θ/°		25	35	39	51	69	81	82	83	82	77	64	54	44	35	
相位	ϕ_1/°	13	22	26	36	56	77	93	85	90	111	126	137	146	152	
	ϕ_2/°	15	24	27	38	58	79	95	87	92	113	129	139	147	154	

3档

序号		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
周期T/s		1.692	1.661	1.682	1.611	1.596	1.580	1.564	1.550	1.560	1.543	1.529	1.519	1.503	1.483	1.47
振幅θ/°		30	37	43	67	81	111	122	120	128	108	83	69	55	41	35
相位	ϕ_1/°	10	13	18	26	37	55	75	105	89	122	140	147	155	160	164
	ϕ_2/°	11	14	19	27	38	56	77	106	91	124	142	148	156	161	165

1个

T 1.557

θ 126

ϕ_1 96

ϕ_2 97

TOP

11.22

9

清华大学实验报告

系别 精仪系 班号 精11 姓名 周禅 (2011010495) (同组姓名)

作实验日期 2013 年 5 月 5 日 教师评定 9-

用单色仪测定介质的吸收曲线

一、实验目的

1. 了解单色仪的构造原理并掌握其使用；

2. 加深对介质光谱特性的了解，掌握测量介质的吸收曲线或透射曲线的原理和方法；

3. 初步了解光电池的工作原理及其应用。

二、实验原理

当一束光入射到有一定厚度的介质平板上时，部分被反射，部分被吸收，剩下的发生透射。

设有一束波长为 λ、入射光强为 I_0 的单色平行光垂直入射到一厚度为 d 的介质平板上，如图1所示。若从界面1射回的反射光强为 I_R，从界面1向介质内透射光的光强为 I_1，入射到界面2的光强为 I_2，从界面2出射的透射光强为 I_T，则定义介质板的光谱外透射率 T 和介质的光谱透射率 T_i 分别为

$$T = \frac{I_T}{I_0} \tag{1}$$

$$T_i = \frac{I_2}{I_1} \tag{2}$$

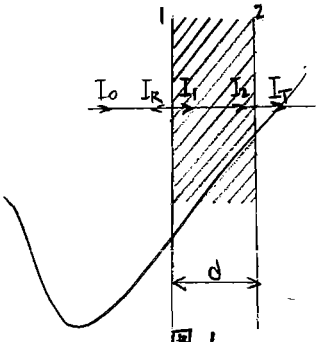


图1

这里 I_R、I_1、I_2、I_T 均为光在界面1,2及介质中多次反射、透射的总效果。

介质对光的反射、透射与吸收不仅与介质有关，而且与入射光波长有关。光谱透射率 T_i 与波长 λ 的关系曲线称透射曲线。在介质内部，T_i 与 d 有如下关系：

$$T_i = e^{-\alpha d} \tag{3}$$

式中，α 称为介质的线性吸收系数或吸收系数。α 不仅与介质有关，而且与入射光波长有关。α 与波长 λ 的关系曲线称为吸收曲线。

设光在单一界面上的反射率为 R，则透射光的光强为

$$I_T = I_{T1} + I_{T2} + I_{T3} + \cdots = I_0(1-R)^2 e^{-\alpha d} + I_0(1-R)^2 R^2 e^{-3\alpha d} + I_0(1-R)^2 R^4 e^{-5\alpha d} + \cdots$$

$$= I_0(1-R)^2 e^{-\alpha d}(1 + R^2 e^{-2\alpha d} + R^4 e^{-4\alpha d} + \cdots) = \frac{I_0(1-R)^2 e^{-\alpha d}}{1 - R^2 e^{-2\alpha d}} \tag{4}$$

其中 I_{Ti} 为光从界面2第 i 次透射的光强。所以

$$T = \frac{I_T}{I_0} = \frac{(1-R)^2 e^{-\alpha d}}{1 - R^2 e^{-2\alpha d}} \tag{5}$$

介质的 T_i 和 α 通过测量由同一材料（α 相同）加工成的表面性质相同（R 相同）但厚度不同的两块试样的光谱外透射率后计算得出。设两试样厚度分别为 d_1 和 d_2，$d_2 > d_1$，光谱外透射率分别为 T_1 和 T_2。由式(5)可得

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

$$\frac{T_2}{T_1}=\frac{e^{-\alpha d_2}(1-R^2e^{-2\alpha d_1})}{e^{-\alpha d_1}(1-R^2e^{-2\alpha d_2})}$$

一般R、α都很小，故上式可近似为

$$\frac{T_2}{T_1}=e^{-\alpha(d_2-d_1)} \quad (6)$$

故

$$\alpha=\frac{\ln T_1-\ln T_2}{d_2-d_1} \quad (7)$$

比较(6)、(7)两式可知

$$T_i=\frac{T_2}{T_1} \quad (8)$$

本实验采用光电池和微电流放大器测量光强。在合适的条件下，光电池输出的光电流与照射到它表面的光强成正比。光电流经微电流放大器后由数字表直接显示其数值，故读出数值后就可计算T_i和α，即

$$T_i=\frac{n_2}{n_1} \quad (9)$$

$$\alpha=\frac{\ln n_1-\ln n_2}{d_2-d_1} \quad (10)$$

式中，n_1和n_2分别表示试样厚度为d_1和d_2时微电流放大器上数字表的示值。

三、实验仪器

1. WDM1型光栅单色仪
   (1) 入射准直系统：狭缝S_1，球面反射镜M_1（产生平行光束）
   (2) 色散元件：反射光栅G（产生各种波长的单色光）
   (3) 出射聚光系统：球面反射镜M_2，平面反射镜M_3，出射狭缝S_2.
2. 汞灯GP20 Hg
3. 溴钨灯及其光源
4. 聚光透镜
5. 装有薄、厚玻璃的插片（$d_1=3.8mm$，$d_2=0.8mm$）

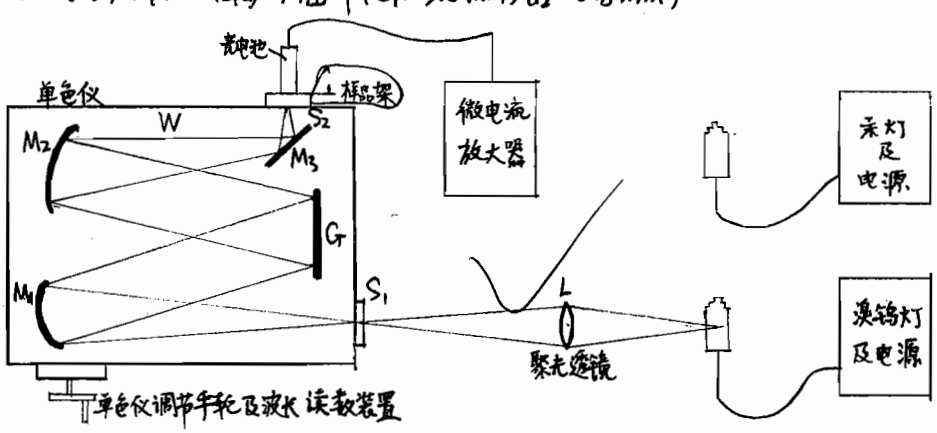


图2 实验装置示意图

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

四、实验任务及注意事项

1. 校准单色仪波长示值

①调节波长读数装置，使示值在577.0nm～579.1nm之间；

②将汞灯放在入射狭缝前，S_1、S_2宽度调至约2mm，观察黄色谱线；

③关小入射狭缝使两条黄色谱线分开且较细；

④关小出射狭缝，微动手轮，使其中一条谱线始终在出射缝中间且与缝同宽；

⑤读出此时单色仪示值，转动手轮读下一条谱线；

⑥重复上述步骤，校准435.8nm、546.1nm、577.0nm、579.1nm的谱线，记录示值，与标准值进行比较。

2. 调节狭缝宽度

①调节波长鼓轮，使读数在577.0nm～579.1nm之间；

②迎着出射光方向观察两黄色谱线，微动手轮使谱线移到视野中央；

③调节入射狭缝S_1宽度，使两条黄谱线刚好分开；

④调节出射狭缝S_2宽度，同时微调手轮，使其中一条谱线在缝中央且与缝同宽。

3. 调节溴钨灯光路

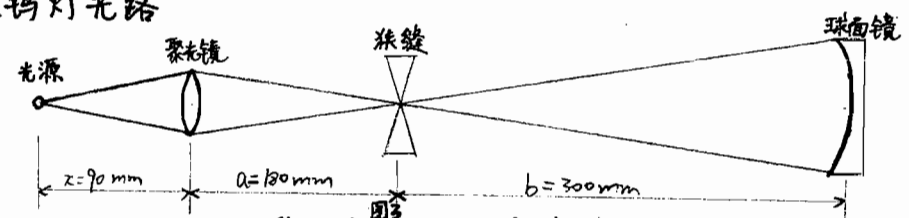


图3

①聚光镜通光孔径$d=30mm$，焦距$f=60mm$，准直镜光阑宽度$D=50mm$。由高斯公式$\frac{1}{f}=\frac{1}{u}+\frac{1}{v}$和相似关系$d/D=a/b$，可计算出$a=180mm$，$x=90mm$，故使聚光镜距狭缝约18cm，溴钨灯距聚光镜约9cm；

②打开溴钨灯电流，缓慢增加电流至1.5A左右；

③调节波长手轮，使读数为610.0nm；

④适当调节溴钨灯、聚光镜的高度和位置，使得从出缝处观察到的光斑清晰、位于正中且亮度最大。

4. 测量钕玻璃在610.0nm～508.0nm范围内的吸收曲线

①装上探测器、打开微电流放大器；

②调节溴钨灯电源的电流，使微电流放大器示值在1.700～1.900之间；

③插上玻璃片，定性观察钕玻璃对不同波长光的吸收情况，大致确定吸收峰位置；

④从610.0nm～508.0nm，每隔1nm记录一次放大器示值，在吸收峰附近每0.5nm记录一次；

⑤更换玻璃厚度，重复④中测量，测点波长与④中相同。

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

注意事项：

① 溴钨灯电流尽量不超过2.50A；

② 波长读数装置出现99999时应停止转动调节手轮，否则会损坏仪器；

③ 两狭缝S_1、S_2宽度最大不得超过3mm，也不得完全闭合，否则会损坏狭缝机构。

五、数据处理

1. 波长示值的校准

标准值/Å	5791	5770	5461	4358
测量值/Å	5822	5800	5492	4390
偏差/Å	31	30	31	32

$\Delta\lambda$ 间的差值 ≤ 0.2 nm，符合要求.

$\overline{\Delta\lambda}=\frac{1}{4}(31+30+31+32)=31$ Å，故偏差可视为31 Å.

后面的实验中测出的波长应修正掉这一偏差，即减去31 Å.

2. 钕玻璃的吸收曲线

实验测得的数据列表整理、计算如下.

其中 n_1 为 $d_1=0.8$mm 时的示值，n_2 为 $d_2=3.8$mm 时的示值

α 按式 $\alpha=\frac{\ln n_1-\ln n_2}{d_2-d_1}$ 求出.

λ_0 为采测波长，λ 为修正后的波长.

有效数

λ_0/Å	λ/Å	n1	n2	α/mm^{-1}	λ_0/Å	λ/Å	n1	n2	α/mm^{-1}
6100	6069	1.620	1.500	0.025654	5630	5599	1.181	1.151	0.008577
6090	6059	1.614	1.480	0.028891	5620	5589	1.173	1.144	0.008345
6080	6049	1.597	1.450	0.032188	5610	5579	1.162	1.135	0.007837
6070	6039	1.578	1.413	0.036814	5600	5569	1.153	1.126	0.007899
6060	6029	1.564	1.377	0.042446	5590	5559	1.144	1.115	0.008559
6050	6019	1.548	1.345	0.046857	5580	5549	1.134	1.103	0.009239
6040	6009	1.534	1.312	0.052109	5570	5539	1.121	1.088	0.009960
6030	5999	1.519	1.281	0.056804	5560	5529	1.112	1.080	0.009733
6020	5989	1.501	1.247	0.061797	5550	5519	1.100	1.068	0.009841
6010	5979	1.485	1.191	0.073540	5540	5509	1.088	1.060	0.008691
6000	5969	1.463	1.086	0.099329	5530	5499	1.078	1.051	0.008455
5990	5959	1.426	0.958	0.132594	5520	5489	1.072	1.042	0.009461
5980	5949	1.380	0.863	0.156475	5510	5479	1.059	1.031	0.008932
5970	5939	1.343	0.834	0.158809	5500	5469	1.050	1.019	0.009989
5960	5929	1.328	0.849	0.149123	5490	5459	1.040	1.003	0.012075
5950	5919	1.327	0.876	0.138437	5480	5449	1.026	0.983	0.014271
5940	5909	1.329	0.873	0.140082	5470	5439	1.015	0.971	0.014772

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____ ）

作实验日期 年 月 日 教师评定

λ_0/Å	λ/Å	n_1	n_2	α/mm^{-1}	λ_0/Å	λ/Å	n_1	n_2	α/mm^{-1}
5930	5899	1.322	0.799	0.167847	5460	5429	1.002	0.954	0.016363
5920	5889	1.286	0.676	0.214366	5450	5419	0.987	0.933	0.018755
5910	5879	1.234	0.556	0.265749	5440	5409	0.977	0.911	0.023315
5905	5874	1.202	0.506	0.288402	5430	5399	0.963	0.884	0.028532
5900	5869	1.176	0.475	0.302186	5420	5389	0.950	0.860	0.033177
5895	5864	1.151	0.461	0.304996	5410	5379	0.935	0.833	0.038504
5890	5859	1.132	0.468	0.294424	5400	5369	0.921	0.792	0.050300
5885	5854	1.121	0.500	0.269123	5390	5359	0.903	0.746	0.063666
5880	5849	1.123	0.559	0.232536	5380	5349	0.882	0.722	0.066722
5875	5844	1.135	0.623	0.199947	5370	5339	0.868	0.720	0.062314
5870	5839	1.157	0.694	0.170371	5360	5329	0.859	0.731	0.053785
5865	5834	1.181	0.769	0.143009	5350	5319	0.855	0.731	0.052229
5860	5829	1.208	0.820	0.129139	5340	5309	0.849	0.722	0.054011
5850	5819	1.250	0.894	0.111731	5330	5299	0.841	0.718	0.052707
5840	5809	1.266	0.892	0.116717	5320	5289	0.831	0.722	0.046868
5830	5799	1.259	0.816	0.144553	5310	5279	0.825	0.725	0.043071
5820	5789	1.230	0.724	0.176659	5300	5269	0.819	0.719	0.043408
5810	5779	1.187	0.642	0.204865	5290	5259	0.810	0.706	0.045806
5800	5769	1.153	0.603	0.216068	5280	5249	0.796	0.702	0.041889
5790	5759	1.130	0.577	0.224044	5270	5239	0.791	0.706	0.037894
5780	5749	1.113	0.504	0.264079	5260	5229	0.784	0.716	0.030243
5775	5744	1.091	0.455	0.291518	5250	5219	0.779	0.718	0.027180
5770	5739	1.064	0.396	0.329459	5240	5209	0.774	0.716	0.025964
5765	5734	1.035	0.355	0.356680	5230	5199	0.764	0.705	0.026790
5760	5729	1.001	0.332	0.367873	5220	5189	0.755	0.694	0.028082
5755	5724	0.975	0.337	0.354118	5210	5179	0.745	0.683	0.028963
5750	5719	0.957	0.381	0.307001	5200	5169	0.734	0.670	0.030410
5745	5714	0.958	0.456	0.247452	5190	5159	0.724	0.652	0.034916
5740	5709	0.978	0.556	0.188247	5180	5149	0.714	0.640	0.036472
5730	5699	1.054	0.788	0.096950	5170	5139	0.701	0.628	0.036656
5720	5689	1.145	0.981	0.051529	5160	5129	0.686	0.621	0.033182
5710	5679	1.197	1.084	0.033054	5150	5119	0.679	0.618	0.031378
5700	5669	1.218	1.134	0.023820	5140	5109	0.674	0.620	0.027837
5690	5659	1.222	1.156	0.018508	5130	5099	0.664	0.624	0.020711
5680	5649	1.218	1.165	0.014830	5120	5089	0.658	0.624	0.017685
5670	5639	1.215	1.166	0.013722	5110	5079	0.652	0.618	0.017852
5660	5629	1.205	1.165	0.011253	5100	5069	0.644	0.614	0.015901
5650	5619	1.198	1.163	0.009884	5090	5059	0.633	0.603	0.016184
5640	5609	1.191	1.156	0.009943	5080	5049	0.624	0.593	0.016985

清 华 大 学 实 验 报 告

系别_____ 班号_____ 姓名_____ （同组姓名_____）

作实验日期　　年　　月　　日　　教师评定

由这些数据可作出钕玻璃的吸收曲线。

所作的是 α 与修正后的波长 λ 的关系，而不是 α 与 λ_0 的关系。

曲线的具体形状见下页的图。

从曲线上可以看出，钕玻璃在 508～610 nm 波段有若干个明显的吸收峰，其中以落在 572.0 nm ～ 596.0 nm 波段的三个峰最高且最为明显，从图中可大致确定这三个峰对应的波长为

$\lambda_1 = 5730\ \text{Å}$ ， $\lambda_2 = 5865\ \text{Å}$ ， $\lambda_3 = 5938\ \text{Å}$

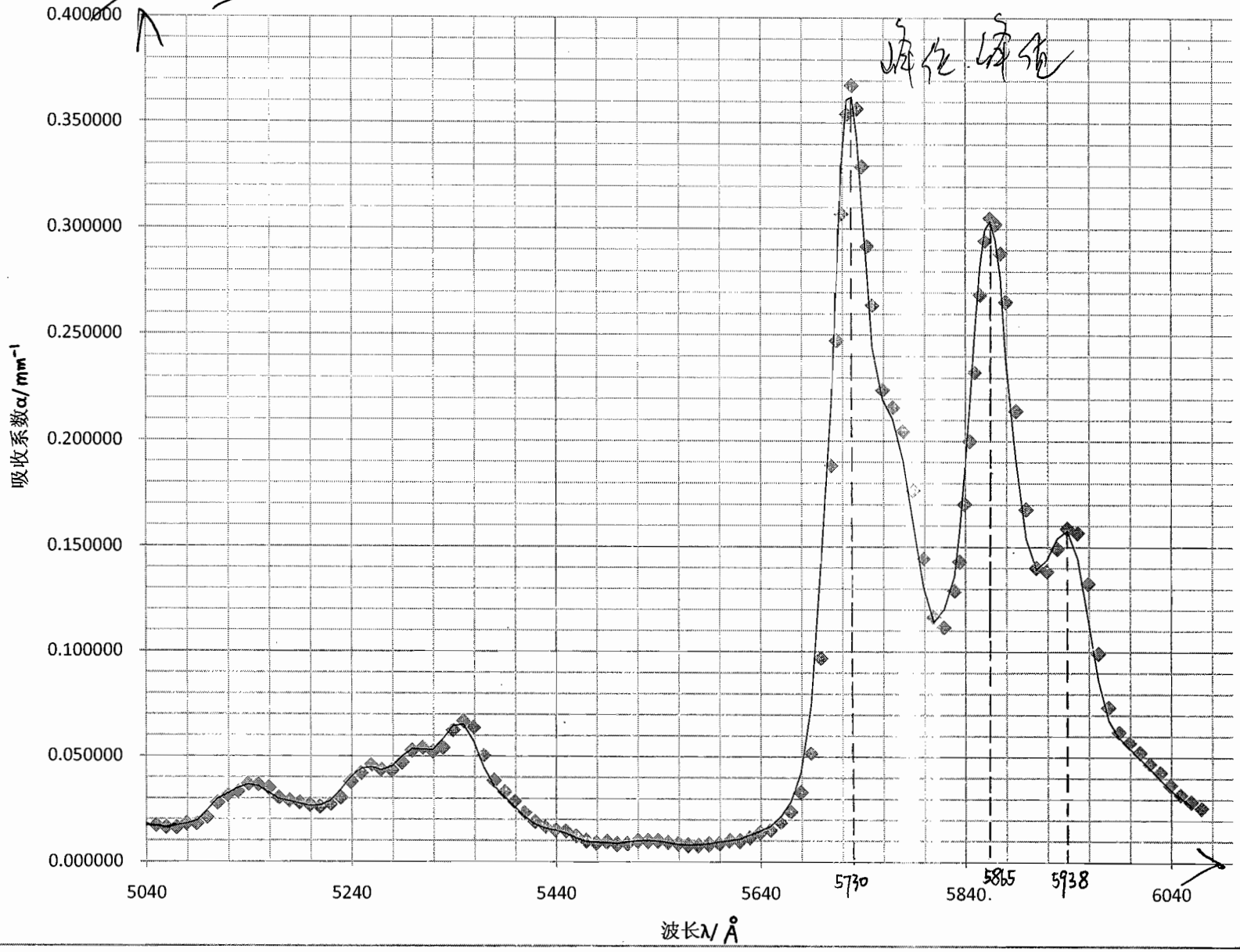
即（以 nm 作单位）：

$\lambda_1 = 573.0\ \text{nm}$ ， $\lambda_2 = 586.5\ \text{nm}$ ， $\lambda_3 = 593.8\ \text{nm}$。

吸收曲线在 504.0 nm ～ 540.0 nm 波段也还有若干个吸收峰，但与前三个相比高度很低且平缓得多，不是十分显著。这里不再一一给出其对应的波长。

从曲线中还可以发现，在 548.0 nm ～ 560.0 nm 波段，钕玻璃的吸收系数比较稳定，几乎没什么变化。可以形象地说，钕玻璃对波长在这一范围内的光"不敏感"。这种不敏感主要体现为对波长变化不敏感。

钕玻璃的吸收曲线


0.400000
0.350000
0.300000
0.250000
0.200000
0.150000
0.100000
0.050000
0.000000
吸收系数α/mm⁻¹
5040
5240
5440
5640
5730
5840
5865
5938
6040
波长λ/Å

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

六、思考题

1. 为什么要进行光源系统与单色仪光学系统的共轴调节？

答：为了获得较强的光强，便于使光源成象在狭缝上。调节后透镜与光缝间的距离使其相对孔径与仪器的相对孔径相等，这样可获得最佳照明，提高光源的光学利用率。

2. 校对单色仪的波长示值为何要用汞灯？而测量吸收曲线为何要用溴钨灯？

答：校对单色仪波长示值时应采用有确定波长可见谱线的光源。汞灯在可见光波段内有407.7nm，435.8nm，546.1nm、577.0nm和579.0nm等可见谱线，且其波长已被之前的实验较为精确地测定，因此用汞灯可确定单色仪的偏差，其谱线分立为校准提供了方便。

测定吸收曲线要求光源能够产生连续谱。溴钨灯光效高、寿命长、光色更好，便于使用，具有很高的输出稳定性，更重要地，其光谱覆盖范围宽，全谱范围内光谱连续且平滑，因而适于用来测吸收曲线。

3. 试讨论单色仪的入射、出射狭缝宽度对出射光单色性的影响。

答：狭缝宽度越小则出射光线单色性越好，但宽度过小也存在着光线亮度不够使观察变困难的问题，因此缝宽要适中，既能保证较好的单色性又要保证能观察到谱线。

一般单色入射准直系统与出射系统的相对孔径是一样的，即在出射狭缝平面上所成的象的大小等于入射狭缝的大小，放大率为1:1。这时，出射狭缝宽度应与入射狭缝宽度相等，才能使出射光束相对地有最大的光强及最好的单色性。

七、实验总结与体会

本次实验的重点和难点在于波长示值的校准和狭缝宽度的调节。这一过程对操作精度要求高，并且必须耐心细致地进行调节。但实验中只要按照要求一步步地进行，就能顺利完成。调节过程中，我发现谱线是斜的，这就使得实验时无法做到谱线刚好被狭缝夹住，因此必须随机应变地采用到的办法，即每次都让谱线的固定位置在狭缝中央且与缝同宽。这一过程让我体会到，具体实验过程中不应墨守成规，而要去试采取不同的方法解决遇到的问题。

测吸收曲线时要记录一百多组数据，这是一个相当冗长、重复性高的、繁琐的过程，但要想出色地完成实验就要有耐心、有毅力，认真地测好每一个数据点。

这次实验总体上进行得很顺利。这不仅由于自己在实验前做了很好的预习，还有赖于顾老师的悉心指导。需测的数据点虽多，但最终做出的吸收曲线还是十分有趣的。这让我觉得本次实验收获很大。

清华大学实验报告

系别 精仪系 班号 精71 姓名 闫福 （同组姓名 ）

作实验日期 2013 年 5 月 5 日 教师评定

一. 校准

标准值/Å	5791	5770	5461	4358
测量值/Å	5822	5800	5492	4390
偏差/Å	31	30	31	32

二. 本底光强. $\lambda = 6109$ Å. $n = 1.885$ $d_1 = 0.8$mm . $d_2 = 3.8$mm

λ/Å	n_1	n_2	λ/Å	n_1	n_2	λ/Å	n_1	n_2	λ/Å	n_1	n_2	λ/Å	n_1	n_2
6100	1.620	1.500	5880	1.123	0.559	5690	1.222	1.156	5440	0.977	0.911	5190	0.724	0.652
6090	1.614	1.480	5875	1.135	0.623	5680	1.218	1.165	5430	0.963	0.884	5180	0.714	0.640
6080	1.597	1.450	5870	1.157	0.694	5670	1.215	1.166	5420	0.950	0.860	5170	0.701	0.628
6070	1.578	1.413	5865	1.181	0.769	5660	1.208	1.165	5410	0.935	0.833	5160	0.686	0.621
6060	1.564	1.377	5860	1.208	0.820	5650	1.198	1.163	5400	0.921	0.792	5150	0.679	0.618
6050	1.548	1.345	5850	1.250	0.894	5640	1.191	1.156	5390	0.903	0.746	5140	0.674	0.620
6040	1.534	1.312	5840	1.266	0.892	5630	1.181	1.151	5380	0.882	0.722	5130	0.664	0.624
6030	1.519	1.281	5830	1.259	0.816	5620	1.173	1.144	5370	0.868	0.720	5120	0.658	0.624
6020	1.501	1.247	5820	1.230	0.724	5610	1.162	1.135	5360	0.859	0.731	5110	0.652	0.618
6010	1.485	1.191	5810	1.187	0.642	5600	1.153	1.126	5350	0.855	0.731	5100	0.644	0.614
6000	1.463	1.086	5800	1.153	0.603	5590	1.144	1.115	5340	0.849	0.722	5090	0.633	0.603
5990	1.426	0.958 ~~0.960~~	5790	1.130	0.577	5580	1.134	1.103	5330	0.841	0.718	5080	0.624	0.593
5980	1.380	0.863	5780	1.113	0.504	5570	1.121	1.088	5320	0.831	0.722			
5970	1.343	0.834	5775	1.091	0.455	5560	1.112	1.080	5310	0.825	0.725			
5960	1.328	0.849	5770	1.064	0.396	5550	1.100	1.068	5300	0.819	0.719			
5950	1.327	0.876	5765	1.035	0.355	5540	1.088	1.060	5290	0.810	0.706			
5940	1.329	0.873	5760	1.001	0.332	5530	1.078	1.051	5280	0.796	0.702			
5930	1.322	0.799	5755	0.975	0.337	5520	1.072	1.042	5270	0.791	0.706			
5920	1.286	0.676	5750	0.957	0.381	5510	1.059	1.031	5260	0.784	0.716			
5910	1.234	0.556	5745	0.958	0.456	5500	1.050	1.019	5250	0.779	0.718			
5905	1.202	0.506	5740	0.978	0.556	5490	1.040	1.003	5240	0.774	0.716			
5900	1.176	0.475	5730	1.054	0.788	5480	1.026	0.983	5230	0.764	0.705			
5895	1.151	0.461	5720	1.145	0.981	5470	1.015	0.971	5220	0.755	0.694			
5890	1.132	0.468	5710	1.197	1.084	5460	1.002	0.954	5210	0.745	0.683			
~~5885~~	~~1.115~~	~~0.500~~	5708	1.218	1.121	5452	0.997	0.933	5208	0.734	0.670			

顾 721

2013.5.5

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 精仪系 班号 精11 姓名 周祥 （同组姓名 ）

作实验日期 2013 年 3 月 29 日 教师评定 89

光电效应测定普朗克常数

一、实验目的

1. 加深对光电效应和光的量子性的理解；
2. 学习验证爱因斯坦光电效应方程的方法，并测定普朗克常数。

二、实验原理

1. 光电效应与爱因斯坦方程

以合适频率的光照射在金属表面上，有电子从表面逸出的现象称为光电效应。观察光电效应的实验示意图如图1所示。调节R可使A、K间获得从-U到0到+U连续变化的电压。光照射光电管阴极时，阴极释放的电子向阳极迁移，并在回路中形成光电流。

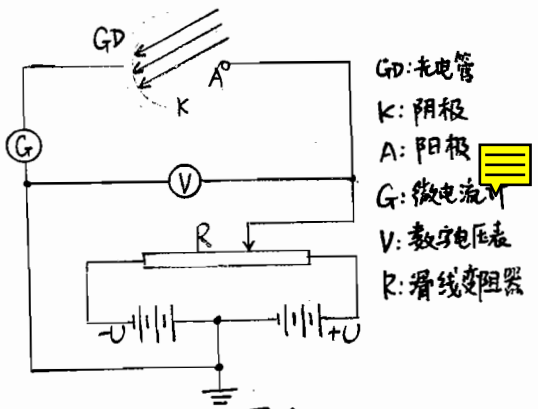


图1

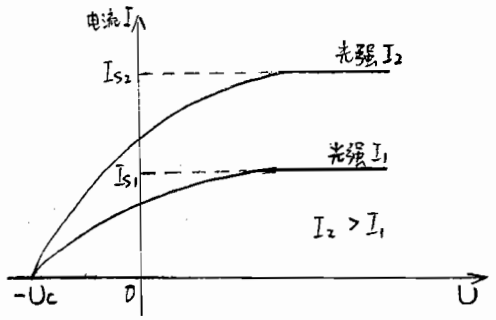


图2

光电效应有如下实验规律

(1) 存在饱和电流I_S，对不同的光强，饱和电流I_S与光强I成正比。

(2) 存在截止电压U_c。反向电压达U_c时，光电流为0，表明具有最大动能的光电子被反向电场阻挡，于是有

$$\frac{1}{2}mv_{max}^2 = eU_c \qquad (1)$$

实验表明光电子的最大动能与入射光强无关，只与入射光频率有关。

(3) U_c与入射光频率成线性关系，如图3所示。存在截止频率ν_c，当入射光频率ν大于ν_c时才发生光电效应。不同金属ν_c值不同，但直线的斜率均相同。

(4) 几乎在开始照射时就产生光电子，无论入射光多弱。延迟时间不超过10^{-9}s。

这些规律用光的波动理论无法解释，但爱因斯坦光量子假说可以解释。假设认为光由能量为$h\nu$的光子组成（h为普朗克常量），光照射在金属上时，金属中的电子要么不吸收能量要么吸收一光子的全部能量$h\nu$。只有此能量大于金属的逸出功W时，电子才可以逸出。由能量守恒有

$$h\nu = \frac{1}{2}mv_{max}^2 + W \qquad (2)$$

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

式(2)为爱因斯坦光电效应方程。将(1)代入(2)，并知 $\nu \geq W/h = \nu_c$，方程可改写为

$$h\nu = eU_c + h\nu_c$$

即

$$U_c = \frac{h}{e}(\nu - \nu_c) \tag{3}$$

式(3)表明了 U_c 与 ν 成直线关系，由直线斜率可求 h，由截距可求 ν_c。

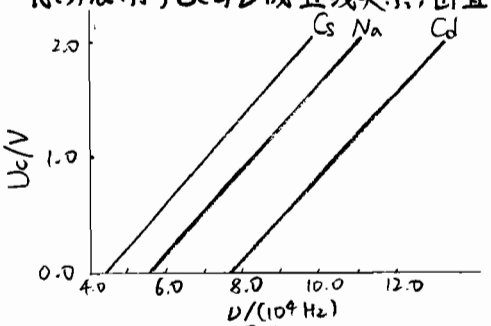


图3

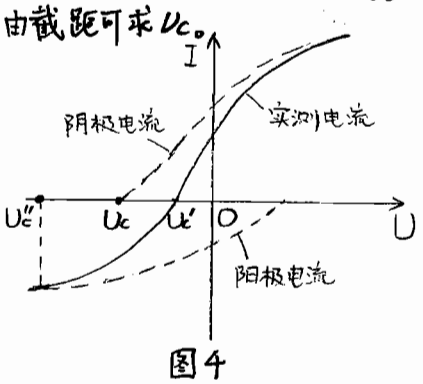


图4

2、实际测量中截止电压的确定

实际测量的光电管伏安特性如图4所示，它比图5复杂，原因如下：

(1)存在暗电流和本底电流。这两种电流属实验中的系统误差，实验时需将它们测出，并在作图时消去其影响。

(2)存在反向电流。制造光电管时，阳极会混入阴极材料，受到光照时会形成阳极电流即反向电流。因此，实测电流是阴极电流与阳极电流的叠加。若用交点 U_c' 来替代 U_c，有误差；若用图中反向电流刚开始饱和时拐弯点 U_c'' 替代 U_c 也有误差。本实验中所用光电管正向电流上升很快，反向电流很小，U_c' 比 U_c'' 更接近 U_c，故本实验中可用交点确定 U_c。

三、仪器装置及使用注意事项

实验装置示意图如图5所示，主要部件如下。

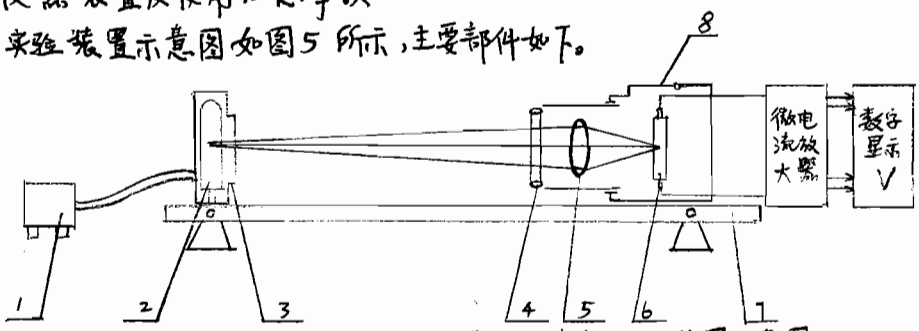


图5 PC-II型普朗克常数测定装置示意图.

1-汞灯限流器；2-汞灯及灯罩；3-光阑；4-干涉滤光片；5-成像物镜；6-光电管；7-导轨；8-观察窗口

(1)光源。采用GP-20Hg低压汞灯。光阑用于调节出射光通量。

(2)干涉滤光片。用于获得所需单色光。

(3)物镜。使汞灯成像在光电管阴极。

(4)光电管。采用1997型测h专用光电管，阴极材料为银氧钾。

清华大学实验报告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名 _____ ）

作实验日期 年 月 日 教师评定

(5)数字式微电流测试仪。可显示电流值和电压值，包含-1.999V～+1.999V光电管工作电源。

操作要点及注意事项：

(1)预热微电流测试仪，点亮汞灯。汞灯一旦开启，不要随意关闭。

(2)调整光路。调整光源与物镜位置使汞灯清晰成像于光电管阴极面。调好后盖好遮光盖。

(3)校准微电流测试仪。先校准零点，再校准满度，然后便可将测量范围旋钮置于所需位置。测试完毕，应将测量范围旋钮转回"短路"位置。

四.实验任务

1.测暗电流的特性曲线。功能选择开关置"2V"，调节电压调节旋钮，使显示为电压最低值，再将功能选择开关拨到"A"，测量范围旋钮转至10^{-12}A档。从-2V到0V，大约每隔0.2V测出相应电压、电流值，作出暗电流特性曲线。

2.测定光电管不同波长的伏安特性曲线。选择某一滤光片，使汞灯的某一单色光照射在光电管上。分别测出波长为404.7 nm、435.8 nm、546.1 nm、577.0nm的U-I特性曲线，并求截止电压U_c。

3.课内用Excel进行直线拟合，获得拟合参数，并求出普朗克常数。

五.实验步骤

1.本次实验实际采用的装置是GD-Ⅲ型普通克常数测定仪，其构造与原理与前述PC-Ⅱ型仪器大致相同，故不再赘述。

2.实验前的准备

(1)认真阅读仪器说明书，检查线路是否已按要求连接好；

(2)旋转"滤色片转换装置"置遮光位置，使光电管所受光照为0；

(3)打开汞灯和测试仪主机，使预热5分钟；

(4)放大倍率调整至"10^{-13}"，调节"放大器调零"旋扭，使"电流指示"显示为0。

3.测量光电管的暗电流

(1)检查线路连接是否正确，将放大倍率调整至10^{-13}；

(2)顺时针旋转"电压调节"旋钮，并适当改变"电压转换"，记录相应电流值。

4.测量光电管的U-I特性

(1)使暗盒离开光源40 cm，将放大倍率调至10^{-13}档，"电压转换"开关置"-2V-2V"档；

(2)旋转"滤色片转换装置"设置滤色片，使光电管从-2V起缓慢增加，观察电流变化情况，并记下电流接近零时的电压值以便精测；

(3)在粗测基础上精测。从短波长起依次换入滤色片，记录光电流的值。

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

六、数据处理

1. 光电管的暗电流特性

实验中测得的数据列表表示如下：

电压U/V	-1.998	-1.801	-1.601	-1.400	-1.201	-1.000	-0.801	-0.600	-0.400	-0.200	0.000
电流$I/10^{-13}$A	-0.1	0.0	-0.2	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.0	0.1	0.1	0.2

尽管电流放大倍率已经调至最小，但测到的暗电流仍然是很小的。不过仍可从这组数据中推测出暗电流的某些性质。

可以发现，在反向电压的大小逐渐减小时，暗电流一度由负值变化为正值。分析暗电流产生的原因便很容易理解这一点：暗电流是由于阴极本身热电子发射等原因而产生的，可以想像，这样的热电子同样具有最大动能；加反向电压时暗电流受到抑制，反向电压大小减小时这种抑制也在减弱，从而使暗电流呈现上升趋势（由负变为正）；这一最大动能的存在也可以解释加反向电压时暗电流也可以为正值的事实。有理由相信，与光电流类似地，暗电流也有在一个相应的"截止电压"和饱和值。

然而，电子的热动运动能与光子的能量相比很小，反映在实验中便是暗电流的数值是很小的。以本次实验所用仪器的精度，尚不足以测出足够精确的暗电流数值以验证上述讨论。

暗电流在实验中属于系统误差，应该从实际测出的光电流中减去。但它的数值与后面测出的光电流相比可以忽略不计；考虑到本实验对精度的要求，后面的数据中不再做此处理，即认为暗电流大小为0，以简化处理过程。

2. 光电管的 U-I 特性

实验中分别对五种不同波长的光测量了光电管的伏安特性。

原始数据列表整理如下，所作的U-I曲线见附页。

365nm	U/V	-1.992	-1.845	-1.820	-1.811	-1.803	-1.793	-1.789	-1.780	-1.770	-1.706	-1.692	-1.608
	$I/10^{-13}$A	-107.4	-34.5	-14.9	-8.1	0.2	8.8	14.9	23.0	36.2	147.8	182.4	549
405nm	U/V	-1.299	-1.800	-1.603	-1.404	-1.303	-1.263	-1.250	-1.245	-1.230	-1.199	-1.149	
	$I/10^{-13}$A	-147.0	-143.7	-130.2	-93.2	-45.5	-13.6	0.4	4.2	23.2	73.3	183.1	

清华大学实验报告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名 _____ ）

作实验日期 年 月 日 教师评定

436nm	U/V	-1.994	-1.800	-1.601	-1.199	-1.135	-1.126	-1.117	-1.114	-1.100	-1.053	-1.006	-0.902	-0.803
	$I/10^{-13}$A	-167.3	-161.4	-155.4	-78.4	-29.9	-15.4	-4.3	0.2	20.8	99.4	199.3	532	1020
546nm	U/V	-1.999	-1.605	-1.203	-0.800	-0.602	-0.580	-0.573	-0.572	-0.560	-0.523	-0.501	-0.401	
	$I/10^{-13}$A	-220	-217	-215	-197	-65.5	-19.8	-1.3	0.9	33.8	186.0	275	1072	
577nm	U/V	-1.998	-1.603	-1.201	-0.804	-0.603	-0.551	-0.500	-0.496	-0.495	-0.463	-0.431	-0.369	
	$I/10^{-13}$A	-144.4	-141.1	-139.4	-136.6	-109.4	-76.5	-9.8	-3.2	0.1	70.8	176.3	560	

如实验原理中所述，这里采用"零点法"确定截止电压，即认为光电管U-I曲线与横轴交点处的电压值就是截止电压，将得到的截止电压列表如下

波长λ/nm	365	405	436	546	577
频率$\nu/10^{14}$Hz	8.22	7.41	6.88	5.49	5.20
截止电压U_c/V	1.805	1.255	1.114	0.569	0.495

在用这些数据得到普朗克常数前先讨论一下光电管U-I曲线的特点。

理论上，光电流应是从截止电压起由0开始上升，并最终达到某饱和值。本次实验所作曲线中并未体现这种饱和值，说明U-I曲线并不完整。这是由于在较小反向电压及正向电压的情况下的光电流并没有加以测量。本实验的目的是得到普朗克常量，故只需要U-I曲线中电流刚开始上升处附近的部分就可以了。

另外，实测的U-I曲线也并非是电流从零开始变化的，而是在较大电压范围内保持某个负值附近，当电压达到某个值时开始迅速上升。这是由于存在反向电流，即光电管阳极由于受阴极材料玷污，在受到光照时也会发出光电子。这些光电子在反向电场作用下形成反向电流。实验数据表明这一反向电流比较小，基本在10^{-11}量级，这也是为什么可以把零点电压视为截止电压的原因。

3. 计算普朗克常量

根据实验数据绘制的U_c-ν关系图线见附页。

从图线中可求出其斜率 $k = 4.1176\times10^{-15}$ (V·s)

由实验原理部分，$U_c = \frac{h}{e}(\nu - \nu_c)$

故 $k = \frac{h}{e}$，其中e为电子电荷量，$e = 1.60\times10^{-19}$C

从而 $h = ke = 4.1176\times10^{-15}\times1.60\times10^{-19} = 6.59\times10^{-34}$ J·s

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名 _____ ）

作实验日期 年 月 日 教师评定

当今普遍采用的普朗克常数的值 $h=6.626068\%\times10^{-34}\ J\cdot s\approx6.63\times10^{-34}\ J\cdot s$

实验值与此值的相对偏差 α 的大小为

$$\alpha=\frac{6.63-6.59}{6.63}\times100\%=0.60\%$$

可见实验的误差不太大，比较让人满意。？

七、误差分析

如前所述，本次实验存在一定误差，误差可能来源于如下几个方面：

1. 暗电流、反向电流等系统误差为了简便在处理数据的过程中没有予以消除，这会影响截止电压 U_c 的确定；

2. 由于实验数据的图线一律采用手绘，有些地方不够精确，会导致截止电压与直线斜率存在偏差；

3. 测光电流时有时需要转换电流放大倍率，此时没有对电流重新校零，实验过程中可能也会不慎触碰调零旋钮，使测得的电流存在偏差；

4. 实验过程中，由于光电管所处的暗盒可能没有完全密封，导致室内灯光及自然光可以进入暗盒，影响实验结果；

5. 仪器本身存在的其它缺陷造成的误差。

八、思考题

1. 实验时能否将干涉滤光片插到光源的光阑口上，为什么？

答：不能。因为若如此做，光在射到光电管上之前会混入自然光等成分，使入射光不是特定波长的，影响实验结果。

2. 从截止电压 U_c 与入射光频率 ν 的关系曲线，能确定阴极材料的逸出功吗？

答：可以。由于 $U_c=\frac{h}{e}(\nu-\nu_c)$，故由曲线截距可得截止频率 ν_c，再由逸出功计算公式 $W=h\nu_c$ 可计算出逸出功。

3. 简述光电管的一些应用以及与光电池的区别？

答：光电管受光照后可产生光电流，从而可用于检测光信号，也可用作传感器。作为一种光敏元件，光电管只是将光信号转化为电信号，不提供电能；而光电池是供能元件，将光能转化为电能。

4. 光电流或截止电压随光源光强变化吗？对这些现象的解释与光的波动理论是否一致？

答：光强越强，光电流越大，这与波动理论一致。但按波动理论，光强越强，光电子的逸出速率就越大，从而截止电压应与光强有关，而实际上截止电压是

清华大学实验报告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

不随光源光强变化的。经典的光的波动理论无法解释截止电压的这一规律。

5. 说明光电效应在建立量子概念和光的波粒二象性方面的意义。

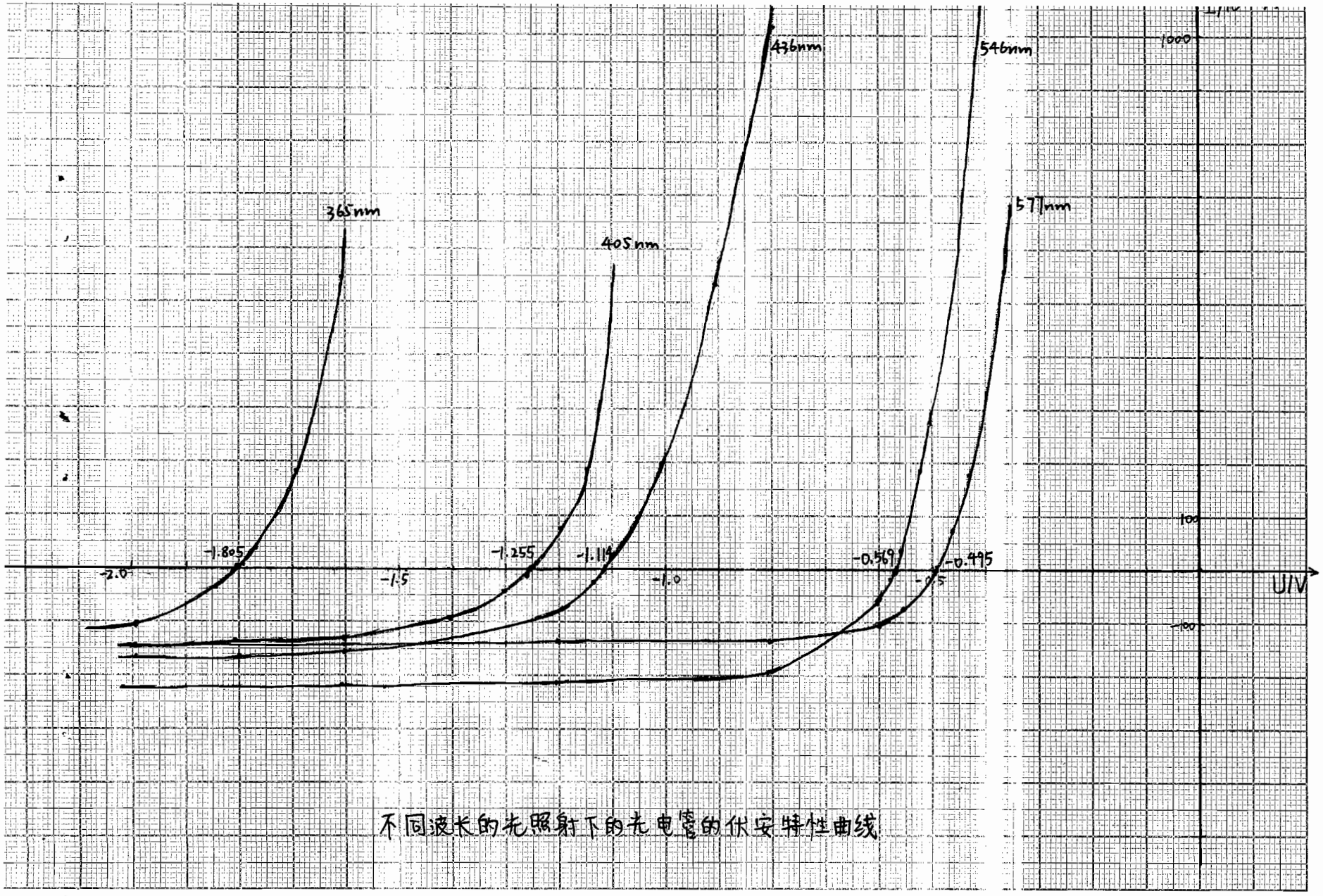
答：光电效应的实验规律是经典的光的波动理论所不能解释的。爱因斯坦从量子力学的基本假设出发，引入光量子的概念，完美地解释了光电效应的实验规律，从而有力地证明了量子理论的正确性。光电效应的实验规律表明，光既是波，又是粒子，光具有波粒二象性；它为光的波粒二象性提供了有力的证据。

九、实验总结

虽然测出的普朗克常数的值与公认值之间存在一定偏差，但本次实验总体上进行得很顺利，也是比较成功的。通过实验我加深了对光电效应和光的量子性的理解，学会了一种测普朗克常数的方法，实验目的已经达到。

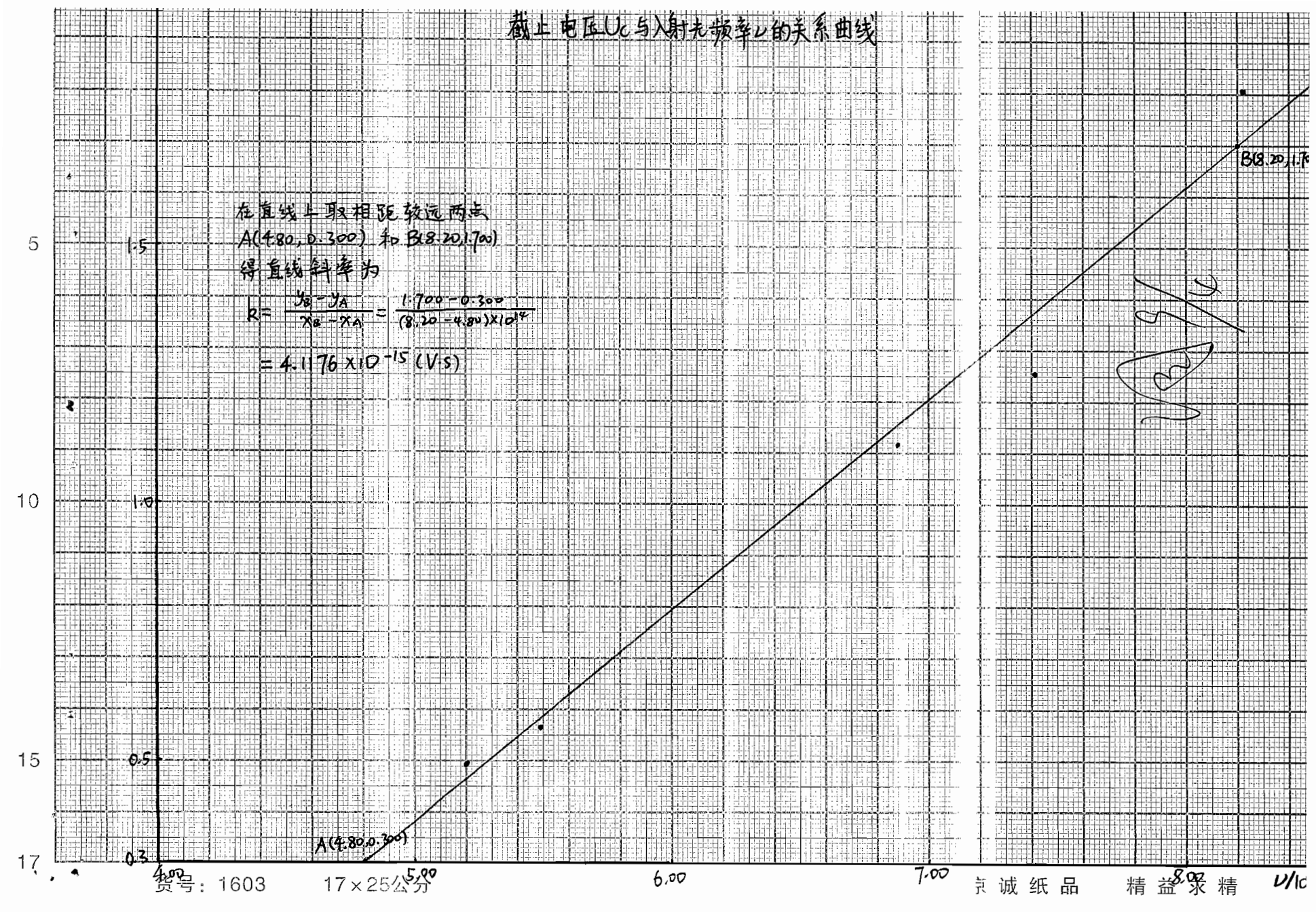
本次实验不可避免地存在一些不足。从光电管的U-I曲线的绘制过程看，测定伏安特性时所采的数据点不够全面且不够均匀，曲线变化较快处采点数不够多，这些可能造成绘制出的曲线不够准确。实验中其他的不足在"误差分析"部分已有所体现。

这是我做过的唯一一次关于近代物理的实验，无论从实验涉及的物理概念和原理上，还是从实验的具体方法上，近代物理实验与传统的物理实验都存在着不小的差异，这在今后的学习中要加以注意并深入体会。



不同波长的光照射下的光电管的伏安特性曲线

货号：1603　　17×25公分　　京诚 品　精益求精


截止电压U_c与入射光频率ν的关系曲线
在直线上取相距较远两点
A(4.80, 0.300) 和 B(8.20, 1.700)
得直线斜率为
$k = \frac{y_B - y_A}{x_B - x_A} = \frac{1.700 - 0.300}{(8.20 - 4.80) \times 10^{15}}$
$= 4.1176 \times 10^{-15}$ (V·s)
1.5
1.0
0.5
0.3
A(4.80,0.300)
B(8.20,1.7
5.00
6.00
7.00
8.00
$U/10^{15}$

清华大学实验报告

系别_____ 班号_____ 姓名_____ （同组姓名_____）

原始数据 作实验日期 年 月 日 教师评定

1. 暗电流特性曲线

电压U/V	-1.998	-1.804	-1.601	-1.400	-1.204	-1.000	-0.801	-0.600	-0.400	-0.200	0.000
电流I/10^{-13}A	-0.1	0.0	-0.2	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.0	0.1	0.1	0.2

2. 不同波长伏安特性.

λ = 404.7 nm: 405nm

U/V	-1.999	-1.800	-1.603	-1.404	-1.303	-1.250	-1.263	-1.245	-1.230	-1.199
I/10^{-13}A	-147.0	-143.7	-130.2	-73.2	-45.5	0.4	-13.6	4.2	23.2	73.3

λ = 435.8nm: 436nm

U/V	-1.994	-1.800	-1.601	-1.199	-1.135	-1.126	-1.117	-1.114	-1.100	-1.053	-1.00
I/10^{-13}A	-167.3	-161.4	-155.4	-78.4	-24.9	-15.4	-4.3	0.2	20.8	89.4	199.

-0.902 532 -0.803 1020

λ = 546.1nm: 546nm

U/V	-1.999	-1.605	-1.203	-0.800	-0.602	-0.580	-0.573	-0.572	-0.560	-0.523	-0.501	-0
I/10^{-13}A	-220	-217	-215	-197	-65.5	-19.8	-1.3	0.9	33.8	186.0	275	10

λ = 577.0nm:

U/V	-1.998	-1.603	-1.201	-0.804	-0.603	-0.551	-0.500	-0.496	-0.495	-0.499	-0.
I/10^{-13}A	-144.4	-141.1	-139.4	-136.6	-109.4	-76.5	-9.8	-3.2	0.1	-5.6	70

-0.431 176.3 -0.364 560

λ = 365nm

U/V	-1.992	-1.845	-1.820	-1.803	-1.789	-1.608	-1.780	-1.770	-1.
I/10^{-13}A	-107.4	-34.5	-14.9	0.2	14.9	549	23.0	36.2	-8

-1.793 -1.706 -1.692

8.8 147.8 182.4

29/3

306

清华大学实验报告

系别 精仪系 班号 精11 姓名 周祥 （同组姓名 ）

作实验日期 2012 年 10 月 11 日 教师评定 9

拉伸法和动力学法测弹性模量

一、实验目的

(1)学习用拉伸法和用更实用、更准确的动力学法测量弹性模量的方法；

(2)掌握螺旋测微计和读数显微镜的使用；

(3)学习用逐差法处理数据；

(4)学习用实验方法研究与修正系统误差。

二、实验原理

1. 胡克定律与弹性模量

设有一长为L、截面积为S的均匀金属丝，沿长度方向受一外力下后伸长δL。单位截面积上的垂直作用力F/S称为正应力，金属丝的相对伸长δL/L为线应变。实验表明，在弹性限度内，正应力与线应变成正比，即

$$\frac{F}{S}=E\frac{\delta L}{L}$$

此即胡克定律。式中比例系数 $E=\frac{F/S}{\delta L/L}$ 称作材料的弹性模量，它表征材料本身的性质，单位为Pa。

2. 拉伸法及用逐差法处理数据

若欲测钢丝的弹性模量，如果能测出其直径D，则由 $E=\frac{F/S}{\delta L/L}$ 可得

$$E=\frac{4FL}{\pi D^2\delta L}$$

具体方法是将钢丝悬挂于支架上，上端固定，下端加砝码对钢丝施力F，测出钢丝相应伸长量δL即可求出E。

δL一般很小，需用读数显微镜测量。且为减少随机误差，应采用测多个δL的方法，即在钢丝下端每加一个砝码测一次伸长位置，通过数据处理求出δL。

若用此法测量10次得到相应位置$y_1, y_2, \cdots, y_{10}$，可先把前后数据分成两组，$y_1 \sim y_5$为一组，$y_6 \sim y_{10}$为一组。将两组中相应数据相减得5个Δ_i，$\Delta_i=5\delta L$，则

$$\delta L=\frac{(y_6-y_1)+(y_7-y_2)+(y_8-y_3)+(y_9-y_4)+(y_{10}-y_5)}{5\times 5}$$

这种数据处理法即逐差法，它可以充分利用所测数据，减小测量的随机误差和仪量带来的误差。

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名 _____ ）

作实验日期 年 月 日 教师评定

3. 动力学法测弹性模量的公式推导

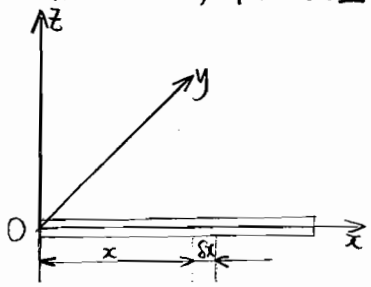


图 1

如图1所示，一细长棒的横振动满足动力学方程

$$\frac{\partial^2\eta}{\partial t^2}+\frac{EI}{\rho S}\frac{\partial^4\eta}{\partial x^4}=0$$

棒轴线沿x方向，式上η为棒上距左端x处截面的z向位移，E为棒的弹性模量，ρ为材料密度，S为棒的横截面积，$I=\iint_S z^2dS$为某一截面的惯性矩。

用分离变量法来解此方程。令$\eta(x,t)=X(t)T(t)$

并带入原方程，得 $\frac{1}{X}\frac{d^4X}{dx^4}=-\frac{\rho S}{EI}\cdot\frac{1}{T}\cdot\frac{d^2T}{dt^2}$

等式两边是两独立变量x、t的函数，只有在两端都等于同一个常数K^4时才可能成立。于是

$$\frac{d^4X}{dx^4}-K^4X=0\ ,\quad \frac{d^2T}{dt^2}+\frac{K^4EI}{\rho S}T=0.$$

设棒中每点都作简谐振动，则这两个方程通解分别为

$$X(x)=B_1chKx+B_2shKx+B_3\cos Kx+B_4\sin Kx$$
$$T(t)=A\cos(\omega t+\varphi)$$

故原方程通解为 $\eta(x,t)=(B_1chKx+B_2shKx+B_3\cos Kx+B_4\sin Kx)A\cos(\omega t+\varphi)$，式中

$$\omega=\left(\frac{K^4EI}{\rho S}\right)^{\frac{1}{2}}\qquad(*)$$

对于用细线悬挂起来的棒，若悬线位于棒作横振动的节点如图2中J、J_1点附近，且棒两端均处于自由状态，则在两端面上，横向力F与弯矩均为0。横向力$F=\frac{\partial M}{\partial x}=-EI\frac{\partial^3\eta}{\partial x^3}$，弯矩$M=-EI\frac{\partial^2\eta}{\partial x^2}$，则对应4个边界条件，

$$\left.\frac{d^3X}{dx^3}\right|_{x=0}=0\ ,\quad \left.\frac{d^3X}{dx^3}\right|_{x=l}=0\ ,\quad \left.\frac{d^2X}{dx^2}\right|_{x=0}=0\ ,\quad \left.\frac{d^2X}{dx^2}\right|_{x=l}=0.$$

l为棒长。将通解代入边界条件得

$$\cos Kl\cdot chKl=1.$$

用数值解法可求得满足此式的一系列根 $Kl=4.730,\ 7.853,\ 10.996,\cdots$。

其中$Kl=4.730$对应的振动频率为基振频率，此时棒的振幅分布如图2所示。试样基频振动时，有2个节点，由计算可得它们的位置分别在距端面0.224l和0.776l处。

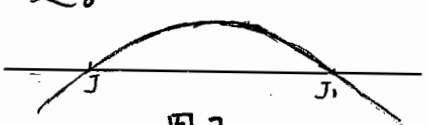


图 2

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名 _____ ）

作实验日期 年 月 日 教师评定

将 $K=K_1=\frac{4.730}{l}$ 代入 (*) 式，得棒作基频振动的固有频率

$$\omega=\left[\frac{4.730^4 EI}{\rho l^4 S}\right]^{\frac{1}{2}}$$

解出弹性模量

$$E=1.9978\times10^{-3}\frac{\rho l^4 S}{I}\omega^2=7.8870\times10^{-2}\frac{l^3 m}{I}f^2$$

上式中 $m=\rho l S$ 为棒的质量，$f=\frac{\omega}{2\pi}$ 为棒的基振频率。对于直径为 d 的圆棒，$I=\iint_S z^2 dS=\frac{\pi d^4}{64}$，代入上式得

$$E=1.6067\frac{l^3 m}{d^4}f^2$$

实际测量时，由于无法满足 $d\ll l$，上式应乘一修正系数 T_1，即

$$E=1.6067\frac{l^3 m}{d^4}f^2 T_1$$

实验中使用黄铜圆杆，$d=5mm$，$l=210mm$，查表可得 $T_1=1.003$。

三、实验仪器

(1) 支架底座；
(2) 读数显微镜；
(3) 钢尺、螺旋测微计；
(5) 信号发生器；
(6) 激振器和拾振器；
(7) 示波器；
(8) 游标卡尺。

四、实验步骤和注意事项

1. 拉伸法测弹性模量

(1) 调整钢丝竖直。钢丝下夹具上挂上砝码钩拉直钢丝，调整底座螺钉使钢丝夹具不与周围支架碰蹭。

(2) 调节读数显微镜。先粗调其高度，再细调，细调时注意消视差。

(3) 测量。测钢丝长 L 及其伸长量 δL。先读出只挂砝码钩（质量 0.200kg）时钢丝夹具标记线的位置，然后在砝码钩上每加一砝码（质量均为 0.200 kg），读次位置 y_i。先从 0.200kg 逐步增加到 0.200×10 kg，再从 0.200×10 kg 逐步减少至 0.200kg，各测一组数据。再用螺旋测微计在钢丝的不同地方测量其直径 D，测 6 次，并在测量前后记录螺旋测微计的零点 d 各 3 次。

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名 _____ ）

作实验日期 年 月 日 教师评定

注意事项：

(1) 调节显微镜要轻、慢，不用手触摸物镜、目镜的光学表面。调好后不再碰动显微镜。

(2) 测量时注意消除测微目镜丝杠空程带来的误差。

(3) 增减砝码动作轻慢，等钢丝不晃动并且形变稳定之后再测量。

2. 动力学法测弹性模量

(1) 连接线路。

(2) 测量被测样品长度、直径(在不同部位测6次取平均值)及质量。

(3) 测样品的弯曲振动基频频率。采用下述方法：在基频节点处正负30mm范围内同时改变两悬线位置，每隔5mm~10mm测一次共振频率。画出共振频率与悬线位置关系曲线。由该图可准确求出悬线在节点位置的基频共振频率。

注意事项：

(1) 不用力拉悬线。悬挂样品、移动悬线时不给悬线冲力，轻放轻动。

(2) 接线时注意将信号发生器的地与示波器的地接在一起，即共地。

(3) 给激振器加正弦信号，幅度限制在 3V ~ 4V 内。

(4) 寻找共振点时，调节信号发生器频率应极其缓慢，到共振频率附近时应用频率微调旋钮调节。调节时还要注意判断假共振信号。当样品棒达到共振时，用手指触摸样品会有麻酥感，且手一碰样品，输出信号会马上小下来。共振时注意观察发射与接收信号间的相位关系。

五、数据处理

1. 拉伸法

(1) 测钢丝直径D

测定螺旋测微计零点 d (单位：mm)。

测量前 -0.002 , -0.003 , -0.002

测量后 -0.003 , -0.004 , -0.005

平均值 $\bar{d} =$ -0.0032 mm

序号	1	2	3	4	5	6
D_i/mm	0.212	0.211	0.211	0.213	0.214	0.213

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名 _____ ）

作实验日期 年 月 日 教师评定

钢丝平均直径 $\bar{D}=\frac{1}{n}\sum D_i = 0.21233\,mm$. $S_D=\sqrt{\frac{\sum(D_i-\bar{D})^2}{n-1}} = 0.001211\,mm$

螺旋测微计示值误差 $\Delta_{仪}=0.004\,mm$.

故 $\Delta_D=\sqrt{S_D^2+\Delta_{仪}^2}=\sqrt{0.001211^2+0.004^2}=0.004\,mm$

修正仪器的系统误差: $D=\bar{D}-\bar{J}=0.21233-(-0.0032)=0.21553\,mm$

所以 $D=(0.216\pm0.004)\,mm$

(2) 测钢丝长度 L 及其伸长量 δL

仪器编号 4 ; 钢丝长 $L=$ 998 mm

序号	$F_i(F_i=mg)/N$	y_i/mm		$\Delta_i(\Delta_i=y_{i+5}-y_i)$/mm	
		增砝码时	减砝码时	增砝码时Δ_+	减砝码时Δ_-
1	0.200×1×9.80	0.645	0.729	1.455	1.374
2	0.200×2×9.80	1.038	0.985	1.367	1.395
3	0.200×3×9.80	1.360	1.380	1.305	1.300
4	0.200×4×9.80	1.659	1.635	1.241	1.290
5	0.200×5×9.80	1.880	1.910	1.300	1.282
6	0.200×6×9.80	2.100	2.103		
7	0.200×7×9.80	2.405	2.380		
8	0.200×8×9.80	2.665	2.680		
9	0.200×9×9.80	2.900	2.925		
10	0.200×10×9.80	3.180	3.192		

$\bar{\Delta}=(\sum\Delta_+ + \sum\Delta_-)\cdot\frac{1}{10}=1.3309\,mm$. $S_\Delta=0.06446\,mm$.

读数显微镜测某一位置误差为 0.01 mm，因此用它测一段伸长量 $\Delta=y_{i+5}-y_i$,

$\Delta_{\Delta仪}=\sqrt{(\Delta_{y_{i+5}仪})^2+(\Delta_{y_i仪})^2}=\sqrt{2}\times0.01\,mm$

故 $\Delta_\Delta=\sqrt{S_\Delta^2+\Delta_{\Delta仪}^2}=\sqrt{0.06446^2+2\times0.01^2}=0.066\,mm$

又由于 $\Delta=5\delta L$, 故 $\delta L=\frac{1}{5}\Delta=\frac{1}{5}\times1.3309=0.2662\,mm$

$\Delta_{\delta L}=\frac{1}{5}\Delta_\Delta=\frac{1}{5}\times0.066=0.013\,mm$

故 $\delta L=(0.266+0.013)\,mm$

(3) 计算总不确定度

由 $E=\frac{4FL}{\pi D^2\delta L}$, $E=\frac{4\times0.200\times9.80\times998\times10^{-3}}{\pi\times0.216^2\times0.266\times10^{-9}}=2.0068\times10^{11}\,Pa=200.68\,GPa$

$\frac{\partial\ln E}{\partial F}=\frac{1}{F}$; $\frac{\partial\ln E}{\partial L}=\frac{1}{L}$, $\frac{\partial\ln E}{\partial D}=-\frac{2}{D}$, $\frac{\partial\ln E}{\partial\delta L}=-\frac{1}{\delta L}$

故 $\frac{\Delta_E}{E}=\sqrt{(\frac{\Delta_F}{F})^2+(\frac{\Delta_L}{L})^2+(\frac{2\Delta_D}{D})^2+(\frac{\Delta_{\delta L}}{\delta L})^2}$

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名 _____ ）

作实验日期 年 月 日 教师评定

由 $\frac{\Delta F}{F}=0.5\%$，$\Delta L\approx 3mm$ 和前面算出的 ΔD、$\Delta \delta L$

$$\frac{\Delta E}{E}=\sqrt{0.005^2+\left(\frac{3}{998}\right)^2+\left(\frac{2\times 0.004}{0.216}\right)^2+\left(\frac{0.013}{0.266}\right)^2}=0.061598$$

$$\Delta E=E\cdot\frac{\Delta E}{E}=200.68\times 0.061598=12\ GPa$$

所以 $E=(2.00+0.12)\times 10^2\ GPa$，此即钢丝弹性模量

(4) 用直线拟合法处理数据

由 $E=\frac{4FL}{\pi D^2\delta L}$，$\delta L=\frac{4FL}{\pi D^2 E}$

又 $\delta L=y-L$，故 $y=L+\frac{4L}{\pi D^2 E}F$，进一步，实验中测得 $y=\frac{4L}{\pi D^2 E}F+C$（常值）

作 $y-F$ 图线，由上式知这是一条直线，求出其斜率 k，则 $k=\frac{4L}{\pi D^2 E}$

故 $E=\frac{4L}{\pi D^2 k}$

所作 $y-F$ 图见附页，图中采用增砝码时得到的数据。钢丝弹性模量：

$$E=\frac{4L}{\pi D^2 k}=\frac{4\times 998\times 10^{-3}}{\pi\times(0.216\times 10^{-3})^2\times 0.1367\times 10^{-3}}=1.9923\times 10^{11}(Pa)=199.23(GPa)$$

2. 动力学法

(1) 测棒的长度 L 和质量 m

游标卡尺零点为 0.00mm，用游标卡尺测样品长度为 $l=$ 210.10mm

用数显电子天平得样品质量 $m=$ 34.39g.

(2) 测棒的直径 d

测螺旋测微器零点 d_0（单位：mm）

测前 −0.012，−0.011，−0.012

测后 −0.015，−0.014，−0.017

} $d_0=-0.0135mm$

序号	1	2	3	4	5	6
d_i/mm	4.982	4.968	4.971	4.972	4.975	4.983

$\bar{d}=4.9752\ mm$. $S_d=0.00611\ mm$

修正系统误差：$d=\bar{d}-d_0=4.9752-(-0.0135)=4.9887\ mm$

螺旋测微器示值误差 $\Delta_{仪}=0.004mm$.

$$\Delta_d=\sqrt{S_d^2+\Delta_{仪}^2}=\sqrt{0.00611^2+0.004^2}=0.007mm$$

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

所以 $d=(4.989\pm0.007)mm$

$L\approx210mm$，$d\simeq5mm$，查表得 $T_1=1.0031$

(3) 画 f-x 曲线确定悬线在节点处时的基频共振频率

序号	1	2	3	4	5	6
x/mm	25	30	35	65	70	75
f/Hz	361.83	360.94	359.87	360.67	361.88	363.04

由数据表格作出 f-x 图线见附页。 $f=359.47$ Hz。

(4) 计算E及其不确定度 Δ_E

$$E=1.6067\frac{l^3m}{d^4}f^2T_1=1.6067\times\frac{(210.10\times10^{-3})^3\times34.39\times10^{-3}}{(4.989\times10^{-3})^4}\times359.47^2\times1.0031$$

$$=1.0722\times10^{11}\ Pa=1.0722\times10^2\ GPa$$

$$\ln E=\ln1.6067T_1+3\ln l+\ln m+2\ln f-4\ln d$$

$$\frac{\partial\ln E}{\partial l}=\frac{3}{l},\quad\frac{\partial\ln E}{\partial m}=\frac{1}{m},\quad\frac{\partial\ln E}{\partial f}=\frac{2}{f},\quad\frac{\partial\ln E}{\partial d}=-\frac{4}{d}$$

故 $\frac{\Delta_E}{E}=\sqrt{\left(\frac{\partial\ln E}{\partial l}\Delta_l\right)^2+\left(\frac{\partial\ln E}{\partial m}\Delta_m\right)^2+\frac{\partial\ln E}{\partial f}\Delta_f^2+\left(\frac{\partial\ln E}{\partial d}\Delta_d\right)^2}=\sqrt{\left(\frac{3\Delta_l}{l}\right)^2+\left(\frac{\Delta_m}{m}\right)^2+\left(\frac{2\Delta_f}{f}\right)^2+}$

由实验室提供 $\Delta_f=0.10$ Hz，$\Delta_m=0.05g$，$\Delta_l=0.02mm$

故 $\frac{\Delta_E}{E}=\sqrt{\left(\frac{3\times0.02}{210.10}\right)^2+\left(\frac{0.05}{34.39}\right)^2+\left(\frac{2\times0.10}{359.47}\right)^2+\left(\frac{4\times0.007}{4.989}\right)^2}=0.00583$

$\Delta_E=E\cdot\frac{\Delta_E}{E}=1.0722\times10^2\times0.00583=0.6$ GPa

故测得样品的弹性模量为（样品材料为黄铜）

$E=(107.2\pm0.6)$ GPa

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名 _____ ）

作实验日期 年 月 日 教师评定

六、思考题

1. 螺旋测微计使用的注意事项是什么？棘轮如何使用？测微计用毕后应作何处置？

①使用前后应进行零点读数纠正误差；手握测微计绝热板部分，被测物也尽量少用手接触，避免因热胀影响测量精度。

②当测微螺杆端面将要接触到被测物之前，应旋转棘轮，直至接触上被测物时，它就自行打滑，并发出"嗒嗒"声，此时应停止旋转棘轮，进行读数。

③用毕还原仪器时，应将螺杆退回几转，留出空隙，以免热胀使螺杆变形。

2. 本实验中读数显微镜作测量时哪些情况下会产生空程差？应如何消除它？

测量时反转鼓轮进行读数会产生空程差，为消除它应始终沿同一方向旋转鼓轮。

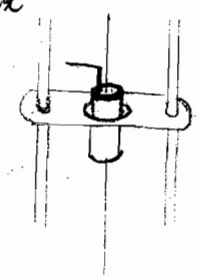
3. 从E的不确定度计算式分析哪个量的测量对E的结果准确度影响最大？测量中应注意什么？

钢丝直径对E的结果影响最大，测量中应测多次直径，且要取钢丝不同部位进行测量。

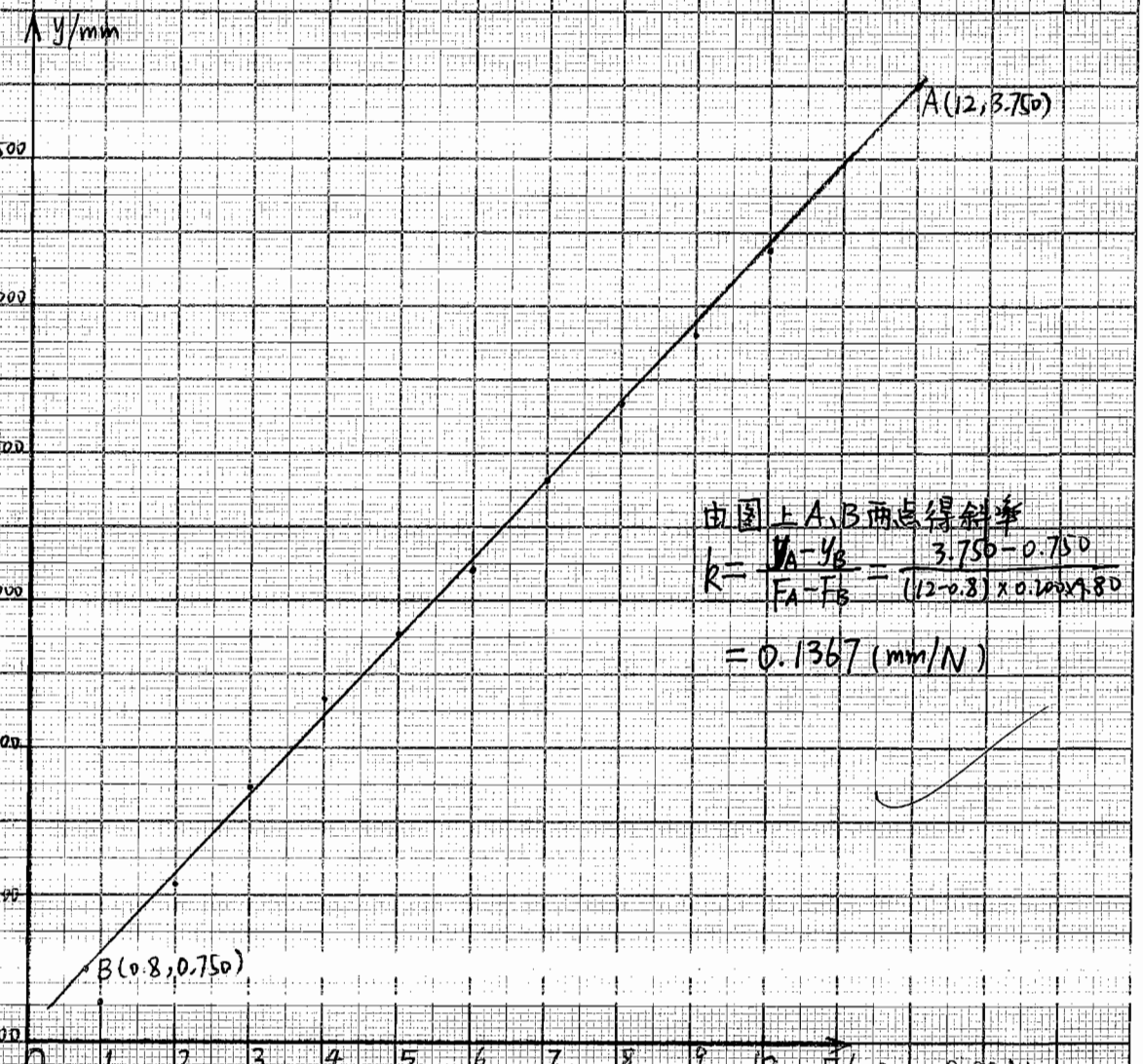
4. 见数据分析部分。

5. 本实验若改用光杠杆法测微小伸长量，实验装置应作何考虑？

如右图，在钢丝适当位置固定一个圆柱块，将光杠杆平面镜底座的后尖足立于圆柱上端面上。同时在目镜边竖直地放置一直标尺。从目镜中可读出钢丝伸长前后叉丝对准的刻度，这样可通过几何上的关系测出钢丝伸缩量。



货号1603 17×25公分



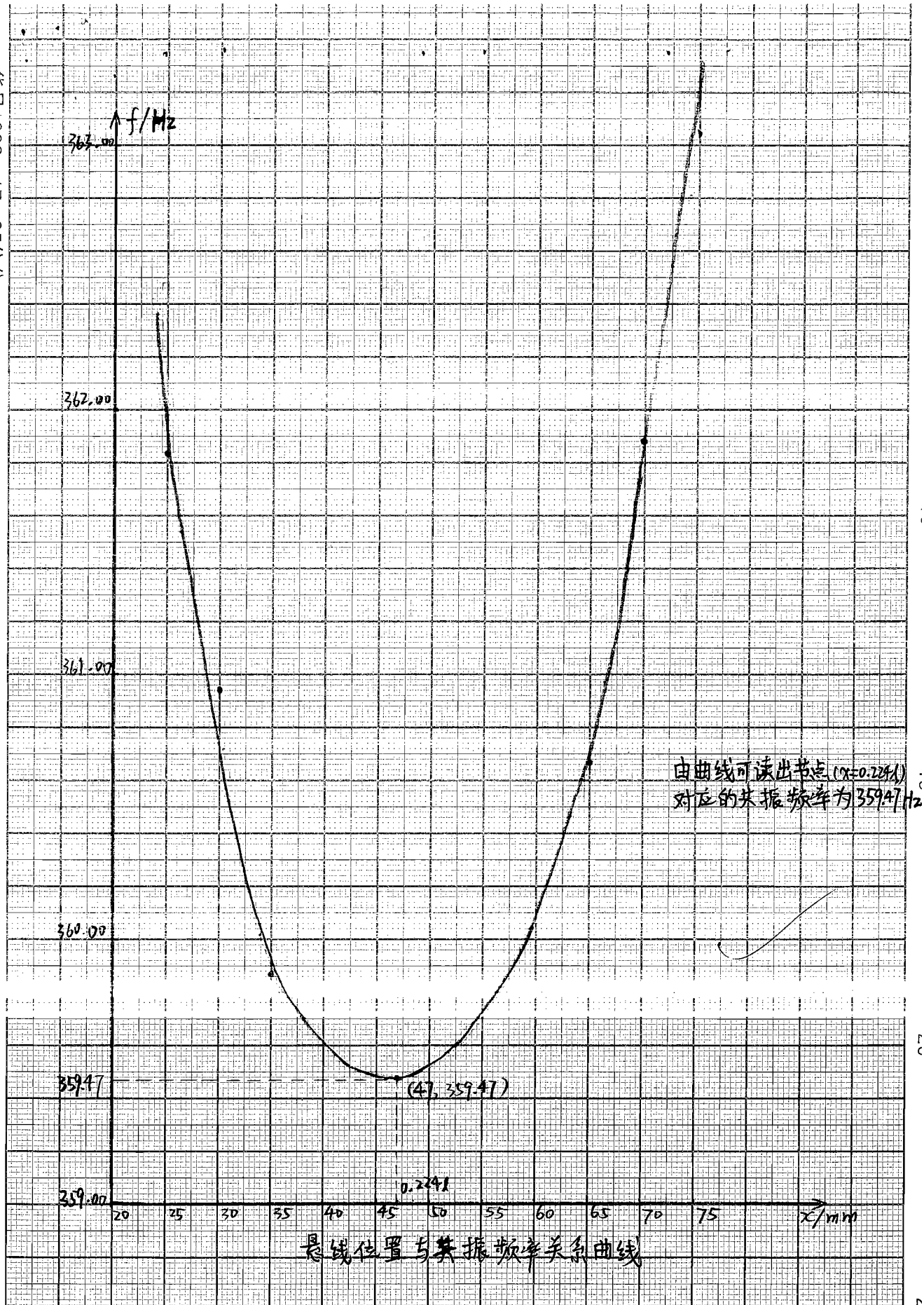
由图上A、B两点得斜率

$$k=\frac{y_A-y_B}{F_A-F_B}=\frac{3.750-0.750}{(12-0.8)\times 0.100\times 9.80}$$

$$=0.1367\ (mm/N)$$

拉伸法测弹性模量y-F曲线

货号1603 17×25公分



悬线位置与共振频率关系曲线

清华大学实验报告

原始数据

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名 _____ ）

作实验日期 年 月 日 教师评定

(1) 测钢丝长度 L 及伸长 δL

仪器编号 4 ；钢丝长度 L = 998 mm。

序号	Fi / mg	增砝码 y_i/mm	减砝码	增砝码时 l_i/mm	减砝码时 l_i
1	1	~~0.694~~ 0.685	0.729	1.455	1.374
2	2	1.038	0.985	1.367	1.395
3	3	1.360	1.380	1.305	1.300
4	4	1.659	1.635	1.241	1.290
5	5	1.880	1.910	1.300	1.282
6	6	2.100	2.103		
7	7	2.405	2.380		
8	8	2.665	2.680		
9	9	2.900	2.925		
10	10	3.180	3.192		

(2) 测钢丝直径 D

零点 d

测前 −0.002mm , −0.003mm , −0.002mm } $\bar{d}$ = −0.003 mm

测后 −0.003mm , −0.004mm , −0.005mm

序号	1	2	3	4	5	6
D_i/mm	0.212	0.211	0.211	0.213	0.214	0.213

$\bar{D}$ = 0.21

$D = \bar{D} - \bar{d} = 0.215$ mm

$\bar{l} = 1.331$ mm , ~~$\delta\bar{l} = 0.2662$ mm~~

~~$E = \frac{4FL}{\pi D^2 \delta L} = \frac{4 \times 9.80 \times 0.998}{\pi \times (0.215 \times 10^{-3})^2 \times (0.2662 \times 10^{-3})} = 1.02 \times 10^{11}$ Pa~~

导 J30 10.11

清华大学实验报告

原始数据

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名 _____ ）

作实验日期 年 月 日 教师评定

2. (1) 游标卡尺零点 0.00 mm

样品长度 210.10 mm，样品质量 34.39 g.

螺旋测微器零点.

测前 -0.012 , -0.011 , -0.012

测后 -0.015 , -0.014 , -0.017

序号	1	2	3	4	5	6
D_i/mm	4.982	4.968	4.971	4.972	4.975	4.983

0031

(2) 测基频频率

序号	1	2	3	4	5	6
悬线性置与悬端距离 x/mm	25	30	35	65	70	75
基频共振频率 f/Hz	361.83	360.94	359.87	360.67	361.88	363.04

$\Delta_f = 0.10\,Hz$, $\Delta_m = 0.059$, $\Delta_{\text{人}} = 0.02mm$, $\Delta_{\text{仪}} = 0.004\,mm$

清华大学实验报告

系别 精仪系 班号 精11 姓名 周祥(2011010495)(同组姓名)

作实验日期 2013 年 4 月 19 日 教师评定 9

霍尔效应实验及磁阻测量

一、实验目的

1. 了解霍尔效应的产生原理以及副效应的产生原理；
2. 掌握霍尔系数的测量方法，学习消除霍尔副效应的实验方法；
3. 研究半导体材料的电阻值随磁场的变化规律。

二、实验原理

1. 霍尔效应

在一块长方形薄金属板两边对称点1和2之间接一灵敏电流计(如图1)，沿x轴正向通以电流I。若在z方向加上磁场B，电流计指针立即偏转，说明1、2两点间产生了电位差。霍尔发现此电位差与电流强度I和磁感应强度B均成正比，与板厚成反比，即

$$U_H = R_H \frac{IB}{d} = K_H IB \quad (1)$$

其中U_H为霍尔电压，R_H为霍尔系数，$K_H = R_H/d$为霍尔片的灵敏度。

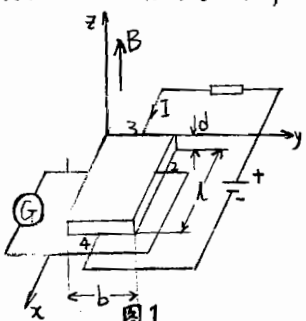


图1

用洛仑兹力可说明此公式，并可进一步地得到

$$R_H = \frac{1}{ne} \quad (2)$$

$$K_H = \frac{R_H}{d} \quad (3)$$

其中e为载流子电荷，n为载流子浓度。R_H的单位是m^3/C。

式(2)和(3)对大多数金属均成立，但对霍尔系数较高的半导体材料，公式中应引入一霍尔因子A。在弱磁场条件下，$A = 3\pi/8$，故

$$R_H = \frac{3\pi}{8}\frac{1}{ne}$$

本次实验为简化计算，A近似为1。

2. 霍尔效应的副效应

实际情况下，会有一些副效应与霍尔效应混在一起，使霍尔电压的测量产生误差，因此必须尽量消除之。各种效应的特点如下。

(1)厄廷好森效应所引起的电位差U_E是指由于载流子以不同速度在平行于x轴的方向上运动，因此在磁场作用下，速度不同于平均速度的载流子在洛仑兹力与霍尔电场力共同作用下，向y轴方向的两侧偏转，其动能在霍尔片两侧转化为热能，在1、2两点间产生温差，从而出现温差电动势U_E。$U_E \propto IB$，正负与I、B的方向相关。

(2)能斯脱效应引起的电位差U_N是指由于连接点3、4处接触电阻不同而产生不同的焦耳热，使3、4两点温度不同，从而使载流子在x方向的运动产生热流，它在磁场作用下在1、2两点间产生电位差U_N。U_N的符号与磁场B的方向有关。

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名 _____ ）

作实验日期 年 月 日 教师评定

(3)里纪—勒杜克效应引起的电位差U_R是指由于上述热流中载流子速度各不相同，在磁场作用下会使1、2两点间出现温差电动势U_R。U_R方向与B的方向有关。

(4)不等位效应引起的电位差U_0是指由于制作上的困难，1、2两点不可能恰好处在同一条等位线上，因而只要样品中有电流通过，即使B不存在，1、2两点间也会出现电位差U_0。U_0的正负只与电流方向有关，其大小在磁场不同时也略有不同。

(5)实际测量时，由于仪表调整的状态，及仪器电压受杂散电磁场和电源地线的影响，电压表会有附加电压U_S。U_S与电流、磁场方向无关。

当I、B确定后，霍尔片上的输出电压应为上述几项的代数和

$$U=f(U_H, U_E, U_N, U_R, U_0, U_S)$$

副效应的消除方法：通过改变工作电流I的方向和外加磁场B的方向的不同组合测量可消除或减小U_N、U_R和U_0的影响。U_E的变化与U_H变化相同，不能用此法消除，但U_E等的值都远小于U_H，实验测量中可略去。消除上述副效应的重点是消除不等位效应U_0。

3. 磁电阻效应原理

一定条件下，导电材料阻值R随磁感应强度B的变化规律称为磁阻效应。磁电阻有各种类型，其中正常磁电阻应用很普遍，锑化铟传感器是其中一种。正常磁电阻情况下半导体内的载流子受洛仑兹力而偏转，在两端积聚并形成霍尔电场。若霍尔电场作用和某一速度的载流子所受的洛仑兹力刚好抵消，则小于或大于该速度的电子将偏转，沿外加电场方向运动的载流子数目减少，电阻增大，表现出横向磁电阻效应。如图2，若A、B端短接，则霍尔电场不存在，所有电子将向A端偏转，也表现出磁电阻效应。

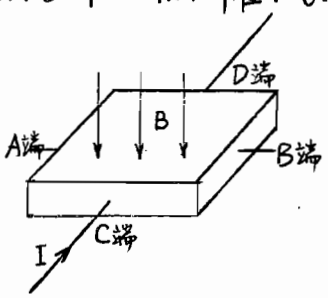


图2 磁阻器件

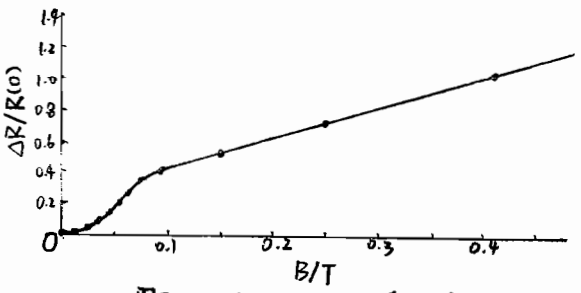


图3 ΔR/R(0)与B的关系曲线

设磁阻器件在零磁场时电阻及电阻率分别为R(0)，ρ(0)，磁场为B时电阻及电阻率分别为R(B)，ρ(B)。以$\Delta\rho/\rho(0)$表示磁阻，$\Delta\rho=\rho(B)-\rho(0)$，而$\Delta R/R(0)\propto\Delta\rho/\rho(0)$，其中$\Delta R=R(B)-R(0)$。磁场较弱时，对正常磁阻器件$\Delta R/R(0)\propto B^2$，而强磁场条件下$\Delta R/R(0)$为B的一次函数（如图3）。对于实验所用器件，$B\leq 0.06$T可看作弱磁场条件，$B\geq 0.12$T可看作强磁场条件。$\Delta R/R(0)$与电流输入端C、D的状态（恒流或恒压）及A、B输出端是短路还是开路有关，故实验结果应注明工作条件。实验

清 华 大 学 实 验 报 告

系别_____ 班号_____ 姓名_____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

中推荐C、D端恒流，A、B端短路的工作条件，因为此时ΔR/R(0)最大。

三、实验仪器

1. ZKY-HC霍尔效应测试仪（含恒流电源、数字电压表、励磁电流源）
2. ZKY-HS霍尔效应实验仪（含三组换向开关、电磁铁、霍尔片、磁电阻）
3. 万用表及导线

四、实验内容及实验注意事项

实验所用电路如图1、图2、图3。图中略去了电磁铁的结构，只表明接线方式。

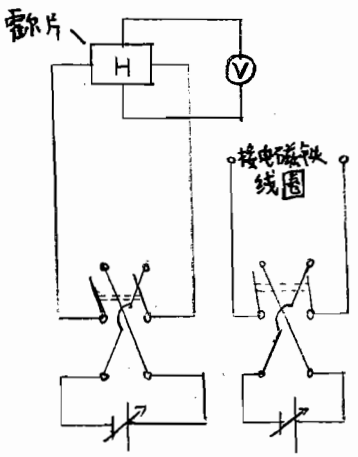


图1 实验1、2、4电路

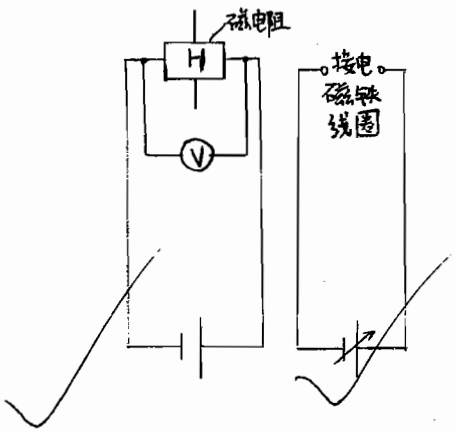


图2 实验3电路

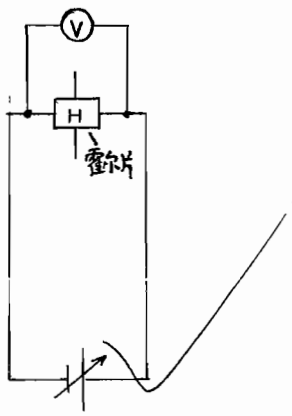


图3 实验6电路

1. 测量霍尔片输出电压U_H与输入电流I的关系曲线，要求电流源2.00~8.00mA，间隔1.00mA，每个测量点测$U_1(+B,+I_H)$、$U_2(+B,-I_H)$、$U_3(-B,-I_H)$和$U_4(-B,I_H)$4组数据。可证$U_H=\frac{1}{4}(U_1-U_2+U_3-U_4)$。课后画出$U_H$~I关系曲线，计算$K_H$、$R_H$、n的数值和不确定度，并给出不等位效应$U_0$的表示方法。
2. 标定激励电流I_M(0~800mA)与磁极间磁场B的关系。
3. 研究锑化铟磁阻器件的磁电阻效应。C、D端恒流，A、B端短路，I_{CD}=1.50mA，测磁电阻ΔR/R(0)随磁场变化规律，I_M：0~1000mA，间隔50~100mA；前6~8个点为非线性区，间隔50mA，后面为线性区，间隔100mA。
4. 测定磁极间隙水平方向磁场的分布曲线B~X；I_o=4.00mA，I_M=500mA。
5. 判定霍尔片载流子的类型是空穴还是电子。实验中记录下U_H、I、B的方向。
6. 测霍尔片中载流子的迁移率。实验时不加磁场，霍尔片工作电流0~8.00mA改变，同时测量C、D端的电压。

清 华 大 学 实 验 报 告

系别_____ 班号_____ 姓名_____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

注意事项：

1. 避免霍尔元件及二维动标尺受挤压、碰撞等，实验前检查两者及电磁铁位置并调整。
2. 实验前应将霍尔元件移至电磁铁气隙中心，并使其平面与磁场方向垂直，以使U_H最大。
3. 在不需要的时候断开励磁电流开关。

五、实验数据处理

1. U_H与I关系及K_H、R_H、n的计算.

由实验室提供的表格查得$I_M = 500mA$时，$B_0 = 123.7mT$

实验测得的数据整理如下：

I/mA	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00	8.00
U_1/mV	47.3	71.3	95.6	119.8	143.7	166.5	189.5
U_2/mV	-48.3	-73.1	-97.8	-123.1	-147.7	-172.6	-197.3
U_3/mV	45.6	68.0	89.9	111.7	133.3	154.8	175.8
U_4/mV	-46.7	-70.1	-92.5	-115.5	-138.5	-161.7	-184.4
$U_H=\frac{U_1-U_2+U_3-U_4}{4}$/mV	47.0	70.6	94.0	117.5	140.6	163.9	186.8

所作的$U_H - I$关系曲线见附页。U_H、I成线性关系.

直线斜率$k = 23.30714286$，相关系数$r = 0.999990185$

由$U_H = R_H\frac{IB}{d} = K_H IB$，故$k = \frac{R_H B}{d} = K_H B$，所以有

$$R_H = \frac{kd}{B} = \frac{23.30714286 \times 3\times10^{-6}}{123.7\times10^{-3}} \approx 5.65250\times10^{-4}\ \Omega\cdot m/T$$

$$K_H = \frac{k}{B} = \frac{23.30714286}{123.7\times10^{-3}} \approx 188.4167\ \Omega/T$$

$$\Delta_k \approx S_{k0} = k\cdot\sqrt{\frac{1/r^2-1}{n-2}} \approx k\cdot\sqrt{\frac{2(1-r)}{n-2}} = 23.30714286\times\sqrt{\frac{2(1-0.999990185)}{7-2}} \approx 0.04618\Omega$$

$$\Delta_{R_H} = \frac{d}{B}\Delta_k = \frac{3\times10^{-6}}{123.7\times10^{-3}}\times 0.04618 \approx 1.1\times10^{-6}\ \Omega\cdot m/T$$

$$\Delta_{K_H} = \frac{1}{B}\Delta_k = \frac{0.04618}{123.7\times10^{-3}} \approx 0.4\ \Omega/T$$

故 $R_H = (5.653\pm0.011)\times10^{-4}\ \Omega\cdot m/T$

$K_H = (188.4\pm0.4)\ \Omega/T$

又$R_H = \frac{1}{ne}$，故$n = \frac{1}{R_H e} = \frac{1}{5.65250\times10^{-4}\times1.6022\times10^{-19}} \approx 1.1042\times10^{22}\ m^{-3}$

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

$\Delta_n = \frac{\Delta_{R_H}}{R_H^2 e} = \frac{1.1\times10^{-6}}{(5.6525\times10^{-4})^2\times1.6022\times10^{-19}} \approx 2.4\times10^{19}\ m^{-3}$

故 $n = (1.1042 \pm 0.0024)\times10^{22}\ m^{-3}$

不等位效应 U_0 的确定：

由实验原理 $U = f(U_H, U_E, U_N, U_R, U_0, U_S)$，$f$ 表示求和，式中 U_E 很小可略去，

故 $U = f(U_H, U_N, U_R, U_0, U_S) = U_H + U_N + U_R + U_0 + U_S$

不妨设 $+B$、$+I$ 条件下参与求和的各电压均取正值

由于 U_H 正负与 I、B 方向有关，U_N、U_R 正负只与 B 方向有关，U_0 正负只与 I 方向有关，U_S 与 I、B 无关

故 $U_1(+B,+I_H) = f(U_H, U_N, U_R, U_0, U_S)$

$U_2(+B,-I_H) = f(-U_H, U_N, U_R, -U_0, U_S)$

$U_3(-B,-I_H) = f(U_H, -U_N, -U_R, -U_0, U_S)$

$U_4(-B,+I_H) = f(-U_H, -U_N, -U_R, U_0, U_S)$

所以 $\frac{1}{4}(U_1 + U_3 - U_2 - U_4) = U_H$

$\frac{1}{4}[(U_1 - U_2) - (U_3 - U_4)] = U_0$

故 $U_0 = \frac{1}{4}(U_1 - U_2 - U_3 + U_4)$

现将实验 1 中各结果整理如下：

$R_H = (5.653 \pm 0.011)\times10^{-4}\ \Omega\cdot m/T$，$K_H = (188.4 \pm 0.4)\ \Omega/T$

$n = (1.1042 \pm 0.0024)\times10^{22}\ m^{-3}$，$U_0 = \frac{1}{4}(U_1 - U_2 - U_3 + U_4)$

2. 标定 I_M 与 B 的关系

实验数据及相关计算结果列表整理如下。其中 $B = \frac{U_H}{K_H I}$，$I = 4.00mA$，$K_H = 188.4\ \Omega/T$

I_M/mA	0	100	200	300	400	500	600	700	800
U_1/mV	1.9	20.5	38.9	57.8	76.5	95.2	113.7	132.5	150.9
U_2/mV	-4.5	-22.9	-41.3	-60.2	-78.8	-97.3	-115.7	-134.2	-152.7
U_3/mV	-4.3	14.9	33.6	52.4	71.1	89.8	108.3	126.7	145.1
U_4/mV	1.8	-17.5	-36.3	-55.0	-73.7	-92.3	-111.0	-129.3	-147.6
U_H/mV	0.0075	18.950	37.525	56.350	75.025	93.650	112.175	130.675	149.075
B/mT	0.0995	25.1	49.8	74.8	99.6	124	149	173	198.

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名 _____ ）

作实验日期 年 月 日 教师评定

由此可作出 B-I_M 曲线（见附页），由曲线可看出 B 与 I_M 成线性（基本为正比）关系，这与理论相符。用计算器可求得拟合直线的方程：

$B = 0.4065 + 0.2472 I_M$ ，I_M 的单位为 mA，B 单位为 mT.

相关系数 $r = 0.9999954$

3. 锑化铟磁阻器件的磁电阻效应

实验数据及相关计算结果列表整理如下.

I_M/mA	0	50	100	150	200	250	300	350	400	500	600	700	800	900	1000
U_{CD}/V	0.5842	0.5960	0.6082	0.6762	0.7378	0.8063	0.8748	0.9335	0.9765	1.0355	1.0835	1.1278	1.1695	1.2090	1.2494
R(B)/Ω	389.5	397.3	418.8	450.8	491.9	537.5	583.2	622.3	651.0	690.3	722.3	751.9	779.7	806.0	832.9
ΔR/Ω	0	7.8	29.3	61.3	102.4	148.0	193.7	232.8	261.5	300.8	332.8	362.4	390.2	416.5	443.4
B/mT	0.4	12.8	25.1	37.5	49.8	62.2	74.6	86.9	99.3	124.0	148.7	173.4	198.2	222.9	247.6
$\frac{\Delta R}{R(0)}/10^{-3}$	0	20.0	75.2	157.4	262.9	380.0	497.3	597.7	671.4	772.2	854.4	930.4	1001.7	1069.3	1138.3

上表中 $R(B) = \frac{U_{CD}}{I}$ ，$I = 1.50$ mA ，$\Delta R = R(B) - R(0)$ ，$B = 0.4065 + 0.2472 I_M$ (mT)

由此可绘出 $\Delta R/R(0) \sim B$ 关系曲线（见附页），由曲线走势进行如下回归分析：

取前 6 点进行二次回归，有

$\Delta R/R(0) = 0.0803 B^2 + 1.2452 B - 4.0797$ ， $r^2 = 0.9991$ ，相关程度高

取后 6 点进行线性回归，有

$\Delta R/R(0) = 2.9426 B + 414.32$ ，$r^2 = 0.9986$ ，相关程度较高（若取后五点，则 $r^2 = 0.9995$）

于是在磁场较弱时，$\Delta R/R(0)$ 与 B 有着二次函数的关系，曲线为抛物线；

磁场较强时，$\Delta R/R(0)$ 与 B 间存在线性关系，曲线为直线。

抛物线与直线间光滑地过渡。

这些均与"实验原理"中的相关内容符合得较好.

4. 磁极间隙水平方向磁场的分布曲线

实验数据及相关计算结果列表整理如下：

其中 $B = \frac{U_H}{K_H I}$ ，$I = 4.00$ mA ，$K_H = 188.4$ Ω/T

实验时的励磁电流 $I_M = 500$ mA.

清 华 大 学 实 验 报 告

系别_____ 班号_____ 姓名_____ （同组姓名_____）

作实验日期　　年　　月　　日　　教师评定

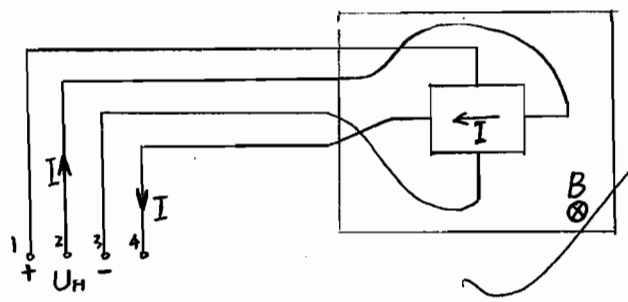
x/mm	0.00	5.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00
U_1/mV	22.7	28.7	45.2	51.9	59.0	68.3	77.1	84.8	89.7	92.8	94.2
U_2/mV	-25.0	-31.1	-47.4	-54.1	-61.2	-70.5	-79.3	-87.0	-92.0	-95.0	-96.3
U_3/mV	17.1	23.1	39.6	46.3	53.5	62.7	71.5	79.1	84.0	87.0	88.5
U_4/mV	-19.5	-25.8	-42.1	-49.0	-56.1	-65.1	-74.0	-81.5	-86.6	-89.6	-91.1
U_H/mV	21.1	27.2	43.6	50.3	57.5	66.7	75.5	83.1	88.1	91.1	92.5
B/mT	28.0	36.1	57.9	66.7	76.3	88.5	100.2	110.3	116.9	120.9	122.7
x/mm	20.00	30.00	40.00	50.00	52.00	54.00	55.00	56.00	57.00	58.00	59.00
U_1/mV	95.2	95.2	95.0	93.9	91.2	82.5	74.1	65.1	56.3	49.7	43.5
U_2/mV	-97.4	-97.3	-97.1	-96.0	-93.3	-84.7	-76.4	-67.5	-58.7	-52.1	-45.9
U_3/mV	89.5	89.5	89.2	88.3	85.5	76.8	68.6	59.5	50.7	44.2	38.0
U_4/mV	-92.1	-92.1	-91.8	-90.7	-87.9	-79.5	-71.4	-62.1	-53.3	-46.8	-40.7
U_H/mV	93.6	93.5	93.3	92.2	89.5	80.9	72.6	63.6	54.8	48.2	42.0
B/mT	124.2	124.1	123.8	122.3	118.8	107.4	96.3	84.4	72.7	64.0	55.7

由此可作出 B~x 曲线（见附页）

曲线有对称性，对称轴大致在气隙中心位置。从曲线中可以看出，随着x的增大，B先是逐渐增大到某个值，在一定范围内保持恒定，然后又逐渐减小。增加的速度先由慢变快，后由快变慢，下降的速度亦然。

从曲线中可以看出，电磁铁气隙中的磁场为匀强磁场，且磁感强度最大。

5. 判断载流子类型



电流方向如图中标示。由左手定则，不管载流子是电子和空穴，均会发生向下的（向3端）偏转。又由于3端的电势低故发生偏转的是电子。也即载流子为电子。

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

6. 霍尔片中载流子的迁移率 μ

$$\mu = \frac{v}{E} = \frac{v}{J/\sigma} = \sigma\frac{v}{I/(bd)} = \sigma\frac{v}{nevbd/(bd)} = \frac{\sigma}{ne} = \sigma R_H$$

故欲测 μ 即是要测霍尔片的电导率 σ

又电阻 $R = \frac{U_{cd}}{I} = \frac{1}{\sigma}\cdot\frac{l}{bd}$，故 $\sigma = \frac{l}{bd}\cdot\frac{I}{U_{cd}}$，$I = \frac{\sigma bd}{l}\cdot U_{cd}$

可见由 $I - U_{cd}$ 曲线的斜率可求出 σ.

I/mA	0	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00	8.00
U_{cd}/V	0.003	1.026	2.055	3.111	4.189	5.289	6.409	7.575	8.772

所作曲线见附页，回归直线方程：$I = -0.1041 + 1.0935U_{cd}$，$r = 0.99965$

故斜率 $k = 1.0935$ mA/V

$$\Delta_k \approx S_k = k\cdot\sqrt{\frac{1/r^2-1}{n-2}} \approx k\sqrt{\frac{2(1-r)}{n-2}} = 1.0935\times\sqrt{\frac{2(1-0.99965)}{9-2}} \approx 0.010935\ \text{mA/V}$$

$k = \frac{\sigma bd}{l}$，故 $\sigma = \frac{kl}{bd} = \frac{1.0935\times10^{-3}\times300\times10^{-6}}{100\times10^{-6}\times3\times10^{-6}} \approx 1093.5\ S\cdot m^{-1}$

$$\Delta_\sigma = \frac{l}{bd}\Delta_k = \frac{300}{100\times3\times10^{-6}}\times0.010935\times10^{-3} \approx 11\ S\cdot m^{-1}$$

故 $\sigma = (1094 \pm 11)\ S\cdot m^{-1}$，又 $R_H = (5.653\pm0.011)\times10^{-4}\ \Omega\cdot m/T$

$\mu = \sigma R_H = 1094\times5.653\times10^{-4} = 0.618438\ T^{-1}$

$\ln\mu = \ln\sigma + \ln R_H$. $\frac{\partial\ln\mu}{\partial\sigma} = \frac{1}{\sigma}$，$\frac{\partial\ln\mu}{\partial R_H} = \frac{1}{R_H}$

故 $\frac{\Delta_\mu}{\mu} = \sqrt{\left(\frac{\Delta_\sigma}{\sigma}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_{R_H}}{R_H}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{11}{1094}\right)^2 + \left(\frac{0.011}{5.653}\right)^2} \approx 1.0241\times10^{-2}$

所以 $\Delta_\mu = \mu\cdot\frac{\Delta_\mu}{\mu} = 0.618438\times1.0241\times10^{-2} \approx 6\times10^{-3}\ T^{-1}$

故 $\mu = (0.618\pm0.006)\ T^{-1}$

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

六、思考题

1. 如何计算实验中霍尔片载流子迁移率μ?

答：由"实验数据处理"部分，$\mu = \sigma R_H$，其中σ为霍尔片的电导率，R_H为霍尔系数。具体计算过程见数据处理部分。

2. 如何观察不等位效应？如何消除不等位效应对测量带来的影响？

答：将电磁铁的激励电流切断，$B=0$，此时霍尔片两侧面间仍有电位差；改变电流I_H的方向，此电位差正负改变，这就是观察不等位效应的方法。

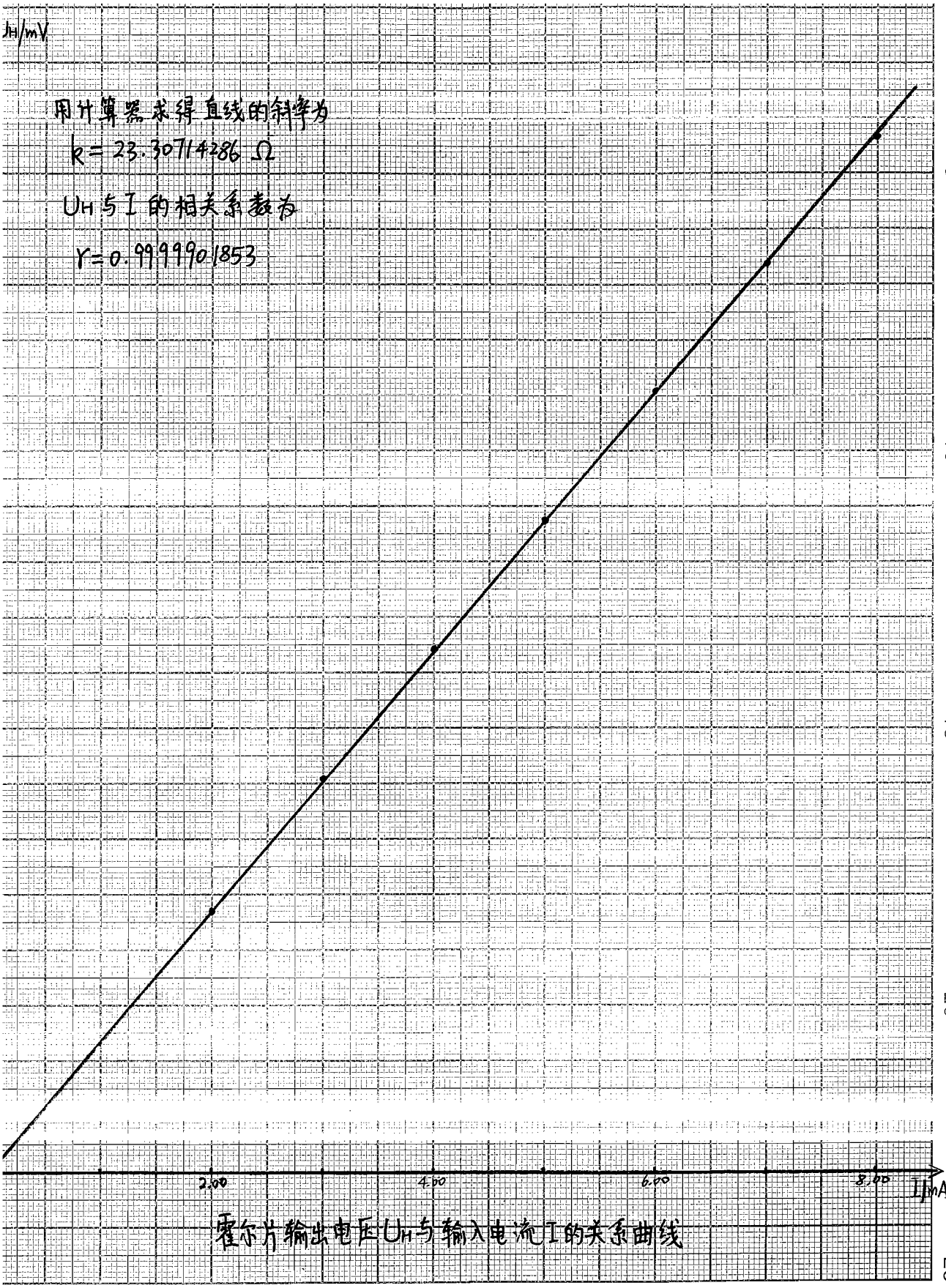
测出$(+B,+I_H)$，$(+B,-I_H)$，$(-B,-I_H)$，$(-B,+I_H)$下的电势差U_1、U_2、U_3和U_4，并按式$U_H = \frac{1}{4}(U_1-U_2+U_3-U_4)$计算即可消除不等位效应，理由在数据处理部分已给出。

3. 如何利用霍尔效应测量磁场？

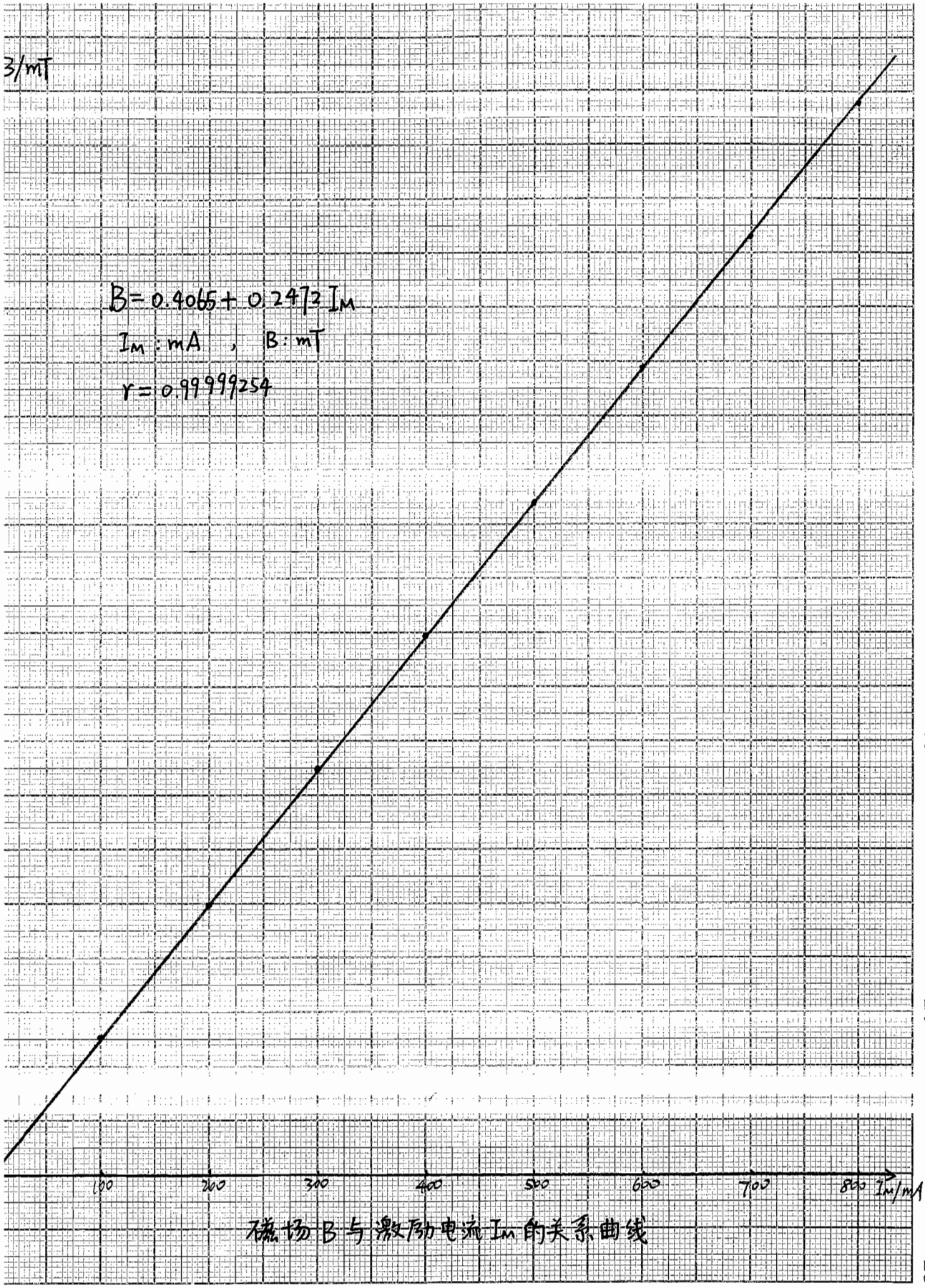
答：给霍尔片通以电流I，测出片上的霍尔电压U_H，即可通过式$B = \frac{U_H}{K_H I}$计算出磁场。K_H可用实验的方法确定。

七、实验总结

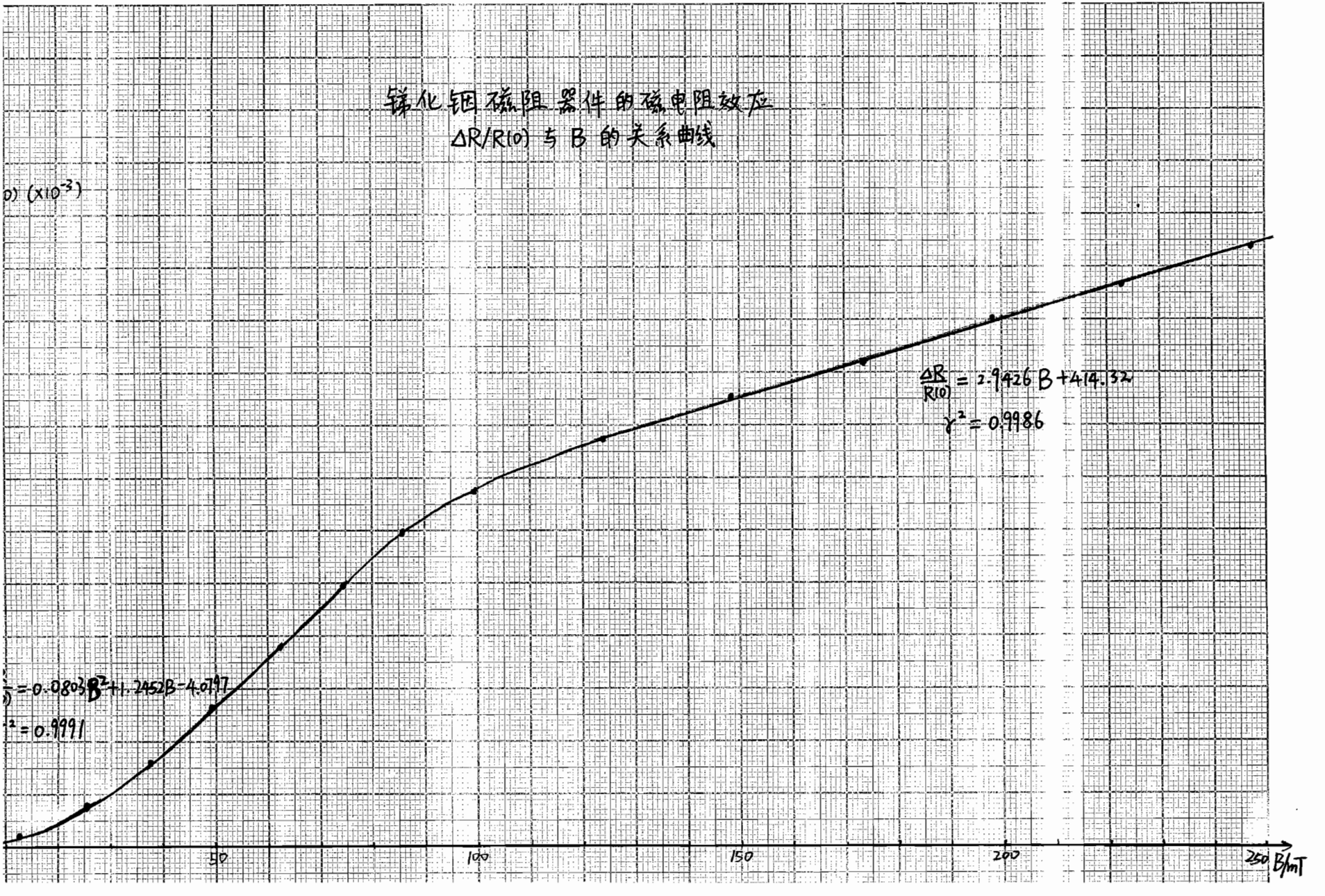
通过本次实验，我对霍尔效应有了更直观、深入的认识，学会了消除霍尔副效应的方法。本次实验内容丰富，各个小实验之间联系密切，前面实验的结果直接影响到后面的实验。这让我对物理实验的方法有了更深刻的认识，对物理现象内在的联系有了进一步的体会。

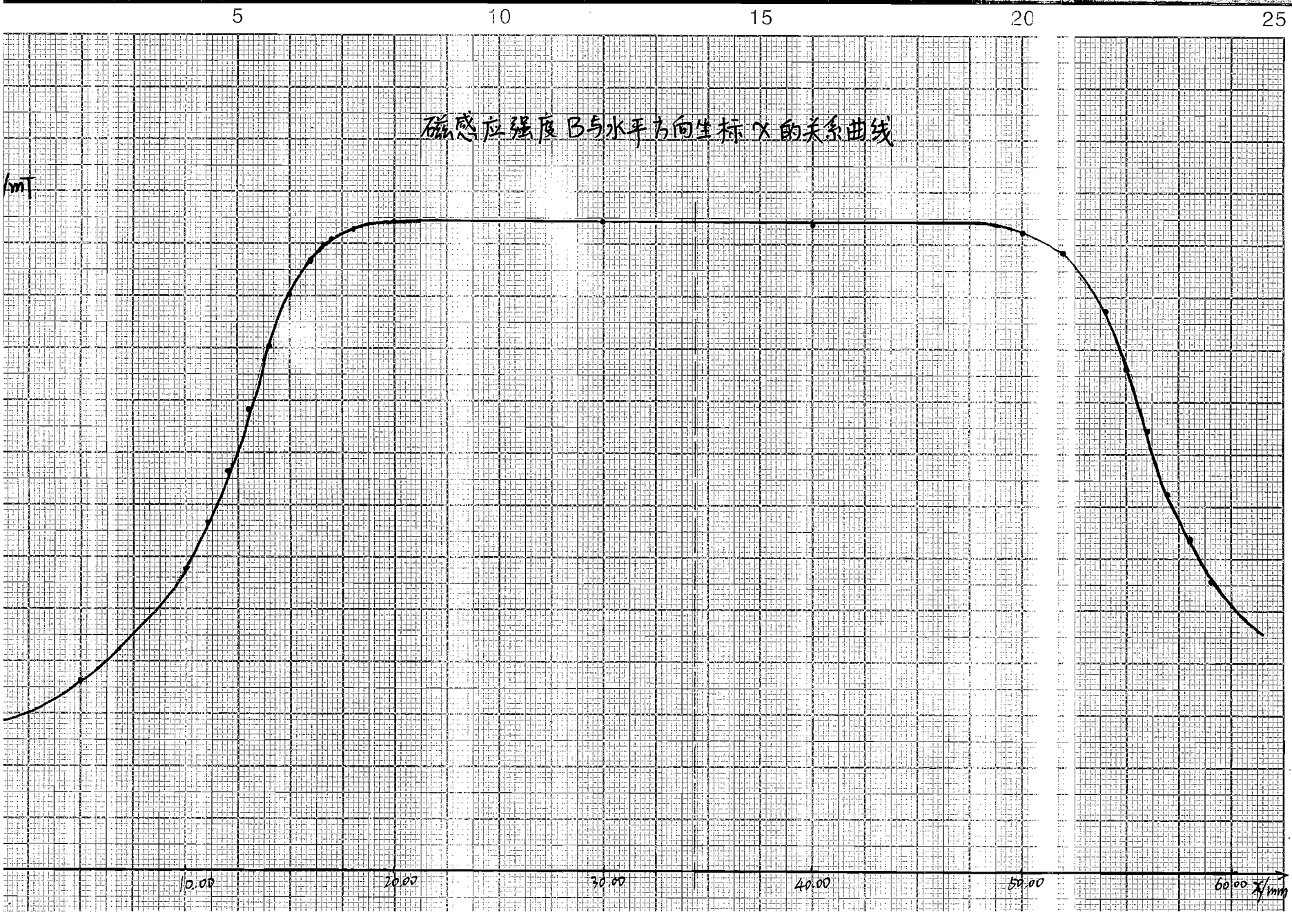


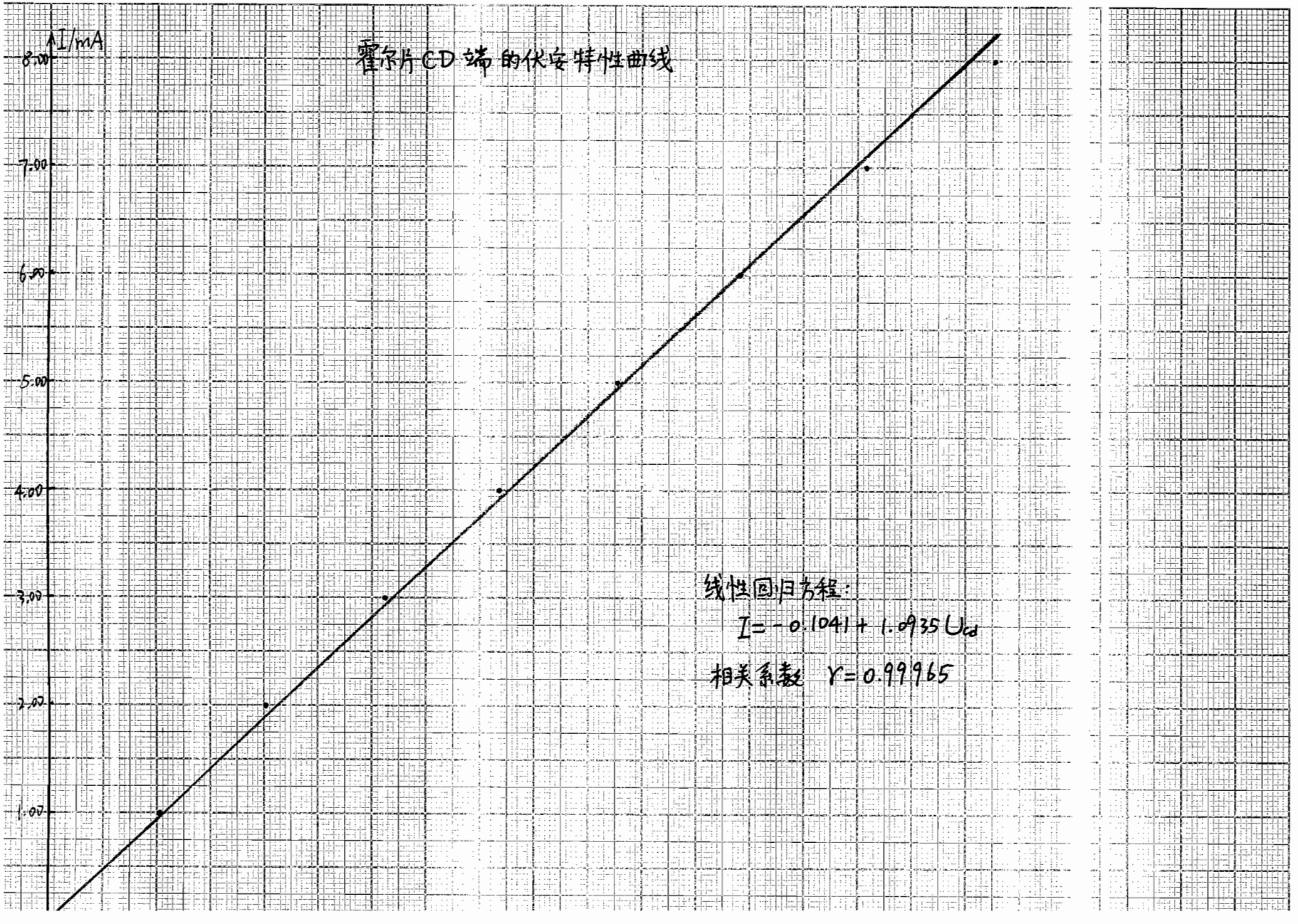
霍尔片输出电压U_H与输入电流I的关系曲线



磁场B与激励电流I_M的关系曲线


锑化铟磁阻器件的磁电阻效应
ΔR/R(0) 与 B 的关系曲线
0) (×10⁻³)
ΔR/R(0) = 2.9426 B + 414.32
γ² = 0.9986
= 0.0803B² + 1.2452B - 4.0197
² = 0.9991
50
100
150
200
250 B/mT


5
10
15
20
25
磁感应强度B与水平方向坐标X的关系曲线
/mT
10.00
20.00
30.00
40.00
50.00
60.00 X/mm


霍尔片CD端的伏安特性曲线
I/mA
8.00
7.00
6.00
5.00
4.00
3.00
2.00
1.00
5
10
15
20
25
线性回归方程:
$I = -0.1041 + 1.0935 U_{cd}$
相关系数 $r = 0.99965$

清华大学实验报告

系别 _____ 班号 精11 姓名 周祥 (同组姓名 _____)

作实验日期 年 4 月 19 日 5# J16 教师评定 李晓东

1.

U_H/mV \ I/mA	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00	8.00
$U_1(+B,+I_H)$	47.3	71.3	95.6	119.8	143.2	166.5	189.5
$U_2(+B,-I_H)$	-48.3	-73.1	-97.8	-123.1	-147.7	-172.6	-197.3
$U_3(-B,-I_H)$	45.6	68.0	89.9	111.7	133.1	154.8	175.8
$U_4(-B,+I_H)$	-46.7	-70.1	-92.5	-115.5	-139.5	-161.7	-184.4
U_H							

$I_M = 500mA$, $B_0 = 123.7 mT$

2.

I_M/mA	0	100	200	300	400	500	600	700	800
$U_1(+B,+I_H)$/mV	1.9	20.5	38.9	57.8	76.5	95.2	113.7	132.5	150.9
$U_2(+B,-I_H)$/mV	4.5	-23.9	-41.3	-60.2	-78.8	-97.3	-115.7	-134.2	-152.7
$U_3(-B,-I_H)$/mV	4.3	14.9	33.6	52.4	71.1	89.8	108.3	126.7	145.1
$U_4(-B,+I_H)$/mV	1.8	-17.5	-36.3	-55.0	-73.7	-92.3	-111.0	-129.3	-147.6

I=4.00mA

3.

I_M/mA	0	50	100	150	200	250	300	350	400	500	600	700	800	900	1000
U_{00}/V	0.5842	0.5960	0.6282	0.6762	0.7378	0.8063	0.8748	0.9335	0.9765	1.0355	1.0835	1.1278	1.1695	1.2090	1.2494

I=1.50mA

4.

x/mm	0.00	5.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00	20.00	30.00	40.00	50.00	52
$U_1(+B,+I_H)$/mV	22.7	28.7	45.2	51.9	59.0	68.3	77.1	84.8	89.7	92.8	94.2	95.2	95.2	95.0	93.9	91
$U_2(+B,-I_H)$/mV	-25.0	-31.1	-47.4	-54.1	-61.2	-70.5	-79.3	-87.0	-92.0	-95.0	-96.3	-97.4	-97.3	-97.1	-96.0	-9
$U_3(-B,-I_H)$/mV	17.1	23.1	39.6	46.3	53.5	62.7	71.5	79.1	84.0	87.0	88.5	89.5	89.5	89.2	88.3	8
$U_4(-B,+I_H)$/mV	-19.5	-25.8	-42.1	-49.0	-56.1	-65.1	-74.0	-81.5	-86.6	-89.6	-91.1	-92.1	-92.1	-91.8	-90.7	-8

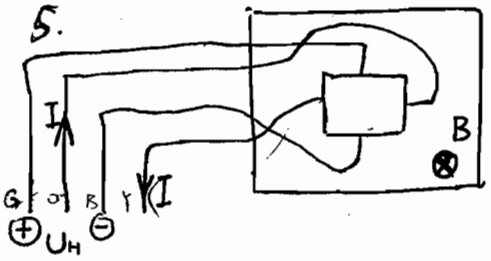
x/mm	54.00	55.00	56.00	57.00	58.00	59.00
U_1/mV	82.5	74.1	65.1	56.3	49.7	43.5
U_2/mV	-84.7	-76.4	-67.5	-58.7	-52.1	-45.9
U_3/mV	76.8	68.6	59.5	50.7	44.2	38.0
U_4/mV	-79.5	-71.4	-62.1	-53.3	-46.8	-40.7

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 精11 姓名 周禄 （同组姓名 _____ ）

作实验日期 年 月 日 教师评定

5.



6. $\mu = \frac{v}{E} = \frac{v}{J/\sigma} = \sigma \frac{v}{I/bd} = \sigma \frac{vdb}{I} = \frac{\sigma v bd}{nevbd} = \frac{\sigma}{ne} = \sigma R_H$

I/mA	0	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00	8.
U_{cd}/V	0.003 ~~-0.0008~~	1.026 ~~1.0267~~	2.055	3.111	4.189	5.287	6.409	7.575	8.

霍尔元件尺寸(μm) 300×100×3

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 精仪系 班号 精11 姓名 尚恩垚 （同组姓名 ）

作实验日期 2012年 9月 27日 5号 教师评定 8+

准稳态法测不良导体的导热系数和比热

一. 实验目的：

1. 了解实热传导的物理过程，掌握用稳态法测定不良导体导热系数和比热的实验方法
2. 掌握热电偶的工作原理，学会用热电偶通过热电转换测量温度的办法
3. 观察学习达到准稳态导热的最佳实验条件的方法，巩固热学的基本知识

二. 实验原理

1. 热传导

两个表面均维持均匀恒温的无限大平板的一维导热稳态问题

$$q = -\lambda \frac{dt}{dx}$$

式中 q 为单位时间内通过单位面积的热流量，即热流密度

$\frac{dt}{dx}$ 为温度变化率

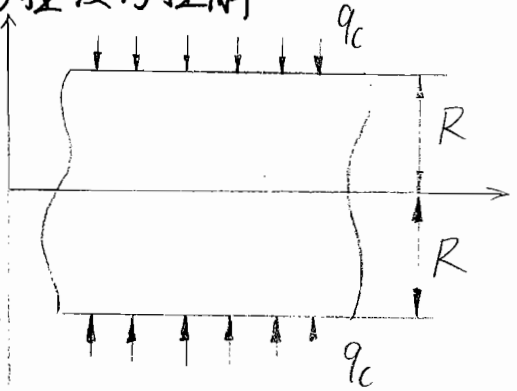
λ 为材料的热导率，单位 $W/(m \cdot K)$

2. 基于一维导热模型的热传导方程及方程解

本实验是基于一维无限大平板导热模型设计的。

设平板厚度为 $2R$，原始温度 t_0

平板两端面受功率相同、能产生



清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

均匀热流的加热器加热，表面热流密度恒为 q_c

求在任何时刻沿X方向的温度分布函数 $t(x,\tau)$ τ为时间变

微分方程式： $\frac{\partial t(x,\tau)}{\partial \tau} = a\cdot\frac{\partial^2 t(x,\tau)}{\partial x^2}$ $(0<x<R,\ \tau>0)$

初始条件： $t(x,\tau)_{\tau=0} = t_0$

边界条件： $q_c = \lambda \frac{\partial t(x,\tau)}{\partial x}\Big|_{x=R}$, $\frac{\partial t(x,\tau)}{\partial x}\Big|_{x=0} = 0$

方程的解为 $t(x,\tau)-t_0 = \frac{q_c}{\lambda}\left[\frac{a\tau}{R} - \frac{R^2-3x^2}{6R} + R\sum_{n=1}^{\infty}(-1)^{n+1}\frac{2}{\mu_n^2}\cos\left(\mu_n\frac{x}{R}\right)\right.$

式中 τ为时间，λ导热系统，t_0初始温度

$a = \frac{\lambda}{c\rho}$ 热扩散率，单位 m^2/s

c 比热，单位 $J/(kg\cdot K)$

ρ 密度，单位 kg/m^3

$\mu_n = n\pi$，$n=1,2,3\cdots$

$F_o = \frac{a\tau}{R^2}$ 傅里叶数（无量纲）

当加热时间τ使 $F_o>0.5$ 后，板内任意处温度与时间成线性关

温升速率相同并保持不变，任两点温差恒定，这种状态叫准稳

$$\Delta t = t(R,\tau)-t(0,\tau) = \frac{q_c R}{2\lambda}$$

则准稳态下导热系数的测量公式为

$$\lambda = \frac{q_c R}{2\Delta t}$$

由比热定义，当样品的横向截面积为F时，则有

$$q_c F = c\rho R F\frac{dt}{d\tau}$$

可得 $c = \frac{q_c}{\rho R\frac{dt}{d\tau}}$

式中 ρ 密度

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名 _____ ）

作实验日期 年 月 日 教师评定

$\frac{dt}{d\tau}$ 准稳态下样品的温升速率

当用有限截面积的平板进行实验时，样品中心区域的导热可近似看成一维。

当样品横向尺寸为厚度6倍以上时，将测温点置于样品的中心区域，非无限大平板误差可以忽略.

3. q_c 的计算

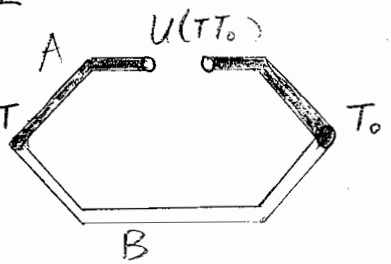
利用对称性设置样品架 $q_c = \frac{U_{加热}^2}{2Fr}$

式中：$U_{加热}$ 加热压电压

r 为单个加热器的电阻

4. 测温系统

本实验采用铜康铜热电偶测温



由于赛塞贝克效应，当 $T \neq T_0$ 时

$U(TT_0) = \alpha(T-T_0) + b(T-T_0)^2$

温差较小时，可忽略二次项 本实验 $\alpha = 40\mu V/^\circ C$

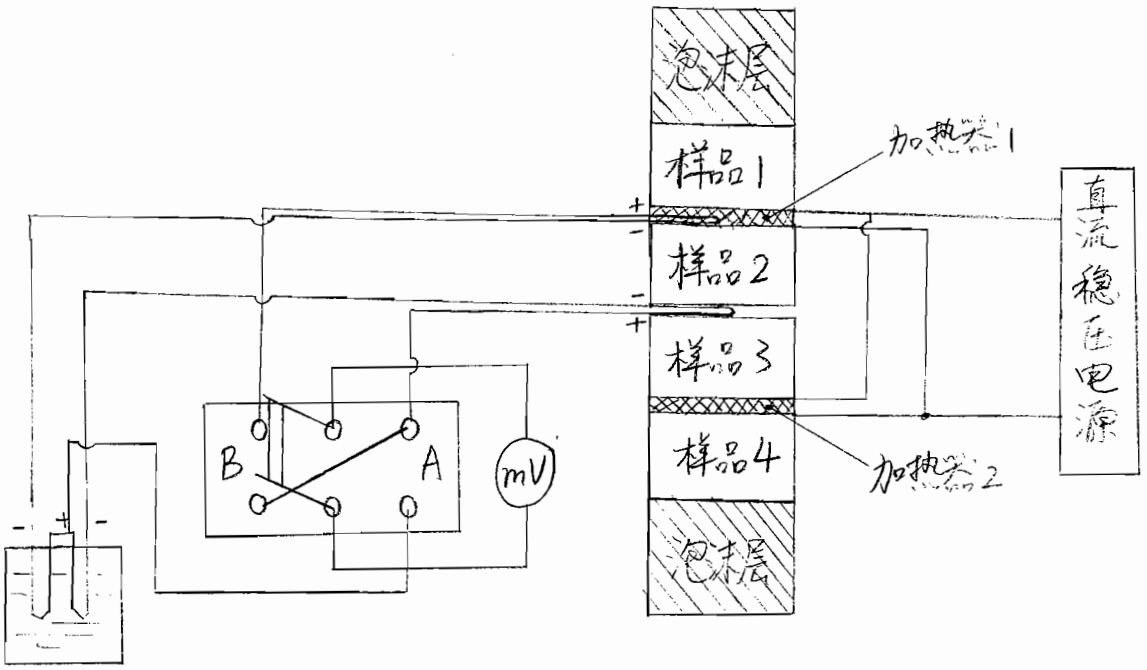
三. 实验装置

热导测量仪
有机玻璃四块
加热器两片
热电偶2只
泡沫绝热体两块
交流信号发生器
UT805数字万用表
保温杯，水
换向开关1个
直流稳压电源
秒表
导线若干
电阻，电容，二极管
温度计（测初温）

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定



四. 实验步骤

1. 读仪器说明书，练习使用数字万用表
2. 旋紧螺杆旋钮，使间隙尽量小。预热稳压电源、万用表。
3. 预设加热电压 15-20V，并用万用表测量实验前的加热电压
4. 万用表检查四只热电偶是否完好，检查加热器是否完好，并测量记录
5. 电路连线
6. 测量初温 t_0，初始温差 $U_1(t_2 t_1)$、$U_2(t_1 t_0)$
7. 接通加热电源，同时开始计时，每隔1分钟测一次 $U_1(t_2 t_1)$、$U_2(t_1$
   共测25分钟
8. 断开回路，拆下万用表，测量实验后加热电压
9. 仪器还原。原始数据找老师评定。

带

清华大学实验报告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名 _____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

注意事项：

1. 实验时热电偶的测温端应安装在正方形样品中心附近
2. 样品初温应保持为室温，不要用手大面积长时间接触
3. 实验前检查热电偶是否完好

五. 数据处理

材料：有机玻璃 仪器编号：5号

初始温度 $t_0 = 25.1\,^\circ C$

加热器电阻 测量值：0.05526 kΩ

$\Delta_{\frac{r}{2}} = 0.01\% \times 0.05526 + 8 \times 0.00001 + 0.000$ 短路电

$\approx 0.0003\ (k\Omega)$

$\therefore \frac{r}{2} = (0.0553 \pm 0.0003)\ k\Omega = (55.3 \pm 0.3)$

加热电压 ① $U_{加前}$ 测量值 9.9836 V

$\Delta_{U加前} = 0.007 \times 9.9836 + 2 \times 0.0001 \approx 0.07$

② $U_{加后}$ 测量值 9.9926 V

$\Delta_{U加后} = 0.007 \times 9.9926 + 2 \times 0.0001 \approx 0.07$

③ $U_{平均} = \frac{1}{2}(U_{加前} + U_{加后})$

$= 9.9881\ V$

$\Delta_{U平均} = \sqrt{\left(\frac{\Delta_{U加前}}{2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_{U加后}}{2}\right)^2} = 0.07$

$\therefore U_{平均} = (9.99 \pm 0.07)\ V$

清 华 大 学 实 验 报 告

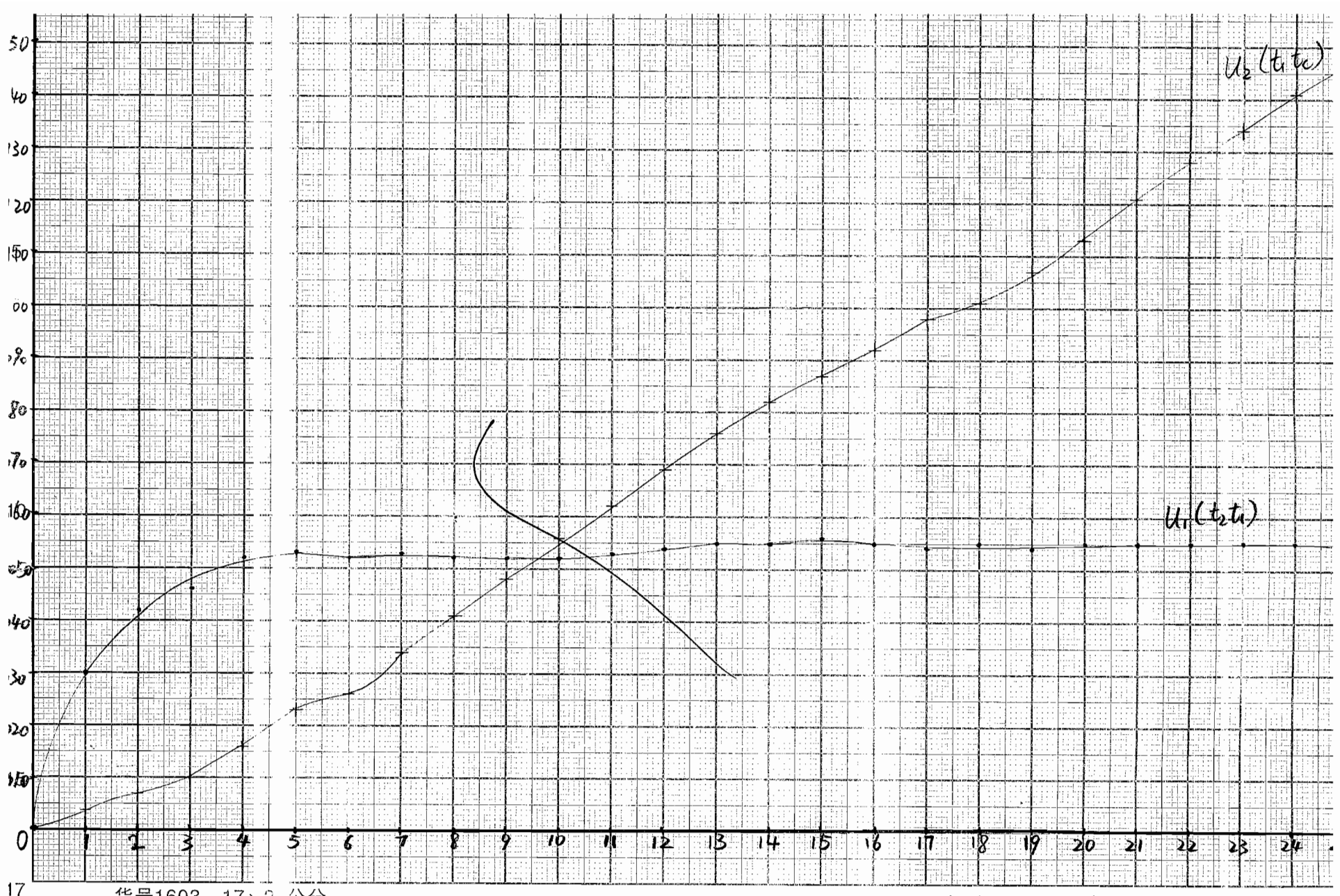
系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

$U_1(t_2t_1)$ $U_2(t_1t_c)$ 的数据处理：

处理方式：两组数据都以 $\tau=0$ 时的数据作为基准，其后所有数据都减去 $\tau=0$ 时数据作为最终结果，以修正系统误差

τ/min	$U_1(t_2t_1)$/mV	$U_2(t_1t_c)$/mV	τ/min	$U_1(t_2t_1)$/mV	$U_2(t_1t_c)$/mV
0	0	0	13	0.055	0.076
1	0.030	0.004	14	0.055	0.082
2	0.042	0.007	15	0.056	0.087
3	0.046	0.010	16	0.055	0.092
4	0.052	0.016	17	0.054	0.098
5	0.053	0.023	18	0.055	0.101
6	0.052	0.026	19	0.054	0.107
7	0.053	0.034	20	0.055	0.113
8	0.052	0.041	21	0.055	0.121
9	0.052	0.048	22	0.055	0.128
10	0.052	0.056	23	0.055	0.134
11	0.053	0.062	24	0.055	0.141
12	0.054	0.069	25	0.054	0.147


$U_2(t_1 t_c)$
$U_1(t_2 t_1)$
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24

京诚纸品 精益求精

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

从图线判断，$\tau = 9\,min$ 后 温差基本恒定；温升速率基本不变

据此判断 $\tau = 9\,min$ 后已进入准稳态。

1. 温差：对~~$\tau = 9\,min$~~进入准稳态后的 $U_1(t_2t_1)$ 加和，取平均

$$\overline{U_1} = \frac{1}{17}\sum_{i=9}^{25} U_1(t_2t_1)_i = 0.0540\,mV$$

$$S_y = \sqrt{\frac{\sum(U_i-\overline{U_i})^2}{17-1}} = 0.00111474\ (mV)$$

置信概率 0.95，查表得 $\frac{t}{\sqrt{n}} = 0.533$

$$\Delta_{仪} = 0.006 \times 0.0540 + 2\times 0.001 = 0.0023\ (mV)$$

$$\Delta_{U1} = \sqrt{\left(\frac{t}{\sqrt{n}}S_y\right)^2 + (\Delta_{仪})^2} \approx 0.0024\,mV$$

$\therefore U_1(t_2t_1) = (0.0540 \pm 0.0024)\,mV$

由塞贝克效应 $U_1(t_2t_1) = a(t_2-t_1)$

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{U_1(t_2t_1)}{a} = \frac{0.0540\,mV}{40\,\mu V/^\circ C} = 1.35\,^\circ C$$

$$不确定度 = \frac{\Delta_{U1}}{a} = 0.06\,^\circ C$$

$\therefore \Delta t = (1.35 \pm 0.06)\,^\circ C$

2. 温升速率：对进入准稳态后的 $U_2(t_1t_C)$ 进行直线拟合，求温升速率

$$a_0 = \frac{\sum\tau_i U_i \sum\tau_i - \sum U_i \sum\tau_i^2}{(\sum\tau_i)^2 - 17\cdot\sum\tau_i^2} = -0.003735$$

$$b_0 = \frac{\sum\tau_i \sum U_i - 17\sum U_i\tau_i}{(\sum\tau_i)^2 - 17\sum\tau_i^2} = 0.005971$$

$$r = \frac{\sum(\tau_i-\overline{\tau})(U_i-\overline{U})}{\sqrt{\sum(\tau_i-\overline{\tau})^2}\cdot\sqrt{\sum(U_i-\overline{U})^2}} = 0.9985,\ 接近于1$$

清 华 大 学 实 验 报 告

9

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名 _____ ）

作实验日期 年 月 日 教师评定

实验名称：

数字存储示波器与瞬态信号测量

系别 精密仪器与机械学系

班级 精11班

姓名 尚恩垚

学号 2011010494

时间 2013-05-27

组别 双一晚E，3号

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

一.实验目的

1.学习使用数字存储示波器；

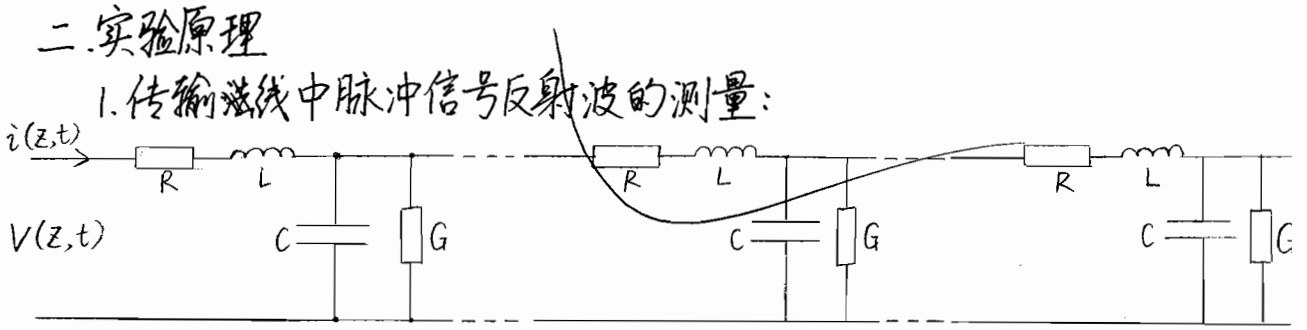
2.学习传输线中脉冲信号的测量方法；

3.了解超声波的产生原理，并测量介质中横纵波声速，根据声速计算试样的杨氏模量和泊松系数；

4.观察波型转换，用固定法、移动法测量表面波波速。

二.实验原理

1.传输线中脉冲信号反射波的测量：



R，L，C，G为单位长度传输线的参数，V(z,t) i(z,t)为与位置z时间t相关的电压电流信号。

用傅利叶分析与合成的方法，可得各种频率信号的传输特性，

令 $V(z,t)=Re[V(z)\cdot e^{j\omega t}]$，$i(z,t)=Re[I(z)\cdot e^{j\omega t}]$

利用电磁场理论与电路方程得：

$\frac{d^2V(z)}{dz^2}=\gamma^2V(z)$，$\frac{d^2I(z)}{dz^2}=\gamma^2I(z)$，其中$\gamma=\alpha+\beta j=\sqrt{(R+j\omega L)(G+j$

上述微分方程的解为：

$V(z)=V^+(z)+V^-(z)=V_0^+e^{-\gamma z}+V_0^-e^{\gamma z}$，$I(z)=I^+(z)+I^-(z)=I_0^+e^{-\gamma z}+I_0^-e$

可以证明 $\frac{V_0^+}{I_0^+}=-\frac{V_0^-}{I_0^-}=\frac{R+j\omega L}{\gamma}$

令 $Z_0=\frac{R+j\omega L}{\gamma}=\sqrt{\frac{R+j\omega L}{G+j\omega C}}=R_0+jX_0$ 为特性阻抗.

Z_0与γ只和电路参数R、L、C、G、ω有关，与长度无关。γ决定了信号的相速与衰减，Z_0决定了加以负载后传输线上的信号波形分布。

当R=G=0时，$\gamma=\alpha+\beta j=j\omega\sqrt{LC}$，$Z_0=R_0+jX_0=\sqrt{\frac{L}{C}}$

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

以上两种情况，Z_0均为纯阻性，β均为ω的线性函数，此时若$R\neq 0$，则能保持信号不产生畸变。

长为l的传输线，终端$z=l$处外加负载为Z_l，$Z_l=\frac{U_l}{I_l}$，由方程解及边界条件可得

$$V(z)=\frac{I_l}{2}\left[(Z_l+Z_0)e^{\gamma(l-z)}+(Z_l-Z_0)e^{-\gamma(l-z)}\right]$$

$$I(z)=\frac{I_l}{2Z_0}\left[(Z_l+Z_0)e^{\gamma(l-z)}-(Z_l-Z_0)e^{-\gamma(l-z)}\right]$$

式中第一项表示沿z的入射波，第二项表示沿$-z$的反射波，整理得

$$V(z)=\frac{I_l}{2}(Z_l+Z_0)e^{\gamma(l-z)}\left[1+\Gamma e^{-2\gamma(l-z)}\right]$$

$$\Gamma=\frac{Z_l-Z_0}{Z_l+Z_0}=|\Gamma|e^{j\theta}$$

Γ是负载端电压反射波与入射波振幅之比，称为Z_l的电压反射系数。

若无损线$Z_0=R_0$，Z_l也为纯阻性，则可分三种情况讨论：

1）开路 $Z_l=R_l=\infty$，$\Gamma=1$，$\begin{cases}V(z)=V_l\cdot\cos\frac{2\pi(l-z)}{\lambda}\\ I(z)=\frac{V_l}{R_0}\sin\frac{2\pi(l-z)}{\lambda}\end{cases}$ 在$z=l$处，电压最大，波腹；电流最小，波

2）短路 $Z_l=R_l=0$，$\Gamma=-1$，反射波反相，驻波分布同开路情况；

3）负载匹配 $Z_l=R_l=R_0$，$\Gamma=0$，无反射波，只有$+z$方向的行波。

2.超声波测量

1）超声波的产生：压电材料电极两端施加脉冲电压，晶片弹性形变，随后自由振动，并在厚度方向形成驻波，波的频率与材料和厚度有关，适当选择厚度则可产生超声波。

2）测量原理：晶片振动过程中，振幅逐渐减小，因此晶片向外发射的是一个超声波波包，即脉冲波。脉冲波传播过程中遇到界面突变部分反射，部分被晶片接收而转变为电信号，经放大后可显示波形

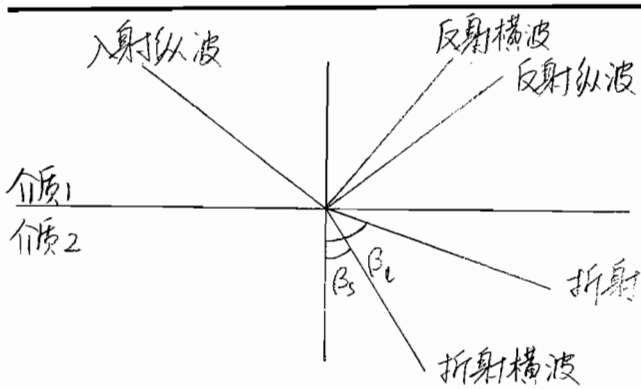
3）波形转换：超声波纵横波入射到两介质界面时，若介质中有一个是固体，则在反射和折射时会产生另一种波形。

根据折射定律 $\frac{\sin\theta}{}=\frac{\sin\beta_l}{}=\frac{\sin\beta_s}{}$

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定



① $C_l < C_{2l}$ 时，$\theta > \theta_l = \sin^{-1}\frac{C_l}{C_{2l}}$ 时全反
介质2中纵波消失；

② $C_l < C_{2s}$ 时，$\theta > \theta_s = \sin^{-1}\frac{C_l}{C_{2s}}$ 时全
介质2中横波消失；

③若 $\theta > \theta_s$，表面条件合适时产生沿
体表面传播的表面波。

三.实验仪器

数字存储示波器，QW-1型瞬态信号测量实验仪，BNC线，2个BNC线接头（短路、匹配电阻用），金属测量试件，纵波直探可变角探头，水（耦合剂）。

四.实验内容

[用数字存储示波器观测连续和单脉冲信号]

1. 仪器设置与接线：打开电源；
"检波"端口与示波器用BNC线相连；衰减器设置在80~90。

2. 连续脉冲信号的测量：
①触发选择拨到"连续"，调节电压和时间的分度值使便于测量；
②按"CURSOR"键，选择"电压""时间"测量模式，移动光标分别测量 U_{max}（脉冲电压幅度），（上升沿时间）t_r，t_f（下降沿时间），t_w（脉冲宽
衰减器数值，（频率值）f.

3. 单脉冲信号的测量：
①按示波器的"SINGLE SEQ"键，选择"单次触发"模式下再拨到"连续"
②按"CURSOR"键，移动光标分别测量 U_{max}，t_r，t_f，t_w，衰减器数值
③按"SAVE/Recall"键，存储波形到A或B通道。

[传输线中脉冲信号反射波的测量]

1. 仪器设置与接线：
"检波"输出信号接到"输入端"；示波器CH1 CH2分别接"输入端""输

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名 _____ ）

作实验日期 年 月 日 教师评定

调节衰减器使脉宽最小。

2. "输出端"分别选择开路、短路、匹配负载三种测试方式，分别测"输入端""输出端"的信号波形和相对延时。

(1) 输出端开路：输出端断开，记录"输入端""输出端"之间信号的电压峰值；

(2) 短路负载：输出端接短路接头，记录"输入端"信号波形和回的时间间隔；

(3) 匹配负载：输出端接匹配电阻，记录波到达的时间 T_1。

[超声波测量实验]

1. 仪器设置与接线：

将实验仪上"发射"连接端与超声探头相连接，"检波"连接示波器；调节衰减器使输出波形最适于测量。

2. 用直探头测量纵波声速 C_L，钻孔深度 h：



(1) 在试样表面喷上水，将直探头紧贴在铁块表面反复移动探头至回波信号最大；

(2) 调整示波器分度值，使便于测量时间；

(3) 分别测量起始波与底波、缺陷波的时间差 T_H

3. 45°斜探头测量试样中横波声速 C_S：

(1) 将探头角度调整为45°，将其置于铁试样弧形部分的圆心处；

(2) 移动探头使回波信号同时达到最大；

(3) 测量回波时间 T_{R1} T_{R2} 和两回波的时间差 $T_{\Delta R}$。

五. 数据处理

1. 用数字存储示波器观测连续或单脉冲信号

$\Delta V_{示} = \frac{1}{10} \times 500\ mV/div = 50.0\ mV$ $\Delta t_{示} = \frac{1}{10} \times 250 = 25.0\ ns$

	U_{max}/V	f/kHz	t_r/ns	t_f/ns	t_w/ns	衰减器 I II /dB	存储通
连续脉冲	2.42	2.40001	180.0	350.0	240.0	86	B
单脉冲	2.40		160.0	350.0	240.0	86	A

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

2. 传输线中脉冲信号传输和反射的观测

(1) 计算实验仪中的电缆长度 L，Δ_L：

已知电磁波波速 $V = 2.0\times10^8$ m/s，认为准确.

	输出端开路			短路负载		匹配负载	
	V/mV	τ_2/ns	τ_1/ns		τ_2/ns		τ_1/ns
输入端	$V_1 = 336$ $V_2 = 264$ $V_3 = 208$	1. 700.0 2. 720.0 3. 700.0	1. 340.0 2. 360.0 3. 340.0	输入端	1. 680.0 2. 660.0 3. 660.0	输入端	1. 330.0 2. 340.0 3. 330.0
输出端	$V_1' = 376$ $V_2' = 288$ $V_3' = 224$	1. 690.0 2. 720.0 3. 720.0		输出端		输出端	

$\Delta_{估示} = \frac{1}{10}\times 250\ \text{ns} = 25.0\ \text{ns}$

① 开路计算 L，Δ_L：

1) 用 τ_2 计算

$$\overline{\tau_2} = \frac{700.0+720.0+700.0+690.0+720.0+720.0}{6} = 708.3\ (\text{ns})$$

$$L = \frac{V\cdot\overline{\tau_2}}{2} = \frac{2.0\times10^8\times708.3\times10^{-9}}{2} = 70.83\ (\text{m})$$

$\because L = \frac{V\cdot\tau_2}{2}$ $\therefore \ln L = \ln V + \ln\tau_2 - \ln 2$

$$\therefore \frac{\Delta_L}{L} = \sqrt{\left(\frac{\partial \ln L}{\partial V}\cdot\Delta_V\right)^2 + \left(\frac{\partial \ln L}{\partial \tau_2}\cdot\Delta_{\tau_2}\right)^2}$$

$$S_{\tau_2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{5}(\tau_{2i}-\overline{\tau_2})^2}{5}} = 13.29\ \text{ns}$$

$$\Delta_{\tau_2} = \sqrt{S_{\tau_2}^2 + \Delta_{估示}^2} = \sqrt{13.29^2 + 25.0^2} = 28.31\ (\text{ns})$$

$$\therefore \Delta_L = L\cdot\sqrt{\left(\frac{\partial \ln L}{\partial V}\cdot\Delta_V\right)^2 + \left(\frac{\partial \ln L}{\partial \tau_2}\cdot\Delta_{\tau_2}\right)^2} = L\cdot\frac{\Delta_{\tau_2}}{\tau_2} = 70.83\times\frac{28.31}{708.3} = 2.8\ (\text{m})$$

$\therefore L = (70.8 \pm 2.8)$ m

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

2）用 τ_1 计算：

$\bar{\tau}_1 = \frac{340.0+360.0+340.0}{3} = 346.67\ (ns)$

$L = V\cdot\bar{\tau}_1 = 2.0\times10^{8}\times346.67\times10^{-9} = 69.33\ (m)$

$\because L = V\tau_1 \quad \therefore \ln L = \ln V + \ln\tau_1$

$\therefore \frac{\Delta_L}{L} = \sqrt{(\frac{\partial \ln L}{\partial V}\cdot\Delta_V)^2+(\frac{\partial \ln L}{\partial \tau_1}\cdot\Delta_{\tau_1})^2} = \frac{\Delta_{\tau_1}}{\tau_1}$

$S_{\tau_1} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{3}(\tau_{1i}-\bar{\tau}_1)^2}{2}} = 11.547\ (ns)$

$\Delta_{\tau_1} = \sqrt{S_{\tau_1}^2+\Delta_{仪示}^2} = \sqrt{11.547^2+25.0^2} = 27.54\ (ns)$

$\therefore \Delta_L = L\cdot\sqrt{(\frac{\partial \ln L}{\partial V}\cdot\Delta_V)^2+(\frac{\partial \ln L}{\partial \tau_1}\cdot\Delta_{\tau_1})^2} = L\cdot\frac{\Delta_{\tau_1}}{\tau_1} = 69.33\times\frac{27.54}{346.67} = 6\ (m)$

$\therefore L = (69\pm6)\ m$

②短路负载计算 L，Δ_L：

$\bar{\tau}_2 = \frac{680.0+660.0+660.0}{3} = 666.67\ (ns)$

$L = \frac{V\cdot\bar{\tau}_2}{2} = \frac{2.0\times10^{8}\times666.67}{2} = 66.67\ (m)$

$S_{\tau_2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{3}(\tau_{2i}-\bar{\tau}_2)^2}{2}} = 11.55\ (ns)$

$\Delta_{\tau_2} = \sqrt{S_{\tau_2}^2+\Delta_{仪示}^2} = \sqrt{11.55^2+25.0^2} = 27.54\ (ns)$

$\therefore \Delta_L = L\cdot\sqrt{(\frac{\partial \ln L}{\partial V}\cdot\Delta_V)^2+(\frac{\partial \ln L}{\partial \tau_2}\cdot\Delta_{\tau_2})^2} = L\cdot\frac{\Delta_{\tau_2}}{\tau_2} = 66.67\times\frac{27.54}{666.67} = 2.8$

$\therefore L = (66.7\pm2.8)\ m$

③匹配负载计算 L，Δ_L：

$\bar{\tau}_1 = \frac{330.0+340.0+330.0}{3} = 333.33\ (ns)$

$L = V\cdot\bar{\tau}_1 = 2.0\times10^{8}\times333.33\times10^{-9} = 66.67\ (m)$

$S_{\tau_1} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{3}(\tau_{1i}-\bar{\tau}_1)^2}{2}} = 5.8\ (ns)$

$\Delta_{\tau_1} = \sqrt{S_{\tau_1}^2+\Delta_{仪示}^2} = 25.66\ (ns)$

$\Delta_L = L\cdot\sqrt{(\frac{\partial \ln L}{\partial V}\cdot\Delta_V)^2+(\frac{\partial \ln L}{\partial \tau_1}\cdot\Delta_{\tau_1})^2} = L\cdot\frac{\Delta_{\tau_1}}{\tau_1} = 66.67\times\frac{25.66}{333.33} = 5\ (m)$

$\therefore L = (67\pm5)$

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

综上，开路用τ_2计算得 $L=(70.8\pm2.8)m$

用τ_1计算得 $L=(69\pm6)m$

短路负载用τ_2计算得 $L=(66.7\pm2.8)m$

匹配负载用τ_1计算得 $L=(67\pm5)m$

(2)计算衰减系数α：

如果选择两个电压值计算α，则无法充分利用数据，且随机性大。可以使用Excel对$\ln V_i \sim L$进行线性拟合（图在下一页）。

由公式 $V_i=V_0\cdot e^{-\alpha l}$，两边取对数，得 $\ln V_i=\ln V_0-\alpha l$.

实验中在L，2L，3L，…，6L处的电压强度分别为V_1' V_1 V_2' V_2 V_3' V_3.

取L=70.8m，有

电压V_i/V	0.376	0.336	0.288	0.264	0.224	0.208
$\ln V_i$	-0.9782	-1.0906	-1.2448	-1.3318	-1.4961	-1.5702
l/m	70.8	141.6	212.4	283.2	354.0	424.8

可得方程 $y=-0.8589-1.7206\times10^{-3}\cdot x$

相关系数 $r=-0.9963$

$\alpha=-k=1.72\times10^{-3}(m^{-1})$

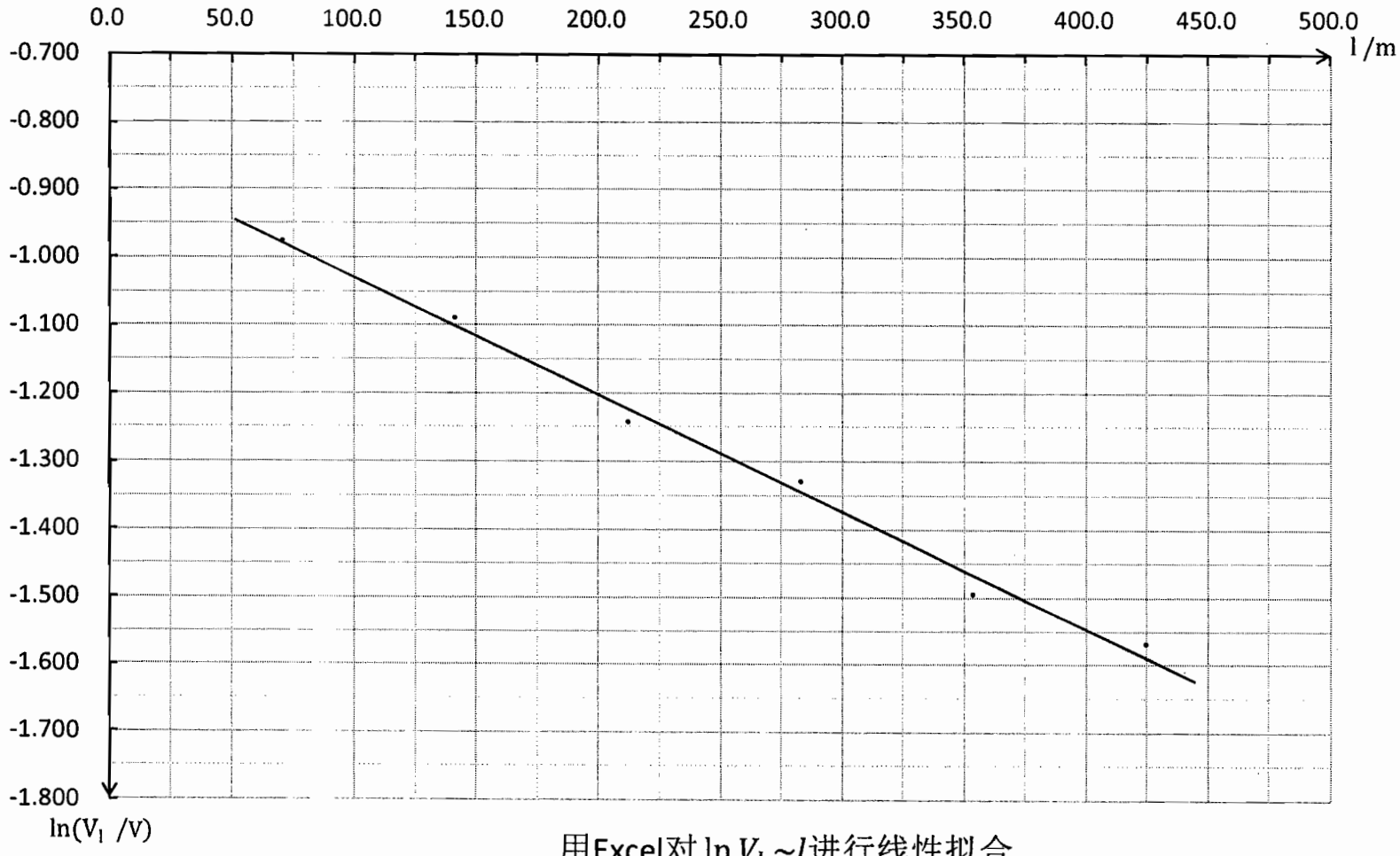
3.超声波测量实验

$R_1=30.00mm$，$R_2=H=60.10mm$，$\Delta_H=\Delta_{R_1}=\Delta_{R_2}=0.02mm$，$\rho=2700\ kg/m$

	$\Delta_{t示}=0.500\mu s$		$\Delta_{t示}=0.500\mu s$		$\Delta_{t示}=2.50\mu s$
	直探头		45°斜探头		
	底波τ_H/μs	缺陷波τ_R/μs	τ_{0R}/μs	τ_{R_1}/μs	τ_{R_2}/μs
1	18.80	14.00	19.00	24.00	43.00
2	19.00	14.20	18.00	24.00	42.00
3	19.20	14.20	19.00	24.00	42.00

(1)直探头测纵波波速及缺口深度

$\bar{\tau}_H=\frac{18.80+19.00+19.20}{3}=19.00(\mu s)$



用Excel对 $\ln V_l \sim l$进行线性拟合

清 华 大 学 实 验 报 告

系别_____ 班号_____ 姓名_____ （同组姓名_____）

作实验日期　　年　　月　　日　　教师评定

$C_L = \frac{2H}{\bar{\tau}_H} = \frac{2\times 60.10\times 10^{-3}}{19.00\times 10^{-6}} = 6326\ (m/s)$

$S_{\tau_H} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{2}(\tau_{Hi}-\bar{\tau}_H)^2}{2}} = 0.2\ (\mu s)$

$\Delta_{\tau_H} = \sqrt{S_{\tau_H}^2 + \Delta_{t示}^2} = \sqrt{0.2^2 + 0.5^2} = 0.539\ (\mu s)$

$\because C_L = \frac{2H}{\tau_H} \quad \therefore \ln C_L = \ln 2 + \ln H - \ln \tau_H$

$\therefore \frac{\Delta_{C_L}}{C_L} = \sqrt{\left(\frac{\partial \ln C_L}{\partial H}\cdot\Delta_H\right)^2 + \left(\frac{\partial \ln C_L}{\partial \tau_H}\cdot\Delta_{\tau_H}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{\Delta_H}{H}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_{\tau_H}}{\tau_H}\right)^2}$

$\therefore \Delta_{C_L} = C_L\sqrt{\left(\frac{\Delta_H}{H}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_{\tau_H}}{\tau_H}\right)^2} = 6326\times\sqrt{\left(\frac{0.02}{60.10}\right)^2 + \left(\frac{0.539}{19}\right)^2} = 1.8\times 10^2\ (m/s)$

$\therefore C_L = (63.3\pm 1.8)\times 10^2\ m/s = (6.33\pm 0.18)\times 10^3\ m/s$

计算缺陷深度 h 和 Δh：　$\bar{\tau}_q = \frac{14.00+14.20+14.20}{3} = 14.13\ (\mu s)$

$h = H - 0.5 C_L \tau_q = 60.10\times 10^{-3} - 0.5\times 63.3\times 10^2\times 14.13\times 10^{-6} = 0.01538\ (m)$
$= 15.38\ (mm)$

$\because h = H - 0.5 C_L \tau_q \quad \therefore \Delta_h = \sqrt{(\Delta_H)^2 + (\Delta_{0.5C_L\tau_q})^2}$

$\because \ln(0.5 C_L \tau_q) = \ln 0.5 + \ln C_L + \ln \tau_q$

$\therefore \Delta_{0.5C_L\tau_q} = (0.5 C_L \tau_q)\cdot\sqrt{\left(\frac{\Delta_{C_L}}{C_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_{\tau_q}}{\tau_q}\right)^2}$

$S_{\tau_q} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{2}(\tau_{qi}-\bar{\tau}_q)^2}{2}} = 0.1155\ (\mu s)$

$\therefore \Delta_{\tau_q} = \sqrt{S_{\tau_q}^2 + \Delta_{t示}^2} = \sqrt{0.1155^2 + 0.5^2} = 0.513\ (\mu s)$

$\therefore \Delta_{0.5C_L\tau_q} = (0.5 C_L \tau_q)\cdot\sqrt{\left(\frac{\Delta_{C_L}}{C_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_{\tau_q}}{\tau_q}\right)^2}$

$= 0.5\times 6326\times 14.13\times 10^{-6}\times\sqrt{\left(\frac{1.8}{63.3}\right)^2 + \left(\frac{0.513}{14.13}\right)^2}$

$= 2.061\times 10^{-3}\ (m) = 2.061\ (mm)$

$\therefore \Delta_h = \sqrt{(\Delta_H)^2 + (\Delta_{0.5C_L\tau_q})^2} = \sqrt{(0.02)^2 + (2.061)^2} = 2.1\ (mm)$

$\therefore h = (15.4\pm 2.1)\ mm$.

(2) 计算横波波速 C_S

$\bar{\tau}_{AR} = \frac{19.00+18.00+19.00}{3} = 18.67\ (\mu s)$

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名 _____ ）

作实验日期 年 月 日 教师评定

$$C_S = \frac{2\cdot\Delta R}{\bar{\tau}_{\Delta R}} = \frac{2(R_2-R_1)}{\bar{\tau}_{\Delta R}} = \frac{2\times(60.10-30.00)\times10^{-3}}{18.67\times10^{-6}} = 3224\ (m/s)$$

$$\Delta_{R_2-R_1} = \sqrt{(\Delta R_1)^2+(\Delta R_2)^2} = \sqrt{2}\cdot 0.02\ (mm)$$

$$S_{\tau_{\Delta R}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{6}(\tau_{\Delta R i}-\bar{\tau}_{\Delta R})^2}{2}} = 0.577\ (\mu s)$$

$$\Delta_{\tau_{\Delta R}} = \sqrt{(S_{\tau_{\Delta R}})^2+(\Delta_{仪示})^2} = \sqrt{0.577^2+0.5^2} = 0.763\ (\mu s)$$

$\because C_S = \frac{2\cdot(R_2-R_1)}{\tau_{\Delta R}}$ $\therefore \ln C_S = \ln 2 + \ln(R_2-R_1) - \ln\tau_{\Delta R}$.

$$\therefore \frac{\Delta_{C_S}}{C_S} = \sqrt{\left(\frac{\partial \ln C_S}{\partial(R_2-R_1)}\cdot\Delta_{R_2-R_1}\right)^2+\left(\frac{\partial \ln C_S}{\partial \tau_{\Delta R}}\cdot\Delta_{\tau_{\Delta R}}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{\Delta_{R_2-R_1}}{R_2-R_1}\right)^2+\left(\frac{\Delta_{\tau_{\Delta R}}}{\tau_{\Delta R}}\right)^2}$$

$$\therefore \Delta_{C_S} = C_S\cdot\sqrt{\left(\frac{\Delta_{R_2-R_1}}{R_2-R_1}\right)^2+\left(\frac{\Delta_{\tau_{\Delta R}}}{\tau_{\Delta R}}\right)^2} = 3224\times\sqrt{\left(\frac{\sqrt{2}\times0.02}{60.10-30.00}\right)^2+\left(\frac{0.763}{18.67}\right)^2}$$

$$= 1.3\times10^{2}\ (m/s)$$

$\therefore C_S = (3.22\pm0.13)\times10^{3}\ m/s$

(3) 计算杨氏模量和Poisson系数

$$T = \frac{C_L}{C_S} = \frac{6.33\times10^{3}}{3.22\times10^{3}} = 1.966$$

$$\text{杨氏模量 } E = \frac{\rho C_S^2(3T^2-4)}{T^2-1} = \frac{2700\times(3.22\times10^{3})^2\times(3\times1.966^2-4)}{1.966^2-1}$$

$$= 7.42\times10^{10}\ (Pa) = 74.2\ (GPa)$$

$$\text{Poisson系数 } \sigma = \frac{T^2-2}{2(T^2-1)} = \frac{1.966^2-2}{2\times(1.966^2-1)} = 0.325$$

六. 实验结果

(1) 开路用 τ_2 计算得 $L=(70.8\pm2.8)$ m

用 τ_1 计算得 $L=(69\pm6)$ m

短路负载用 τ_2 计算得 $L=(66.7\pm2.8)$ m

匹配负载用 τ_1 计算得 $L=(67\pm5)$ m

(2) 衰减系数 $\alpha = 1.72\times10^{-3}\ m^{-1}$

(3) 纵波波速 $C_L = (6.33\pm0.18)\times10^{3}\ m/s$

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名 _____ ）

作实验日期 年 月 日 教师评定

(4)缺陷深度 $h = (15.4 \pm 2.1)\,mm$

(5)横波波速 $C_S = (3.22 \pm 0.13) \times 10^3\,m/s$

(6)杨氏模量 $E = 74.2\,GPa$

Poisson系数 $\sigma = 0.325$

七. 误差分析

1. 在"传输线中脉冲信号的传输和反射"实验中，可以发现：使用不同方法得到的线缆长度 L 和 Δ_L 不同，可能的原因是：

①靠人眼判断光标位置，并不准确；

②仪器误差 25.0 ns 对不同大小的测量量影响不同。

2. 由实验计算结果可以看出，仪器误差在不确定度的计算中占了较大比重。建议在波形观测时，先选用时间分度较大的档位定位波形，再调小时间分度以显示单个波形。

3. 本实验中选择测量的波形质量直接影响了测量误差。建议通过调节衰减器数值和示波器分度值，使波形完整清晰便于测量。

4. 使用斜探头测量时，超声波的传播方向难以准确经过圆心。

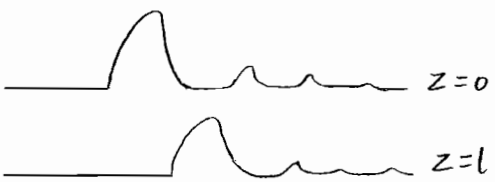
5. 电子仪器普遍存在温漂现象，但对本实验影响应该很小。

八. 思考题

若 $Z_L = R_L$ 略大于或略小于 R_0 时，波形如何？

答：电压反射系数 $T = \dfrac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} = \dfrac{R_L - R_0}{R_L + R_0}$ （Z_L Z_0 均为纯电阻性负载时），

① R_L 略大于 R_0 时，$T > 0$ 且 T 较小，接近于 0，所以 $z = 0$ 处会出现一个小的反射波，$z = l$ 处相应地出现小的反射波（同相）。

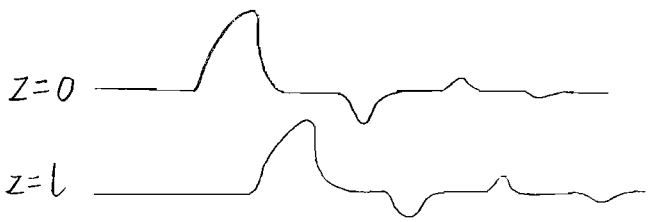


清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

②R_1略小于R_0时，$T<0$且T较小，接近于0，所以$z=0$处会出现反相的反射波。$z=l$处相应地出现反相的反射波。



九.感想与体会

本实验的重点在于"传输线中脉冲反射波的测量"和"超声波测量"，第一部分测量连续脉冲和单脉冲主要是为了熟悉仪器操作。两个实验都利用了$s=\frac{v\cdot\Delta t}{2}$的关系式，所测的时间差都较小，因而时间测量的精度对实验结果影响很大。虽然两个实验使用了同一台示波器来观测脉冲信号，但在介质中传输并反射的，一个是电磁波，一个超声波。

传输线实验通过发射信号与反射信号的时间差间接地测量电缆长度，方法简单易行。而且电磁波在同轴电缆中，外部干扰小。由于电磁波波速快，实验中使用了几十米的电缆，但所测时间仍不到1μs，使实验结果的不确定度在m的量级上。这种测量方法在远距离、测量断线位置时更有优势。但距离越长，信号被吸收得越多（指数型衰减），这时可以增大输入信号或者分段测量。

"超声波测量"实验包括两部分，测量横纵波波速和缺陷深度，前一个是已知距离求波速，后一个是已知波速测距离。由于超声波可以在不破坏试件的情况下穿透介质检测距离和表面状况，使得这种测量方法在无损探伤、B超、雷达探测、石油勘探等领域具有广泛的应用。但我觉得本实验也体现了超声波测量的一些缺憾：

①噪声干扰大。声波在介质不均匀处、表面畸变处、缺陷处都会发生反射。虽然超声波具有良好的方向性，但由于发射装置和介质界

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

并不理想，总会接收到其他方向的反射信号。从示波器的图像看，噪声使图像波形不整洁。

②精度不高。本实验结果的不确定度在几毫米，而游标卡尺可以达到 0.02 mm，可见由超声波测量普通的长度并没有优势。不过，对于工件的内部缺陷和远距离测量却是卡尺难以企及的，正是超声波测量的优势所在。

③需要已知波速才能测出距离，但一些复杂结构中具有不同的材料（如人脑），波速可能并不单一。只能从波形的变化中定性地判断异常。

感谢老师的耐心讲解和悉心指导。

清华大学实验报告

系别 _____ 班号 精11 姓名 尚恩垚 （同组姓名 _____ ）

作实验日期 年 月 日 3号 教师评定

1. 观察测量脉冲信号

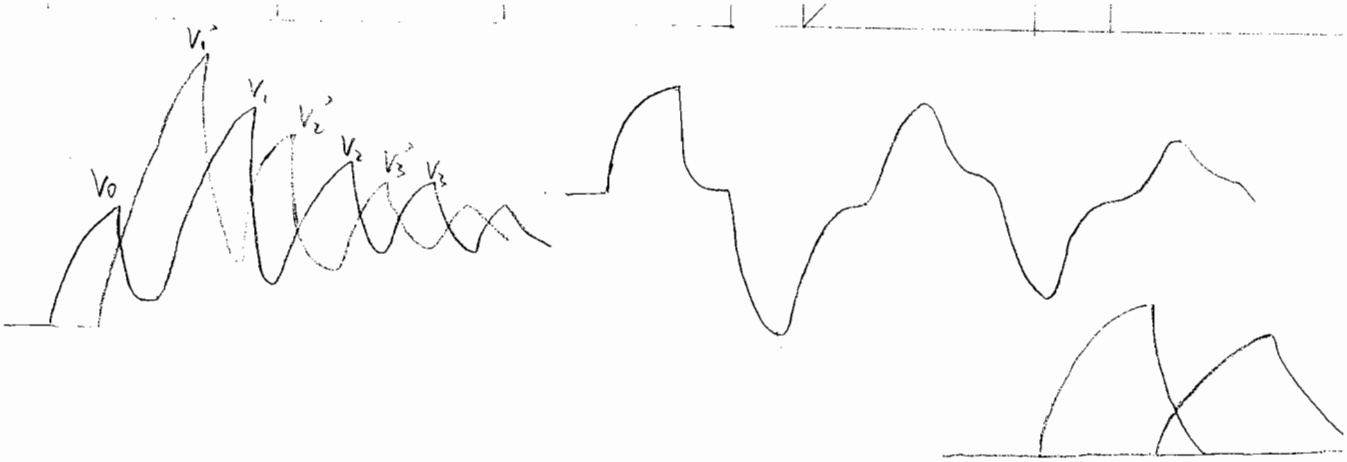
$\Delta V_{示波器} = 50.0\ mV$　$\Delta t_{示波器} = 25.0\ ns$

	U_{max}/V	f/kHz	上升 t_r/ns	下降 t_f/ns	脉冲宽度 t_w/ns	衰减器 I II/dB	存储通
连续脉冲	242	2.4000	180.0	350.0	240.0	86	B
单脉冲	240		160.0	350.0	240.0	86	A

2. 传输线中脉冲信号传输与反射

$\Delta t_{示波} = 25.0ns$

	输出端开路 V/mV	T_2/ns	T_1/ns	短路负载	T_2/ns	匹配负载 移光标	T_1/ns
输入端	$V_1 = 336$	1. 700.0	1. 340.0	输入端	1. 680.0	输入端 1.	330.0
	$V_2 = 264$	2. 720.0	2. 360.0		2. 660.0	2.	340.0
	$V_3 = 208$	3. 700.0	3. 340.0		3. 660.0	3.	330.0
输出端	$V_1' = 376$	1. 690.0		输出端		输出端	
	$V_2' = 288$	2. 720.0					
	$V_3' = 224$	3. 720.0					



清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

3. 超声波测量 $\Delta t_{示波器} = 0.500\mu s$ $\Delta t_{表} = 2.50\mu s$

	直探头—纵波		斜探头—横波			可变探头—表面波		
	底波 T_H/μs	缺陷波 T_D/μs	T_{OR}/μs	T_{R1}/μs	T_{R2}/μs	L/mm	角度(°)	ΔT_b/μs
1	18.80	14.00	19.00	24.00	43.00			
2	19.00	14.20	18.00	24.00	42.00			
3	19.20	14.20	19.00	24.00	42.00			

57

14同-张

3号

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 精仪系 班号 精11 姓名 尚恩垚 （同组姓名 ）

作实验日期 年 月 日 教师评定 9

分光计的调节和色散曲线的测定

尚恩垚
2011010494
5号

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 精仪系 班号 精11 姓名 尚恩士 （同组姓名 ）

作实验日期 年 月 日 教师评定

分光计的调节和色散曲线的测定

一、实验目的

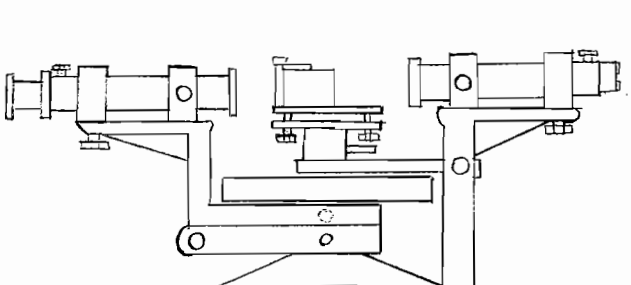
(1)了解分光计的原理与构造，练习调节分光计

(2)用最小偏向角法测定玻璃折射率

(3)掌握三棱镜顶角的两种测量方法

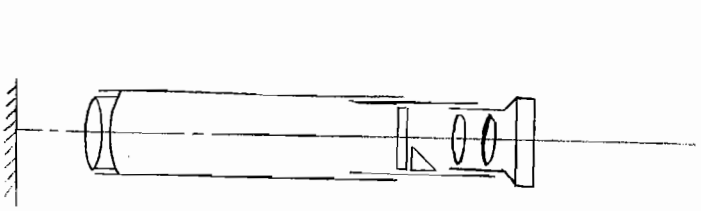
二、实验原理

1、分光计的结构及调节原理



调节要求 ①入射光与出射光均为平行光束 ②入射光和出射光的方向以及反射面或折射面的法线都与分光计的刻度盘平行

1) 望远镜



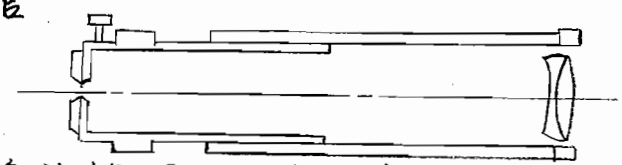
如果叉丝平面正好处在物镜的焦面上，从叉丝发出的光经物镜后成一平行光束。如果前方有一平面镜将这束平行光反射回来，再经物镜成像于其焦平面上，那么"十"形叉丝与"十"形叉丝的像都能看到，并无视差。这就是自准法的原理

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

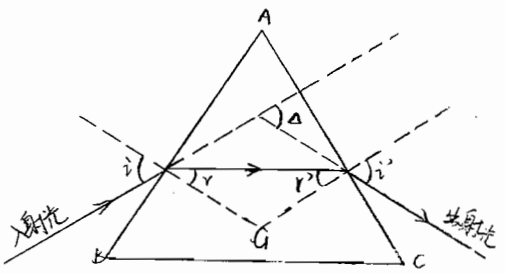
2）平行光管



只要将狭缝调到透镜的焦平面上，则从狭缝发出的光经透镜后将就成为平行光。

3）刻度盘：为消除偏心差，采用两个游标读数的方法。

2. 最小偏向角法测玻璃的折射率



当入射角i等于出射光i'时，入射光和出射光的夹角最小，称为最小偏向角δ

光线偏向角 $\delta = (i-r)+(i'-r')$

当 $i=i'$ 时，由折射定律有 $r=r'$，得 $\delta = 2(i-r)$ ①

又因 $r+r' = 2r = \pi - G = \pi - (\pi - A) = A$，所以 $r = \frac{A}{2}$ ②

联立①②得 $i = \frac{A+\delta}{2}$

折射定律有 $n = \frac{\sin i}{\sin r} = \frac{\sin\frac{A+\delta}{2}}{\sin\frac{A}{2}}$

3. 色散及色散曲线的拟合

折射率n随波长入而变的现象称为色散。对一种玻璃材料所作出的折射率和波长的关系曲线称为色散曲线。不同材料的色散曲线不同。平均色散 $n_F - n_C$，色散本领 $V = \frac{n_F - n_C}{n_D - 1}$

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

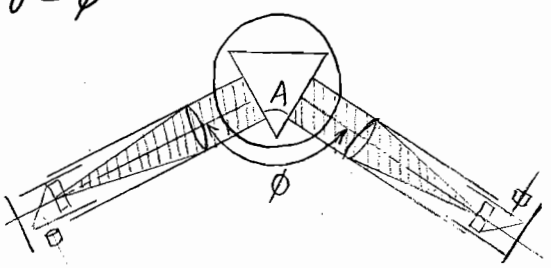
作实验日期 年 月 日 教师评定

其中，n_C n_F n_D 分别为玻璃对夫琅和费谱线中C线、D线、F线的折射率。

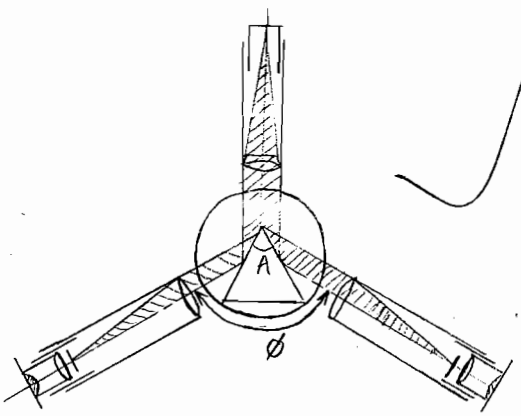
经验公式 $n^2 = A_0 + A_1\lambda^2 + A_2\lambda^{-2} + A_3\lambda^{-4} + A_4\lambda^{-6} + A_5\lambda^{-8}$。设 $y = n^2$，$x_1 = \lambda^2$，$x_2 = \lambda^{-2}$，$x_3 = \lambda^{-4}$，$x_4 = \lambda^{-6}$，$x_5 = \lambda^{-8}$，把一元高次方程拟合成为 $y \sim x_1, x_2, x_3, x_4, x_5$ 的多元线性回归问题，拟合色散曲线，得到经验公式。

4. 三棱镜顶角的测量原理

(1) 自准法。$A = 180° - \phi$



(2) 平行光法测定三棱镜顶角。$A = \frac{1}{2}\phi$



三、实验仪器

分光计、平面反射镜、玻璃三棱镜、氦光谱管及其光源

清 华 大 学 实 验 报 告

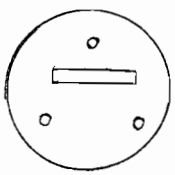
系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

四、实验任务.

1. 粗调：目测调节望远镜、平行光管、小平台，尽量使其与刻度盘平行

2. 调节望远镜适于观察平行光



①旋转目镜，直至看清叉丝

②按图放置平面镜，点亮望远镜小灯

③缓慢转平台，寻找光斑，否则重新粗调.

④稍微调节套筒，直至叉丝像清晰且无视差

3. 调节望远镜光轴垂直于分光计主轴.

采用渐近法，调节望远镜和载物台，各调一半。然后转动平台180

同样调节，反复几次，直至平面镜前后两面都能把十字像与叉丝重

4. 调节平行光管使产生平行光

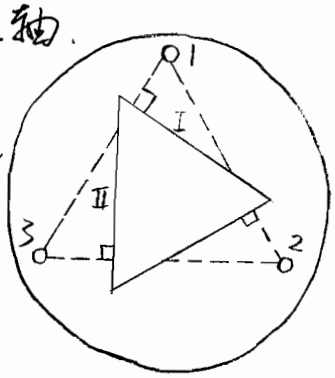
①望远镜正对光管。调节狭缝与透镜间距，直至看到清晰的狭缝像无视差

②可以调节狭缝宽度约0.5mm左右。

5. 调节光管主轴垂直于分光计主轴.

调节光管的调水平螺钉，使狭缝像中点与叉丝中心交点重合。

6. 调节三棱镜两个光学面的法线垂直于分光计主轴.



①粗调平台水平，按图放三棱镜

②调节平台，使三棱镜两光学面法线与望远镜光轴平行.

（调节螺钉1，不改变II，改变I；

调节螺钉2，不改变I，改变II。）

7. 测量汞光管谱线的最小偏向角.

①用眼睛寻找出射彩光的方向.

②转望远镜，并调节使谱线清晰、明亮、线宽合适。认清谱线

③稍稍转动平台，观察谱线移动方向。

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

④转平台使谱线向偏向角减小的方向移动，同时让望远镜跟踪谱线

⑤当转到某位置，谱线向相反方向移动，转折位置为最小偏向角所在

⑥转望远镜，使叉丝竖线对准谱线中心，确认一下它已处在最小偏向角处

⑦读两游标值，并记录

⑧重复④~⑦，测出其余谱线的最小偏向角.

8. 测三棱镜顶角：自准法或平行光法

注意事项：(1) 光学元件应轻拿轻放，切忌用手触摸光学面.

(2) 不应在止动螺钉锁紧时强行转望远镜，也不要随意拧狭缝

(3) 测量数据前检查分光计的止动螺钉

(4) 正确使用望远镜的微调螺钉

(5) 不要用手触摸高压电源

五 数据处理

1. (1) $n = \dfrac{\sin\frac{A+\delta}{2}}{\sin\frac{A}{2}}$

$$\Delta_n = \sqrt{\left(\frac{\partial n}{\partial A}\times\Delta_A\right)^2 + \left(\frac{\partial n}{\partial \delta}\times\Delta_\delta\right)^2}$$

$$= \sqrt{\left(\frac{\sin\frac{\delta}{2}}{2\sin^2\frac{A}{2}}\times\Delta_A\right)^2 + \left(\frac{\cos\frac{\delta+A}{2}}{\sin\frac{A}{2}}\times\Delta_\delta\right)^2}$$

(2) 自准法测顶角 $A = 180° - \phi$

估计 $\Delta_A = \Delta_{仪} = 1' = 2.9\times10^{-4}\,rad$

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名 _____ ）

作实验日期 年 月 日 教师评定

$$\delta = \frac{1}{2}(\delta_1 + \delta_2) = \frac{1}{2}(\phi_1 - \phi_{10} + \phi_2 - \phi_{20})$$

$$\Delta_\delta = \sqrt{(\tfrac{1}{2}\Delta_{\phi_1})^2 + (\tfrac{1}{2}\Delta_{\phi_{10}})^2 + (\tfrac{1}{2}\Delta_{\phi_2})^2 + (\tfrac{1}{2}\Delta_{\phi_{20}})^2}$$

$$= 1' = 2.9\times10^{-4}\ \text{rad}$$

(3) 将 $\Delta_A = \Delta_\delta = 2.9\times10^{-4}$ rad 代入 Δ_n （使用燕先的 n、δ估计）

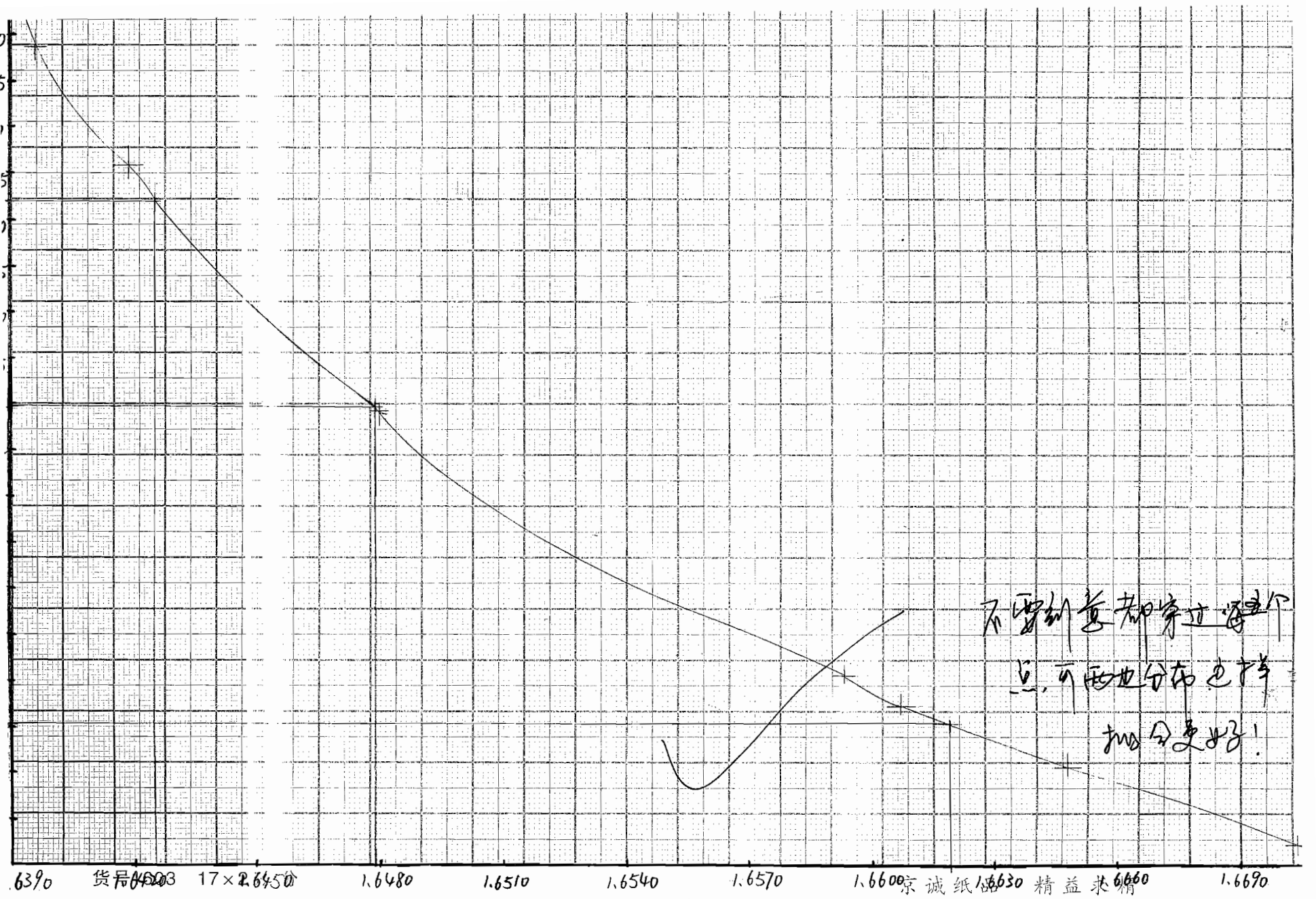
$$\Delta_n = \sqrt{\left(\frac{\sin 25°31.5'}{2\times\sin^2 30°1.5'}\times 2.9\times10^{-4}\right)^2 + \left(\frac{\cos 55°33'}{\sin 30°15'}\times 2.9\times10^{-4}\right)^2}$$

$$= 0.0004$$

∴ n 应取5位有效数字

2. $A = 60°03'$ $\Delta_{仪} = 1'$ $\phi_{10} = 10°26'$ $\phi_{20} = 190°26'$

波长/nm	447.1	471.3	492.2	501.6	587.6	667.8	706.6
ϕ_1	317°05'	317°40'	318°05'	318°14'	319°24'	320°0'	320°14'
ϕ_2	137°05'	137°40'	138°05'	138°14'	139°23'	140°01'	140°14'
$\delta_1=\lvert\phi_1-\phi_{10}\rvert$	53°21'	52°46'	52°21'	52°12'	51°02'	50°26'	50°12'
$\delta_2=\lvert\phi_2-\phi_{20}\rvert$	53°21'	52°46'	52°21'	52°12'	51°03'	50°25'	50°12'
$\delta=\frac{\delta_1+\delta_2}{2}$	53°21'	52°46'	52°21'	52°12'	51°03'	50°26'	50°12'
$\frac{A+\delta}{2}$	56°42'	56°25'	56°12'	56°08'	55°33'	55°15'	55°08'
n	1.6704	1.6648	1.6607	1.6593	1.6480	1.6419	1.6396


不要动笔都穿过这个
点，可以也分布更平
均分更好！
1.6390
1.6480
1.6510
1.6540
1.6570
1.6600
1.6630
1.6660
1.6690
京诚纸品 精益求精

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

由色散曲线可知 $n_C = 1.6426$

$n_D = 1.6480$

$n_F = 1.6616$

平均色散 $n_F - n_C = 1.6616 - 1.6426 = 0.0190$

色散本领 $V = \frac{n_F - n_C}{n_D - 1} = \frac{1.6616 - 1.6426}{1.6480 - 1} = 0.0293$

3. 用经验公式对测量数据进行多元线性拟合。

$$n^2 = A_0 + A_1\lambda^2 + A_2\lambda^{-2} + A_3\lambda^{-4} + A_4\lambda^{-6} + A_5\lambda^{-8}$$

利用 Excel 的 LINEST 函数可得

$r = 0.999946$

$A_0 = 2.64678$

$A_1 = 0$

$A_2 = 9.0737 \times 10^{-15}$

$A_3 = 7.90143 \times 10^{-27}$

$A_4 = -1.17247 \times 10^{-39}$

$A_5 = 7.51499 \times 10^{-53}$

λ/nm	n	n^2	$n^2_{拟合}$	$\frac{\lvert n^2 - n^2_{拟合}\rvert}{n^2}$
447.1	1.6704	2.79024	2.79019	0.001%
471.3	1.6648	2.77156	2.77167	0.004%
492.2	1.6607	2.75792	2.75822	0.011%
501.6	1.6593	2.75328	2.75281	0.017%
587.6	1.6480	2.71590	2.71615	0.009%
667.8	1.6419	2.69584	2.69554	0.011%
706.6	1.6396	2.68829	2.68846	0.006%

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名 _____ ）

作实验日期 年 月 日 教师评定

利用拟合公式计算 n_C, n_D, n_F

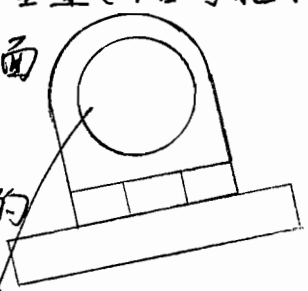
入	$n_{拟合}$	$n_{读图}$	$\left\|\frac{n_{拟合}-n_{读图}}{n_{读图}}\right\|$
$\lambda_C=656.3nm$	1.6425	1.6426	0.0060%
$\lambda_D=589.3nm$	1.6479	1.6480	0.006%
$\lambda_F=486.1nm$	1.6619	1.6616	0.018%

4. 误差分析 ①游标读数不准 ②操作不规范造成的系统误差

七. 1. 当转动小平台180°反复调节使望远镜光轴垂直于分光计主轴时，小平台是否也同时调好到垂直于主轴了？为什么？

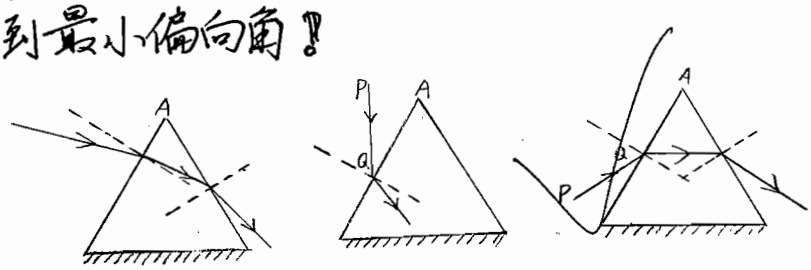
答：不一定。这只能说明平面镜法线、望远镜光轴垂直于主轴，不能说明平台水平。而且由于元件各异，另放元件在放到平台上时必须调整元件光学面法线与主轴垂直（平台可能不水平）

一方面，由于平面镜底座的工艺原因，平面镜法线不一定平行于小平台平面；



另一方面，即使平行，也只能保证平面的一个基向量垂直于主轴，在垂直于该基向量的方向上，小平台的方位仍是任意的。

2. 根据折射定律，定性分析入射光的方位应处于何种情况才能找到最小偏向角！



答：因为玻璃的折射率大于空气的折射率，由折射定理，入射角比

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

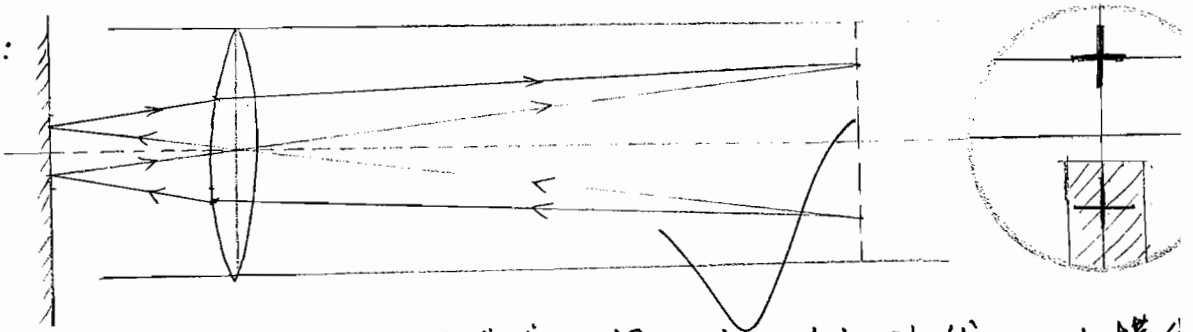
折射角大，且分居法线两侧。故而只有(c)可能找到最小偏向角

3. 根据实验原理，怎样测量光波波长

答：可以测量该波长对应的光波的最小偏向角，求出玻璃材料对该波长光的折射率。1）通过作与y轴平行的直线，取其与色散曲线的交点的y值 2）将y值代入已得到的经验公式，算出λ值。

4. 试根据光路图分析，为什么望远镜光轴与平面镜法线平行时，在目镜内应看到十字叉丝反射像与双十字形叉丝的上方交点相重合？

答：



分划板双十字叉丝的下横线在望远镜的中心轴线上，上横丝与十字叉丝的横丝相对于轴线处于对称的位置。

八. 实验小结

这是我在清华做的第一次光学实验。在做实验之前，我从网上搜索到了相关视频，通过仔细认真地预习，实验进行得便比较顺利。分光计的确是一台精密的仪器呀。在第一次测出光谱时，这些彩色的光线经过千辛万苦终于调出来了。那种惊喜之情，现在仍令我回味。但通过与标准的比较，我测出的

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

实验数据除黄光外其他都多出了4'。这看似微小的角度对于精密的实验来讲却是不可小视的系统误差。所以我不得不重新开始，获许或许难免失落，但精益求精的思想却深刻在我脑海中。无论如何，这仍然是一次无比珍贵的回忆。

感谢老师的指导和帮助，感谢您的耐心和认真。

清华大学实验报告

系别 精仪系 班号 精11 姓名 尚思士 (同组姓名 _____)

作实验日期 年 月 日 教师评定

5号

$\phi_{10} = 10°26'$ $\phi_{20} = 190°26'$ $\Delta_{仪} = 1'$

	447.1	471.3	492.2	501.6	587.6	667.8	706.6
ϕ_1	317°05'	317°40'	318°5'	318°14'	319°24'	320°0'	320°14'
ϕ_2	137°05'	137°40'	138°5'	138°14'	139°23'	140°01'	140°14'
$\delta_1 = \lvert\phi_1 - \phi_{10}\rvert$	53°21'	52°46'	52°21'	52°12'	51°02'	50°26'	50°12'
$\delta_2 = \lvert\phi_2 - \phi_{20}\rvert$	53°21'	52°46'	52°21'	52°12'	51°03'	50°25'	50°12'
$\delta = \frac{1}{2}(\delta_1 + \delta_2)$	53°21'	52°46'	52°21'	52°12'	51°03'	50°26'	50°12'

$A = 60°03'$

于轩峰 J40

10.11

清华大学实验报告

系别 精仪系 班号 精11 姓名 尚恩赴 (同组姓名)

作实验日期 年 月 日 教师评定

分光计的调节和色散曲线的测定

一. 实验目的:

(1) 了解分光计的原理和构造，练习调节分光计

(2) 用最小偏向角法测定玻璃折射率

(3) 掌握三棱镜顶角的两种测量方法

二. 实验~~任务~~仪器

分光计、平面反射镜、玻璃三棱镜、氦光谱管及其电源

三. 实验任务及操作要点

1. 粗调: ① 目测调节望远镜和平行光管的光轴尽量使它们与刻度盘平行

② 调节小平台尽量使它与主轴垂直

2. 调节望远镜适合于观察平行光

① 旋转目镜，直至看清叉丝

② 将平面镜放在小平台上，点亮望远镜的小灯。

③ 缓慢转动小平台，寻找光斑，否则重新粗调。

④ 稍微调节套筒，直至叉丝像清晰且无视差。

3. 调节望远镜光轴垂直于分光计主轴.

采取渐近法调节望远镜和载物台，使平面镜转180°前后的两面都能把十字像与叉丝上交点重合

4. 调节平行光管使产生平行光

调节狭缝和透镜间的距离，使狭缝~~在于透镜焦平面~~像清晰且无视差。

5. 调节平行光管光轴垂直于分光计主轴.

调节光管，使狭缝像中点与叉丝中心交点重合.

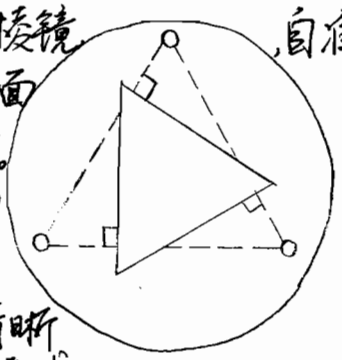
6. 调节三棱镜两光学面法线垂直于分光计主轴

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

粗调小平台水平，按图装三棱镜，自准法调节平台，使三棱镜两个光学面法线与望远镜的光轴平行。



7. 测量氦光管谱线的最小偏向角

①用眼睛寻找出射彩光的方向

②转望远镜，并调节使谱线清晰明亮、线宽合适。认清9条光谱线。

③稍稍转动小平台，观察谱线的移动方向。

④转平台使谱线向偏向角减小的方向移动，同时让望远镜跟

⑤当转到某位置，谱线向相反方向移动，转折位置为最小偏

⑥转望远镜叉丝竖线对准谱线中心，确认一下它已处在最小

⑦读两游标的数值并记录

⑧重复④~⑦，测出所需7条谱线的位置。

8. 测三棱镜顶角

自准法或平行光法

注意事项：

(1) 光学元件轻拿轻放，切忌用手触摸光学面。

(2) 不应在止动螺钉锁紧时强行转动望远镜，也不要随意拧动

(3) 测量数据前检查分光计的止动螺钉

(4) 正确使用望远镜的微调螺钉。

(5) 不要用手触摸高压电源。

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 精仪系 班号 精11 姓名 尚恩垚 （同组姓名 ）

作实验日期 2012 年 11 月 29 日 教师评定 9+

液体的粘度测量

班级：精11
姓名：尚恩垚
学号：2011010494
日期：2012年11月29日

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 精仪系 班号 精11 姓名 尚恩赴 （同组姓名 ）

作实验日期 2012 年 11 月 29 日 教师评定

液体的粘度的测量

一、实验目的

1. 了解液体粘度测量原理
2. 用旋转法测量液体粘度、粘度与温度的关系曲线
3. 比较落旋转法、落球法、毛细管法.

二、实验原理

1. 粘度：

粘度分为动力粘度和运动粘度，一般动力粘度简称为粘度，是用来表示流体粘性程度的物理量。

$\tau_{xz} = \eta \frac{dV_x}{dz} = \frac{\Delta F}{\Delta S}$ （F为切应力，S为表面积） η单位 Pa·s

实际工作中直接测量运动粘度 $\nu = \frac{\eta}{\rho}$，单位 m^2/s

2. 旋转法测定液体粘度：

根据牛顿内摩擦定律可导出 couette-Margules 公式：

$\eta = \frac{(R_1^2 - R_2^2)}{4\pi L R_2^2 R_1^2} \cdot \frac{M_1}{\omega_0}$ （R_2为旋转薄壁半径，R_1为容器半径，M_1为旋转柱面所受力矩，L为薄壁高度，ω_0

只需测得以上数据，便可测得η.

同时，存在 Andrade 公式：$\eta = Ae^{E/kT}$

3. 落球法测定液体粘度：

根据小球在液体中的受重力、浮力、粘滞力 $f = 6\pi\eta v r$ 平衡条件

可得出公式：

$\eta = \frac{2}{9} \cdot \frac{(\rho - \rho_0) g r^2}{V}$ （ρ为小球密度，ρ_0为液体密度，r为球半径，

V为最终速度）

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

经过对容器情况的修正得到：

$$\eta_0 = \frac{1}{18}\cdot\frac{(\rho-\rho_0)gd^2}{V(1+2.4\frac{d}{2R_0})(1+3.3\frac{d}{2H})}$$

（d为小球直径，R_0容器半径，H为液体高度）

之后又经过1级修正，2级修正

$$\eta_1 = \eta_0 - \frac{3}{16}\rho_0 dV \qquad \eta_2 = \frac{1}{2}\eta_1\cdot\left[1+\sqrt{1+\frac{19}{270}\left(\frac{\rho_0 dV}{\eta_1}\right)^2}\right]$$

4. 毛细管法测定液体粘度

毛细管粘度计，根据U型管结构，液体在重力作用下流动，测得一定量液体经上、下标线E、F的时间，便可按照公式计算出粘度

根据泊肃叶公式：$dV = \frac{\pi r^4 8\rho dt}{8\eta l}$ 导出比较法测量η的公式：

$$\eta_2 = \eta_1\cdot\frac{\rho_2 t_2}{\rho_1 t_1}$$

即可根据已知的η_1，求出η_2

三、实验器材

NDJ-7旋转式粘度计，HS-4型恒温浴槽，长筒，PZ-B-5型液

卷尺，螺旋测微计，磁铁，大小两个钢球，芬式粘度计.

四、实验任务.

1. 用旋转法测量蓖麻油在室温下至60°C范围内的粘度变化，绘出粘温曲线并与公式比较

2. 用毛细管法、落球法测量室温下蓖麻油的粘度，并对两种方法测量值进行分析比较.

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

步骤

1. 旋转法测蓖麻油粘度

①按照说明书调整好仪器

②调整恒温浴槽温度，使容器上温度示数在22℃～55℃之间变化，每隔2～3℃记录一次粘度.

2. 落球法测蓖麻油粘度.

①测量液体高度，容器内径，小球匀速通过距离长度

②用螺旋测微器分别测量大小钢球直径6次.

③分别将大小球投入蓖麻油，测量经过两标记点的时间，分别进行六次实验。

3. 用毛细管法测量酒精粘度.

①校标天平，分别测量水及酒精密度

②分别用芬式粘度计测量水及酒精经过两刻度线的时间，当液体由酒精换为水时，粘度计用蒸馏净水清洗三次，时间分别测量3次.

五. 数据处理

(1) 1. 旋转法

温度/℃	22.9	24.0	26.0	28.2	31.6	33.7	35.1	38.2	41.3	44.2	46
读数	84.2	76.3	66.8	57.5	45.0	39.5	35.3	28.3	22.9	18.9	16.
粘度η/mPa·s	842	763	668	575	450	395	353	283	229	189	16

48.5	51.9	54.2	56.1
14.5	12.1	10.5	9.9
145	121	105	99

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

(2) 由 Andrade 公式 $\eta = Ae^{E/kT}$

有 $\ln\eta = \ln A + \frac{E}{kT} = \frac{E}{k}\cdot\frac{1}{T} + \ln A$

ln(η/Pa·s)	-0.172	-0.270	-0.403	-0.553	-0.799	-0.929	-1.041	-1.262	-1.474	-1.666	-1.8
$\frac{1}{T}$ ($\times10^{-3}$/K)	3.38	3.37	3.34	3.32	3.28	3.26	3.24	3.21	3.18	3.15	3.1
	-1.931	-2.112	-2.254	-2.313							
	3.11	3.08	3.05	3.04							

(3) 由图可知，最后一点与直线偏离较大，故舍去

使用最小二乘法进行直线拟合

得 $a = -22.1127$ $b = 6.494035$

$r = 0.99976$

r 接近于 1，说明拟合程度较好，与公式较符合

(4) 由 Andrade 公式，斜率为 $\frac{E}{k}$，截距为 $\ln A$

故 $E = k\cdot(1000b) = 8.96\times10^{-20}$ J

$A = e^a = 2.49\times10^{-10}$ Pa·s

$\therefore \eta = Ae^{\frac{E}{kT}} = 2.49\times10^{-10}\cdot e^{\frac{6494}{T}}$ Pa·s

(5) 数据较好地满足线性关系，因而较好地证明了 Andrade 公式的正确

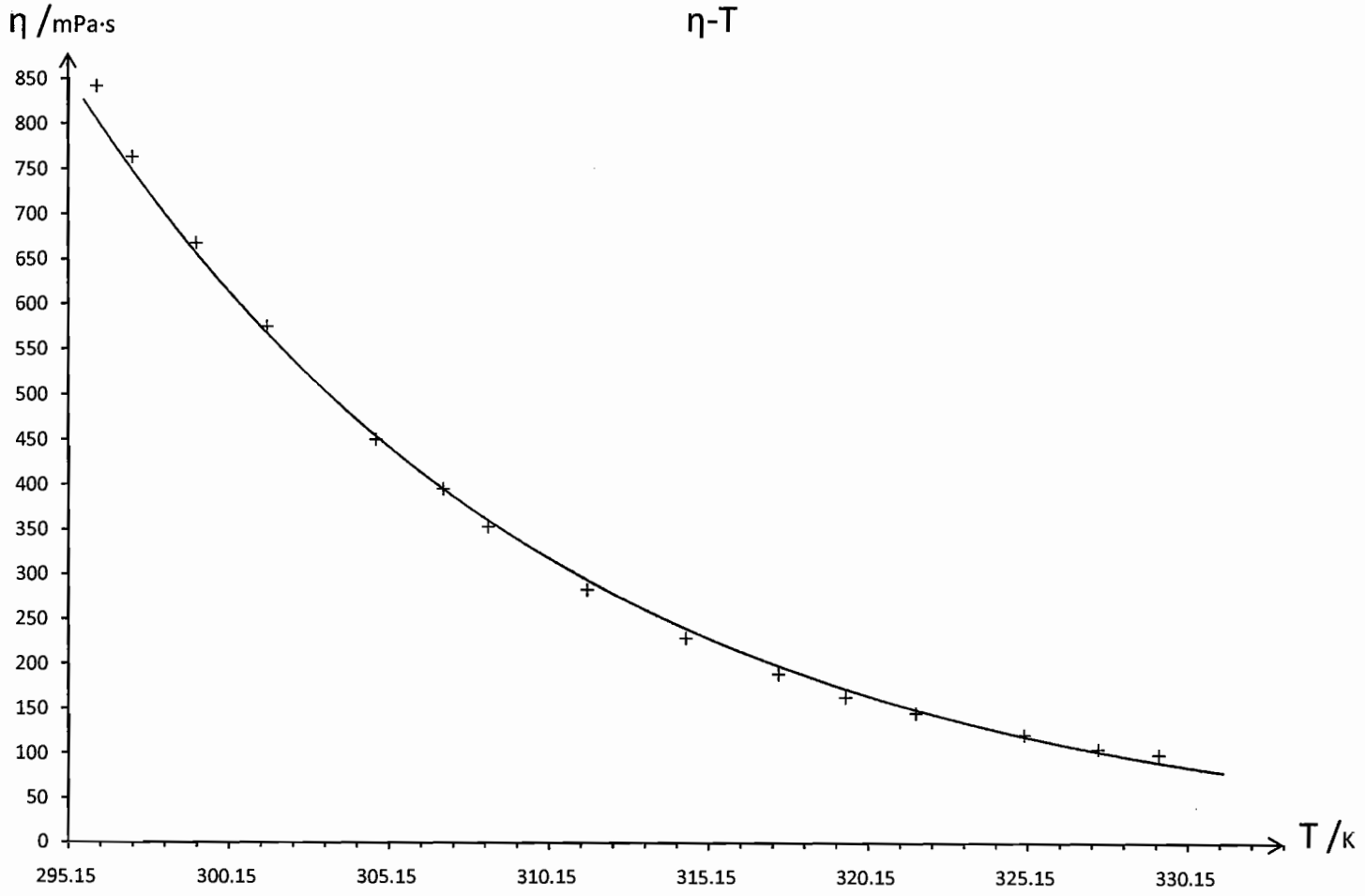
误差分析：

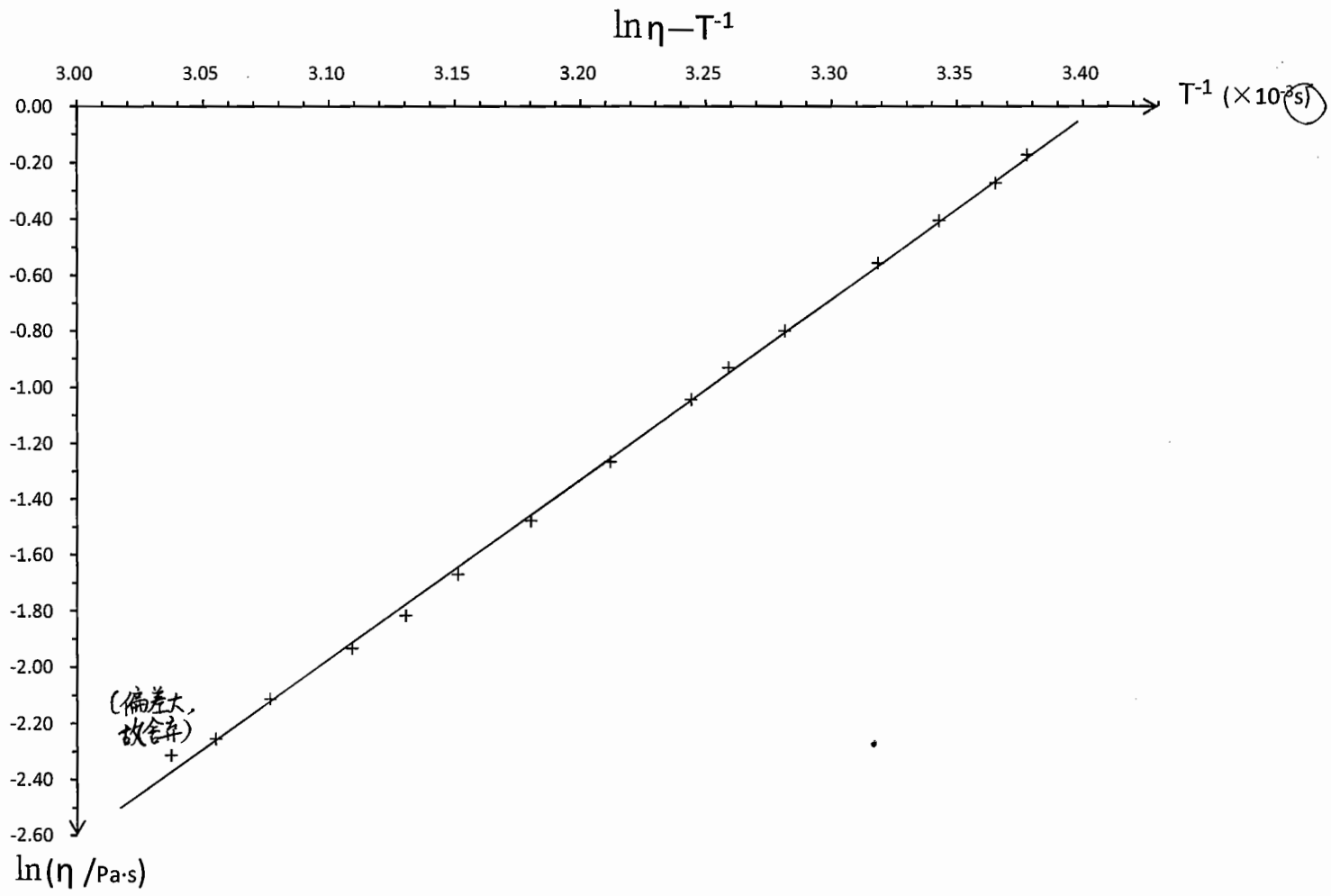
可能造成误差的因素有 ① 粘度计、温度计读数偏差

② 转轴未与容器轴线完全重合

③ 待测液体混入杂质产生的误差

④ 转子磨损或腐蚀产生的误差


η /mPa·s
η-T
850
800
750
700
650
600
550
500
450
400
350
300
250
200
150
100
50
0
T /K
295.15
300.15
305.15
310.15
315.15
320.15
325.15
330.15


lnη—T-1
3.00
3.05
3.10
3.15
3.20
3.25
3.30
3.35
3.40
T-1 (×10-3s-1)
0.00
-0.20
-0.40
-0.60
-0.80
-1.00
-1.20
-1.40
-1.60
-1.80
-2.00
-2.20
-2.40
-2.60
(偏差大，故舍弃)
ln(η /Pa·s)

清华大学实验报告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名 _____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

2. 落球法

(1)

测量序号	1	2	3	4	5	6
$d_大$/mm	1.378	1.366	1.367	1.373	1.364	1.371
$d_小$/mm	0.793	0.792	0.801	0.796	0.789	0.810

计算得 $\bar{d}_大 = 1.370$ mm

$\bar{d}_小 = 0.797$ mm

(2)

测量序号	1	2	3	4	5	6
$t_大$/s	28.78	28.10	27.44	28.04	27.35	28.09
$t_小$/s	83.22	82.72	83.05	82.75	82.80	82.10

计算得 $\bar{t}_大 = 27.97$ s

$\bar{t}_小 = 82.77$ s

故 $V_大 = \frac{L}{\bar{t}_大} = 7.545 \times 10^{-3}$ m/s

$V_小 = \frac{L}{\bar{t}_小} = 2.549 \times 10^{-3}$ m/s

(3) 由实验原理中的推导可知

$$\eta_0 = \frac{1}{18} \cdot \frac{(\rho - \rho_0) g d^2}{v\left(1 + 2.4\frac{d}{2R_0}\right)\left(1 + 3.3\frac{d}{2H}\right)}$$

一级修正后 $\eta_1 = \frac{1}{18} \cdot \frac{(\rho - \rho_0) g d^2}{v\left(1 + 2.4\frac{d}{2R_0}\right)\left(1 + 3.3\frac{d}{2H}\right)} - \frac{3}{16}\rho_0 d v$

二级修正后 $\eta_2 = \frac{1}{2}\eta_1\left(1 + \sqrt{1 + \frac{19}{270}\left(\frac{\rho_0 d v}{\eta_1}\right)^2}\right)$

使用二级修正后的公式，将 $\rho = \rho_{钢} = 7.80\ g/cm^3 = 7800\ kg/m^3$

$\rho_0 = \rho_{蓖} = 0.957\ g/cm^3 = 957\ kg/m^3$

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

$g = g_{北京} = 9.8015\ m/s^2$

$\bar{d}_大 = 1.370 \times 10^{-3} m$，$\bar{d}_小 = 0.797 \times 10^{-3} m$

$v_大 = 7.545 \times 10^{-3} m/s$，$v_小 = 2.549 \times 10^{-3} m/s$

$2R_0 = D_{液} = 6.05 \times 10^{-2} m$，$H = 0.4320\ m$ 代入公式得

对于大球，$\eta_{大0} = 0.875\ Pa \cdot s$

$\eta_{大1} = 0.873\ Pa \cdot s$ （一级修正后）

$\eta_{大2} = 0.873\ Pa \cdot s$ （二级修正后）

对于小球，$\eta_{小0} = 0.897\ Pa \cdot s$

$\eta_{小1} = 0.897\ Pa \cdot s$ （一级修正后）

$\eta_{小2} = 0.897\ Pa \cdot s$ （二级修正后）

故 $\eta = \frac{\eta_{大2} + \eta_{小2}}{2} = 0.885\ Pa \cdot s$

与旋转法测得的室温数值 0.842 Pa·s 有一定的偏差

误差分析：

可能造成误差的因素有：①计算所取的蓖麻油密度为20°C下的，并非实际温度下的密度

②球并不是完全沿液体轴线下落

③在计时点间球未完全保持匀速运动

④观察球下落时折射产生误差

⑤球不是完全的球形，各处直径略有偏差

金陵

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

3.毛细管法

测量序号	1	2	3
水 时间/s	134.75	130.15	131.25
酒精 时间/s	202.03	203.04	204.16

计算得 $\overline{\Delta t_{水}} = 132.05\ s$ $S_{t_{水}} = 2.40208\ s$

$\overline{\Delta t_{酒精}} = 203.08\ s$ $S_{t_{酒}} = 1.06547\ s$

又测得 $\rho_{水} = 0.9950\ g/cm^3$, $\rho_{酒精} = 0.7940\ g/cm^3$

故 $\eta_{酒精} = \eta_{水} \cdot \frac{\rho_{酒精} \cdot \overline{\Delta t_{酒精}}}{\rho_{水} \cdot \overline{\Delta t_{水}}} = 0.001009 \times \frac{0.7940 \times 203.08}{0.9950 \times 132.05} = 1.238 \times 10$

计算不确定度

$$\frac{\Delta\eta}{\eta_{酒精}} = \sqrt{\left(\frac{\eta_{水}\rho_{酒精}}{\rho_{水} \cdot \overline{\Delta t_{酒精}}}\right)^2 (S_{t_{酒}})^2 + \left(\frac{\eta_{水}\rho_{酒精}}{\rho_{水} \cdot \overline{\Delta t_{水}}}\right)^2 (S_{t_{水}})^2} = 1.5244 \times 10^{-}$$

$\Delta\eta = 1.9 \times 10^{-8}\ Pa \cdot s$

误差分析：

①使用毛细管粘度计时，管中液体混入杂质

②试验过程中粘度计的位置发生改变导致倾角不同.

六.实验结论

1.旋转法：所测数据较好地证明了Andrade公式的正确性

2.落球法：

$\eta = 0.885\ Pa \cdot s$

3.毛细管法：

$\eta_{酒精} = 1.238 \times 10^{-3}\ Pa \cdot s$

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 教师评定

七. 感想

1. 从实验过程来看，旋转法在借助仪器的条件下相对落球法和毛细管法来说更加容易操作。
2. 落球法和毛细管法更加适用于只拥有简易设备的条件下使用
3. 不同于旋转法和落球法，毛细管法只适用于粘度较低的液体，粘度较大的液体会对毛细管的连续使用造成较大影响。
4. 毛细管法由于需要对不同的液体进行换装，往往会相互产生影响造成较大的误差.
5. 落球法实验过程中受人的主观性影响较大（如小球投放位置）因此也会产生一定的偏差.

感谢杨老师的帮助指导。

清华大学实验报告

系别 精仪系 班号 精11 姓名 尚恩垚 （同组姓名 ）

作实验日期 2012 年 11 月 29 日 编号：1 教师评定

温度/℃	22.9	24.0	26.0	28.2	31.6	33.7	35.1	38.2	41.3	44.2	4
	84.2	76.3	66.8	57.5	45.0	39.5	35.3	28.3	22.9	18.9	16
	48.5	51.9	54.2	56.1							
	14.5	12.1	10.5	9.9							

$\eta =$ 10.a mPa·s

示值

$g_{北京} = 9.8015\ m/s^2$

$H = 43.20$ cm，$D_{管} = 6.05$ cm，$\rho_{液}(20℃) = 0.957\ g/cm^3$

$\Delta_{仪} = 21.1$ cm

测量序号	1	2	3	4	5	6
$d_大$/mm	1.378	1.366	1.367	1.373	1.364	1.371
$d_小$/mm	0.793	0.792	0.801	0.796	0.789	0.810

$\rho_{钢球} = 7.80\ g/c$

测量序号	1	2	3	4	5	6
$t_大$/s	28'18"	28'10"	27'44"	28'04"	27'35"	28'09"
$t_小$/s	83'22"	82'72"	83'05"	82'75"	82'80"	82'10"

$\rho_{水} = 0.9950\ g/cm^3$，$\rho_{酒精} = 0.7940\ g/cm^3$

	t_1	t_2	t_3
水 t/s	2:14.75	2:10.15	2:11.25
酒精 t/s	3:22.03	3:23.04	3:24.16

$\eta_{水} = 0.001009\ Pa·s$

2012.11.29

T41 梁雨桃.

清华大学实验报告

系别 精仪 班号 11 姓名 韩盈舟 （同组姓名 ）

作实验日期 年 月 日 2011010493 教师评定

偏振光学实验

一、实验目的：

1. 理解偏振光的基本概念，偏振光的起偏与检偏方法。
2. 学习偏振片与波片的工作原理与使用方法。

二、实验原理：

1、光波偏振态的描述：

一个单色偏振光可分解为两个偏振方向互相垂直的线偏振光的叠加，即

$$\begin{cases} E_x = a_1 \cos\omega t \\ E_y = a_2 \cos(\omega t + \delta) \end{cases}$$

以下，取 $a_1, a_2 > 0$，$0 \le \delta \le \pi$。

当 $\delta = 0, \pi$ 时，描述的是线偏振光

$\delta = \frac{\pi}{2}, -\frac{\pi}{2}$ 时且 $a_1 = a_2$，是圆偏振光，

其他时候表示的为椭圆偏振光。记椭圆长轴方位角为 ψ

则 $\psi = \frac{1}{2}\arctan(\tan 2\beta \cdot \cos\delta)$

$$\frac{b^2}{a^2} = \frac{2}{1+\sqrt{1-(\sin\delta\cdot\sin 2\beta)^2}} - 1$$ ，其中 $\beta = \arctan\left(\frac{a_2}{a_1}\right)$

可以看出，a_1、a_2 为椭圆偏振光在 x 方向、y 方向上的偏振分量的振幅。

2、偏振片：

对于理想偏振光，只有电矢量振动方向与透射轴方向平行的光波分量才能通过偏振片。所以光通过偏振片后变为线偏振光。

定义消光比 $e = T_2/T_1$

由马吕斯定律 $T_\theta = (T_1 - T_2)\cos^2\theta + T_2$

透射光强极值之比 $\frac{I_{min}}{I_{max}} = \frac{T_{11}}{T_{11}} = \frac{T_1 T_2}{(T_1^2 + T_2^2)/2} = \frac{2e}{1+e^2} \approx 2e$.

清华大学实验报告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 [redacted] (同组姓名 _____)

作实验日期 年 月 日 2011060493 教师评定

多数情况下，$\frac{b^2}{a^2}=\frac{I_{min}}{I_{max}}$

3. 延迟器和波片

常用的线性延迟器是由双折射材料制成的光学元件。且有两个互相垂直的特定方向，慢轴和快轴。

则 $\delta_r=2\pi(n_s-n_f)d/\lambda_0=\omega(n_s-n_f)d/c_0$

波片是一种特殊的位相延迟器。

线偏振光沿 x_r、y_r 方向分量，可表示为：

$$\begin{cases} E_s=a_1\cos\omega t \\ E_f=a_2\cos\omega t \end{cases}$$

经过位相延迟器，两分量变为 $\begin{cases} E_s'=a_1\cos\omega t' \\ E_f'=a_2\cos(\omega t'+\delta_r) \end{cases}$

其中 $t'=t-n_s d/c_0$

三种波片的偏振状态

波片种类	$-\frac{\pi}{4}<\beta<\frac{\pi}{4}$	$\frac{\pi}{4}<\lvert\beta\rvert<\frac{\pi}{2}$	$\beta=\pm\frac{\pi}{4}$	$\beta=0$ 或 $\frac{\pi}{2}$
1/4 波片	椭偏 $\Psi=0$，$\frac{b^2}{a^2}=\tan^2\beta$	椭偏 $\Psi=\frac{\pi}{2}$，$\frac{b^2}{a^2}=\cot^2\beta$	圆偏 $\frac{b^2}{a^2}=1$	线偏振 $\Psi=0$ 或 $\frac{\pi}{2}$
1/2 波片	线偏振光 $\Psi=-\beta$，透射光振动方向相对于入射光线转过 2β 角			
全波片	入射光线偏振状态不变			

偏振状态分析：

① 先将入射光表示成分别沿快慢轴方向振动的两分量，其相差为 δ_r，振幅为 a_2 和 a_1

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 ~~韩盈升~~ (同组姓名 _____)

作实验日期 年 月 日 2011010493 教师评定

③ 透射光的位相差为 $\delta_t = \delta_i + \delta_r$，$\delta_r$ 为延迟器相延量.

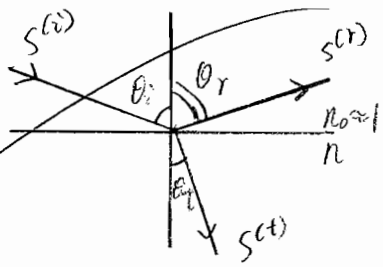
④ 由 δ_t、a_1、a_2 可以确定透射光的偏振状态。

波片在使用时首先要定出波片快慢轴的方向。且我们通常把波片的实际相延和理想值之差叫波片相延误差。

测定1/4波片 δ_r 的方法：

$$|\sin\delta_r| = \frac{2\sqrt{I_{min}/I_{max}}}{\sin(2\beta)\,(1+I_{min}/I_{max})}$$

4. 反射和折射时的起偏现象：



易知，$\theta_i = \theta_r$，$\sin\theta_t = \frac{\sin\theta_i}{n}$.

由菲涅耳公式，

$$R_p = r_p^2 = \left[\frac{\tan(\theta_i-\theta_t)}{\tan(\theta_i+\theta_t)}\right]^2,\quad T_p = 1-R_p$$

$$R_S = r_S^2 = \left[\frac{\sin(\theta_i-\theta_t)}{\sin(\theta_i+\theta_t)}\right]^2,\quad T_S = 1-R_S$$

当 $\theta_i+\theta_t=\frac{\pi}{2}$ 时，即 $\theta_i = \arctan n = \theta_B$ 时，$R_p = 0$

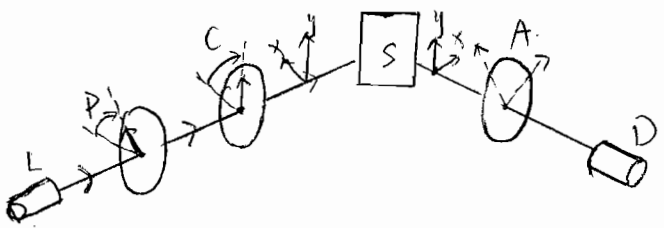
且可算出 S分量 $R_{SB} = \sin^2(\theta_i-\theta_t) = \sin^2\left[\theta_i - \frac{\pi}{2} - \theta_i\right] = (n^2-1)^2/(n^2+1)^2$

经过 N 块玻璃片后，S分量的总透射率为

$$(1-R_{SB})^N = \left[1+(n-1)^2/2n\right]^{-4N}$$

5. 椭偏法测 1/4 波片相延的原理.

椭偏法测光路如图



该光路由起偏器P、

起补偿作用的 1/4 波片C、

被测样品S和

检偏器A 构成

清华大学实验报告

系别 精仪 班号 11 姓名 韩盈舟 （同组姓名 ）

作实验日期 年 月 日 2011.10.13 教师评定

椭偏法测量的基本原理是由起偏器P和波片C产生一束椭圆偏振光，然后调节P的方位角改变该椭圆偏振光x方向和y方向偏振分量的相延使得光波通过样品S后变成线偏振光，即使x方向和y方向偏振分量的为相延为0或π，从而计算出ψ和Δs

三、实验装置：

分光计，氦氖激光器，起偏器，检偏器；两个λ/4波片，C_0 C_x；光强探测器（硅光电池、毫伏表），电阻箱；棱镜。

四、实验内容：

[准备]

1. 提前开启激光电源，20 min左右光强才较稳定

2. 粗调起偏器和检偏器的轴线，小平台基本水平且与分光计主轴垂直；

3. 调节电阻箱阻值200Ω；调节平行光管的位置和方向，使光束通过起偏管中心附近，由检偏管中心射出，且毫伏表 I_{max} 大于1mV。

[观测布儒斯特角]

4. 将棱镜放在小平台上

(1) 先确定 $\alpha_1=0$；

用小纸片扎一小孔放在激光器出射光束处，通过调整使棱镜表面反射光束在纸屏上的亮点与小孔重合，记录方位角 $\alpha_1=0$；

(2) 测 α_B：

旋转棱镜使光束入射角约为57°；旋转至某一位置可看到白屏上的反射光点较暗；边调节起偏器P盘，边旋转棱镜，在该位置附近转动，可看到光点由明到暗，再由暗到明；反复微调P盘和

清华大学实验报告

系别 精仪 班号 11 姓名 [redacted] （同组姓名 ）

作实验日期 年 月 日 2011010493 教师评定

和棱镜，使光点最暗，记录此时棱镜的方位角 α_0。

[测定P盘透射轴方向]

5、测量布儒斯特角时使光点最暗的P盘方向 $P_{\leftrightarrow}$；重复调节6次，计算平均值；将P盘置于平均值位置。

移去棱镜；转动检偏器A盘，使毫伏表示值为最小值，记下A盘度盘的读数 a；

[消光比的测量]

6、P盘不动，转动A盘，取 $R_1=R_2=200\Omega$，依次交替测量透射亮强的最大值 I_{max} 和最小值 I_{min}，并测量挡住光源时的 I_0。

[测量透射光强 I_m 和两偏振器夹角 θ 的关系]

7、转A盘使 $a=a_0+90°+\theta$，测量 θ 分别为 0°、15°、30°、45°、60°、75°、80°、84°、87°、90°、180° 时的 I_m

[空波片 C_0 的快轴方向]

8、调节 $a=a_0$，把波片 C_0 轻轻安装到P盘所在侧的度盘上；C_0 快轴的大致方向已用白点标出，使快轴大致在竖直方向，旋转 C_0 使毫伏表示值最小，记录 C_0 靠近中心的游标盘读数。

[线偏振光经过玻片]

9、在上步实验的基础上，C_0 慢轴已处于水平方向；

旋转P盘，使P透射轴与水平夹角 $P-P_{\leftrightarrow}$ 分别为 0°，22.5°，45.0°，67.5°，43.0°，测量每个角度时毫伏表的最大最小值及毫伏表最大时A盘示值 a_i，具体操作：

旋转P盘，使 $P=P_{\leftrightarrow}+\beta$；旋转A盘，使毫伏表示值在最大值附近，反复调节找到最大值位置，记录毫伏表最大值和A盘示值 a_i；

清华大学实验报告

系别 精11 班号 _____ 姓名 [illegible] （同组姓名 _____）

作实验日期 年 月 日 20110604 教师评定

旋转A盘，使毫伏表示值最小，记录此值。

[定待测波片 C_x 的轴方向]

10. 放上 C_x，旋转 C_x 使毫伏表示值最小，此时 C_x 某轴已垂直于P的透射光振动轴，即达到竖直方向，记录度盘示值。

[观测偏振光通过 $\frac{1}{2}$ 波片或全波片]

11. 调节 C_0 快轴在垂直方向，C_x 某轴在垂直方向；分别调节P-P'为0°、15.0°、30.0°、45.0°测量毫伏表示值最小时的A盘读数 α_i；计算 $\alpha_P - \alpha_{i=0}$。

12. 调节 C_0 快轴在水平方向，C_x 某轴保持在垂直方向；分别调节P-P'为0°、15.0°、30.0°、45.0°，测量毫伏表示值最小时的A盘读数 α_i；计算 $\alpha_i - \alpha_{i=0}$

13. 经老师检查数据合格后，整理仪器，离开实验室。

注意事项：

1. 光学元件轻拿轻放，切忌用手触摸光学仪器表面；
2. 强光会灼伤眼睛，不可用眼直视激光光束。

五、数据处理：

4. 观测布儒斯特角：

光束正入射棱镜表面时平台方位角 $\alpha_{i=0}$ = 21°30′

入射角为布儒斯特角时平台方位角 α_B = 144°35′

布儒斯特角 $\theta_B = \alpha_{i=0} + 180° - \alpha_B$ = 56°55′

$n = \tan\theta_B$ = 1.535

清华大学实验报告

系别 精11 班号 _____ 姓名 韩盈舟 （同组姓名 _____）

作实验日期 年 月 日 2011010493 教师评定

n的相对误差为 $\left|\frac{1.535-1.54}{1.54}\right| \times 100\% = 0.32\%$

引起误差的原因：

① 棱镜表面不平直，存在散射光原因。

② 棱镜在布氏角附近一个小范围转动时，光点均比较暗淡，通过目测难以判断光强最小时的准确角度。理论分析可以发现，在 $R_P-\theta_i$ 关系图上，$\theta_i=\theta_B$ 时 $\frac{\partial R_P}{\partial \theta_i}=0$，$\theta_B$ 附近 R_P 变化缓慢，即布氏角处光亮度对 θ_i 的变化不敏感。

③ 测量时的光路可能不完全水平或垂直，与理论情况不一致。

④ 分光计未消除偏心影响，只读了一个表盘，但此影响较小。

此方法简便易行，可半定量地测定布儒斯特角，但作为间接测定折射率的方法，其准确率不高。因为 n 与 θ_B 之间存在 $n=\tan\theta_B$ 的定量关系，只要能准确测出其中一个，就可以推算另一个。

5、定偏振器振动的透射轴方向

序号	1	2	3	4	5	6	标准差	平均值	$\sigma_{\overline{P}}$
$P_{\leftrightarrow}$	261.0	260.5	260.7	260.5	260.2	260.8	0.2787	260.62	5.6

$$\overline{P_{\leftrightarrow}} = \frac{\sum P_{\leftrightarrow}}{6} = 260.62^\circ$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum(P_{\leftrightarrow i}-\overline{P_{\leftrightarrow}})^2}{5}} = 0.2787^\circ$$

本实验中在上一步骤观测到布儒斯特角后未测定。$P_{\leftrightarrow}$ 是后续实验的基准。测量 P 透射轴水平时的度盘示值，仍用内眼来

清华大学实验报告

系别 _____ 班号 精11 姓名 韩鸿舟 (同组姓名 _____)

作实验日期 年 月 日 2011010493 教师评定

观察光强，在反复调节P的转角以确定消光态，人眼对光亮区分极限对应的度数在1°左右，其精度对后续实验而言已经足够。

α_0 只测了一次，可能有随机误差。但实验整体对精度要求不高。

6、测消光比 e

$R_2=100\Omega$	I_{max}(单位mV)	$I_1=8.904$	$I_3=9.000$	$I_5=9.002$	$I_7=8.878$
$R_1=300\Omega$	I_{min}(单位mV)	$I_2=0.006$	$I_4=0.002$	$I_6=0.003$	挡光源时 $I_0=0.001$

消光比 $e=\frac{R_2}{R_1}\cdot\frac{(I_4+I_6-2I_0)}{4I_5}=\frac{100}{300}\times\frac{0.002+0.003-2\times0.001}{4\times9.002}=2.777\times10^{-4}$

这个结果并不准确：

(1) 假设认为 $\Delta_I=0.001\,mV$，则两次测量之差 $\Delta_{(I_{min}-I_0)}=\sqrt{2}\times0.001\,mV$，这样的不确定度对约为0.003的 I_{min} 来说，已经相当大了。

(2) 由于周围环境影响，仪器状态的波动，毫伏表的灵敏度等原因，毫伏表示值并不稳定，最小光强表现为在一个范围内上下波动。

① 因为最小光强难以测准，而且在e的算式中对结果影响较大，所以只能认为消光比e的数量级在 $10^{-4}\sim10^{-5}$。建议使量程更小的电压表，或改用在更大范围内呈线性的光电池。

② R的选择也会影响结果的准确性。测最小光强时电流较小，若R值过小，则所测的电压较小，难以测准；若R值过大，则在测最大光强时光强与电流的线性程度下降（因光电池内阻随光强增加而减小，负载电阻R越大，光电池的线性范围越小

清华大学实验报告

系别 _____ 班号 精11 姓名 [illegible] （同组姓名 _____）

作实验日期 年 月 日 2011010493 教师评定

所以在测 I_{max} 时，R值应较小，测 I_{min} 时R值应较大。

③ 需注意，在测 I_{max}、I_{min} 等一系列光强时，应将分光计上的望远镜平行光管锁紧，以防滑动，因光方向的改变也会影响接收的光强。

7. 测量透射光强 I_m 与两偏振器夹角θ的关系

夹角θ/度	0	15.0	30.0	45.0	60.0	75.0	80.0	84.0	87.0	90.0	
角盘 $a=a_0+90°+\theta$	95.6	110.6	125.6	140.6	155.6	170.6	179.6 175.6	182.6 178.6	185.6 182.6	185.6	95
I_m(mV)测量值	9.002	8.421	6.780	4.539	2.279	0.623	0.210 0.288	0.029 0.116	0.003 0.029	0.003	9.0
$I_c=I_{max}(\cos\theta)^2+I_{min}$	—	8.402	6.755	4.504	2.254	0.606	0.274	0.101	0.028	0.003	—
$\lvert I_c-I_m\rvert/I_m$(%)	—	0.23%	0.37%	0.77%	1.09%	2.73%	486%	8.18%	3.45%	0%	—

电阻箱 R= 100Ω，$P=\overline{P_{\leftrightarrow}}$ =260.62；a_0 = 5.6；$I_{max}=I_m$

θ=84°时，$\frac{|I_c-I_m|}{|I_m-I_0|}=\frac{|0.101-0.110|}{|0.110-0.001|}\times100\%=8.26\%$

θ=87°时，$\frac{|I_c-I_m|}{|I_m-I_0|}=\frac{|0.028-0.029|}{|0.029-0.001|}\times100\%=3.57\%$

θ=90°时，$\frac{|I_c-I_m|}{|I_m-I_0|}=\frac{|0.003-0.003|}{|0.003-0.001|}=0$

曲线见附页；

由图可以看出，$\frac{I_m}{I_{max}}\sim\theta$ 和 $\cos^2\theta\sim\theta$ 两条曲线重合得很好；用Excel进行数据拟合，相关性 $r^2=0.9999$，验证了马吕斯定律。

相对误差 $\frac{|I_c-I_m|}{I_m}$ 随θ的增大有显著的增大趋势。但其绝对误差并没有增大很多，可见操作本身没有问题，是仪器

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 2011010493 教师评定

自带的误差。

8. 空波片 C_0 快轴方向

$P = \overline{P_{\leftrightarrow}} = 260.62°$ 、 $\alpha_2 = 5.6$，波片 C_0 快轴在垂直方向时度盘示值 $C_0 = 287.$

实验中先使 C_0 标有白点的快轴方向大致垂直，在该位置附近旋转 C_0 使毫伏表示值最小。误差主要来源是光强最小值的测定。

9. 线偏振光通过半波片

$\beta = P - P_{\leftrightarrow}$（度）	0.0	22.5	45.0	67.5	43.0
P 盘方位角：$P = \beta + P_{\leftrightarrow}$	260.62	283.12	305.62	328.12	303.62
α_1	94.2	89.1	48.0	13.2	62.9
$\psi = \alpha_2 + 90° - \alpha_1$	1.4	6.5	47.6	82.4	32.7
I_{max}	5.568	6.590	4.740	5.051	4.813
I_{min}	0.001	1.136	3.218	0.800	3.283
$b^2/a^2 \simeq I_{min}/I_{max}$	0.0002	0.172	0.679	0.158	0.682
用式(1)算 δ_Y	—	$\arcsin(0.09)$ 无解	78.98°	76.14°	79.85°
用式(2)算 ψ	—		无解	~~-6.726°~~ 83.264°	34.18°

除了 $\beta = 22.5°$ 时最为接近理论值，其他情况下相差较大，C_0 的相延 δ_Y 并不准确等于 $\frac{\pi}{2}$。

理论上：

假设 $\delta_Y = \frac{\pi}{2}$，当 P 轴与 C_0 慢轴夹角 45° 时，为椭圆偏振光，入射线偏振光在慢轴上的分量大于在快轴上的分量，$\psi = 0$，$\frac{b^2}{a^2} = \tan\beta$；当 $\beta = 45°$ 时，快轴、慢轴上的分振动振幅相等，

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 ~~韩圣舟~~ (同组姓名 _____)

作实验日期 年 月 日 2011010493 教师评定

$\frac{b^2}{a^2} = \cot^2\beta$；当 $\beta=0$ 或 $90°$ 时，为线偏振光。

实际：$\delta_1 \neq \frac{\pi}{2}$

$\beta=0.0°$ 时，$\varphi = 1.4°$ 接近 0，引起误差的原因可能是 α_2 的测量和光强最大值处 α_1 的测量不十分准确，造成误差积累；$I_{min}=0.001$，接近 0。I_{min} 不为 0 可能是因为 I_0 的存在。和 P 盘、A 盘消光比不为 0，两者偏振方向不完全垂直。

$\beta=22.5°$ 时，$\varphi = 65°$ 与 $0°$ 存在较大误差。可能是角度测量造成误差积累。

$\beta=45°$ 时，理论上应为圆偏振光，实际测量时 A 盘转动，光强变化不明显，测得 $\frac{I_{min}}{I_{max}}$ 不准确。

$\beta=67.5°$ 时，φ 与 $90°$ 较为接近，符合理论。

$\beta=45.0°$ 时，与 $\beta=45°$ 相似。

10、检偏，定波片 C_1 的轴方向

$P_{\leftrightarrow} = 260.62°$，$\alpha_1 = 5.6°$

波片 C_1 的一个轴在垂直方向时度盘示值 $C_1 = 280°$

操作与第 8 步类似。

11、线偏振片通过 $\frac{1}{4}$ 波片或全波片

C_1 某轴在垂直方向，度盘示值 $C_1 = 280°$

C_0 快轴在垂直方向，度盘示值 $C_0 = 287.8$

$P-P_{\leftrightarrow}$	0.0	15.0	30.0	45.0
P	260.62	275.62	290.62	305.62
消光时 A 盘 α_1	5.6	353.9	337.7	320.2
$\alpha_0 - \alpha_1$	0	-348.3	-332.1	-314.6

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 韩盈舟 （同组姓名 _____）

作实验日期 年 月 日 2011010493 教师评定 _____

两个$\frac{1}{4}$波片叠放时，若快轴方向相同，则组成$\frac{1}{2}$波片，且$\frac{1}{2}$波片的快轴方向与两个$\frac{1}{4}$波片相同；若快轴方向相互垂直，则组成全波片。

线偏振光通过$\frac{1}{2}$波片后，振动方向为原方向相对快轴的镜像方向；旋转入射光，透射光反方向旋转；透过全波片时振动方向不变。

由表中数据可知，此时两波片组成$\frac{1}{2}$波片；C_1快轴方向垂直，示值 280°

12、线偏振光通过$\frac{1}{2}$波片或全波片.

C_1在某轴在垂直方向，度盘示值 C_1= 280°

C_0 快轴在水平方向，度盘示值 C_0= 197.8°

P-P₀	0.0	15.0	30.0	45.0
P	260.62	275.62	290.62	305.62
消光时A盘a_i	5.7	19.7	33.6	49.5
a_0-a_i	-0.1	-14.1	-28	-43.9

分析同步骤11，此时两波片组成全波片；C_1快轴方向垂直，示值187.5°

六、思考题：

1.(1) 当2个$\frac{1}{4}$波片，快轴与快轴平行时，构成$\frac{1}{2}$波片；

当2个$\frac{1}{4}$波片快轴相互垂直时，构成全波片.

(2) 线偏振光通过$\frac{1}{2}$波片后，振动方向为原方向相对快轴的镜像方向。通过全波片后，振动方向不变。

可旋转入射线偏振光，若透射光向旋转，则为全波片。

清 华 大 学 实 验 报 告

系别 _____ 班号 _____ 姓名 _____ （同组姓名_____）

作实验日期 年 月 日 2011040493 教师评定

若遮射光反方向旋转，则为$\frac{1}{4}$波片。

2. 波片快慢轴与P遮射轴夹角应为45°

$\frac{1}{4}$波片型光隔离器的原理：

光通过偏振片P，成为振动方向与P遮射轴平行的线偏振光；

再通过夹角为45°的$\frac{1}{4}$波片，变为右旋（或右旋）圆偏振光；

在光学表面M发生反射，由于存在半波损失，反射后旋向改变，变为右旋（或右旋）圆偏振光；

旋向改变了的圆偏振光反向通过$\frac{1}{4}$波片，成为线偏振光，但其偏振方向与入射线偏振光垂直，所以无法通过偏振片P，从而实现隔离反向光的作用。

七、感想与收获：

此次实验为半定量测量，一些测量值与理论值误差较大，但可以定性体现偏振现象，验证了马吕斯定律。

马吕斯定律，布儒斯特定律，双折射现象都是光偏振的重要内容。光的偏振特性清楚地体现了光的横波性，让我加深了对光的理解。

感谢王老师的悉心指导。老师为天嗓子不舒服还坚持给我们讲课。真的很负责任。

偏振光学表格每人只发一张　姓名 [illegible] 学号 2011010493 班号 精11 座位号 5 日期 5.22

(注意：仪器娇贵，手下留情；报告中要有数据分析、讨论和结论。)

4. 观测布儒斯特角： 光束正入射棱镜表面时平台方位角 $\alpha_{i=0}$= 21°30′；入射角为布儒斯特角时平台方位角 α_B = 144°35′；布氏角的测量值 $\theta_B = \alpha_B - \alpha_{i=0}$ = 56°55′；由此算出的折射率 $n = \tan\theta_B$ = 1.535；n的相对偏差 $(n-1.54)/1.54$ = −0.32 %。

5. 测定偏振器透射轴方向： 布氏角时起偏器P的透射轴在水平方向，方位角为 $p_{\leftrightarrow}$；检偏器A和P正交时（P盘置于平均值 $\overline{p_{\leftrightarrow}}$，A盘转至消光状态），A的方位角记作 $a_{\updownarrow}$。

序号	1	2	3	4	5	6	标准差	平均值 $\overline{p_{\leftrightarrow}}$	$a_{\updownarrow}$
$p_{\leftrightarrow}$	260.0	260.5	260.7	260.5	260.2	260.8	0.2787	260.62	5.6

6. 测消光比 e： 当 $p = \overline{p_{\leftrightarrow}}$ 时，交替测量透射光强极值 I_{max} 和 I_{min} (直接记录毫伏表读数)。

※提示：检查仪器，数字毫伏表显示的 I_{max} 值大于 1mV 才能开始实验。

$$e = \frac{R_2}{R_1}\cdot\frac{(I_4 + I_6 - 2I_0)}{4\cdot I_5}$$

R_2=100Ω	I_{max} (单位mV)	I_1= 8.904	I_3= 8.907	I_5= 8.908	I_7= 8.878
R_1=200 Ω	I_{min} (单位mV)	I_2= 0.006	I_4= 0.007	I_6= 0.003	挡住光源时 I_0= 0.000 (参见表7后注)

7. 测量透射光强 I_m 与两偏振器夹角 θ 间的关系：

电阻箱示值 R= 100 Ω，$p = \overline{p_{\leftrightarrow}}$ = 260.62；$a_{\updownarrow}$ = 5.6；$I_{max} = I_m$ (夹角 θ=0度时)

夹角 θ (度)	0	15.0	30.0	45.0	60.0	75.0	80.0	84.0	87.0	90.0	0
A盘 $a = a_{\updownarrow} + 90° + \theta$	95.6	110.6	125.6	140.6	155.6	170.6	175.6	179.6	182.6	185.6	95.6
I_m (mV) 测量值	9.002	8.421	6.780	4.539	2.279	0.623	0.288	0.110	0.029	0.003	9.00
$I_c \approx I_{max}(\cos\theta)^2 + I_{min}$	※	8.402	6.755	4.504	2.254	0.606	0.274	0.101	0.028	0.003	※
$\lvert I_c - I_m\rvert / I_m$ (%)	※	0.23%	0.37%	0.77%	1.09%	2.73%	4.86%	8.18%	3.45%	0%	※

注：**(1)** $I_c \approx I_{max}(\cos\theta)^2 + I_{min}$ 为计算值；$\lvert I_c - I_m\rvert / I_m$ 为相对偏差。**(2)** 用 $\lvert I_c - I_m\rvert / \lvert I_m - I_0\rvert$ 计算 84、87、90°时的相对偏差，式中 I_0 为挡住光源时的值（包含背景光、光电池暗电流、噪声、寄生电势和电表零点漂移等综合影响）。

8. 定波片 C_0 快轴方向(大致方向已知) $\overline{p_{\leftrightarrow}}$ = 260.62，$a_{\updownarrow}$ = 5.6，波片 C_0 快轴在垂直方向时度盘示值 C_0 = 287.8

9. 线偏振光通过1/4波片， C_0 度盘示值 C_0 = 287.8

$\beta = p - p_{\leftrightarrow}$ (度)	0.0	22.5	45.0	67.5	43.0
P盘方位角 $p = \beta + p_{\leftrightarrow}$	260.62	283.12	305.62	328.12	303.62
A盘透射轴在长轴方向时读数 a_i	94.2	89.1	48.0	13.2	62.9
长轴方位角 $\psi = a_{\updownarrow} + 90 - a_i$	1.4	6.5	47.6	82.4	32.7
I_{max}(最大光强)	5.568	6.590	4.740	5.051	4.813
I_{min}(最小光强)	0.001	1.136	3.218	0.800	3.283
$b^2/a^2 \approx I_{min}/I_{max}$	0.0002	0.172	0.679	0.158	0.682
用(11)式计算所得的 δ_r	※				
用(2)式计算所得的 ψ	※				

注：由于测量误差等原因，δ_r、ψ 计算结果可能无解

10. 定波片 C_x 的轴方向 $\overline{p_{\leftrightarrow}}$ = 260.62，$a_{\updownarrow}$ = 5.6

波片 C_x 的一个轴在垂直方向时度盘示值 C_x = 280

11. 线偏振光通过1/2波片或全波片：

C_x 某轴在垂直方向，度盘示值 C_x = 280

C_0 快轴在垂直方向，度盘示值 C_0 = 287.8

$p - p_{\leftrightarrow}$	0.0	15.0	30.0	45.0
p	260.62	275.62	290.62	305.62
消光时A盘读数 a_i	5.6	353.9	337.7	320.2
$a_{\updownarrow} - a_i$	0	−348.3	−332.1	−314.6

12. 线偏振光通过1/2波片或全波片：

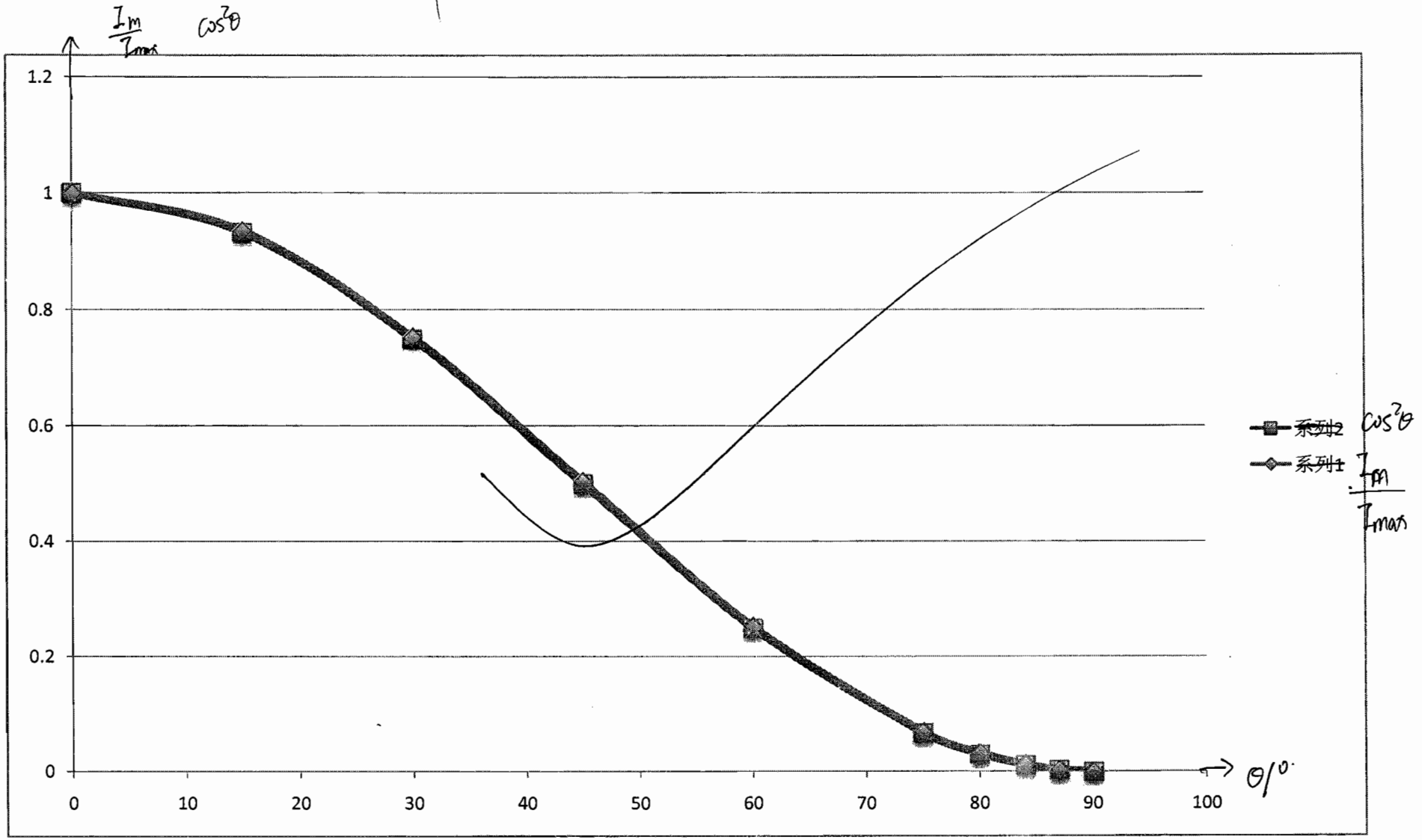
C_x 某轴在垂直方向，度盘示值 C_x = 280

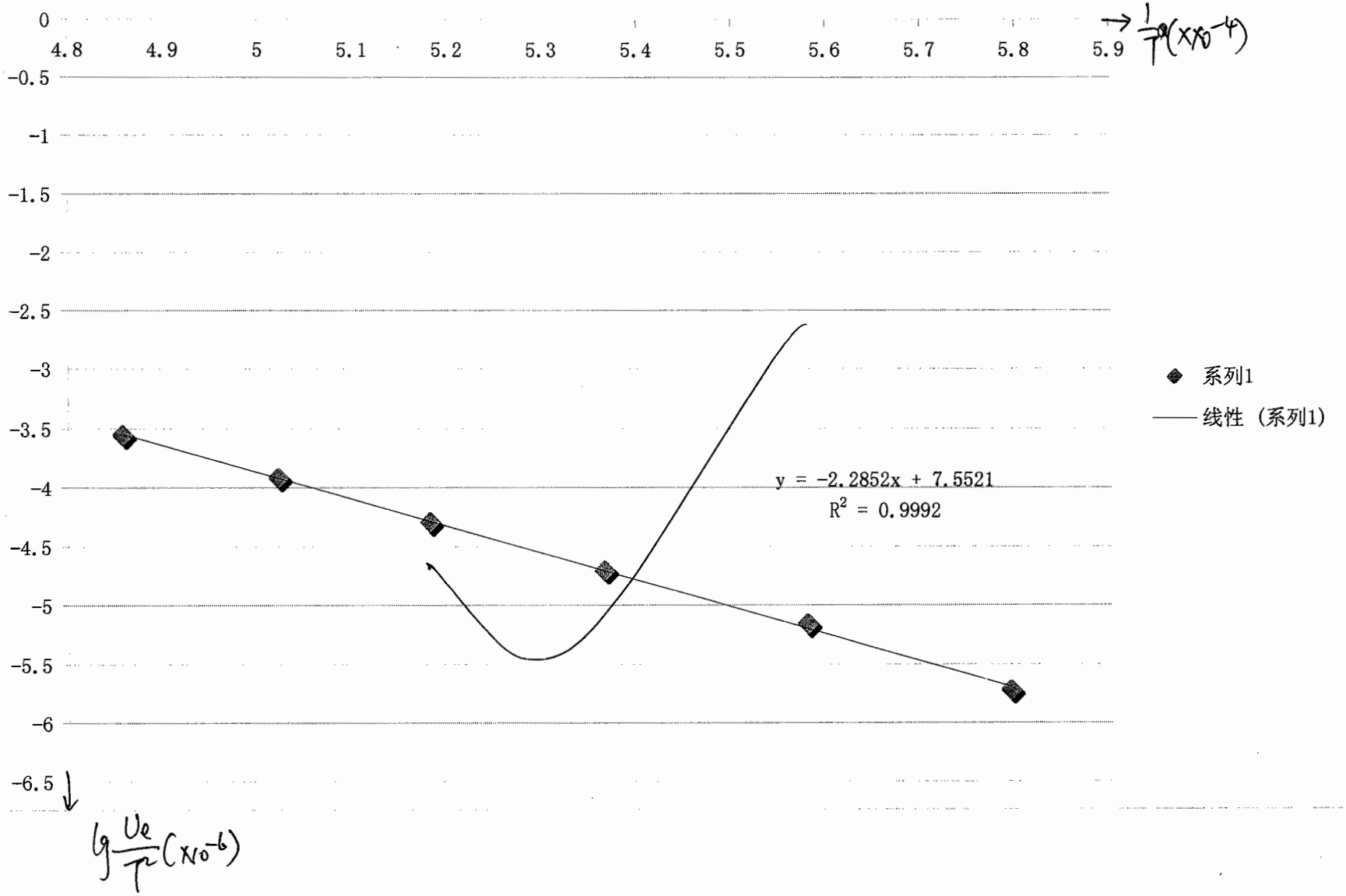
C_0 快轴在水平方向，度盘示值 C_0 = 197.8

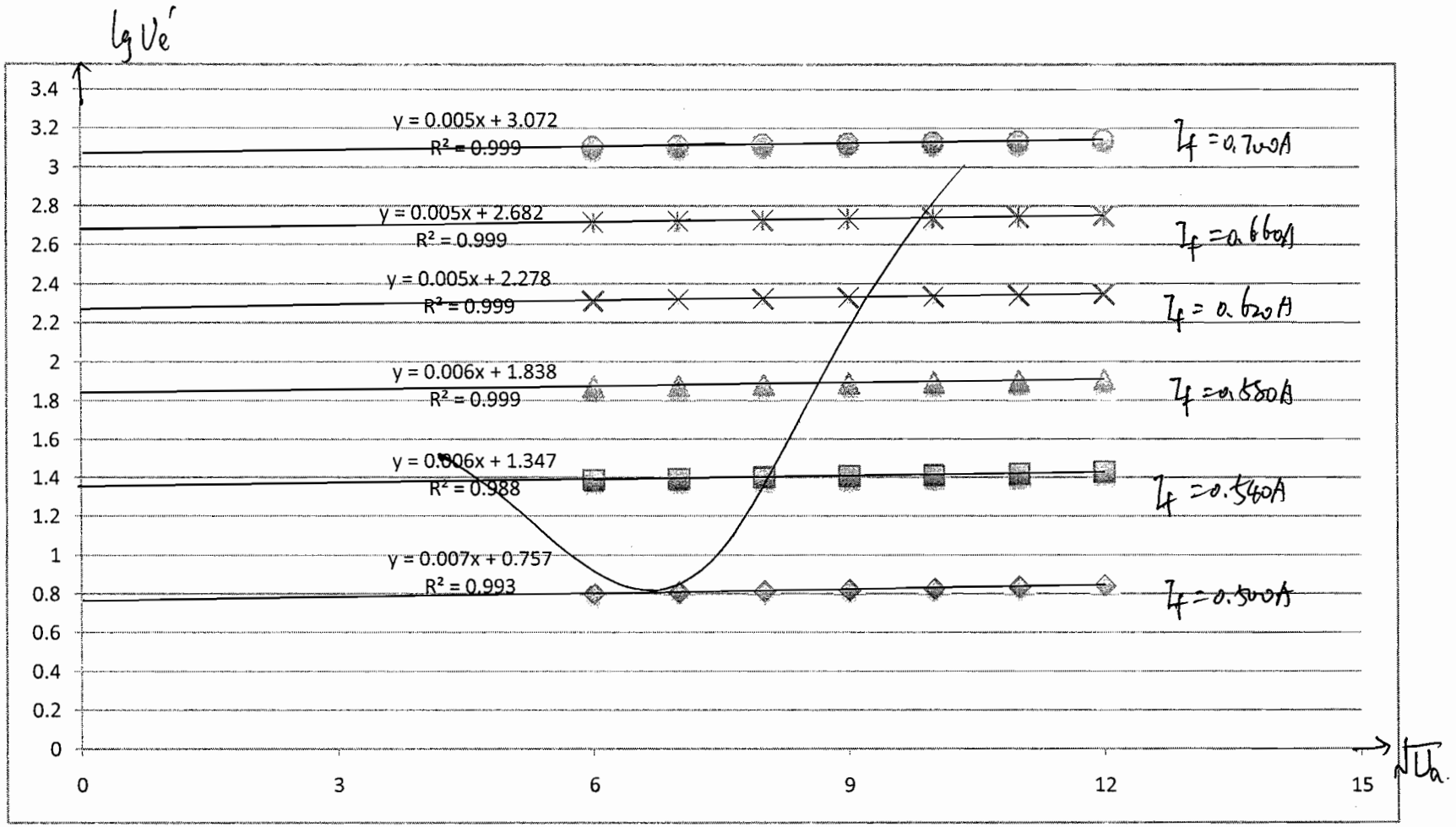
$p - p_{\leftrightarrow}$	0.0	15.0	30.0	45.0
p	260.62	275.62	290.62	305.62
消光时A盘读数 a_i	5.7	191.7	33.6	49.5
$a_{\updownarrow} - a_i$	−0.1	−141	−28	−43.9

报告中要求分析步骤11,12中 C_x 快轴的方向

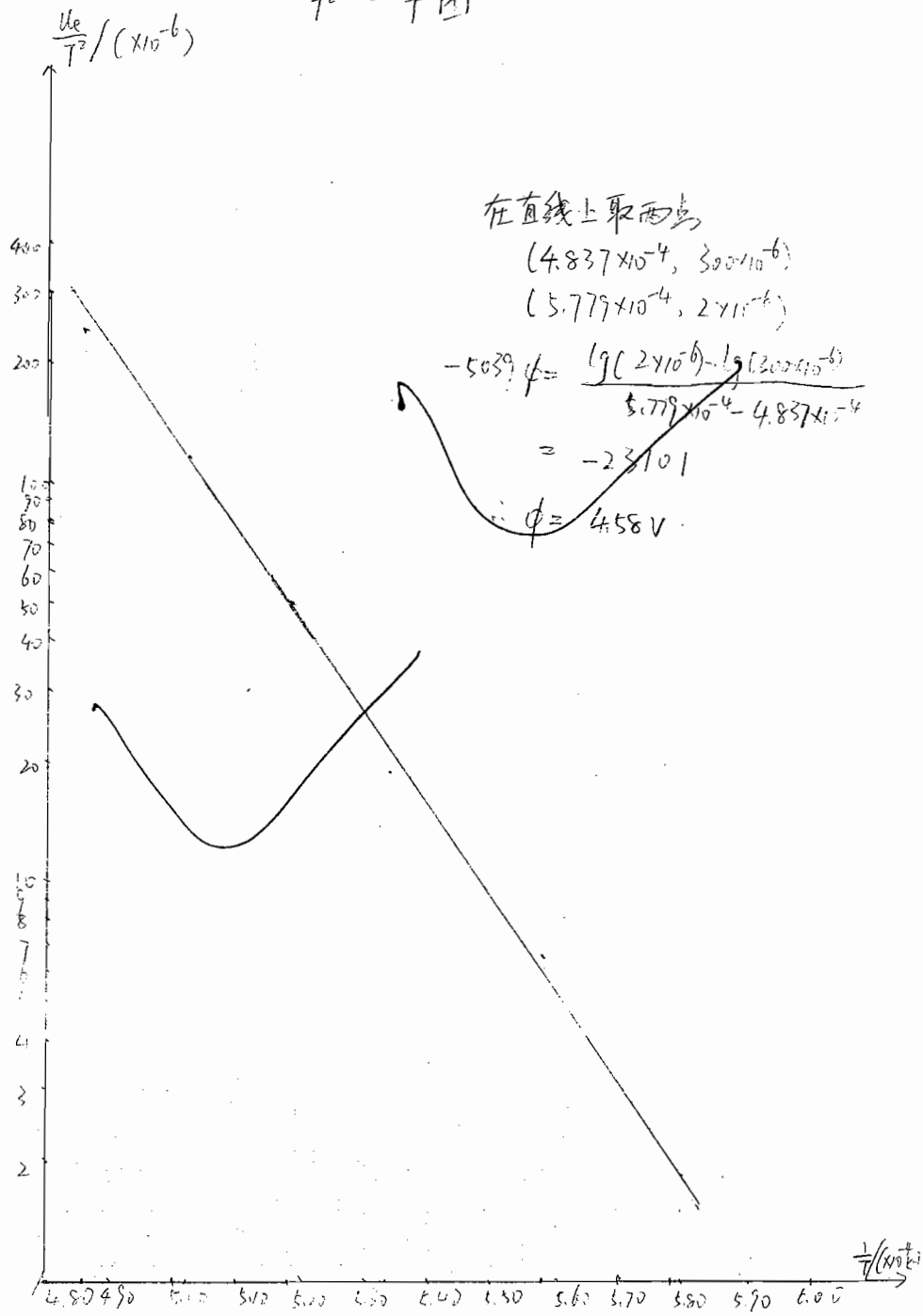
结论：


$\frac{I_m}{I_{max}}$ $\cos^2\theta$
1.2
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
θ/°
系列2
系列1
$\cos^2\theta$
$\frac{I_m}{I_{max}}$


0
4.8
4.9
5
5.1
5.2
5.3
5.4
5.5
5.6
5.7
5.8
5.9
$\rightarrow \frac{1}{T}(\times 10^{-4})$
-0.5
-1
-1.5
-2
-2.5
-3
-3.5
-4
-4.5
-5
-5.5
-6
-6.5
$\downarrow \lg\frac{U_e}{T^2}(\times 10^{-6})$
y = -2.2852x + 7.5521
R^2 = 0.9992
系列1
线性（系列1）


lg Ve'
y = 0.005x + 3.072
R² = 0.999
y = 0.005x + 2.682
R² = 0.999
y = 0.005x + 2.278
R² = 0.999
y = 0.006x + 1.838
R² = 0.999
y = 0.006x + 1.347
R² = 0.988
y = 0.007x + 0.757
R² = 0.993
If =0.700A
If =0.660A
If =0.620A
If =0.580A
If =0.540A
If =0.500A
√Ua
0
3
6
9
12
15
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1
1.2
1.4
1.6
1.8
2
2.2
2.4
2.6
2.8
3
3.2
3.4

$\frac{U_e}{T^2} \sim \frac{1}{T}$ 图



在直线上取两点

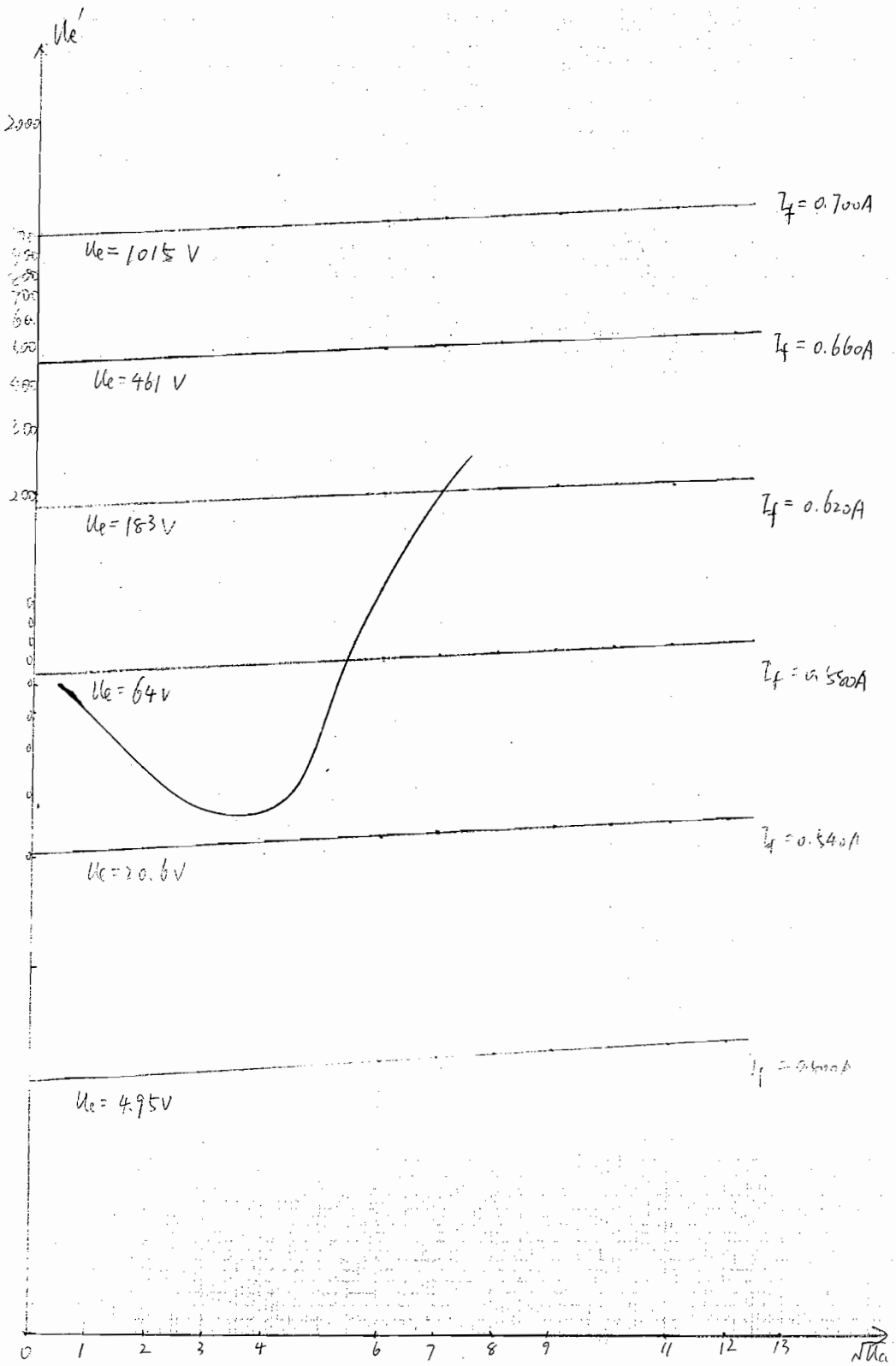
$(4.837\times10^{-4},\ 300\times10^{-6})$

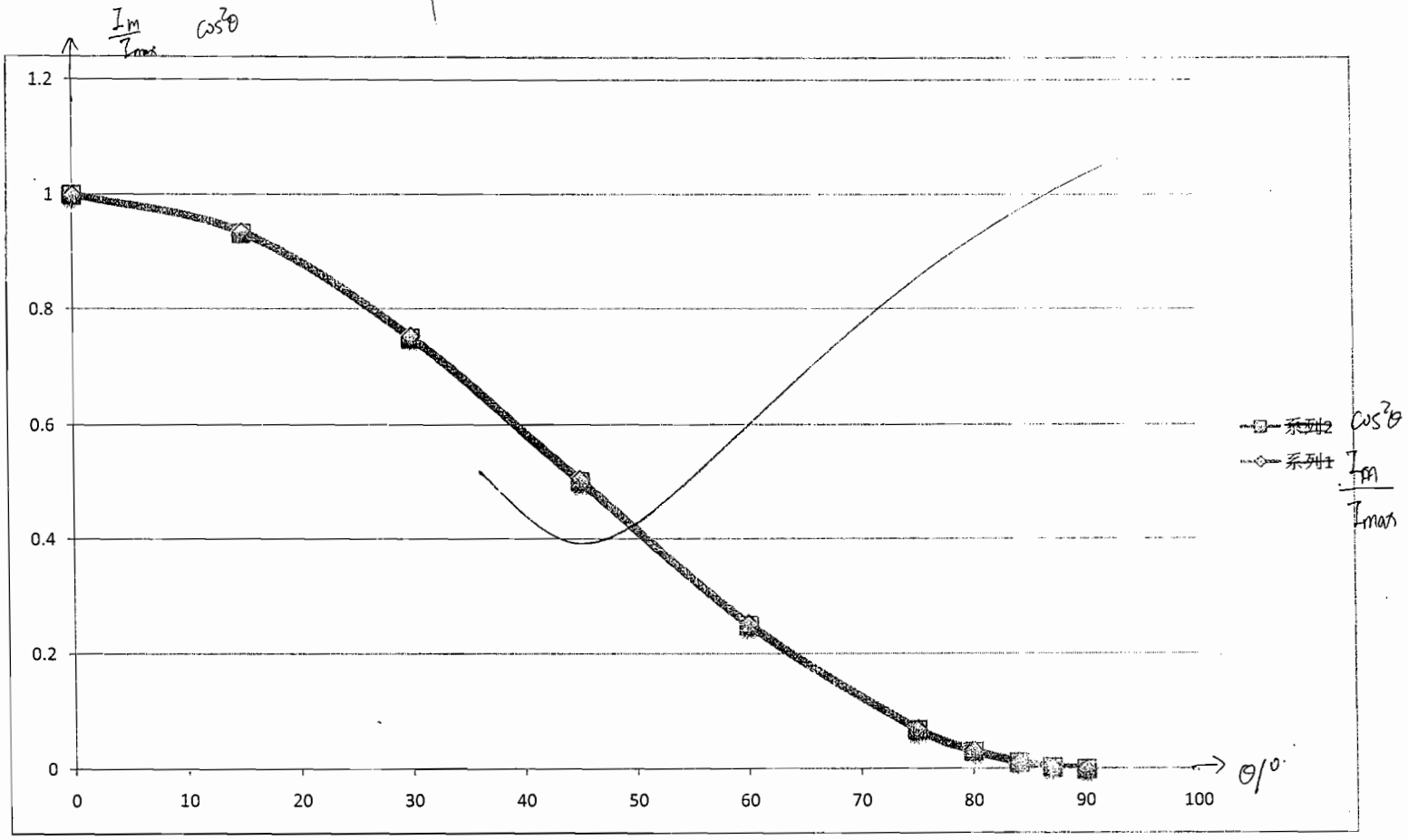
$(5.779\times10^{-4},\ 2\times10^{-6})$

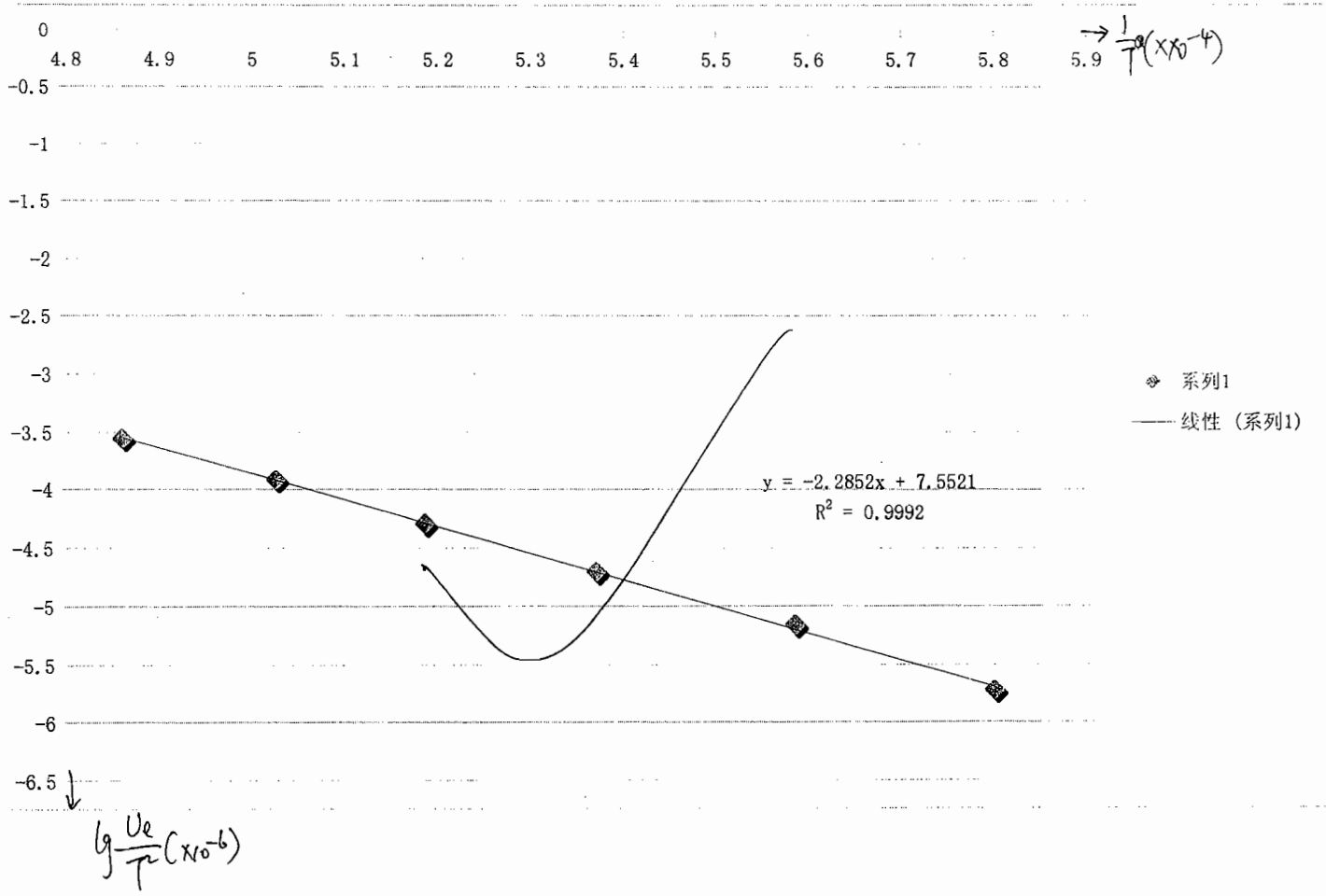
$-5059\phi = \frac{\lg(2\times10^{-6}) - \lg(300\times10^{-6})}{5.779\times10^{-4} - 4.837\times10^{-4}}$

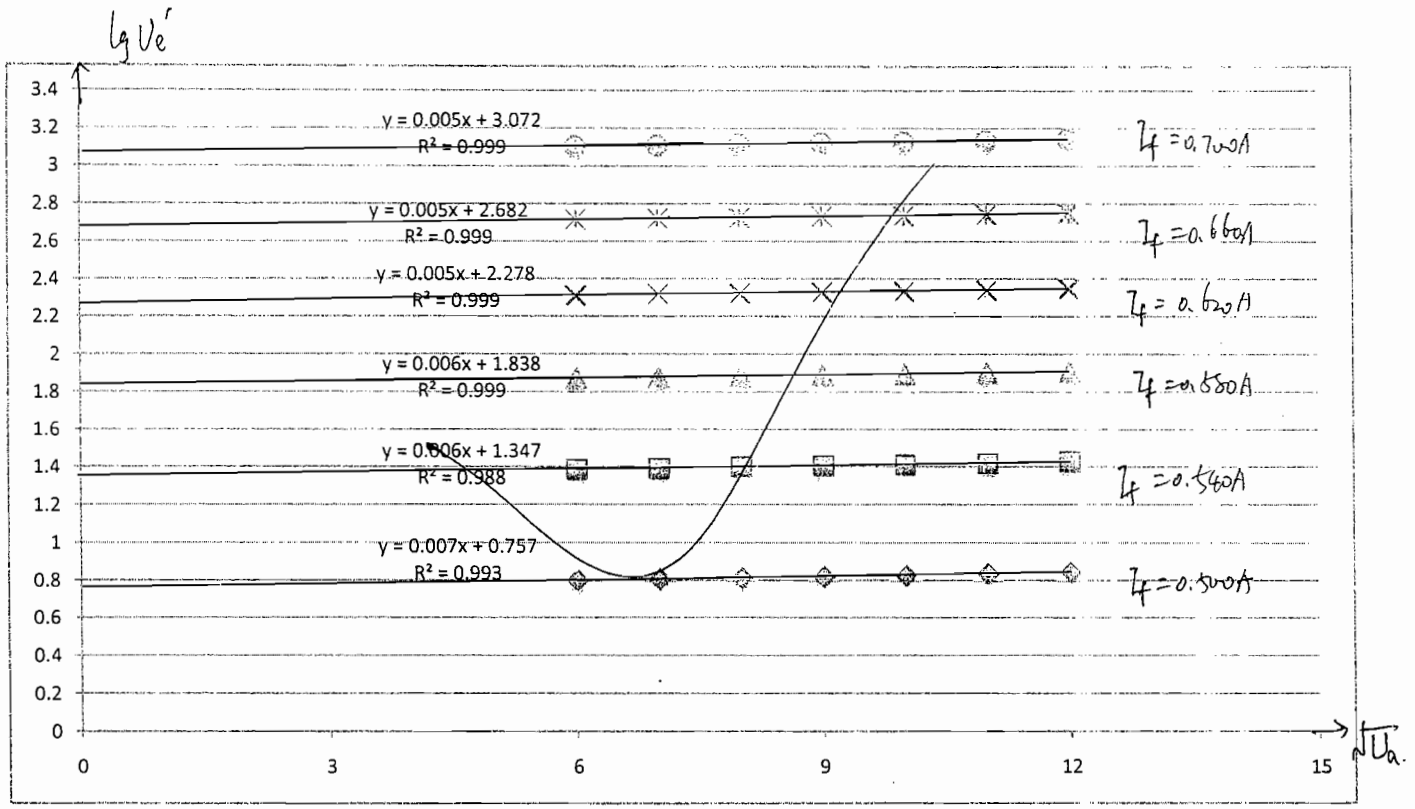
$= -2.101$

$\therefore \phi = 4.58\,V$


U_e'
2000
U_e = 1015 V
I_f = 0.700A
U_e = 461 V
I_f = 0.660A
U_e = 183 V
I_f = 0.620A
U_e = 64 V
I_f = 0.580A
U_e = 20.6 V
I_f = 0.540A
U_e = 4.95 V
0 1 2 3 4 6 7 8 9 11 12 13
$\sqrt{U_a}$


$\frac{I_m}{I_{max}}$ $\cos^2\theta$
1.2
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
θ/°
系列2
系列1
$\cos^2\theta$
$\frac{I_m}{I_{max}}$


0
4.8
4.9
5
5.1
5.2
5.3
5.4
5.5
5.6
5.7
5.8
5.9
→ 1/T(×10⁻⁴)
-0.5
-1
-1.5
-2
-2.5
-3
-3.5
-4
-4.5
-5
-5.5
-6
-6.5
y = -2.2852x + 7.5521
R² = 0.9992
系列1
线性（系列1）
↓ lg Ue/T²(×10⁻⁶)


lg Ve'
3.4
3.2
3
2.8
2.6
2.4
2.2
2
1.8
1.6
1.4
1.2
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
y = 0.005x + 3.072
R² = 0.999
y = 0.005x + 2.682
R² = 0.999
y = 0.005x + 2.278
R² = 0.999
y = 0.006x + 1.838
R² = 0.999
y = 0.006x + 1.347
R² = 0.988
y = 0.007x + 0.757
R² = 0.993
If =0.700A
If =0.660A
If =0.620A
If =0.580A
If =0.540A
If =0.500A
0
3
6
9
12
15
√Ua.