

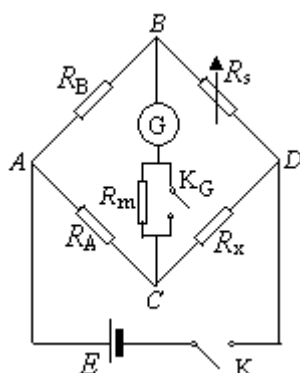
1 实验名称 电桥法测中、低值电阻

一. 目的和要求

1. 掌握用平衡电桥法测量电阻的原理和方法；
2. 学会自搭电桥，且用交换法测量电阻来减小和修正系统误差；
3. 学会使用 QJ-23 型惠斯登电桥测量中值电阻的方法；
4. 学会使用 QJ-42 型凯尔文双臂电桥测量低值电阻的方法；

二. 实验原理

直流平衡电桥的基本电路如下图所示。



图中 R_A, R_B 称为比率臂， R_S 为可调的标准电阻，称为比较臂， R_x 为待测电阻。在电路的对角线（称为桥路）接点 BC 之间接入直流检流计，作为平衡指示器，用以比较这两点的电位。调节 R_S 的大小，当检流计指零时，B、C 两点电位相等 $U_{AC} = U_{AB}$ ； $U_{CD} = U_{BD}$ ，即 $I_A R_A = I_B R_B$ ； $I_x R_x = I_S R_S$ 。因为检流计中无电流，所以 $I_A = I_x$ ， $I_B = I_S$ ，得到电

桥平衡条件 $R_x = \frac{R_A}{R_B} R_S$ 。

三. 实验仪器

直流电源，检流计，可变电阻箱，待测电阻，元器件插座板，QJ24a 型惠斯登直流电桥，QJ42 型凯尔文双臂电桥，四端接线箱，螺旋测微计

四. 实验方法

1. 按实验原理图接好电路；
2. 根据先粗调后细调的原则，用反向逐次逼近法调节，使电桥逐步趋向平衡。在调节过程中，先接上高值电阻 R_m ，防止过大电流损坏检流计。当电桥接近平衡时，合上 K_G 以提高桥路的灵敏度，进一步细调；
3. 用箱式惠斯登电桥测量电阻时，所选取的比例臂应使有效数字最多。

五. 数据记录与分析

1. 交换法研究自搭电桥的系统误差

	$R_A/R_B=100/100$	$R_B/R_A=100/100$	$\Delta_{RS\text{仪}}$	σ_{RS}	$\Delta_{R'S\text{仪}}$	$\sigma_{R'S'}$
	$R_S(\Omega)$	$R'_S(\Omega)$	(Ω)	(Ω)	(Ω)	(Ω)
R_{X2}	294.7	300.9	0.3	0.2	0.3	0.2
R_{X3}	1976.0	2015.0	2	1	2	1

$\Delta_{RS\text{仪}} = \pm(0.001R_S + 0.002m)$ ，其中 R_S 是电阻箱示值， m 是所用转盘个数，

$$\sigma_{RS} = \frac{R_S + R'_S}{2\sqrt{R_S R'_S}} \cdot \frac{\Delta_{RS\text{仪}}}{\sqrt{3}}, \quad R_X = \sqrt{R_S R'_S}, \quad \sigma_{R_X} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{R'_S}{R_S} \sigma_{R_S}^2 + \frac{R_S}{R'_S} \sigma_{R'_S}^2}$$

所以 $R_{X2} = 297.8 \pm 0.1\Omega$ ， $R_{X3} = 1995.4 \pm 0.8\Omega$

2. 不同比例臂对测量结果的影响

R_A/R_B	$R_S(\Omega)$	$R_{X1}(\Omega)$	结论
100/100	51.0	51.0	比例臂越小，有效数字位数越多，测量结果越精确。
100/1000	500.6	50.06	
100/10000	5125.6	51.256	

3. 用箱式惠斯登电桥测量电阻

R_X	比率 C	$R_S(\Omega)$	$R_X(\Omega)$	结果
R_{X1}	0.01	5098	50.98	比例臂 C 的选取应使有效数字位数最多，从而提高测量精度
R_{X2}	0.1	2990	299.0	
R_{X3}	1	1990	1990	

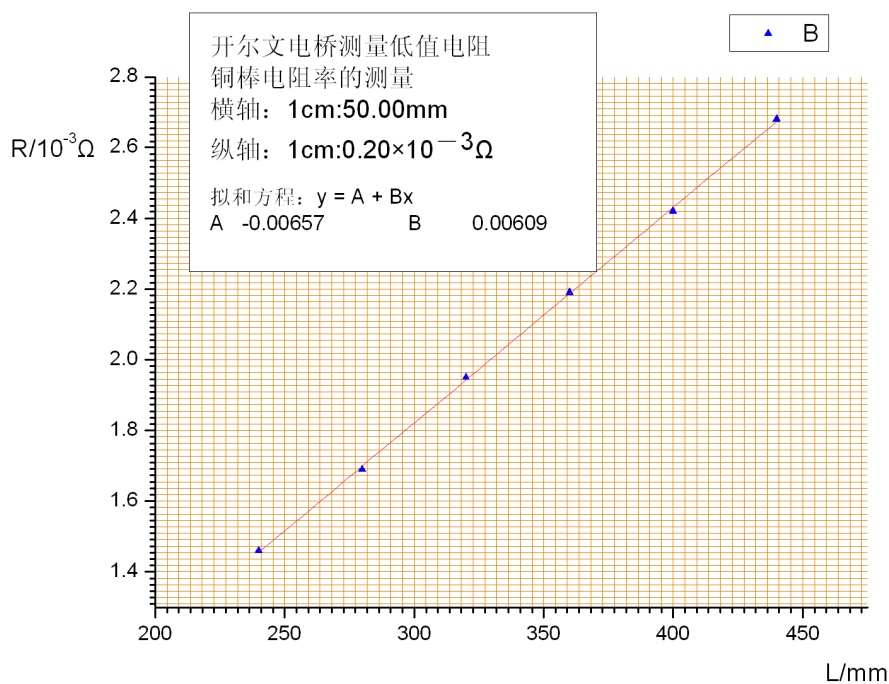
4. 用开尔文电桥测量低值电阻

铜棒平均直径 $d=3.975\text{mm}$ （多次测量取平均）（末读数—初读数）

铜棒长度/mm	240.00	280.00	320.00	360.00	400.00	440.00
电阻值/ $10^{-3}\Omega$	1.46	1.69	1.95	2.19	2.42	2.68

电阻 $R = \frac{\rho}{S} L = \frac{4\rho}{\pi d^2} L$ ，由下图中的拟合直线得出斜率 $k = \frac{4\rho}{\pi d^2} = 0.00609$ ，

$$\text{则电阻率 } \rho = \frac{\pi d^2 k}{4} = \frac{3.142 \times 0.00609 \times (3.975 \times 10^{-3})^2}{4} = 7.56 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$$



六. 分析讨论题

当惠斯登电桥平衡后，若互换电源与检流计位置，电桥是否仍保持平衡？试说明之。

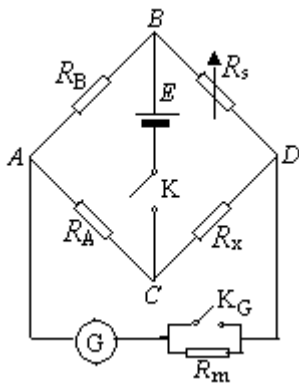
答：电桥仍保持平衡。在互换电源与检流计位置前，电桥平衡条件为 $R_x = \frac{R_A}{R_B} R_s$ ，互

换位置后的电桥线路如下。在新桥路内，若 $I_g = 0$ ，检流计无电流通过，A，D 两点电位相

等。则有 $U_{CA} = U_{CD}$, $U_{AB} = U_{DB}$; $I_A = I_B$, $I_x = I_s$ ，因而有 $I_A R_A = I_x R_x$; $I_B R_B = I_s R_s$ 的关

系。这样 $R_A / R_B = R_x / R_s$ 。即 $R_x = \frac{R_A}{R_B} R_s$ 就是互换位置前的平衡条件。所以电桥仍保持

平衡。



2 实验名称 静 电 场 测 绘

一. 目的与要求

1. 学习用模拟法测绘静电场的分布。
2. 加强对电场强度和电势的概念。

二. 实验原理

由于静电实验条件苛刻且不稳定，而稳恒电流的电场和相应的静电场的空间是一致的，在一定的条件下，可以用稳恒电流的电场来模拟测绘静电场。

静电场与稳恒电流场的对应关系为

静 电 场	稳 恒 电 流 场
导体上的电荷 $\pm Q$	极间电流 I
电场强度 \vec{E}	电场强度 \vec{E}
介电常数 ϵ	电导率 σ
电位移 $\vec{D} = \epsilon \vec{E}$	电流密度 $\vec{J} = \sigma \vec{E}$
无荷区 $\oint \epsilon \vec{E} \cdot d\vec{S} = 0$	无源区 $\oint \sigma \vec{E} \cdot d\vec{S} = 0$
电势分布 $\nabla^2 U = 0$	电势分布 $\nabla^2 U = 0$

根据上表中的对应关系可知，要想在实验上用稳恒电流场来模拟静电场，需要满足下面三个条件：

- (1) 电极系统与导体几何形状相同或相似。
- (2) 导电质与电介质分布规律相同或相似。
- (3) 电极的电导率远大于导电质的电导率，以保证电极表面为等势面。

以无限长同轴柱状导体间的电场为例，来讨论二者的等效性。设真空静电场中圆柱导体 A 的半径为 a ，电势为 U_a ；柱面导体 B 的内径为 b ，且 B 接地。导体单位长度带电 $\pm \lambda$ （即线密度）。根据高斯定理，在导体 A、B 之间与中心轴距离为 r 的任意一点的电场大小为

$$E = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0 r} \quad (1)$$

电势为

$$U = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{b}{r} \quad (2)$$

导体 A 的电势可表示为

$$U_a = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{b}{a} \quad (3)$$

于是在距中心 r 处

$$U_r = U_a \ln \frac{b}{r} / \ln \frac{b}{a} \quad (4)$$

此时的场强为

$$E_r = \frac{1}{r} \times U_a / \ln \frac{b}{a} \quad (5)$$

将 A、B 间充以电阻率为 ρ 、厚度为 δ 的均匀导电质，不改变其几何条件及 A、B 的电位，则在 A、B 之间将形成稳恒电流场。设场中距中心线 r 点处的电势为 U' ，在 r 处宽度为 dr 的导电质环的电阻为

$$dR = \rho \frac{dr}{s} = \rho \frac{dr}{2\pi r \delta} \quad (6)$$

从 r 到 b 的导电质的电阻为

$$R_r = \int_r^b dR = \frac{\rho}{2\pi \delta} \ln \frac{b}{r} \quad (7)$$

电极 A、B 间导电质的总电阻为

$$R = \frac{\rho}{2\pi \delta} \ln \frac{b}{a} \quad (8)$$

由于 A、B 间为稳恒电流场，则

$$\frac{U'}{U_a} = \frac{R_r}{R} \quad (9)$$

即

$$U' = U_a \ln \frac{b}{r} / \ln \frac{b}{a} \quad (10)$$

比较 (10) 和 (4) 式可知，电流场中的电势分布与静电场中完全相同，可以用稳恒电流场模拟描绘静电场。

根据 (4) 可以导出 $r = \frac{b}{\left(\frac{b}{a}\right)^{\frac{U_r}{U_a}}}$ 或

$$r = a^n \times b^{1-n} (n = U_r / U_a) \quad (11)$$

三. 实验仪器

静电场描绘仪，坐标纸。

四. 实验操作步骤

1. 测量长的同轴圆柱体间的电场分布。

(1) 按照实验面板提示，选择检流计法，调整好仪器，选 $U_a = 10V$ 。

(2) 移动探针，分别取测量电位 U_r 为 $1V$ ， $3V$ ， $5V$ 三个等势面，每组均匀分布 8 点等势点，测出各等势点的坐标，并列表记录，将数据输入电脑处理，得到测量半径 $r_{测}$ （对应三个测量半径）。

(3) 将三个等势面的 r_i ，并与 (11) 式的理论值 $r_{理}$ 比较，并求百分误差。

2. 测量平行输电线间的电场分布

(1) 按照实验面板提示，选择电压法，调整好仪器，仍选 $U_a = 10V$ ；

(2) 移动探针，分别取测量电位 U_r 为 $1V$ ， $3V$ ， $5V$ ， $7V$ ， $9V$ 三个等势面，每组

均匀分布 8 点等势点，曲率较大出取点应稍密。

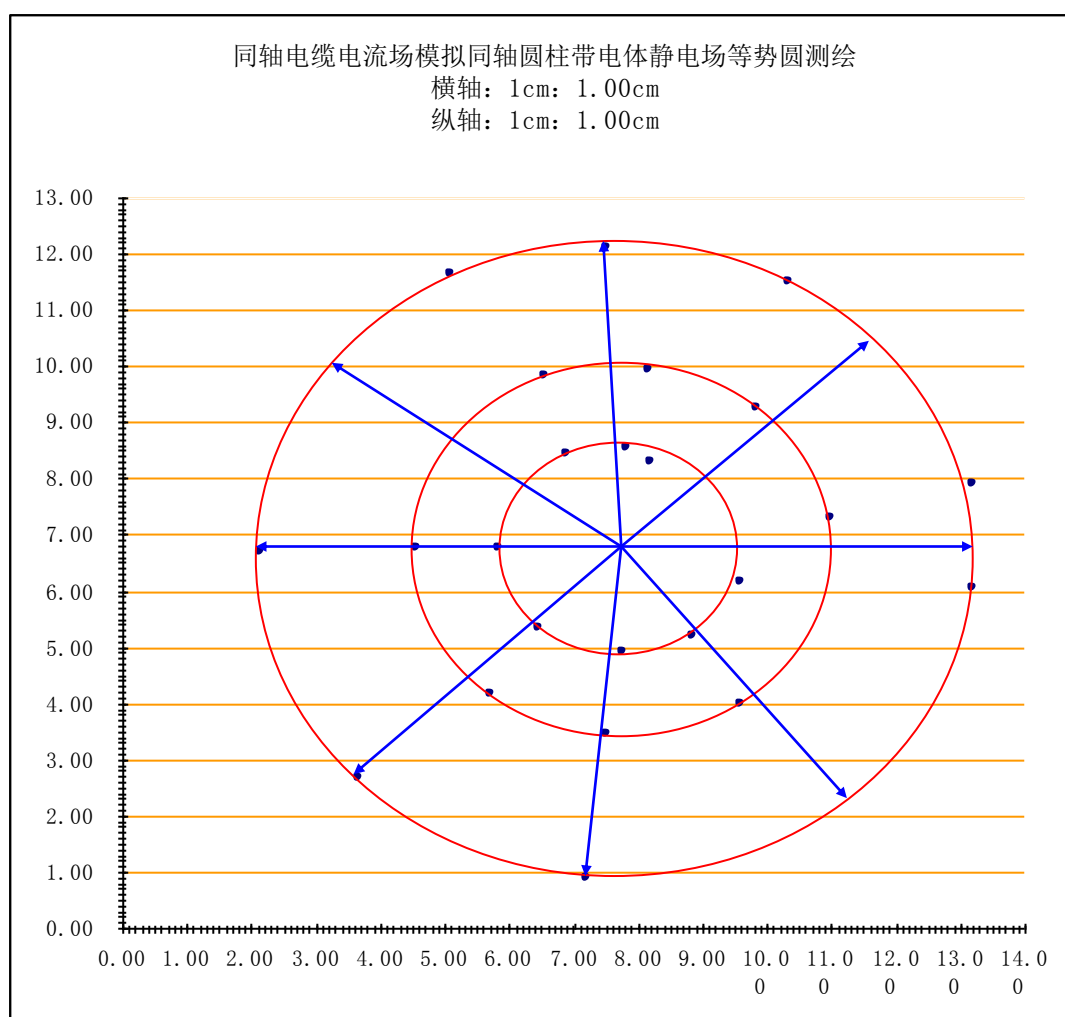
五. 数据记录

1. 同轴电缆电流场模拟同轴圆柱带电静电场等势圆测绘

(1) 电极半径：正极 $a = 5.00\text{mm}$ ，负极 $b = 75.00\text{mm}$

(2) 等势点坐标

坐标 序号	1V 等势点坐标		3V 等势点坐标		5V 等势点坐标	
	$X_1(\text{cm})$	$Y_1(\text{cm})$	$X_2(\text{cm})$	$Y_2(\text{cm})$	$X_3(\text{cm})$	$Y_3(\text{cm})$
1	2.13	6.70	4.55	6.75	5.85	6.75
2	3.65	2.66	5.70	4.15	6.45	5.35
3	7.20	0.90	7.50	3.45	7.75	4.90
4	13.18	6.05	9.60	4.00	8.86	5.20
5	13.20	7.89	11.00	7.30	9.60	6.15
6	10.35	11.50	9.85	9.25	8.21	8.30
7	7.50	12.10	8.15	9.95	7.82	8.55
8	5.10	11.65	6.54	9.83	6.90	8.45



各等势圆的圆心坐标和半径计算结果

电势值(V)	1	3	5
X_0 (cm)	7.68	7.77	7.73
Y_0 (cm)	6.55	6.72	6.69
R_p (cm)	5.61	3.28	1.86

(3) 等势圆理论半径的计算及比较

根据(11)式 $r = \frac{b}{\left(\frac{b}{a}\right)^{\frac{U_r}{U_a}}}$ 及 $E = \frac{|r_{\text{测}} - r_{\text{理}}|}{r_{\text{理}}} \times 100\%$,

当 $U_r = 1V$ 时, $r_1 = 5.72cm$, $E = 1.9\%$;

当 $U_r = 3V$ 时, $r_3 = 3.33cm$, $E = 1.5\%$;

当 $U_r = 5V$ 时, $r_5 = 1.94cm$, $E = 4.1\%$;

2. 平行输电线电流场模拟等值异号点电荷静电场等势线簇测绘

六. 分析讨论题

1. 根据测绘的等势线和电场线的分布, 试分析哪些地方场强较强, 那些地方场强较弱?

答: 根据(11)式, 电场强度的大小 E 与半径 r 成反比, 越靠近内电极 A, 电场越强, 电场线越密。

2. 对电极和导电纸的电导率各有什么要求, 为什么? 两者相互接触的要求对实验结果有什么影响, 为什么?

答: 导电纸的电导率应较小, 而电极的电导率远大于导电纸的电导率, 以保证电极表面为等势面,

3 实验名称 刚体转动惯量的测量（扭摆）

一. 实验要求与目的

1. 用扭摆测定多种形状物理的转动惯量和弹簧的扭转系数；
2. 观察刚体的转动惯量与质量分布的关系；
3. 验证平行轴定理；

二. 实验原理

将物体在水平面内转过 θ 角。在弹簧恢复力矩作用下，物体就开始绕垂直轴作往返扭转运动。根据虎克定律，弹簧受扭转而产生的恢复力矩 M 与所转过的角度 θ 成正比，即

$$M = -k\theta \quad (1)$$

式中： k 为弹簧的扭转常数。根据转动定律 $M = I\beta$ （式中， I 为物体绕转轴的转动惯量， β 为角加速度）得

$$\beta = M/I \quad (2)$$

令 $\omega^2 = k/I$ ，忽略轴承摩擦阻力矩，由式（1）、式（2）得

$$\beta = \frac{d^2\theta}{dt^2} = -\frac{k}{I}\theta = -\omega^2\theta$$

上述方程表示扭摆运动为简谐振动，角加速度与角位移成正比，且方向相反。此方程的解 $\theta = A\cos(\omega t + \varphi)$ ；式中： A 为简谐振动的角振幅； φ 为初相位角； ω 为圆频率。此简谐振动的周期

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi\sqrt{\frac{I}{k}} \quad (3)$$

由式（3）可知，只要实验测得物体扭摆的摆动周期，并在 I 和 k 中任何一个量已知时即可计算出另一个量。

本实验测量形状规则物体的转动惯量，它的质量和几何尺寸通过量具直接测量得到，再算出本仪器弹簧的 k 值。若要测定其他形状物体的转动惯量，只需将待测物体安放在本仪器顶部的各种夹具上，测定其摆动的周期，由式（3）即可算出该物体绕转动轴的转动惯量。

理论分析证明，若质量为 m 的物体绕通过质心轴的转动惯量为 I_0 时，当转轴平行移动距离 x 时，则此物体对新轴的转动惯量变为 $I_0 + mx^2$ 。这就是转动惯量的平行轴定理。

三. 实验内容与步骤

1. 实验内容

- （1）熟悉仪器的构造和使用方法。
- （2）测定扭摆弹簧的扭转常数。
- （3）测定塑料圆柱体、金属圆筒、木球与金属细杆的转动惯量，并与理论计算值相比较，求百分误差。
- （4）改变滑块在细杆的位置，验证转动惯量平行轴定理。

2. 实验步骤

- （1）分别测出圆柱体直径，圆筒内外径以及细杆长度，并分别测出它们的质量。

①圆柱体直径、圆筒内外径、球体直径及细杆长度测量 3 次，取平均值；其中，圆柱体直径、圆筒外径和细杆长度用大游标卡尺测量，圆筒内径用小游标卡尺测量。

②圆柱体、圆筒、球体及细杆的质量用电子天平测量 1 次。

(2) 物盘、圆柱体、圆筒、球体和细杆的摆动周期。

①调整扭摆底座底脚螺钉，使水平仪中气泡居中。

②装上金属载物盘，并调整光电探头的位置使载物盘上挡光杆处于其缺口中央且能遮住发射红外线的小孔。使用转动惯量测试仪测定摆动周期 T_0 ；使用累积放大法测量 10 个周期，测量 3 次，取平均值。

③将塑料圆柱体、金属圆筒垂直放在载物盘上，测定其摆动周期 T_1 、 T_2 ，使用累积放大法测量 10 个周期，测量 3 次，取平均值。

④取下载物金属盘，装上木球，测定摆动周期 T_3 （计算木球的转动惯量时，应扣除支架的转动惯量），使用累积放大法测量 10 个周期，测量 3 次，取平均值。

⑤取下木球，装上金属细杆（金属细杆中心必须与转轴重合）。测定摆动周期 T_4 （计算金属细杆转动惯量时，应扣除支架的转动惯量），使用累积放大法测量 10 个周期，测量 3 次，取平均值。

(3) 计算出各物体绕中心对称轴转动的转动惯量的理论值。

$$\text{圆柱体 } I'_1 = \frac{1}{8} m_1 D_1^2; \text{ 圆筒 } I'_2 = \frac{1}{8} m_2 (D_{2\text{内}}^2 + D_{2\text{外}}^2); \text{ 球体 } I'_3 = \frac{1}{10} m_3 D_3^2; \text{ 细长杆 } I'_4 = \frac{1}{12} m_4 L^2$$

(4) 由载物盘摆动周期 T_0 ，塑料圆柱体的摆动周期 T_1 及圆柱体理论转动惯量值 I'_1 ，算出弹簧的扭转系数 k 及载物盘的转动惯量 I_0 。

$$k = 4\pi^2 \frac{I'_1}{T_1^2 - T_0^2}$$

$$I_0 = I'_1 \frac{T_0^2}{T_1^2 - T_0^2}$$

(5) 计算各物体转动惯量的实验值。

$$I_i = \frac{kT_i^2}{4\pi^2} - I_0$$

(6) 验证转动惯量的平行轴定理。

测出两滑块质量 m_s 及其内外径 $D_{s\text{内}}$ 、 $D_{s\text{外}}$ 和长度 L_s ，将滑块对称放置在细杆两边的凹槽内，此时滑块质心离转轴距离分别为 5.00 cm，10.00 cm，15.00 cm，20.00 cm，25.00 cm，测定摆动周期 T 。分别计算出对应转动惯量实验值（计算转动惯量时，应扣除支架的转动惯量）：

$$I_{\text{杆}i} = \frac{kT_{\text{杆}i}^2}{4\pi^2} - I'_4$$

将测量值与平行轴定理理论值 $I' = I'_s + 2m_s X^2$ 比较，求出实验值与理论值的百分差，

其中两滑块绕质心转轴的转动惯量为:

$$I'_s = 2 \left[\frac{1}{16} m_s (D_{s内}^2 + D_{s外}^2) + \frac{1}{12} m_s L_s^2 \right]$$

(7) 测出的各项有关数据输入计算机, 检查实验结果。

四. 数据记录

物体名称	质量 (g)	几何尺寸 (cm)		周期 (s)		转动惯量理论 值 ($10^{-3}kg \cdot m^2$)	实验值 ($10^{-3}kg \cdot m^2$)	百分 误差 (%)							
金属 载物 盘				$10T_0$	<div>8.21</div> <div>8.22</div> <div>8.21</div>		$I_0 = I'_1 \frac{\bar{T}_0^2}{\bar{T}_1^2 - \bar{T}_0^2}$ =0.5455								
塑 料 圆 柱	$m_1 =$ 714.9	D_1	<div>9.994</div> <div>9.998</div> <div>9.992</div>	$10T_1$	<div>13.32</div> <div>13.34</div> <div>13.33</div>	$I'_1 = \frac{1}{8}m_1\bar{D}_1^2$ =0.8926	$I_1 = \frac{k\bar{T}_1^2}{4\pi^2} - I_0$ =0.8926	0							
		\bar{D}_1	9.994	T_1	1.333										
金 属 圆 通	$m_2 =$ 720.3	$D_{2外}$	<div>9.998</div> <div>9.998</div> <div>9.998</div>	$10T_2$	<div>16.59</div> <div>16.60</div> <div>16.59</div>	$I'_1 = \frac{1}{8}m_1(\bar{D}_2^2 + \bar{D}_{2外}^2)$ =1.6878	$I_1 = \frac{k\bar{T}_2^2}{4\pi^2} - I_0$ =1.6821	0.3							
			$\bar{D}_{2外}$		9.998										
			$D_{2内}$		<div>9.354</div> <div>9.356</div> <div>9.354</div>				T_2	1.659					
		$\bar{D}_{2内}$		9.354											
		木 球	$m_3 =$ 985.5	D_3	<div>10.792</div> <div>10.794</div> <div>10.790</div>				$10T_3$	<div>11.91</div> <div>11.91</div> <div>11.90</div>	$I'_3 = \frac{1}{10}m_3\bar{D}_3^2$ =1.1478	$I_1 = \frac{k\bar{T}_3^2}{4\pi^2}$ =1.1480	0.02		
					\bar{D}_3					10.792				T_3	1.191
金 属 细 杆	$m_4 =$ 132.0	L	61.00 (已知)	$10T_4$	<div>22.48</div> <div>22.48</div> <div>22.49</div>	$I'_4 = \frac{1}{12}m_4L^2$ =4.0931	$I_1 = \frac{k\bar{T}_4^2}{4\pi^2}$ =4.0901	0.08							
					T_4				2.248						

1. 各物体转动惯量理论值的计算

$$\text{圆柱体: } I'_1 = \frac{1}{8} m_1 D_1^2 = \frac{1}{8} \times 714.9 \times 10^{-3} \times 9.994^2 \times 10^{-4} = 0.8926 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$\begin{aligned} \text{圆筒: } I'_2 &= \frac{1}{8} m_2 (D_{2\text{内}}^2 + D_{2\text{外}}^2) = \frac{1}{8} \times 720.3 \times 10^{-3} \times (9.998^2 + 9.354^2) \times 10^{-4} \\ &= 1.6878 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \end{aligned}$$

$$\text{球体: } I'_3 = \frac{1}{10} m_3 D_3^2 = \frac{1}{10} \times 985.5 \times 10^{-3} \times 10.792^2 \times 10^{-4} = 1.1478 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$\text{细长杆: } I'_4 = \frac{1}{12} m_4 L^2 = \frac{1}{12} \times 132.0 \times 10^{-3} \times 61.000^2 \times 10^{-4} = 4.0931 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

2. 扭转系数 k 的计算

$$\text{由 } T_0 = 0.821 \text{ s}, \quad T_1 = 1.333 \text{ s}, \quad I'_1 = 0.8926 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$k = 4\pi^2 \frac{I'_1}{T_1^2 - T_0^2} = 4\pi^2 \frac{0.8926 \times 10^{-3}}{1.333^2 - 0.821^2} = 31.9522 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$$

3. 各物体转动惯量的实验值计算

1) 载物盘的转动惯量

$$I_0 = I'_1 \frac{T_0^2}{T_1^2 - T_0^2} = 0.8926 \times 10^{-3} \times \frac{0.821^2}{1.333^2 - 0.821^2} = 0.5455 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

2) 金属圆筒的转动惯量

$$I_2 = \frac{k T_2^2}{4\pi^2} - I_0 = \frac{31.9522 \times 10^{-3} \times 1.659^2}{4\pi^2} - 0.5455 \times 10^{-3} = 1.6821 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$\text{相对误差 } E_2 = \frac{|1.6821 - 1.6878|}{1.6878} \times 100\% = 0.3\%$$

3) 木球的转动惯量

$$I_3 = \frac{k T_3^2}{4\pi^2} - I_0 = \frac{31.9522 \times 10^{-3} \times 1.191^2}{4\pi^2} - 0.5473 \times 10^{-3} = 1.1480 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$\text{相对误差 } E_3 = \frac{|1.1480 - 1.1478|}{1.1478} \times 100\% = 0.02\%$$

4) 细长杆的转动惯量

$$I_4 = \frac{k T_4^2}{4\pi^2} = \frac{31.9522 \times 10^{-3} \times 2.248^2}{4\pi^2} = 4.0901 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$\text{相对误差 } E_4 = \frac{|4.0901 - 4.0931|}{4.0931} \times 100\% = 0.07\%$$

4. 验证转动惯量的平行轴定理:

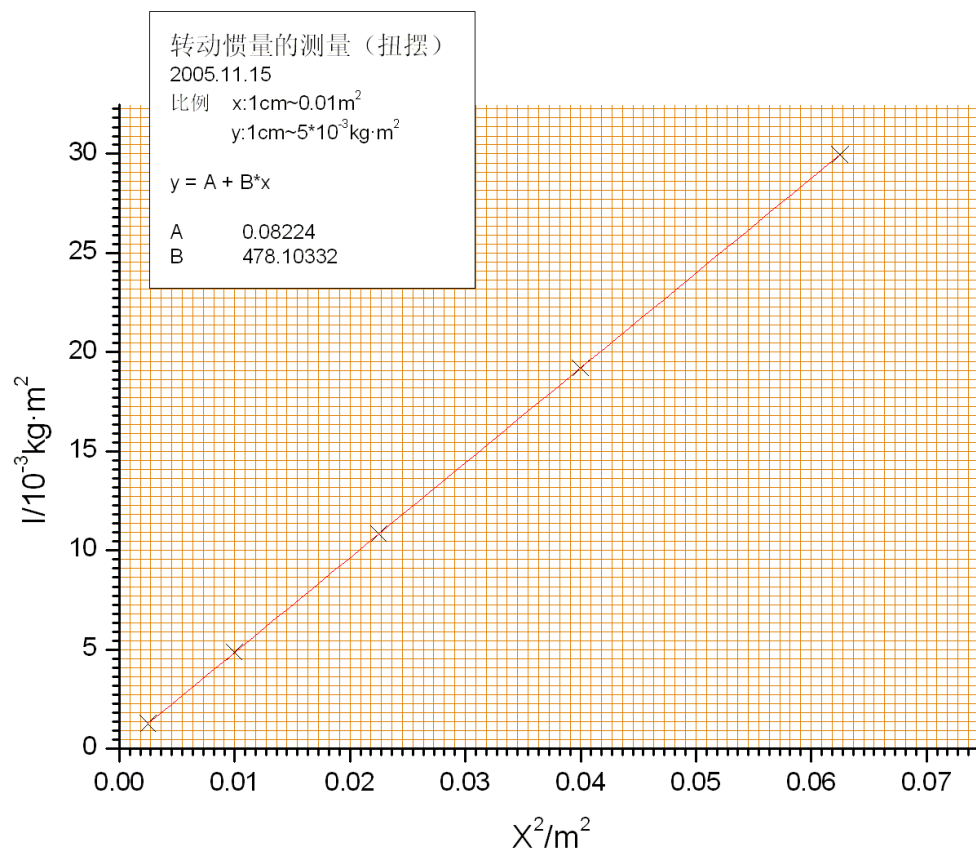
滑块质量: 240.1g;

滑块几何尺寸: 长度=3.318cm; 外径=3.504cm; 内径=0.596cm;

两滑块绕过质心转轴的转动惯量理论值:

$$I'_s = 2\left[\frac{1}{16}m_s(D_{s\text{内}}^2 + D_{s\text{外}}^2) + \frac{1}{12}m_sL_s^2\right] = 0.8197 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

x ($10^{-2}m$)	周期(s)				实验值: $I = \frac{k\bar{T}^2}{4\pi} - I_4$ ($10^{-3}kg \cdot m^2$)	理论值: $I' = I'_s + 2m_s x^2$ ($10^{-3}kg \cdot m^2$)	百分误差 $E = \frac{ I' - I }{I'} \times 100\%$
	$10T$		\bar{T}				
5.00	25.74	25.74	25.75	2.574	1.2722	1.2825	0.8
10.00	33.28	33.28	33.26	3.327	4.8684	4.8840	0.3
15.00	42.97	42.94	42.96	4.296	10.8465	10.8865	0.4
20.00	53.64	53.64	53.63	5.364	19.1962	19.2900	0.5
25.00	64.87	64.89	64.85	6.487	29.9671	30.0945	0.4



如图中线性拟合的结果，直线的斜率为 478.1033×10^{-3} ，也就是说 $m_s = 239.0516\text{g}$ ，实验测量 $m_s = 240.1\text{g}$ ，百分误差为 0.4%，同时，拟合所得的截距为 $0.08224 \times 10^{-3} \text{kg} \cdot \text{m}^2$ ，理论计算值为 $0.8197 \times 10^{-4} \text{kg} \cdot \text{m}^2$ ，相对误差为 0.3%。

六. 提问与讨论

1. 弹簧扭转系数 k 如何求得？

金属载物台绕转动轴的转动惯量为 I_0 ，对应的周期为 T_0 ，载物台上放上规则几何物体后的转动惯量为 $I_0 + I_1$ ，此时周期为 T_1 ，根据周期公式有

$$\left. \begin{aligned} T_0 &= 2\pi\sqrt{I_0/k} \\ T_1 &= 2\pi\sqrt{(I_0 + I_1)/k} \end{aligned} \right\} k = 4\pi^2 \frac{I_1}{T_1^2 - T_0^2}$$

2. 什么是测量周期的累积放大法？

实验中每次测量 10 个周期，测量三次，再求平均，这样是为了消除测量单个周期引起的误差。

3. 如何验证平行轴定理？

将滑块对称放置在细杆两边的凹槽内，此时滑块质心离转轴距离为 x ，若质量为 m 的物体绕通过质心轴的转动惯量为 I_0 时，则此物体对新轴的转动惯量变为 $I_0 + mx^2$ 。这是转动惯量的平行轴定理。在实验中，分别将 x 取不同的值，同时根据测得的周期算出对应的实验转动惯量，验证这些实验点是否呈线性关系，这就是平行轴定理的验证。

4 实验名称 用波尔共振仪研究受迫振动

一. 目的与要求

1. 研究波尔共振仪中弹性摆轮受迫振动的幅频特性和相频特性；
2. 观察在一定阻尼矩下的共振现象，测量阻尼系数；
3. 学习用频闪法测定运动物体的某些量。

二. 原理简述

波尔共振仪是采用扭转摆轮在弹性力矩作用下自由摆动，在电磁阻尼力矩作用下作受迫振动来研究其特性的。当摆轮在有空气阻尼和电磁阻尼的媒质中运动并受到 $M = M_0 \cos \omega t$ 策动力矩的作用，其运动方程为

$$J \frac{d^2 \theta}{dt^2} = -k\theta - b \frac{d\theta}{dt} + M_0 \cos \omega t$$

令 $\omega_0^2 = \frac{k}{J}$, $2\beta = \frac{b}{J}$, $m = \frac{M_0}{J}$ (ω_0 为系统的固有频率, β 为阻尼系数) 则有

$$\frac{d^2 \theta}{dt^2} + 2\beta \frac{d\theta}{dt} + \omega_0^2 \theta = m \cos \omega t$$

当振动达到稳定状态时其振幅

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

它和策动力矩的相位差

$$\varphi = \arctg \frac{2\beta\omega}{\omega_0^2 - \omega^2}$$

其共振圆频率和振幅分别为

$$\omega_r = \sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2} \quad , \quad \theta_r = \frac{m}{2\beta\sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}}$$

三. 实验仪器

ZKY-BG 波尔共振仪 (同济大学)

四. 实验方法

1. 测量系统固有频率 ω_0

在摆轮自由振动时，振幅将不断衰减，需测量在不同振幅时相应的系统固有频率 ω_0 。

测量在不同振幅时的振动周期 T_0 ，根据 $\omega_0 = \frac{2\pi}{T_0}$ ，计算系统固有圆频率 ω_0 。初始振幅应

不小于 160 度。

2. 测量阻尼系数 β

选择“阻尼振荡”，确定一定的电磁阻尼力矩（选中“阻尼 1”状态），测量 10 个周期

下各次的振幅。根据阻尼振动为 $\theta = \theta_0 e^{-\beta t}$ ， $\ln \frac{\theta_0 e^{-\beta t}}{\theta_0 e^{-\beta(t+nT)}} = n\beta T = \ln \frac{\theta_0}{\theta_n}$ ，利用对数逐差

法，隔 5 项逐差， $\beta = \frac{1}{5T} \ln \frac{\theta_i}{\theta_{i+5}}$ ，求出 β 值。

3. 测定受迫振动的幅频特性和相频特性

确定阻尼状态（“阻尼 1”）不变，选中“强迫振荡”，调节电机转速旋钮在 4-5 左右，打开“电机”，待受迫振动稳定后，改变周期为“10”，进行测量。并用频闪法测量受迫振动与周期性策动力矩的改变电机转速（策动力矩的周期），待稳定后重复测量一次，共测量 9 个点，每次均要用频闪法测量相位差。

五. 数据处理

1. 摆轮振幅与系统固有频率 ω_0 关系

振幅 θ (度)	周期 T_0 (秒)	固有频 率 ω_0 (秒 ⁻¹)	振幅 θ (度)	周期 T_0 (秒)	固有频 率 ω_0 (秒 ⁻¹)	振幅 θ (度)	周期 T_0 (秒)	固有频 率 ω_0 (秒 ⁻¹)
156	1.6357	3.8413	106	1.6365	3.8394	80	1.6370	3.8382
139	1.6360	3.8460	104	1.6363	3.8399	79	1.6368	3.8387
131	1.6358	3.8410	103	1.6365	3.8394	78	1.6370	3.8382
126	1.6362	3.8401	91	1.6368	3.8387	57	1.6373	3.8375
124	1.6360	3.8406	89	1.6366	3.8392	56	1.6371	3.8380
123	1.6362	3.8401	88	1.6368	3.8387	53	1.6373	3.8375
108	1.6365	3.8394	86	1.6366	3.8392	52	1.6371	3.8380
107	1.6363	3.8399	85	1.6368	3.8387			

2. 阻尼系数 β

i	振幅 θ_i (度)	振幅 θ_{i+5} (度)	$\ln \frac{\theta_i}{\theta_{i+5}}$
1	154	102	0.4120
2	142	94	0.4125
3	130	86	0.4132
4	120	79	0.4180
5	110	72	0.4238

i	振幅 θ_i (度)	振幅 θ_{i+5} (度)	$\ln \frac{\theta_i}{\theta_{i+5}}$
1	149	98	0.4190
2	137	90	0.4202
3	126	83	0.4174
4	116	76	0.4229
5	107	70	0.4243

10T=16.363s, T=1.6363s

$$\overline{\ln \frac{\theta_i}{\theta_{i+5}}} = \frac{1}{5} \sum \ln \frac{\theta_i}{\theta_{i+5}} = 0.4159 \quad ,$$

$$\overline{\ln \frac{\theta_i}{\theta_{i+5}}} = \frac{1}{5} \sum \ln \frac{\theta_i}{\theta_{i+5}} = 0.4208$$

$$\beta_1 = \frac{1}{5T} \overline{\ln \frac{\theta_i}{\theta_{i+5}}} = \frac{1}{5 \times 1.6363} \times 0.4159 \quad ,$$

$$= 0.05083$$

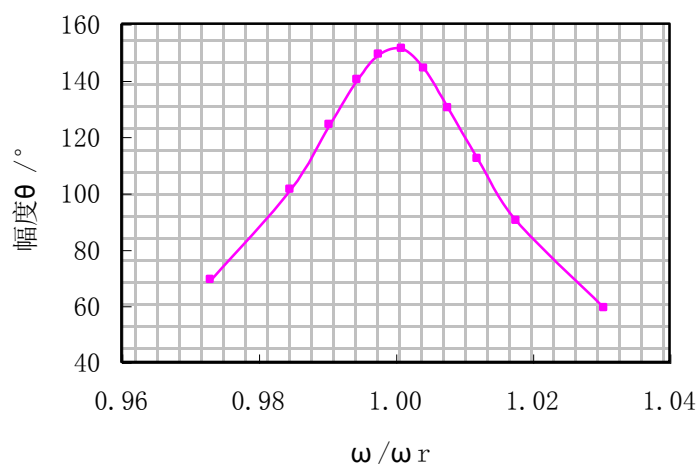
$$\beta_2 = \frac{1}{5T} \overline{\ln \frac{\theta_i}{\theta_{i+5}}} = \frac{1}{5 \times 1.6363} \times 0.4208$$

$$= 0.05143$$

$$\beta = \frac{\beta_1 + \beta_2}{2} = \frac{0.05083 + 0.05143}{2} = 0.05113$$

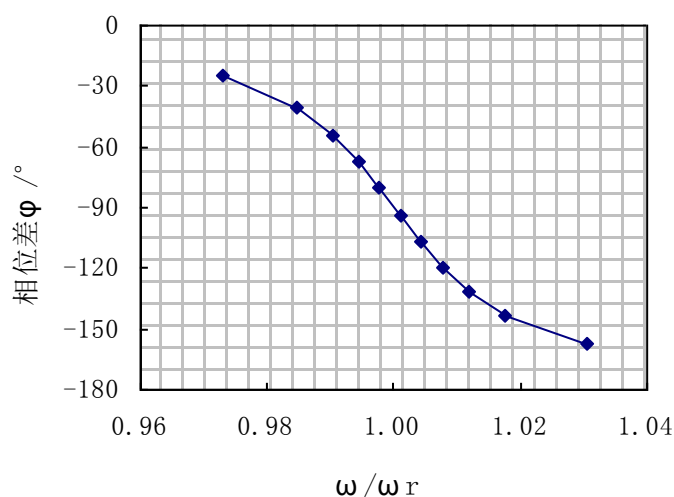
3. 幅频特性和相频特性关系曲线

强迫力 矩周期 T (秒)	频率 ω (秒)	振幅 θ (度)	扭簧对应 的固有周 期 T_0 (秒)	扭簧对应 的固有频 率 ω_0 (秒)	相位差 测量值 (度)	相位差 理论值 (度)	频率比率 ω / ω_r
1.6823	3.7349	69	1.6370	3.8282	25	26	0.9731
1.6620	3.7805	101	1.6365	3.8394	41	41	0.9847
1.6451	3.8193	124	1.6360	3.8406	54	54	0.9904
1.6451	3.8193	140	1.6360	3.8406	67	67	0.9945
1.6396	3.8321	149	1.6357	3.8413	80	80	0.9976
1.6341	3.8450	151	1.6357	3.8413	94	94	1.0010
1.6292	3.8566	144	1.6360	3.8406	107	107	1.0042
1.6237	3.8697	130	1.6362	3.8401	120	120	1.0077
1.6171	3.8855	112	1.6365	3.8394	132	132	1.0120
1.6083	3.9067	90	1.6368	3.8387	143	143	1.0177
1.5888	3.9547	59	1.6373	3.8375	156	157	1.0305



$\theta \sim \omega / \omega_r$ 幅频特性曲线

如用直角坐标纸图示法作图，则横坐标取 $1\text{cm}=0.0100$ ，纵坐标取 $1\text{cm}=10^\circ$ ，坐标原点 $(0.960, 40)$ 为宜。



$\phi \sim \omega / \omega_r$ 相频特性曲线

如用直角坐标纸图示法作图，则横坐标取 $1\text{cm}=0.0100$ ，纵坐标取 $1\text{cm}=20^\circ$ ，坐标原点 $(0.960, -180)$ 为宜。

六. 分析讨论

本实验数据由控制仪采集，一般情况下数据记录不会有误，但应注意以下几点：

1. 在作自由振荡和阻尼振荡时，连杆的位置应使有机玻璃刻度盘刻线对准零刻度，否则位相差测量有较大误差。
2. 在作自由振荡和阻尼振荡时，初位移应 $\geq 160^\circ$ ，使不同振幅所对应的系统固有频率的测量值覆盖受迫振动的测量范围。
3. 周期测量产生的误差，可能来自于阻尼电流的不稳定而引起电磁阻尼力矩的变化和光电门的松动。
4. 受迫振动要等到整个振动达到平衡时，即振幅不再变化、电机转动的周期和摆轮的转动周期不变且相等时才能打开测量开关。

5 实验名称 分光计

一.目的与要求:

- 1.了解分光计的结构及基本原理,学习分光计的调整技术;
- 2.学习用自准法和反射法测量三棱镜的顶角;
- 3.通过测量三棱镜的最小偏向角求玻璃棱镜的折射率。

二.原理简述:

1.自准法测三棱镜顶角 α 。

光路如图所示,光线垂直 AB 射入,记下方位角

T_1 ,然后使光线垂直入射于 AC ,记下沿原路反射回

来的方位角 T_2 ,则 $\alpha = 180^\circ - |T_2 - T_1|$ 。

2.最小偏向角法测玻璃三棱镜的折射率。

在棱镜中,经两次折射后的出射光线与入射光线的夹角 δ 称为偏向角。棱镜的顶角 α ,棱镜材料的折射率 n 及最小偏向角 δ_{\min} 的关系为

$$n = \frac{\sin \frac{1}{2}(\delta_{\min} + \alpha)}{\sin \frac{\alpha}{2}}。$$

三.实验仪器:

JY 型分光计,三棱镜,平面反射镜,汞灯。

四.实验方法:

1.分光计的调整。

- (1) 目测粗调,使望远镜、平行光管、载物台大致成水平状态;
- (2) 自准法细调,实现绿色小十字和准线中的竖线相重合;
- (3) 调节望远镜光轴垂直旋转中心轴:转动游标盘实现竖直线的重合,“减半逼近调节法”实现水平线的重合;
- (4) 调整平行光管,使狭缝像在水平、竖直状态都能被十字线的水平线上下平分。

2.自准法测三棱镜顶角。

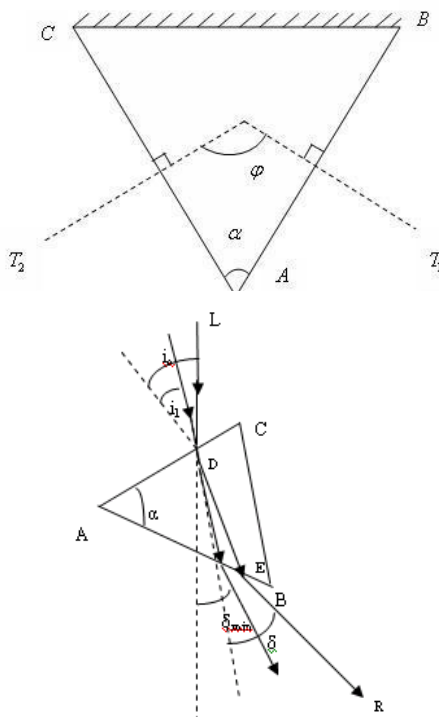
将毛面 BC 对着平行光观,转动游标盘,使 AB 面对准望远镜,调节游标盘微调螺丝,使绿色小十字与划丝上部十字完全重合,记下双游标读数 T_1, T_1' ;转动游标盘,使 AC 面

对准望远镜,同样记下 T_2, T_2' ,可得出顶角 $\alpha = 180^\circ - \frac{\varphi_1 + \varphi_1'}{2}$, $\varphi_1 = |T_2 - T_1|$, $\varphi_1' = |T_2' - T_1'|$ 。

3.最小偏向角的测量。

打开汞灯,在视野中找到黄、绿、紫三条谱线,朝一个方向转动游标盘,找到最小偏向角,固定游标盘,调节望远镜微调螺丝,分别使三条谱线与竖直划丝重合,记下此时读数 T_1 ,

T_1' (T_2, T_2' 和 T_3, T_3'),重复测量 5 次。取下三棱镜,再次转动游标盘,使望远镜对准平



行光管，调节望远镜微调螺丝使竖直划丝与白光狭缝重合，记下游标读数 T_0 ， T'_0

五.数据记录:

1.自准法测三棱镜顶角 α : (分光计游标: $\Delta T_{\text{仪}}=2'$)

	T_1	T'_1	T_2	T'_2
1	233°0'	53°3'	113°0'	293°2'
2	233°0'	53°3'	113°1'	293°2'
3	233°1'	53°3'	113°0'	293°1'
4	233°1'	53°3'	113°0'	293°2'
5	233°1'	53°4'	113°1'	293°2'
6	233°1'	53°4'	113°0'	293°2'

2.测量玻璃三棱镜的折射率 n :

	$\delta_{\text{黄}}$		$\delta_{\text{绿}}$		$\delta_{\text{紫}}$	
	T_1	T'_1	T_2	T'_2	T_3	T'_3
1	98°30'	278°30'	98°22'	278°23'	97°40'	277°42'
2	98°31'	278°30'	98°22'	278°23'	97°41'	277°41'
3	98°30'	278°30'	98°22'	278°23'	97°42'	277°43'
4	98°31'	278°31'	98°22'	278°24'	97°42'	277°42'
5	98°31'	278°31'	98°22'	278°23'	97°42'	277°41'
6	98°31'	278°30'	98°22'	278°23'	97°42'	277°42'

$$T_0 = 137^\circ 18', T'_0 = 317^\circ 19'$$

六.数据处理:

1.三棱镜顶角 α

$$\text{由 } \alpha = 180^\circ - \frac{\varphi_1 + \varphi'_1}{2}, \quad \varphi_1 = |T_2 - T_1|, \quad \varphi'_1 = |T'_2 - T'_1|。$$

次数	1	2	3	4	5	6
α	$60^{\circ}0'$	$60^{\circ}0'$	$59^{\circ}58'$	$59^{\circ}59'$	$59^{\circ}58'$	$59^{\circ}58'$

$$\alpha = 59^{\circ}59', \sigma_{\alpha} = 0.4' < \sigma_{\text{仪}} = 1'$$

$$\text{顶角的测量结果为 } \alpha \pm \sigma_{\alpha} = 59^{\circ}59' \pm 1'$$

$$\text{百分误差为 } E = \frac{1'}{59^{\circ}59'} \times 100\% = 0.3\%$$

$$2. \text{最小偏向角: } \delta_{\min} = \frac{1}{2}(|T - T_0| + |T' - T'_0|)$$

次数	1	2	3	4	5	6
黄光 $\delta_{\text{黄}}$	$38^{\circ}48'$	$38^{\circ}48'$	$38^{\circ}48'$	$38^{\circ}48'$	$38^{\circ}48'$	$38^{\circ}48'$
绿光 $\delta_{\text{绿}}$	$38^{\circ}56'$	$38^{\circ}56'$	$38^{\circ}56'$	$38^{\circ}56'$	$38^{\circ}56'$	$38^{\circ}56'$
紫光 $\delta_{\text{紫}}$	$39^{\circ}38'$	$39^{\circ}38'$	$39^{\circ}36'$	$39^{\circ}36'$	$39^{\circ}37'$	$39^{\circ}36'$

$$\delta_{\text{黄}} = 38^{\circ}48', \sigma_{\text{黄}} = 0.4' < \sigma_{\text{仪}} = 1'$$

$$\delta_{\text{绿}} = 38^{\circ}56', \sigma_{\text{绿}} = 0.2' < \sigma_{\text{仪}} = 1'$$

$$\delta_{\text{紫}} = 39^{\circ}37', \sigma_{\text{紫}} = 0.6' < \sigma_{\text{仪}} = 1'$$

此棱镜对三种不同波长光的最小偏向角分别为:

$$\delta_{\text{黄}} \pm \sigma_{\text{黄}} = 38^{\circ}48' \pm 1'$$

$$\delta_{\text{绿}} \pm \sigma_{\text{绿}} = 38^{\circ}56' \pm 1'$$

$$\delta_{\text{紫}} \pm \sigma_{\text{紫}} = 39^{\circ}37' \pm 1'$$

3. 玻璃三棱镜折射率的测量:

$$\text{根据公式 } n = \frac{\sin \frac{1}{2}(\delta_m + \alpha)}{\sin \frac{\alpha}{2}}, \text{ 可以计算得}$$

$$n_{\text{黄}} = 1.518736; n_{\text{绿}} = 1.52025; n_{\text{紫}} = 1.527977$$

$$\text{折射率的标准误差根据公式 } \sigma_n = \sqrt{\left(\frac{\partial n}{\partial \alpha}\right)^2 \sigma_{\alpha}^2 + \left(\frac{\partial n}{\partial \delta_m}\right)^2 \sigma_{\delta_m}^2}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial n}{\partial \alpha} &= \frac{\sin \frac{\alpha}{2} \cdot \cos \left(\frac{\alpha + \delta_m}{2} \right) \cdot \frac{1}{2} - \sin \left(\frac{\alpha + \delta_m}{2} \right) \cdot \cos \frac{\alpha}{2} \cdot \frac{1}{2}}{\sin^2 \frac{\alpha}{2}} \\
&= \frac{\sin \frac{\alpha}{2} \cdot \cos \left(\frac{\alpha + \delta_m}{2} \right) - \sin \left(\frac{\alpha + \delta_m}{2} \right) \cdot \cos \frac{\alpha}{2}}{2 \sin^2 \frac{\alpha}{2}} \\
&= \frac{\sin \left(\frac{\alpha}{2} - \left(\frac{\alpha + \delta_m}{2} \right) \right)}{2 \sin^2 \frac{\alpha}{2}} = -\frac{\sin \frac{\delta_m}{2}}{2 \sin^2 \frac{\alpha}{2}}
\end{aligned}$$

$$\frac{\partial n}{\partial \delta_m} = \frac{1}{\sin \frac{\alpha}{2}} \cdot \cos \left(\frac{\alpha + \delta_m}{2} \right) \cdot \frac{1}{2} = \frac{\cos \left(\frac{\alpha + \delta_m}{2} \right)}{2 \sin \frac{\alpha}{2}}$$

$$\sigma_n = \sqrt{\left(-\frac{\sin \frac{\delta_m}{2}}{2 \sin^2 \frac{\alpha}{2}} \right)^2 \sigma_\alpha^2 + \left(\frac{\cos \frac{\alpha + \delta_m}{2}}{2 \sin \frac{\alpha}{2}} \right)^2 \sigma_{\delta_m}^2}$$

计算的各折射率的标准误差为：

$$\sigma_{n_{\text{黄}}} = 0.0003; \quad \sigma_{n_{\text{绿}}} = 0.0003; \quad \sigma_{n_{\text{紫}}} = 0.0003$$

$$n_{\text{黄}} \pm \sigma_{n_{\text{黄}}} = 1.5187 \pm 0.0003$$

$$n_{\text{绿}} \pm \sigma_{n_{\text{绿}}} = 1.5202 \pm 0.0003$$

$$n_{\text{紫}} \pm \sigma_{n_{\text{紫}}} = 1.5280 \pm 0.0003$$

七、分析讨论题

1. 分光计为什么要调整到望远镜与仪器中心轴线正交？不正交对测量结果有何影响？

答：只有望远镜与仪器中心轴线正交才能在转动望远镜（或载物台）测量不同位置（或测量面）的光线时保证所测光线都在视场中，且与分划板准线的相对位置不变，使测量正常准确进行。不正交将使测量结果误差增大，降低测量准确度。

2. 反射法测三棱镜顶角时，棱镜应放在什么位置，才能保证望远镜中能我到两个面的反射狭缝像？

答：应使三棱镜顶角A正对平行光管。

6 实验名称 衍射光栅（汞光谱波长测量）

一.目的与要求:

- 1.观察光栅的衍射光谱，理解光栅衍射基本规律；
- 2.进一步熟悉分光计的调节与使用；
- 3.测定光栅常量和汞原子光谱部分特征波长。

二.原理简述:

1.衍射光栅，光栅常量。

光栅由大量相互平行、等宽、等距的狭缝（或刻痕）构成。原制光栅是用金刚石刻刀在精制的平行平面的光学玻璃上刻划而成的。刻痕处，光射到它上面向四处散射而透不过去，两刻痕之间相当于透光狭缝。

光栅上若刻痕宽度为 a ，刻痕间距为 b ，则 $d = a + b$ 称为光栅常量，它是光栅基本参数之一。

2.光栅方程，光栅光谱。

当一束平行单色光垂直入射到光栅平面上时，光波将发生衍射。光衍射角 φ 满足光栅方程 $d \sin \varphi = k\lambda$ ， $k = 0, \pm 1, \pm 2 \cdots$ 。光会叠加，衍射后的光波经过透镜会聚后，在焦平面上将形成分隔得较远的一条列对称分布明条纹。

如果入射光波含几种不同波长的复色光，会形成衍射光谱。普通低压汞灯每一级有 4 条特征谱线：紫光 $\lambda_1 = 404.78 \text{ nm}$ ，绿光 $\lambda_2 = 546.07 \text{ nm}$ ，黄光 $\lambda_3 = 578.0 \text{ nm}$ 和 $\lambda_4 = 579.1 \text{ nm}$ 。

3.光栅常量与汞灯特征谱线波长的测量

光垂直入射到光栅上，若 λ 已知，测出相应的 φ ，就可以算出光栅常量 d ；反之，若 d 已知，测出 φ_i ，可以计算 λ_i 。

三.实验仪器

分光计、光栅、双面反射镜、汞灯

四.实验内容

1.分光计调整与观察汞灯衍射光谱。

- (1) 认真调整好分光计；
- (2) 将光栅放于载物台上。通过调平螺丝使光栅平面与平行光管光轴垂直。转动望远镜观察汞灯衍射光谱。中央零级为白色，望远镜分别转到左右时均可以看到第一级的 4 条彩色谱线；

(3) 调节平行光管狭缝宽度，以能够分辨出两条紧靠的黄色谱线为准；

2.光栅常量与光谱线波长的测量。

以绿光谱线的波长 $\lambda = 546.1 \text{ nm}$ 作为已知，测出第一级绿光明条纹的衍射角 φ 。为了

消除偏心差，同时读下 T ， T' 双游标的读数。

五. 数据记录

次数	绿光			
	T_1	T'_1	T_{-1}	T'_{-1}
1	98°40'	278°38'	117°45'	297°46'
2	98°44'	278°43'	117°44'	297°46'
3	98°40'	278°38'	117°45'	297°44'
4	98°44'	278°43'	117°45'	297°43'
5	98°40'	278°39'	117°43'	297°44'
6	98°40'	278°39'	117°44'	297°46'

次数	紫光			
	T_1	T'_1	T_{-1}	T'_{-1}
1	100°41'	284°40'	115°36'	295°36'
2	100°40'	284°39'	115°38'	295°38'
3	100°41'	284°41'	115°39'	295°38'

次数	黄光（内）			
	T_1	T'_1	T_{-1}	T'_{-1}
1	97°47'	277°46'	117°42'	297°42'
2	97°46'	277°46'	117°41'	297°42'
3	97°46'	277°45'	117°42'	297°41'

次数	黄光（外）			
	T_1	T'_1	T_{-1}	T'_{-1}
1	97°45'	277°45'	117°44'	297°43'
2	97°45'	277°46'	117°43'	297°44'
3	97°45'	277°46'	117°43'	297°44'

六. 数据处理

根据公式 $\varphi = \frac{1}{4}(|T_1 - T_{-1}| + |T'_1 - T'_{-1}|)$ 得到绿光每次测量的衍射角

$$\varphi_1 = 9^\circ 33', \quad \varphi_2 = 9^\circ 31', \quad \varphi_3 = 9^\circ 33', \quad \varphi_4 = 9^\circ 30', \quad \varphi_5 = 9^\circ 32', \quad \varphi_6 = 9^\circ 33'$$

那么 $\varphi = 9^\circ 32'$ ， $\sigma_\varphi = 1'$ ，即 $\varphi \pm \sigma_\varphi = 9^\circ 32' \pm 1'$ 。

$$\text{光栅常数 } d = \frac{\lambda}{\sin \varphi} = \frac{546.1 \text{ nm}}{\sin 9^\circ 32'} = 3297.28 \text{ nm}$$

$$\sigma_d = \left(\frac{\lambda}{\sin \varphi} \right)' \sigma_\varphi = \frac{\lambda \cos \varphi \sigma_\varphi}{\sin^2 \varphi} = 546.1 \text{ nm} \times \frac{\cos 9^\circ 32'}{\sin^2 9^\circ 32'} \times \frac{\pi \times 1'}{180 \times 60'} = 6 \text{ nm}$$

$$d \pm \sigma_d = (3297 \pm 6) \text{ nm}$$

不同波长光在此光栅下的衍射角，测量波长值及相对误差分别为

紫光： $\varphi = 7^\circ 29'$ ， $\lambda = 429.4 \text{ nm}$ ， $E = 1.5\%$ ；

黄光（内）： $\varphi = 9^\circ 58'$ ， $\lambda = 570.6 \text{ nm}$ ， $E = 1.1\%$ ；

黄光（外）： $\varphi = 9^\circ 59'$ ， $\lambda = 571.6 \text{ nm}$ ， $E = 1.3\%$ 。

七.分析讨论题

1.试结合测量的百分误差分析其产生的原因？

答：在正常的误差范围内，一般产生误差的原因：分光计没有严格的调整好。平行光不是真正的平行光，两轴线没严格正交。视察没有完全消除。测量时十字准线没有对准光谱线的中间。移动望远镜时手不是拿着架子转动，而是拿着目镜转动。两人读数的误差等等。

2.如果光栅平面和分光计转轴平行，但光栅上刻线和转轴不平行，那么整个光谱会有何变化？对测量结果有无影响？

答：会出现光谱线不水平。对测量结果略有影响，但在误差要求范围之内，影响可不予考虑。

7 实验名称 拉伸法测量金属材料杨氏模量

一. 实验内容

1. 学习用拉伸法测量金属丝杨氏模量，掌握光杠杆测定微小伸长量的原理；
2. 初步学会调节使用望远镜；
3. 学习处理数据的一种方法—逐差法。

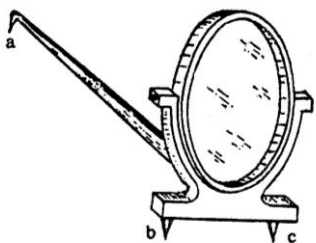
二. 实验原理

1. 杨氏模量

根据虎克定律，在弹性限度内，物体的应力与应变成正比：

$$\frac{F}{S} = Y \cdot \frac{\Delta L}{L}$$

其中比例系数 Y 就是该材料的杨氏弹性模量，简称杨氏模量。



光杠杆镜架结构

在实验中测量钢丝的杨氏模量，其截面为圆形，其直径为 d 时，相应的截面积 $S = \pi d^2 / 4$ ， ΔL 是较大长度的微小伸长量，无法用一般的长度测量仪器测量，因此实验中用光杠杆法进行测量，测量公式

$$\Delta L = \frac{l}{2D} \Delta x$$

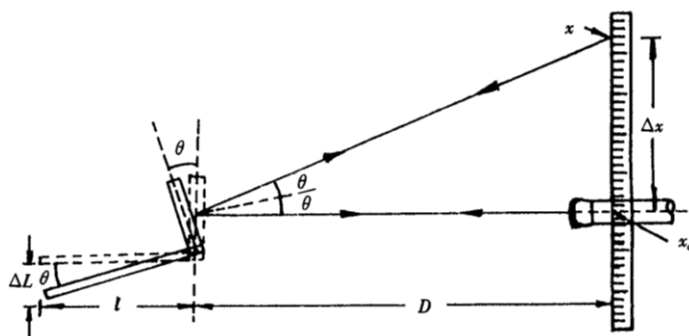
于是可得实验中的杨氏模量测量公式：

$$Y = \frac{8DLF}{\pi d^2 l \Delta x}$$

可见 Δx 随所加外力在弹性限度内是线形变化的。

2. 光杠杆

实验中 ΔL 是一微小变化量，变化在 $10^{-2} mm$ 数量级。因此实验设计的关键是寻找测量微小变化量的方法和装置，这里我们采用了光学放大方法——光杠杆来实现。



设在钢丝下端未加砝码时，从望远镜中读得标尺读数记为 x_0 ，当增加砝码时，钢丝伸长量为 ΔL ， a 足随圆柱体夹头一起下降，于是光杠杆镜架绕 bc 轴转动。根据反射定律，平面镜法线转动 θ 角，反射线将转过 2θ ，此时从望远镜中读得的标尺读数为 x_i 。因为 ΔL 为一微小量，所以 θ 也很小，近似有 $\theta \approx \tan \theta$ 和 $2\theta \approx \tan 2\theta$ 。于是由三角函数关系可得：

$$2 \frac{\Delta L}{l} = \frac{\Delta x}{D}$$

由于 D 远大于 l ，则 Δx 必然远大于 ΔL 。这样，就将一个原来数值小的钢丝长度变化量 ΔL 转化成一个数据较大的标尺的读数变化量 Δx 。从这里可以明显的看出光杠杆装置的放大作用。光杠杆的放大倍数即为

$$\frac{\Delta x}{\Delta L} = \frac{2D}{l}$$

3、误差传递公式及仪器的选择

通过计算公式 $Y = \frac{8DLF}{\pi d^2 l \Delta x}$ 我们可以得出杨氏模量的相对误差传递的推导公式

$$E_Y = \sqrt{\left(\frac{\sigma_D}{D}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_l}{l}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_L}{L}\right)^2 + \left(2 \frac{\sigma_d}{d}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{(\Delta x)}}{\Delta x}\right)^2}$$

由推导公式中可见， d 的不确定度占了很大比例，因此测量时应选择精确度较高的仪器来测量 d ，实验中选择螺旋测微计来测量。

而测量 ΔL 时，由于 ΔL 是长度很大的量上的微小变化，不能用游标卡尺或螺旋测微计测量，所以实验中采用了光杠杆法来测量。

三、仪器记录

螺旋测微计, 游标卡尺, 米尺, 尺读望远镜, 杨氏模量测定仪。

四. 操作步骤

1. 首先检查、布置仪器

(1) 调节杨氏模量测定仪脚架的底脚螺丝，使水准气泡居中，此时两支柱铅直。

(2) 在钢丝下端挂上砝码挂钩，使钢丝拉直，并检查钢丝下端夹头能否在平台圆孔中自由上下滑动，减少摩擦带来的误差。

(3) 将光杠杆放在平台上，两前足放于凹槽中，后足放在圆柱夹尖的上端，注意不要与钢丝相碰。调整望远镜和光杠杆处于同一高度，并使望远镜大致水平，光杠杆镜面及标尺大致铅直。

2. 调节望远镜

(1) 旋转目镜，调目镜与叉丝间的距离到能清楚看见叉丝；

(2) 移动镜尺装置，在望远镜外沿镜筒上方瞄准器方向看光杠杆镜面，直到能看到反射回来的标尺像，并用瞄准器对准标尺像。然后调节望远镜物镜焦距，使标尺像聚焦在叉丝平面上，并适当调节望远镜俯仰，应可看见像。

(3) 消除视差，上下左右晃动眼睛，同时观察像的相对位置有无改变，如有改变，则调节物镜距离直至像的相对位置不变动。

至此，望远镜调节完成，测量过程中不要再变动仪器的相对位置，包括放置望远镜的桌子不可震动，否则要从头再调。

3. 记录实验开始时望远镜中的标尺读数 x_0 ，然后依次增加砝码，记录下标尺读数

$x_i (i = 1, 2, \dots, n)$ ，到第 8 个为止（第 8 个不读数），再依次减少砝码，记录对应的标尺读数

x'_i 。对应的和数值取平均，可以消除摩擦和滞后等带来的系统误差。

4. 其他数据的测量

(1) 用卷尺测量钢丝长度 L 和光杠杆镜面到标尺的垂直距离 D 。

(2) 取下光杠杆，在平整的纸上压出三个足痕，自 a 足画一垂直于 bc 足连线的垂线，用游标卡尺量出垂线长度 l 。

(3) 用螺旋测微计测量钢丝的直径 d 。在不同位置均匀取点测量 6 次。

五. 数据记录与处理

1. 钢丝形变测量

F/N	0	4.9	9.8	14.7	19.6	24.5	29.4	34.3
$X_{\text{增}}/\text{cm}$	-0.40	0.00	0.44	0.90	1.30	1.85	2.21	2.63
$X_{\text{减}}/\text{cm}$	-0.41	0.02	0.40	0.85	1.35	1.79	2.25	2.64
\bar{x}/cm	-0.40	0.01	0.42	0.88	1.32	1.82	2.23	2.64

$$2. \text{镜尺距: } D=137.9\text{cm}, \Delta_{D\text{仪}}=0.5 \text{ cm}, \quad \sigma_D = \frac{0.5}{\sqrt{3}} = 0.3 \text{ cm}$$

$$D = (137.9 \pm 0.3) \text{ cm}$$

$$3. \text{钢丝长度: } L=92.45-2.00=90.45\text{cm}, \Delta_{L\text{仪}}=0.05\text{cm}, \quad \sigma_L = \frac{\Delta_{L\text{仪}}}{\sqrt{3}} = \frac{0.05}{\sqrt{3}} = 0.03\text{cm},$$

$$L = 90.45 \pm 0.03\text{cm}$$

$$4. \text{钢丝直径 } d: \Delta_{d\text{仪}}=0.004\text{mm}, \quad \sigma_{d\text{仪}} = \frac{0.004}{\sqrt{3}} = 0.002\text{mm}$$

次数	1	2	3	4	5	6	平均 \bar{d}	σ_d
D/mm	0.501	0.498	0.502	0.503	0.501	0.506	0.502	0.003

$$d = 0.502 \pm 0.003\text{mm}$$

$$5. \text{光杠杆常数: } b=7.508\text{mm}, \Delta_{b\text{仪}}=0.002\text{mm}, \quad \sigma_L = \frac{\Delta_{b\text{仪}}}{\sqrt{3}} = \frac{0.002}{\sqrt{3}} = 0.001\text{mm},$$

$$b = 7.508 \pm 0.001\text{mm}$$

6. 逐差法求伸长量，并求出杨氏模量

$$\overline{\Delta X} = \frac{1}{4} \times \sum_{i=1}^5 (\overline{x_{i+4}} - \overline{x_i}) = \frac{1}{4} \times [(1.32 + 0.40) + (1.82 - 0.01) + (2.23 - 0.42) + (2.64 - 0.88)] = 1.78\text{cm}$$

$$\overline{\Delta X} = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 \left(\frac{x_{i+4\text{增}} + x_{i+4\text{减}}}{2} - \frac{x_{i\text{增}} + x_{i\text{减}}}{2} \right) = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^4 [(x_{i+4\text{增}} + x_{i+4\text{减}}) - (x_{i\text{增}} + x_{i\text{减}})]$$

$$\because \text{上式求和号内共 16 项均为单次测量, 各项的测量仪器误差 } \sigma_{x\text{仪}} = \frac{\Delta_{x\text{仪}}}{\sqrt{3}} = \frac{0.05}{\sqrt{3}} = 0.03 \text{ cm}$$

\therefore 对式 $\overline{\Delta X}$ 的各量求偏导数后，根据误差传递的推导式可得

$$\sigma_{\overline{\Delta X}} = \frac{1}{8} \sqrt{16\sigma_{x\text{仪}}^2} = \frac{1}{2} \sigma_{x\text{仪}} = \frac{1}{2} \times 0.03 = 0.02 \text{ cm}$$

$$\overline{\Delta X} \pm \sigma_{\overline{\Delta X}} = 1.78 \pm 0.02 \text{ cm}, \quad F = 4 \times 4.9 = 19.6\text{N}$$

$$\overline{E} = \frac{8F \cdot L \cdot D}{\pi \cdot d^2 \cdot b \cdot \overline{\Delta X}} = \frac{8 \times 19.6 \times 90.45 \times 10^{-2} \times 1.379}{3.1416 \times 0.502^2 \times 10^{-6} \times 7.508 \times 10^{-2} \times 1.78 \times 10^{-2}} = 1.85 \times 10^{11} (\text{N/m}^2)$$

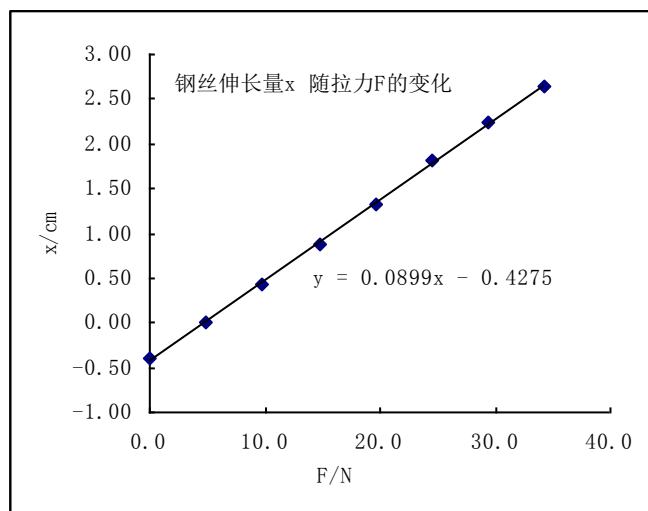
$$\begin{aligned}\frac{\sigma_E}{E} &= \sqrt{\left(\frac{\sigma_L}{L}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_D}{D}\right)^2 + \left(2\frac{\sigma_{d\text{仪}}}{d}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{b\text{仪}}}{b}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\Delta X}}{\Delta X}\right)^2} \\ &= \sqrt{\left(\frac{0.03}{90.45}\right)^2 + \left(\frac{0.3}{137.9}\right)^2 + \left(2 \times \frac{0.002}{0.502}\right)^2 + \left(\frac{0.001}{7.508}\right)^2 + \left(\frac{0.02}{1.78}\right)^2} = 0.012\end{aligned}$$

$$\therefore \sigma_{Y\text{仪}} = E \cdot \bar{Y} = 1.85 \times 10^{11} \times 0.012 = 0.02 \times 10^{11} (\text{N/m}^2)$$

$$\text{即 } \bar{E} \pm \sigma_E = (1.85 \pm 0.02) \times 10^{11} (\text{N/m}^2)$$

7. 图解法求杨氏模量:

据 $E = \frac{8F \cdot L \cdot D}{\pi \cdot d^2 \cdot b \cdot x}$, 则 $x = \frac{8L \cdot D}{\pi \cdot d^2 \cdot b \cdot E} F + x_0$ 。将钢丝形变测量数据, 作 $\bar{x}_i \sim F_i$ 图如下, 为一直线, 求出直线得斜率



$$k = 0.0899 = \frac{\Delta x}{\Delta F} = \frac{8LD}{\pi d^2 b E}, \text{ 则}$$

$$E = \frac{8 \times 90.45 \times 10^{-2} \times 1.379}{3.1416 \times (0.502 \times 10^{-3})^2 \times (7.508 \times 10^{-2}) \times k} = 1.87 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$$

六. 分析讨论题

本实验中哪些量的测量误差对结果影响较大, 如何改进?

答: 从误差传递公式 (相对误差) 来看: $E_Y = \sqrt{E_L^2 + E_D^2 + 2^2 E_d^2 + E_b^2 + E_{\Delta X}^2}$,

因为 E_d^2 前有系数 2^2 , 所以 d 的测量误差对结果影响较大, 我们可以进行多次测量来减小

其误差。另外, 由于 ΔX 值较小所以 $E_{\Delta X}$ 就较大, 改进的方法有两种: (1) 增加测量次数;

(2) 增加放大倍数, 即在一定的范围内, 增加 D 值。

8实验名称 阴极射线示波器

一. 目的与要求

1. 了解示波器的主要构成部分以及示波器显示波形的原理；
2. 学习示波器的调节，观察各种信号的波形。
3. 利用李萨如图形测量未知信号频率。

二. 原理

1. 示波器显示波形的原理

示波器虽然具有多种类型或型号，它们在结构上都包含几个基本的部分：示波管、水平放大器、竖直放大器、扫描发生器、触发同步和直流电源等。

示波管是示波器的关键部件，当电子枪被加热发出电子束后，经电场加速打在荧光屏上就形成一个亮点，电子束在到达荧光屏之前要经过两对相互垂直的电偏转板，如果没有偏转电场的作用，电子束将打在荧光屏的中央；如果施加了偏转电场，电子束（亮点）的位置就会发生偏移。

如果只在竖直（Y 轴）偏转板上加一交变的正弦电压 $U_y = U_0 \sin \omega t$ ，则电子束的亮点将随电压的变化在竖直方向来回运动。由于 $U_x = 0$ ，所以光点在 X 轴方向无位移，在荧光屏上将显示一条竖直亮线。如果只在水平（X 轴）偏转板上加上一个与时间成正比的锯齿波扫描电压 $U_x = Kt$ （它可由示波器内的扫描发生器产生的），电子束将在水平方向作周期性地从一边匀速移动到另一边，如果锯齿波的周期较长，在荧光屏上可以看到电子束的移动过程，如果锯齿波的周期足够短，荧光屏上将只显示一条水平亮线。

如果在水平偏转板上加上一个锯齿波电压的同时，在竖直偏转板上加上一个周期性变化的电信号，电子束在水平匀速移动的同时还在竖直方向随周期性电信号的变化而移动，荧光屏上将显示出加在竖直偏转板上的电信号的变化规律——波形。当竖直方向电信号的周期与水平方向锯齿波电压的周期相同或为其整数倍，荧光屏上的图形将通过一次次的扫描得到同步再现，从而显示出竖直方向电信号稳定的波形。

2. 李萨如图形

如果在示波器的X轴和Y轴上都输入正弦波电压，且使它们的频率相等或成整数比，屏幕上将呈现光点特殊形状的轨迹图形，称为李萨如图形。

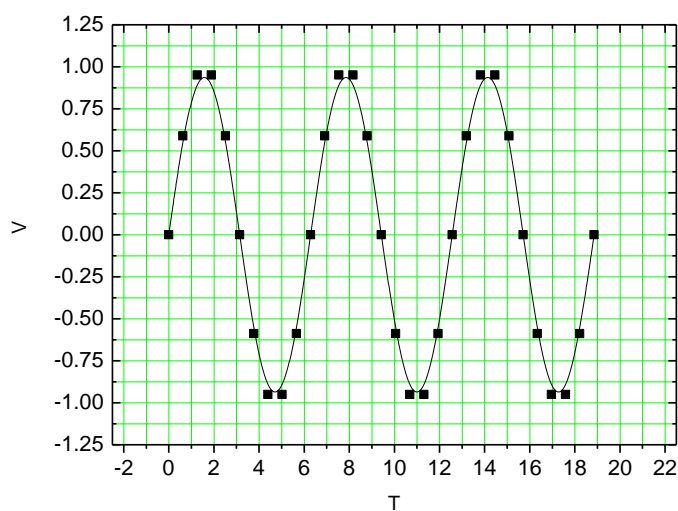
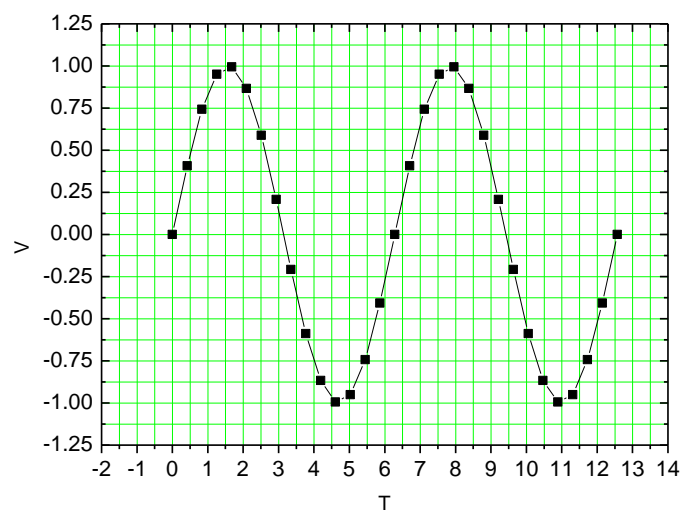
三. 仪器

ST16B示波器，DF1631功率函数信号发生器，THF-1简易函数信号发生器。

四. 实验内容与步骤

1. 描绘示波器机内正弦波（市电）波形

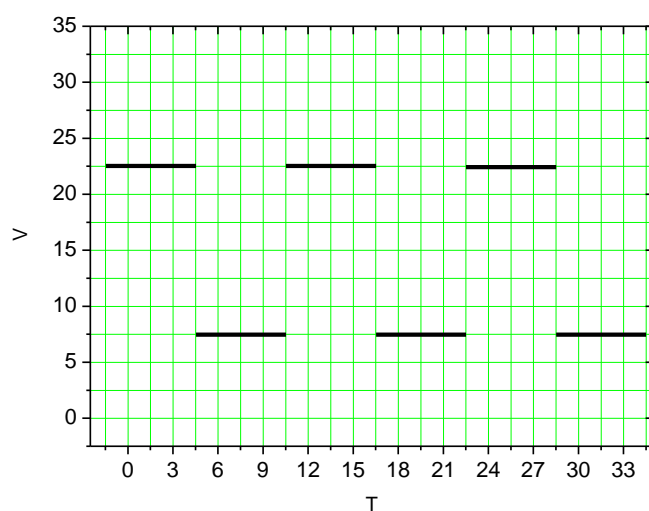
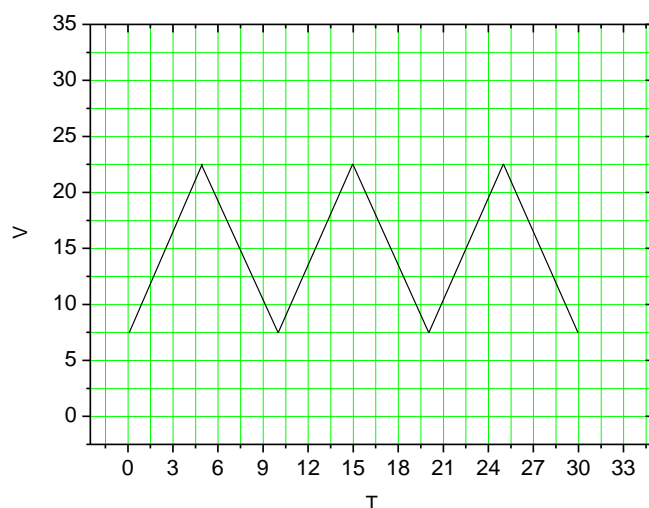
方法：把示波器校准信号接入示波器的Y输入端口，示波器X输入的触发方式选择“自动”，即可看到50Hz的正弦交流信号。通过调节选择时间扫描旋钮，可以改变屏幕显示的波形的个数。两个和三个完整周期的波形描绘如下：



2. 描绘信号发生器三角波和方波信号的波形

方法：把DF1631功率函数信号发生器电压输出端口接入示波器的Y输入端口，示波器X

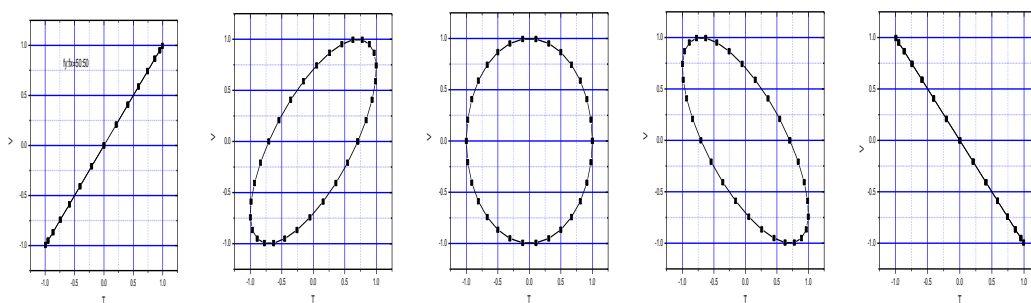
输入的触发方式选择“自动”；分别选择信号发生器输出波形为三角波和方波，同时适当选择示波器Y输入电压旋钮和X输入时间扫描旋钮，可以改变屏幕显示的波形的个数。三个完整周期的波形描绘如下：



3. 描绘李萨如图形特征变化图

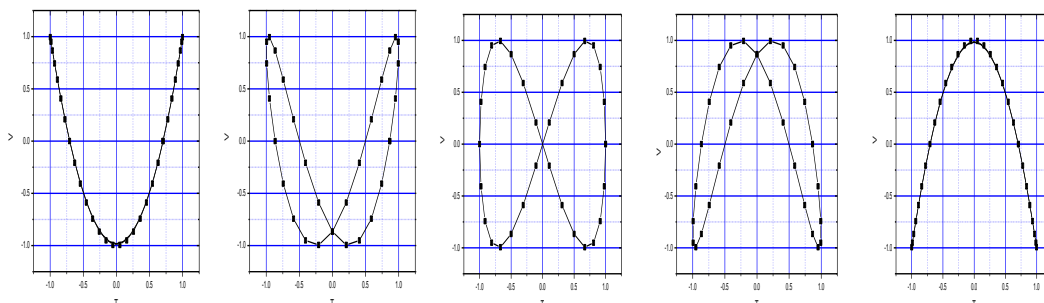
方法：把示波器校准信号接入示波器的Y输入端口，把DF1631功率函数信号发生器电压输出端口接入示波器的X输入端口，此时示波器X输入的触发方式选择“外接”。选择信号发生器输出波形正弦波，改变信号发生器输出频率分别为50Hz、25Hz和150Hz。适当选择示波器Y输入电压旋钮和X输入时间扫描旋钮，可以在屏幕显示不同的李萨如图形。波形描绘如下：

$f_y:f_x=50:50$ 时的李萨如图像特征变化图



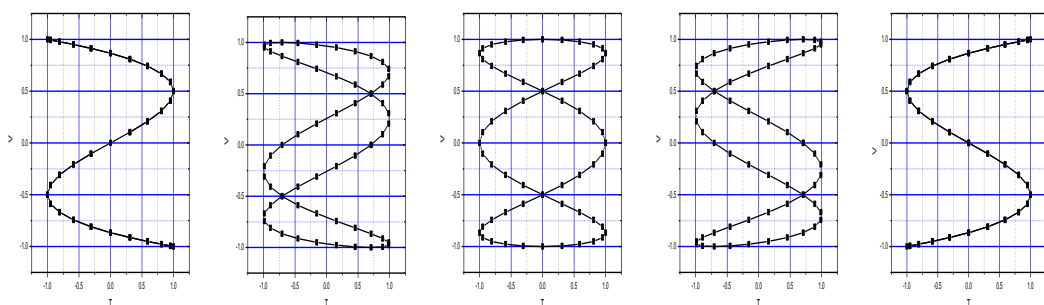
(a) 相位差为0 (b) 相位差为 $\pi/4$ (c) 相位差为 $\pi/2$ (d) 相位差为 $3\pi/4$ (e) 相位差为 π

$f_y:f_x=50:25$ 时的李萨如图像特征变化图



(a) 相位差为 $\pi/4$ (b) 相位差为 $\pi/3$ (c) 相位差为 $\pi/2$ (d) 相位差为 $2\pi/3$ (e) 相位差为 $3\pi/4$

$f_y:f_x=50:150$ 时的李萨如图像特征变化图



(a) 相位差为0 (b) 相位差为 $\pi/4$ (c) 相位差为 $\pi/2$ (d) 相位差为 $3\pi/4$ (e) 相位差为 π

4. 利用李萨如图形测量未知频率THF-1简易函数信号发生器的频率

方法：把THF-1简易函数信号发生器信号接入示波器的Y输入端口，把DF1631功率函数信号发生器电压输出端口接入示波器的X输入端口，此时示波器X输入的触发方式选择“外接”。选择两信号发生器输出波形均为正弦波。适当选择示波器Y输入电压旋钮和DF1631功率函数

信号发生器电压输出幅度，使屏幕显示图像大小合适。通过频率调节旋钮改变DF1631功率函数信号发生器输出频率，同时观察示波器屏幕的图像变化。当屏幕出现一个较稳定椭圆时，此时DF1631功率函数信号发生器所显示频率即为THF-1简易函数信号发生器输出信号的频率。

所测该THF-1简易函数信号发生器输出频率为：1.803KHz。

5. 描绘THF-1简易函数信号发生器输出的半波整流、全波整流和衰减波波形。

五. 分析讨论题

示波器能否用来测量直流电压？如果能测，则应如何进行？

答：示波器能测量直流电压。

具体进行测量时应按下述步骤：

1. 示波器X轴输入锯齿波扫描，即“自动”位置。
2. 将Y轴输入耦合开关拨至“DC”位置。
3. 使“Y输入”端接地，观察时基线位置，将其移至屏幕某一确定位置。
4. 确定未知电压在屏幕上位置：将待测直流电压接入“Y输入”端时，基线在Y方向产生位移，选择适当“Y衰减”档时，使基线的位移控制在屏幕的有效工作范围内，记下此时基线在Y轴方向的位置。
5. 定标：保持步骤4的各旋钮位置不变，将“Y输入”端与带有电压数字指示的直流稳压电源相接。分别记下直流电压在1V, 2V, 3V……时屏幕上的基线在Y轴方向移动所处位置，并标上对应的电压值，将待测电压时基线所示位置与上述标定值比较，即可确定待测直流电压值。

9 实验名称 用交流电桥测量电感和电容

一. 目的与要求

1. 掌握交流电桥的基本原理和调节方法。
2. 学会使用交流电桥测电容、电感及其有关参数。

二. 原理简述

交流电桥电路基本形式如图 1 所示。

电桥平衡时 $i_G = 0$, C、D 两点的电位相等

$$\dot{u}_1 = \dot{u}_2, \quad \dot{u}_3 = \dot{u}_4$$

上式各量分别为四臂上复数电压, 平衡时满足条件

$$\dot{Z}_1 \cdot \dot{Z}_4 = \dot{Z}_2 \cdot \dot{Z}_3 \quad (1)$$

如果把阻抗写成如下形式

$$\dot{Z}_1 = Z_1 e^{j\varphi_1}, \quad \dot{Z}_2 = Z_2 e^{j\varphi_2}, \quad \dot{Z}_3 = Z_3 e^{j\varphi_3}, \quad \dot{Z}_4 = Z_4 e^{j\varphi_4}$$

其中 Z_n 为幅模, φ 为幅角, 代入 (1) 式得

$$Z_1 Z_4 e^{j(\varphi_1 + \varphi_4)} = Z_2 Z_3 e^{j(\varphi_2 + \varphi_3)} \quad (2)$$

从而得到交流电桥平衡的另一种表达式

$$\begin{cases} Z_1 \cdot Z_4 = Z_2 \cdot Z_3 \\ \varphi_1 + \varphi_4 = \varphi_2 + \varphi_3 \end{cases} \quad (3)$$

$$(4)$$

1. 用比较法测电感 L 及品质因素 Q

电路图如图 2, 待测电感 L_X (其损耗电阻为 R_X), 由图可知

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{Z}_1 = R_X + j\omega L_X \\ \dot{Z}_2 = R_2 \\ \dot{Z}_3 = R + j\omega L_3 \\ \dot{Z}_4 = R_4 \end{array} \right.$$

其中, $R = R_3 + R_L$ (R_L 为 L_3 的损耗电阻)。则当电桥平衡时, 可得:

$$R_4 R_X + j\omega R_4 L_X = R_2 R + j\omega R_2 L_3$$

按实部、虚部分别相等, 则得

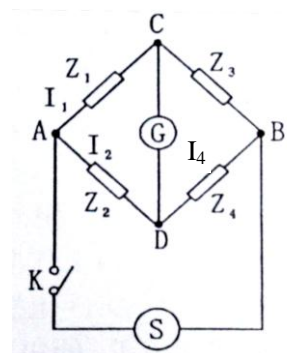


图 1

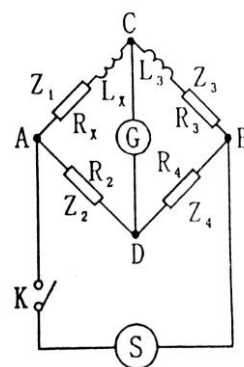


图 2

$$L_x = R_2 L_3 / R_4, \quad R_x = R_2 R / R_4 \quad (5)$$

$$\text{电感器 } L_x \text{ 的品质因素 } Q = \frac{\omega L_x}{R_x} = \frac{2\pi f L_x}{R_x} \quad (6)$$

2. 用比较法测电容 C 及损耗因素 $\tan \delta$

电路图如图 3。待测电容 C_x 用的是串联型等效电路 (适用于测量损耗小的电容)。

$$\text{由图可知} \quad \begin{cases} \dot{Z}_1 = R_x + \frac{1}{j\omega C_x}, & \dot{Z}_2 = R_2 \\ \dot{Z}_3 = R_3 + \frac{1}{j\omega C_s}, & \dot{Z}_4 = R_4 \end{cases}$$

$$\text{当电桥平衡时, 可得: } R_2 \left(R_3 + \frac{1}{j\omega C_s} \right) = R_4 \left(R_x + \frac{1}{j\omega C_x} \right)$$

按实部、虚部相等分别相等, 则得:

$$C_x = \frac{R_4}{R_2} \cdot C_s, \quad R_x = \frac{R_2}{R_4} \cdot R_3 \quad (7)$$

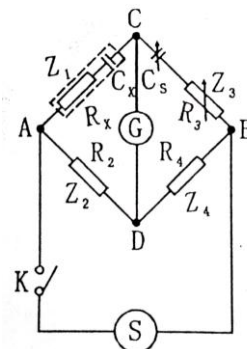


图 3

$$\text{电容损耗因素} \quad \tan \delta = \omega R C = 2\pi f R C \quad (8)$$

三. 实验仪器

THMJ-2 型 R、L、C 交流电路综合实验箱, 万用表, XC2810A 型 LCR 自动测量仪。

四. 实验方法

1. 测量电感 L_x 及其品质因素 Q

(1) 按图 2 连接线路, R_2 、 R_3 、 R_4 接 TR1、TR2、TR3, L_3 用 TL。为方便计算取 $R_2=R_4$, 选取 $f=1000\text{Hz}$, 交替调节 TL 和 TR2 直至电桥达到平衡 (交流指零表趋向于 0), 读出 TL 值及 TR2 值。

(2) 用 LCR 自动测量仪测出 L_3 的损耗电阻 R_L 。

(3) 将待测电感 L_{x1} 换成 L_{x2} , 重复上述步骤进行测量。根据各测量值, 依照式 (5), 算出 L_{x1} 、 L_{x2} 及 R_{x1} 、 R_{x2} , 并根据频率计的读数, 由式 (6) 算出品质因素 Q_1 、 Q_2 。

(4) 选取 L_{x1} 用五个不同频率测电感和品质因素。方法同上。

2. 测量电容 C 及损耗因素 $\tan \delta$

(1) 按图 3 连接线路, C_s 用 TC, R_2 、 R_3 、 R_4 接 TR1、TR2、TR3, $R_2=R_4=1\text{K}\Omega$, $f=1000\text{Hz}$ 。交替调节 TC 和 TR2, 直至电桥趋向平衡, 记录 TC 和 TR2 的值。根据 (7) 式算出 C_x 和 R_x 的值。

(2) 再根据 f , 由 (8) 式算出损耗因素 $\tan \delta$ 。

(3) 三个待测电容 C_{x1} 、 C_{x2} 和 C_{x3} 都用上述方法测量。

(4) 另外选 C_{x1} 用 5 个不同频率进行测量。

五. 数据处理

表1 $f=1000\text{Hz}$ 时电感的测量 ($R_2=R_4=1\text{K}\Omega$)

测量值 待测元件	T_L / mH	TR_2 / Ω	R_L / Ω	R / Ω	L_x / mH	R_x / Ω	Q
L_{x1}	32	117.9	57.2	175.1	32	175.1	1.1
L_{x2}	5	42.2	17.0	59.2	5	59.2	0.5

计算公式: $R = TR_2 + R_L$, $L_x = R_2 \cdot TL / R_4$, $R_x = R_2 R / R_4$, $Q = 2\pi f L_x / R_x$ 。

表2 不同频率时电感的测量 ($R_2=R_4=7\text{K}\Omega$)

频率 f/Hz	R_3 / Ω	L_3 / mH	R_L / Ω	R / Ω	L_x / mH	R_x / Ω	Q
50	110.4	47			47		
100	113.5	51			51		
501	118.4	33			33		
4999	101.4	31			31		
10007	403.1	31			31		

从表中可以看出, 当频率较低 (小于 100Hz) 时, 电感测量值变化较大。

表3 电容的测量 ($f=1000\text{Hz}$, $R_2=R_4=1\text{K}\Omega$)

测量值 待测元件	$C_s / \mu F$	R_3 / Ω	$C_x / \mu F$	R_x / Ω	$\tan \delta$
C_{x1}	0.490	0	0.490	0	0
C_{x2}	0.034	0	0.034	0	0
C_{x3}	0.007	0	0.007	0	0

计算公式: $C_x = C_s \cdot R_4 / R_2$, $R_x = R_3 \cdot R_2 / R_4$, $\tan \delta = \omega R_x C = 2\pi f R_x C$

表4 不同频率时电容的测量 ($R_2=R_4=7\text{K}\Omega$)

频率 f/Hz	50	100	500	1000	10035
R_3 / Ω	0	0.5	0	2.3	0
$C_{x1} / \mu F$	0.486	0.487	0.485	0.482	0.483

从表4可以看出: 测量结果基本上不受频率影响。

六. 分析讨论

1. 试结合实验分析, 测量结果的误差主要来源于电桥中的哪些因素。

答: 误差主要来源于以下因素:

(1) 调节元件的误差, 其中

$$E_R = 1.0\%, \quad E_L = 2.0\%, \quad E_c = 1.0\%, \quad E_f = 1.0\%$$

(2) 导线电阻及接触电阻。

(3) 频率选择的影响, 不同频率时感抗、容抗不同, 而电感、电容一般都存在

能耗。

(4) 调节平衡时，交流指零表一般不能调到零。

2. 频率在实验中的影响

答：从测量结果来看，不同频率对电感的影响较大，而对电容基本上没有影响。

10 实验名称 吊片法测量液体的表面张力

一. 目的与要求:

1. 学习吊片法测量液体表面张力的原理和方法;
2. 学习表面活性剂临界胶束浓度的测量方法。

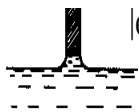
二. 原理简述:

由于液相和气相的密度差异,在液体表面存在着收缩张力,使表面积缩到最小。表面上单位长度上的张力称为表面张力。液体的许多现象与表面张力有关,例如:毛细现象、润湿现象、泡沫的形成等。液体表面张力和物质种类、温度、浓度、电解质、有机醇含量等多种因素有关。测量液体表面张力的方法很多,如吊片法、毛细管上升下降法、吊环法等等。

本实验采用吊片法,如图 1 所示,将盖玻片、云母片、滤纸等竖平板插入液体,使其底边与液面接触,测定吊片脱离液体所需与表面张力相抗衡的最大拉力 F ,也可将液面缓慢地上升至刚好与吊片接触,并将吊片加工成粗糙表面和处理得非常洁净,使吊片被液体湿润,接触角 $\theta \rightarrow 0$, $\cos \theta \rightarrow 1$,同时吊片厚度 t 和底边长 l 相比非常小,可忽略不计,则表面张力

$$\gamma = \frac{\Delta W}{2l} = \frac{F - G}{2l}$$

图 1 吊片法测量
表面张力示意图



吊片法直观可靠,不仅可以测量纯液体(如水,乙醇等)和溶液的表面张力,还可以用来测量表面活性剂的临界胶束浓度(cmc)。表面活性剂是一类能显著降低水的表面张力的物质,它的分子一般是由亲油基和亲水基两部分组成。从图 2 表面活性剂水溶液表面张力随浓度的变化曲线可以看到,少量的表面活性剂加到水中,就能使表面张力急剧下降,当浓度增大到某一临界值时,表面张力降至最低,继续增大浓度,表面张力又几乎保持恒定。其中的临界点(图中阴影部分),称为临界胶束浓度 cmc,是表征表面活性剂表面活性的一个重要参数之一。如图 2 所示,在 cmc 附近,表面活性剂的洗涤作用、密度等许多性质都会发生很大变化,使用表面活性剂时,浓度一般要比 cmc 稍大,否则其性能不能充分发挥,而浓度过高是不必要的。

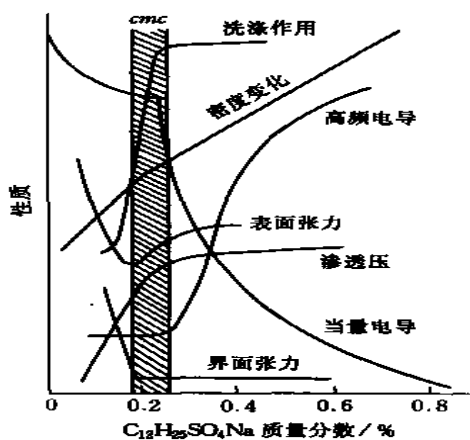


图 2 表面活性剂性质随浓度变化

三. 实验仪器:

高精度的电子天平(最小读数为 1mg),剪刀,精密滤纸,毫米尺,200mL 烧杯,滴管,去离子水,高浓度的十二烷基苯磺酸钠水溶液储备液($C_0=4.18\%$)。

四. 实验方法:

1. 测量纯水的表面张力

(a) 将干净滤纸剪成边长约 2.0 cm 的长方形小条, 测量底边长 l 后, 固定在与天平相连的挂钩上, 调整纸片, 使下底边保持在水平状态;

(b) 一定量的去离子水加入洁净的烧杯内并置于升降台上, 调节升降台, 待纸片为液体润湿后, 将纸片脱离液面, 此时天平读数 m_0 为吊片的质量, 将天平置 “0”;

(c) 接触法测量最大拉力: 调节升降台, 使液面缓缓上升, 直至吊片底边刚好和液面接触, 记录下天平的读数 m ;

(d) 脱离法测量最大拉力: 升高液面, 使部分吊片浸入液面以下, 调节升降台使液面缓缓下降, 直到吊片即将脱离液面, 记录下此时的读数 m' ;

(e) 重复操作步骤 (c)、(d), 共测量 6 次;

2. 脱离法测量表面活性剂水溶液的临界胶束浓度 cmc

(a) 称出洁净烧杯重量 $m_{\text{杯}}$, 然后加入约 35 ml 的去离子水, 用天平称出水 and 烧杯总量为 $m_{\text{水+杯}}$, 取下烧杯后置天平为 “0”;

(b) 用滴液管滴加 1 滴表面活性剂储备液, 轻轻摇晃, 待溶液混合均匀后, 用脱离法 (参见操作 1(d)) 测量浓度为 C_i 的表面活性剂溶液的天平增量 m_i' ;

(c) 逐渐增加表面活性剂的加入量, 记录下不同浓度下 C_i 下的天平增量 m_i' , 直到表面张力基本上不再变化, 记录下总的滴加量 $n_{\text{总}}$;

(d) 称出烧杯的总质量 $m_{\text{总}}$.

五. 数据记录与处理:

1. 纯水表面张力的测量

表 I 纯水表面张力测量 ($l=2.10\text{cm}$, $\Delta m_{\text{仪}}=0.002\text{g}$, $\Delta l_{\text{仪}}=0.05\text{cm}$)

Times	1	2	3	4	5	6	average
m (g)	0.288	0.289	0.288	0.290	0.289	0.289	0.289
m' (g)	0.295	0.293	0.293	0.293	0.293	0.295	0.293

$$\text{接触法: } \bar{m} = 0.2888\text{g}, \sigma_m = 0.0008\text{g}, \Delta_{\text{仪}} = \frac{0.005}{\sqrt{3}} = 0.003\text{g}, \quad m = 0.289 \pm 0.003\text{g}$$

$$\sigma_l = \frac{\Delta_{\text{仪}}}{\sqrt{3}} = \frac{0.05}{\sqrt{3}} = 0.03\text{cm}, l = 2.10 \pm 0.03\text{cm}$$

$$\bar{\gamma} = \frac{\bar{\Delta m} \cdot g}{2l} = \frac{0.289 \times 9.79}{2 \times 0.0210} = 67.4\text{mN} \cdot \text{m}^{-1},$$

$$E_{\gamma} = \sqrt{E_{\Delta m}^2 + E_l^2} = \sqrt{\left(\frac{0.003}{0.289}\right)^2 + \left(\frac{0.03}{2.10}\right)^2} = 2 \times 10^{-2}$$

$$\sigma_{\gamma} = E_{\gamma} \cdot \bar{\gamma} = 2 \times 10^{-2} \times 67.4 = 1, \gamma = 67 \pm 1\text{mN} \cdot \text{m}^{-1}$$

$$A = \frac{|67 - 72.0|}{72.0} \times 100\% = 6.9\%$$

脱离法测量数据处理同上:

$$\bar{m}' = 0.293\text{g}, \sigma_m = 0.001\text{g}, \Delta_{\text{仪}} = \frac{0.005}{\sqrt{3}} = 0.003\text{g}, \quad m' = 0.293 \pm 0.003\text{g},$$

$$\bar{\gamma} = 68.4\text{mN} \cdot \text{m}^{-1}, E_{\gamma} = 2 \times 10^{-2}, \sigma_{\gamma} = 1, \gamma = 68 \pm 1\text{mN} \cdot \text{m}^{-1}$$

$$A = 5.6\%$$

- 从天平的读数来看，本实验测量水的表面张力的重复性很好，随机误差小于仪器误差；
- 脱离法测量得到的表面张力大于接触法，说明吊片正好和液面接触时，由于表面张力的作用，部分吊片被拉入液面以下，该部分吊片受到浮力的作用，使的天平测量得到的拉力偏小，而脱离法则消除了浮力的影响，测到的表面张力更加准确；
- 脱离法、接触法测量得到的水的表面张力，均小于室温下的标准值，由多种原因造成，如水的纯度、温度等，详见分析讨论第 2 题。

2. 十二烷基苯磺酸钠表面活性剂水溶液临界胶束浓度 cmc 的测量

表 II 表面活性剂水溶液表面张力随浓度变化 ($\Delta m_{\text{仪}}=0.002\text{g}$, $\Delta l_{\text{仪}}=0.05\text{cm}$)

$l=2.00\text{cm}$, $m_{\text{杯}}=101.640\text{g}$, $m_{\text{杯+水}}=133.806\text{g}$, $m_{\text{总}}=166.770\text{g}$, $C_0=4.18\%$

N/drop	m_i/g	$C(\text{wt}\%)$	$\gamma(\text{mN/m})$
1	0.209	0.0020	51.2
5	0.193	0.0101	47.3
8	0.180	0.0162	44.1
11	0.165	0.0222	40.4
15	0.161	0.0303	39.4
20	0.167	0.0403	40.9
25	0.169	0.0502	41.4
36	0.162	0.0719	39.7
51	0.165	0.1012	40.4

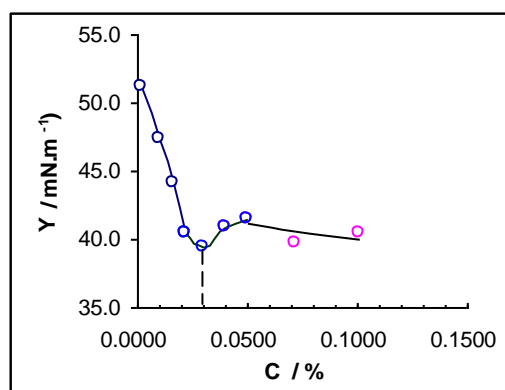


图 3 表面活性剂表面张力随浓度的变化

$$m_{\text{水}} = m_{\text{杯+水}} - m_{\text{杯}} = 32.166\text{g}$$

$$\Delta m_{\text{滴}} = m_{\text{总}} - m_{\text{杯+水}} = 166.770 - 133.806 = 0.798\text{g}, \text{单滴溶液 } m_{\text{滴}} = 0.798/51 = 0.0156\text{g}$$

浓度 c 和相应的表面张力数据结果如表 I 所示，数据处理举例如下：

当 $N=15$ 滴时， $C_{15} = 4.18\% \times (15 \times 0.0156) / (15 \times 0.0156 + 32.166) = 0.0303\%$

$$\gamma_{15} = \frac{\Delta m \cdot g}{2l} = \frac{0.161 \times 9.79}{2 \times 0.0200} = 39.4 \text{ mN} \cdot \text{m}^{-1}$$

表面活性剂水溶液表面张力随浓度变化如图 1 所示， $\text{cmc} \approx 0.0303\% (\text{wt}\%)$ ，和理论值 0.0418% 比较接近。

六. 分析讨论：

1. 吊片用滤纸为材料，有什么优点和不足？

湿滤纸和水溶液的接触角 $\rightarrow 0$ ，可以避开接触角的测量，滤纸的厚度和边长相比非常小，可以忽略不计，同时滤纸价格便宜，便于更换，滤纸边长也可以根据需要即时调整；不足之处是溶液中的表面活性剂可能粘附在纸片上，使表面张力的测量不够准确。

2. 分析纯水的表面张力与室温下公认值有误差的可能原因。

纯水表面张力和温度、水的纯度、吊片清洁程度、接触角，以及吊片边长长度、吊片的位置、天平的精确程度、读数稳定性等等多种因素有关，因此测量得到的表面张力和理论值可能会存在一定的差距。

11 实验名称 温度电测法

一. 目的与要求

1. 掌握电阻温度计测量温度的基本原理和方法。
2. 学习采用不平衡电桥测非电量的标定方法。
3. 了解热电偶测温原理。
4. 学习标定热电偶的方法。
5. 进一步熟悉电势差计的使用方法。

二. 原理

1. 电阻温度计与不平衡电桥

在 $-50\sim 150^{\circ}\text{C}$ 范围内铜电阻的阻值随温度变化的关系为：

$$R_t = R_0(1 + At + Bt^2 + Ct^3)$$

式中 R_0 、 R_t 分别为温度 0 度和温度 t 度时的电阻值， A 、 B 、 C 为参数。利用金属的这种性质来测量介质温度的仪器称为电阻温度计。它一般由铜电阻和不平衡电桥组成。

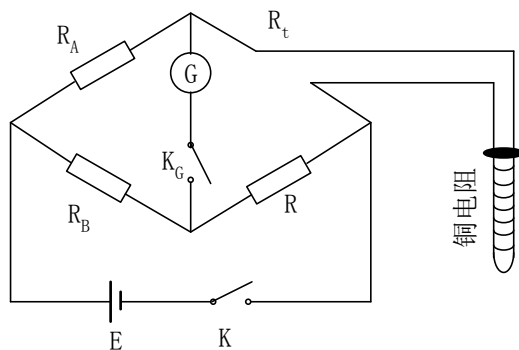


图 1 不平衡电桥

如果 R_t 、 R_A 、 R_B 和 R 配合适当，可使电桥平衡，电流计 G 中无电流流过。若温度变化使 R_t 值变化，则电桥处于不平衡状态， G 中有电流流过。一定的温度 t 对应一定的 R_t ，而 R_t 又对应于一定的 I_t 和 G 的偏转量。所以只要事先对 G 标定，就可以根据 G 的偏转量连续地测量温度。 G 的标定利用教材 p183 页铜电阻 R_t 与 t 的关系。在图 1 中取一标准电阻箱代替 R_t ，使 $R_A:R_B=1:1$ 。若从 -50°C 开始标定，则 R 取 41.7Ω ；若从 0°C 开始标定，则取 R 为 53.0Ω 。然后取电阻箱的阻值为 41.7Ω （或 53.0Ω ）可使电桥平衡，在 G 指针指零处，刻上 -50°C （或 0°C ）。然后依次取电阻箱的阻值为附表中所列的数值，并在指针相应偏转的各个位置刻上相应的温度值。这样，在电阻箱换回 R_t 后，就可以由不平衡电桥中电流计的偏转量直接读出温度。

2. 热电偶测温原理与标定

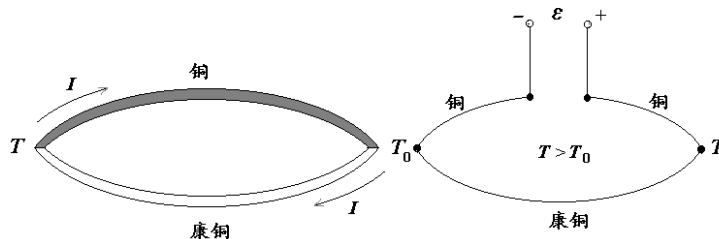


图 2 热电偶示意图

把两种不同的金属两端彼此焊接组成闭合回路，若两接点的温度不同，回路中就产生温

度差电动势。这两种金属的组合叫热电偶。

温差电动势的大小除了和组成的热电偶材料有关外，还决定于两接点的温度差。将一端的温度 t_0 固定(称为冷端，实验中利用冰水混合物)，另一端的温度 t 改变(称为热端)，温差电动势亦随之改变。电动势和温差的关系较复杂，其第一级近似式为

$$E = a(t - t_0)$$

式中 a 称为热电偶的温差电系数，其大小取决于组成热电偶的材料。

热电偶可以用电测量温度。用一只已知 a 值的热电偶，一端温度固定不变，另一端与待测物体接触，再用电位差计测出热电偶回路的电动势，就可以求出待测温度。由于温差电动势较低，因此在实验中利用电位差计来测量。

用实验测定温差电动势与测温端温度的关系曲线，称为温差电偶的定标。定标方法有两种：(1) 定点法。利用已知的几个固定点温度，例如：水的沸点、水的三相点、氮的三相点、某些纯金属的凝固点等，作为已知温度，测出温差电偶在这些已知温度下的电动势，用最小二乘法以多项式拟合实验曲线，求出温差电系数等常数。(2) 比较法。用标准测温仪(水银温度计)与未知温差电偶置于同一恒温加热器中，改变温度进行对比，也可作出 $E \sim t$ 定标曲线，本实验即采用比较法对铜-康铜温差电偶进行定标。

三. 仪器

1. 铜电阻、电阻箱、标准电阻、微安表、稳压电源、开关、恒温装置、温度计
2. 铜-康铜热电偶、电势差计、保温瓶、控温保温管式电炉、水银温度计

四. 实验内容与步骤

(一) 电阻温度计的标定与测温

1. 按图 1 连接电路， R_t 处接标准电阻箱。
2. 标定，在微安表上各偏转量处刻上对应的温度。本实验标定范围为 $0 \sim 100^\circ\text{C}$ 。
3. 检验，用标定好的电阻温度计分别测量不同温度的水温，同时与水银温度计测出的结果进行比较。

(二) 热电偶标定

1. 连接电路。

将热电偶的电压端接到电位差计上“未知”端。注意极性，对铜-康铜热电偶中康铜断开，对应冷端为正，相反为负。电路如图 3 所示。

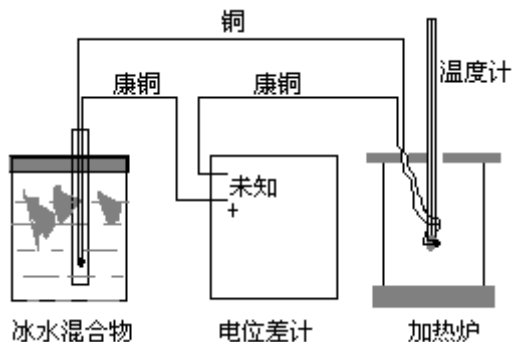


图 3

2. 校准工作电流

先将电位差计上功能开关 K 调至“标准”，调节面板右上角的“电流调节”旋钮，使检流计指“0”，此时工作电流即调好了。

3. 测出室温下的初始电动势

先将 K 拨至“未知”，然后，调节右下方的读数盘，使检流计指“0”，同时读出温度计和电位差计上读数盘的数值。要注意的面板上“倍率”开关，根据电势差太小，合理选择倍率。

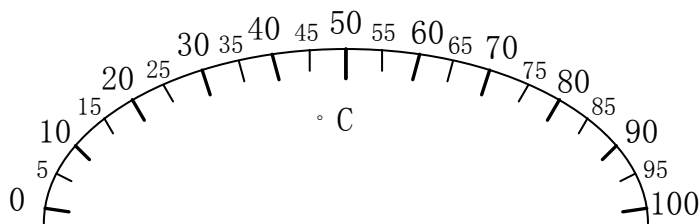
4. 加热测测量

自 40℃起，每升高 20℃测量一组 t 和 E，测量到 260℃。

五. 数据处理与分析

1. 电阻温度计的标定与测温

(1) 电阻温度计标定表头示意图



电阻温度计最小刻度 5℃。

(2) 水温测定记录

酒精温度计最小分度为 1℃；铜电阻温度计最小分度为 5℃。

	酒精温度计	铜电阻温度计
冷水	19.3℃	18℃
热水	54.6℃	53℃

1、热电偶标定

次 数	t_0 (°C) (冷端)	t (°C) (热端)	δt (°C) (温差)	E (mV)
1	0	40	40	0.210
2		60	60	1.125
3		80	80	2.015
4		100	100	3.055
5		120	120	4.194
6		140	140	5.179
7		160	160	6.199
8		180	180	6.998
9		200	200	7.852
10		220	220	8.678
11		240	240	9.480
12		260	260	10.310

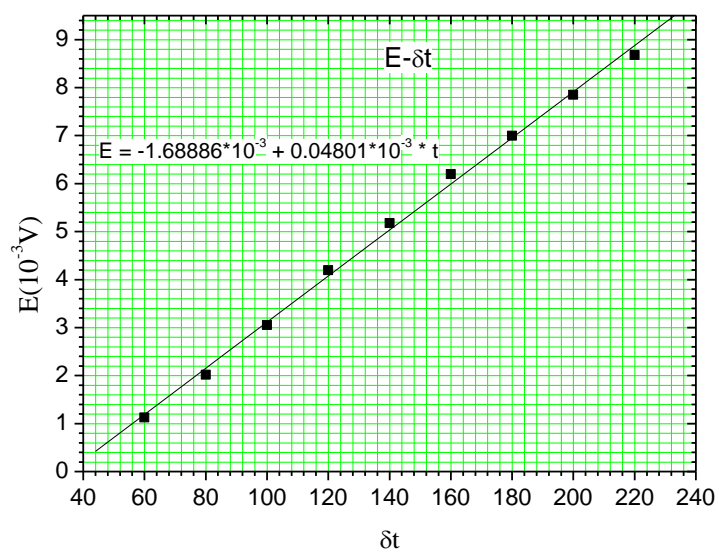


图 4 热电偶的 $E \sim \delta t$ 关系

从图 4 中的拟合结果可以得到，本实验所使用的铜—康铜热电偶的温差电系数 $a = 0.048 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。

12 实验名称 霍尔法测量铁磁材料的磁滞回线和磁化曲线

一. 目的与要求

1. 了解产生霍尔效应的机理。
2. 了解用霍尔效应测量磁场的原理和基本方法
3. 认识铁磁物质的磁化规律，测定样品的磁化曲线。
4. 测绘样品的磁滞回线，测定样品的 H_c 、 B_r 、 H_m 、 B_m

二. 原理

1. 铁磁材料的磁化及磁导率

铁磁物质的磁化过程很复杂，这主要是由于它具有磁滞的特性。一般都是通过测量磁化场的磁场强度 H 和磁感应强度 B 之间的关系来研究其磁性规律的。

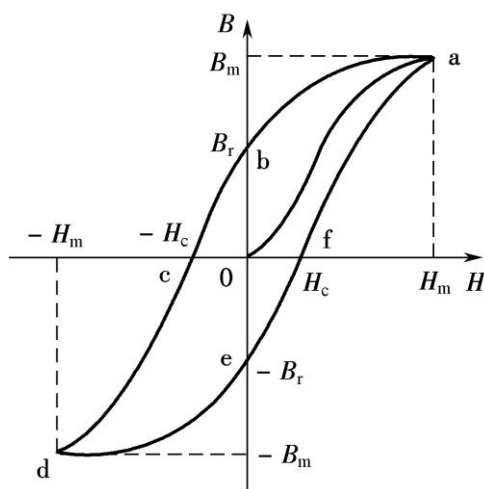


图 1 起始磁化曲线和磁滞回线

当铁磁物质中不存在磁化场时， H 和 B 均为零，即图 1 中 $B \sim H$ 曲线的坐标原点 0。随着磁化场 H 的增加， B 也随之增加，但两者之间不是线性关系。当 H 增加到一定值时， B 不再增加（或增加十分缓慢），这说明该物质的磁化已达到饱和状态。 H_m 和 B_m 分别为饱和时的磁场强度和磁感应强度（对应于图中 a 点）。如果再使 H 逐渐退到零，则与此同时 B 也逐渐减少。然而 H 和 B 对应的曲线轨迹并不沿原曲线轨迹 $a \rightarrow 0$ 返回，而是沿另一曲线 $a \rightarrow b$ 下降到 B_r ，这说明当 H 下降为零时，铁磁物质中仍保留一定的磁性，这种现象称为磁滞， B_r 称为剩磁。将磁化场反向，再逐渐增加其强度，直到 $H = -H_c$ ，磁感应强度消失，这说明要

消除剩磁，必须施加反向磁场 H_c 。 H_c 称为矫顽力。它的大小反映铁磁材料保持剩磁状态的能力。图 1 表明，当磁场按 $H_m \rightarrow 0 \rightarrow -H_c \rightarrow -H_m \rightarrow 0 \rightarrow H_c \rightarrow H_m$ 次序变化时， B 所经历的相应变化为 $B_m \rightarrow B_r \rightarrow 0 \rightarrow -B_m \rightarrow -B_r \rightarrow 0 \rightarrow B_m$ 。于是得到一条闭合的 $B \sim H$ 曲线，称为磁滞回线。所以，当铁磁材料处于交变磁场中时（如变压器中的铁心），它将沿磁滞回线反复被磁化→去磁→反向磁化→反向去磁。在此过程中要消耗额外的能量，并以热的形式从铁磁材料中释放，这种损耗称为磁滞损耗。可以证明，磁滞损耗与磁滞回线所围面积成正比。

2. $B \sim H$ 曲线的测量方法

将待测的铁磁材料做成环形样品，绕上一组线圈，在环形样品的中间开一极窄的均匀气隙，在线圈中通以励磁电流，则铁磁材料即被磁化，气隙中的磁场应与铁磁材料中的磁场一致。如果样品截面的线度与气隙的宽度比例恰当，则气隙中有一定区域的磁场是均匀的。若在线圈中通过的电流为 I ，则磁化场的磁场强度 H 为

$$H = \frac{N}{\bar{l}} I$$

其中 N 为磁化线圈的匝数， \bar{l} 为样品平均磁路长度。变化通电线圈中的励磁电流，磁场强度 H 也作相应的变化，用特斯拉计测得气隙中均匀磁场区域内的磁感应强度 B 与 H 的对应关系，即能得到该铁磁材料的磁滞回线和磁化曲线，从中测得剩磁、矫顽力及饱和磁感应强度等表征铁磁材料基本磁特性的物理量

三. 仪器

HM - 1 霍尔法磁化曲线与磁滞回线实验仪，其中包括：SXG - 2000 数字式毫特计（实验仪的右侧），量程 2000 mT；IS600 恒流电源（实验仪的左侧），可调恒定电流 $0 \sim 600.0 \text{ mA}$ ；实心铁芯样品（绕有 2000 匝励磁线圈，截面长 2.00cm、宽 2.00cm，气隙间隔 2.0mm，样品的平均磁路长度为 24.00cm）

四. 实验内容与步骤

1. 铁磁材料磁隙磁场分布的测量和样品退磁

样品气隙中的磁场分布与横向位置 X 有关，测试时，应将毫特计的霍尔探头置于磁感应强度最大值的均匀区域内。我们可以测量样品中剩磁的磁感应强度 B 与 X 的关系，来确定测试磁化曲线和磁滞回线时探头的放置位置。

转动霍尔探头支架上的鼓轮，将探头平行地插入气隙，注意不能与样品接触。线圈通以

一定的直流电流，用毫特计沿 X 方向等间隔（1.0mm）测出磁场分布，以均匀区域内最大值处为测量点。

由于铁磁材料中有剩磁存在，在测量磁化曲线和磁滞回线前必须对样品进行退磁处理。在测量点，将励磁电流调到 600mA，然后减小到零，再把电流反向，调到 600mA，然后也调到零。这样，不断改变电流方向，同时逐渐减小励磁电流的大小，重复上述过程直至毫特计示值为零，退磁完成。

2. 起始磁化曲线的测量。

励磁电流 I 以 50mA 为间隔从零开始逐渐增加，直至磁感应强度 B 趋向饱和，即测得起始磁化曲线。

3. 磁滞回线的测量。

为了得到一个中心对称而稳定的磁滞回线，在测量磁滞回线之前必须对样品进行反复磁化，称为磁锻炼。磁锻炼是这样实现的：当测量起始磁化曲线 B 增加得十分缓慢（即达到饱和状态）时，励磁电流 I_m ，保持 I_m 不变，把双刀换向开关来回拨动 10 次即可。在拉动开关时，触点从接触到断开的时间应该长些。磁锻炼后就可以测量磁滞回线。

调节励磁电流从饱和电流 I_m 开始，每隔 50mA 减小到零，然后双刀换向开关将电流换向，电流反向从零增加（每隔 50mA）到 $-I_m$ ，这样使励磁电流 I 经 $I_m \rightarrow 0 \rightarrow -I_m \rightarrow 0 \rightarrow I_m$ 变化（每隔 50mA），记录相应的磁感应强度 B 值。由励磁电流 I 可得到 H 。在直角坐标纸上作铁磁材料样品的起始磁化曲线和磁滞回线，读出该样品的饱和磁感应强度 B_m 、矫顽力 H_c 以及剩磁 B_r 。由于 H 数据有效数字比较多，在直角坐标纸上画出 $B \sim H$ 曲线不易，我们可以作 $B \sim I$ 曲线，二者变化规律相同，同样在图上可读出 B_m 和 B_r ，至于矫顽力 H_c ，可以先读出 I_c （即对应于 H_c 的电流），再用公式 $H = \frac{N}{l} I$ 计算得到。

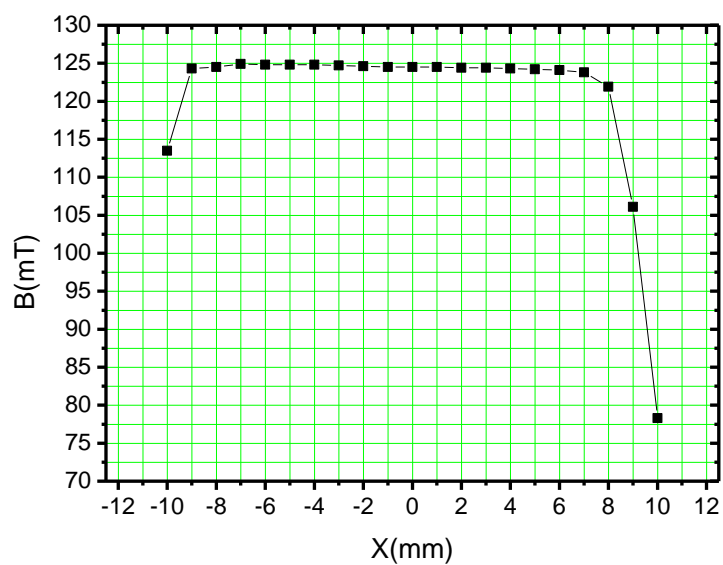
H_c 的电流)，再用公式 $H = \frac{N}{l} I$ 计算得到。

五. 数据处理与分析

1. 铁磁材料磁隙磁场分布

X (mm)	-10.0	-9.0	-8.0	-7.0	-6.0	-5.0
B (mT)	113.5	124.3	124.5	124.9	124.8	124.8
X (mm)	-4.0	-3.0	-2.0	-1.0	0.0	1.0
B (mT)	124.8	124.7	124.6	124.5	124.5	124.5
X (mm)	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0
B (mT)	124.4	124.4	124.3	124.2	124.1	123.8
X (mm)	8.0	9.0	10.0			
B (mT)	121.9	106.1	78.3			

磁隙磁场分布曲线如下图所示：



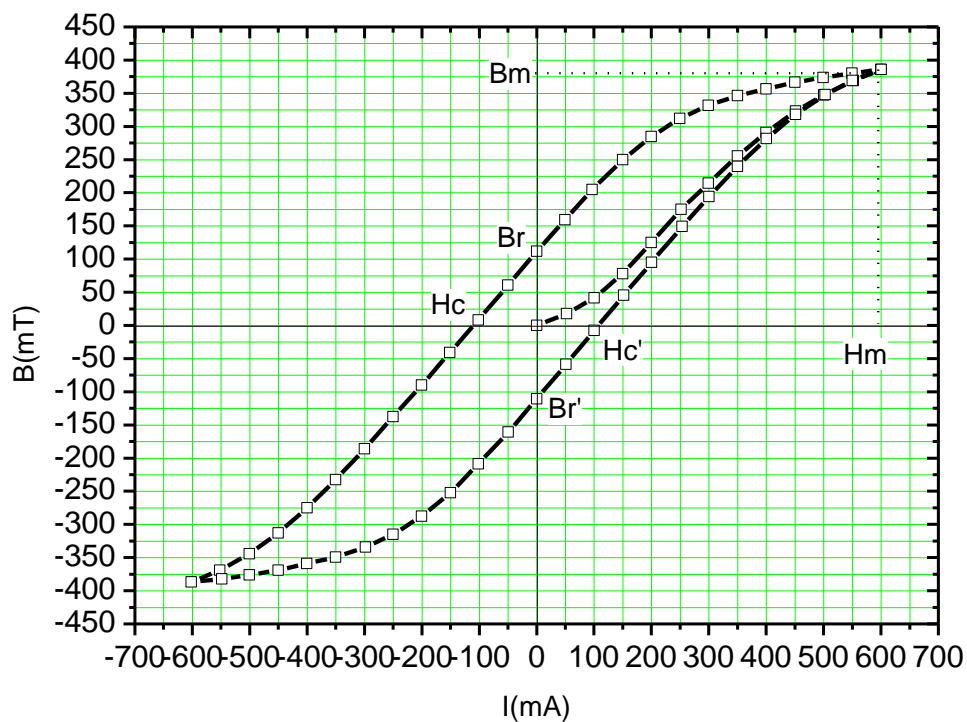
2. 铁磁材料起始磁化曲线

测量点位置 $X_B = -2.0$;

励磁电流 I (mA)	0.0	52.2	100.1	150.2	199.7	251.9	299.1
磁感应强度 B (mT)	0.2	17.8	41.5	78.0	124.7	175.0	214.6
励磁电流 I (mA)	350.4	399.9	451.5	500.4	551.7	600.1	
磁感应强度 B (mT)	255.4	290.7	323.0	347.4	369.0	385.7	

3. 铁磁材料磁滞回线

励磁电流 I (mA)	600.1	549.7	499.5	450.2	399.7	350.1	299.1
磁感应强度 B (mT)	385.7	380.1	373.8	366.5	356.7	346.4	331.6
励磁电流 I (mA)	249.7	199.6	149.8	97.1	49.2	0.2	-50.1
磁感应强度 B (mT)	311.9	284.8	249.8	204.7	159.2	111.7	60.6
励磁电流 I (mA)	-101.6	-151.0	-200.6	-250.2	-300.0	-350.4	-399.9
磁感应强度 B (mT)	8.3	-41.1	-90.0	-137.7	-185.9	-232.8	-275.0
励磁电流 I (mA)	-450.3	-500.7	-552.2	-601.8	-548.7	-500.7	-450.3
磁感应强度 B (mT)	-313.2	-344.1	-369.1	-387.0	-382.2	-376.3	-369.0
励磁电流 I (mA)	-400.3	-350.1	-298.3	-250.2	-200.2	-150.1	-101.5
磁感应强度 B (mT)	-359.2	-349.2	-334.0	-314.9	-287.7	-252.2	-208.8
励磁电流 I (mA)	-49.4	0.4	50.9	100.4	151.7	200.4	253.9
磁感应强度 B (mT)	-160.8	-110.8	-58.7	-7.6	45.5	95.3	149.2
励磁电流 I (mA)	300.4	350.2	400.5	451.2	502.7	550.3	600.3
磁感应强度 B (mT)	194.1	239.8	281.6	318.1	347.8	369.0	385.9



如图可知，饱和磁感应强度 $B_m = 379.7 \text{ mT}$ ；剩磁 $B_r = 114.7 \text{ mT}$ ；利用公式 $H = \frac{N}{l} I$ ，矫顽力为：

$$H_c = \frac{N}{l} I_c = \frac{2000}{24.0 \times 10^{-2}} \times 108.31 \times 10^{-3} = 902.58 (\text{A/m})$$

饱和磁化强度为： $H_m = \frac{N}{l} I_m = \frac{2000}{24.0 \times 10^{-2}} \times 595.0 \times 10^{-3} = 4958.3 (\text{A/m})$

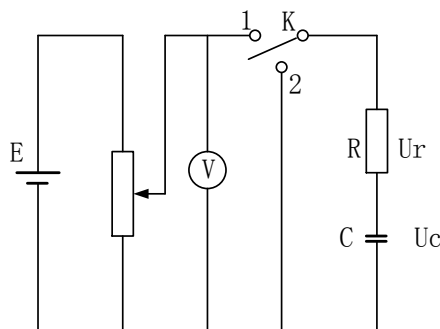
13 实验名称 RC 串联电路暂态过程的研究

一.目的与要求

1. 学习如何通过实验方法研究有关 RC 串联电路的暂态过程。
2. 加深对电容特性的认识和对 RC 电路特性的理解。
3. 用电压表测和来研究 RC 串联电路充放电电压曲线。
4. 研究不同 R(或 C)的 RC 串联电路的各种特性。
5. 由实验测量，并计算常数，将此值与理论公式求得值进行比较。
6. 用示波器观察 RC 串联电路的充放电电压曲线和时间常数。
7. 用示波器观察方波作用下的 RC 电路波形，进一步研究电容的充放电特性。

二.原理

如下图所示，在 RC 串联电路中，当开关 K 拨向 1 时，电源通过电阻 R 对电容 C 进行充电。当电容器充电达到稳定后，把开关 K 拨向 2，此时电容 C 通过 R 放电。这两个过程就是 RC 电路的暂态过程。



RC 串联电路

对于电容 C 的充放电过程，用电容两端的电压可以表征为：

$$U_C(t) = E(1 - \exp(-\frac{t}{RC})) \quad (\text{充电过程})$$

$$U_C(t) = E \exp(-\frac{t}{RC}) \quad (\text{放电过程})$$

从中可以看到，充放电的上升和下降时间取决于参量 RC，称 $\tau = RC$ 为 RC 电路时间常数，其大小标志着暂态过程的快慢。同时， $T_{1/2}$ 也是反映暂态过程快慢的一个重要参量，即在放电过程中， $U_C(t)$ 下降到初始值的一半时所需的时间。

$$\frac{1}{2}E = Ee^{-\frac{T_{1/2}}{\tau}}, \quad T_{1/2} = 0.6931\tau$$

理论上证明，充放电电压曲线的交点所对应的时间即是 $T_{1/2}$ 。

三.仪器

各种不同量值的电阻电容、数字电压表、稳压电源、示波器、开关、秒表。

四.实验内容与步骤

- 1.用电压法测量充放电曲线。
- 2.用示波器观察输入方波时的暂态过程。

五. 数据处理与分析

- 1.用电压法测量充放电曲线

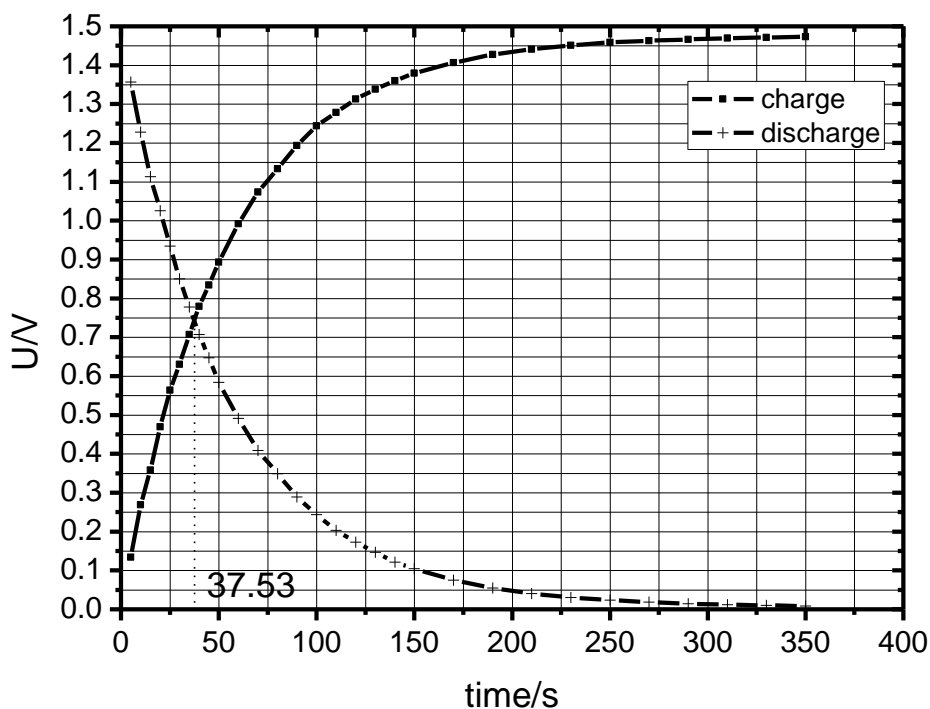
$R=50000\Omega$; $C=1000\mu F$

充电数据:

t/s	U/V	t/s	U/V	t/s	U/V
5	0.1343	60	0.9920	170	1.4068
10	0.2690	70	1.0735	190	1.4273
15	0.3584	80	1.1334	210	1.4413
20	0.4698	90	1.1932	230	1.4512
25	0.5635	100	1.2435	250	1.4586
30	0.6303	110	1.2781	270	1.4633
35	0.7071	120	1.3129	290	1.4664
40	0.7793	130	1.3380	310	1.4693
45	0.8346	140	1.3598	330	1.4714
50	0.8935	150	1.3794	350	1.4728

放电数据:

t/s	U/V	t/s	U/V	t/s	U/V
5	1.3571	60	0.4909	170	0.0753
10	1.2274	70	0.4089	190	0.0547
15	1.1134	80	0.3486	210	0.0408
20	1.0253	90	0.2892	230	0.0306
25	0.9346	100	0.2437	250	0.0234
30	0.8506	110	0.2030	270	0.0183
35	0.7781	120	0.1728	290	0.0146
40	0.7071	130	0.1463	310	0.0119
45	0.6471	140	0.1217	330	0.0101
50	0.5844	150	0.1041	350	0.0086



RC 串联电路充放电电压曲线图

理论上证明，充放电电压曲线的交点所对应的时间即是 $T_{1/2}$ ，直接从图中可以读出，当 $R=50000\Omega$ ， $C=1000\mu\text{F}$ 时， $T_{1/2} = 37.53\text{s}$ 。又因为 $T_{1/2} = 0.6931\tau$ ；所以，实验测量的 $\tau_{\text{实验}}$

$$= \frac{T_{1/2}}{0.6931} = 54.15\text{s}$$

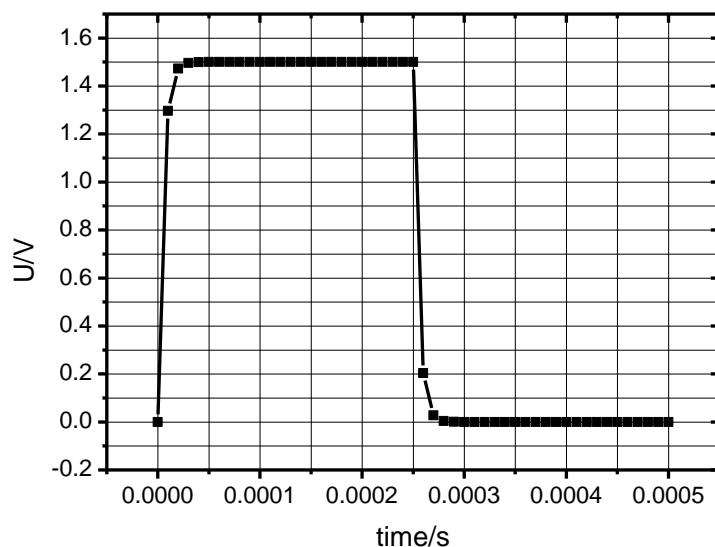
而理论的时间常数 $\tau = RC = 50000\Omega \times 1000\mu\text{F} = 50.00\text{s}$ ，时间常数 τ 的相对误差为

$$E = \frac{|\tau_{\text{实验}} - \tau|}{\tau} \times 100\% = \frac{54.15 - 50.00}{50.00} \times 100\% = 8.3\%$$

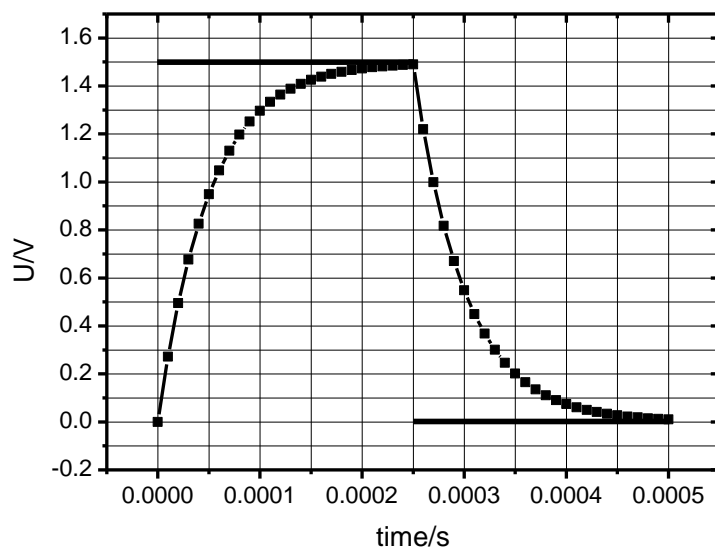
2. 用示波器观察输入方波时的暂态过程

固定电容 $C=0.22\mu\text{F}$ ，改变不同的 R 的阻值，观察在电压幅值为 1.5V ，频率 $f=2000\text{Hz}$ ，即周期 $T=0.5\text{ms}$ 的方波作用下 RC 串联电路的充放电过程。三种典型的曲线如下：（说明：图中仅画出了在第一个方波周期作用下的充放电过程，在连续方波作用下，第三个图的曲线将是在一个电压值上的锯齿波形状。）

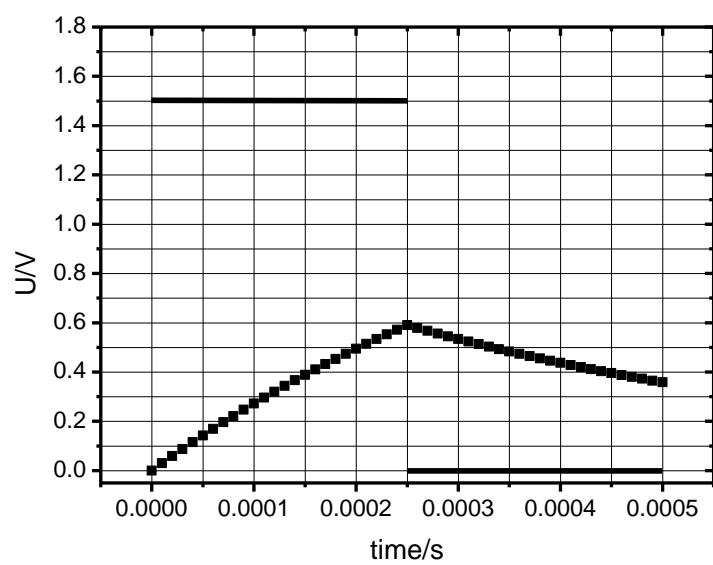
（1）当 $C=0.22\mu\text{F}$ ， $R=0.02273\text{K}\Omega$ ，此时 $T_{\text{方波}}(0.5\text{ms}) \ll \tau(\ll 0.005\text{ms})$ 。如图可见，充电时，电路能够迅速充电；而放电时，电路能够快速放电。



(2) 当 $C=0.22\mu\text{F}$, $R=0.2273\text{K}\Omega$ 时, 此时 $T_{\text{方波}}(0.5\text{ms}) \approx 10\tau(\approx 0.05\text{ms})$ 。如图可见, 充电的半个周期内, 电路几乎恰好能够充满; 而在放电的半个周期内, 电路几乎恰好能够放完。



(3) 当 $C=0.22\mu\text{F}$, $R=2.273\text{K}\Omega$ 时, 此时 $T_{\text{方波}}(0.5\text{ms}) \approx \tau(\approx 0.5\text{ms})$



14 实验名称 声 速 的 测 量

一.目的与要求

- (1) 共振干涉法（驻波法）和相位比较法（行波法）测量声速的原理和方法。
- (2) 加强对驻波及振动合成等理论的理解。
- (3) 了解压电换能器的功能和培养综合使用仪器的能力。

二.原理

声速 v 、声源振动频率 f 和波长 λ 之间的关系为：

$$v = f\lambda \quad (1)$$

可见，只要测得声波的频率 f 和波长 λ ，就可求得声速 v 。其中声波频率 f 可通过频率计测得。本实验的主要任务是测量声波波长 λ ，常用的方法有驻波法和相位法。

一. 相位法

波是振动状态的传播，也可以说是相位的传播。在波的传播方向上的任何两点，如果其振动状态相同或者其相位差为 2π 的整数倍，这两点间的距离应等于波长的整数倍，即

$$l = n\lambda \quad (n \text{ 为一正整数}) \quad (2)$$

利用这个公式可精确测量波长。

若超声波发生器发出的声波是平面波，当接受器端面垂直于波的传播方向时，其端面上各点都具有相同的相位。沿传播方向移动接收器时，总可以找到一个位置使得接受到的信号与发射器的激励电信号同相。继续移动接受器，直到找到的信号再一次与发射器的激励电信号同相时，移过的这段距离就等于声波的波长。

二. 驻波法

按照波动理论，发生器发出的平面声波经介质到接收器，若接收面与发射面平行，声波在接收面处就会被垂直反射，于是平面声波在两端面间来回反射并叠加。当接收端面与发射头间的距离恰好等于半波长的整数倍时，叠加后的波就形成驻波。此时相邻两波节（或波腹）间的距离等于半个波长（即 $\lambda/2$ ）。当发生器的激励频率等于驻波系统的固有频率（本实验中压电陶瓷的固有频率）时，会产生驻波共振，波腹处的振幅达到最大值。

声波是一种纵波。由纵波的性质可以证明，驻波波节处的声压最大。当发生共振时，接收端面处为一波节，接收到的声压最大，转换成的电信号也最强。移动接收器到某个共振位置时，如果示波器上出现了最强的信号，继续移动接收器，再次出现最强的信号时，则两次共振位置之间的距离即为 $\lambda/2$ 。

三.仪器

声速测量仪，示波器，信号发生器

四.实验内容与步骤

1. 用驻波法测空气中的声速

- (1) 按图 1 连接电路，使 S_1 和 S_2 靠近并留有适当的空隙，使两端面平行且与游标尺正交。

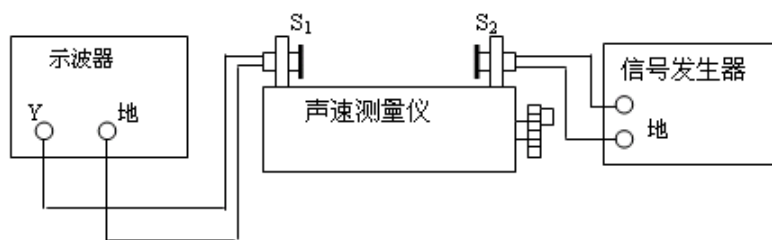


图1 驻波法测声速实验装置图

(2) 根据实验室给出的压电陶瓷换能片的振动频率 f (约为 40KHz 左右), 将信号发生器的输出频率调至 f 附近, 缓慢移动 S_2 , 当在示波器上看到正弦波首次出现振幅较大处, 固定 S_2 , 再仔细微调信号发生器的输出频率, 使荧光屏上图形振幅达到最大, 读出共振频率 f 。

(3) 在共振条件下, 将 S_2 移近 S_1 , 再缓慢移开 S_2 , 当示波器上出现振幅最大时, 记下 S_2 的位置 L_0 。

(4) 由近及远移动 S_2 , 逐次记下各振幅最大时 S_2 的位置为 L_1 、 L_2 、... L_{11} , 共测 12 个以上。

(5) 用逐差法算出声波波长的平均值。

2. 用相位法测空气中的声速

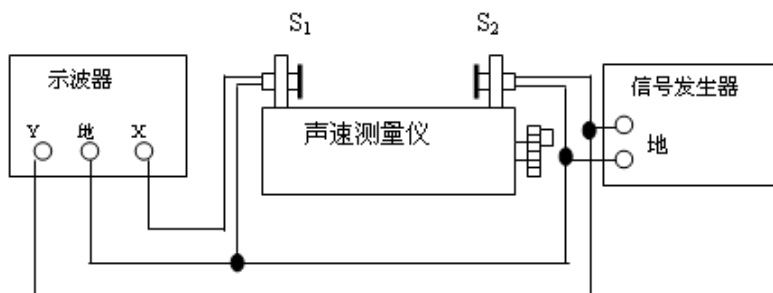


图2 相位法测声速实验装置图

(1) 按图 2 连接电路。

(2) 将示波器“秒/格”旋钮旋至 X-Y 档, 信号发生器接示波器 CH2 通道, 用李萨如图形观察发射波与接收波的位相差 (示波器的使用请参见实验十四的附录)。

(3) 在共振条件下, 使 S_2 靠近 S_1 , 然后慢慢移开 S_2 , 当示波器上出现 45° 倾斜线时, 微调游标卡尺的微调螺丝, 使图形稳定, 记下 S_2 的位置 L'_0 。

(4) 继续缓慢移开 S_2 , 依次记下示波器上出现直线时游标卡尺的读数 L'_1 、 L'_2 ... L'_{11} , 共测 12 个以上。

(5) 用逐差法算出声波波长的平均值。

(6) 记下室温 $t^{\circ}\text{C}$ ，根据声速的理论公式计算 $t^{\circ}\text{C}$ 时声速的理论值：

$$V = V_0 \sqrt{\frac{T}{T_0}} = V_0 \sqrt{1 + \frac{t}{273.15}}$$

式中： $T=(t+273.15)\text{K}$ ； $V_0=331.45\text{m/s}$ (为 $T_0=273.15\text{K}$ 时的声速)。V 的单位为 m/s 。

3. 用驻波法测水中的声速

方法同步骤 1，此时只是把 S_1 和 S_2 放入水槽中。此时压电陶瓷换能片的振动频率 f 约为 250KHz 左右。

五.数据处理与分析

1.逐差法

(1) 两种测量方法均用逐差法处理 ΔX ：

把 12 个数据分成两组 X_{i+6} 、 X_i ，

$$(\Delta X)_j = |X_{i+6} - X_i| \quad j=1、2、3、4、5、6$$

$$\overline{(\Delta X)} = \frac{\sum_{j=1}^6 (\Delta X)_j}{6}, \quad \sigma_{(\Delta X)} = \frac{1}{6} \sqrt{12 \sigma_{x\text{仪}}^2} = \frac{1}{\sqrt{3}} \sigma_{x\text{仪}}, \quad \text{其中 } \sigma_{x\text{仪}} = \frac{\Delta_{x\text{仪}}}{\sqrt{3}},$$

$$\Delta_{x\text{仪}} = 0.004\text{mm}$$

(2) λ 的计算

$$\frac{\lambda}{2} = \frac{\overline{(\Delta X)}}{6}, \quad \lambda = \frac{\overline{(\Delta X)}}{3}$$

(3) 声速的计算

$$V = f\lambda = \frac{1}{3} f \overline{(\Delta X)}$$

$$\sigma_V = V \sqrt{\left(\frac{\sigma_{f\text{仪}}}{f}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\Delta X}}{\overline{(\Delta X)}}\right)^2}$$

(4) 理论值的计算

$$V_S = V_0 \sqrt{\frac{T}{T_0}}$$

$$V_0=331.45 \text{ m/s } (T_0=273.15\text{K}), \quad T=(t^{\circ}\text{C}+273.15) \text{ K}$$

(5) 百分误差的计算

$$E = \frac{|V - V_S|}{V_S} \times 100\%$$

2.共振干涉法测空气中的声速

共振频率= 45.1KHz 室温= 25.8°C

	1	2	3	4	5	6
X_i/mm	11.115	15.040	19.000	22.850	26.660	30.540
	7	8	9	10	11	12
X_i/mm	34.412	38.248	42.182	46.012	49.808	53.736
$(\Delta X)_j/\text{mm}$	23.297	23.208	23.182	23.162	23.148	23.196

$$\overline{(\Delta X)} = \frac{\sum_{j=1}^6 (\Delta X)_j}{6} = 23.199 \text{ mm}$$

$$V = f\lambda = \frac{1}{3} f \overline{(\Delta X)} = \frac{1}{3} \times 45.1 \times 10^3 \times 23.199 \times 10^{-3} \text{ m/s}$$

$$\sigma_{(\Delta X)} = \frac{1}{6} \sqrt{12 \sigma_{x/\lambda}^2} = \frac{\sqrt{3}}{3} \sigma_{x/\lambda} = 0.002 \text{ mm}$$

$$\sigma_V = V \sqrt{\left(\frac{\sigma_{f/\lambda}}{f}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\Delta X}}{\Delta X}\right)^2} = 349 \times \sqrt{\left(\frac{0.3}{45.1}\right)^2 + \left(\frac{0.002}{23.199}\right)^2} = 2 \text{ m/s}$$

$$V \pm \sigma_V = 349 \pm 2 \text{ m/s},$$

$$V_s = V_0 \sqrt{\frac{T}{T_0}} = 331.45 \times \sqrt{\frac{288.15}{273.15}} = 346.75 \text{ m/s}$$

$$E = \frac{|V - V_s|}{V_s} \times 100\% = \frac{349 - 346.75}{346.75} = 0.6\%$$

3. 相位比较法测空气中的声速

	1	2	3	4	5	6
X_i'/mm	11.294	15.198	19.116	23.056	26.858	30.830
	7	8	9	10	11	12
X_i'/mm	34.892	38.502	42.385	46.240	50.091	53.855
$(\Delta X)_j'/\text{mm}$	23.598	23.304	23.269	23.204	23.233	23.025

$$\overline{(\Delta X)'} = \frac{\sum_{j=1}^6 (\Delta X)_j'}{6} = 23.282 \text{ mm},$$

$$V = f\lambda = \frac{1}{3} f \overline{(\Delta X)'} = \frac{1}{3} \times 45.1 \times 10^3 \times 23.282 \times 10^{-3} = 350 \text{ m/s}$$

$$\sigma_V = V \sqrt{\left(\frac{\sigma_{f/\lambda}}{f}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\Delta X'}}{\Delta X'}\right)^2} = 350 \times \sqrt{\left(\frac{0.3}{45.1}\right)^2 + \left(\frac{0.002}{23.199}\right)^2} = 2 \text{ m/s},$$

$$V \pm \sigma_V = 350 \pm 2 \text{ m/s}$$

$$V_s = V_0 \sqrt{\frac{T}{T_0}} = 331.45 \times \sqrt{\frac{288.15}{273.15}} = 346.75 \text{ m/s} ,$$

$$E = \frac{|V - V_s|}{V_s} \times 100\% = \frac{350 - 346.75}{346.75} = 0.9\%$$

4.共振干涉法测量水中的声速

共振频率=258.8KHz

	1	2	3	4	5	6
X_i' / mm	17.945	20.915	23.818	26.713	29.713	32.541
	7	8	9	10	11	12
X_i' / mm	35.565	38.410	41.381	44.280	47.115	49.935
$(\Delta X)''_j / \text{mm}$	17.620	17.495	17.563	17.567	17.402	17.394

$$\overline{(\Delta X'')} = \frac{\sum_{j=1}^6 (\Delta X'')_j}{6} = 17.507 \text{ mm} ,$$

$$V = f\lambda = \frac{1}{3} f \overline{(\Delta X'')} = \frac{1}{3} \times 258.8 \times 10^3 \times 17.507 \times 10^{-3} = 1510.27 \text{ m/s}$$

六.分析讨论题

如何调节与判断测量系统是否处于共振状态？

答：根据实验室给出的压电陶瓷换能片的振动频率 f (约为 40KHz 左右)，将信号发生器的输出频率调至 f 附近，缓慢移动 S_2 ，当在示波器上看到正弦波首次出现振幅较大处，固定 S_2 ，再仔细微调信号发生器的输出频率，使荧光屏上图形振幅达到最大，读出共振频率 f 。

15 实验名称 动态悬挂法测定金属材料的杨氏模量

一. 目的与要求

1. 用动态悬挂法测定金属材料的杨氏模量。
2. 培养综合应用物理仪器的能力。
3. 学习用图示法表达实验结果。

二. 原理

根据棒的横振动方程：

$$\frac{\partial^4 y}{\partial^4 x} + \frac{\rho S}{YJ} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

式中 ρ 、 S 、 Y 、 J 分别表示材料的密度、样品（棒）的截面积、材料的杨氏模量、特定截面的惯量矩。求解方程，得圆形棒的杨氏模量为

$$Y = 1.6067 \frac{l^3 m}{d^4} f^2 \quad (2)$$

式中 l 为棒长， d 为棒的界面直径， m 为棒的质量。若是矩形棒，则为

$$Y = 0.9464 \frac{l^3 m}{bh^3} f^3 \quad (3)$$

式中 l 为棒长， b 、 h 分别为棒的宽、厚， m 为棒的质量。

在实验中测出样品棒的固有频率 f ，即可由（2）、（3）式计算出样品的杨氏模量 Y 。

在国际单位制中杨氏模量的单位为牛顿·米⁻²。

本实验装置如图 1 所示。

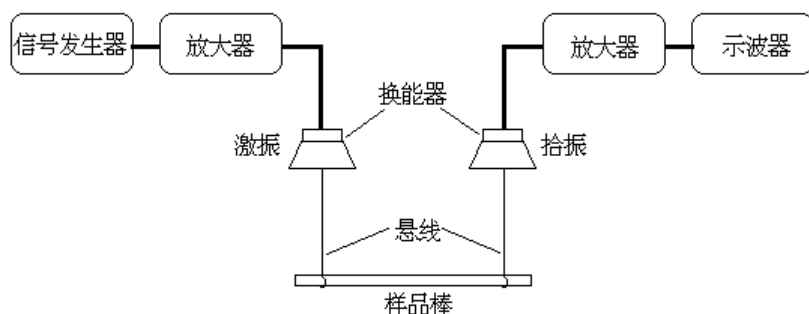


图 1 动态悬挂法测量杨氏模量实验装置图

将信号发生器输出的等幅正弦波信号，经过放大器加在激振器上，把电信号转变成机械振动，在由悬线把机械振动传给样棒，使得样棒受迫横振动。样棒另一端的悬线把样棒的振动传给拾振器，这时机械振动又转变成电信号，该信号经放大后送到示波器上显示。

当信号发生器的频率不等于样棒的固有频率时，样棒不发生共振，示波器显示屏上的信

号的幅度不大。当信号发生器的信号频率等于样棒的固有频率时，样棒发生共振，示波器上波形幅度突然增大，读出此时的频率为共振频率。由于样棒的固有频率与共振频率相差甚小，可作为样棒的固有频率。

三. 仪器

悬挂法杨氏模量测量仪，示波器，低频信号发生器，电子秤，游标卡尺，铜棒和不锈钢圆棒样品。

四. 实验内容与步骤

1. 测定样棒的长度、直径和质量；

2. 在室温下不锈钢和铜的杨氏模量分别约为 2×10^{11} 牛顿·米⁻² 和 1.2×10^{11} 牛顿·米⁻²，先估算出共振频率，以便寻找共振点。

3. 分别测出不锈钢棒和铜棒的固有频率。

4. 利用（2）式分别计算出不锈钢棒和铜棒的杨氏模量。

五. 数据处理与分析

1. 圆形棒试样的几何尺寸和质量

$$\Delta d_{\text{仪}} = \pm 0.004 \text{ mm}; \quad \Delta l_{\text{仪}} = 0.02 \text{ mm}; \quad \Delta m_{\text{仪}} = 0.2 \text{ g};$$

材料	直径 d/mm							长度 l/cm	质量 m/g
	1	2	3	4	5	6	平均		
Fe	5.957	5.953	5.961	5.956	5.960	5.951	5.956	16.054	35.3
Cu	5.883	5.878	5.882	5.876	5.869	5.875	5.877	16.042	37.4

2. 两种材料的共振频率

测量次数	1	2	3	4	5	6	平均
Fe	1008.0	1009.2	1008.8	1007.5	1009.0	1008.4	1008.5
Cu	722.4	724.2	725.9	724.7	723.4	725.8	724.4

$$\text{钢棒: } \bar{d} = 5.956 \text{ mm}; \quad \Delta d_{\text{仪}} = \pm 0.004 \text{ mm}; \quad \sigma_{d\text{仪}} = 0.004/\sqrt{3} = 0.002 \text{ mm}$$

$$\sigma_d = \sqrt{\frac{(5.957-5.956)^2 + (5.953-5.956)^2 + (5.961-5.956)^2 + (5.956-5.956)^2 + (5.960-5.956)^2 + (5.951-5.956)^2}{6-1}}$$

$$= 0.004 \text{ mm} > \sigma_{\text{仪}}$$

所以, $d = 5.956 \pm 0.004 (\text{mm})$

$$\bar{f} = 1008.5 \text{ Hz}; \quad \Delta f_{\text{仪}} = 2 \text{ Hz}; \quad \sigma_{f\text{仪}} = 1.2 \text{ Hz}$$

$$\sigma_f = \sqrt{\frac{(1008.0-1008.5)^2 + (1009.2-1008.5)^2 + (1008.8-1008.5)^2 + (1007.5-1008.5)^2 + (1009.0-1008.5)^2 + (1008.4-1008.5)^2}{6-1}}$$

$$=0.6\text{Hz} < \sigma_{f\text{仪}}$$

$$\text{所以, } f = 1008.5 \pm 1.2(\text{Hz})$$

$$Y = 1.6067 \cdot \frac{\ell^3 m}{d^4} \cdot f^2$$

$$\bar{Y} = 1.6067 \frac{l^3 m \bar{f}^2}{\bar{d}^4} = 1.6067 \times \frac{(16.054 \times 10^{-2})^3 \times 35.3 \times 10^{-3} \times 1008.5^2}{(5.956 \times 10^{-3})^4}$$

$$= 1.90 \times 10^{11} \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$$

$$\sigma_Y = \sqrt{2^2 \left(\frac{1.2}{1008.5}\right)^2 + 4^2 \left(\frac{0.004}{5.956}\right)^2 + 3^2 \left(\frac{0.02}{160.54}\right)^2 + \left(\frac{0.2}{35.3}\right)^2} \times 1.90 \times 10^{11}$$

$$= 0.01 \times 10^{11} \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$$

$$\text{所以, } Y_{\text{钢}} = \bar{Y}_{\text{钢}} \pm \sigma_{Y\text{钢}} = (1.90 \pm 0.01) \times 10^{11} \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$$

$$\text{铜棒: } \bar{d} = 5.877\text{mm}; \Delta d_{\text{仪}} = \pm 0.004\text{mm}; \sigma_{d\text{仪}} = 0.004/\sqrt{3} = 0.002\text{mm}$$

$$\sigma_d = \sqrt{\frac{(5.883-5.877)^2 + (5.878-5.877)^2 + (5.882-5.877)^2 + (5.876-5.877)^2 + (5.869-5.877)^2 + (5.875-5.877)^2}{6-1}}$$

$$= 0.005\text{mm} > \sigma_{\text{仪}}$$

$$\text{所以, } d = 5.877 \pm 0.005(\text{mm})$$

$$\bar{f} = 724.4\text{Hz}; \Delta f_{\text{仪}} = 2\text{Hz}; \sigma_{f\text{仪}} = 1.2\text{Hz}$$

$$\sigma_f = \sqrt{\frac{(722.4-724.4)^2 + (724.2-724.4)^2 + (725.9-724.4)^2 + (724.7-724.4)^2 + (723.4-724.4)^2 + (725.8-724.4)^2}{6-1}}$$

$$= 1.4\text{Hz} > \sigma_{f\text{仪}}$$

$$\text{所以, } f = 724.4 \pm 1.4(\text{Hz})$$

$$Y = 1.6067 \cdot \frac{\ell^3 m}{d^4} \cdot f^2$$

$$\bar{Y} = 1.6067 \frac{l^3 m \bar{f}^2}{\bar{d}^4} = 1.6067 \times \frac{(16.042 \times 10^{-2})^3 \times 37.4 \times 10^{-3} \times 724.4^2}{(5.877 \times 10^{-3})^4}$$

$$= 1.091 \times 10^{11} \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$$

$$\begin{aligned}\sigma_Y &= \sqrt{2^2 \left(\frac{1.4}{724.4}\right)^2 + 4^2 \left(\frac{0.005}{5.877}\right)^2 + 3^2 \left(\frac{0.02}{160.42}\right)^2 + \left(\frac{0.2}{37.4}\right)^2} \times 1.091 \times 10^{11} \\ &= 0.008 \times 10^{11} N \cdot m^{-2}\end{aligned}$$

所以, $Y_{\text{铜}} = \bar{Y}_{\text{铜}} \pm \sigma_{Y_{\text{铜}}} = (1.091 \pm 0.008) \times 10^{11} N \cdot m^{-2}$

16 实验名称 全 息 照 相

一. 目的与要求

1. 了解光学全息照相的基本原理及其主要特点。
2. 学习静态全息照相的拍摄方法和实验技术。
3. 了解全息照相再现物像的性质、观察方法。

二. 原理

1. 全息照相与全息照相技术

照相是将物上各点发出或反射的光记录在感光材料上。由光的波动理论知道，光波是电磁波。一列单色波可表示为：

$$x = A \cos \left(\omega t + \varphi - \frac{2\pi r}{\lambda} \right) \quad (1)$$

式中，A 为振幅， ω 为圆频率， λ 为波长， φ 为波源的初相位。

一个实际物体发射或反射的光波比较复杂，但是一般可以看成是由许多不同频率的单色光波的叠加：

$$x = \sum_{i=1}^n A \cos \left(\omega_i t + \varphi_i - \frac{2\pi r_i}{\lambda_i} \right) \quad (2)$$

因此，任何一定频率的光波都包含着振幅（A）和位相 $\left(\omega t + \varphi - \frac{2\pi r}{\lambda} \right)$ 两大信息。光在传播过程中，借助于它们的频率、振幅和位相来区别物体的颜色（频率）、明暗（振幅平方）、形状和远近（位相）。

普通照相是通过成像系统使物体成像在感光材料上，材料上的感光强度只与物体表面光强分布有关，因为光强与振幅平方成正比，所以它只记录了光波的振幅信息，无法记录物体光波的位相差别。因此普通照相记录的只能是物体的一个二维平面像，失去了立体感。

全息照相不仅记录了物体发出或反射的光波的振幅信息，而且把光波的位相信息也记录下来，所以全息照相技术所记录的并不是普通几何光学方法形成的物体像，而是物光光波本身，它记录了光波的全部信息，并且在一定条件下，能将所记录的全部信息完全再现出来因而再现的物像是一个逼真的三维立体像。

全息照相包含两个过程：第一，把物体光波的全部信息记录在感光材料上，称为记录过程；第二，照明已被记录下来的全部信息的感光材料，使其再现原始物体的光波，称为再现过程。

全息照相的基本原理是以波的干涉为基础的。所以除光波外，对其他的波动过程如声波、超声波等也都适用。

2. 全息照相的基本过程——记录和再现

(1) 全息照相记录过程的原理——光的干涉。

怎样才能把物光的全部信息同时记录下来呢？由物理光学可知，利用干涉的方法，以干涉条纹的形式就可以记录物光的全部信息。

记录过程中所使用的光路如图 1 所示。相干性好的 He-Ne 激光器发出激光束，通过分束镜 G 分成两束。其中一束光经反射镜 M_1 反射，再由扩束镜 L_1 将光束扩大后均匀的照射到被摄物体 D 上，经物体表面反射（或透射）后再照射到感光材料（实验中用全息感光胶片） H 上，一般称这束光为物光；另一束光经反射镜 M_2 反射、 L_2 扩束后，直接均匀地照射到 H 上，一般称这束光为参考光。这两束光在胶片 H 上叠加干涉，出现了许多明暗不同的花纹、小环和斑点等干涉图样，被胶片 H 记录下来，再经过摄影、定影等处理，成了一张有干涉条纹的“全息照片”（或称全息图）。干涉图样的形状反映了物光和参考光间的位相关系，干涉条纹明暗对比程度（称为反差）反映了光的强度关系，干涉条纹的疏密则反映了物光和参考光的夹角。

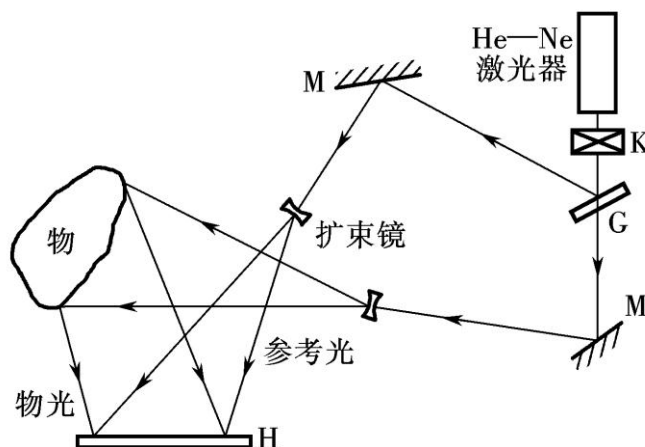


图 1 全息照相光路

(2) 全息照相再现过程的原理——光的衍射

我们知道，人之所以能看到物体，是因为从物体发出或反射的光波被人的眼睛所接收。所以，如果要想从全息照相的“照片”上看原来物体的像，直接观察“照片”是看不到的，

而只能看到复杂的干涉条纹。如果要看到原来物体的像，则必须使“照片”能再现原来物体发出的光波。这个过程就被称为全息照片的再现过程。这一过程所利用的是光栅衍射原理。

再现过程的观察光路。一束从特定方向或与原来参考方向相同的激光束照明全息照片。“照片”上每一组干涉条纹相当于一个复杂的光栅，它使再现光发生衍射。我们沿衍射方向透过“照片”朝原来被摄物的方位观察时，就可以看到一个完全逼真的三维立体图像。如图2所示。按光栅衍射原理，再现光将发生衍射，其+1级衍射光是发散光，与物体在原来位置时发出的光波完全一样，将形成一个虚像，与原物体完全相应，称为真像；-1级衍射光是会聚光，将形成一个共轭实像，称为膺像。

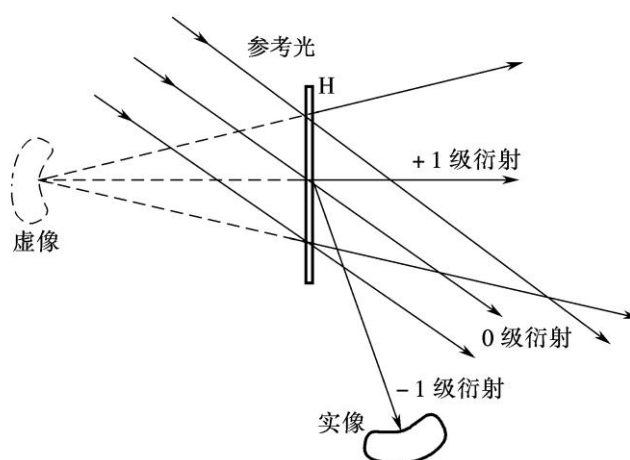


图2 用全息图再现物体光波

3. 全息照相的主要特点和应用

(1) 全息照相的体视特性。全息照片再现的被摄物体是一幅完全逼真的三维立体图像。因此，当我们移动眼睛从不同的角度去观察时，就好像面对原物体一样，可看到原被遮住的侧面。

(2) 全息照相的可分割性。全息照片上的任一小区域都分别记录了从同一物点发出的不同倾角的物光信息。因此，通过全息照片的任一碎片仍能再现出完整的图像。

(3) 全息照片的多重记录性。在一次全息照相拍摄曝光后，只要稍微改变感光胶片的的方向，如转过一定角度，或改变参考光的入射方向，就可在同一张感光胶片上进行第二次、第三次的重叠记录。再现时，只要适当转动全息照片即可获得各自独立互不干涉的图像。

由于全息照相技术具有上述独特的特点，所以，在各个领域中已得到较广泛的应用。如利用全息照片的体视特性，可作三维显示、立体广告、立体电影、立体电视等，利用全息照相的可分割性和多重记录特性，可作信息存贮、全息干涉计量、振动频谱分析、无损检测和测量位移、应力、应变等。

4. 拍摄系统的技术要求

为了拍摄合乎要求的全息照片，对拍摄系统有一定的技术要求：

(1) 对于全息照相的光学系统要求有特别高的机械稳定性。如果物光和参考光的光程稍有不规则的变化，就会使干涉图像模糊不清。即使像平面振动而引起工作台面的振动，光学元件及物体夹得不牢固而引起的抖动，强烈声波振动而引起空气密度的变化等，都会引起干涉条纹的不规则漂移而使图像模糊。因此，拍摄系统必须安装在具有防振装置的平台，系统中光学元件和各种支架都要用磁钢牢固地吸在钢板上。在曝光过程中，人们不要走动，不要高声说话，以保证干涉条纹无漂移。

(2) 要有好的相干光源。一般实验中常采用 He-Ne 激光器作为光源。同时物光和参考光的光程差要符合相干条件，一般常使两者光程大致相等。

(3) 物光和参考光的光强比要合适。一般以 1:4 到 1:10 为宜；两者间的夹角小于 45° ，因为夹角越大，干涉条纹越密，对感光材料分辨率的要求也越高。

三. 仪器

全息实验台（包括激光源及各种镜头支架、载物台、底片夹等部件和固定这些部件所用的磁钢），全息照相感光胶片（全息干版），暗室冲洗胶片的器材等。

四. 实验内容与步骤

1. 漫反射全息照片的拍摄

(1) 光路的调整。按图 1 光路旋转各元、器件，并作如下调整：1) 使各元件等高；2) 使参考光均匀照亮胶片夹上白纸屏，使入射光均匀照明被摄物体，而且漫反射光能照射到白纸屏上，调节两束光的夹角约为 30° ；3) 使物光和参考光的光程大致相等。合适的光强比问题，实验室已根据被摄物的情况在选择分束镜 M 时一起考虑了。

(2) 曝光、拍摄。1) 根据物光和参考光的总光强确定曝光时间；2) 关闭所有光源，在全暗条件下轻轻地将胶片装在胶片上（先取下夹上的白纸屏），稍等片刻；3) 打开激光光源进行自动定时曝光，然后关闭激光光源，取下胶片仍用黑布包好。本实验中曝光时间用了 14 秒。

2. 全息照片的冲洗

在照相室中，按暗室操作技术规定进行显影、定影、水洗及冷风干燥等工作。在白炽灯下观看时，若有干涉条纹，说明拍摄冲洗成功。本实验中显影用了 1.5 分钟，定影用了 5

分钟。

3. 全息照片再现像的观察

按图 2 光路观察再现的虚像（真像）。观察时，注意比较再现虚像的大小、位置与原物的情况，体会全息照相的体视性。再通过小孔观察再现虚像，并改变小孔覆盖在全息照片上的位置，体会全息照相的可分割性。

五. 数据处理与分析

按实验当日的气温，决定曝光时间、显影时间和定影时间。

全息照片记录到的是强度和疏密分布不同的干涉条纹，其上每组干涉条纹相当于一个光栅。为使原物的象能再现出来，需使用一束与原参考光相同的光（称为再现光）照射全息照片。再现光照射全息照片后发生衍射。其中+1 级衍射波是具有与原物光相同波面与传布方向的发散波，人们沿此衍射方向透过全息照片朝原被摄物的方位观察时，可看到与原物一样的像；-1 级衍射波是具有与原物光相同波面会聚波，在该处可得原物的实象。如图 2 所示。

六. 分析讨论题

1. 造成再现现象不够清晰或亮度不够的可能原因；

（a）拍摄光路：学生在暗室中装卸全息干版时，可能无意中使底片架的位置有所移动，致使拍摄时物光与参考光到达底片时的光程差不等于零但尚小于激光光源的相干长度。

（b）He-Ne 激光器的输出光不稳定（闪烁），使实际曝光时间不足。

（c）曝光过度。

（d）全息干版质量差。

（e）观察再现现象时，把全息底片的药膜放反（即药膜面未对着再现光）。

2. 观察不到再现现象的可能原因：

（a）底片架移动，使物光与参考光的光程差大于激光光源的相干长度，拍摄失败。

（b）底片架移动，使物光或参考光中只有一束光射入干版。

（c）拍摄时，干版药膜置放反了，使干版片曝光不足。

（d）显影不足。

17 实验名称 变阻器的使用与电路控制

一. 目的与要求

1. 了解电路设计中控制部分的重要性。
2. 理解滑线变阻器作控制元件时，控制特征性对负载的影响。
3. 正确选择滑线变阻器的阻值及在电路设计中的连接方式。
4. 测定不同连接方式下的变阻器的特征曲线，加深对变阻器控制特征的理解。

二. 原理

一个实验电路一般可以分为电源、控制电路和测量电路三部分。测量电路是事先根据实验方法确定好的，可以把它抽象地用一个电阻 R 来代替，称为负载。根据负载所要求的电压 U 和电流 I ，选定电源。只要选择电源的端电压 U_0 略大于 U ，额定电流大于 I 即可。而控制电路中电压和电流的变化，都可用滑线变阻器来实现。控制电路有制流和分压两种最基本接法。两种接法的性能和特点可由特性曲线、调节范围、细调程度来表征。

1. 制流电路与制流特性曲线

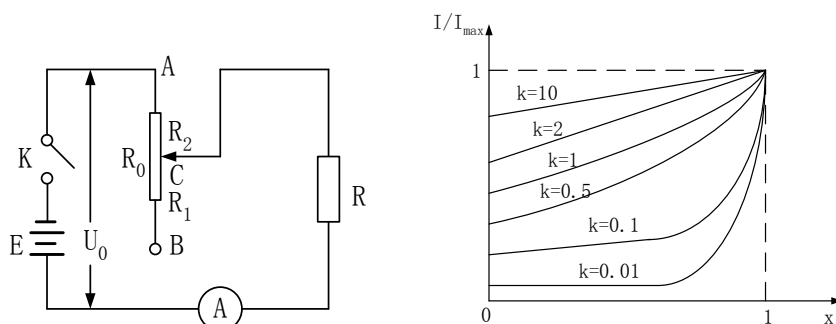


图 1

引进参数： $k = R/R_0$ ，指负载电阻与滑线电阻之比，又称为电路特征系数； $x = R_1/R_0$ ，

指滑动端在滑线电阻上的相对位置。从直流特性曲线可以看到：负载 R 上通过的电流不可能为零； k 愈大，电流调节范围越小，但电路的线性程度愈好；对 $k > 1$ ，调节的线性比较好，电流调节范围适中；对 k 很小，电流调节范围很大，但线性程度很差，当 x 接近 1 时电流变化很大，细调程度不够。

引入 k 与 x 后，制流电路电流的调节范围为： $\frac{kI_{\max}}{k+1} \sim I_{\max}$ 。当 k

值较大或 x 值较小时，控制电路能够较精确地改变负载上的电流；当 k 值较小或 x 值较大时，细调能力下降。

2. 分压电路与分压特性曲线

与制流电路类似，引入参数 $k = R/R_0$ 和 $x = R_1/R_0$ 。对于不同的 k 值， x 与 U 的关系如下图分压特性曲线所示。

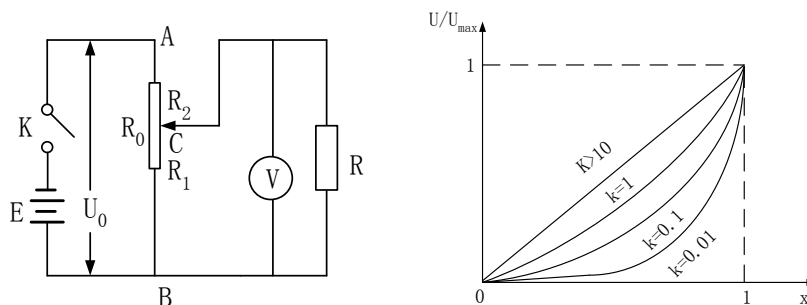


图 2

如图可知，若要使电压 U 在 0 到 U_0 整个范围内均匀变化，则取 $k > 1$ 比较合适；分压电路的调节范围和变阻器阻值无关；当 k 远大于 1 时，电路元件选定后，在整个滑线变阻器的调节范围内，细条程度处处一样；当 k 远小于 1 时，如果 x 较小，控制电路也能较精细地改变负载电流，而如果 x 较大，细调能力下降；当 k 在 1 附近时，细调程度介于前两者之间。

三. 仪器

滑线变阻器： 10Ω ， 56Ω ， 420Ω ， $1K\Omega$ ， 330Ω ；多量程电压表（量程有 $45mV$ ， $75mV$ ， $150mV$ ， $3V$ ， $7.5V$ ，……， $3V$ 及以上的内阻为 $500\Omega/V$ ）；多量程电流表（量程有 $7.5mA$ ， $15mA$ ， $30mA$ ， $75mA$ ， $150mA$ ， $1.5A$ ……）；可变电阻箱；单刀双掷开关；多档输出直流稳压电源（ $1.5V$ ， $3V$ ， $4.5V$ ， $6V$ ， $7.5V$ ， $9V$ ）

四. 实验内容与步骤

1. 设计一个负载为 42Ω ，电流调节范围为 $0.01-0.1A$ 的制流电路。
2. 设计一个电压变化范围为 $0-3V$ ，总负载为 1000Ω （总负载是指电压表与电阻箱的并联电阻）的分压电路，研究其在 $k=1$ 和 $k>10$ 两种情况下的分压特性曲线。

五. 数据处理与分析

1. 设计一个负载为 42Ω ，电流调节范围为 $0.01-0.1A$ 的制流电路。

分析：电路示意图如图 1 所示。根据题设， $R=42\Omega$ ， $I_{\max}=0.1A$ ， $I_{\min}=0.01A$ ，

所以电流表量程为 $150mA$ 。因为 $U=R \cdot I_{\max}=42 \times 0.1=4.2V$ ，而电源电压要求 $E \geq U$ ，

根据实验室提供的电源，可选择 $E=4.5V$ 。

利用 $k = \frac{R}{R_0}$ ，那么 $k = \frac{U/I_{\max}}{U/I_{\min} - U/I_{\max}} = \frac{I_{\min}}{I_{\max} - I_{\min}} = \frac{0.01}{0.1 - 0.01} \approx 0.111$ ；

则 $R_0 = \frac{R}{k} = \frac{42}{0.111} \approx 378\Omega$ ，根据实验室提供的变阻器，可以选择 $R_0 = 420\Omega$ 。

制流电路：取 $k=0.111$ ， $I \sim x$ 关系 $\Delta I_{\text{仪}} = 150mA \times 0.5\% = 0.8mA$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
x	0.100	0.200	0.300	0.400	0.500	0.600	0.700	0.800	0.900	1.000
$I (mA)$	11.5	13.0	14.5	16.5	19.5	23.8	31.0	43.0	72.0	105.0
I/I_{\max}	0.110	0.124	0.138	0.157	0.186	0.224	0.295	0.410	0.686	1.000

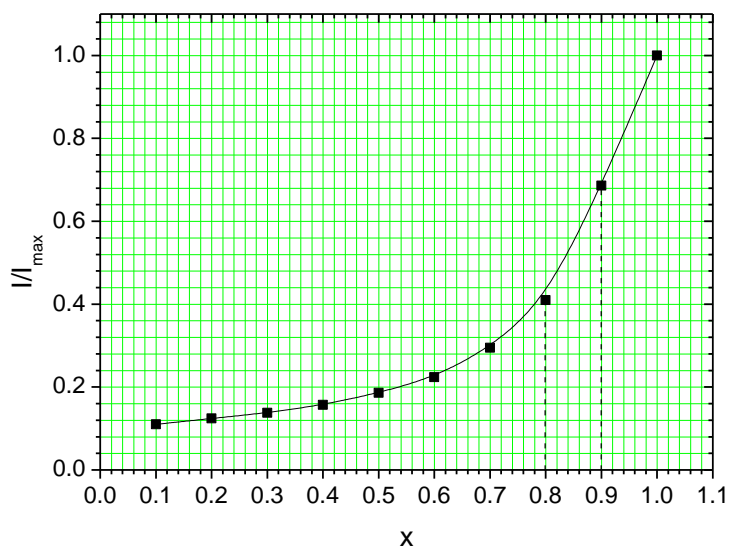


图 3 制流特性曲线

同时，由制流电路特性曲线可知， $k=0.111$ 时，当 x 接近 1 时电流变化很大，细调程度不够。因此，可以在主控电路基础上加上另一变阻器进行细调。实验中在主控 $x=0.9$ 时，加一细调变阻器，实现 x 在 $0.8-0.9$ 范围内的细调。那么此时细调变阻器 $R'_0 = \frac{1}{10} R_0 = 42\Omega$ 。根据实验室所提供仪器，细调变阻器选用 56Ω 。电路设计如下所示：

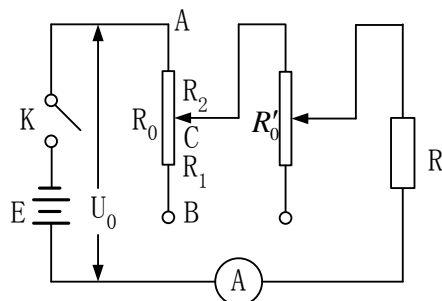


图 4 加细调电路

主控变阻器 $x=0.8\sim 0.9$ 时，选用细调变阻器 $R_0=56\Omega$ 。

	1	2	3	4	5	6
x'	0.000	0.200	0.400	0.600	0.800	1.000
I (mA)	36.0	41.0	47.0	53.0	61.0	72.0
I/I_{\max}	0.343	0.391	0.448	0.505	0.581	0.686

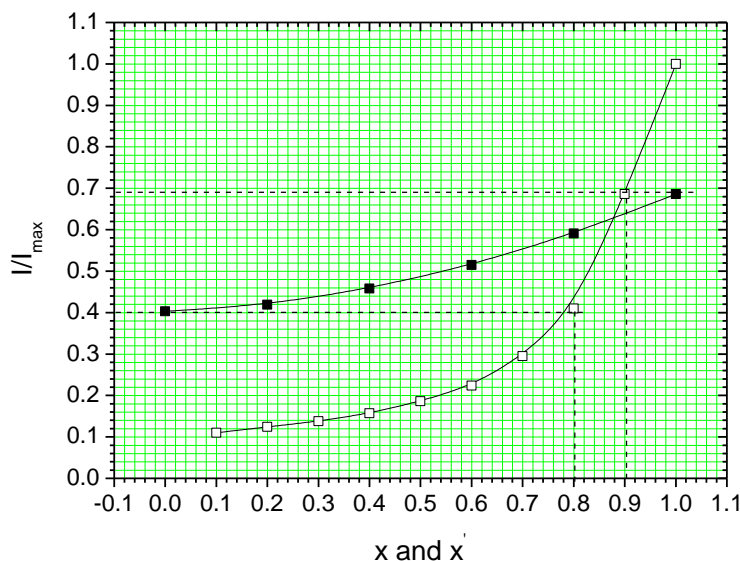


图5 加细调后的制流特性曲线

从图5中可以看到，加细调后，在主控0.8~0.9的范围内，可以通过细调实现电路中电流较均匀的微小改变。

2. 设计一个电压变化范围为0—3V，总负载为1000Ω（总负载是指电压表与电阻箱的并联电阻）的分压电路，研究其在 $k=1$ 和 $k>10$ 两种情况下的分压特性曲线。

根据电压变化范围，选择电源 $E=3V$ ；根据电压表量程3V档时内阻为500Ω/V，所以电压表的内阻 $R_V=500 \times 3=1500\Omega$ 。根据并联电路

$$\frac{1}{R_{\text{总}}} = \frac{1}{R_V} + \frac{1}{R}; \text{ 即: } \frac{1}{1000} = \frac{1}{1500} + \frac{1}{R}, \text{ 所以 } R=3000\Omega.$$

当 $k=1$ 时，依 $\frac{R_{\text{总}}}{R_0} = k = 1$ ，所以 $R_0 = R_{\text{总}} = 1000\Omega$ ；

当 $k>10$ 时，依 $\frac{R_{\text{总}}}{R_0} = k \geq 10$ ，要求 $R_0 \leq 100\Omega$ ；在（10Ω与56Ω）中选择56Ω；（考虑到

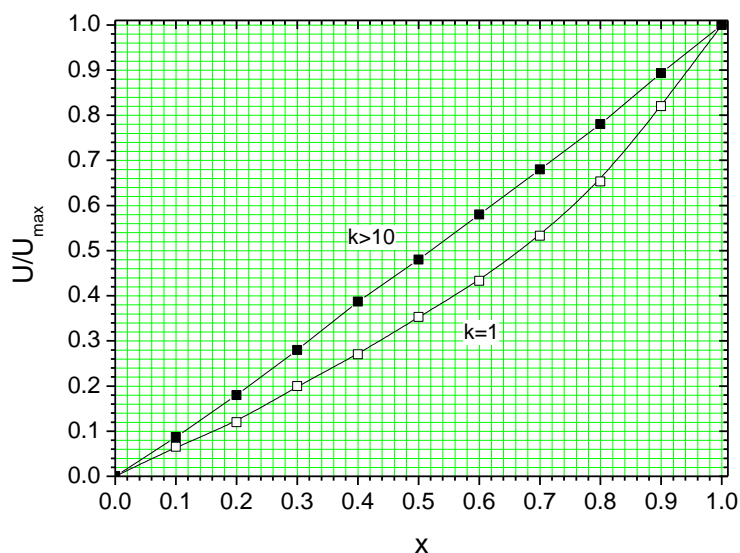
功率损耗 $w=U^2/R$ ）所以 $R_0 = 56\Omega$ 。

$k=1$ ，作 $V-x$ ， $\Delta V_{\text{仪}} = 3\text{伏} \times 0.5\% = 0.02V$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
X	0.000	0.100	0.200	0.300	0.400	0.500	0.600	0.700	0.800	0.900	1.000
V(V)	0.00	0.17	0.36	0.62	0.84	1.06	1.30	1.60	1.96	2.46	3.00
V/V_{max}	0.000	0.065	0.120	0.207	0.280	0.353	0.433	0.533	0.653	0.820	1.000

$k=18$ ，作 $V-x$ ， $\Delta V_{\text{仪}} = 3\text{伏} \times 0.5\% = 0.02V$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
x	0.000	0.100	0.200	0.300	0.400	0.500	0.600	0.700	0.800	0.900	1.000
$V(V)$	0.00	0.20	0.54	0.84	1.16	1.44	1.74	2.04	2.34	2.68	3.00
V/V_{\max}	0	0.067	0.180	0.280	0.387	0.480	0.580	0.680	0.780	0.893	1.000



六. 分析讨论题

1. 对设计与验证的结果进行综合分析讨论

(1) 选择分压或制流的主要依据是什么？

答：主要考虑负载对变阻器特性的要求。此外，对测量范围、线性程度、省电、安全经济及电源的稳定性、操作简便等进行综合考虑，使之处于最佳方案。

(2) 若已确定选择分压法，那么选定变阻器阻值时，应考虑的主要因素是什么？若选择制流法又该如何考虑？

答：(1) 此时重要考虑线性及电源特性

(2) 此时应考虑电流范围、线性程度及省电。

2. 细调时，细调变阻器与主控变阻器的阻值之比应如何确定？

答：一般取细调电阻 R'_0 为主控变阻值 R_0 的 1/10，此时细调线形很好，可以对负载作线形控制。

18 实验名称 伏安法测量线性电阻的误差分析

一. 目的与要求

1. 熟悉电学测量的基本线路，掌握电表的接线方法。
2. 学会正确使用电压表、电流表、电阻箱和滑线变阻器。
3. 掌握用伏安法测电阻的两种方法，学习通过设计不同接线方式以减小测量误差。

二. 原理

通过电路中一个导体的电流 I 与该导体两端的电压 U 成正比，与该导体的电阻 R 成反比，这个规律就是欧姆定律。用数学式子可表示为：

$$I = \frac{U}{R} \quad (1)$$

在国际单位制中，电流单位为安培，电压单位为伏特，电阻单位为欧姆。式 (1) 也可写成：

$$R = \frac{U}{I} \quad (2)$$

若用电压表测得电阻两端的电压 U ，同时用电流表测出通过该电阻的电流 I ，由式 (2) 即可求出电阻 R 。这种用电表直接测出电压和电流数值，由欧姆定律计算电阻的方法，称为伏安法。伏安法测电阻原理简单，测量方便，尤其适用于测量非线性电阻的伏安特性。但是用这种方法进行测量时，电表的内阻对测量结果有一定的影响，应根据不同的情况采用不同的接线方法。

用伏安法测电阻，可采用图 9-1 所示的两种接线方式。

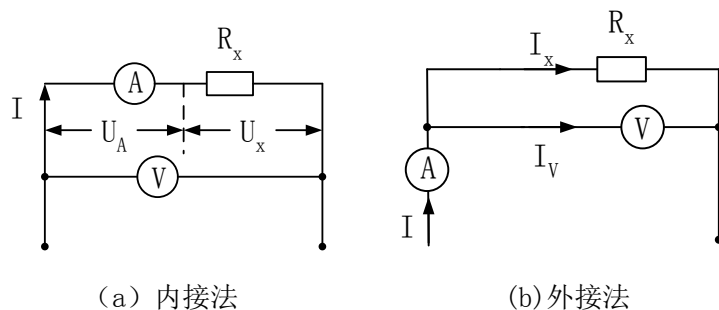


图 1 伏安法测电阻的两种接线方式

在图 1a 中，使用的是电流表的内接法。电流表的读数 I 为通过待测电阻 R_x 的电流 I_x ，电压表的读数 U 不是 U_x ，而是 $U = U_x + U_A$ 。如果将电表的指示值 I 、 U 代入式 (2)，待测电阻的测量值为

$$R = \frac{U}{I} = \frac{U_A + U_x}{I_x} = R_x + R_A = R_x \left(1 + \frac{R_A}{R_x}\right)$$

式中的 R_A 为电流表的内阻。只有当 $R_x \gg R_A$ 时，才有 $R \approx R_x$ 。可见，内接法测电阻的条件就是 $R_x \gg R_A$ 。显然被测电阻阻值越大，电流表的内阻越小，所产生的系统误差越小。

一般说来，内接法适用于测量阻值较大的电阻。如果知道了 R_A 的数值，则待测电阻可用下

式计算

$$R_x = \frac{U - U_A}{I} = R - R_A = R(1 - \frac{R_A}{R}) \quad (3)$$

在图 1b 中, 使用的是电流表的外接法。电压表的读数 U 等于电阻 R_x 两端的电压 U_x , 电流表的读数 I 不等于 I_x , 而有 $I = I_V + I_x$ 。如果将电表的指示值 U 、 I 代入 (2) 式, 则得到待测电阻的测量值为:

$$R = \frac{U}{I} = \frac{U_x}{I_x + I_V} = \frac{U_x}{I_x(1 + \frac{I_V}{I_x})}$$

将上式中的 $(1 + \frac{I_V}{I_x})^{-1}$ 用二项式定理展开, 可得:

$$R \approx \frac{U_x}{I_x} (1 - \frac{I_V}{I_x}) = R_x (1 - \frac{R_x}{R_V})$$

式中 R_V 为电压表的内阻。只有当 $R_x \ll R_V$ 时, $R \approx R_x$ 。由此可见, $R_x \ll R_V$ 就是外接法测电阻的条件。显然被测电阻的阻值越小, 电压表的内阻越大, 所产生的系统误差越小。一般说来, 外接法适用于测量阻值较小的电阻。用图 1b 的接法时, 测得的电阻值比实际值 R_x 偏小。如果知道了 R_V 的数值, 则待测电阻的阻值 R_x 可由下式得到:

$$R_x = \frac{U_x}{I - I_V} = \frac{U_x}{I(1 - \frac{I_V}{I})} \approx \frac{U_x}{I} (1 + \frac{I_V}{I}) = R(1 + \frac{R}{R_V}) \quad (4)$$

概括地说, 用伏安法测电阻时, 由于线路方面的原因, 测得的电阻值总是偏大或偏小, 即存在一定的系统误差。要确定究竟采用哪一种接线法, 必须事先对 R_x 、 R_A 、 R_V 三者相对大小作粗略估计, 当 $R_x \gg R_A$ 时, 可采用图 1a 的接线方法; 当 $R_x \ll R_V$ 时, 可采用图 1b 的接线方法; 对于既满足 $R_x \gg R_A$, 又满足 $R_x \ll R_V$ 的电阻, 可采用任一种接法进行测量。

如果要得到待测电阻的准确值, 必须分别按式 (3) 或式 (4) 加以修正。

三. 仪器

滑线变阻器: 10Ω , 100Ω ; 电阻: 1000Ω , 3Ω 左右各一个;

多量程电压表 (量程有 45mV , 75mV , 3V , 7.5V , $\dots\dots$, 其中 45mV 档内阻为 15Ω , 75mV 档内阻为 30Ω , 3V 及以上的内阻为 $500\Omega/\text{V}$);

多量程电流表 (量程有 7.5mA , 15mA , 30mA , 75mA , $\dots\dots$, 其中 7.5mA 档内阻为 3.6Ω , 15mA 档内阻为 2.25Ω , 30mA 档的内阻为 1.34Ω);

单刀双掷开关; 保护电阻 (100Ω); 多档输出直流稳压电源 (1.5V , 3V , 4.5V , 6V , 7.5V , 9V)

四. 实验内容与步骤

设计一个用单刀双掷开关控制可进行内、外接法测量的伏安法测量电路。

设计依据:

(1) 根据公式 $R = \frac{U}{I}$, 电路能够给出一系列的 U 和相应的 I , 从而把未知电阻测量出

来；(2) 依 U 为自变量，可以从 $0V$ 到一定的电压值，而分压电路具有这样的调压能力；(3) 根据分压电路的分压特性曲线可知，当参数 k 大于等于 10 时，电路具有较好的线性；(4) 为了保护电表，实验室提供一个 100Ω 的保护电阻。电路的设计示意图见图 2，电路元件参数的选择分析如下。

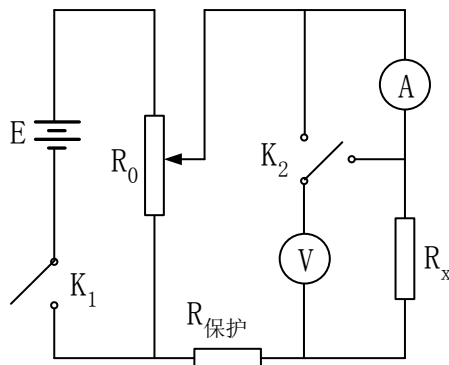


图 2 设计电路示意图

五. 数据处理与分析

1. 电路设计参数选择

电路参数选择分析：

(1) 当 $R_x \sim 1000\Omega$ 时，根据其允许通过的电流 $I_{\max}=7.5\text{mA}$ ，那么它的 $U_{\max}=7.5\text{V}$ ；所以电流表选择 7.5mA 档， $R_A=3.60\Omega$ ，电压表选择 7.5V 档， $R_V=7.5\text{V} \times 500\Omega/\text{V}=3750\Omega$ 。又因为有保护电阻 $R_{\text{保护}}$ 的分压作用，可估计其能分压 $7.5\text{mA} \times 100\Omega=0.75\text{V}$ 左右，所以电源 E 应该选择 9V 档。根据分压电路的参数 k 要大于等于 10 ，即

$$k = \frac{R_{\text{负载}}}{R_0} \geq 10$$

$$R_{\text{负载}} = (R_V \text{ 并联 } R_x) + 3.60\Omega + 100\Omega = \frac{3750 \times 1000}{3750 + 1000} + 103.6 = 893.1\Omega$$

应取 $R_0 < 89.31\Omega$ 。根据实验室提供的变阻器，选择 56Ω 的变阻器。

(2) 当 $R_x \sim 3\Omega$ 时，根据其允许通过的电流 $I_{\max}=15\text{mA}$ ，那么它的 $U_{\max}=45\text{mV}$ ；所以当电流表外接时，电压表选择 45mV 档， $R_V=15\Omega$ ；此时经过电流表的总电流为 $(15\text{mA} + 45\text{mV}/15\Omega)=18\text{mA}$ ，所以电流表可选择 30mA 档， $R_A=1.34\Omega$ 。当电流表内接时，电流表选择 15mA 档， $R_A=2.25\Omega$ ；此时电压表两端可出现 $(45\text{mV} + 15\text{mA} \times 2.25\Omega)=78.75\text{mV}$ 的电压，所以此时电压表选择 75mV 档，此时 $R_V=30\Omega$ 。又因为有保护电阻 $R_{\text{保护}}$ 的分压作用，可估计其能分压 $15\text{mA} \times 100\Omega=1.5\text{V}$ 左右，所以电源 E 应该选择 1.5V 档。根据分压电路的参数 k 要大于等于 10 ，即

$$k = \frac{R_{\text{负载}}}{R_0} \geq 10$$

$$R_{\text{负载}} = (R_V \text{ 并联 } R_x) + 2.25\Omega + 100\Omega = \frac{30 \times 3}{30 + 3} + 102.25 = 105.0\Omega$$

应取 $R_0 < 10.50\Omega$ 。根据实验室提供的变阻器，选择 10Ω 的变阻器。

实验电路参数列表如下：

		E/V	R ₀ /Ω	U _m	ΔU _{仪m}	I _m /mA	ΔI _{仪m}	R _A /Ω	R _V /Ω
大电阻	内接	9	56	7.5 V	0.04 V	7.5	0.04mA	3.60	3750
	外接	9	56	7.5 V	0.04 V	7.5	0.04mA	3.60	3750
小电阻	内接	1.5	10	75mV	0.4 mV	15	0.08mA	2.25	30
	外接	1.5	10	45mV	0.2 mV	15	0.08mA	2.25	30

表中电表的示值误差 $\Delta U = U_m \times S\%$, $\Delta I = I_m \times S\%$, U_m 和 I_m 分别为电压表和电流表的量限, S 为电表准确度等级, 实验室提供的电压表和电流表准确度等级均为 0.5 级。

$$\text{而 } \sigma_U = \frac{\Delta U}{\sqrt{3}}, \sigma_I = \frac{\Delta I}{\sqrt{3}}。$$

2. 伏安法测量电阻数据

大电阻标称值: 1000Ω; 小电阻标称值: 3.033Ω;

大电阻	内接	U/V	0.00	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00
		I/mA	0.00	1.02	1.98	3.00	3.95	5.00	6.00	7.00
	外接	U/V	0.00	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00
		I/mA	0.00	1.30	2.58	3.58	5.10	6.38	7.50	8.85
小电阻	内接	U/mV	0.0	10.0	20.0	30.0	40.0	50.0	60.0	70.0
		I/mA	0.00	1.40	2.95	4.65	6.40	7.80	9.30	11.00
	外接	U/mV	0.0	6.0	12.0	18.0	24.0	30.0	33.0	36.0
		I/mA	0.00	2.40	4.80	7.10	9.50	11.60	12.75	14.30

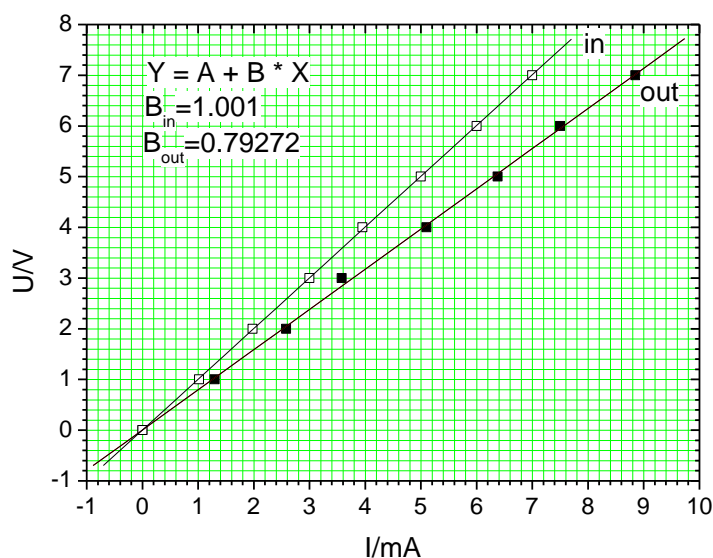


图 3 伏安法测量大电阻的 U—I 曲线

从图中由两条曲线的斜率可以直接得到内接和外接电流表时所测出的电阻, 其中内接测量结果为 $R_{\text{内接}} = 1.00 \text{ K}\Omega$; $R_{\text{外接}} = 792.7\Omega$ 。根据电流表内接时: $R_x = R(1 - \frac{R_A}{R})$, 此时

$R = 1001\Omega$, $R_A = 3.6\Omega$, 那么经过修正后, 用内接法测量所得的大电阻阻值为:

$$R'_{x内} = R(1 - \frac{R_A}{R}) = 1001 \times (1 - \frac{3.60}{1001}) = 997.4\Omega$$

修正前内接法测大电阻的相对误差为:

$$E_{内} = \frac{|1001 - 1000|}{1000} \times 100\% = 0.1\%$$

修正后内接法测大电阻的相对误差为:

$$E'_{内} = \frac{|997.4 - 1000|}{1000} \times 100\% = 0.26\%$$

再根据电流表外接时, $R_x = R(1 + \frac{R}{R_V})$, 此时 $R = 792.7\Omega$, $R_V = 3750\Omega$, 那么经过修正

后, 用外接法测量所得的大电阻阻值为:

$$R'_{x外} = R(1 + \frac{R}{R_V}) = 792.7 \times (1 + \frac{792.7}{3750}) = 960.3\Omega$$

修正前外接法测大电阻的相对误差为:

$$E_{外} = \frac{|792.7 - 1000|}{1000} \times 100\% = 20.7\%$$

修正后外接法测大电阻的相对误差为:

$$E'_{外} = \frac{|960.3 - 1000|}{1000} \times 100\% = 4\%$$

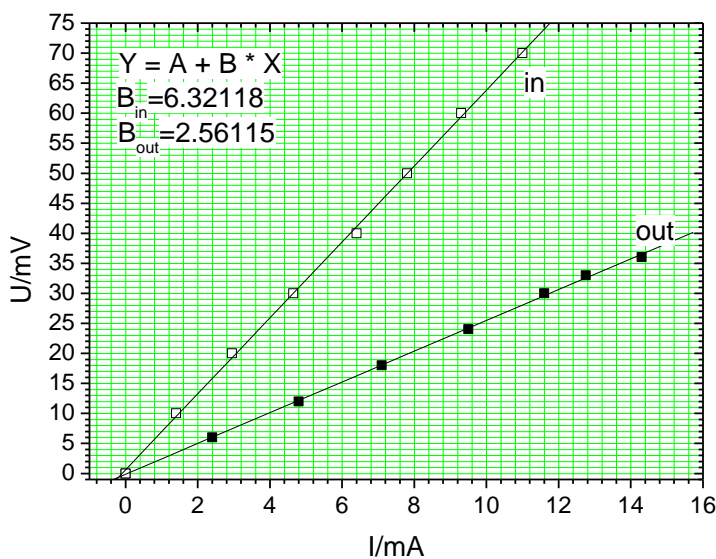


图 4 伏安法测量小电阻的 U—I 曲线

结论：对于大电阻，内接法可以比较精确测量阻值；同时，经过修正后，测量结果的精确度大大提高。

从图中由两条曲线的斜率可以直接得到内接和外接电流表时所测出的电阻，其中内接测量结果为 $R_{\text{内接}} = 6.321\Omega$ ； $R_{\text{外接}} = 2.561\Omega$ 。根据电流表内接时： $R_x = R(1 - \frac{R_A}{R})$ ，此时 $R = 6.321\Omega$ ， $R_A = 2.25\Omega$ ，那么经过修正后，用内接法测量所得的小电阻阻值（标称值为 3.033Ω ）为：

$$R'_{x\text{内}} = R(1 - \frac{R_A}{R}) = 6.321 \times (1 - \frac{2.25}{6.321}) = 4.071\Omega$$

修正前内接法测小电阻的相对误差为：

$$E_{\text{内}} = \frac{|6.321 - 3.033|}{3.033} \times 100\% = 108.4\%$$

修正后内接法测小电阻的相对误差为：

$$E'_{\text{内}} = \frac{|4.071 - 3.033|}{3.033} \times 100\% = 34.2\%$$

再根据电流表外接时， $R_x = R(1 + \frac{R}{R_V})$ ，此时 $R = 2.561\Omega$ ， $R_V = 30\Omega$ ，那么经过修正后，

用外接法测量所得的小电阻阻值为：

$$R'_{x\text{外}} = R(1 + \frac{R}{R_V}) = 2.561 \times (1 + \frac{2.561}{30}) = 2.78\Omega$$

修正前外接法测小电阻的相对误差为：

$$E_{\text{外}} = \frac{|2.561 - 3.033|}{3.033} \times 100\% = 15.6\%$$

修正后外接法测小电阻的相对误差为：

$$E'_{\text{外}} = \frac{|2.78 - 3.033|}{3.033} \times 100\% = 8.3\%$$

结论：对于小电阻，外接法可以比较精确测量阻值；同时，经过修正后，测量结果的精确度明显提高。

3. 电表量程选择的研究。（取 $R=1000\Omega$ 内接法数据进行分析）

量限	U(V)	$\Delta U_{\text{仪}}/U$	I(mA)	$\Delta I_{\text{仪}}/I$
$\sim U_m/3$	2.50	0.015	2.50	0.015
$\sim U_m/2$	3.75	0.010	3.75	0.010
$\sim 2U_m/3$	6.00	0.006	6.00	0.006

根据 $\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta U_{\text{仪}}}{U} + \frac{\Delta I_{\text{仪}}}{I}$, 有

$$(1) \quad \frac{\Delta R_1}{R_1} = \frac{\Delta U_{\text{仪}1}}{U_1} + \frac{\Delta I_{\text{仪}1}}{I_1} = 0.015 + 0.015 = 3.0\%$$

$$(2) \quad \frac{\Delta R_2}{R_2} = \frac{\Delta U_{\text{仪}2}}{U_2} + \frac{\Delta I_{\text{仪}2}}{I_2} = 0.010 + 0.010 = 2.0\%$$

$$(3) \quad \frac{\Delta R_3}{R_3} = \frac{\Delta U_{\text{仪}3}}{U_3} + \frac{\Delta I_{\text{仪}3}}{I_3} = 0.006 + 0.006 = 1.2\%$$

可见,选择合适的电表量程后,不同的测量范围的误差不同,当测量范围大于 $2/3U_m$ 时,测量结果的误差明显减小,结果更精确。