

第2章 基础必修实验

2.1 杨氏模量的测量

力作用于物体所引起的效果之一是使受力物体发生形变，物体的形变可分为弹性形变和塑性形变。固体材料的弹性形变又可分为纵向、切变、扭转、弯曲。对于纵向弹性形变可以引入杨氏模量来描述材料抵抗形变的能力。

杨氏模量（Young's modulus）是表征在弹性限度内物质材料抗拉或抗压的物理量，它是沿纵向的弹性模量，是材料力学中的名词。1807年因英国医生兼物理学家托马斯·杨（Thomas Young, 1773—1829）所得到的结果而命名。根据胡克定律，在物体的弹性限度内，应力与应变成正比，其比值被称为材料的杨氏模量，它是表征材料性质的一个物理量，仅取决于材料本身的物理性质。杨氏模量一般只与材料的性质和温度有关，与其几何形状无关。杨氏模量表征材料的刚性，杨氏模量越大，越不容易发生形变。

杨氏模量的测定对研究金属材料、光纤材料、半导体、纳米材料、聚合物、陶瓷、橡胶等各种材料的力学性质有着重要意义，在机械零部件设计、生物力学、地质等领域均有应用。杨氏模量的测量方法一般有拉伸法、梁弯曲法、振动法、内耗法等，其中会用到光纤位移传感器、莫尔条纹、电涡流传感器和波动传递技术（微波或超声波）等实验技术和方法。

【实验目的】

1. 理解光杠杆测量微小长度变化的原理；
2. 掌握用静态伸长法测量金属丝杨氏模量的方法；
3. 学会用逐差法和作图法处理实验数据。

【实验仪器】

YMC—1 杨氏模量测定仪（包括光杠杆、砝码、镜尺等），螺旋测微器，游标卡尺，米尺，待测金属丝等。

2.1.1 实验原理

实验测定杨氏模量的方法很多，如拉伸法、弯曲法和振动法（前两种方法可称为静态法，后一种可称为动态法）。本实验是用静态拉伸法测定金属丝的杨氏模量，并学习使用光杠杆法测量微小长度的变化。光杠杆法可以实现非接触式的放大测量，且直观、简便、精度高，它的原理被广泛地应用在测量技术中。

1. 杨氏模量公式推导

假定长为 L ，截面积为 S 的均匀金属丝，在受到沿长度方向的外力 F 作用下伸长 δL ，根据胡克定律有：在弹性限度内，伸长应变 $\delta L/L$ 与外施压强 F/S 成正比，即有

$$\frac{\delta L}{L} = \frac{1}{Y} \frac{F}{S} \quad (2.1-1)$$

式中, Y 为金属丝的杨氏模量, 它表述了材料抵抗外力产生拉伸 (或收缩) 形变的能力 (抗弹性形变能力)

$$Y = \frac{F \cdot L}{\delta L \cdot S} \quad (2.1-2)$$

金属丝截面为圆形, 其直径为 d , 相应截面积 $S=1/4\pi d^2$, 代入式 (2.1-2) 得

$$Y = \frac{4F \cdot L}{\delta L \cdot \pi d^2} \quad (2.1-3)$$

可见, 只要测出式 (2.1-3) 中右边各量, 就可计算出杨氏模量。式中 L (金属丝原长) 可由米尺测量, d (钢丝直径) 可用螺旋测微仪测量, F (外力) 可由实验中钢丝下面悬挂的砝码的重力 mg 得出, 而 δL 是一个微小长度变化, 很难用普通测量长度仪器测准, 因此, 本实验利用光杠杆的光学放大作用实现对金属丝微小伸长量 δL 的间接测量, 实验系统如图 2.1-1 所示。

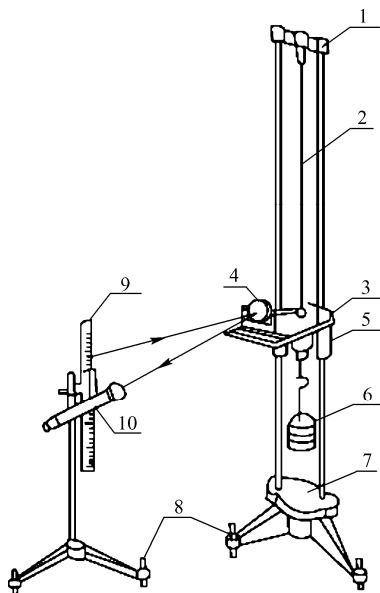


图 2.1-1 实验系统示意图

2. 光杠杆法测微小长度变化的原理

尺读望远镜和光杠杆组成如图 2.1-2(a)所示的测量系统, 光杠杆结构如图 2.1-2(b)所示, 将光杠杆和望远镜按图 2.1-1 所示放置好, 按仪器调节顺序调好全部装置后, 光杠杆的平面镜竖直, 即镜面法线在水平位置, 这时, 从望远镜可以看见直尺由平面镜反射的像, 将望远镜中的交叉线横线对准直尺与望远镜同高度的刻度的像并进行读数, 记为 r_0 。

当金属丝受力 F 时, 伸长为 δL , 如图 2.1-2 所示, θ 很小, 则 $\theta \approx \delta L/D$, 其中 D 为光杠杆的 f 脚尖至两前脚连线的垂直距离。反射光线转过 2θ , 且 $2\theta = l_i/R$, 此时望远镜中叉丝横线与标尺另一刻度的像重合, 读取此刻度数, 并记为 r_i , 则 $l_i = |r_i - r_0|$, 所以

$$\delta L = \frac{D}{2R} l_i \quad (2.1-4)$$

上式表示 δL 原本是难测的微小长度变化, 但取 $R \gg D$ 后, 经光杠杆转换后的量 l_i 却是较大的量。 $\frac{l_i}{\delta L}$ 为放大率, 那么光杠杆系统的放大倍数即为 $2R/D$ 。

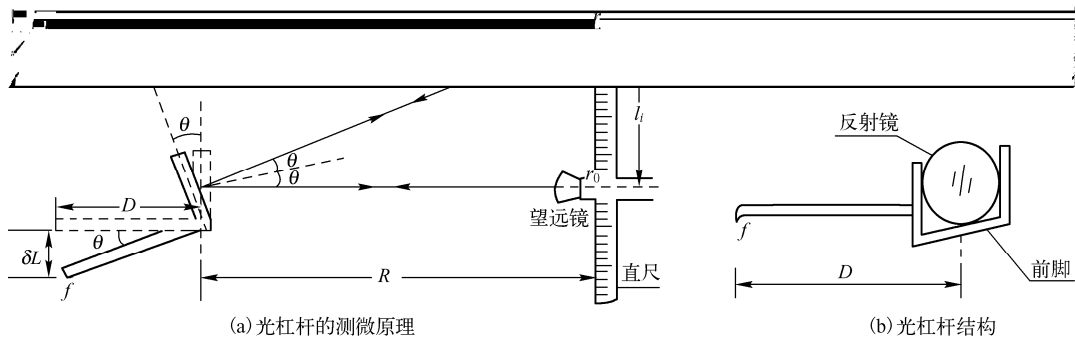


图 2.1-2 光杠杆放大原理图

把式 (2.1-4) 代入式 (2.1-3) 得

$$Y = \frac{8FLR}{\pi d^2 D l_i} \quad (2.1-5)$$

上式成立的条件是：①要在钢丝的弹性限度内 (F 不能过大)；② θ 角很小 ($D \gg \delta L$, $R \gg l_i$)。③ f 和镜面的刀口始终处在同一平面内。

2.1.2 实验步骤

1. 装置的调整

(1) 调节杨氏模量测定仪三角底座上的调整螺钉，使支架、细钢丝铅直，使载镜平台水平。

(2) 将光杠杆两前脚放在平台前面的横槽中，后脚 f 放在钢丝下端的浮台上适当位置，不能与钢丝接触，不要靠着圆孔边，也不要放在夹缝中，如图 2.1-3 所示。

(3) 目测初调：将望远镜放在离光杠杆镜面 1.5~2.0m 处，并使二者在同一高度。调整光杠杆镜面与载镜台基本垂直，望远镜水平，标尺竖直，望远镜应水平对准平面镜中部。调整望远镜上下位置，从望远镜目镜上方看，使得通过望远镜筒上的准心往平面镜中观察，能看到标尺的像。

(4) 调节望远镜目镜调焦旋钮，以看清镜筒中叉丝的像为准。

(5) 细调：缓慢调整望远镜右侧物镜调焦旋钮，直到能在望远镜中看见清晰的标尺像，并使望远镜中的标尺刻度线的像与叉丝水平线的像重合，如图 2.1-4 所示。若未发现标尺像，可左右稍微转动或上下移动望远镜。眼睛在目镜处稍微上下移动，如果叉丝的像与标尺刻度线的像出现相对位移，应重新微调目镜和物镜，直至消除相对位移为止。

(6) 加预定重量砝码，钢丝拉直，微调平面镜的倾角，使望远镜中叉丝水平线在标尺零刻度线到 ± 2 cm 左右的范围内。

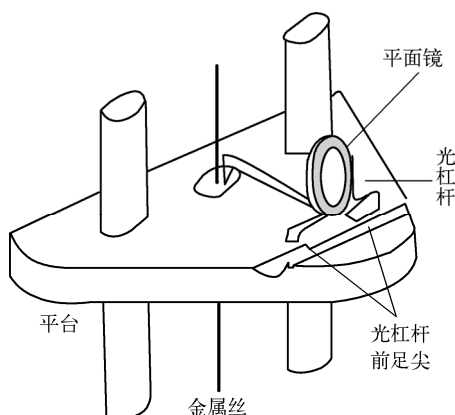
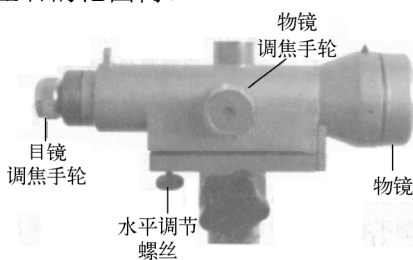
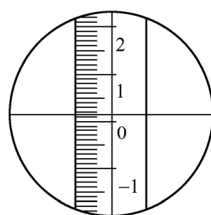


图 2.1-3 光杠杆安装示意图



(a) 望远镜结构



(b) 目镜中标尺像

图 2.1-4 望远镜的调节

2. 实验测量

首先，测量望远镜中标尺刻度值。记下望远镜中的读数 r_0 ，逐次加上 1kg 砝码，记录对应的标尺刻度值 r_i (i 代表砝码数量)，然后将所加砝码逐次去掉（每次减 1kg），记下对应读数 r'_i 。数据记录在表 2.1-1 中， i 最大为 8。

其次，用卷尺测量金属丝的长度 L （两夹头上表面距离）和反射镜面与竖尺之间的距离 R ，做一次测量，并估计不确定度。

最后，用螺旋测微器测量金属丝直径 d ，在钢丝的不同部位测量，共测 5 次，数据列于表 2.1-2 中，用游标卡尺测量光杠杆长度 D 。测量过程中，可以将 f 点及刀口（光杠杆两前脚）的印痕印在纸上，测 f 至刀痕线的垂直距离。一次测量并估计不确定度，得出测量结果，并估计不确定度。

2.1.3 数据处理

1. 用逐差法处理数据

(1) 根据表 2.1-1 中所测得的数据用逐差法计算 l 和 σ , 并得出结果 $l = \bar{l} \pm \sigma(\text{mm})$; 根据上述测量分别获得 R 、 L 、 D 的测量结果; 由表 2.1-2 记录 d 的测量结果。

表 2.1-1 标尺及差值记录

i	$F_i(\text{kg})$	$r_i(\text{mm})$	$r'_i(\text{mm})$	$\bar{r}_i(\text{mm})$	每增量 kg 标尺的差值 $l_i(\text{mm})$	
0					$l_1 = \bar{r}_4 - \bar{r}_0$	
1						
2					$l_2 = \bar{r}_5 - \bar{r}_1$	
3						
4					$l_3 = \bar{r}_6 - \bar{r}_2$	
5						
6					$l_4 = \bar{r}_7 - \bar{r}_3$	
7						
8	-	-				
平均值					\bar{l}	

结果

$$l = \bar{l} \pm \sigma_l = \text{_____}(\text{mm})$$

$$R = R_{\text{测}} \pm \sigma_R = \text{_____}(\text{mm})$$

$$L = L_{\text{测}} \pm \sigma_L = \text{_____}(\text{mm})$$

$$D = D_{\text{测}} \pm \sigma_D = \text{_____}(\text{mm})$$

$$d = \bar{d} \pm \sigma_d = \text{_____}(\text{mm})$$

表 2.1-2 钢丝直径

次	1	2	3	4	5	平均
$d(\text{mm})$						

(2) 由式 (2.1-5) 计算杨氏模量 $Y_{\text{测}}$, 并计算出不确定度, 列出不确定度推导过程和公式, 得出测量结果 $Y = Y_{\text{测}} \pm \sigma_Y$ (提示: 根据误差传递先推导出相对不确定度表达式 $E = \sigma_Y / Y$, 并计算出 E , 然后计算出 σ_Y 。)

2. 用最小二乘法处理数据

把式 (2.1-5) 改写为

$$l_i = \frac{8LR}{\pi d^2 DY} F_i = K F_i, \quad K = \frac{8LR}{\pi d^2 DY}。$$

$$Y = \frac{8LR}{\pi d^2 DK} \quad (2.1-6)$$

在既定的实验条件下, K 是一个常量, 若以 $l_i = \bar{r}_i - \bar{r}_0$ ($i=0,1,2,\dots$) 为纵坐标, 以 F_i 为横坐标作 $l_i - F_i$ 图, 用最小二乘法计算斜率 K 的数值; 由式 (2.1-6) 计算杨氏模量 Y 的值。

【注意事项】

1. 调好仪器后, 加减砝码要轻放轻拿, 防止光杠杆、望远镜、竖尺的位置的任何变动。

2. 在望远镜中读数时，眼睛要水平望，避免视差。
3. 在测量金属丝直径 d 时注意维护金属丝平直状态。
4. 注意保护光杠杆，勿使其掉落摔坏。

【思考题】

1. 本实验求 Y 的公式，应满足哪些条件？如何推导出来？
2. 本实验中，各长度量用不同的仪器来测量，是怎样考虑的？
3. 在逐差法处理数据中，能否取其相邻两项的差值，如 $\bar{r}_1 - \bar{r}_0$ ，再求 \bar{l} 、 $\overline{\Delta l}$ （此时对应每增重 1 kg）？为什么？逐差法处理数据的优点是什么？
4. 利用光杠杆测微小长度 δL 变成测 l 量， $\beta = \frac{l}{\delta L}$ 称为光杠杆的放大率，根据光杠杆的原理， $\beta = \frac{2R}{D}$ ，是否能以增加 R 、减小 D 来提高 β ，这样做是否有限度？应怎样来考虑这个问题？

2.1.4 应用小实例——利用光杠杆法测量磁性液体磁致弹性层的弹性系数

1. 实验器材

永磁体、磁性液体、YMC-1 光杠杆、尺读望远镜、米尺、电子天平、铝砝码、升降平台、有机玻璃板。磁性液体是 10 纳米左右的磁性颗粒稳定悬浮一定基液的胶体，它被永磁体吸附形成具有弹性的包覆层，这种包覆层称之为磁性液体磁致弹性层，如图 2.1-5 所示。

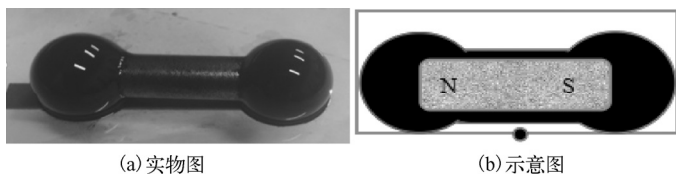


图 2.1-5 被磁性液体包覆的永磁体

2. 实验原理

本实验中，磁性液体弹性磁层的弹性系数 k 的定义是薄膜层所受的力 ΔF 与薄膜层压缩的距离 Δl 的比值，这是系数不是常数。光杠杆法测微小长度变化的原理如图 2.1-2(a)所示。测试设计的尺读望远镜和光杠杆组成微小压缩量测试系统如图 2.1-6 所示。

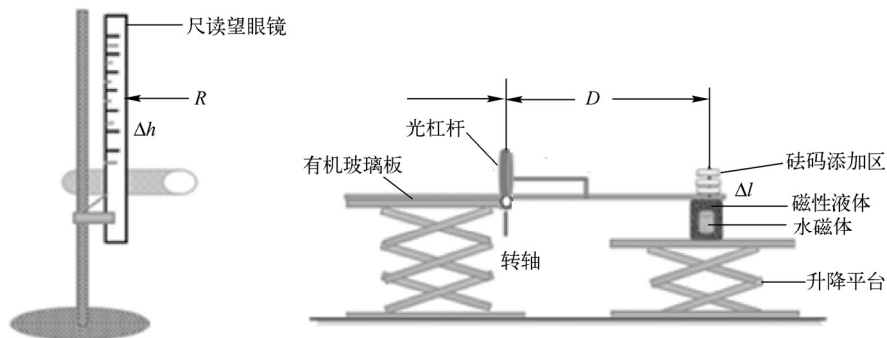


图 2.1-6 测试系统结构示意图

将望远镜和光杠杆组成测试系统放置好，光杠杆的平面镜竖直，即镜面法线在水平位置，按仪器调节顺序调节好测试光路图。不加砝码时，可从望远镜中的十字叉线横线对准直尺与望

望远镜同高度的刻度的像并进行读数，记为 r_0 。每放一个砝码 m ，磁性液体弹性薄膜层受力增加 mg 。 θ 很小

$$\theta = \Delta l / D$$

其中 D 为光杠杆的后脚尖至两前脚尖连线的垂直距离。反射光线转过 2θ 角，且 $2\theta = h_n / R$ 。此时，可读望远镜中的刻度数，记为 h_n ($n=1, 2, 3, \dots$ 为加法码的个数)，则 $h_n = |r_n - r_0|$ 。 Δl 原是不可测的微小长度变化，但因为 $R \gg D$ ，经过杠杆转化后的量 h_n 是较大的量，即

$$k_n = \frac{\Delta F}{\Delta l} = \frac{nm g \cdot 2R}{h_n \cdot D}$$

【参考文献】

- [1] 李成, 高金伙, 冉奇东等. 第十届挑战杯全国大学生课外学术科技作品竞赛江西赛区三等奖作品《基于磁性液体磁致弹性层的振动发电装置》. 南昌: 南昌航空大学, 2015.

2.2 用电量热器测液体比热容

【实验目的】

1. 学习用量热器的方法。
2. 用电量热器测定水的比热容。

【实验仪器】

铝电量热器、铝搅拌器、 $0 \sim 50^\circ\text{C}$ 水银温度计、电流表、电压表、开关、秒表、稳压电源、天平。

2.2.1 实验原理

电量热器构造如图 2.2-1 所示。在外套筒的绝热垫中放有量热器 C，搅拌器 S，温度计 T，加热线绕电阻 H，待测液体。

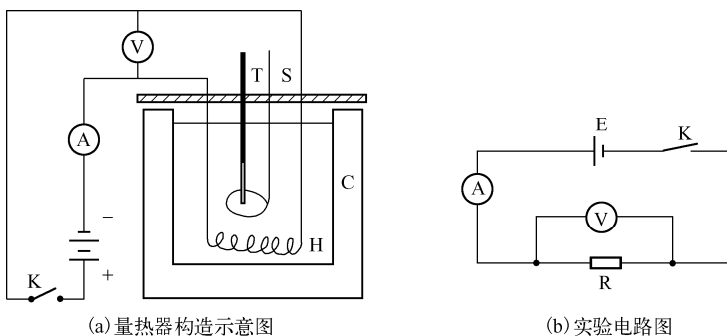


图 2.2-1 电量热器构造及实验电路图

当接通电路时，线圈中有电流 I 流过并在 H 两端获得电压降 V ，如测出通电的时间 t ，则在 t 时间内供给量热器的电能为：

$$A = IVt \tag{2.2-1}$$

如不计散热损失，则此电能将全部转换为热能而使量热器及其中的液体温度升高 ΔT 度，

从而得到热平衡方程：

$$(m_{\text{铝}}C_{\text{铝}} + m_{\text{水}}C_{\text{水}})(T - T_0) = IVt \quad (2.2-2)$$

式中， $C_{\text{水}}$ 是待测的未知量， T_0 是容器内水的初温， T 是加热后的终温。很显然，这里有：

$$\Delta T = T - T_0$$

由此可得：

$$C_{\text{水}} = \frac{IVt}{m_{\text{水}}(T - T_0)} - C_{\text{铝}} \frac{m_{\text{铝}}}{m_{\text{水}}} \quad (2.2-3)$$

其中式(2.2-2)和式(2.2-3)都采用SI制。

以上是在理想绝热情况下讨论的，由于有温差，在加热过程中，不断有热量从量热器向外发散，使得实测温度总要比理想绝热时的温度低。实验时，如果系统（量热器及其中的水）温度与环境温度相差不大时，由于散热所造成的影响可以根据牛顿冷却定律来进行修正。牛顿冷却定律指出，当系统与环境的温差不超过 $10 \sim 15^\circ\text{C}$ 时，系统温度的变化率与温差成正比，其数学式为

$$\frac{dT}{dt} = k'(T - T_a)$$

式中 T 为系统的温度， T_a 为环境的温度， k' 为散热系数。设系统的热容为 C ，并注意到 $dQ = CdT$ ，于是，上式可改写为

$$\frac{dQ}{dt} = Ck'(T - T_a) = K(T - T_a) \quad (2.2-4)$$

表示 dt 时间间隔内散失的热量 dQ ，式中， K 为与系统散热表面积成正比并随表面的吸收或辐射热的本领而变的一个常数；根据牛顿冷却定律，并采用比较的方法进行散热影响的修正，从而求出理想绝热情况下，加热 t 时间后系统的终温 T'_{ht} 。具体做法如下：实验过程中，从通电加热开始计时测温，每隔一定时间（如 2min ）记录一次温度，以此数据作出 $T-t$ 图（见图 2.2-2，理想情况下的 $T-t$ 图）。

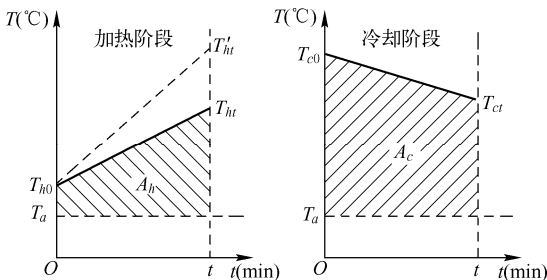


图 2.2-2 $T-t$ 图

系统加热升温时间为 $0 \sim t$ ，水温由初始温度 T_{h0} 上升到终温 T_{ht} ；同样，系统冷却降温时间为 $0 \sim t$ ，水温由初始温度 T_{c0} 下降到终温 T_{ct} 。假设两个阶段的失散热量分别为 Q_1 和 Q_2 ，在理想绝热情况下，加热阶段终温为 T'_{ht} ，正因为 Q_1 散失，终温只有 T_{ht} ，而存在温差 $T'_{ht} - T_{ht}$ ；冷却阶段，正因为 Q_2 散失，水温才会由 T_{c0} 下降到终温 T_{ct} ，存在温差 $T_{c0} - T_{ct}$ 。因而，根据牛顿冷却定律和热平衡方程有：

$$Q_1 = K \int_0^t [T_h(t) - T_a] dt = KA_h = (m_{\text{铝}}C_{\text{铝}} + m_{\text{水}}C_{\text{水}})(T'_{ht} - T_{ht}) \quad (2.2-5)$$

$$Q_1 = K \int_0^t [T_c(t) - T_a] dt = KA_c = (m_{\text{铝}} C_{\text{铝}} + m_{\text{水}} C_{\text{水}})(T_{c0} - T_{ct}) \quad (2.2-6)$$

将式 (2.2-5) 除以式 (2.2-6) 得:

$$T'_{ht} = \frac{A_h}{A_c} (T_{c0} - T_{ct}) + T_{ht} \quad (2.2-7)$$

式中 A_h 和 A_c 分别为 $T-t$ 图中, $0 \sim t$ 时间内, 加热阶段温度曲线 $T_h = T_h(t)$ 和冷却阶段温度曲线 $T_c = T_c(t)$ 与环境温度曲线所夹面积。令式 (2.2-7) 所得的 $T'_{ht} = T$, 另外令 $T_{h0} = T_0$, 将它们代入式 (2.2-3) 即可求 $C_{\text{水}}$ 。若加热阶段 t 时刻断开电流后, 水温继续上升到某一最大值 T_{max} , 则用 T_{max} 替代式 (2.2-7) 中 T_{ht} , 为对式 (2.2-2) 中电功的修正。

2.2.2 实验步骤

1. 用天平称量热器内筒及搅拌器的质量 $m_{\text{铝}}$, 注入约半筒水, 并称得质量 M , 从而得出水的质量 $M_{\text{水}} = M - m_{\text{铝}}$; 记下环境温度。

2. 按图 2.2-1 (b) 接线, 检查无误后打开电源, 调节电压。根据电压表和电流表读数估算电热功率, 功率调节到约 5W ($P=UI$), 再断开开关 K。

3. 插入温度计, 使用搅拌器使水温分布均匀; 水温等于或略高于环境温度为宜 (若水温低于环境温度可接通开关 K 稍许加热), 这时记下初始温度, 准备开始加热阶段实验。

4. 接通 K, 同时用秒钟计时, 缓慢搅拌, 每 2 分钟记录一次温度, 10 分钟时断开 K。此时水温度仍可能继续上升, 等到降温后, 记录温度作为冷却阶段的初始温度。冷却阶段, 每 2 分钟记一次温度, 记 5 次为止。记录表格如表 2.2-1 所示。

5. 根据表 2.2-1 中的数据在计算纸上绘制温度 $T(^{\circ}\text{C})$ 与时间 $t(\text{min})$ 的关系曲线, 如图 2.2-2 所示, 计算面积 A_h, A_c 的值。将由式 (2.2-7) 求出的 T 和加热阶段的初始温度代入式 (2.2-3) 中求 $C_{\text{水}}$ 。

需要用到和记录的其他数据如下:

量热器的比热容 $C_{\text{铝}} = 0.895 \times 10^3 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$;

量热器 (搅拌器) 及水的质量: $M = \underline{\hspace{2cm}}$ kg;

量热器及搅拌器的质量: $m_{\text{铝}} = \underline{\hspace{2cm}}$ kg;

水的质量: $M_{\text{水}} = \underline{\hspace{2cm}}$ kg;

环境温度: $T_a = \underline{\hspace{2cm}}$ $^{\circ}\text{C}$;

电流 $I = \underline{\hspace{2cm}}$ A; 电流表级别: $\underline{\hspace{2cm}}$ 量限: $\underline{\hspace{2cm}}$

电压 $V = \underline{\hspace{2cm}}$ V; 电压表级别: $\underline{\hspace{2cm}}$ 量限: $\underline{\hspace{2cm}}$

表 2.2-1 $T-t$ 记录表

时间 (min)	加热时间段						冷却时间段					
	0	2	4	6	8	10	0	2	4	6	8	10
温度 $^{\circ}\text{C}$												

【误差分析】

1. 本实验中用天平称质量, 相对误差可不计;
2. 因加热及冷却时间为 10 分钟, 而秒表的精度高, 故相对误差可忽略, 上述各项误差较小可忽略不计, 故由式 (2.2-3):

$$E_{C_{\text{水}}} = \frac{\sigma_{C_{\text{水}}}}{C_{\text{水}}} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_I}{I}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_V}{V}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_T}{T}\right)^2} \quad (2.2-8)$$

比热测量结果：
 $\sigma_{C_{\text{水}}} = C_{\text{水}} \cdot E_{C_{\text{水}}} = \underline{\hspace{2cm}}$
 $C_{\text{水测}} = C_{\text{水}} \pm \sigma_{C_{\text{水}}} = \underline{\hspace{2cm}} (\text{J/kg}\cdot\text{K})$

【思考题】

1. 为什么在切断电源后温度仍然会上升？
2. 为什么要对散热进行修正，如何修正？
3. 为什么要求初始温度与环境温度接近？

2.2.3 实验拓展——利用量热器测量冰的熔化热

相变潜热简称潜热，指单位质量的物质在等温等压情况下，从一个相变化到另一个相吸收或放出的热量。这是物体在固、液、气三相之间以及不同的固相之间相互转变时具有的特点之一。固、液之间的潜热称为熔化热（或凝固热），液、气之间的潜热称为汽化热（或凝结热），而固、气之间的潜热称为升华热（或凝华热）。

物质从固相转变为液相的相变过程称为熔化。一定压强下晶体开始熔化时的温度称为该晶体在此压强下的熔点。对于晶体而言，熔化是组成物质的粒子由规则排列向不规则排列的过程，破坏晶体的点阵结构需要能量，因此，晶体在熔化过程中需吸收能量，但其温度却保持不变。单位质量物质的某种晶体熔化成为同温度的液体所吸收的能量，叫做该晶体的熔化潜热，简称熔化热。

熔化热的确定，对于相关材料工程有着直接指导意义。例如，相变蓄热材料是当今蓄热材料研究和应用的主流。复合相变蓄热材料，在选料时，熔化热是需要考虑的非常重要因素之一。

1. 实验仪器

冰箱，0℃容器，量热器，物理天平或电子天平，数字温度计（-10.0~100.0℃，一支），烧杯，停表，冰，冷、热水，干燥的吸水布。

2. 实验原理

(1) 混合量热法测量冰熔化热原理

在一定压强下，晶体熔化时的温度称为熔点。单位质量的晶体熔化为同温度的液体时所吸收的热量，称为熔化潜热，也称熔化热 L 。不同的晶体有不同的熔化热。本实验是量热学实验中的一个基本实验，采用量热学实验的基本方法——混合量热法。其基本做法是：把待测系统 I 和一个已知热容的系统 II 混合起来，并且设法使它们形成一个与外界没有热量交换的孤立系统 I+II。这样 I（或 II）所放出的热量全部为 II（或 I）所吸收。

将 M 克 0℃的冰投入盛有 m 克 T_1 ℃水的量热器内筒中。设冰全部融化为水后平衡温度为 T_2 ℃，若量热器内筒、搅拌器和温度计的质量分别为 m_1 、 m_2 和 m_3 ，其比热容分别为 C_1 、 C_2 和 C_3 ，水的比热容为 C_0 ，则根据混合量热法所依据的原理，冰全部融化为同温度（0℃）的水及其从 0℃升到 T_2 ℃过程中所吸收的热量，等于其余部分从温度 T_1 ℃降到 T_2 ℃时所放出的热量，即

$$ML + M(T_2 - 0)C_0 = (mC_0 + m_1C_1 + m_2C_2 + m_3C_3)(T_1 - T_2) \quad (2.2-9)$$

由此可得冰的熔化热为

$$L = \frac{1}{M}(mC_0 + m_1C_1 + m_2C_2 + m_3C_3)(T_1 - T_2) - T_2C_0 \quad (2.2-10)$$

式中，水的比热容 $C_0=4.18\times 10^3\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ，内筒、搅拌器和温度计都是铝制的，其比热容 $C_1=C_2=C_3=0.895\times 10^3\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 。

(2) 实验过程中的散热修正

前已指出，必须在系统与外界绝热的条件下进行实验。为了满足此条件，应该从实验装置、测量方法和实验操作等方面尽量减少热交换。但是，由于实际上往往很难做到与外界完全没有热交换，因此，必须研究如何减少热量交换对实验结果的影响。

设图 2.2-3 所示的温度-时间曲线是在进行冰的熔化热实验过程中绘制的， T'_1 为水的初温，它较环境温度 T_0 高，因此，在投入冰块之前，由于向外界散热，水温也随时间而缓慢降低，如 AB 段所示。与 B 点相应的温度为 T_1 ，它就是投入冰块时水的温度。在刚投入冰块时，水温高，冰的有效面积大，融化快，因此系统温度 T 降低较快，如 BC 段所示；随着冰的不断融化，冰块逐渐变小，水温逐渐降低，冰融化就慢，水温的降低变缓慢了，如 CD 段所示。 D 点的温度为 T_2 ，它是冰块和水混合后的最低平衡温度。此后，由于系统从外界吸热，水温缓慢升高，如 DE 段所示。

根据牛顿冷却定律式 (2.2-4)，实验过程中，即系统温度从 T_1 变为 T_2 这段时间 ($t_1\sim t_2$) 内，系统与外界间交换的热量为

$$\begin{aligned} Q &= \int_{t_1}^{t_2} k(T-T_0)dt \\ &= k \int_{t_1}^{t_0} (T-T_0)dt + k \int_{t_0}^{t_2} (T-T_0)dt \end{aligned} \quad (2.2-11)$$

前一项 $T-T_0>0$ ，系统散热，后一项 $T-T_0<0$ ，系统吸热，两积分对应于图 2.2-3 中面积

$$S_A = \int_{t_1}^{t_0} (T-T_0)dt \quad S_B = \int_{t_0}^{t_2} (T-T_0)dt$$

由此可见， S_A 与系统向外界散失的热量成正比，即有 $Q_{\text{散}}=kS_A$ ； S_B 与系统从外界吸收的热量成正比，即有 $Q_{\text{吸}}=kS_B$ 。因此，只要 $S_A\approx S_B$ ，系统对外界的吸热和散热就可以相互抵消。这叫热量补偿法。

要使 $S_A\approx S_B$ ，就必须使 $(T_1-T_0)>(T_0-T_2)$ ，究竟 T_1 和 T_2 应取多少，或 $(T_1-T_0)/(T_0-T_2)$ 应取多少 (参考经验值 3/10)，要在实验中根据具体情况调整选择。具体做法是要进行多次实验，而且在做完某次实验并绘制出 $T-t$ 曲线后，根据 S_A 和 S_B 的面积判断出下一次实验应如何改变 T_1 和 T_2 。如此反复多次，就能找出最佳的初温 T_1 和末温 T_2 。

由于系统与外界温差越大，热传导越快，时间越长，传递热量越多，所以，要求系统与外界温差尽可能小，实验过程尽可能短。

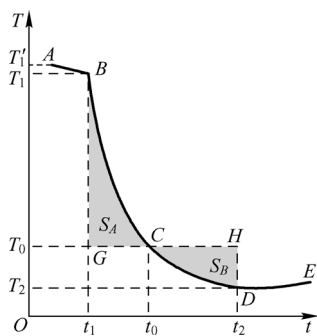


图 2.2-3 冰的熔化热实验 $T-t$ 曲线

2.3 直流电桥测电阻

【实验目的】

1. 掌握色环电阻阻值读取的基本方法;
2. 掌握直流单臂电桥原理及利用它测量电阻的方法。

【实验仪器】

QJ-19 型直流单双臂电桥，检流计，电阻若干，导线若干等。

2.3.1 实验原理

1. 直流电桥测量原理

图 2.3-1 是直流单臂电桥的原理图。四个电阻 R 、 R_1 、 R_2 、 R_x 连成四边形，称为电桥的四个臂。四边形的一个对角线连有检流计，称为“桥”；四边形的另一对角线接上电源，称为电桥的“电源对角线”， E 为线路中供电电源。 $R_{\text{保护}}$ 为较大的可变电阻，在电桥不平衡时取最大电阻作限流作用以保护检流计；当电桥接近平衡时取最小值以提高检流计的灵敏度。

电源接通时，电桥线路中各支路均有电流通过。当 C 、 D 两点之间的电位不相等时，桥路中的电流 $I_g \neq 0$ ，检流计的指针发生偏转；当 C 、 D 两点之间的电位相等时，桥路中的电流 $I_g = 0$ ，检流计指针指零（检流计的零点在刻度盘的中间），这时称电桥处于平衡状态。因此电桥处于平衡状态时有：

$$I_g = 0, \quad U_{AC} = U_{AD}, \quad U_{CB} = U_{DB}$$

又 $I_{R_x} = I_{R_1}$ ， $I_R = I_{R_2}$ ，即

$$I_{R_x} R_x = I_R R, \quad I_{R_1} R_1 = I_{R_2} R_2$$

于是

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

即

$$R_x R_2 = R R_1 \quad (2.3-1)$$

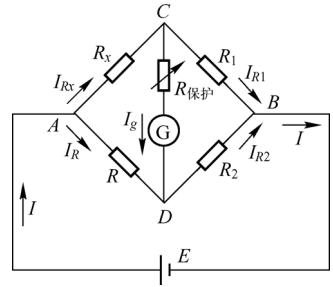


图 2.3-1 直流单臂电桥的原理图

此式说明，电桥平衡时，电桥相对臂电阻的乘积相等。这就是电桥的平衡条件。

根据电桥的平衡条件，若已知其中三个臂的电阻，就可以计算出另一个桥臂电阻，因此，电桥测电阻的计算式为

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} R = KR \quad (2.3-2)$$

电阻 R_1 、 R_2 为电桥的比率臂， R_x 为待测臂， R 为测定臂，实验室常用电阻箱。由式 (2.3-2) 可以看出，待测电阻 R_x 由比值 K 和标准电阻 R 决定，比值 K 可以作成 10^n ，这是成品电桥常用的方法。检流计在测量过程中起判断桥路有无电流的作用，只要检流计有足够的灵敏度来反映桥路电流的变化则电阻的测量结果就与检流计的精度无关。由于标准电阻可以制作得比较精密，所以利用电桥的平衡原理测电阻的准确度可以很高，大大优于伏安法测电阻，这也是电桥应用广泛的重要原因。

2. 色环电阻识别基本知识

色环电阻是应用于各种电子设备的最多的电阻类型，无论怎样安装，维修者都能方便地读出其阻值，便于检测和更换。各种颜色色环的标示如表 2.3-1 所示。

表 2.3-1 色环标示

颜色	银	金	黑	棕	红	橙	黄	绿	蓝	紫	灰	白	无
有效数字	—	—	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	—
数量级	10^{-2}	10^{-1}	10^0	10^1	10^2	10^3	10^4	10^5	10^6	10^7	10^8	10^9	—
允许偏差/%	± 10	± 5	—	± 1	± 2	—	—	± 0.5	± 0.25	± 0.1	± 0.05	—	± 20
温度关系/ ($\times 10^{\circ}\text{C}^{-1}$)	—	—	—	100	50	15	25	—	10	5	—	1	—

色环标示法包含电阻的阻值、公差、规格，主要分两部分：第一部分，靠近电阻前端的一

组用来表示阻值；第二部分，靠近电阻后端的一条色环用来代表公差精度。第一部分的每一条色环都等距，自成一组，容易和第二部分的色环区分。识别方法如下：

(1) 三色环电阻：第一、二环分别代表两位有效数的阻值，第三环代表倍率；

(2) 四色环电阻：第一、二环分别代表两位有效数的阻值，第三环代表倍率，第四环代表误差；

(3) 五色环电阻：第一、二、三环分别代表三位有效数的阻值，第四环代表倍率，第五环代表误差；

(4) 六色环电阻：第一、二、三环分别代表三位有效数的阻值，第四环代表倍率，第五环代表误差，第六环表示该电阻的温度系数。

2.3.2 实验内容与步骤

1. 先找标志误差的色环，从而排定色环顺序。
2. 对照表 2.3-1 判断色环电阻的阻值 R_x 。
3. 打开检流计电源，将检流计调到 $1\mu\text{A}$ 挡并调零。
4. 将检流计连接到直流电桥上，其他各器件接法见图 2.3-2，电路原理参见图 2.3-3。

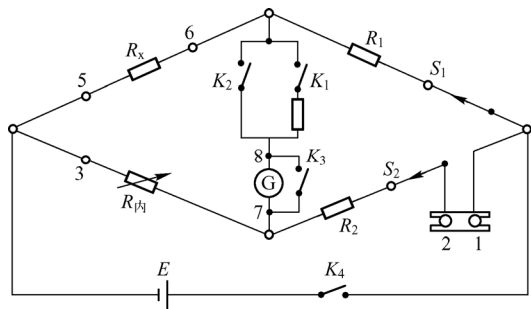
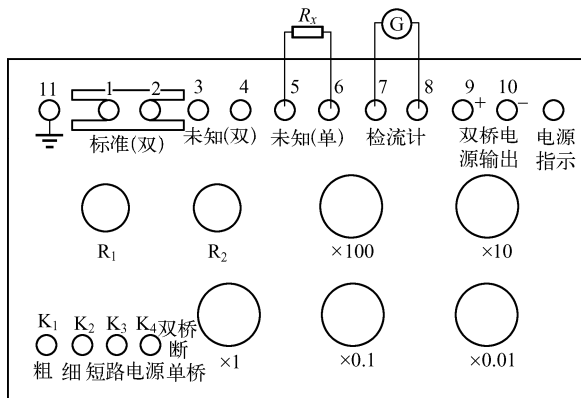


图 2.3-2 QJ-19A 型单双臂直流电桥面板和单桥接法示意图 图 2.3-3 QJ-19A 型单双臂直流电桥单桥电路图

5. 把 R_x 直接放在“未知单”旋钮端面上并拧紧旋钮。

6. 根据色环电阻的阻值按照表 2.3-2 正确选择比例臂 R_1 、 R_2 ，由公式 $R_x = \frac{R_1}{R_2} R$ 以及 R_x

的标示值估算 R 的值，并把面板上的 R “旋钮”调到 R 估算值。

7. 打开电桥电源，面板上开关拨向单桥，按下粗调，调节 R 的值，使检流计处于零；弹起粗调，按下细调，调节 R ，使检流计为零，这时 R 值被确定。将 R_1 、 R_2 和 R 记录于表 2.3-3 中。

表 2.3-2 比例臂设定值

R_x (Ω)	比例臂电阻 (Ω)	
	R_1	R_2
$10 \sim 10^2$	100	100
$10^2 \sim 10^3$	100	100
$10^3 \sim 10^4$	1000	100
$10^4 \sim 10^5$	10000	100
$10^5 \sim 10^6$	10000	10

表 2.3-3 数据记录表

被测电阻	R_{x1}	R_{x2}	R_{x3}
R_x 标示值 (Ω)			
R_1 (Ω)			
R_2 (Ω)			
R (Ω)			

- 断开电源，弹起“粗”、“细”调按钮，面板上开关由单桥拨向断，取下已测电阻。
- 重复第 1、2、5、6、7、8 步，测量其余电阻。

【注意事项】

- 连线前，电桥面板上的“粗”、“细”、“短路”按钮都必须弹起，检流计应调整好零点；
- 按下“粗”按钮时，电桥未平衡，如果检流计指针偏转到最大角度，为了避免损坏检流计，“粗”按钮必须弹起，检查比例臂和测定臂的估算值是否正确，再继续测量；
- 开始测量时，检流计未偏转，说明电桥没有连通；
- 换电阻测量时一定要先断开电源；
- 根据色环判断阻值时，一定要准确判断误差标志；
- 在仅靠色环间距还无法判定色环顺序的情况下，还可以利用电阻的生产序列值来加以判别（正反读）。

【思考题】

- 如何正确选用比例臂？其目的何在？
- 影响电桥测量精度的因素有哪些？
- 电桥平衡后，若互换电源和检流计的位置，电桥是否仍保持平衡？试加以证明。

2.3.3 实验拓展——用双电桥测低值电阻

1. 实验仪器

QJ-19A 型单双臂直流电桥（见图 2.3-2）、LM1719A 型直流稳压电源、AC15A 型检流计、标准电阻 0.001Ω 、直流安培计、滑线变阻器、待测铜 1、铜 2、铁棒、换向开关、螺旋测微器、游标尺、导线等。

2. 实验原理

用惠斯通电桥可以测量 $10\sim 100\text{k}\Omega$ 的电阻，而用它来测量 1Ω 以下的低电阻，由于导线电阻和接点处的接触电阻相对不可忽略，测量误差就很大。例如导线电阻和接触电阻之和达 0.001Ω 左右，所测低电阻为 0.01Ω ，则其影响可为 10%；若所测低电阻为 0.001Ω 以下，则无法得出测量结果。为了减小误差，对惠斯通电桥进行改进而发展成双臂电桥，又称为开尔文电桥，它适用于 $10^{-5}\sim 10^2\Omega$ 电阻的测量。

导线电阻和接触电阻都会对低值电阻的测量结果产生影响。图 2.3-4 为测量电阻 R_x 的电路，考虑到电流表、毫伏表与测量电阻的接触电阻后，等效电路如图 2.3-5 所示。由于毫伏表内阻 R_g 远大于接触电阻 R_{13} 和 R_{14} ，所以由 $R=V/I$ ，得到的电阻值是 $(R_x+R_{11}+R_{12})$ 。当待测电阻 R_x 很小时，不能忽略接触电阻 R_{11} 和 R_{12} 对测量结果的影响。

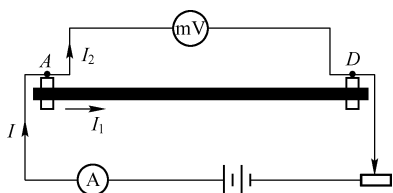


图 2.3-4 测量电阻的电路图

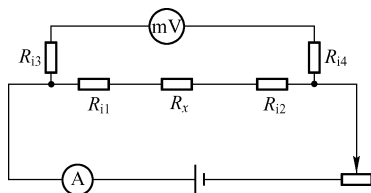


图 2.3-5 等效电路图

为消除接触电阻的影响，接线方式改成四端方式，如图 2.3-6 所示。 A 、 D 为电流端， B 、 C 为电压端，等效电路如图 2.3-7 所示。此时毫伏表上测得电压为 R_x 的电压降，由 $R_x = V/I$ 即可准确计算出 R_x 。

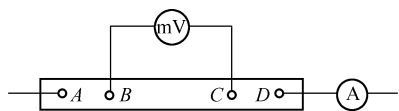


图 2.3-6 四端接法电路图

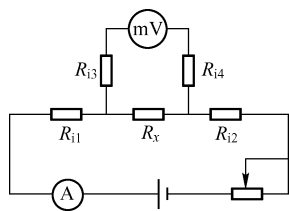


图 2.3-7 四端接法等效电路

把四端接法的低电阻接入原单臂电桥，演变成图 2.3-8 所示的双臂电桥，标准电阻 R_N 和被测电阻 R_x 都备有一对“电流接头”，如 R_N 的 C_{N1} 和 C_{N2} ； R_x 的 C_{x1} 和 C_{x2} ，同时还备有一对“电位接头”， R_N 的 P_{N1} 和 P_{N2} ； R_x 的 P_{x1} 和 P_{x2} ， R_x 和 R_N 用一根粗短导线 r 连接起来，并和电源组成一闭合回路。在它们的“电位接头”上分别与桥臂电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 相连接。图 2.3-9 是图 2.3-8 的等效电路，分别用 r_1 、 r_2 、 r_3 、 r_4 、 r_1' 、 r_2' 表示接触电阻和接线电阻之和。其中 r_3 、 r_4 分别并入 R_4 、 R_2 （几百欧姆）中， r_1 、 r_2 分别并入 R_3 、 R_1 （大电阻）中， r_1' 、 r_2' 都并入粗导线的电阻 r 中， r_1' 、 r_2' 都并入电源 E 的支路的电阻值中。

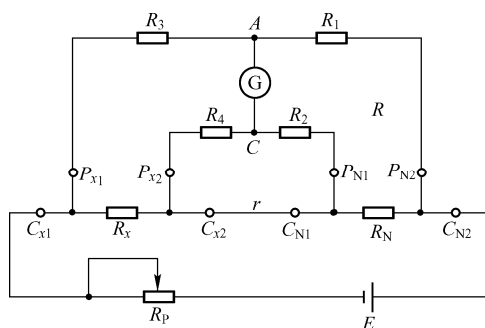


图 2.3-8 双臂电桥测量原理

G —检流计； E —直流电源； R_1, R_2, R_3, R_4 —桥臂电阻； R_N —标准电阻；
 R_x —被测电阻； R_p —调节电阻； C —电源接头； P —电位接头

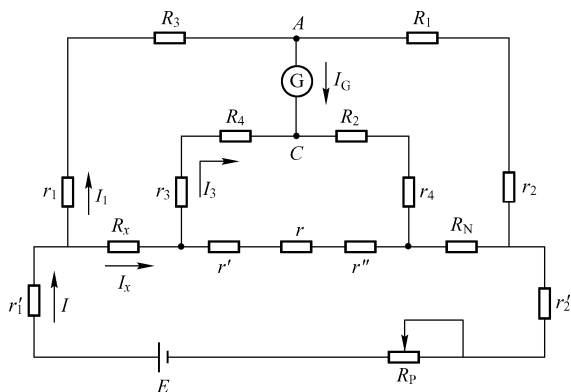


图 2.3-9 双臂电桥测量原理等效电路

当电桥达到平衡时，通过检流计的电流 $I_G=0$ ， A 、 C 两点电位相等，则可得下列方程

$$I_1(R_3 + r_1) = I_x R_x + I_3(R_4 + r_3)$$

$$I_1(R_1 + r_2) = I_x R_N + I_3(R_2 + r_4)$$

$$(I_x - I_3)r = I_3(R_2 + R_4 + r_3 + r_4)$$

因为 $R_3 \gg r_1$, $R_1 \gg r_2$, $R_4 \gg r_3$, $R_2 \gg r_4$, 上述方程可简化为

$$I_1 R_3 = I_x R_x + I_3 R_4$$

$$I_1 R_1 = I_x R_N + I_3 R_2$$

$$(I_x - I_3)r = I_3(R_2 + R_4)$$

解方程组得

$$R_x = \frac{R_3}{R_1} R_N + \frac{r R_3}{R_4 + R_2 + r} \left(\frac{R_2}{R_1} - \frac{R_4}{R_3} \right) \quad (2.3-3)$$

在制造电桥时, 使电桥在调节平衡的过程中, 总保持 $R_2 / R_1 = R_4 / R_3$, 那么式 (2.3-3) 中包括有 r 的部分总可等于零, 则被测电阻 R_x 由下式求得

$$R_x = \frac{R_3}{R_1} R_N \quad (2.3-4)$$

本实验使用 QJ-19A 型单双臂两用电桥的双臂电桥测低阻, 其电路图如图 2.3-10 所示。它是根据上述原理做成的。其中 $R_{外}$ 、 $R_{内}$ 与图 2.3-8 中 R_3 、 R_4 相对应, 故由图 2.3-10 可得

$$R_x = \frac{R_{外}}{R_1} R_N + \frac{r R_{外}}{R_{内} + R_2 + r} \left(\frac{R_2}{R_1} - \frac{R_{内}}{R_{外}} \right) \quad (2.3-5)$$

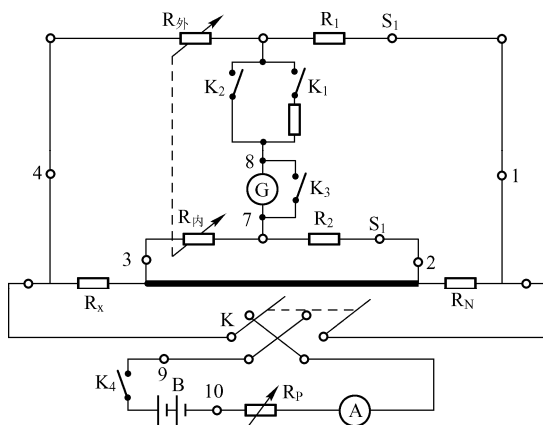


图 2.3-10 QJ-19A 型双臂电桥原理图

K—外接换向开关; A—外接安培计; R_p —外接变阻器; E—外接直流电源; r —外接粗短导线;

G—外接检流计; R_x —外接被测电阻; R_N —外接标准电阻

制造电桥时, 可使得 $R_1 = R_2$, $R_{外}$ 、 $R_{内}$ 采用两个机械联动的转换开关, 同时调节它们的数值, 使得 $R_{内} = R_{外} = R$, 其倍率分别为 $\times 100$, $\times 10$, $\times 1$, $\times 0.1$, $\times 0.01$, 选择所组成的总电阻由于保持 $R_2 / R_1 = R_{内} / R_{外}$, 故式 (2.3-5) 中包含有 r 的项便等于零, 被测电阻 R_x 就由下式决定

$$R_x = \frac{R_{外}}{R_1} R_N = \frac{R_N}{R_2} R \quad (2.3-6)$$

利用双电桥测低电阻, 能够排除或减小接线电阻和接触电阻对测量结果的影响, 其原理如下:

(1) 被测电阻 R_x 和标准电阻 R_N 之间的接线电阻和电流接头 C_{x2} 、 C_{N2} 的接触电阻 r'' 、 r' 都并入电阻 r 中, 由式 (2.3-3) 可看出, 只要保证 $R_2 / R_1 = R_4 / R_3$, 不管 r 为何值, 包含 r 的项总是等于零, 这样就排除了这部分接线电阻和接触电阻对测量结果的影响。由于受到指零仪——检流计的灵敏度限制, 实际上对 r 有些影响, 因此, 在双臂电桥上, r 的数值应尽

量小 ($\leq 0.001\Omega$), 连接导线 r 选用粗导线, 尽量短。

(2) R_x 和 R_N 与电源连接的接线电阻, 以及 C_x 、 C_{N1} 的接触电阻 r'_1 和 r'_2 只对总的工作电流 I 有影响, 对电桥平衡无影响, 故对测量结果的影响被排除了。

(3) 电位接头 P_{x1} 、 P_{N1} 、 P_{x2} 、 P_{N2} 的接线电阻以及接触电阻都分别包括到桥臂支路里。由于 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 都选择在 10Ω 以上, 实验中做到引线电阻应小于 0.005Ω , 则对测量结果影响可减小, 以至排除。

实验中, 低值电阻等器件可按图 2.3-11 所示方式接线, 各个电阻见配置表 2.3-4。

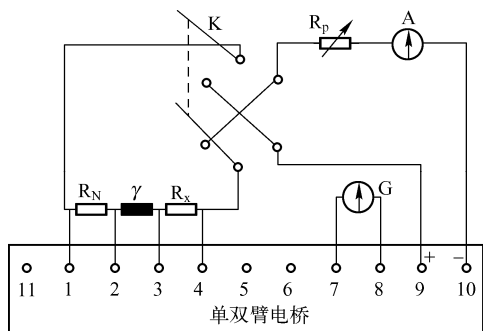


图 2.3-11 双臂电桥接线图

表 2.3-4 比例配置表

$R_x(\Omega)$	R_N	$R_1 = R_2(\Omega)$
10~100	10	100
1~0	1	100
0.1~1	0.1	100
0.01~0.1	0.01	100
0.001~.01	0.001	100
0.0001~.001	0.001	1000
0.00001~.0001	0.001	1000

【参考文献】

[1] 谢行恕, 康士秀, 霍剑青. 大学物理实验第 2 册 (第 1 版) [M]. 北京: 高等教育出版社, 2001.

2.3.4 阅读资料——电桥

一个同源输入、差值输出指零的两端口复合比率网络便是电桥网络, 简称为电桥。电桥自 1843 年诞生起, 至今已有 160 多年历史。按电桥的电源性质和桥臂结构的不同, 可以区分为直流电桥及交流电桥两大系统。按电桥的比率性质, 可以把电桥分为阻抗比率臂电桥、变压器比率臂电桥、向轴感应比率臂电桥、双曲线函数电桥、电阻中和电桥及电磁桥等。按使用的平衡性分为平衡电桥和非平衡电桥。电桥由于具有反应迅速、灵敏度高的特点而被广泛应用于电子产品和测量计量中。比如 LCR 电桥或称数字电桥, 是一种能够测量电感 L 、电容 C 、电阻 R 、阻抗 $|Z|$, 以及损耗因子 D 和品质因数 Q 这几种基本参数的测试仪器。非平衡电桥与一些传感元件配合使用, 达到观测和控制环境变化的目的。3DB 电桥也叫同频合路器, 是通信系统中常用的无源器件, 尤其是在射频、微波电路与系统中应用广泛。图 2.3-12 和图 2.3-13 分别是几种古典直、交流电桥。

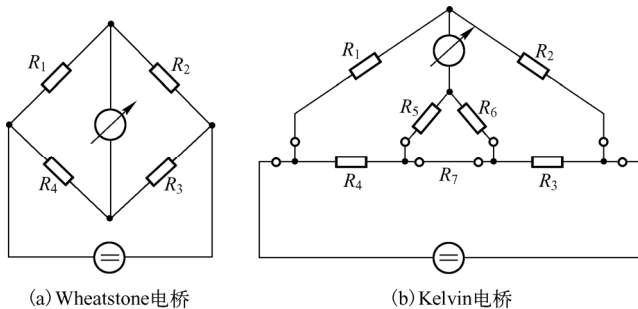
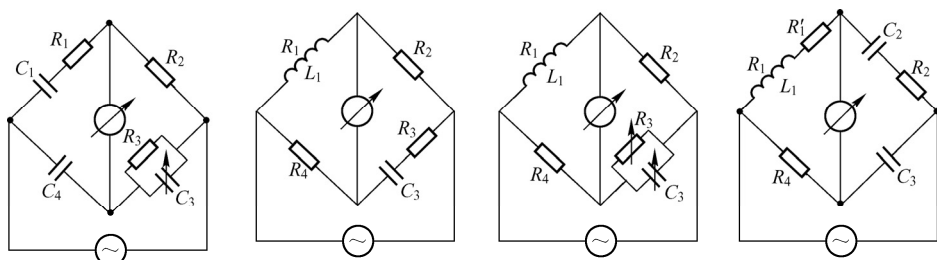


图 2.3-12 直流电桥示例



(a) Schering 电容电桥

(b) Hay 电感电桥

(c) Maxwell 电感电桥

(d) Owen 电感电桥

图 2.3-13 交流电桥示例

【参考文献】

[1] 张功铭, 赵复真. 新型电桥: 电桥的探索与创新 (第 1 版) [M]. 北京: 中国计量出版社, 2007.

2.4 分光计的调试及测三棱镜的折射率

JJY 型分光计是一种分光测角的光学仪器。可对光的反射、折射、衍射的角度进行测量。

- (1) 利用光的反射原理测量棱镜的角度；
- (2) 利用光的折射原理测量棱镜的最小偏向角，从而计算棱镜玻璃的折射率和色散率；
- (3) 和光栅配合，进行光的衍射实验，测量光波波长；
- (4) 和偏振片、波片配合，进行光的偏振实验，等等。

【实验目的】

1. 了解分光计的结构，学会调节和使用分光计；
2. 学会用最小偏向角法测量玻璃三棱镜的折射率。

2.4.1 实验仪器

分光计、三棱镜、钠灯及附属设备等。

1. 分光计的结构

分光计的结构如图 2.4-1 所示。

2. 分光计的调整

为了精确测量，必须将分光计调好。调节分光计的要求是：①平行光管和望远镜的光轴与分光计的旋转主轴垂直；②使光源发出平行光通过平行光管；③望远镜接收平行光（聚焦无穷远）。

(1) 目测粗调

用目视法调整望远镜、平行光管和载物台面都大致垂直于旋转主轴。其步骤如下：

- ① 把分光计的平行光管对准光源；
- ② 调节望远镜和平行光管的倾斜度螺钉，使它们基本上水平，并且都大致垂直于旋转主轴；
- ③ 把载物台调到所需要的高度，并且固定好。调节载物台的三个调平螺钉，使载物台表面基本上水平。
- ④ 把两游标转到便于观察的位置。

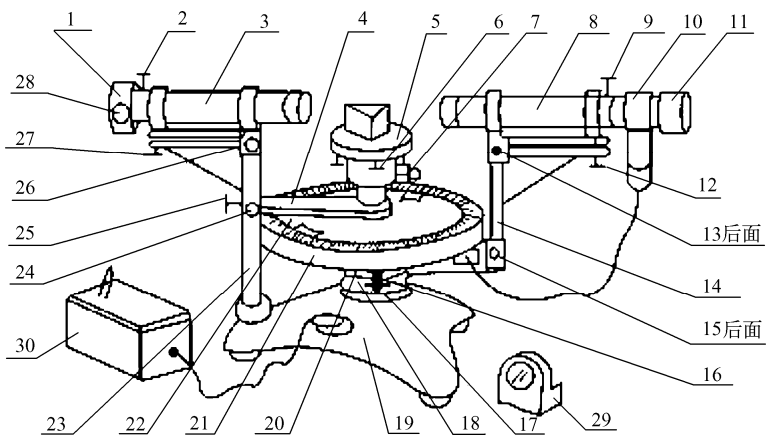


图 2.4-1 分光计的结构图

1. 狭缝装置; 2. 狭缝装置锁紧螺钉; 3. 平行光管部件; 4. 制动架(二); 5. 载物台; 6. 载物台调平螺钉(3只); 7. 载物台锁紧螺钉; 8. 望远镜部件; 9. 目镜锁紧螺钉; 10. 阿贝式自准直目镜; 11. 目镜视度调节手轮; 12. 望远镜光轴高低调节螺钉; 13. 望远镜光轴水平调节螺钉; 14. 支臂; 15. 望远镜微调螺钉; 16. 转座与度盘止动螺钉; 17. 望远镜止动螺钉; 18. 制动架(一); 19. 底座; 20. 转座; 21. 刻度盘; 22. 游标盘; 23. 立柱; 24. 游标盘微调螺钉; 25. 游标盘止动螺钉; 26. 平行光管光轴水平调节螺钉; 27. 平行光管光轴高低调节螺钉; 28. 狭缝宽度调节手轮; 29. 平面反射镜; 30. 电源适配器

(2) 目镜的调焦

目镜调焦的目的是使眼睛通过目镜能够看清目镜中分划板上的黑十字准线。调焦方法：一边旋转目镜调焦手轮，一边从目镜中观察，直到分划板刻度线成像清晰。调焦前最好拿一张白纸放在物镜前面，利用室内光的漫反射照明。

(3) 望远镜的调焦

望远镜调焦的目的是将目镜分划板上的十字线调到物镜的焦平面上，也就是望远镜对无穷远调焦。其方法如下：

① 接上灯源，将电源开关拨至 ON，照亮目镜内的十字分划板。

② 将反射镜按图 2.4-2 所示放置在载物台上。这样放置的优点是：若要调节平面镜的倾斜度，只要调节螺钉 b 或 c 就行了（螺钉 a 与平面镜的倾斜无关）。并且使望远镜的光轴大致与反射镜面垂直。

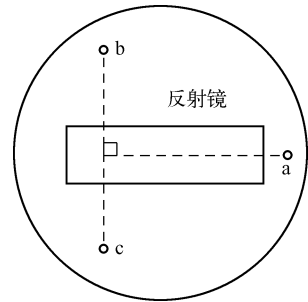


图 2.4-2 平面反射镜在载物台上的放置方式

③ 转动载物台，调节望远镜的倾斜度和反射镜的倾斜度，使从分划板上十字缝里发出的光线经反射镜反射回到望远镜中。但此时从目镜中观察，只能看到一团模糊的亮斑。然后调节物镜和分划板之间的距离。松开目镜锁紧螺钉 9，前后移动目镜 10，使得分划板处在物镜的焦平面上时，这一光斑就会形成清晰的亮十字像，如图 2.4-3 所示。

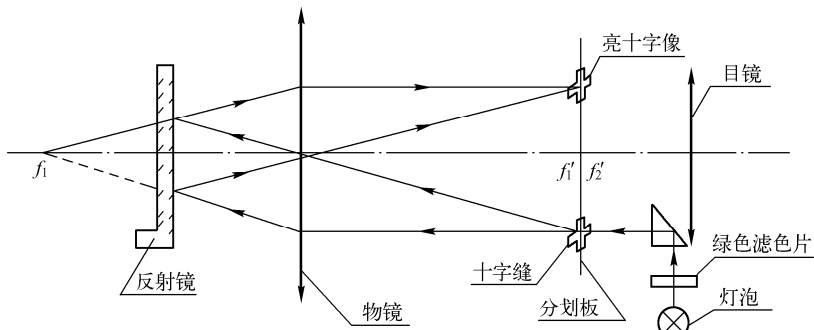


图 2.4-3 自准直法示意图