

大学物理实验 1

汕头大学物理系普通物理实验室 编

2026 年 3 月修订

目录

绪论.....	(1)
误差理论.....	(3)
力、热学实验	
实验一 用拉伸法测量杨氏模量.....	(18)
实验二 单摆实验.....	(26)
实验三 落球法测量液体的粘滞系数.....	(34)
实验四 用扭摆法测量物体的转动惯量.....	(38)
实验五 用电热法测定热功当量.....	(44)
*实验六 碰撞实验.....	(48)
电磁学实验	
电学实验操作规程.....	(56)
电磁学实验的常用仪器和器件.....	(57)
实验七 示波器的原理和使用.....	(63)
实验八 用惠斯登电桥测电阻.....	(74)
实验九 电表的改装和校准.....	(80)
实验十 用电位差计测量电动势.....	(87)
*实验十一 示波器测绘磁材料的磁化曲线和磁滞回线.....	(94)
实验十二 交流电路的谐振现象.....	(97)
光学实验	
光学实验预备知识.....	(105)
实验十三 薄透镜聚焦的测量.....	(112)
实验十四 分光计的调节和使用.....	(115)
实验十五 光波波长的测量及光栅特性的研究.....	(119)
实验十六 用牛顿环测透镜曲率半径.....	(123)
实验十七 用迈克尔逊干涉仪测激光波长.....	(128)
*实验十八 棱镜玻璃折射率的测量.....	(133)
带*的为选做实验	

绪 论

科学实验是科学理论的源泉，是工程技术的基础。作为 21 世纪的理工科大学学生，不仅要具备比较深广的理论知识，还要具有从事科学实验的能力，以适应科学技术的不断进步和社会主义建设迅速发展的需要。

物理学从本质上来说是一门实验科学。物理实验是物理学的基础，物理定律、物理学的理论等无一不是建立在实验基础上的。任何物理理论，都必须依靠实验提供精确的材料来验证，如果新的理论与实验事实不一致，则不论理论体系本身在数学上、逻辑上多么严密，都不得不进行修正，甚至于被否定，这已经被历史事实所证明。

事实正是这样，在物理学史上许多关键问题的解释，最后都是诉诸于实验。例如，杨氏双缝光的干涉实验证实光的波动说，迈克尔逊—莫雷实验证实以太不存在，赫兹实验证实麦克斯韦的电磁理论等，实验都起了决定性的作用。近代物理学的例子就更多了。因此，物理实验教学与物理理论教学具有同等重要的地位，它们既有深刻的内在联系和配合，又有各自的任务和作用。

随着科学技术的发展，用于物理实验的仪器越来越精细和广泛，用实验可以验证更深一层的理论，推动理论研究的发展，从而启示新的科学思想，提供新的实验方法。能用精确的数据阐明各类事物的细微差异，证明一定的假设，并使假设转化为理论，指出理论的适用范围。近代科学的历史表明，物理学领域内所有研究成果都是理论和实验密切结合的结晶。

在学习物理学时，我们务必明了物理学具有上述特点，正确处理理论课与实验课的关系，不可偏废一方。

物理实验课的作用和任务：

1. 学习并掌握进行物理实验的基础知识、基本方法和基本技能，了解科学实验的主要过程，培养学生初步具有科学实验的能力，其中包括：

1) 能够自行阅读实验教材或资料，作好实验前的准备；

2) 运用实验原理和方法去研究某些物理现象，并对其具体测量，从而得出结论；

3) 从实验要求或课题出发，根据实验原理，确定和选择适当的仪器设备，完成简单的设计性实验，并能获得正确的结果；

4) 熟悉常用仪器的基本原理，了解其结构和性能，并能正确使用它们，熟

悉基本实验方法。在实验中，注意培养分析和排除故障的能力；

5) 正确记录和处理实验数据，绘制曲线，分析影响实验结果的原因，撰写合格的实验报告；

2. 通过对物理现象的观察和分析，对物理量的测量，加深对物理学某些概念、规律和原理的理解。

3. 培养学生严肃的工作作风，实事求是的科学态度和勇于探索、勇于克服困难、爱护财产、遵守纪律的优良品德。

应当指出，对于一个工程技术人员来说，如果没有扎实的理论知识，没有足够的现代科学实验能力，不仅不能作出创造性的成果，也难于适应科学技术飞速发展的需要，难以担负起建设社会主义祖国的重任。

只要你能抓住重点，认真刻苦的努力学习，严格按照本课程的要求，我们相信，你一定会获得成功。

(摘自《基础物理实验》沈元华 陆申龙主编)

实验数据的处理

物理实验的目的是探寻和验证物理规律，而许多物理规律是用物理量之间的定量关系来表达的。在物理实验中可以获得大量的测量数据，这些数据必须经过认真地、正确地、有效地处理，才能得出合理的结论，从而把感性认识上升为理性认识，形成或验证物理规律。所以，数据处理是物理实验中一项极其重要的工作，本章将介绍一些最基本的数据处理方法，包括误差分析，不确定度评定、有效数字及作图拟合法等。

第一节 实验误差的分析

一个待测物理量的大小，在客观上应该有一个真实的数值，叫作“真值”。由于测量方法、测量仪器、测量条件及测量者的种种问题，实际测得的数值即测量值，只能是一个真值的近似值。测量值与真值之差称为误差。测量方法的考虑、测量仪器的选择、测量条件的确定、测量数据的处理等等都应在可能的范围内力求减少误差。

所谓测量，就是由测量者采取某种测量方法、用某种测量仪器将待测量与标准量进行比较。例如，为测量一个铁球的质量，可以用天平（测量仪器）把铁球（待测物）放在天平的一侧，把适量的砝码（其质量为标准量）放在另一侧，适当调节而使两侧平衡时（测量方法），即可得到待测物的质量，即待测量。由此可知，测量值并不等于真值，测量值存在误差的原因可能有以下三方面：测量仪器（及标准量）的问题、测量方法的问题、测量者的问题。现分述如下：

1. 测量仪器及标准量的问题

在许多情况下，测量仪器上的刻度（或数字显示）就代表了标准值，如米尺、温度计等。但是这种“标准量”也并非真正标准，它与真正的标准必有差距。例如，米尺端边会磨损、刻度有不均匀性或不够准确、在不同温度下米尺本身的长度的有变化等。

2. 测量方法的问题

采用不同的测量方法可能会得到不同的测量结果，其影响是很明显的。例如，

为了测量一块玻璃板的温度，用一般的温度计测量和用激光测量，其结果就往往不一样；为了测量重力加速度，用测单摆周期的方法或用自由落体的方法结果也可能不同。

3. 测量者的问题

这方面的问题很多。首先是“估读”的不同，待测量位于标准量的某两刻度之间时，必须估读其数值，不同测量者的估读会有不同；这与测量者的位置，熟练程度及仪器所处的环境状况等有关。其次是“判断”的不同，例如，要测量干涉条纹间的距离，为确定何处是干涉条纹的中心位置（即光最亮处或最暗处），需要经验和判断能力，最后还有“误读”的可能，即测量者长期工作中难免犯错误，把数据读错也是很可能发生的。

以上三方面的问题都会造成误差。其中第一个问题和第三个问题产生的误差大小与测量仪器、测量者、测量条件和测量次数有关的，可以用一定的方法进行评定（第三个问题中的“误读”除外），这种评定的方法将在第二节详述。测量方法的问题则要进行定性分析以尽量避免或进行定量分析予以修正。

例如，要测量一块正在加热的平面玻璃的温度，无论用温度计或热电偶，放在玻璃板的任何一侧，都不可能测准的，因为测温元件（温度计或热电偶）与待测元件（玻璃板）的受热与散热情况都不相同，它们的温度不可能相同。因此，可以改用激光测温的方法，它利用待测元件本身作为测温元件，从玻璃表面间反射光的干涉条纹变化来确定其温度变化，就可以避免因测温元件与待测元件的温度差而形成的误差。

又如，用单摆测量重力加速度的一般公式为

$$g=4\pi^2 \frac{L}{T^2}$$

式中 T 为单摆周期，L 为摆长。这里忽略了单摆摆线的质量，忽略了单摆运动是非简谐运动，也忽略了空气阻力的影响等等，如要修正上述这些因素造成的误差，则要进行严格的计算和修正。如摆线质量为 μ ，摆球半径为 r，质量为 m，则上述公式

应修正为

$$g=4\pi^2 \frac{L}{T^2} \left(1 + \frac{2}{5} \frac{r^2}{L^2} - \frac{1}{6} \frac{\mu}{m} \right)$$

摆动的幅角较大或空气的浮力与阻力的影响较大时还应作其他各种修正。

实验误差的分析是一项十分重要的工作，要考虑实际上可能对测量结果产生影响的各种因素，分析其影响的大小。任何实验都不要把一切影响因素全部消除，这在经济上、时间上、精力上都造成浪费，而实际上也是不可能做到的；只要达到一定的误差允许范围之内就行。而这种分析需要广博的基础知识、丰富的实践经验和高超的判断能力。这就要求我们在各种实验中认真思索，仔细考虑，以积累经验，丰富知识，提高分析判断能力。

第二节 实验不确定度的意义

一、 不确定度评定的意义

如上所述，即使采用了正确的测量方法，由于测量仪器和测量者的问题，测量结果仍不可能是绝对准确的，它必然有不确定的成分，实际上，这种不确定的程度是可以用一种科学的、合理的、公认的方法来表征的，这就是“不确定度”的评定，在测量方法正确的情况下，不确定度愈小，表示测量结果愈可靠。反之，不确定度愈大，测量的质量愈低，它的可靠性愈差，使用价值就愈低。

不确定度必须正确评价。评价得过大，在实验中会怀疑结果的正确性而不能果断地作出判断，在生产中会因测量结果不能满足要求而需要投资，造成浪费；评价得过小，在实验中可能得出错误的结论；在生产中则产品质量不能保证，造成危害。

二、 关于不确定度的一些基本概念和分类

不确定度的评定十分重要，但以往各国对不确定度的表示和评定却有不同看法和规定，这无疑影响了国际间的交流与合作。1992年，国际标准化组织（ISO）发布了具有指导性的文件《测量不确定度表示指南》（以下简称《指南》），为世界各国不确定度的统一奠定了基础。1993年ISO和国际理论与应用物理联合会（IUPAP）等七个国际权威组织又联合发布了《指南》的修订版。从此，物理实验的不确定度评定有了国际公认的准则。

《指南》对实验的测量不确定度有十分严格而详尽的论述。作为普通物理实验教学，只要求对不确定度的下述基本概念有初步的了解。

不确定度是表征测量结果具有分散性的一个参数，它是被测量的真值在某个量值范围内的一个评定。所谓“标准不确定度”是指以“标准偏差”表示的测量不确定度估计值，简称不确定度，常记为 u 。（关于“标准偏差”的意义请阅本章附录 1。）标准不确定度一般可分为以下三类：

1、A 类评定不确定度：在同一条件下多次测量，即由一系列观测结果的统计分析评定的不确定度，简称 A 类不确定度，常记为 u_A 。

2、B 类评定不确定度：由非统计分析评定的不确定度，简称 B 类不确定度，常记为 u_B 。

3、合成标准不确定度：某测量值的 A 类与 B 类不确定度按一定规则算出的测量结果的标准不确定度，简称合成不确定度。

以下分别讨论如何进行不确定度的评定、合成、传递和表示。

三、 标准不确定度的评定

1、 A 类不确定度 u_A

在相同的条件下，对某物理量 x 作 n 次独立测量，得到的 x 值为 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ ，于是平均值为 \bar{x} 为

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1)$$

平均值为测量结果的最佳值，它的不确定度为

$$u_A(\bar{x}) = t^* \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (2)$$

式中的 t 就称为“ t 因子”，它与测量次数和“置信概率”有关。（所谓“置信概率”是指真值落在 $\bar{x} \pm u_A(\bar{x})$ 范围内的概率。） t 因子的数值可以根据测量次数和置信概率查表得到，当测量次数较少或置信概率较高时， $t > 1$ ；当测量次数 $n \geq 10$ 且置信概率为 68.3% 时， $t \approx 1$ ；在大多数普通物理教学实验中，为了简便，一般就

取 $t=1$ 。(关于 t 因子的大小, 请阅本章附录 2。)

2、 B 类不确定度 u_B

若对某物理量 x 进行单次测量, 那么 B 类不确定度由测量不确定度 $u_{B1}(X)$ 和仪器不确定度 $u_{B2}(x)$ 两部分组成。

测量不确定度 $u_{B1}(X)$ 是由估读引起的, 通常取仪器分度值 d 的 $\frac{1}{10}$ 或 $\frac{1}{5}$, 有时也取 $\frac{1}{2}$, 视具体情况而定; 特殊情况下, 可取 $u_{B1}=d$, 甚至更大。例如用分度值为 1mm 的米尺测量物体长度时, 在较好地消除视差的情况下, 测量不确定度可取仪器分度值的 $\frac{1}{10}$, 即 $u_{B1}(X) = \frac{1}{10} * 1\text{mm} = 0.1\text{mm}$; 但在示波器上读电压值时, 如果荧光线条比较宽、且可能有微小抖动, 则测量不确定度可取仪器分度值的 $\frac{1}{2}$, 若分度值为 0.2V, 那么测量不确定度 $u_{B1}(X) = \frac{1}{2} * 0.2\text{V} = 0.1\text{V}$ 。又如, 用肉眼观察远处物体成像的方法粗测透镜的焦距, 虽然所用钢尺的分度值只有 1mm, 但此时测量不确定度 $u_{B1}(X)$ 可取数毫米, 甚至更大。

仪器不确定度 $u_{B2}(x)$ 是由仪器本身的特性所决定的, 它定为:

$$u_{B2}(x) = \frac{a}{c} \quad (3)$$

其中, a 是仪器说明书上所标明的“最大误差”或“不确定度限值”, c 是一个与仪器不确定度 $u_{B2}(x)$ 的概率分布特性有关的常数, 称为“置信因子”。仪器不确定度 $u_{B2}(x)$ 的概率分布通常有正态分布、均匀分布和三角分布以及反正弦分布、两点分布等。对于正态分布、均匀分布和三角分布, 置信因子 c 分别取 3、 $\sqrt{3}$ 和 $\sqrt{6}$ 。如果仪器说明书上只给出不确定限值 (即最大误差), 却没有关于不确定度概率分布的信息, 则一般可用均匀分布处理, 即 $u_{B2}(x) = \frac{a}{\sqrt{3}}$ 。

有些仪器说明书没有直接给出其不确定限值, 但给出了仪器的准确度等级, 则

其不确定度限值 a 需经计算才能得到。如指针式电表的不确定度限值等于其满量程值乘以等级，例如满量程为 10V 的指针式电压表，其等级为 1 级，则其不确定度限值 $a=10\text{V}\cdot 1\%=0.1\text{V}$ 。又如电阻箱的不确定度限值等于示值乘以等级再加上零值电阻，由于电阻箱各档的等级是不同的，因此在计算时应分别计算，例如常用的 ZX21 型电阻箱，其示值为 $360.5\ \Omega$ ，零值电阻为 $0.02\ \Omega$ ，则其不确定度限值 $a=(300\cdot 0.1\%+60\cdot 0.2\%+0\cdot 0.5\%+0.5\cdot 5\%+0.02)\ \Omega=0.47\ \Omega$

四、 标准不确定度的合成与传递

由正态分布、均匀分布和三角分布所求得的标准不确定度可以按以下规则进行合成与传递。

1.合成

(1) 在相同条件下，对 x 进行多次测量时，待测量 x 的标准不确定度 $u(x)$ 由 A 类不确定度 $u_A(x)$ 和仪器不确定度 $u_{B2}(x)$ 合成而得。即

$$u(x) = \sqrt{u_A^2(x) + u_{B2}^2(x)} \quad (4)$$

其中， $u_{B2}(x)$ 的值由 (3) 式根据相应的概率分布进行估算。

(2) 对待测量 x 进行单次测量时，待测量 x 的标准不确定度 $u(x)$ 由测量不确定度 $u_{B1}(x)$ 和仪器不确定度 $u_{B2}(x)$ 合成而得，即

$$u(x) = \sqrt{u_{B1}^2(x) + u_{B2}^2(x)} \quad (5)$$

对于单次测量，有时会因待测量的不同，其不确定度的计算也有所不同。例如用温度计测量温度时，温度的不确定度合成公式为上述的 (5) 式；而在长度测量中，长度值是两个位置读数 x_1 和 x_2 之差，其不确定度合成公式为 $u(x) = \sqrt{u_{B1}^2(x_1) + u_{B1}^2(x_2) + u_{B2}^2(x)}$ 。这是因为 x_1 和 x_2 在读数时都有测量不确定度，因此在计算合成不确定度时都要算入。(注：这种情况下，长度 x 可以理解为间接测量量，即 $x = x_2 - x_1$ ，这样 $u_{B1}(x)$ 可用标准不确定度的传递公式 (7) 得 $u_{B1}(x) = \sqrt{u_{B1}^2(x_1) + u_{B1}^2(x_2)}$ ，再用公式 (5) 得到 $u(x) = \sqrt{u_{B1}^2(x_1) + u_{B1}^2(x_2) + u_{B2}^2(x)}$ 。

因此使用公式(5)时没有必要对长度这样的量做特别的处理, 摘录者注)

2. 传递

在间接测量时, 待测量(即复合量)是由直接测量的量通过计算而得的, 若 $y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_N)$, 且各 x_i 相互独立, 则测量结果 y 的标准不确定度 $u(y)$ 的传递公式为:

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) \quad (6)$$

由(6)式可以得到一些常用的不确定度传递公式如下:

对加减法: $y = x_1 \pm x_2$, 则

$$u^2(y) = u^2(x_1) + u^2(x_2) \quad (7)$$

对乘除法: $y = x_1 \cdot x_2$, 或 $y = \frac{x_1}{x_2}$, 则

$$\left[\frac{u(y)}{y} \right]^2 = \left[\frac{u(x_1)}{x_1} \right]^2 + \left[\frac{u(x_2)}{x_2} \right]^2 \quad (8)$$

对乘方(或开方): $y = x^n$, 则

$$\left[\frac{u(y)}{y} \right]^2 = \left[n \cdot \frac{u(x)}{x} \right]^2 \quad (9)$$

五、 不确定度的表示

由于不确定度 $u(x)$ 表示的是待测量 x 的真值在一定的置信概率下可能存在的范围, 因而, 测量结果常表示为 $x \pm u(x)$, 如: 所测长度为 $(1.05 \pm 0.02)m$ 这是不确定度的一般表示法。

有时, 以不确定度对于待测量的百分比来表示更能看出不确定度的相对大小, 即把测量结果的不确定度表示为 $\frac{u(x)}{x} \times 100\%$, 如: 所测长度为 $1.05m$, 相对不确定度 2% , 这是不确定度的百分比表示法。

除了以上两种常用的不确定度表示法外, 还有一种更为简略的表示法, 叫做不

确定度的有效数字表示法。所谓有效数字，是指一个数值中，从第一个非 0 数字算起的所有数字。例如， $x=0.0035$ 中的 3 是第一个非 0 数字，因此 x 有两位有效数字：3 和 5，小数点前后的三个 0 都是表示数量级的，不是有效数字。又如， $x=3.500$ 有四位有效数字 3，5，0，0 都是有效数字，其中的两个 0 虽然对该数的大小并无意义，但它却表示这个数的准确程度可达到小数点后的第三位，即 x 的值约在 3.495 和 3.504 之间，它与 $x=3.5$ 是显然不同的。后者表示小数点后的第一位数（即 5）就是可疑的，不确定的。测量最后结果的不确定度，一般只取一位有效数字，而测量结果的末位有效数字应与不确定度的有效数字对齐，即测量结果的末位有效数字是不确定的（特殊情况下，不确定度的有效数字可取两位，即测量值的末两位有效数字都是不确定的）。这样，根据测量值的不确定度，可以决定测量值的有效数字位数。

在计算数据时，当有效数字位数确定后，须进行数字修约，修约规则为：四舍六入五成双“五成双”的意思是遇到被舍数字恰为“50”或只有“5”一位数字时，则“5”有时入，有时不入，应使有效数字末位保持为偶数，这样可使舍和入的机会均等，从而避免在处理较多数据时因入比舍多而带来的问题。

例如：经计算所得的长度值为 $x=3.54825m$ ，若不确定度为 $0.0003m$ ，则应取测量值的结果为 $x=3.5482m$ ；若不确定度为 $0.002m$ ，则应取测量值的结果为 $x=3.548m$ ；若不确定度为 $0.05m$ ，则应取测量值的结果为 $x=3.55m$ ；若不确定度为 $0.1m$ ，则应取测量值的结果为 $x=3.5m$ （如以毫米为单位，则应写成 3.5×10^3mm ，不可写成 $3500mm$ ）。这样，从测量值的有效数字，就可大约知道它的不确定度，这就是不确定度的有效数字表示法，显然，这只是一种简略的表示法，在严格的定量实验中，应采用有确定度的一般表示法或百分比表示法。

虽然测量最后结果的不确定度，一般只取一位有效数字，但在运算过程中，不确定度一般要取两位或更多，中间过程测量值的有效数字也应适当多取一些，以免过早舍入，造成不合理的结果。

有效数字的运算有一定的规则，最简单和常用的规则是：

当两个数相加减时，有效数字的位数应对齐；当两个数相乘除时，有效数字的

位数应与有效数字少的一致。

例如, $x=1.832m$ (共有 4 位有效数字, 末位在小数点后第 3 位),

$y=1.69m$ (共有 3 位有效数字, 末位在小数点后第 2 位)

则: $x+y=3.52m$ (末位取小数点后第 2 位); $x-y=0.14m$ (末位取小数点后第 2 位);

$xy=3.10m^2$ (共取 3 位有效数字) $\frac{x}{y}=1.08$ (共取 3 位有效数字)

六、 实例

用电子天平测得一个圆柱体的质量 $m=80.36g$; 电子天平的最小指示值为 $0.01g$; 不确定度限值为 $0.02g$ 。用钢尺测量该圆柱体的高度 $H=H_2-H_1$, 其中, $H_1=4.00cm$, $H_2=19.32cm$, 钢尺的分度值为 $0.1cm$, 估读 $1/5$ 分度; 不确定度限值为 $0.01cm$ 。用游标卡尺测量该圆柱体的直径 D (数据如下表所示); 游标卡尺的分度值为 $0.002cm$; 不确定度限值为 $0.002cm$ 。

D/cm	2.014	2.020	2.016	2.020	2.018
	2.018	2.020	2.022	2.016	2.020

试根据上述数据, 计算该圆柱体的密度及其不确定度。

(1) 圆柱体的质量 $m=80.36g$

$$u(m) = \sqrt{(u_{B1}(m))^2 + (u_{B2}(m))^2} = \sqrt{(0.01)^2 + (0.02/\sqrt{3})^2} = 0.015g$$

(2) 圆柱体的高 $H=H_2-H_1=(19.32-4.00)cm=15.32cm$

$$u(H) = \sqrt{(u_{B1}(H_1))^2 + (u_{B2}(H_1))^2 + (u_{B1}(H_2))^2 + (u_{B2}(H_2))^2} = \sqrt{2 \cdot ((0.01)^2 + (0.01/\sqrt{3})^2)} = 0.029cm$$

(3) 圆柱体的直径的平均值 $\bar{D} = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} D_i = 2.0184cm$

$$u_A(\bar{D}) = \sqrt{\sum_{i=1}^{10} (D_i - \bar{D})^2 / (10 \cdot (10 - 1))} = 0.00078 \text{ cm}$$

$$u(\bar{D}) = \sqrt{(u_A(\bar{D}))^2 + (u_{B2}(\bar{D}))^2} = \sqrt{0.00078^2 + (0.002/\sqrt{3})^2} = 0.0014 \text{ cm}$$

(4) 根据上述数据计算材料的密度 ρ 。

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{4m}{\pi D^2 H} = \frac{4 \times 80.36}{3.1416 \times (2.0184)^2 \times 15.32} = 1.639 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho = \frac{u(\rho)}{\rho} = \sqrt{\left(\frac{u(m)}{m}\right)^2 + \left(2 \frac{u(\bar{D})}{\bar{D}}\right)^2 + \left(\frac{u(H)}{H}\right)^2} = 0.24\%$$

$$u(\rho) = \frac{u(\rho)}{\rho} \times \rho = 0.24\% \times \rho = 0.004 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho \pm u(\rho) = (1.639 \pm 0.004) \text{ g/cm}^3$$

第三节 数据处理的基本方法

一、列表法

1、列表的作用

在记录和处理数据时，常常把数据列成表格，可以简明地表示有关物理量之间的对应关系，便于随时检查测量结果是否合理，及时发现、分析问题。数据列表还可以提高处理数据的效率，在处理数据时，有时把计算过程中的中间值列入表内，可以随时从列表中发现运算是否正确，以利于计算和分析误差。列表还有助于找出有关物理量之间规律性的联系，得出正确的结论或获得经验公式等。

2、列表的要求

- (1) 简单明了，便于看出有关量之间的关系。
- (2) 表明所列表格中各符号所代表的物理量的意义，写明其单位，物理量的单位应写在标题栏目中，不要重复地写在各个数值的后面。
- (3) 表格中的数据要正确反映被测物理量的有效数字。
- (4) 必要时需对某一个项目加以说明。

二、作图法——图示法和图解法

1、作图法的作用与优点

物理实验中得出的一系列数据，若用图线来表示，可以比较直观地表达所测物理量之间的关系，有时还可以不通过计算就能读得在某种情况下物理量之间对应值。因此，作图法是研究物理量之间变化规律，找出对应的函数关系，求经验公式的最常用方法之一。

如果图线是根据许多数据点描出的平滑曲线，则作图法具有求出多次测量值平均效果的作用，并能对平均值进行修正。

通过作图，能简便地从图线中求出实验所需要的某些结果：如对直线 $y=ax+b$ ，可从图线斜率求出 a 的值，从截距求出 b 的值；可以作出仪器的标准曲线；图线还可帮助发现实验中个别的测量错误，并可通过图线对系统误差进行分析等。

2、实验数据的图线表示法——图示法和图解法

用图示法表达物理量之间的关系时，应注意以下要求：

(1) 坐标点和实验图线必须画得清楚正确，不仅能正确反映物理量之间的数量关系，容易读数，而且要求在一张图中尽可能反映更多方面的变化特点。

(2) 因为所作的图线是供他人阅读的，就必须既无遗漏，又不含糊，使现象的物理本质揭露得清晰完整。

现以毫米方格坐标纸作图为例，来说明作图的具体方法，如图 2-1-1 所示。

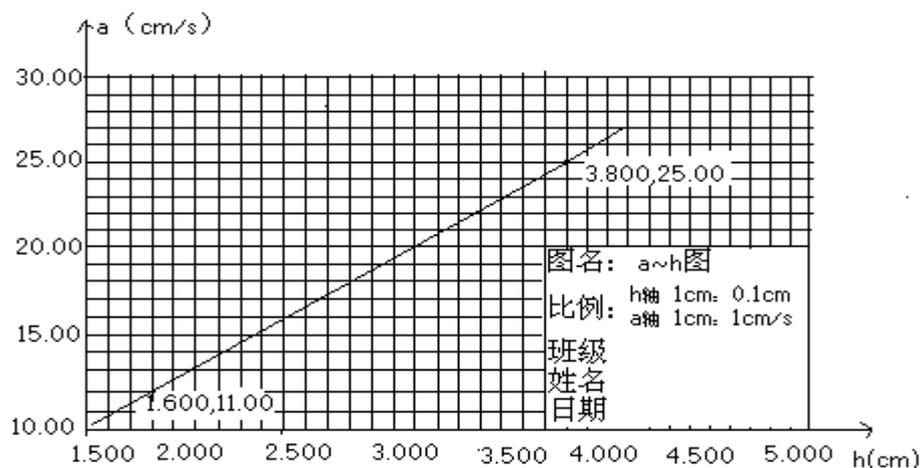


图 2-1-1 作图的例子

(图中每一格代表毫米方格纸上 1 大格，即 1 厘米，其中应再有十个毫米格，因不容易画，故没有画出来)

①用列表法列表：由实验测得滑块在重力作用下沿斜面滑下的加速度 a 与斜面高度 h 的对应关系数据列表如下。

表 2-1-1 加速度 a 与斜面高度 h 的关系

$h(\text{cm})$	1.646	2.220	2.794	3.368	3.942
$a(\text{cm/s}^2)$	10.77	14.55	18.34	22.16	25.99

②选坐标轴：以横轴代表自变量，纵轴代表应变量，各以两条互相垂直的粗线表示，并加箭头，在轴的末端注明所代表的物理量及其单位，使读者一眼就看出图线所表达的关系。

③确定坐标比例和标度：在纵、横两个坐标轴上相隔一定距离用整齐的数字标度，定标度时要注意做到：

a、坐标读数的有效数字位数一般应不少于实验数据的有效数字位数。

b、比例的选择。比例应取得适当，以不用计算就能直接读出图线上每一点的坐标为宜。通常用 1、2、5 而不选用 3、7、9 的比例来标度。

c、应尽量使图线占据图纸的大部分，不要偏于一角或一边。为此，横轴和纵轴的比例可取得不同，且两轴的交点不一定取 $(0, 0)$ ，以便调整图线的大小和位置，对于不同的数据，应选取大小适当的图纸。

d、如果数据特别大或特别小，可以提出乘积因子，例如提出 $\times 10^3$ 或 10^{-2} 等放在坐标轴最大值的右边。

④描点：依据实验数据，用削尖的硬铅笔在图上描点。为避免联接图线时图点被遮盖或搞错，或因同一图上有几条图线时图点可能混淆，故常用 +、 \times 、 \odot 、 Δ ，等符号中的一种符号标明。同一图线上的数据点要用同一种符号，如果图上有两条图线，则应用两种不同符号以示区别。

⑤连线：除了作校正图线时相邻两点一律用直线联接外，一般说，连线时应尽量使图线紧贴所有的观测点（但是应当舍去严重偏离图线的点子），并使观测点均匀分布于图线的两侧。为使图线平滑，可用透明的直尺或曲线板（作曲线时用）作图，作曲线时，眼睛应注视所有的点子，当曲线板的某一段跟观测点的趋向一致时，再用削尖的铅笔联成光滑图线。如欲将此图线延伸到测量数据范围之外，则依其趋

势用虚线表示。所有图线不得直接徒手画，一定要用直尺、曲线板（尺）画线。

延伸实验图线，以便得到实验范围外的数据的方法，叫做外推法。这是一种包含冒险性的处理方法，使用时应当慎重，因为外推法假定物理定律不仅可以用于实验范围，而且在外延的范围内也可以成立，但事实并非总是如此。

⑥写图例说明：在图右上方（或右下方）空旷处位置写出简洁而完整的图例说明。图例说明一般包括下列内容：名称，即图名；比例（要分别表示横轴、纵轴上单位长度与物理量的比例数）；班级、姓名、实验日期等内容。

图线不仅可以表述物理量之间的关系，而且可以在图线上直接得到解新的数据，如在图线上求斜率、截距，并由它们的值再求得有关的物理量。如图 2-1-1 中在直线上取两点求出斜率 K 后，就可求出该地区的重力加速度。求斜率时应在图线上选取相距较远的两点。并用与原来作图点不同的符号标出，以示区别，且在其旁用括号注出该点的纵、横轴的坐标值。于是可得直线斜率：

$$K = \frac{a_2 - a_1}{h_2 - h_1} = \frac{3.800 - 1.600}{25.00 - 11.00} = 0.1571(1/s^2)$$

求助于斜率时应注意写明单位。

在实际工作中，有许多复杂的函数形式，经过适当变换后成为线性关系，即把曲线改成直线。

例如：(1) $y = ax^b$ (a、b 为常量)

则 $\log y = b \log x + \log a$

$\log y$ 为 $\log x$ 的线性函数：斜率为 b ，截距为 $\log a$ 。

(2) $y = ae^{-bx}$ (a、b 为常量)

则 $\ln y = -bx + \ln a$

$\ln y \sim x$ 图线的斜率为 $-b$ ，截距为 $\ln a$ 。

(3) $y = ab^x$ (a、b 为常量)

则有 $\log y = (\log b)x + \log a$

$\log y \sim x$ ，图线的斜率为 $\log b$ ，截距为 $\log a$ 。

经过这样的变换，使物理量之间的关系看上去更为明了。许多经验公式也就不难解

决了。

作图用的纸，除毫米方格纸外，还有对数坐标纸和半对数坐标纸等等。若上例中(1)用对数坐标纸作图，(2)、(3)用半对数坐标纸作图，则作图就更简单方便。

三、逐差法

逐差法，又称逐差算法，是物理实验中常用的数据处理方法之一，一般用于等间隔线性变化测量中所得数据的处理。由误差理论知道，算术平均值是几次测量的近真值(最佳值)，为了减少随机误差，在实验中都是尽量进行多次测量。但是，在等间隔线性变化测量中，若仍用一般的求平均值的方法，我们将发现只有第一次测量值和最后一次测量值起作用，所有中间的测量值全部抵消，对于这种测量，就无法反映出多次测量能减少随机误差的特点了。

我们以测量弹簧倔强系数的例子来说明逐差法处理数据的过程。将弹簧悬挂在装有竖直标尺的支架上，先记下弹簧下端点在标尺上的读数 n_0 ，然后依次在弹簧下端的挂钩上加 1 千克、2 千克、3 千克、...7 千克的砝码，分别记下对应的弹簧下端点在标尺上的位置 n_1 、 n_2 、 n_3 、... n_7 。对应于 1 千克砝码弹簧相应的伸长为： $\Delta n_1 = n_1 - n_0$ ； $\Delta n_2 = n_2 - n_1$ ； $\Delta n_3 = n_3 - n_2$ ；...， $\Delta n_7 = n_7 - n_6$ 。根据求平均值的定义，弹簧在 1 千克砝码的作用下，其平均伸长为：

$$\begin{aligned}\overline{\Delta n} &= \frac{\Delta n_1 + \Delta n_2 + \Delta n_3 + \cdots + \Delta n_7}{7} \\ &= \frac{(n_1 - n_0) + (n_2 - n_1) + (n_3 - n_2) + \cdots + (n_7 - n_6)}{7} \\ &= \frac{n_7 - n_0}{7}\end{aligned}$$

从上式可知，中间值全部抵消，只有始末二次测量值起作用，与增加重量 7 千克的单次测量等价。

为了保持多次测量优点，只要在数据处理方法上作一些变化，仍能达到利用多次测量来减少随机误差的目的。

通常，可将等间隔连续测量值分成两组：

一组为： n_0 、 n_1 、 n_2 、 n_3 ；

另一组为： n_4 、 n_5 、 n_6 、 n_7 。

取对应项的差值(称为逐差)

$$\Delta n_1 = n_4 - n_0;$$

$$\Delta n_2 = n_5 - n_1;$$

$$\Delta n_3 = n_6 - n_2;$$

$$\Delta n_4 = n_7 - n_3.$$

再取平均值

$$\overline{\Delta n} = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 \Delta n_i = \frac{1}{4} [(n_4 - n_0) + (n_5 - n_1) + (n_6 - n_2) + (n_7 - n_3)]$$

由此可见，与上面不同，这时各个数据都用上了。但应注意， $\overline{\Delta n}$ 是增加 4 千克砝码时弹簧的平均伸长。

实验一 用拉伸法测量金属丝的杨氏模量

一、目的

1. 用拉伸法测定金属丝的杨氏量；
2. 用光杠杆测量微小长度变化；
3. 用逐差法和作图法处理数据。

二、仪器用具

杨氏模量测定仪、光杠杆、望远镜和标尺(镜尺组)、钢丝、砝码、直尺、钢卷尺、螺旋测微计等。

三、原理

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，在弹性限度内，伸长应变 $\frac{\delta L}{L}$ 与外施压强 $\frac{F}{S}$ 成正比：

$$\frac{F}{S} = E \cdot \frac{\delta L}{L}$$

其中的比例系数 E 称为该金属丝的杨氏模量。因此杨氏模量 E 可表示为：

$$E = \frac{F \cdot L}{S \cdot \delta L} \quad (1)$$

若金属丝的直径为 d ，则 $S = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot d^2$ ，代入(1)式可得：

$$E = \frac{4 \cdot F \cdot L}{\pi \cdot d^2 \cdot \delta L} \quad (2)$$

式(2)中的 L 以米为单位， F 以牛顿为单位，则杨氏模量 E 的单位为牛顿/米²。 F 、 L 和 d 都比较容易测量，但是，在外力 F 作用下金属丝的长度变化 δL 是很小的，不易测准。实验中采用光杠杆测量 δL 。

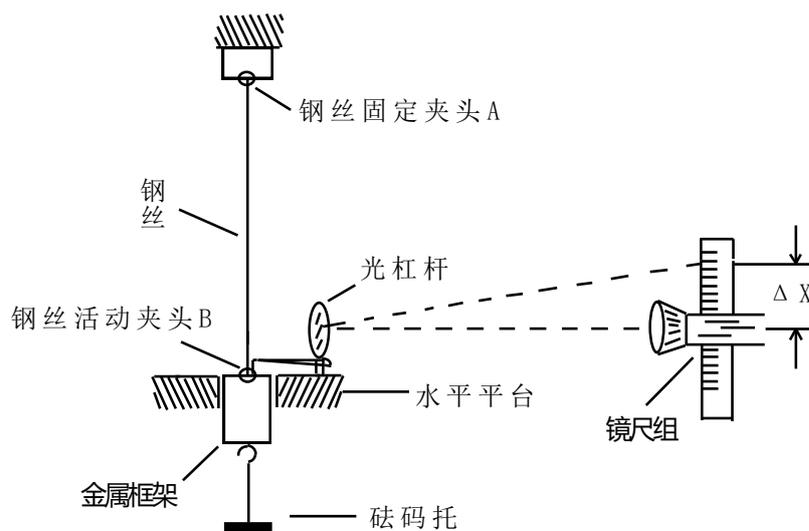
实验装置如图一所示，包括以下二部分：

1. **钢丝和支架**。固定于支架(图一中未画出)的钢丝固定夹头**A**将待测金属丝(钢丝)的上端夹紧固定；下端连接一个金属框架，由钢丝活动夹头**B**夹紧。框架较重，使钢丝维持伸直。框架下附有砝码托，可以载荷不同数值的砝码。钢丝夹头**B**可随钢丝的伸缩而上下移动。支架中部有一个可以升降的水平平台(未画出可调升降的装置)。

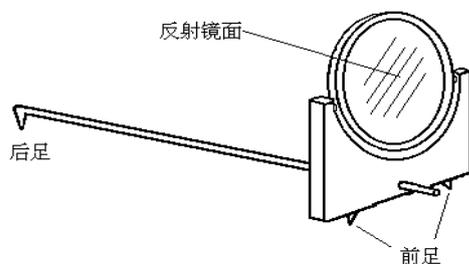
2. **光杠杆和镜尺组**。这是测量 δL 的主要部件，光杠杆的外形见图二。实验时光杠杆的

后足放在钢丝夹头**B**上；前两足放在水平平台的横槽里；三足维持在同一水平面上。可见，当金属丝受外力伸长 δL 时，光杠杆后足也随之下降 δL 。镜尺组是由一测量望远镜及其旁边的一竖放标尺所组成。

若**K**为光杠杆后足尖到两前足尖的垂线长度，**D**为光杠杆镜面至标尺的距离， ΔX 是在外力**F1**以及**F2**作用下，望远镜中标尺读数之差。可得出（详见附录中介绍）：



图一 实验装置示意图



图二光杠杆的外形图

$$\delta L = \frac{\Delta X \cdot K}{2 \cdot D} \quad (3)$$

若将(3)式和**F=mg**代入(2)，则钢丝的杨氏模量**E**可表示为：

$$E = \frac{8 \cdot m \cdot g \cdot L \cdot D}{\pi \cdot d^2 \cdot \Delta X \cdot K} \quad (4)$$

四、实验内容

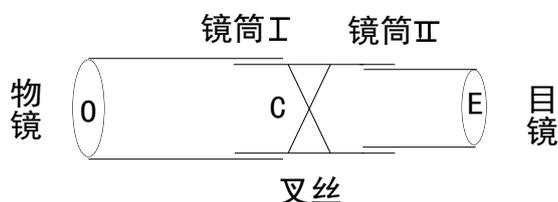
1. 杨氏模量测定仪的调整

①在钢丝下端加1个砝码(标示值为0.320Kg),将钢丝拉直。检查钢丝活动夹头**B**是否能在水平平台的方孔中上下自由活动而不与方孔有较大的摩擦。

②将光杠杆放在水平平台上,其后足放在钢丝的活动夹头**B**上,后足的竖槽对准钢丝,但不要与钢丝相碰;前两足放在水平平台的横槽里(光杠杆的前后足距离可以调节),三足维持在同一水平面上。使反射镜面大致铅直。

2. 读数望远镜的调节

读数望远镜的结构示意图如图三所示,主要由物镜**O**、叉丝**C**及目镜**E**三部分组成。望远镜之物镜**O**皆为凸透镜,以收集远物之光线并使之会聚成象;叉丝**C**乃是读数之标准;而目镜**E**则是用来观察象和叉丝的。



图三 读数望远镜的结构示意图

粗调

①将望远镜正对光杠杆反射镜,调节望远镜的上下位置使其与光杠杆处于同一高度上。调节望远镜三脚支架的底脚螺丝,使望远镜大致水平,标尺大致铅直。

②眼睛靠近目镜,沿着望远镜外侧上方的准星方向对准光杠杆反射镜,观察反射镜中是否有标尺的像,若没有,则要移动镜尺组,直到在望远镜的上方能看到标尺像在视场的中央为止。

细调

①调节目镜,看清十字叉丝。眼睛贴近目镜,转动目镜**E**(调节镜筒II,以改变叉丝**C**到目镜**E**的距离),直至看清望远镜中的叉丝**C**为止。此后的调节中不再旋动目镜。

②调节物镜,看清标尺读数。眼睛贴近目镜,转动物镜**O**(调节镜筒I,以改变目镜**E**和叉丝**C**的整体到物镜**O**的距离),若看不到标尺像,判断后再细调一下镜尺组的位置,直到能清晰地看到镜面所反射的标尺读数与叉丝而无视差为止(视差是由于标尺成象面没有落在叉丝面上,所以,当眼睛上下移动时,标尺像与叉丝有明显的相对运动)。

③转动望远镜,使水平叉丝与标尺的刻度平行。

3. 用逐差法处理数据

①记下望远镜中与叉丝横线重合的标尺读数 n_1 。

②逐次将**0.320Kg**的砝码加在砝码托上(砝码的开槽要交叉放置),同时在望远镜中读记对应的 n_i ,共加七次(共加砝码**7×0.320Kg**)。然后将所加砝码逐次去掉(每次减**0.320Kg**),记下对应读数 n'_i ,取两组对应数据的平均值得到:

$$\bar{n}_i = \frac{n_i + n'_i}{2}, i = 1, 2, \dots, 8$$

然后用逐差法处理数据。

数据记录表格如下:

砝码个数	砝码 (Kg)	增重时的读数 n_i (cm)	减重时的读数 n'_i (cm)	读数的平均值 \bar{n}_i (cm)	逐差法处理数据得 N_i (cm)	平均值 \bar{N} 及其不确定度 $U(\bar{N})(cm)$
0	0			$\bar{n}_1 =$	$N1 = \bar{n}_5 - \bar{n}_1$	\bar{N} = (N1+N2+N3+N4)/4 =
1	0.320			$\bar{n}_2 =$	=	
2	0.640			$\bar{n}_3 =$	$N2 = \bar{n}_6 - \bar{n}_2$	
3	0.960			$\bar{n}_4 =$	=	
4	1.280			$\bar{n}_5 =$	$N3 = \bar{n}_7 - \bar{n}_3$	$U(\bar{N}) =$
5	1.600			$\bar{n}_6 =$	=	
6	1.920			$\bar{n}_7 =$	$N4 = \bar{n}_8 - \bar{n}_4$	
7	2.240			$\bar{n}_8 =$	=	

用逐差法处理数据时, (4)式应改写为:

$$E = \frac{8 \cdot m \cdot g \cdot L \cdot D}{\pi \cdot d^2 \cdot \bar{N} \cdot K} \quad (5)$$

这时, (5)式中的m=1.280Kg。

③在操作的过程中, 应注意:

●在调好实验观察系统之后, 整个操作过程中都要防止实验系统产生震动, 以保证读数准

确。

- 加减砝码时勿使砝码托摆动，且将砝码缺口交叉放置。
 - 增减砝码时动作要轻慢，应等钢丝不晃动并且形变稳定之后再行测量。
 - 测量中应随时注意判断数据，以便及时发现问题，改进操作。
- ④ 将光杠杆的三个足尖印在一张平纸上，作后足尖到两前足尖的垂线，测量其长度**K**；测量钢丝的原长**L**及标尺至镜面的距离**D**；各测量**1**次。
- ⑤ 用螺旋测微计测量钢丝各段不同位置上的直径，共**3**次，求其平均值**d**及不确定度**U(d)**。

测量时应十分仔细，切勿扭折钢丝。

⑥ 估计一次测量的不确定度 $U(K), U(L)$ 及 $U(D)$ ，计算不确定度 $U(E)$ ，表示测量结果 $E \pm U(E)$ 。

4、用作图法处理数据

把测量公式(5)改写为：

$$N = \frac{8 \cdot L \cdot D}{\pi \cdot d^2 \cdot K \cdot E} \cdot F = b \cdot F \quad (6)$$

其中 $F=mg$ 。

在既定的实验条件下， b 是一个常量。若以 $N_i = \bar{n}_{i+1} - \bar{n}_1$ ($i=1, 2, 3, \dots, 7$) 为纵坐标， F_i 为横坐标作图，应得一斜率为 b 的直线。由图上得到 b 的数据后可计算出杨氏模量：

$$E = \frac{8 \cdot L \cdot D}{\pi \cdot d^2 \cdot K \cdot b} \quad (7)$$

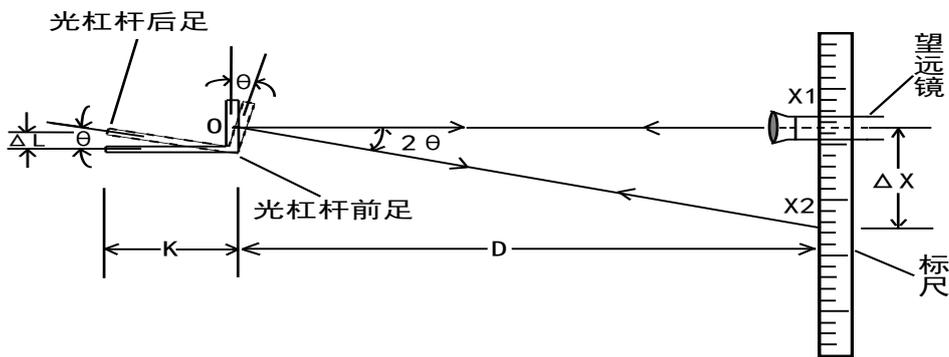
五、回答问题

1. 用逐差法处理数据有什么好处？

2. 在测量钢丝的伸长量时，先是逐步增重，然后又逐步减重，最后求 $\overline{n_i}$ 。为什么要这么做？

附录 光杠杆原理(摘自物理系本科生实验“金属线胀系数的测定”中的附表。)

将光杠杆和镜尺组安置好，按上述的步骤，适当调整就会在望远镜中看到经由镜面反射的标尺象。设标尺上刻度 X_1 与叉丝横线重合(见图三)，即光线 X_1-0 经平面镜反射后进入望远镜中。当金属棒受热伸长 ΔL 时，光杠杆的后足也随之上升 ΔL ，而前足保持不



图三

动，于是后足以前足为轴旋转一角度 θ ，这时平面镜向顺时针方向也转过 θ 角。此时，直尺上刻度 X_2 (在刻度 X_1 的下方) 和叉丝横线重合，即光线 X_2-0 经平面镜反射进入望远镜中 [注]。入射光线 X_1-0 的反射光线和入射光线 X_2-0 的反射光线方向相同，根据光的反射定律，镜面旋转 θ 角，反射线将旋转 2θ 角。在 θ 角较小时 (即 $\Delta L \ll K$ 。注意：图中的 θ 角被夸大画出)，而 X_1 、 X_2 又都在望远镜的附近，因此有：

$$\theta \approx \frac{\Delta L}{K}$$

$$2\theta \approx \frac{X_2 - X_1}{D} = \frac{\Delta X}{D}$$

式中 K 是光杠杆后足尖到两前足尖的垂线长度， D 是镜面到标尺的距离，合并上面两式，可得到：

$$\Delta L = \frac{K}{2 \cdot D} \cdot \Delta X$$

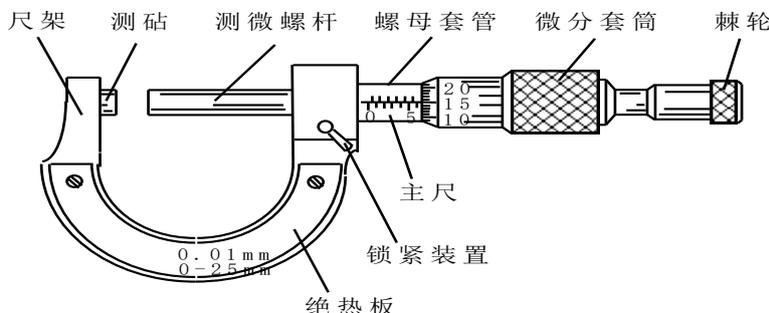
由此可见，光杠杆将金属棒的伸长量 ΔL 加以放大，其放大倍数是 $\frac{2 \cdot D}{K}$ ，此放大的作用相当于“杠杆”的作用，故称为光杠杆。若标尺的分度值为 1mm ，则光杠杆的分度值为 $\frac{K}{2 \cdot D}\text{mm}$ 。光杠杆的作用在于将微小的 ΔL 放大为标尺上的位移 ΔX ，通过 X_2 、 X_1 、 D 及 K 这些比较容易测量准确的量，间接地测定 ΔL 。

[注意] 在实验“用拉伸法测定杨氏模量”中，要注意到，当金属丝受外力而伸长 ΔL 时，光杠杆的后足随之下降 ΔL ，而前足保持不动，于是后足以前足为轴旋转一角度 θ ，这时平面镜向逆时针方向也转过 θ 角。此时，直尺上刻度 X_2 (应在刻度 X_1 的上方) 和叉丝横线重合，即光线 X_2-0 经平面镜反射进入望远镜中，此时公式 (4) 仍成立 (既在“用拉伸法测定杨氏模量”实验中的公式 (3))。

螺旋测微计使用说明

1. 螺旋测微计（千分尺）简介

螺旋测微计又称千分尺，是比游标卡尺更精密的长度测量仪器。实验室常用的千分尺如图五所示，其量程为25mm，分度值为0.01mm。



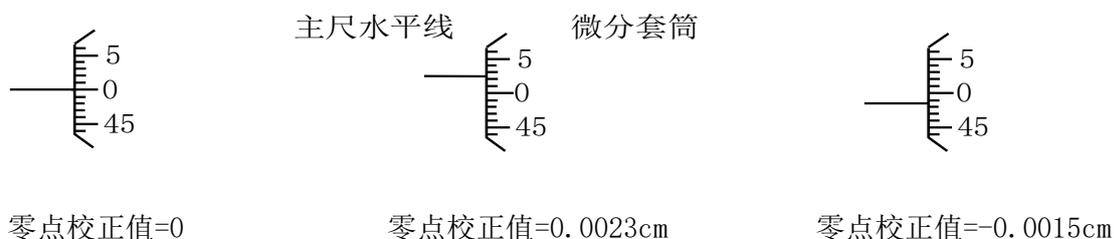
图五 螺旋测微计(千分尺)

千分尺结构的主要部分是精密测微螺杆和套在螺杆上的螺母套管以及紧固在螺杆上的微分套筒。螺母套管上的主尺有两排刻线，下半边是毫米刻线，而上半边是半毫米刻线。微分套筒圆周上刻有50个等分格，当它转一周时，测微螺杆前进或后退一个螺距(0.5mm)，所以螺旋测微计的分度值为 $0.5\text{mm}/50 = 0.01\text{mm}$ ，即千分之一厘米，所以又称千分尺。

2. 读数方法

① 当千分尺的测砧与测微螺杆密切吻合时的读数一般都不为0。因此，在测量时都应检查0点，并记下0点读数以便对测量值进行0点校正。物体的长度等于测量物体的读数减去零点校正值，所以应特别注意零点校正值是正数还是负数。

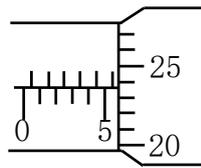
图六是零点校正值的示意图。当微分套筒的零刻度线在螺母套管的主尺水平线的下方时，零点校正值为正数，测量结果偏大；反之，零点校正值为负数，测量结果偏小。



图六 千分尺的零点校正

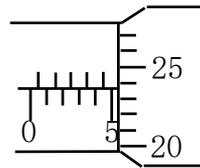
② 读数时由主尺读整刻度值，0.5mm以下由微分套筒读出分格值，并估读到0.001mm那一位。

③ 留心主尺上的半毫米刻度线是否露出微分套筒边缘。若是，如图七(A)所示，由主尺读得5.5mm，由微分套筒读得0.237mm，此时测量的读数应为5.737mm；若否，如图七(B)所示，此时由主尺读得的应是5.0mm，由微分套筒读得的还是0.237mm，此时测量的读数则为5.237mm。



(A)

读数为5.737mm



(B)

读数为5.237mm

图七 半毫米刻度线是否露出套筒边缘时的读数

3. 使用注意事项

①测量时须用棘轮。测量者转动螺杆时，对被测物所加压力的大小会直接影响测量的准确，为此，在结构上加一棘轮作为保护装置。当测微螺杆端面将要接触到被测物之前，应旋转棘轮，直至接触上被测物时，它就自行打滑，并发出“嗒嗒”声，此时即应停止旋转棘轮，进行读数。

②读数时应用锁紧装置止动，以免测微螺杆移动而使测量不准。读数完毕后，应随即松开锁紧装置。

③手握千分尺的绝热板部分，被测物也尽量少用手接触，以免因热胀影响测量精度

④用毕还原仪器时，应将螺杆退回几转，留出空位，以免热胀使螺杆变形。

实验二 单摆实验

一、目的

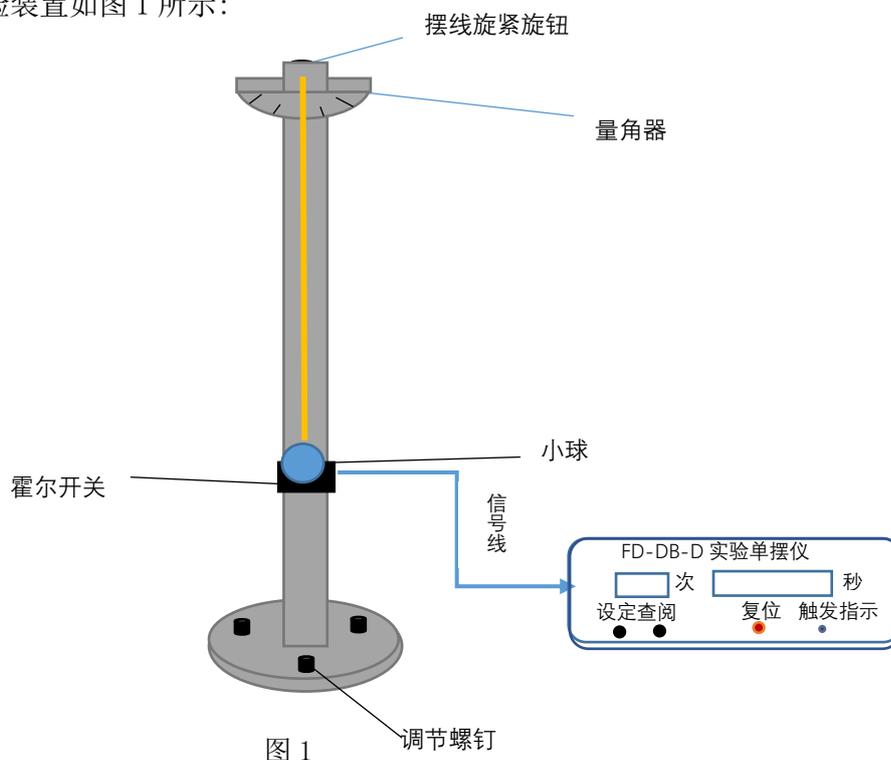
1. 学习用单摆测重力加速度；
2. 掌握自动测时方法；
3. 学习用图解法处理数据；
4. 学会用外推法求极小摆角时的振动周期。

二、仪器用具

单摆实验架、实验单摆仪、游标卡尺、机械秒表

三、仪器简介

本实验装置如图 1 所示：



自动计时的实现方法

本实验采用 UGN3109 型集成开关型霍尔传感器（集成霍尔开关）与电子计时器实现自动计数计时。集成霍尔开关放于小球正下方，1cm 为霍尔开关导通（或截止）距离。磁钢放置在小球正下方。当小磁钢随小球从霍尔开关上方经过时，会使集成霍尔开关输出一个信号给计时器，计时器便开始计时。当磁钢经过半个周期回复至平衡位置时，又产生一个信号让计时器停止计时。所以单摆摆动一个周期，在计时器上反映为 2 次。如记录的次数和计时仪器

面板上预置的次数一样，则该信号便是计时器停止计时的信号。计时器锁存和显示计数。

四、原理

1. 重力加速度的测定

把一个金属小球拴在一根细长的线上，如果细线的质量比小球的质量小很多，而球的直径又比细线的长度小很多，则此装置可看作是一个不计质量的细线系住一个质点，稍微推动一下小球，在重力作用下，小球即可在竖直面内摆动，这种装置称为单摆。

2. 周期与摆幅的关系

在忽略空气阻力和浮力的情况下，由单摆振动时能量守恒，可得质量为 m 的小球在 θ 处动能和势能之和为常数，即

$$\frac{1}{2}mL^2\left\{\frac{d\theta}{dt}\right\}^2 + mgL(1 - \cos\theta) = E_0 \quad (1)$$

(1) 式中， L 为单摆摆长， θ 为摆角， g 为重力加速度， t 为时间， E_0 为小球的总机械能。因小球在摆幅 θ_m 处释放，则有

$$E_0 = mgL(1 - \cos\theta_m)$$

代入 (1)，解方程 (1) 得到

$$\frac{\sqrt{2}}{4}T = \sqrt{\frac{L}{g}} \int_0^{\theta_m} \frac{d\theta}{\sqrt{\cos\theta - \cos\theta_m}} \quad (2)$$

(2) 式中 T 为单摆振动周期。

令 $k = \sin(\theta_m/2)$ ，并作变换 $\sin(\theta/2) = k \sin\phi$ 便有

$$T = 4 \sqrt{\frac{L}{g}} \int_0^{\pi/2} \frac{d\phi}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2\phi}}$$

这是一个椭圆积分，经近似计算得到

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}} \left\{ 1 + \frac{1}{4} \sin^2\left(\frac{\theta_m}{2}\right) + \dots \right\}$$

$$\text{即 } 2T = \pi \sqrt{\frac{L}{g}} \left\{ 4 + \sin^2\left(\frac{\theta_m}{2}\right) + \dots \right\} \quad (3)$$

在传统手控计时方式下，一般取 1 级近似，即不考虑摆角对周期的影响。

$$2T = 4\pi \sqrt{\frac{L}{g}} \quad (4)$$

但当振动周期可以精确测量时，必须考虑摆角的影响，即用二级近似公式。

$$2T = \pi \sqrt{\frac{L}{g}} \left\{ 4 + \sin^2\left(\frac{\theta_m}{2}\right) \right\} \quad (5)$$

当 θ_m 趋近于零时，(5) 式化简为 (4) 式。

3. 系统误差分析及修正

上面已谈到(4)式是作了一些假定后得出的，实际上悬线质量并不为零，小球也不是质点，悬点有一定的摩擦，空气有一定的阻力等等，这在理论上就不可避免地带来一些误差，现分析如下：

①悬线质量和小球体积对单摆公式的修正：

考虑到实际情况，严格地说，单摆的振动应看成是一个刚体绕固定轴的摆动，由于悬线有一定的质量和小球有一定的体积，而需对(4)式做如下修正：

$$T^2 = 4\pi^2 \frac{L}{g} \left(1 + \frac{2r^2}{5L^2} - \frac{1}{6} \frac{\mu}{m} \right) \quad (6)$$

其中 r 为小球半径， μ 为悬线质量， m 为小球质量。例如：若 $\frac{r}{L} = 0.03$ ， $\frac{\mu}{m} = 0.01$ ，对重力加

速度带来的相对误差为：

$$\left| \frac{2r^2}{5L^2} - \frac{1}{6} \frac{\mu}{m} \right| = \left| \frac{2}{5} (0.03)^2 - \frac{1}{6} (0.01) \right| = 0.25\% \quad (7)$$

②浮力的修正

考虑到空气浮力的影响，(4)式修正为：

$$T^2 = 4\pi^2 \frac{L}{g} \left(1 + \frac{\rho_0}{\rho} \right) \quad (8)$$

式中 ρ_0 为空气密度， $\rho_0 = 0.001293$ 克/厘米³； ρ 为小球密度，若 $\rho = 7.83$ 克/厘米³，则因空

气浮力带来的相对误差为：

$$\frac{\rho_0}{\rho} = \frac{0.001293}{7.83} \approx 0.02\%$$

③阻尼的修正

考虑空气的粘滞阻力及悬挂点的摩擦对单摆的阻尼作用, (4)式修正为:

$$T^2 = 4\pi^2 \frac{L}{g} \left(1 + \frac{\lambda^2}{4\pi^2}\right) \quad (9)$$

式中 $\lambda = Ln \frac{\theta_n}{\theta_{n+1}}$, 叫做对数减缩, $\frac{\theta_n}{\theta_{n+1}}$ 叫做阻尼比值, 即是在同一边 (相差一个周期) 的相

继两个振幅 (幅角) 的比值。这种阻尼实际很小, 引起的相对误差通常不到百万分之一。除非对精度有更高的要求, 通常是可以略去的。

以上是对每一因素的影响单独所做的修正。实际上, 这些因素的影响是同时存在的, 考虑它们总的影响, 则(4)式应做如下修正:

$$T^2 = 4\pi^2 \frac{L}{g} \left(1 + \frac{2r^2}{5L^2} - \frac{1\mu}{6m} + \frac{1}{8}\theta^2 + \frac{\rho_0}{\rho} + \frac{\lambda^2}{4\pi^2}\right) \quad (10)$$

五、实验内容

1. 传统 (机械表) 法

①用水平仪调节底座水平;

②调节和测量摆线长度。移动标尺上所附的平面镜, 使小球悬点在平面镜的水平横划线处成像。通过仔细调节, 使悬点、横划线、悬点的像三点共线。记下横划线在标尺上的读数, 即摆线的长度 L_1 。测量小球直径 d , 最后摆长 $L = L_1 + d/2$ 。

③渐进法测单摆周期 $T (\theta < 5^\circ)$

测定单摆的振动周期时, 由于撇秒表时手的动作有时快有时慢, 故不能只测一个周期的时间 T , 而是测量单摆连续振动约 100 次的时间, 即 $100T$, 然后求 T , 以减小相对误差, 在测 $100T$ 时, 因为需要一个周期一个周期地累计, 容易使人疲劳, 而且容易数错, 为此, 介绍一下渐进法。

首先测 30 个周期的时间, 这一步仍需一个一个周期地数, 设: $30T^* = 43.35$ 秒, 然后预期 100 整周期的时间, 即约 140 秒。让单摆平稳摆动, 设某次当它由左向右经过平衡位置时撇下秒表按钮, 秒表开始走动, 此时实验者不必一次一次地数周期个数, 可以暂时做其他工作, 等经过 140 秒以后再观察单摆, 当某次它又由左向右经过平衡位置时, 再撇下表, 表停止。假设测得 n 个全摆动的时间 $t_n = 146.15$ 秒, 即 $n = 30t_n / 43.35 = 101.2$, 但周期数 n 只能是整数, 出现非整数, 是由于时间测得不够准确, 因此, 应取 $n = 101$ 。于是算出周期 T 为:

$$T = \frac{t_n}{n} = \frac{146.15}{101} = 1.4470 \text{秒}$$

如果测得 $n=t_n/T^*=101.9$ ，则 n 应取 102 次。重复测三次。

2. 按式(10)对 g 值进行修正（选作）

①用电子天平称出摆线质量 μ 和小球质量 m ，于是可算出小球密度 ρ ；摆长 L 及小球半径

r 前面已测出，. 这样，修正项 $\frac{2}{5} \frac{r^2}{L^2}$ ， $\frac{1}{6} \frac{\mu}{m}$ ， $\frac{\rho_0}{\rho}$ 均可得到。

②测量摆角 θ 。应保证 $\theta \leq 5^\circ$ ，测出时间 t_n 的始末的摆角 $\theta_{\text{始}}$ 、 $\theta_{\text{末}}$ ，求其平均摆角 $\bar{\theta}$ 。

③将有关的测量值代入(10)式中，求出修正后的 g 值。将未经修正的 g 值及修正过的 g 值与汕头地区的标准值 $g = 978.9 \text{cm/s}^2$ 对比。

3、霍尔传感器法实验

①如上法调节和测量摆长；

②线路连接如图 1 所示，在小球底部贴一块小型钕铁硼磁钢，在平面镜上方装上传感器，再移动至摆球下方不到 1.0cm 处，使磁钢产生的磁场能被传感器收到。多功能毫秒计面板上的低电平指示灯亮，（如果低电平指示灯一直不亮，交换小磁钢上、下面），然后下调霍尔传感器与小磁钢的距离，恰使低电平指示灯亮。

③ 调节计时器，预置开关次数。将小球分别拉开一段距离，在量角器上读出拉开的角度（注意消除视差）分别从 5° - 25° ，每隔 5° 测量一个值。复位多功能毫秒仪后放开小球，即开始计数计时工作，小球在传感器所在铅垂面内摆动，计数次数到即刻停止计时。记录不同拉开角度周期 T 。分别各测 3 次。

六、数据记录及处理

1、数据记录

摆长测量数据

①、传统（机械表）法）

次数	$t_{30}(s)$	\bar{T}	$t_n(s)$	n'	$n(n'/\text{取整})$
1					
2					
3					

②、霍尔传感器法 $t_{10}(s)$

拉开角度\测量值\次数	1	2	3
5°			
10°			
15°			
20°			
25°			

2、数据处理

传统法

1、给出 $g = g(\bar{T}, \bar{l}) \pm U(g)$

霍尔传感器法

1、作表格列出 $\sin^2(\theta_m/2)$ 及相应的二倍周期 $2T$ 。

项目\测量值\次数	1	2	3
悬线长度 L_1 (cm)			
小球直径 d (cm)			
摆长 $L = L_1 + d/2$			

2、由表格数据作出 $2T - \sin^2(\theta_m/2)$ 图，并进行直线拟合，得截距 A ($2T(0^\circ)$)。将 A 和

$\theta_m = 0^\circ$ 代入 (4) 式。计算出 g 。

七、思考题

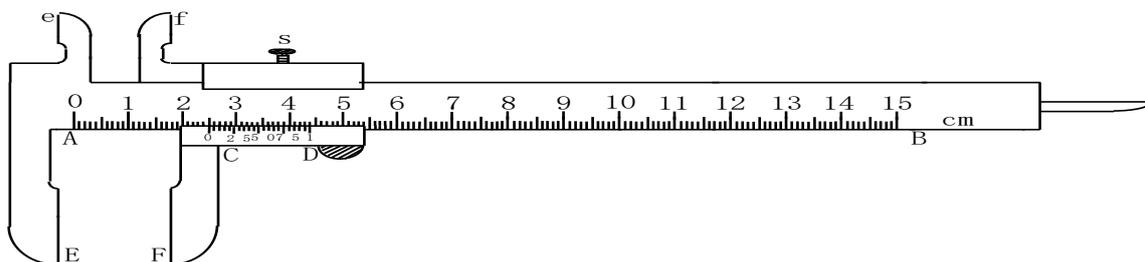
比较三种方法的误差，试分析之。

附录:

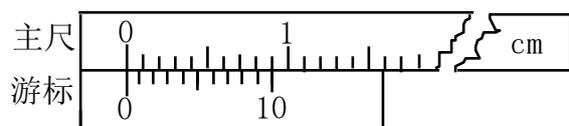
游标卡尺使用说明

1. 游标卡尺简介

游标卡尺的外形如图一所示。AB为主尺，最小分度为 1 毫米；CD为游标，它与F、f 连在一起，松开螺旋S，可使它们一起沿主尺滑动。当E、F(e、f)吻合时（此时深度尺G恰被主尺端遮住），游标的0线应与主尺的0线对准，这时的读数为” 0”（如图二所示）。测量时，两个 0 线之间的距离等于所测的长度，因此，游标零线在主尺上所指的读数就是被测对象的长度。S为固定螺旋。



图一 游标卡尺外型示意图



图二 游标的0线与主尺的0线对准

测量厚度或直径时，将被测物体夹于外量爪EF间；若测内径，则将物体跨套在内量爪e、f 上；深度尺G用来测量槽的深度。紧固螺旋S用来固定量值读数。使用游标卡尺时，一手拿物体，另一手持尺，轻轻把物体卡住，应特别注意量爪不被磨损，不允许用游标卡尺测量粗糙的物体，更不允许被夹紧的物体在卡口内移动。

2. 游标原理

游标是用来提高读数准确度的一种辅助装置，许多种仪器上都有游标。游标上的刻度有10个分度的(如图二)，20个分度的(如图一)和50个分度的。

图二中的游标有10个分度，这10个分度的总长度等于主尺上的9个分度的总长，即等于9毫米，所以游标上每个分度的长度等于 $9/10$ 毫米= 0.9 毫米，与主尺上的一个分度相差 $1-0.9 = 0.1$ 毫米，即0.01厘米。可见，如图一所示的游标卡尺(有20个分度)，其游标上每个分度的长度与主尺上的一个分度相差应为0.05毫米。

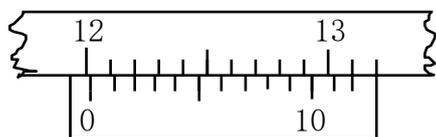
一般来说，游标是将主尺的 $(n-1)$ 个分格分成 n 等分(称为 n 分游标)。设主尺的一分格宽为 a ，则游标一分格宽为 $b = \frac{n-1}{n} \cdot a$ ，二者的差即 $a - b = \frac{a}{n}$ 是游标的最小分度值。使用 n 分度游标测量时，如果游标的第 K 条线与主尺某一刻度对齐，则被测物不足一小格的小数 ΔL 值等于：

$$\Delta L = K(a - b) = K\left(a - \frac{n-1}{n}a\right) = K \frac{a}{n}$$

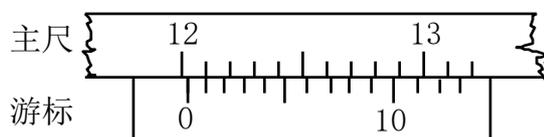
即 ΔL 等于游标的最小分度值 (a/n) 乘以 K 。所以使用游标时，先要了解最小分度值。

下面通过图三和图四来说明测量时怎样读取数据。使用游标测量时，游标0线在主尺上所指的读数应分为两步进行：

①从游标0线的位置读出整格数(如图三、四中的整格数为12厘米)。



图三 读数为12·02厘米



图四 读数为12·01厘米

②根据游标上与主尺对齐的刻线读出不足一小分格的小数(如图三中游标上的第二条刻线与主尺刻线对齐，读出0.02厘米；而图四中应读出0.01厘米)，然后再与①的读数相加得出测量值分别为12·02厘米及12·01厘米。

游标读数的精密度取决于最小分度值 (a/n) ，为了提高测量的精密度，就要制造 n 较大的游标。但 n 过大时，主尺一分格与游标一分格之差就很小，这在实际测量时，将出现游标上有几条线都似乎和主尺的刻度线对齐。因此难于确定 K 值，使读数发生困难。一般实用的游标有 n 等于10，20，和50三种，其最小分度值分别为0.1mm，0.05mm和0.02mm。使用游标卡尺时，应注意当两量爪密切吻合时，游标0线是否与主尺0线对齐，如果没有对准，应记下它们之间的差值，称为0点校正值。在这种情况下，测量结果要用校正值进行校正。

实验三 落球法测量液体的粘滞系数

一、目的

- 1、学习用激光光电传感器测量时间和物体运动速度的实验方法。
- 2、用斯托克斯公式测定蓖麻油的粘滞系数。
- 3、观测落球法测量液体粘滞系数的实验条件是否满足，必要时进行纠正。

二、仪器用具

玻璃圆筒、实验架、激光发射、接收部件（两对）、蓖麻油、钢球若干、重锤、秒表、千分尺、游标尺、米尺、比重计及温度计及磁铁等。

三、原理

若一个小球在液体中铅直下落，由于附着于球面的液层与周围其它液层之间存在相对运动，因此使小球受到摩擦阻力，它的大小与落球的速度有关，测出小球的速度后即可计算出液体的粘滞系数。这种方法一般用来测量粘滞系数较大的液体，并要求液体有一定的透明度。

当金属球在液体中下落时，它受到三个铅直方向的力：重力 mg (m 是小球的质量， g 是重力加速度)；液体的浮力 $\rho_0 Vg$ (ρ_0 是液体密度， V 是小球体积， g 为重力加速度)和粘滞阻力 f (方向与浮力相同，铅直向上)。如果液体是无限深广的，且小球的半径 r 和下落速度 v 均较小，根据斯托克斯公式，这时的粘滞阻力 f 为：

$$f = 6\pi\eta vr \quad (1)$$

上式中 η 是液体的粘滞系数。在CGS制中， η 的单位是泊(P)， $1 P = 1 g/cm \cdot s$ ；在SI制中， η 的单位是帕斯卡·秒(Pa·s)， $1 Pa \cdot s = 1 Kg/m \cdot s = 10 P$ 。

小球在液体中落下时，三个力都在铅直方向，重力向下，浮力和阻力向上。阻力随小球速度的增加而增加。显然，从静止开始小球作加速运动，而当小球下落速度达一定大小时，这三个力之和等于零，于是小球就以匀速下落，所以由(1)式可得：

$$mg = \rho_0 Vg + 6\pi\eta vr \quad (2)$$

设 ρ 为小球密度，钢球的体积 $V = \frac{4}{3}\pi r^3$ 代入上(2)式得：

$$\eta = \frac{2gr^2(\rho - \rho_0)}{9v} = \frac{gd^2(\rho - \rho_0)}{18v} \quad (3)$$

上式中， d 为钢球的直径($d=2r$)。汕头地区： $g = 978.9\text{cm}/\text{s}^2$

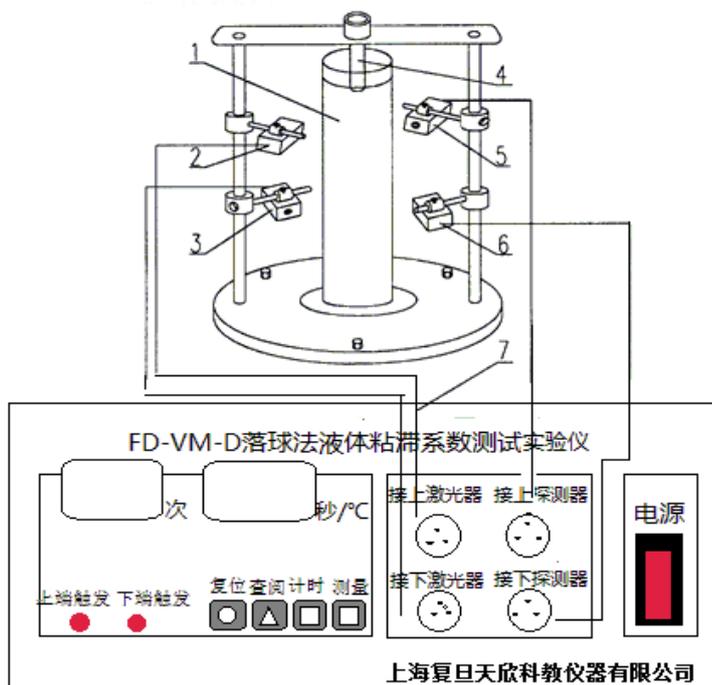
本实验用一个玻璃圆筒盛以待测的蓖麻油，见图一。圆筒旁边有两个激光发射器2、3和两个激光接收器5、6，发射器2、3间的距离为 L ，两对激光器用以测量钢球的下落速度 v 。小球自液面起，从静止开始下落到 发射器2时已作匀速运动。为此，筒中的油量已事先准备好。

实验时，待测液体盛于玻璃圆筒中，故液体不能满足上述无限深广的条件。半径为 r 的钢球沿内半径为 R 的玻璃圆筒中心轴线下落，筒内液体高度为 H ，那么考虑器壁的影响，(3)式应修正如下：

$$\eta = \frac{gd^2(\rho - \rho_0)}{18v} \cdot \frac{1}{(1 + 2.4\frac{d}{D})(1 + 3.3\frac{d}{2H})} \quad (4)$$

上式中， D 为玻璃圆筒的内径($D=2R$)； $2.4\frac{d}{D}$ 这一项是由于液体不是无限宽广所加的修正；

$3.3\frac{d}{2H}$ 这一项是由于液体不是无限深所加的修正。



1. 盛液桶 2. 激光发射盒 3. 激光发射盒 4. 落球导管
5. 激光接收盒 6. 激光接收盒 7. FD-VM-D粘滞系数测定仪

图一 实验装置示意图

四、实验内容

1. 打开电源开关，按仪器面板上的复位键，显示器上依次显示：数字“0-9”后，显示传感器当前温度。

2. 调节仪器

①调节底盘水平：小心移开盛液桶，在实验架横梁上放重锤部件，调节底盘旋钮，使重锤对准底盘的中心圆点后，收回重锤线。

②放盛液桶到实验架，在实验架横梁上放重锤到盛液桶底部，调节盛液桶位置，使重锤线位于盛液桶的中轴线，此中轴线将是落球的理想路径。

③依前面实验示意图，连接实验架上下二个激光器电源，可见红色激光对准重锤线。

④依前面实验示意图，连接上下探测器部件到主机，收回重锤线，调节上下接收部件，使可见红色激光对准接收部件上的小孔，并使主机上的上下触发发光管变亮。

⑤撤去横梁上的重锤部件，放上与小球相应的钢球导管。

⑥将小球放入导管，看其能否阻挡光线，若不能，则适当调整激光器位置。

★注意：重锤应先擦拭干净后才能放起。

3. 测量蓖麻油的温度与密度。

因粘滞系统 η 与温度密切相关，故应在实验前后各测一次油温(将仪器上自带的温度传感器放入液体进行测量)，然后求其平均值，查表计算得出对应的 η 标准值。液体的密度 ρ_0 由比重计读出(g/cm^3)，钢球的密度 ρ 为 $7.83\text{g}/\text{cm}^3$ 。

4. 记录千分尺的零点校正值，再测量钢球的直径。

为避免钢珠从千分尺的测量面滚出来，可以在测量面上涂少许蓖麻油。在实验的过程中要严防钢球丢失。

5. 按主机面板上的计时键，将小球放入钢球导管，当小球第一次挡住红色激光时，接收器第一次触发(有指示灯和显示器显示)，测定仪开始计时(显示器从到0开始)，到小球下一次挡住红色激光时，接收器第二次触发停止计时，此时间就为小球下降L距离所花费的时间。

6. 重复上述实验内容，共测大、小钢珠各5个的直径及对应的下落时间。(每次测量前都按下计时键)

7. 按查阅键可以显示前面测量的所有数据，并记录下来。(注意：实验过程中不要按下复位键，否则将会清除前面测量的所有数据)

8. 用米尺测量两激光发射部件发射孔之间的距离L和液面到液底的高度 H，用游标尺测量圆筒的内径 D。各测 3 次。

9. 实验完毕，计算粘滞系统 η 。若误差太大，找出原因，再做一次。

10. 最后用磁铁把落到筒底的钢球吸出来，此时要防止蓖麻油溢出。

五、要求

1. 自己设计数据记录表格，把所测的数据填入表格中。
2. 根据附录表中数据，作出 $\eta-T$ 曲线图，找出相应温度下蓖麻油粘滞系数的理论值。
3. 各计算大、小钢球的平均直径，分别按 (3)、(4) 式计算 η 的测量值，计算误差并讨论结果。

六、思考题

1. 如何判定小球通过二激光发射孔之间的运动是否匀速？
2. 若使小球在靠近筒壁处下落测 η 是否可以？
3. 若测量小球以上激光发射部件发射孔到筒底的时间来计算速度是否可以？
4. 本实验用 (3) 式计算结果应是 $\eta_{\text{大球}} > \eta_{\text{小球}} > \eta_{\text{标准}}$ ，原因是什么？试讨论。
5. 导出误差公式，讨论哪些量的测量相对误差对结果影响最大？（修正因子 $(1 + 2.4 \frac{d}{D})$ 和 $(1 + 3.3 \frac{d}{2 \cdot H})$ 的影响很小，可不考虑。）
6. 如何由附录求任何温度下的 η 的标准值？

附录

一、蓖麻油的粘滞系数与相应的温度值

温 度 (°C)	5	10	15	20	25	30	35	40	100
粘 滞 系 数 (P)	37.6 0	24.1 8	15.1 4	9.50	6.21	4.51	3.1 2	2.3 1	1.6 9

实验四 用扭摆法测量物体的转动惯量

一、目的

1. 用扭摆测定几种不同形状物体的转动惯量, 弹簧的扭转常数, 并与理论值进行比较。
2. 验证转动惯量平行轴定理。

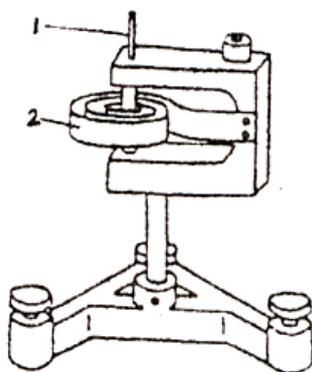
二、仪器用具

1. 扭摆、附件为塑料圆柱体、金属空心圆筒、实心球体、金属细长杆（二个滑块可在上面自由移动）。
2. 数字式计时仪 型号 TH-1 测时精度 0.01 秒。
3. 数字式电子秤 型号 YP3000 称量 3000g 分度值 0.1g。

三、原理

转动惯量的测量, 一般都是使刚体以一定形式运动, 通过表征这种运动特征的物理量与转动惯量的关系, 进行转换测量。本实验使物体作扭转摆动, 由摆动周期及其它参数的测定计算出物体的转动惯量。

扭摆的构造见图所示, 在其垂直轴 1 上装有一根薄片状的螺旋弹簧 2, 用以产生恢复力矩。在轴的上方可以装上各种待测物体。垂直轴与支座间装有轴承, 使摩擦力矩尽可能降低。



扭摆构造图

将物体在水平面内转过一角度 θ 后, 在弹簧的恢复力矩作用下, 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 为物体绕转动轴的转动惯量, β 为角加速度, 由上式得

$$\beta = \frac{M}{I} \quad (2)$$

令 $\omega^2 = \frac{K}{I}$ ，且忽略轴承的磨擦阻力矩，由式 (1) 与 (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具有角简谐振动的特性：角加速度与角位移成正比，且方向相反。此方程的解为

$$\theta = A\cos(\omega t + \varphi)$$

式中，A 为谐振动的角振幅， φ 为初相位角， ω 为角速度。此谐振动的周期为

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

利用公式 (3) 测得扭摆的摆动周期后，在 I 和 K 中任何一个量已知时即可计算出另一个量。

由公式 (3) 可得出

$$\frac{T_0}{T_1} = \frac{\sqrt{I_0}}{\sqrt{I_0 + I_1'}} \quad \text{或} \quad \frac{I_0}{I_1'} = \frac{T_0^2}{T_1^2 - T_0^2}$$

式中 I_0 为金属载物圆盘绕转轴的转动惯量， I_1' 为另一物体的转动惯量理论值，对质量为 m_1 外径为 D_1 的圆柱体，则

$$I_1' = \frac{1}{8}m_1D_1^2$$

弹簧扭转常数

$$K = 4\pi^2 \frac{I_1'}{T_1^2 - T_0^2}$$

本实验用一个几何形状有规则的物体，它的转动惯量可以根据它的质量和几何尺寸用理论公式直接计算得到。再算出本仪器弹簧的 K 值。若要测定其它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，测定其摆动周期，由公式 (3) 即可算出该物体绕转动轴的转动惯量。

数字式计时器，它由主机和光电探头两部分组成。用光电探头来检测挡光杆是否挡光，根据挡光次数自动判断是否已达到所设定的周期数。周期数可设定为 5 次或 10 次。

光电探头采用红外发射管和红外线接收管。人眼无法直接观察仪器工作是否正常。但

可用纸片遮挡光电探头间隙部位,检查计时器是否开始计时和达到预定次数时是否停止计数,以及按下“复位”钮时是否显示为“0000”。为防止过强光线对光电探头的影响,光电探头不能置放在强光下。实验采用窗帘遮光,确保计时的准确。

数字式电子台秤是利用数字电路和压力传感器组成的一种台秤。本实验所用的台秤,称量为3000g,分度值为0.1g,使用前应检查零读数是否为“0”。物体放在秤盘上即可从显示窗直接读出该物体的重量(近似看作质量 m),最后一位出现 ± 1 的跳动属正常现象。

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,则此物体对新轴线的转动惯量变为 I_0+mx^2 。这称为转动惯量的平行轴定理。

四、要求

1. 熟悉扭摆的构造,使用方法,掌握数字式计时仪的正确使用要领。
2. 测定扭摆的仪器常数(弹簧的扭转常数) K 。
3. 测定塑料圆柱、金属圆筒、球体与金属细长杆的转动惯量。并与理论计算值比较,求百分差。
4. 改变滑块在细长杆上的位置,验证转动惯量平行轴定理。

五、实验步骤

1. 用游标卡尺分别测出圆柱体的外径,金属圆筒的内、外径、球体直径,用钢皮尺测金属细长杆长度(各测量3次)。
2. 调整扭摆基座底脚螺丝,使水准泡中气泡居中。
3. 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接收红外光线的小孔,测定其摆动周期 T_0 。
4. 将塑料圆柱体垂直放在载物盘上,测出它的摆动周期 T_1 。
5. 用金属圆筒代替塑料圆柱体,测出摆动周期 T_2 。
6. 取下载物金属盘、装上球体并测出它的摆动周期 T_3 。
7. 取下球体,装上金属细杆(金属细杆中心必须与转轴重合),测出它的摆动周期 T_4 。
8. 将滑块对称的放置在细杆两边的凹槽内(此时滑块质心离转轴的距离分别为5.0, 10.0, 15.0, 20.0, 25.0厘米)测定细杆的摆动周期。二滑块绕质心转轴的转动

惯量理论值
$$I_5' = 2 \left[\frac{1}{16} m_{\text{滑}} (D_{\text{外}}^2 + D_{\text{内}}^2) + \frac{1}{12} m_{\text{滑}} H^2 \right]$$
, D 为滑块的内、外直径, H 为高度。

实验注意点

1. 由于弹簧的扭转常数 K 值不是固定常数,它与摆动角度略有关系,摆角在 $90^\circ \sim 40^\circ$ 间基本相同。
为了降低实验时由于摆角度变化过大带来的系统误差,在测定各种物体的摆动周期时,摆角不宜过小、变化过大,若摆动20次后,摆角减小,可使其增大后再测

量，且整个实验中摆角基本保持在这一范围内。

2、光电探头宜放置在挡光杆的平衡位置处，挡光杆不能和它相接触，以免增大摩擦力矩。

3、机座应保持水平状态。

4、若发现摆动时有响声或摆动数次后摆角明显减小或停下，应将止动螺丝旋紧。

5、在称衡金属细长杆与球体的质量时，必须将支架取下，否则会带来极大误差。由于此二项的质量约为它们的 60%与 5%，但它的转动惯量仅是它们的 0.5%~1.0 左右。（细杆夹具和球支座的转动惯量实验值见附录）

6、实验仪器制作设计时，将塑料圆柱体与金属圆筒制作成外径、高度、质量基本相同（相差不大于 10 克），由于质量分布不同，二者的转动惯量值相差接近一倍。

数据记录表

物体名称	质量 (kg)	几何尺寸 (10^{-2} m)		周期 (s)		转动惯量理论值 (10^{-4} kg·m ²)	实验值 (10^{-4} kg·m ²)
金属载物盘				10T ₀			$I_0 = \frac{I_1 \bar{T}_0^2}{\bar{T}_1^2 - \bar{T}_0^2}$ =
				\bar{T}_0			
塑料圆柱		D ₁		10T ₁		$I_1' = \frac{1}{8} m \bar{D}_1^2 =$	
		\bar{D}_1		\bar{T}_1			
$K = 4\pi^2 \frac{I_1'}{\bar{T}_1^2 - \bar{T}_0^2} =$ $\frac{K}{4\pi^2} =$							百分差
金属圆筒		D _外		10T ₂		$I_2' = \frac{1}{8} m (\bar{D}_{外}^2 + \bar{D}_{内}^2)$	$I_2 = \frac{K \bar{T}_2^2}{4\pi^2} - I_0$ =
		$\bar{D}_{外}$					
		D _内					
		$\bar{D}_{内}$					
实心球		D ₃		10T ₃		$I_3' = \frac{1}{10} m \bar{D}_3^2$	$I_3 = \frac{K}{4\pi^2} \bar{T}_3^2$ =
		\bar{D}_3		\bar{T}_3			
金属细杆		L		10T ₄		$I_4' = \frac{1}{12} m \bar{L}^2$	$I_4 = \frac{K}{4\pi^2} \bar{T}_4^2$ =
		\bar{L}		\bar{T}_4			

验证转动惯量平行轴定理

滑块质量 $m=$ $D_{\text{内径}} =$ $D_{\text{外径}} =$ $H=$ (各测三次)

x (10^{-2}m)	5.00	10.00	15.00	20.00	25.00
5次摆动周期 $5T$ (s)					
摆动周期 \bar{T} (s)					
实验值 ($10^{-2}\text{kg}\cdot\text{m}^2$) $I = \frac{K}{4\pi^2} \bar{T}^2$					
理论值 ($10^{-2}\text{kg}\cdot\text{m}$) $I' = I_4' + 2mx^2 + I_5'$					
百分差					

结论:

[附]

细杆夹具转动惯量实验值

$$I = 0.230 \times 10^{-4} \text{kg}\cdot\text{m}^2$$

球支座转动惯量实验值

$$I = 0.178 \times 10^{-4} \text{kg}\cdot\text{m}^2$$

实验五 用电热法测定热功当量

一、目的

1. 用电热法测定热功当量；
2. 用牛顿冷却定律进行散热修正—修正终温。

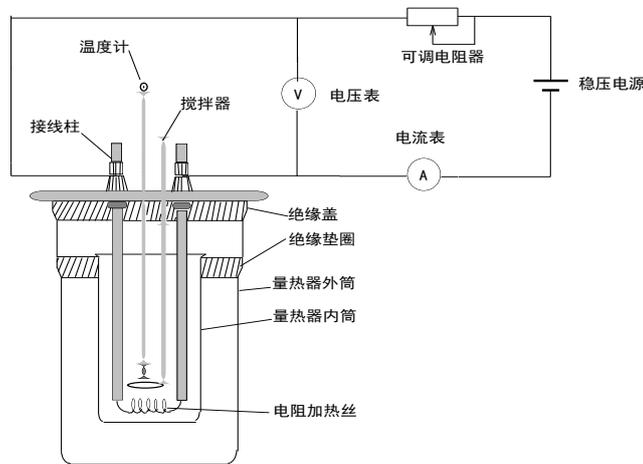
二、仪器用具

量热器、数字温度计、秒表、量筒、电子天平、稳压电源、可调电阻、数字电流表、数字电压表等。

三、原理

1. 用电热法测定热功当量

实验装置如下图所示：



若施加在电阻加热丝两端的电压为 V ，通过的电流为 I ，通电时间为 t ，则电场力所做的功为：

$$A = VIt \quad (1)$$

式(1)中 V 的单位为伏特 (V)， I 的单位为安培 (A)， t 的单位为秒 (s)， A 的单位为焦耳 (J)。

如果这些功全部转化为热量，使一个盛水的量热器系统的温度从 $T_0^\circ\text{C}$ 升高到 $T_f^\circ\text{C}$ ，则系统所吸收的热量为：

$$Q = (m_0c_0 + m_1c_1 + m_2c_2)(T_f - T_0) \quad (2)$$

式(2)左括号中分别为水、量热器玻璃内筒、铜搅拌器（包括铜电极）， m_i 的单位为克 (g)，

c_i 的单位是卡/克·度 ($\text{cal/g}\cdot^\circ\text{C}$)； Q 的单位为卡 (cal)。如果在加热过程中没有热量损失，设热功当量为 J ，则：

$$A = JQ$$

热功当量 $J = \frac{A}{Q}$ (焦耳/卡) (3)

2. 散热修正

实际上, 在用电流加热使系统升温的过程中, 系统不可避免地要与外界进行热交换。设系统温度高于环境温度, 那么, 系统所获得的热量有一部分将散失掉。因此系统实际达到的终温 T_f'' 要低于不散热时应该达到的终温 T_f' , 要设法把由于散热而导致的温度降 δT 求出, 使

$$T_f = T_f'' + \delta T \quad (4)$$

散热修正的方法, 即为求 δT 的方法, 现叙述如下:

根据牛顿冷却定律, 在系统温度与环境温度相差不大时 (不超过 $10 \sim 15^\circ\text{C}$), 系统处于自然冷却的情况下, 系统的散热速率为:

$$v = \frac{dT}{dt} = K(T - \theta) \quad (5)$$

式中 T 为系统表面的温度, θ 为环境温度。 K 为散热系数, 在 $T - \theta$ 的值不大时 K 是一个常量, 它与系统的表面状况及热容有关。当 θ 不变时, 有:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{d(T - \theta)}{dt} = K(T - \theta)$$

即 $\frac{d(T - \theta)}{T - \theta} = K dt$ (6)

取 $t=0$ 时, $T=T_0'$, (6) 式的解为:

$$\ln \frac{T - \theta}{T_0' - \theta} = Kt \quad (7)$$

选择系统已经自然冷却后的某时刻温度为 T_0' 开始计时, 经时间 t 后来 (t 可取分为单位), 系统温度降为 T_f' , 则可求得散热系数 K 为:

$$K = \frac{1}{t} \ln \frac{T_f' - \theta}{T_0' - \theta} \quad (8)$$

计算得出 $K < 0$, 说明系统是降温。假定在加热过程中, 系统的温度是均匀上升的。在加热过程中, 系统的平均温度为:

$$\bar{T} = \frac{1}{2}(T_0 + T_f) \quad (9)$$

则(5)式可近似表示为:

$$\Delta T = K(\bar{T} - \theta)(t_f - t_0)$$

式中 $(t_f - t_0)$ 为加热所用的时间。将(10)式的结果代入(4)式,即可求得经散热修正后系统的终温 T_f 。

四、实验内容及注意事项

本实验步骤由同学试行安排,注意以下几点:

- 1、记录实验前、后的室温,取平均。
- 2、内筒中装入大约半筒的水。
- 3、调节滑线变阻器和电源电压,观察电流表(约1.0-1.5安培左右),记录电压V、电流I的数值。
- 4、通电后每隔一分钟记下系统温度,直到比室温高 $10^{\circ}\text{C} \sim 15^{\circ}\text{C}$,断电前再记录一次电压V、电流I的数值,并与前值的平均。断电后,记录通电时间及系统终温(应是断电搅拌后稳定的最高温)。然后每隔二分钟记一次降温的水温,共记录十次。用逐差法求K值。
- 5、自始至终必须轻轻地对水进行搅拌,这样才能使温度计的示数代表系统的温度。

五、要求

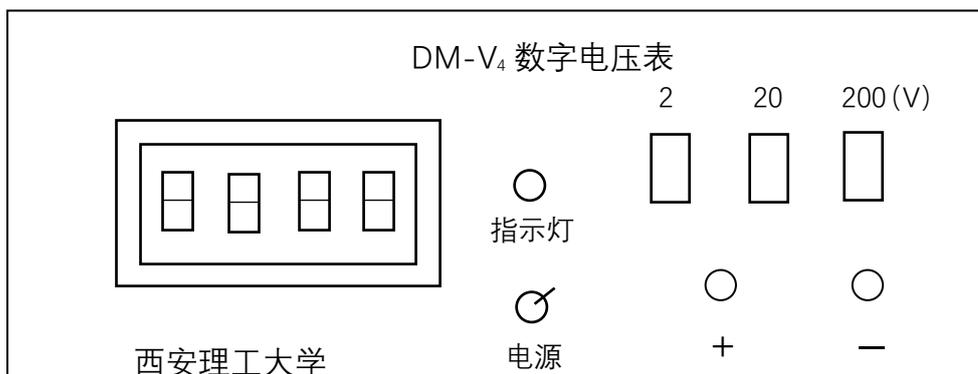
计算修正前后的热功当量,做比较。

六、思考题

1. 如何判断系统已开始冷却,怎样能把K求得准些?
2. 从实验数据说明散热修正的必要,如不修正,结果将有多大的误差?
3. 在调节了1.5安培后,是否可以继续通电加热而不要关闭电源?为什么?

附录:

一、数字电压表使用说明



1、面板及操作

- 1) 电源开关: 开关拨向上,电源接通,指示灯和数码管亮。开关拨向下,电源断开,指示灯和数码管灭。

- 2) 量程选择：按动量程选择开关，选择合适的量程。
- 3) 测量：打开电源开关后，预热 5 分钟，再在红黑接线柱上接被测电压。如果超量程，数字表现显示“1”或“-1”，按动量程开关重新选择合适量程。

备注：数字电流表与数字电压表使用方法相同

二、数字温度计

数字温度计由单片机和 DS18B20 单线数字温度传感器组成。

前面板由三部分组成，从右到左依次为电源开关、传感器接口、数码显示器，后面板上有机保险和电源插座。

- 1) 电源开关：电源开关扳向上，电源接通，数码管点亮，仪器工作，开关扳向下，电源关断，仪器停止工作。
- 2) 插接传感器：对正缺口，插好传感器并锁紧。
- 3) 数码显示器：数码显示有如下几种情况：（一）当电源接通，而传感器未接或未接好（接口旋空）时，数码管将显示任意值或一个点且不变；（二）当你在检测过程中忽然发现数码不变动时，那是由传感器未接牢所致，请重新接好，它便转为正常。

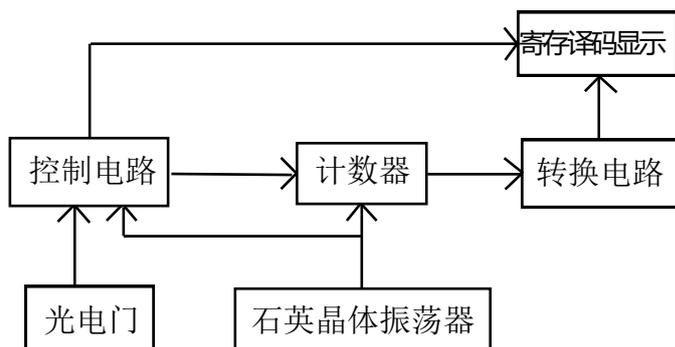
注意事项

- 1、测量头不能直接放入导电溶液及带腐蚀性溶液中使用。
- 2、在测试中特别注意温升过冲，如过冲过大，将会损坏传感器。
- 3、传感器接线不能接反，如接反将烧坏传感器。不用时，将保护套推上，以防损坏。

的弹性碰撞器之间沿气垫来回运动。

气垫导轨的底部装有底座调平螺钉，用于调节导轨水平。

实验中，滑块运动的时间是用光电计时装置来测定的。该装置包括光电门和MUJ—III计时计数测速仪。光电门安装在气垫导轨上，由光源（聚光小灯泡）及光电转换电路（光敏半导体器件）组成。时间用MUJ—III仪器测量（MUJ—III仪器的使用操作详见附录），它比秒表测量精度高，秒表一般测量精度为0.1秒（100ms）或0.01秒（10ms），而MUJ—III仪器可测量到0.01ms。其数字计时电路框图如图二所示。

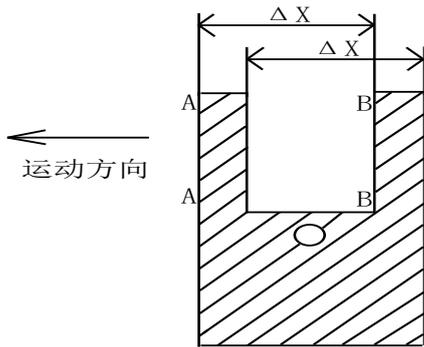


图二 光电计时系统框图

在MUJ—III仪器内部，石英晶体振荡器产生稳定的时钟脉冲，其相邻两电脉冲的时间间隔为0.01ms。滑块上装有一个凹型档光片（如图三所示），当档光片的边沿AA遮住光电门上的聚光小灯泡射入光敏管的光线时，光电转换电路就输出一电脉冲，使仪器内部的控制电路发出一个启动信号，打开计数器的门，于是，时钟脉冲开始进入计数器使之不停地计数。一直到档光片的另一边沿BB再次遮光时，光电门又输出一电脉冲，使控制电路发出一个止动信号，关闭计数器的门，于是计数器停止计数，所计的脉冲数通过译码，最后在显示屏上直接显示出所测的数值。

气垫导轨是应用气垫进行力学实验的装置。它可以消除导轨对运动物体（滑块）的直接摩擦，同时采用光电计时测速装置进行测量，从而能够用实验方法精确地测定物体的速度和加速度及观测物体在外力作用下的运动规律。

MUJ—III仪器采用单片微处理器，进行程序化控制，是一种最新设计的智能化仪器。在与气垫导轨配套使用时，除了有一般数字计时器的功能外，还具有将所测的时间直接转换为速度及加速度的特殊功能。



图三 滑块上的凹型档光片

四、原理

1. 检验动量守恒定律

动量守恒定律指出：若一个物体系受到的合外力等于零，则组成该物体系的各物体动量的矢量和保持不变，即总动量为：

$$\mathbf{K} = \sum_{i=1}^n \mathbf{m}_i \mathbf{V}_i = \text{恒量} \quad (1)$$

上式中 \mathbf{m}_i 和 \mathbf{V}_i 分别是物体系中第 i 个物体的质量和速度。 n 是物体系中物体的数目。若物体系所受合外力在某个方向的分量为零，则此物体系在此方向的总动量守恒。

本实验研究两个滑块在水平气垫上沿直线发生的碰撞。对于气垫的漂浮作用，滑块受到的摩擦力可以忽略不计。这样，当发生碰撞时，物体系（两滑块）在水平方向上不受外力作用，而仅受内力相互作用，故在水平方向动量守恒。

设两个滑块的质量分别为 \mathbf{m}_A 和 \mathbf{m}_B 。碰撞前它们在导轨上的速度分别为 \mathbf{V}_A 和 \mathbf{V}_B ，碰撞后的速度分别为 \mathbf{V}_A^* 和 \mathbf{V}_B^* ，则动量守恒定律可以写成：

$$\mathbf{m}_A \mathbf{V}_A + \mathbf{m}_B \mathbf{V}_B = \mathbf{m}_A \mathbf{V}_A^* + \mathbf{m}_B \mathbf{V}_B^* \quad (2)$$

如取 $\mathbf{V}_B = 0$ ，则(2)式简化为：

$$\mathbf{m}_A \mathbf{V}_A = \mathbf{m}_A \mathbf{V}_A^* + \mathbf{m}_B \mathbf{V}_B^* \quad (3)$$

在本实验中，我们利用(3)式检验动量守恒定律，检验的方法是分别测出 \mathbf{m}_A 、 \mathbf{m}_B 、 \mathbf{V}_A 、 \mathbf{V}_A^* 、 \mathbf{V}_B^* ，比较 $\mathbf{m}_A \mathbf{V}_A$ 与 $(\mathbf{m}_A \mathbf{V}_A^* + \mathbf{m}_B \mathbf{V}_B^*)$ 是否相等。

2. 关于碰撞后动量的损耗

动量守恒定律成立的条件是要求物体系所受外力为零。不论碰撞是弹性的还是非弹性的，动量守恒都应成立。但对于动能在碰撞过程中是否守恒，则除了与在碰撞过程中外力

是否对系统做功有关以外，还与碰撞的性质有关。若碰撞物体是由弹性材料作成，碰撞结束后物体没有发生形变，则物体系的总动能不变，这就是弹性碰撞；若物体材料具有一定塑性，碰撞结束后有部分形变残留，则物体系的总动能有所损耗（转变为其他形式的能量），这就是非弹性碰撞。碰撞的性质可以用恢复系数表示如下：

$$e = \frac{v_B^* - v_A^*}{v_A - v_B} \quad (4)$$

完全弹性碰撞时 $e=1$ ，机械能守恒；完全非弹性碰撞时 $e=0$ ，机械能损耗最大；一般情况下 $0 < e < 1$ 。

五、实验内容

1. 调整气垫导轨水平

导轨的水平状态调整是实验前的重要准备工作，反复①②步骤，耐心地进行。

①利用水平仪，调节气垫导轨底座的双脚调平螺钉，使导轨的横向接近水平。

②开启气源，将气垫导轨通气，把滑块轻轻地放置于导轨上，调节气垫导轨底座的单脚调平螺钉，直至滑块在实验段内保持不动或稍有滑动但方向不定，即认为气垫导轨的纵向已基本调平。

注意：先开启气源，再把滑块放在导轨上。严禁在未通气前就将滑块放在导轨工作面上滑动，以免擦伤导轨表面。使用完毕后，先取下滑块再关闭气源。

③让滑块通过光电门，观察 MUJ-III仪器的显示，熟悉该仪器中“功能选择复位键”及“数值转换键”的使用（详见附录）。

2. 滑块运动速度的测量

物体作直线运动时的平均速度为 $\bar{v} = \frac{\Delta X}{\Delta t}$ 。 ΔX 是物体在 Δt 时间内所经过的位移，

当取极限 $\Delta t \rightarrow 0$ 时，就得到物体在某点的瞬时速度，即：

$$\bar{V} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta X}{\Delta t}$$

实际上按上述定义直接去测量某点的瞬时速度是不可能的。因为测量的过程 Δt 总是个有限的小量，所以在一定的误差范围内，可用很小的 Δt 经过位移 ΔX 来近似代替瞬时速度。

当MUJ-III仪器面板上的“功能选择复位键”设定在“计时”，“数值转换键”设定在“ms”，则显示屏上显示出的数值即为滑块经过距离为 Δx （挡光片宽度，见图三）时所需的时间 Δt （ms）。若“功能选择复位键”仍设定在“计时”，而“数值转换键”设定在“cm/s”，则显示屏上显示的数值即为滑块经过光电门的速度（cm/s），即 $\Delta x / \Delta t$ 的值。MUJ-III仪器每次开机时，挡光片的宽度 Δx 会自动设定为1cm。如果在实验中使用其它宽度的挡光片，

则在开机后必须对挡光片的宽度重新设定(详见附录明),否则显示的时间正确,而显示成速度时将是错误的。

3. 两滑块的碰撞运动

将光电门放到合适的位置(考虑一下,根据什么原则来确定合适的位置?),使挡光片的挡光边与运动方向垂直。

①两滑块作弹性碰撞

在 $V_B = 0$ 的前提下,分别选择 $m_A = m_B$ 、 $m_A > m_B$ 及 $m_A < m_B$ 三种情况,各重复测量三次弹性碰撞前后的速度,计算碰撞前后动量守恒的情况及恢复系数。

②两滑块作完全非弹性碰撞

在 $V_B = 0$ 的前提下,分别选择 $m_A = m_B$ 、 $m_A > m_B$ 及 $m_A < m_B$ 三种情况,各重复测量三次完全非弹性碰撞前后的速度,计算碰撞前后动量守恒的情况及恢复系数。

注意:

- 测量时要注意保证 $V_B = 0$;
- 滑块运动速度适中. 尽量做到正碰,以减少碰撞时滑块晃动;
- 注意光电门的位置,及时测出碰撞前后的速度,保证数据的准确性。

六、问答题

1. 在本实验的操作中,如何保证实验条件?
2. 在本实验中,如何用光电计时系统测量很短的时间 Δt ?想一想,又如何测量较长的滑行时间?
3. 若挡光片的边沿与运动方向不垂直,会不会影响测量结果?为什么?
4. 比较弹性碰撞与完全非弹性碰撞能量损失情况(各任选一组数据计算)

附录 《MUJ—III 计时计数测速仪》使用说明

本仪器以51系列单片微机为中央处理器,并编入与气垫导轨实验相适应的数据处理程序。仪器前面板左边的“功能选择复位键”,可选择操作功能;右边的“数值转换键”,可设定测量单位;P1、P2为光电输入口,用于采集数据信号,由中央处理器处理;LED数码显示屏显示各种测量结果。

该仪器的前面板图及后面板图如下页所示。

一、功能键

1. 功能选择复位键

- ①用于五种功能(计时,加速度,碰撞,周期及计数)的选择及取消显示数据。
- ②复位。

2. 数值转换键

①测量单位 (ms、cm/s及 cm/s^2) 的转换；

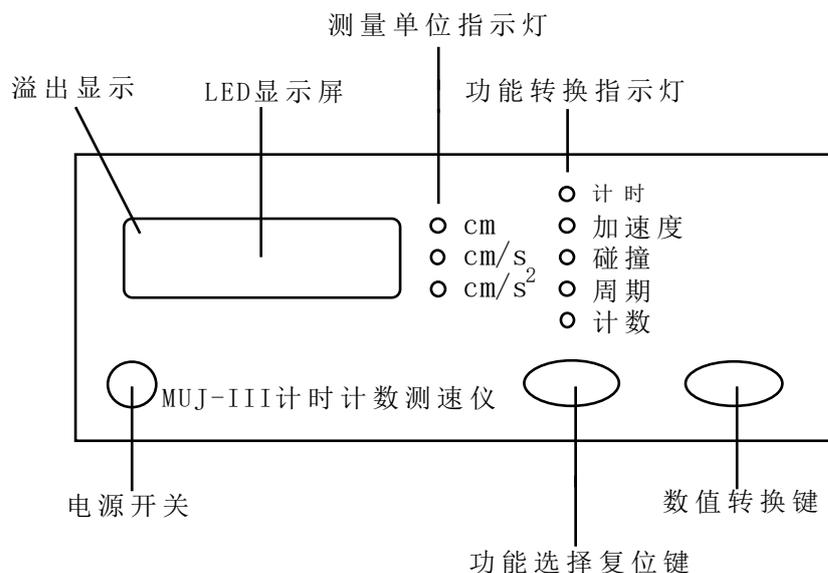
②挡光片宽度的设定；

③简谐运动周期值的设定。

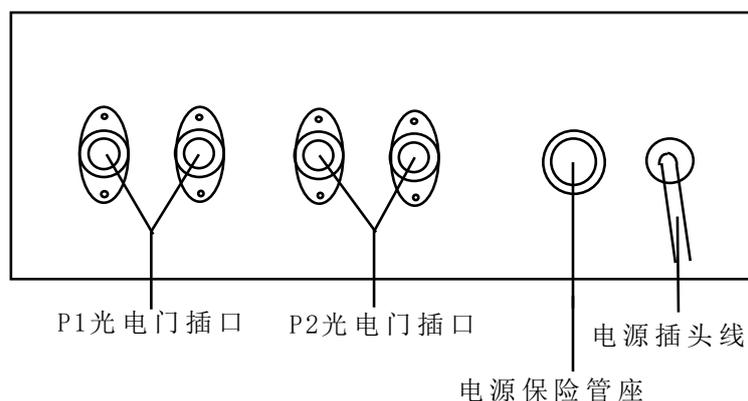
二、使用与操作

1. 开机前接好电源。

2. 根据实验的需要，选择所需光电门的数量，将光电门线插入P1、P2插口(注意一定要接触可靠)。



前面板图



后面板图

3. 按“功能选择复位键”，选择你所需要的功能。注意：当光电门没遮光时，每按键一次转换一种功能，循环显示；当光电门遮光时，按下此键即复位清零。

4. 当你每次开机时，挡光片宽度会自动设定为1.0cm, 周期自动设定为十次。

5. 当选择计时、加速度或碰撞功能时，按下“数值转换键”小于1.5秒时，三种测量单位

ms、cm/s及 cm/s^2 自动地循环显示，以供你选择。

6. 按下“数值转换键”大于1.5秒时，将显示已设定挡光片的宽度。假如挡光片的宽度为10mm，则显示1.0；若为30mm，显示3.0。此时如有已完成的实验数据，能够保持。若再按“数值转换键”，可重新设定所需要的挡光片宽度，前面所保持的实验数据将被清除。

注意：你所使用的挡光片宽度与你设定的挡光片宽度应相符，否则显示ms时正确，而转换成cm/s时将是错误的。

7. 当功能选择“周期”时，按 6. 的方法可设定你所需要的周期数值。

三、五种功能详释

实验开始前，请确认你所使用的挡光片与本机设定的挡光片宽度应相等。仅在显示时间时可忽略此操作。

1. 计时：测量P1口或P2口两次挡光时间间隔(ms)及滑块通过P1口或P2口光电门的速度(cm/s)。

- “功能选择复位键”设定在“计时”档；而“数值转换键”设定在“ms”或“cm/s”档。

- 让带有凹型挡光片的滑块通过光电门，即可显示你所需要的测量数据。

- 此项实验可连续测量。

2. 加速度：测量滑块通过每个光电门的速度和这段路程的加速度(此时，滑块经过两个光电门时间将不显示)。

- “功能选择复位键”设定在“加速度”档，“数值转换键”设定在“cm/s”档。

- 让带有凹型挡光片的滑块通过光电门。

- 显示屏上将循环显示下表左边每行的数据：

显示屏显示	解释
1	表示滑块已通过p1口的第一个光电门
×××××	表示已测得滑块通过第一个光电门的速度(cm/s)
2	表示滑块已通过p2口第二个光电门
×××××	表示已测得滑块通过第二个光电门的速度(cm/s)
1-2	表示滑块已通过第一至第二个光电门
×××××	表示已测得滑块从第一个至第二个光电门的加速度 (cm/s^2)

- 本档具有保护数据的功能，只有按下“功能选择复位键”方可进行下一次测量。

3. 碰撞：等质量、不等质量的碰撞。

- “功能选择复位键”设定在“碰撞”档，“数值转换键”设定在“cm/s”档。

- 在两个滑块上装好相同宽度的凹型档光片和碰撞弹簧(或尼龙搭扣)，通常让其中一个滑块静止于两个光电门之间，另一个滑块通过一个光电门后，两个滑块碰撞。根据滑块质量的变化分别通过各自的光电门。

- 显示屏上将循环显示下表左边的数据：

显示屏显示	解释
P1. 1	表示滑块已第一次通过P1口的光电门
×××××	表示已测得滑块第一次通过P1口光电门的速度(cm/s)
P1. 2	表示滑块已第二次通过P1口的光电门
×××××	表示已测得滑块第二次通过P1口光电门的速度(cm/s)
P2. 1	表示滑块已第一次通过P2口的光电门
×××××	表示已测得滑块第一次通过P2口光电门的速度(cm/s)
P2. 2	表示滑块已第二次通过P2口的光电门
×××××	表示已测得滑块第二次通过P2口光电门的速度(cm/s)

- 为提高循环显示效率，本机只显示遮过光的光电门的测量值。

- 本档具有保护数据的功能，只有按下“功能选择复位键”方可进行下一次测量。

4. 周期：测量简谐运动1~100个周期的时间。

- 滑块安装好挡光条。

- “功能选择复位键”设定在“周期”档，“数值转换键”设定在“ms”档。

- 按下“数值转换键”不放，确认到你所需的周期数时才放开此键即可。简谐运动每完成一个周期，显示的周期数会自动减1，当最后一次遮光完成时，显示屏会自动显示累计的时间值。

5. 计数：测量遮光的次数。

- “功能选择复位键”设定在“计数”档。

- 滑块安装好挡光条，并通过光电门计数开始。

- 最大计数量程为99999次，超过后会自动清零，重新开始计数。所需计数较大时，只需记住有几次清零，用99999乘以清零次数加上显示数值即为计数值。

四、自检

本机具有自检功能。按下任意键后，再开启电源开关，数码管循环显示，执行自检，最终显示38.96ms。按下“数值转换键”显示25.67ms，表示本机工作程序正常。

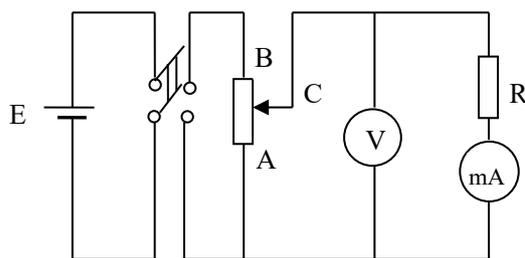
电学实验操作规程

1 准备

到实验室前先准备好数据表格，实验时，先要把本组实验仪器的规格弄清楚，然后根据电路图要求摆好元件（基本按电路图排列次序，但也要考虑到读数和操作的方便）。

2 连线

要在理解电路的基础上连线。例如图一电路，应当这样理解：分压器先把电源电压分为两部分，用伏特表测出 AC 部分的电压，再把这部分电压送到用电的电阻 R 上，并由毫安计测出 R 上的电流。连线时的次序和思路，可从电源开始（但先不接通电源），用两根线连到开关的两个接线柱上，再由开关引出两根线，连到变压器全电阻 AB 上，使产生电压降。从 AC 两端引线到伏特计上测量分压，再从伏特计两端引出分压送到电阻 R 与毫安计串联的电路。



图一

连线时还应注意利用不同颜色的导线，这样可以表现出电路电位的高低。一般，用红色或浅色线接正极或高电位，用蓝色或深色接负极或低电位。最后，应特别指出，在连线过程中，所有的电源最后才连入电路，开关也要断开。

3 检查

接好电路后，先复查电路连线是否正确，再检查其它要求是否符合，例如，开关是否打开、电表和电源正负极是否接错、量程是否正确、电阻箱数值是否正确、变阻器的滑线端（或电阻箱各档旋钮）位置是否正确等等，直到一切都做好，经指导老师检查正确后，再接上电源。

4 通电

在通电合上开关前，要先想好通电瞬间各仪表的正常反应是怎样的（例如电表指针是指零不动或是应摆动到什么位置等）。开关合上时要密切注意仪表反应是否正常，并随时准备在不正常时打开开关。

实验过程中需要暂停时，应断开必要的开关。若需要更换电路，应将电路中各个仪表拨到安全位置然后打开开关，拆去电源，再改接电路，经指导老师检查后才可接电源继续做实验。

5 安全

不管电路有无高电压，要养成避免用手或身体接触电路中导体的习惯。

6 规整

实验完毕，应将电路中仪器拨到安全位置，打开开关，经教师检查实验数据后再拆线。拆线时应先拆去电源，最后将所有仪器放回原处，再离开实验室。

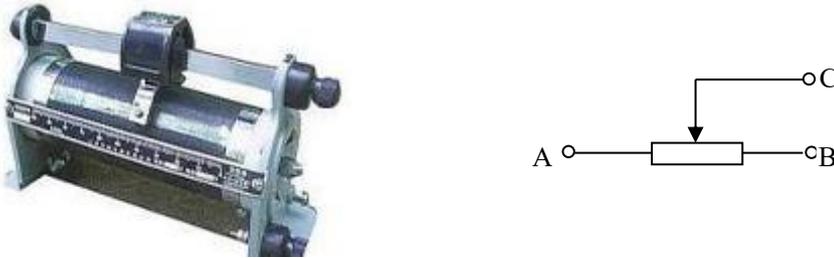
电磁学实验的常用仪器和器件

电磁学实验离不开各种电测仪表、设备，为此，在使用之前，应先了解它的性能、规格和使用方法，这样，才能在使用时，保证仪器设备处于正常情况下工作，从而避免损坏，保证实验顺利进行和实验结果的准确、可靠。

下面对一些常用的基本仪器设备及其接线要领、注意事项作一简单介绍。

一 滑线变阻器

滑线变阻器是电磁学实验中常用的器件，它用于调节电压和电流，在电路中的基本接法有电位器接法和可变电阻器接法。滑线变阻器的外形和结构见图一，其主要部分为密绕在瓷管上的粗细均匀的电阻丝（如镍铬丝），然后将电阻丝两端分别与接线柱 A、B 相连，另一接线柱 C 通过铜棒与滑动接触器连接。因此，沿铜棒移动接触器的位置，即可改变 AC(或 BC)间的电阻值，图下方为滑线变阻器在电路中的符号。



图一

使用滑线变阻器时应注意下面几点：

1. 通过变阻器的电流，不能超过它的额定电流值。
2. 作固定电阻使用时，只用 A 与 B 两个接线柱。
3. 作可调电阻器使用时，把 A 与 C 或 B 与 C 两个接线柱接入电路，接通电源前，应先把变阻器调到电阻值最大的位置，保证电路接通电源后电流为最小，然后，逐渐减少电阻，直到需要值。
4. 作电位器使用时，电源接在 A 和 B 两个固定端上，而电路则接在滑动端 C 及任一固定端 A (B) 之间，接通电源前，滑动端应移在输出电压为零的位置上，然后，逐渐增加输出电压（电流），使它达到所需要的值。

二 旋转式电阻箱

电阻箱是一种数值可调节的精密电阻组件，它由若干个数值准确的固定电阻元件（用高稳定锰铜合金丝绕制）组合而成，并借助转盘位置的变换来获得 $1\sim 9999\ \Omega$ （ZX36 型）或 $0.1\sim 99999.9\ \Omega$ （ZX21a 型）的各电阻值（图二）。现结合上述两种型号电阻箱，将有关事项说明如下：

1. 最大允许电流。一般电阻箱的额定功率为 0.25W ，可以由它计算出最大允许电流：

$$I = \sqrt{\frac{W}{R}}$$

2 允许基本误差。我们实验中常采用准确度登记为 0.1 的电阻箱，在额定电流范围内，其允许基本误差为：

$$\Delta R = (0.1\%R + 0.002m) \Omega$$

其中 R 指经调节后的电阻箱示值，m 是电阻箱的总转盘数，第二项误差是由于电阻箱转盘的接触电阻而引入的，当 R 较大时，第二项误差可以略去不计。如果 R=395Ω（设为 ZX36 型），那么它的允许基本误差 ΔR=0.4Ω。因此，在代入计算式时，R 值写成 359.0Ω 较妥，在一般情况下，可以认为电阻箱所指示的电阻值均为四位有效数字。

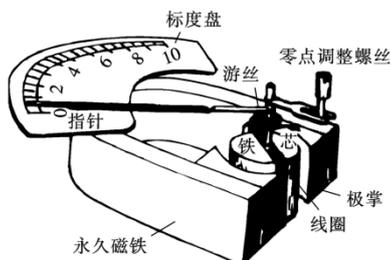


图二

3 使用注意：首先，在使用电阻箱前，应先旋转一下各个转盘，使盘内弹簧触点的接触性能稳定可靠（应该定期清洗各个弹簧片，避免长期使用后接触电阻增大，而影响测量的正确度）。其次，工作电流绝不超过最大允许值。再次，使用和储存场所的温度应为+10—40℃，相对湿度不大于 80%。周围空气中不含有腐蚀性气体。

三 电表

实验室用电表大部分是磁电式电表，它的内部结构可以简单的表示为如图三所示。永久磁铁的两个极上连着带圆筒孔腔的极掌，极掌之间装有圆柱形软铁芯，它的作用是使极掌和铁芯间的空隙中磁场很强，并且磁力线是以圆柱的轴为中心呈均匀辐射状。在圆柱形铁芯和极掌间空隙处放有长方形线圈，线圈上固定一根指针，当有电流通过时，线圈就受电磁力矩而偏转，直到跟游丝的反扭力矩平衡，线圈偏角的大小与所通入的电流成正比，电流方向不同，偏转方向也不同，这是磁电式电表的基本特征。



图三



图四

1. 直流检流计

检流计是一种测量小电流及小电压的仪表，一般常用作电路平衡的指零器，根据灵敏度的高、低(或电流常数的大小)，检流计大致可分为指针式和光点式两类。实验中常使用的 AC5/2, AC5/3 型指针式检流计(光点式检流计另介绍)见图四。它的电流常数分别为 $\angle 2 \times 10^{-6}$ A/格、 $\angle 7 \times 10^{-7}$ A/格。指针式检流计的特点是零点位于刻度板中央。未通电时，仅指针正对零点；通电流后，随电流方向的不同可以左右偏转，检流计常处于断开状态，仅当按下按钮时，检流计才接入电路中。为了避免过大的电流流过检流计，在使用时，可串联一个很大的保护电阻(如几兆欧)，或并联一个可变电阻(如电位器)，调节其电阻的大小，即可控制流过检流计的电流。

使用检流计应注意

a 轻拿轻放，在搬动时将活动部分用止动器锁住，对无止动器的检流计，可用一根导线将接线柱两端短路，避免震断动圈的悬丝。

b 不许用万用表的欧姆档去测量检流计的内阻，以避免通入过大的电流烧坏检流计。

2. 直流电流表

用来测量直流电路中的电流强度，根据量程的不同，大致分为微安表、毫安表和安培表三类，有的电流表是多量程的，例如 C31-A 型直流电流表，共 12 个不同量程，测量范围很广，最小的为 0-7.5mA，最大的为 0-30A，利用插塞来转换量程，在正确选择所需量程后，只要将插塞插入该量程孔中即可使用。在测量过程中，如果要改变量程，应先切断电源，再拔出插塞，插入另一孔中，然后接通电源。该电表的等级为 0.5 级，内阻较小，相应于各种量程，其内阻在 10^{-3} -几 Ω 的范围内变化，量程越大，内阻越小。

3. 直流电压表

用来测量直流电路中两点间电压的大小，大致可分为毫伏表、伏特表两类。电压表一般也是多量程的，例如 C31-V 直流电压表，可由 0-45mV 到 0-600V 几个量程所组成，量程的转换也是利用插塞。此表的等级也是 0.5 级，电表内阻随量程而异，量程越大，内阻越高。从 0-3V 开始，不同量程的内阻也与该量程之比是一个常数，即每伏的欧姆数为 $500\Omega/V$ 。如 300V 档内阻为 $150K\Omega$ 。

电表误差及准确度等级

如何一个电表在测量时都有误差，是由于结构上和制作上的不完善而产生的，它是本身固有的，这种误差称为允许基本误差 ($\Delta'A$)。一般以最大引用误差 (a%) 或等级值 (a) 来表示，即有：

$$\Delta'A = a\% \cdot A_m$$

其中 A_m 为电表的量程。a 值越小，电表越精密。多量程电表的级值是一定的(如 C31-A 型电流表的 a 仅为 0.5)；但由上式可知，对于不同的量程， $\Delta'A$ 是不同的。 A_m 越小、 $\Delta'A$ 也越小；而同一量程的 $\Delta'A$ 值是相同的。因此，对一定的待测量(如某电流值 I)，在使用一只多量程电表(如电流表)进行测量时，应注意以下两点：首先，勿使所选择量程 (I_m) 小于 I 值；其次，在满足上述要求前提下，应尽量选择小的量程，借以提高测量值的准确度；此外，对于同一个量，测量时所用电表的准确度越高(级值越小)，读出数值的准确度也越高。

电表使用的注意事项

a 使用前应观察指针是否与零刻度线重合，否则应调整表盖上的机械零位器，使指针指零。

b 直流电表的偏转方向与所通过的电流方向有关，所以，接线时必须注意电表上接线柱的

“+”和“-”，其中“+”端表示电流流入端，而“-”表示电流流出端，切不可接错。否则，就要撞坏指针。

c 使用电表前，应根据待测量电流或电压的大小选择合适的量程（一般指针偏转不应小于标度尺全长的 85%），若量程选择得太小，则通入过大的电流和电压，会使电表损坏；若量程选择得太大，指针偏转又太小，读数就不准确，因此，事先应估计待测量的大小，选择稍大于此量的量程，试测一下，如不合适，再更换更合适的量程。

d 电表接入电路中，要注意联接方式，安培表是用来测量电流的，必须串联在待测电路中，由于电表都有一定的内阻，当它串入电路后，对待测电路有一定的影响，故其内阻应比待测电路的总电阻小得多；伏特表是用来测量电压的，必须与待测电压两端并联，而电压表内阻应远大于待测元件的电阻。

e 在测量时，必须注意正确读数，也就是说，在读取电表的指示值时，应使我们的视线与电表标尺的平面垂直，如果电表标尺上带有镜子的话，在读数时就应使指针与镜子中的指针影子重合。

常用电表的符号及意义

每一电气测量指示仪表的表面上都有多种符号的表面标记，它显示了仪表的基本技术特性，只有在识别它们之后，才能正确选择和使用，常用符号和标记如下表一

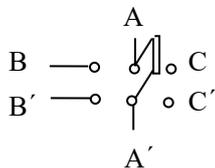
表一，常用电气仪表表面上的标记

符号	符号意义
— 或 DC	直流电
≈或 AC	交流电
≡	交直流两用
☆	电表绝缘强度试验电压 500V
⊥	电表垂直放置
∩	电表水平放置
⏏	磁电式
⏏	静电式
⏏	电动式
1.5	等级为 1.5，最大引用误差为 1.5%
II	II 级防外磁场

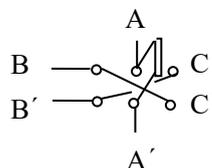
四 开关

在电学实验中，我们常用开关来接通，切断电源，还常利用开关来换接部分电路或电路中的元件。常用的开关有单刀单向、单刀双向、双刀双向、双刀换向和阻尼等几种。下面仅以双刀换向开关为例来说明它的作用，双刀换向开关是在双刀双向开关（图五）的基础上加两根对角连线而构成（图六）。当这两把能一起转动的刀（键）打向左方时，A 与 B 相通，A' 与 B' 相通；而当双刀打向右方时，A 与 C 相通，A' 与 C' 相通。若一个直流电源接于 A、

A'两端,而B、B'之间接有电阻,那么B、B'两端的正、负极就可随着双刀的不同位置而改变,从而达到了电流换向目的。如果考虑开关上两根对角连接电阻的影响而造成的不对称性,是否有其它连接方式?



图五



图六

五 直流电源

目前实验室普遍采用石家庄产的 HT 系列电源,该系列电源是采用运算放大器。硅晶体管的直流稳压电源,该电源精度高,纹路小,抗干扰能力强,有良好的负载适应性,该系列电源输出电压均为 0~30V,输出路数一般为二路,使用时注意如下:

- 1 开启电源开关,指示灯亮表示电源接通应预热 30 分钟。
- 2 电源输出两路公用一块电压表和一块电流表,“电压监视”,“电流监视”开关起转换第 I, II 路电压,路电流的作用。
- 3 若需监视第 I 路电压电流时,把电压监视,电流监视开关放在 I 位置,调节“电压粗调”“电压细调”即可得到所需电压值。
- 4 若过载或短路,电路保护无输出,应排除过载或短路故障,按“启动”按钮,电源即可输出。
- 5 输出电压由接线柱“+”、“-”供给,地接线柱仅与机壳相连。

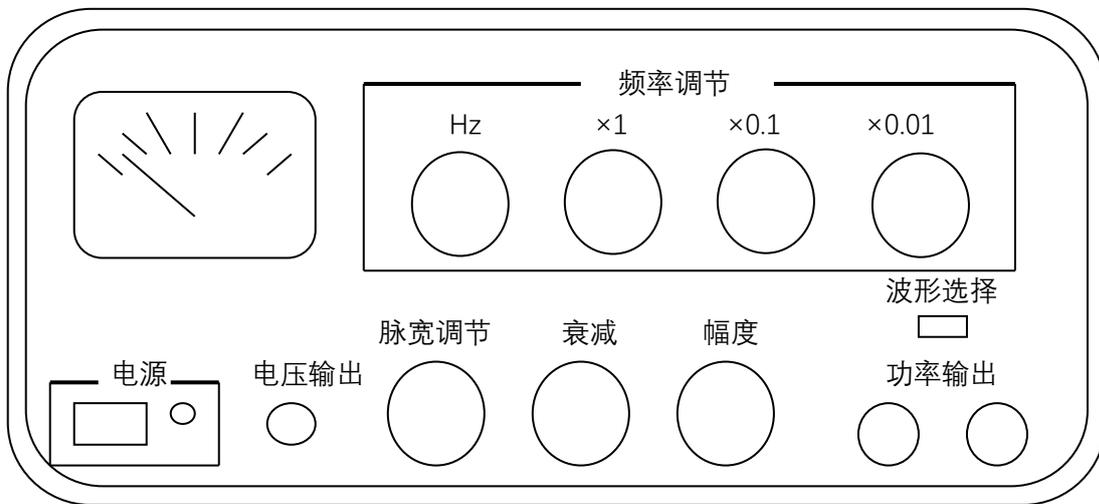
六 低频信号发生器

实验里常用的交流信号源如 DF1028B 型(如图七),能产生 20Hz-10KHz 电压输出,和 1Hz-100KHz 的功率输出(最大输出达到 20W),具有正弦波输出和脉宽可调节的方波输出.使用时应注意:

- 1 将电源接入 220V, 50Hz 交流电源,预热一段时间.
- 2 根据使用的需要,按下或弹出波形选择按钮,选择正弦波和方波输出.
- 3 根据所使用的频率范围,合理地选择频率开关和倍乘,尽可能多的设置有效位数,以获得最佳频率精度.
- 4 当电压输出阻抗负载不等于 50Ω 时,负载上的电压值为:

$$V_L = V_0 \frac{R_L}{R_L + 50} \times (0.1)^{A dB / 20}$$

式中 V_L 为负载上的电压, V_0 为输出开路电压即电表指示值, R_L 为负载电阻值, A 为衰减值.



DF1028B 型信号发生器面板图

实验七 示波器的原理和使用

[实验目的]

1. 初步了解示波管的结构；
2. 掌握双踪示波器的显示原理和使用方法；
3. 学习用示波器测量电压、电流、频率，以及相位差。

[仪器用具]

示波器，低频信号发生器，电感箱，电阻箱，电容箱。

[实验原理]

电子示波器又称“阴极射线示波器”，它可以非常直观地把各种电过程的图象用荧光屏显示出来。如果配合一些其他仪器和转换装置，它还可以对许多电学量，如：电流、电压、功率、相位、频率、调制度以及一些非电量进行定量测量。因此它是一种用途非常广泛的电子仪器。它构造的主要部分是示波管（如图 7-1）；扫描、触发系统；放大部分，包括 Y 轴放大和 X 轴放大两部分；电源部分，它供给以上三部分工作的各种电压。

(1) 示波管如图 7-1 所示。阴极被加热后发射出电子，经聚集和加速后，电子束穿过加有电压的垂直和水平偏转系统（简称纵偏和横偏）打在荧光屏上，致使荧光物质发光形成一个亮点，亮点在屏上的位移与偏转板上所加电压成正比，因此，亮点的运动轨迹描绘出纵偏和横偏信号的合成运动规律的图象。

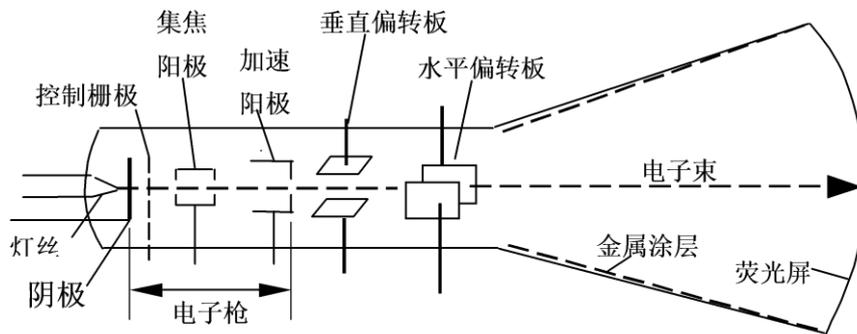


图 7-1 示波管结构图

(2) 示波器显示波形的基本原理。如图 7-2a 所示，在 X 轴偏转板（即水平偏转）上加一个随时间 t 按一定比例增加的电压信号 U_x ，则光点将从 A 点向 B 点移动。如果光点达到 B 点时突然把 U_x 降到零（图中坐标轴上的 T_x 点），那么光点就要返回 A 点。若此后 U_x 按上述相同情况

变化(幅值 U_m 和周期 T_x 均相同), 则光点又会重新由 A 移到 B。这样 U_x 周而复始地变化, 并由于发光物质的特性又能使光迹有一定的保留时间, 于是就得到一条“扫描线”, 一般称它为时间基线, 只要在 X 轴偏转板上加一个类似“锯齿”形式的电压信号, 就可以得到这样一条基线。

假如在 X 轴加有扫描电压的同时, 在 Y 轴加一正弦变化电压(图 7-2b), 则电子流不但受到水平电场力而且还受到铅直方向电场力的作用, 示波屏上不再是一条经过中心的水平方向光迹。设正弦电压信号 U_y 的周期 T_y 与 U_x 的周期 T_x 相同, 当 U_y 为正半周时, 偏转板 Y_1 的电位高于 Y_2 , 所以在水平中心线的上方出现一个正弦波正半周的波形; 当 U_y 为负半周时, 偏转板 Y_2 的电位高, 正弦波负半周的波形就出现在中心线的下方。当扫描电压第一个周期结束时, 正好完整显示了一个周期的信号波形 U_y ; 而且电子束立即回到原点, 并开始扫描第二个周期的信号波形。光点所画的轨迹和第一周期的完全重合, 所以在屏上显示出一个波形。由于在每一个周期内, 加在 X 轴偏转板上的锯齿波电压与时间成线性关系, 因而示波管所显示的波形也就是待测电压信号在 (U_y, t) 坐标图上的波形, 这就是示波器显示波形的基本原理。

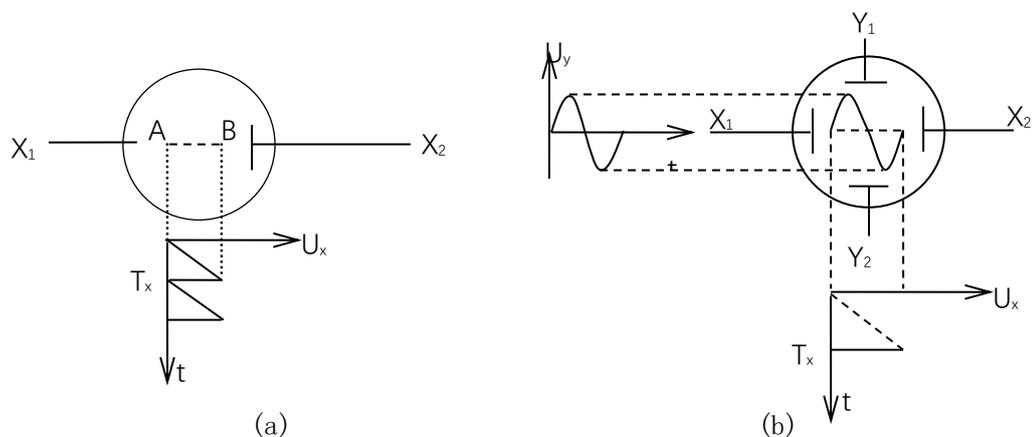


图 7-2 示波器显示波形原理图

如 U_x 的周期为 U_y 的 n 倍(整数), 屏上就显示 n 个正弦波形, 当被测信号系统频率不是扫描电压频率的整数倍时, 荧光屏上的波形就会左右移动。为了观察到稳定的波形, 就需要始终保持 U_x 和 U_y 频率整数倍的关系, 为此, 一般就设法引入另一个幅值可以调节的电压, 以控制扫描电压的频率, 从而满足上述条件, 这就是整步(同步)作用, 所引入的电压叫整步电压(即触发源), 整步电压可以取自被测信号(称内整步), 或电源电压(称电源整步); 也可将另一外加信号由“整步输入”接线柱接入, 这称为外整步, 总之, 视情况而定。在一般情况下, 常使用“内整步”。通过选择合适的整步源(触发源), 并调整触发电平在较小的合适水平, 就可以

获得被测信号的稳定波形。

如果纵偏压加一个正弦电压，横偏压也加一个正弦扫描电压，当两电压信号的频率成正比时，得出来的图形将是李萨如图形，如表(一)中所示，李萨如图形用来测量未知频率，令 f_y 、 f_x 分别代表纵偏压和横偏压的频率， n_x 代表 X 方向的切线和图形相切的切点数， n_y 代表 Y 方向的切线和图形相切的切点数，则有

$$\frac{f_y}{f_x} = \frac{n_x}{n_y} \quad (7-1)$$

如果已知 f_x ，则由稳定的李萨如图形和关系式(7-1)可求出 f_y 。

双踪示波器，双踪示波器具有两个 Y 轴输入通道，两个独立信号 Y_1 和 Y_2 分别接到双踪示波器的“ Y_1 信号输入”和“ Y_2 信号输入”端，利用电子开关电路，将两个通道输入信号交替地耦合到 Y 轴后级放大器，使两组输入信号交替地作用于 Y 轴偏转系统，利用荧光屏上光迹余辉，与人眼视觉惯性，可在荧光屏上同时看到两组输入信号波形。输入信号在荧光屏上有四种显示方式：(1) Y_1 显示：此时只显示 Y_1 信号，不显示 Y_2 信号，以便对 Y_1 信号单独观察。(2) Y_2 显示：此时只显示 Y_2 信号，不显示 Y_1 信号。(3) 交替：此时第一次扫描显示 Y_1 (或 Y_2) 然后第二次显示 Y_2 (或 Y_1)，不断重复显示，由于一般扫描的周期相当短，在显示一个信号时，另一个信号前一次的显示余辉尚未消失，看到的是两个信号的波形同时显示在屏上。(4) 断续：同一次扫描中，在 $10\mu\text{s}$ 数量级的极短时间交替显示 Y_1 和 Y_2 ，亦即信号 Y_1 只来得及显示其完整波形的很小一段就转而显示信号 Y_2 ，同样， Y_2 也只显示很小一段又转而第二次显示 Y_1 ，如此不断重复进行，在一个扫描周期内可同时显示 Y_1 和 Y_2 两个信号的波形。只是两个信号的波形都是断续的。

[实验内容]

(一) 测量电压和电流

1. 接通交流电源(220V), 荧光屏上应显示一条扫描线, 调节 INTENSITY (辉度), FOCUS (聚焦), X 轴左右移位等旋钮, 使扫描线亮度适中, 清晰; 调节 Y 轴上下移位旋钮, 使扫描线跟屏上的基准线重合。

2. 按图 7-3(a) 联接线路图, 调节信号频率 $f=5000\text{Hz}$, 电压表指示为 1V , 衰减为 0dB $C=0.03\mu\text{F}$, $R=100\Omega$ 。

3. 调节各通道 CH1, CH2 对应的偏转因子调节旋钮 “VOLTS/DIV” 和水平偏转因子 “TIME/DIV”, 设置触发源 “SOURCE” 于 “VERT” 模式, 调节触发电平旋钮 “TRIG LEVEL”, 得到稳定的波形如图 7-3(b) 所示。

4. 读出垂直方向上距离 Y_{cm} , 再从屏幕下方读出 Y 方向上的偏转因子 $m(\text{V}/\text{cm})$, 从而得出该波形的峰峰电压 $V_{\text{pp}}=Y \times m(\text{V})$ 。

5. 测量周期的方法, 首先从波形上利用屏幕标尺读出一个周期对应的水平距离 X_{cm} , 再从屏幕左上角读出水平方向的扫描速率因子 $n(\mu\text{s}/\text{cm})$, 则该波形对应的周期 $T=X \times n(\mu\text{s})$, 频率 $f=1/T$ (当波形稳定时, 也可以从屏幕右下角直接读出频率)。

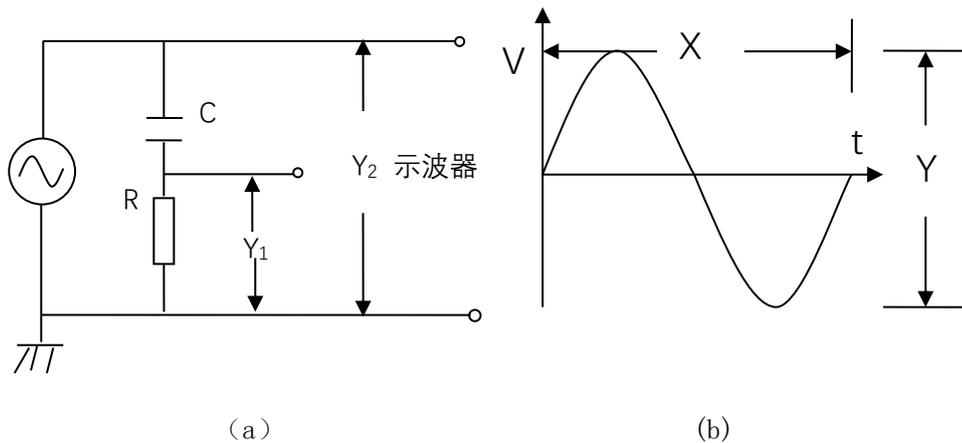


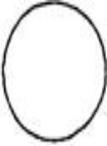
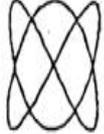
图 7-3 测量交流回路的电压和电流

(二) 观察李萨如图形并测量频率

1. 选择示波器的水平显示方式为 X-Y 水平方式, 从低频信号发生器取出频率为 50Hz 、电压幅度约为 1V 的电压信号, 将其接至 Y (Y_2) 轴输入端钮。

2. 从另一台低频信号发生器取出另一个幅值也约为 1V 、频率为 f_x 的信号接至 X 轴输入端钮, 调节示波器的有关旋钮, 使波形大小适合观测, 再调节信号发生器的输出频率 f_x , 使示波器屏幕上出现稳定的、如表(一)中的各个图形, 分别读出 f_x 并完成下表。

李萨如图形举例表(一)

$f_y:f_x$	1:1	1:2	1:3	2:3	3:2	3:4	2:1
李萨如图形							
n_x							
n_y							
f_x (Hz)							
f_y (Hz)	50	50	50	50	50	50	50

(三) 测量相位差

1. 图 7-4 为实验原理线路图,按图接好线路,其中信号源频率为 $f=500\text{Hz}$, 电感 $L=1\text{H}$, $R=3200\Omega$.

2. 调节有关旋钮使二波形稳定后,调节 Y_1, Y_2 移位旋钮,使两个波形都移到关于 oo' 的对称轴上,如图 7-5. 从屏幕的主格中测得波形 A 一个周期 (360°) 的时间为 T , 而波形 B 滞后于波形 A 的时间为 Δt . 则二波形的相位差为:

$$\varphi = \frac{360^\circ}{T} \times \Delta t$$

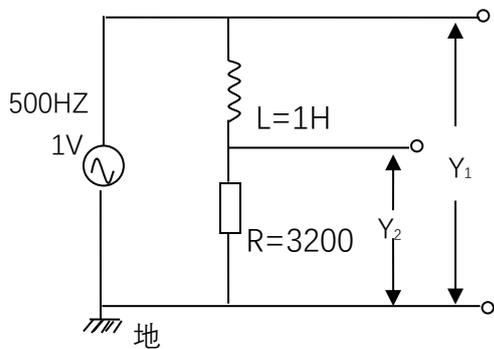


图 7-4 相位差实验原理图

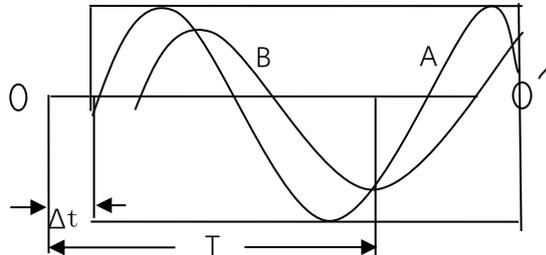


图 7-5 相位差的测量

[数据处理]

1. 利用电阻计算图 7-3 回路的电流, 并把测得的信号源电压与电压表指示进行比较.
2. 完成表 (一) 的内容.
3. 求出内容 (三) 中的相位差, 并与理论值比较.

[思考题]

1. 开机后, 如果屏上出现一从左向右的亮点, 通过调节哪些旋钮, 可以得到一扫描线.
2. 在荧光屏上可以观察到示波器产生的锯齿波吗?
3. 可以用示波器来测量直流电压吗? 如何测量?
4. 实验内容 (一) 中测得的信号源电压为什么与电压表的指示值不一致.
5. 可以用示波器来测量交流元件 (如电容, 电感) 吗? 如何测量?

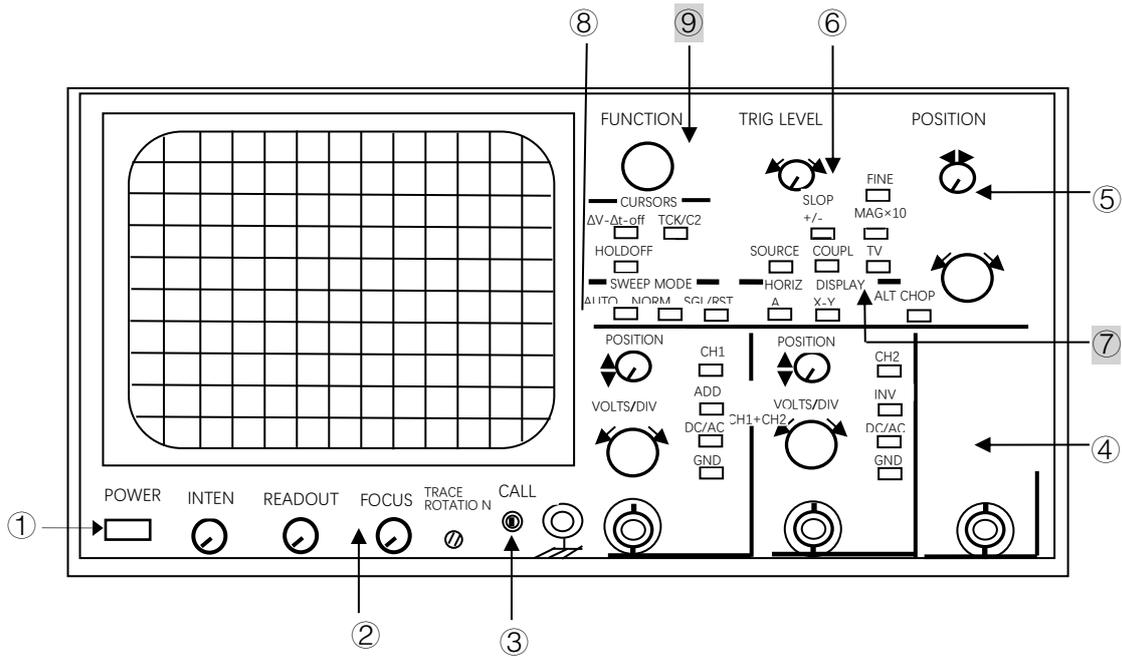
SS7802 型示波器使用说明

- 1 POWER: 电源开关键, 接通或断开电源.
- 2 INTEN: 调节屏幕光点和扫描线亮度.
READOUT: 调节读出字符亮度.
FOCUS: 聚焦旋钮, 可使光迹达到清晰的程度.
TRACE RDTARION: 当光迹由于磁场的影响在水平方向轻微倾斜时, 该旋钮用于调节光迹与

水平刻度平行。

- 3 **CAL connector**:校准信号输出端子,输出方波作为本机 Y 轴, X 轴校准和同轴电缆线的调整用。

 **Connector**: 测量接地端。



SS7802 示波器面板图

- 4 **Vertical axis**:垂直方向控制旋钮部分。

INPUT connector:信号输入端。

EXT INP6:外触发信号输入端

[VOLTS/DIV]:调节 CH1(通道 1)或 CH2(通道 2)垂直方向偏转因数,设置适合观察的波形幅值.偏转因数显示在屏幕的左下角,选择范围为 2mV/div 到 5V/div

① 按下 CH1 的 **VOLTS/DIV**,偏转因数显示 “>”标志,当偏转因数调到最大时,屏幕显示 “CH1 VER LIMIT”。

② 调节 CH1 的 **VOLTS/DIV**,偏转因数连续步进变化。

CH2(通道 2)也是相同的功能。

[↑ POSITION ↓]:调节 CH1(通道 1)或 CH2(通道 2)波形上下移动

[CH1, CH2]:通过按下该旋钮选择 CH1(通道 1)或 CH2(通道 2)ON 或 OFF,输入信号所在的通道设置在 ON 状态,该输入信号在屏幕上,输入信号通道设置在 OFF 状态,该输入信号从屏幕上消失。

① 设置在 ON 状态的输入通道,其 **VOLTS/DIV** 和通道输入耦合类型,都显示在屏幕的左下角,当通道选择设置在 OFF 状态时,则在屏幕上消失。

② 当所有的通道(CH1, CH2, ADD)选择都设置在 OFF 状态时,显示 CH1。

DC/AC, GND: 输入耦合开关

① 按下 CH1 的 **GND** 可以设置 CH1 的 **GND** 在 ON 状态(GND 接地标志就显示在屏幕的左下角),这时,输入信号与 CH1 放大器断开,放大器输入端接地,屏幕显示水平扫描线。

② 按下释放 CH1 的 **GND** 按钮,使 **GND** 在 OFF 状态。

③ 按下 CH1 的 **DC/AC**, 设置 CH1 在 DC(直流)或 AC(交流)状态。

(DC:放大器输入端与信号输入端直接耦合,可以显示直流信号和交流信号.AC:放大器输入端与信号输入端经电容耦合,显示交流信号,阻断直流信号。)

ADD: 按下设置 **ADD** 在 ON 状态,屏幕显示(CH1+CH2)信号。

INV: 按下设置 **INV** 在 ON 状态,CH2 通道出现反方向(-CH2)信号,即如果:

A. 设置 CH1 和 CH2 在 ON 状态, **ADD** 在 ON 状态:

① INV 在 OFF 状态,则 CH1, CH2, (CH1+CH2) 信号显示在屏幕上(“+”符号显示在屏幕的左下角)

② INV 在 ON 状态,则 CH1, -CH2(CH1-CH2) 信号显示在屏幕上(“↓”符号显示在屏幕左下角 CH2 读数后面)

B. 设置 **ADD** 在 OFF 状态, **INV** 在 ON 状态,则 CH1, -CH2 信号显示在屏幕上

5 Horizontal section:水平部分

[←Position→]: 调节波形左右移动

Find: 按下该按钮,指示灯亮, **[←Position→]** 微调波形左右移动,当 **[←Position→]** 调节到底时,屏幕上的波形在原来的方向向左或右滚动,轻轻朝另外的方向调节 **[←Position→]**,可以使滚动的波形停止下来。

[TIME/DIV]: 调节扫描速率,扫描速率的大小可以显示在左上角。

① 按下 **[TIME/DIV]**, 非校准符号 “>” 显示在屏幕的左上角上,此时调节 **[TIME/DIV]**, 扫描速率在两个步进之间连续变化,当调节值达到最大或最小时,屏幕显示 “VARLIMIT”

② 重新按下 **[TIME/DIV]**, 释放非校准设置模式,消除 “>” 符号。

MAG 10: 以中线为参数将波形放大 10 倍。

① 将要放大的波形部分调到屏幕中间。

② 按下 **MAG 10** 按钮,波形的扫描速率在中线的左右放大 10 倍, “MAG” 显示在屏幕的右下角。

ALT CHOP: 当双通道模式被选择时,可以选择 ALT(alternate 交替)或 CHOP(chop 断续)模式。

① ALT 是两个输入信号交替扫描,这种模式适合观察高频双通或多通道信号。

② CHOP 是两个扫描信号的开关频率接近 555Hz,这种扫描适合观察低频双通或多通道信号。

6 Triggering section:触发部分

[TRIG LEVEL]: 调节触发电平高低

- ① 当产生触发信号时, TRIG' D 指示灯亮
- ② 有时 “?” 显示在显示值的右边, 这表明如果设置 AC 耦合 (coupling), EXT 或 VARIABLE, 可以直接读出.

SLOPE: 触发极性按钮

- ① 通过按下 **SLOPE** 选择触发极性 “+” 或 “-”
- ② “+” 表明扫描在波形的上升沿开始
- ③ “-” 表明扫描在波形的下降沿开始

SOURCE: 选择触发源 (CH1, CH2, LINE, EXT, VERT)

CH1: 使用 CH1 的输入信号作为触发源.

CH2: 使用 CH2 的输入信号作为触发源.

LINE: 电源信号作为触发信号, 这适合观察与电源号频率相同的信号.

EXT: 使用外信号触发信号, 外触发信号可以从控制面板的 “EXT INPUT” 输入端输入 (外触发信号最大范围是 400V, 要避免超出这样范围的输入的电压).

表 1: 没有选择 ADD

显示通道	同步信号源
CH1	CH1
CH2	CH2
CH1, CH2	CH1

VERT: 从通道输入信号中取出小信号作为触发源, 选择或不选择 ADD 时, 可参考表 1 和表 2。

表 2: 选择 ADD

显示通道	同步信号源
ADD	CH1
CH1, ADD	CH1
CH2, ADD	CH2
CH1, CH2, ADD	CH1

COUPL: 按下该按钮选择触发耦合模式 (AC, DC, HF REJ, LF REJ)

AC: 隔断触发信号的直流成分, 最低的频率是 100Hz.

DC: 通过所有的信号成分.

HF REJ: 减少高频成分 (10KHz 以上), 这种模式适合于触发源包含高频噪声, 并且由于这些噪声使触发不稳定.

LF REJ: 减少低频成分 (10KHz 以上), 这种模式适合于触发源包含低频噪声, 并且由于这些噪声使触发不稳定.

TV: 按下该按钮 TV 触发模式 (BOTH, ODD, EVEN, or TV-H), 设置触发极性与视频同步信号的极性相同.

- ① 当选择 TV-H 时, 屏幕显示 f:TV-MODDE, 通过调节 [FUNCTION], 选择 NTSC, PAL (SECAM), or HDTV
- ② 当选择 BOTH, ODD, or EVEN 时, 屏幕显示 f:TV-LINE, 通过调节 [FUNCTION], 选择信号线. 每次按下或连续按下 [FUNCTION] 键时, 就在前一次改变的方向上进行粗调.

TRIG' D indicator: 产生触发脉冲时指示灯亮.

READY indicator: 等待触发信号时指示灯亮.

7 HORIZ DISPLAY: 水平显示.

A, **X-Y**

- ① 按下 **A**, **X-Y** 选择 A 或 X-Y 的水平方式
- ② **A** 是显示扫描方式
- ③ **X-Y** 显示的是 CH1 通道作为 X 轴输入, 另一通道 (CH1, CH2, ADD) 作为 Y 轴输入而获得的信号, 这种模式适合观察磁滞回线, 李萨如图形等.

8 扫描模式: **AUTO**, **NORM**, **SGL/RST**

通过按下 **AUTO**, **NORM** 选择周期扫描方式, 当选择 **AUTO** 时, **AUTO** 指示灯亮, 当选择 **NORM** 时, **NORM** 指示灯亮, 如果未设置触发, 可通过调整 [TRIG LEVEL] 设置触发.

AUTO: 自动触发扫描方式.

A. 如果触发信号频率属于以下所述几种情况, 会由于自激扫描, 而使触发变得不稳定, 这时, 使用 **NORM** 设置触发. ①当扫描时间在 500ms/div 之间, 近似 10Hz 或更低. ②当扫描时间超过 500ms/div, 50Hz 或更低.

B. 允许在 50Hz 或更高的频率进行触发.

C. 当缺乏一个合适的触发信号时候, 设置在自动扫描.

NORM: 常态触发方式

- ① 允许在所有的扫描频率上触发, **NORM** 触发模式特别适合于低频和低周期信号.
- ② 在缺乏适当的触发信号时无法产生自动触发, 可使用 **NORM** 触发.
- ③ 当输入耦合设置在 **GND**, 触发源是 **CH1, CH2** 时, 扫描处在自动状态, 使用这功能, 可以很容易确定 **GND** 位置.

Single Sweep: 单次扫描

SGL/RST: 按下该按钮 (SGL/RST 指示灯亮) 可以设置单次扫描模式, **READY** 指示灯亮表示等待输入信号.

- ① 当触发信号产生时, 扫描发生, **READY** 指示灯熄灭. 当在 **CHOP** 模式, 所有通道同时扫描, 当处在 **ALT** 模式时, 只有一个通道扫描.
- ② 再次按下 **SGL/RST** 按钮, 另外一个单次扫描.

9 FUNCTION

[FUNCTION]: 调节标尺的位置, 开, 关等, 可以通过转动或按下这旋钮进行设置.

一 CURSORS: 游标

- ① 按下 $\Delta V-\Delta t$ -OFF 选择 ΔV (电压测量) 或 Δt (时间测量)
- ② 操纵游标: 当选择 ΔV 或 Δt 时, 显示测量的两个游标, 通过转动 [FUNCTION] 调整可移动游标的位置, 每次当按下或连续按下 [FUNCTION] 时, 游标可以在原来的方向上粗调.
- ③ 每次按下 TCK/C2 标志 “一” 的可移动游标发生变化, 变化的顺序为: 游标 1 (C1) → 游标 2 (C2) → 双游标 (TCK)

二 时间 Δt 和频率 $1/\Delta t$ 的测量; 按下 $\Delta V-\Delta t$ -OFF 选择 Δt , 显示竖直游标 1 和竖直游标 2, 可以使游标 1 和游标 2 之间的时间 Δt 和和频率 $1/\Delta t$ 显示在屏幕的左下角, 通过移动游标 1 或游标 2 的位置可以测量 Δt .

- ① 按下 TCK/C2 按钮选择游标 1 (C1), 屏幕显示成 f:H-C1, 游标 1 上的 “1” 特征可以显示游标 1 是可以移动的.
- ② 通过转动 [FUNCTION] 移动竖直游标 1 的位置.
- ③ 按下 TCK/C2 按钮选择游标 2 (C2), 屏幕显示成 f: H-C2, 游标 2 上的 “1” 特征可以显示游标 2 是可以移动的. 通过转动 [FUNCTION] 移动竖直游标 2 的位置.
- ④ 经过设置的游标 1 和游标 2 之间的时间 Δt 和频率 $1/\Delta t$ 可以显示在屏幕的左下角.
- ⑤ 按下 TCK/C2 按钮选择 TCK (tracking) 屏幕显示成 f:H-TRACK, 游标 1 和游标 2 上的 “1” 特征可以显示两游标都可以移动的, 当转动 [FUNCTION] 时, 游标 1 和游标 2 一起移动而它们之间的距离不变.
- ⑥ 按下 $\Delta V-\Delta t$ -OFF 可以设置 t 复位 OFF (没有显示游标).

HOLDOFF: 当观察一个由复杂成分构成的脉冲时, 触发有时变得不稳定, 这时, 调整 HOLDOFF (扫描中断) 时间, 可以获得稳定的波形.

- ① 按下选择 HOLDOFF, 功能显示 f:HODOFF.
- ② 转动 [FUNCTION], 调整 HOLDOFF 时间, 每次按下或连续按下 [FUNCTION] 可以对 HOLDOFF 时间进行调整.
- ③ 当 [FUNCTION] 顺时针或逆时针调到头时, HOLDOFF 时间分别为最大和最小 (0%)
- ④ 一般情况下, 把 HOLDOFF 时间设置为 0%

实验八 直流电桥

[实验目的]

1. 了解惠斯登电桥的原理；
2. 学会用惠斯登电桥测中值电阻的方法。

[仪器用具]

电阻箱、检流计、滑线变阻器、电源、开关、待测电阻、箱式惠斯登电桥等。

[实验原理]

电桥在电磁测量技术中应用极其广泛，它是一种用比较法进行测量的仪器。电桥可以测量电阻、电容、电感、频率、温度、压力等许多物理量，也广泛应用于近代工业生产的自动化控制中。根据用途不同，电桥有多种类型，其性能和结构也各有特点，但基本原理相同。本实验使用的单电桥仅是其中的一种，是惠斯登在 1943 年发明的，所以也称为“惠斯登电桥”。

电阻值的测量是基本的电学测量之一，测量电阻的方法很多，如伏安法、欧姆法、电桥法等。其中以电桥法应用得最为普遍、容易，达到较高的准确度。

1. 单臂电桥的线路如图 8-1 所示，其中 R_1, R_2, R_x, R_s 电阻联成四边行 ABCD，每边称作电桥的一个臂。对角 A 和 C 上加上电源，对角 B 和 D 之间连接流计 G，所谓“桥”是指在 B、D 这条对角线而言，检流计 G 的作用就是比较两点的电位，当 B、D 两点电位相等时，检流计无电流通过，这种状态称作电桥平衡。

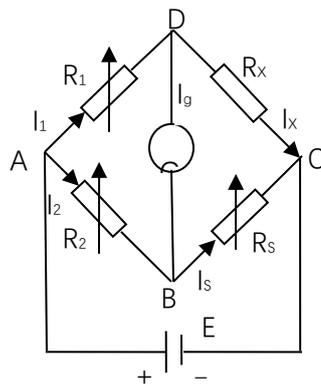


图 8-1

电桥平衡时, 有

$$I_g=0 \quad (8-1)$$

故 $I_1=I_x \quad I_2=I_s$

同时, 由于 B、D 两点电位相同, 所以

$$U_{AB}=U_{AD} \quad U_{BC}=U_{DC}$$

且 $I_1R_1=I_2R_2 \quad I_xR_x=I_sR_s$

于是有 $\frac{R_1}{R_x} = \frac{R_2}{R_s}$ (8-2)

即 $R_x = \frac{R_1}{R_2} R_s$ (8-3)

若已知 R_1, R_2, R_s (或 R_s 及比率 $\frac{R_1}{R_2}$ 已知), 可由(8-3)式求出 R_x

为了计算方便, 通常把 R_1/R_2 的值选为 10^n (n 为正负整数), 令 $K_r=R_1/R_2$, $R_x=K_rR_s$, R_1 、 R_2 称为“比率臂”, K_r 称为比率臂的“倍率”, R_s 称为“比较臂”, R_x 称为“待测臂”, 式(8-2)或(8-3)称为电桥的平衡条件。可见, 电桥的平衡与工作电流 I 的大小无关。调节电桥达到平衡有两种方法: 一是取比率系数 K_r 为某一值 (通称为倍率), 调节比较臂 R_s ; 二是保持比较臂 R_s 不变, 调节比率系数 K_r (倍率) 的值。后一种方法准确度很低, 几乎已不使用。目前广泛采用具有特定比率系数值的前一种电桥调节方法。

[实验内容]

1. 用敞式电桥测量未知电阻

(1) 用电阻箱连接成桥路如图 8-2 所示。其中 R_1 、 R_2 为电阻箱, 可调节范围为 $0 \sim 9999\Omega$; R_s 也为电阻箱, 可调节范围为 $0 \sim 99999.9\Omega$ 。在比率系数一定时, 可通过调节 R_s 使电桥平衡。 R_n 是可变电阻, 用来限制电流的大小; K_E 是单板开关, K_S 是检流计按钮开关, 均用来控制电路的通断。

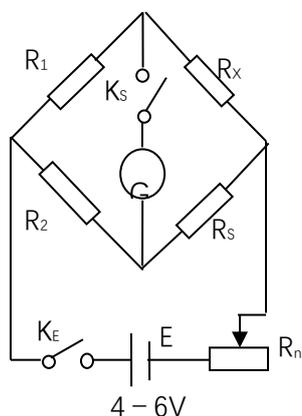


图 8-2

(2) 实验时, 各接头必须干净并接牢, 可变电阻 R_n 应取最大值, 以免损坏检流计。选

取比率臂: 比率值分别取 $\frac{R_1}{R_2} = 1$ 和 0.1, 估计待测电阻 R_{x1} 及 R_s 的阻值范围。

(3) 打开检流计锁扣检查, 调节检流计的机械零点。

(4) 合上开关 K_E , 再按按钮开关 K_S , 看检流计是否偏转, 调节 R_s , 使检流计指针趋零。

减少 R_n 增加电桥灵敏度, 再调节 R_s , 使指针趋零。反复多次调节, 电桥就算达到平衡。

(5) 记下电阻箱 R_s 的读数及倍率 $K_r (K_r = \frac{R_1}{R_2})$ 的数值, 待测电阻 R_{x1} 即可用公式 (8-3)

计算。

(6) 待测电阻 R_{x1} 的相对误差, 可按下式估算:

$$E_r = \frac{\Delta R_x}{R_x} = \frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3}$$

$$\approx a_1\% + a_2\% + a_3\%$$

其中 a_i 为各电阻箱的准确度等级, 而绝对误差 $\Delta R_x = R_x \cdot E_r (\Omega)$

(7) 按照上述步骤, 测量另一个未知电阻 R_{x2} 。再将 R_{x1} 、 R_{x2} 串联和并联, 分别测出其等效电阻, 并分别估算测量误差, 写出测量结果的完整表达式, 数据填入表 1。

表1 用敞式电桥测未知电阻数据 电阻箱的准确度等级 a=

被测电阻	R_{X1}		R_{X2}		$R_{X1} + R_{X2}$		$R_{X1} // R_{X2}$	
倍率 $K_r=R_1/R_2$	5000:500 0	500:5000	5000:500 0	500:5000	5000:500 0	500:5000	5000:500 0	500:5000
读数臂 $R_s (\Omega)$								
$R_x=K_r \cdot R_s$								
E_r								
$\Delta R_x (\Omega)$								
$R_x \pm \Delta R_x$ (Ω)								

2. 用 QJ23a 惠斯登电桥测量未知电阻

(1) 用箱式电桥测量未知电阻 R_{X1} 、 R_{X2} 及 R_{X1} 、 R_{X2} 串联和并联的等效电阻 (使用方法及注意事项参阅附录 1-1)。

(2) 比率值的选取应使 R_s 有四位有效读数。

(3) 在正常情况下, 使用准确度等级为 0.01、0.02、0.05 和 0.1 级的电桥时, 测量电阻的最大允许基本误差为:

$$\Delta R_x = \pm K_r (a\% R_s + b\Delta R)$$

式中 ΔR 是最小步进值或分度值, a 是准确度等级, b 是固定差项系数, 当 $a=0.01$ 和 0.02 时, 可取 $b=0.3$; 当 $a=0.05$ 和 0.1 时, 可取 $b=0.2$, 算出各次测量的绝对误差 ΔR_x , 最后写出测量的结果: $R_x \pm \Delta R_x$

表2 用箱式电桥测未知电阻

被测电阻	R_{X1}	R_{X2}	$R_{X1} + R_{X2}$	$R_{X1} // R_{X2}$
倍率 $K_r=R_1/R_2$				
准确度级 a				
$R_s (\Omega)$				
$R_x=K_r \cdot R_s$				

$\Delta R_x (\Omega)$				
$R_x \pm \Delta R_x$ (Ω)				

[注意事项]

1. 实验前 R_n 应调至最大，以后渐减少 R_n ，随着电桥趋于平衡， R_n 减少到零；每次更换 R_x 前，均要增大 R_n 打开 K_S 。
2. 为了保护检流计，使用开关的顺序应先合 K_E ，后合 K_S ；先断开 K_S ，后断 K_E 。
3. 按下 K_S 的时间不能太长，测量完毕，必须打开 K_E 和 K_S ，并将检流计锁扣锁上。

[思考题]

1. 电桥的平衡条件是什么？图 8-2 中的 R_n 有什么作用？ R_n 是否影响电桥的平衡？
2. 当电桥达到平衡后，若互换电源与检流计的位置(图 8-1 中 $A \leftrightarrow B, C \leftrightarrow D$) 电桥是否仍然保持平衡，试证明之。

附录 1 QJ23a 型惠斯登电桥

一. 面板图

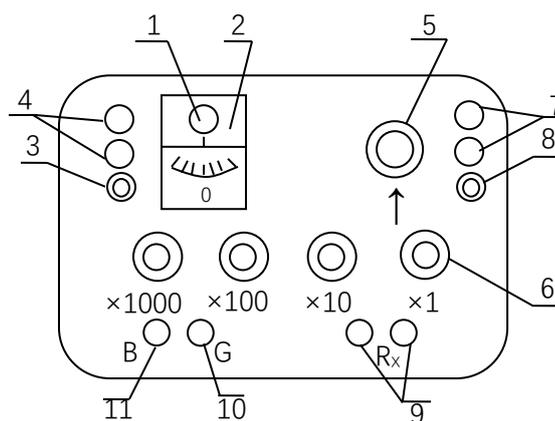


图 1-1 QJ23a 型电桥面板图

1. 指零仪零位调整器； 2. 指零仪； 3. 内、外接指零仪转换开关； 4. 外接指零仪接线端钮； 5. 量程倍率变换器(倍率)； 6. 测量盘； 7. 外接电源接线端钮； 8. 内、外接电源转换开关； 9. 测试电阻器接线端钮； 10. 指零仪按钮(G)； 11. 电源按钮(B)；

二. 电路原理图

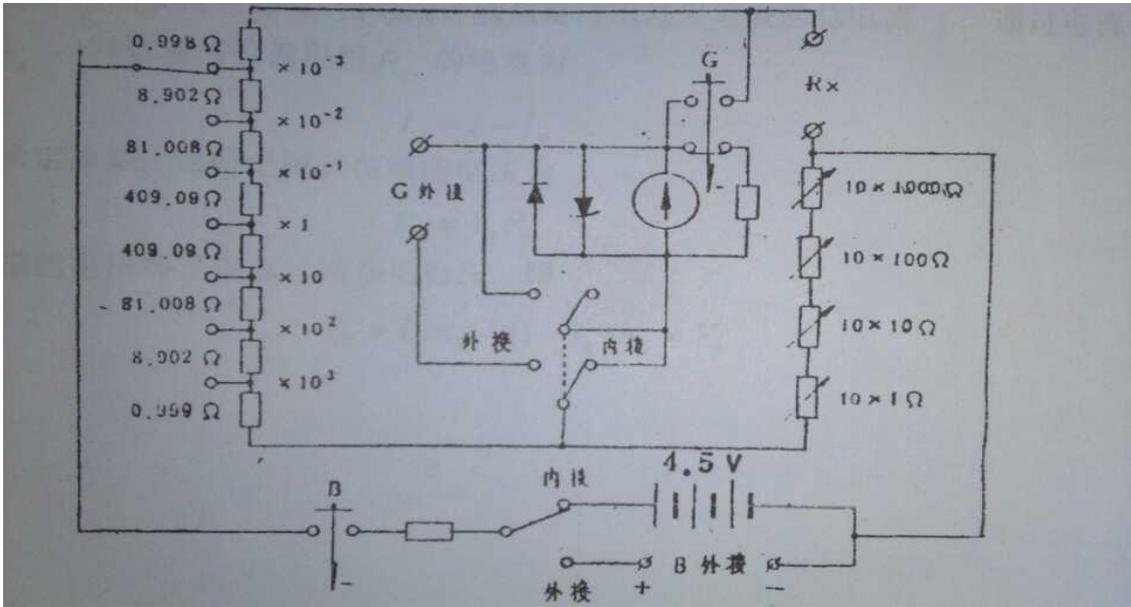


图 1-2 QJ23a 型电桥原理图

图 1-2 所示为 QJ23a 型电桥内部接线图, 比率 $\times 10^3$ 或者 $\times 10^{-3}$ 的准确度等级为 0.5; $\times 10^2$ 或者说 $\times 10^{-2}$ 时为 0.2 级; 10^{-1} 或 1 或 10 时为 0.1.

三. 使用方法及注意事项

(1) 将待测电阻 R_x 接在 “9” 两个端钮上。

(2) 将 “3”、“8” 扳向 “内接”, 则内附检流计、内附电源接入电桥线路, 再调整 “1”, 使指针指零位。

(3) 估计 R_x 的近似值, 将比率臂旋钮 “5” 和比较臂 “6” 旋至适当的位置。

(4) 先按 “B” 后按 “G”, 分别调整四个比较臂旋钮, 直至检流计指针指零为止, 则

$$\text{待测电阻 } R_x = \text{比率臂读数} \times \text{比较臂读数之和}$$

(5) 使用时, 比较臂 $\times 1000$ 不允许置于 “0” 位。

(6) 当内附电源电压不足时, 可打开电桥底部一长方形板, 调换 1.5 伏特干电池三节, 应注意 “+”、“-” 极性。

(7) 应需要外接检流计和外接电源时, 可将它们分别接于 “4” 和 “7” 的两对接线柱上, 并把 “3”、“8” 扳向 “外接”。

(8) 仪器使用完毕将 “3”、“8” 扳向 “外接”, “11”、“10” 按钮松开。

实验九 电表的改装和校准

[实验目的]

1. 掌握将微安表改装成较大量程的电流表和电压表的原理和方法；
2. 学会校准电流表和电压表的方法；
3. 利用已经改装过的电流表和电压表测量未知电阻的阻值；

[仪器用具]

直流毫安表，直流电压表，直流微安表表头，电阻箱，滑线变阻器，开关，电源等。

[实验原理]

1. 将电流计改装为安培表

用于改装的电流计(微安表)习惯上称为“表头”。由于表头满刻度时，所允许通过的电流很小，只适用于测量微安级或毫安级的电流，而待测电流往往较大，若要测量较大的电流，需要扩大电表的电流量程。

根据电阻并联规律可知，如果在电流计两端并联上一个阻值适当小的电阻 R_S (如图 9-1 所示)。可使电流计不能承受的那部分电流从 R_S 上通过，这种电流计和并联电阻 R_S 组成的整体(图中用虚线框住部分)，就是所改装的安培表，并联电阻 R_S 就叫分流电阻，当选用不同大小的 R_S 。就可以得到不同量程的安培表。

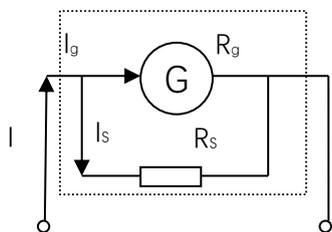


图 9-1

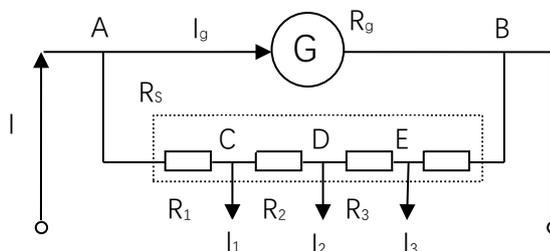


图 9-2

由图 9-1 可知，当电流计满刻度时通过安培表的总电流 I ，通过电流计的电流为 I_g ，所以通过分流电阻 R_S 的电流为

$$I_s = I - I_g, \quad (9-1)$$

由欧姆定律知，这时电流计两端的电压为

$$V_g = I_g R_g, \quad (9-2)$$

R_S 两端的电压等于电流计两端的电压，即

$$V_s = I_s R_s = (I - I_g) R_s = V_g \quad (9-3)$$

整理后得到分流电阻

$$R_s = \frac{I_g}{I - I_g} R_g = \frac{1}{\frac{I}{I_g} - 1} R_g \quad (9-4)$$

式中总电流 I 就是改装后电表的量程， R_g 为电流计内阻。

实际上改装多量程的安培表，用得较多的是串联接法，即采用中间抽头转换式分流电路，如图 9-2 所示，计算这种分流电阻的步骤：首先按公式 (9-4) 求出各分流电阻串联后的总电阻 R_s ，然后分别求出各个分流电阻的阻值。

如 B 挡，对于 A、B 端按 (9-4) 式

$$R_s = \frac{I_g}{I - I_g} R_g \quad ,$$

现将 (9-4) 展成为：

$$I R_s = I_g R_g + I_g R_s = I_g (R_g + R_s) \quad . \quad (9-5)$$

对于 C 挡，A、C 端电压为：

$$(I_1 - I_g) R_1 = I_g (R_g + R_s - R_1) \quad ,$$

整理后得

$$I_1 R_1 = I_g R_g + I_g R_s - I_g R_1 + I_g R_1 = I_g (R_g + R_s) \quad , \quad (9-6)$$

由 (9-5) 和 (9-6) 可知

$$I R_s = I_1 R_1 = I_g (R_g + R_s) \quad ,$$

从而

$$R_1 = \frac{I}{I_1} R_s \quad , \quad (9-7)$$

$$R_2 = \frac{I}{I_2} R_s - R_1 \quad , \quad (9-8)$$

$$R_3 = \frac{I}{I_3} R_s - (R_1 + R_2) \quad (9-$$

9)

R_1 、 R_2 、 R_3 为各分流器的阻值，电流最大处的分流电阻为 R_1 ，依次为 R_2 、 R_3 、 I_1 、 I_2 、 I_3 为所须扩大的电流数，其中最大的电流为 I_1 ，依次为 I_2 、 I_3 。

必须注意,在图 9-2 的电路图中用(9-4)式计算 R_S 的电流 I 和用(9-7)-(9-9)式计算 R_1, R_2, R_3 的电流 I 均是相同。而且是指几种扩大的电流量程中最小的电流数值。

2. 将电流计改装为伏特表

电流计满刻度时电压很小,不能用来测量较大的电压,为要测量较大的电压,可以在电流计上串联一个阻值适当的大电阻 R_m (如图 9-3)所示,使电流计不能承受的那部分电压降落在 R_m 上,这种由电流计和串联电阻 R_m 组成的整体(图中用虚线框住的部分),就是所改装的伏特表,串联电阻 R_m 叫扩程电阻。选取不同大小的 R_m 就可以得到不同量程的伏特表。

由图 9-3 可知,电流计满刻度时,加在伏特表 A, B 两端的总电压为 V , 降在电流计两端的电压为 $V_g = I_g R_g$. 因此降在扩程电阻 R_m 两端的电压为:

$$V_m = V - V_g \quad (9-10)$$

由欧姆定律知,通过扩程电阻 R_m 的电流 I_m 与通过电流计满刻度电流 I_g 相等,即

$$I_m = \frac{V_m}{R_m} = \frac{V - V_g}{R_m} = I_g \quad (9-11)$$

整理后得扩程电阻 R_m 为

$$R_m = \frac{V - V_g}{I_g} = \frac{V}{I_g} - R_g \quad (9-12)$$

式中总电压 V 即是改装电表的量程。

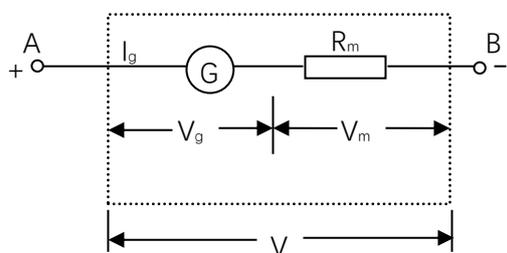


图 9-3

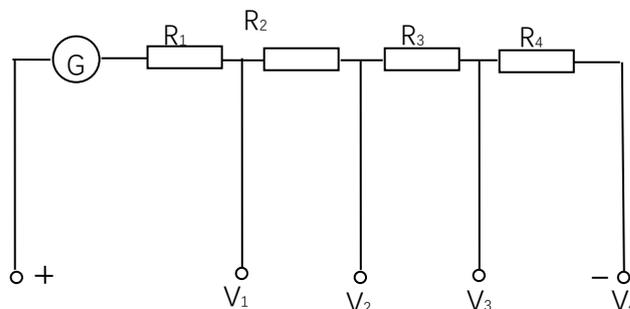


图 9-4

实际上多量程伏特表其扩程电阻的接线方式用得较多的是串联接法(如图 9-4 所示)。扩程电阻 R_m 是由若干个电阻按一定的阻值组成,一般低阻值(如 R_1)在前,依次高阻值(R_2, R_3, R_4),量程也由低到高(V_1, V_2, V_3, V_4),为此,在用(9-12)式计算各量程扩程电阻 R_m 时,从第二个阻值开始,还要减去在它之前的电阻值,才是该量程实际所应串联的扩程电阻数值。

3. 电表级别的确定和校准

校准时,待校准电表与标准电表读数之差 $\Delta V = V_x - V_0$ 就是待校电表的绝对误差,取

其中最大的绝对误差(亦称额定误差)除以量程,即为该电表的标称误差(亦称最大引用误差),故

$$\text{标称误差} = \frac{|\Delta V|_{\max}}{V_m} \times 100\%$$

根据标称误差的大小,电表分成不同的等级,一般有 0.5、1.0、1.5、2.5 等级。

例如,待校电表的 $|\Delta v|_{\max} = 0.02$ 伏,待校电表的量程 $V = 1.50$ 伏,则待校电表的标称误差为:

$$\frac{|\Delta V|_{\max}}{V_m} \times 100\% = \frac{0.02}{1.50} \times 100\% = 1.3\%$$

故该电表应为 1.5 级。可见,电表的标称误差和它的等级不一定完全相同。

反之,如果知道电表的级别(一般在电表面板上刻示),也可以求得电表的额定误差,其关系为:

$$\Delta V_{\max} = a\% \times V_m$$

式中 ΔV_{\max} 为电表的额定误差, a 为电表的级别, V_m 为电表的量程。

为了确定待校电表的读数和准确值的差异,可将待校电表和一个标准电表同时测量一定的电流(或电压),读出待校电表各个指示值 I_x 和标准电表对应的指示值 I_s ,得到该刻度的修正值 $\Delta I_x = I_s - I_x$ 。从而画出电表的校准曲线(以 I_x 为横坐标 ΔI_x 为纵坐标的曲线,两个校准点之间用直线连接,整个图形是折线状)。在以后使用这个电表时,根据校准曲线可以修正电表的读数,得到较为准确的结果。

[实验内容]

(一) 电流表的扩程与校准

将量程为 $100\mu\text{A}$ 的表头扩程至 10mA 。

(1) 由(9-4)式算出分流电阻的数值,表头的内阻由实验室给出。

(2) 按图 9-5 接线,分流电阻 R_s 用电阻箱充当, $R = 1000\Omega$ 是滑线变阻器, $E = 1.5\text{V}$ 是电源,接好之后自己检查,经教师复查后再接电源。

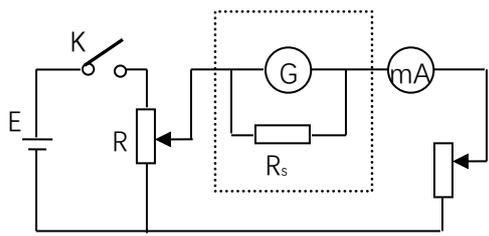


图 9-5

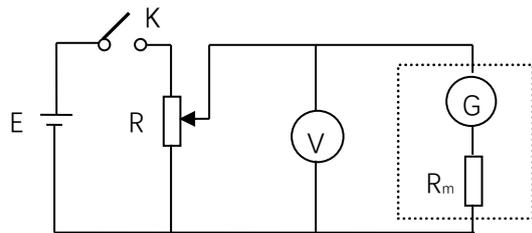


图 9-6

表 (1) 微安表参数

满度电流 $I_g(\mu A)$	扩程后量程 $I(mA)$	内阻 R $R_g(\Omega)$	分流电阻 $R_s(\Omega)$	
			计算值	实际值

(3) 调好待校表头的机械零点，合上电源，调节 R 及 R_s 使两表头同时满刻度。将各值记于表(1)。

(4) 调节 R 校准刻度，使电流从小到大校准六个刻度值，然后电流从大到小重复一遍 {参考表(2)所列数值进行校准}。

表 (2) 电流表校准数据

被校准读数 I_x	(mA)	0.0	2.0	4.0	6.0	8.0	10.0
上升时标准表读数 I_{S1}	(mA)						
(mA)							
下降时标准表读数 I_{S2}	(mA)						
$I_S = (I_{S1} + I_{S2})/2$	(mA)						
$\Delta I_x = I_S - I_x$	(mA)						

(二) 电压表的扩程与校准

将量程为 $100\mu A$ 的表头改装为 1.5V 的伏特表

(1) 由(9-12)式算扩程电阻 R_m 。

(2) 按图 9-6 接好线，步骤跟校准毫安表一样，先调准零点，取 $E=2V$ 再校准量程和六个刻度值 {测量数据记录于表(3), (4)}。

表(3)微安表头参数

满度电流 $I_g (\mu A)$	扩程后量程 V (V)	内阻 R_g (Ω)	扩程电阻 $R_m (\Omega)$	
			计算值	实际值

表(4)电压表校准数据

被校准读数 V_x (V)	0.00	0.30	0.60	0.90	1.20	1.50
上升时标准表读数 V_{S1} (V)						
下降时标准表读数 V_{S2} (V)						
$V_S = (V_{S1} + V_{S2}) / 2$ (V)						
$\Delta V_x = V_S - V_x$ (V)						

(三) 测量电阻的伏安特性

用已经改装过的电流表和电压表测定线性电阻的伏安特性并求阻值

(1) 如图 9-7, 用已经改装过的电流表和电压表测量未知电阻的电流和电压。

(2) 按图连接线路, 经检查无误后, 接通电源(电源电压约为 3 伏), 调节可变电阻 R 的阻值并分别把待测电阻 R_x 上的电流和电压记录在表(5)中。

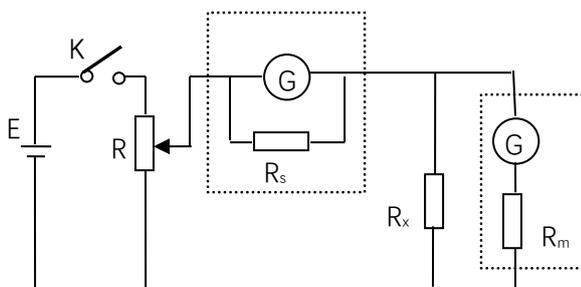


图 9-7 测定电阻的伏安特性

表(5)测量结果

测量次数	1	2	3	4	5	6	7	8
电压 V(V)								
电流 I (mA)								

[数据处理]

- (1) 把表(1) — (5) 整理完成在实验报告中, 确定已改装后的毫安表, 伏特表的级别, 完成下表。

毫安表, 伏特表的级别

	量程	准确度等级	内阻
电流表			
电压表			

- (2) 作 $\Delta I_x - I_x$ 图及 $\Delta V_x - V_x$ 图。
(3) 利用校准曲线, 对表(5)数据进行修正, 修正值列于表(6), 由修正数据作出电阻 R_x 伏安特性曲线并求阻值。

表(6) 电阻的伏安特性

测量次数	1	2	3	4	5	6	7	8
电压 V(V)								
电流 I (mA)								

[思考题]

- (1) 校准毫安表时, 如果发现改装表的读数比校准表的读数都偏高, 此时分流电阻 R_s 应增大还是减少? 为什么?
(2) 校准伏特表时, 如果发现改装表的读数比校准表的读数都偏低, 此时扩程电阻 R_m 应增大还是减少? 为什么?

实验十 用电位差计测量电动势

[实验目的]

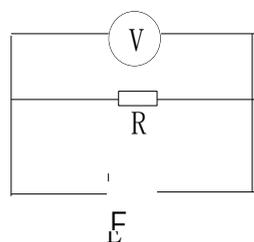
1. 了解电位差计的工作原理和结构特点;
2. 掌握电位差计的使用方法.

[仪器用具]

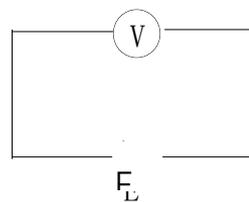
电位差计、标准电池、电阻箱、直流稳压电源、检流计、待测电池、分压箱等.

[实验原理]

平时,我们常用电压表测量电阻两端的电压或电池的电动势,如图10-1(a)所示.稍加分析就可以发现这种测量结果是不正确的.因为,由于电压表内阻的分流作用,使图10-1(a)测得的电压比 R 两端的实际电压小.而图10-1(b)中将电压表并联到电池两端,就有电流 I 通过电池的內部. 电池有内阻 r ,在电池内部不可避免地存在电位降落 Ir ,因而电压表的指示值只是电池端电压 $V = E_x - Ir$ 的大小.显然,只有当 $I=0$ 时,电池两端的电压 V 才等于电动势 E_x .



(a) 电压表的分流作用



(b) 电压表指示端电压

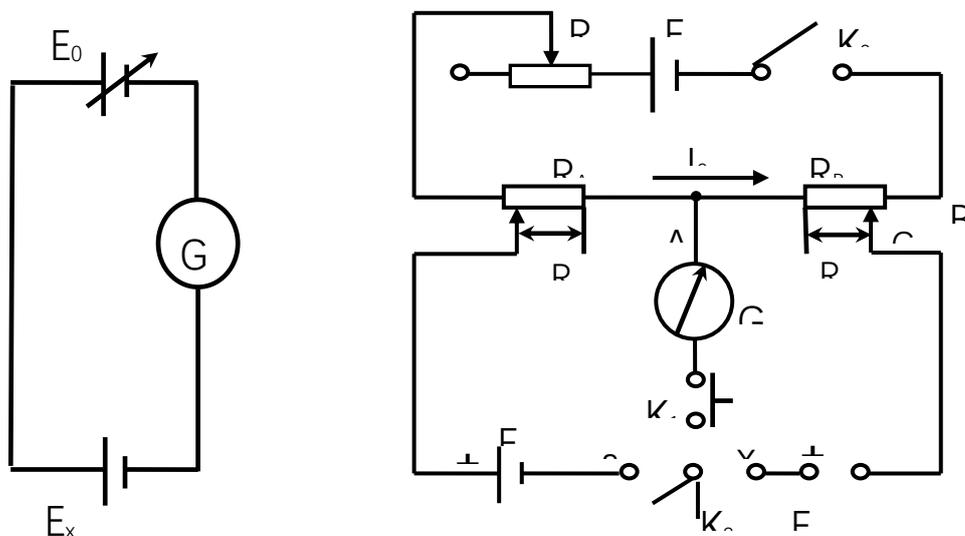
图10-1 用电压表测电压

怎样才能使电池内部没有电流通过而又能测定电池的电动势 E_x 呢?这就需要采取补偿法.

1. 电位差计的电路原理

欲精确地测量未知电动势 E_x ,原则上可按图10-2(a)电路,其中 E_0 是可调电压的电源,调节 E_0 使检流计指零,这就表示在该回路中两个电源(E_0 和 E_x)的电动势必然大小相等,

方向相反, 在数值上有 $E_x = E_0$ 。这时, 我们称电路达到补偿. 在补偿条件下, 如果 E_0 的数值已知, 则 E_x 即可求出. 据此原理构成的测量电动势或电位差的仪器称为电位差计. 可见, 构成电位差计需要有一个 E_0 , 而且它要满足两项要求. (1) 它的大小便于调节, 使 E_0 能够 and E_x 补偿. (2) 它的电压很稳定, 并能够准确读出. 实际的电位差计原理图, 如图10-2(b)所示, 它由两个回路构成: 由电源 E 、制流电阻 R_n 和精密电阻 R_A 、 R_B 构成辅助电路;



(a) 补偿电路

(b) 电位差计原理图

图10-2 补偿法测量电动势

$E_x K_2 K_1 G A R_x E_x$ (或 $E_S R_S A G K_1 K_2 E_S$) 组成补偿回路. 在辅助回路中, 调节 R_n 使回路中有一定的标准电流 I_0 流过 R_A 、 R_B (称工作电流标准化), 在 R_A 、 R_B 上产生均匀的电位降, 并以 I_0 为标准, 把电阻的数值转换成电压值标在刻度盘上. 改变滑动头C的位置, 就能改变A、C间的电位差 U_{AC} 的大小, U_{AC} 相当于上面所要求的 “ E_0 ”. 测量时, 将 U_{AC} 与未知电动势 E_x 进行比较, 当检流计指零时 (称电位差计平衡), $E_x = U_{AC}$.

2. 电位差计使用方法

(1) 工作电流标准化: 为了使 U_{AC} 中流过的电流是标准电流 I_0 , 可借助于标准电池 E_S 进行校准. 在图10-2 (b) 中将 K_2 合向 E_S 一边, 调节 R_n , 改变辅助回路中的电流, 若当检流计指

零时， R_S 上的电位差恰与 E_S 相等。由于 E_S 和 R_S 都是准确值，这时辅助回路中的电流就能精确地校准到所需的 I_0 值。

(2)测量：把 K_2 合向 E_x 一边，只要 $E_x \leq I_0 R_B$ ，总可以调节滑动头C，使检流计再度指零，这时必定有：

$$E_x = I_0 R_{AC} = U_{AC} \quad .$$

因为 I_0 已被校准， E_x 就能由标定的 U_{AC} 直接读出。同理，如果要测量任一电路两点间的电位差，只要将待测两点接入补偿回路代替 E_x ，即可测出。

[实验内容]

1. 测量干电池的电动势

(1)记录室温，按附录1中饱和式标准电池的温度修正公式，算出室温下的 E_t ，将电位差计上相应的温度补偿旋钮 R_S 拨到 E_t 值。

(2)按图10-3接线，注意电池正负极的联接，选取适当的分压比。因为干电池的电动势大约1.5V，超出UJ31型电位差计的测量范围171mV，不能直接测量。因此，必须用分压箱(UJ31型电位差计使用说明请阅附录2)。

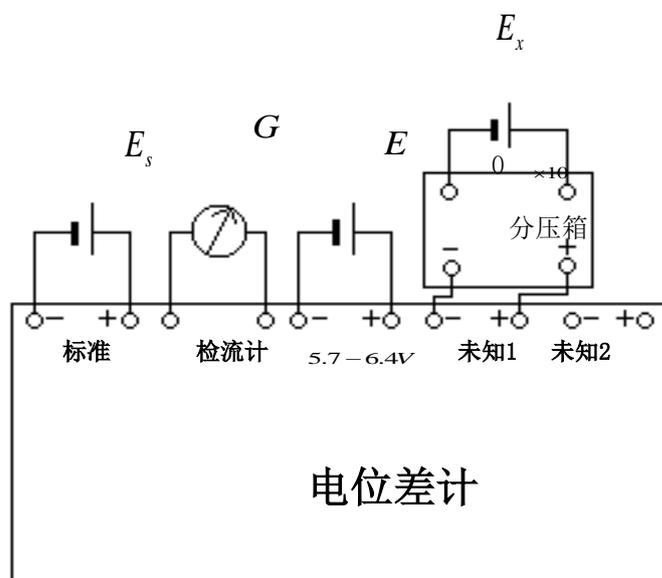


图 10-3 电位差计接线图

(3)测量前先调整检流计光标正对“零位”，将 R_0 旋至“x10”处， K_2 指在“标准”。

(4)标准工作电流：调节 R_n 的“粗”、“中”、“细”三个旋钮，按下 K_1 的“粗”按钮，当发现检流计光标发生偏转时，松开 K_1 的粗按钮；重新调节 R_n ，再接通 K_1 粗按钮，反复多次调节 R_n ，再接通 K_1 粗按钮，直到检流计光标指示为零后，再按“细”按钮，并仔细调节 R_n 的“中”、“细”两个旋钮，使检流计指示为零。在测量过程中，为了保证电位差计的工作电流不变，要经常进行这一校准步骤，检查标准电流有无变化，若有变化，应作校准，在本实验中，要求每测一个数据，作一次校准。

(5)测量未知电动势：不再调节 R_n ，将 K_2 旋至“未知”处，仍然先按下“粗”按钮，调节测量盘 I、II、III，使检流计指示为零，再按下“细”按钮，微调测量盘III，使检流计指零，从转盘I、II、III上读出未知电动势之值 E_x 。

(6)重复测量 E_x 三次，取其平均值作为测量结果。

2. 测量电位差计的调节灵敏度

(1)由于检流计灵敏度的限制，当检流计不偏转时，并不能说明补偿回路电流绝对等于零，因此与电桥一样，电位差计也有一个灵敏度的问题。测量电位差计的调节灵敏度方法是：当电位差计达到平衡时，改变一个微小的 ΔE_x ，使检流计偏转 Δn 格，定义 $\frac{\Delta n}{\Delta E_x}$ 为电位差计的调节灵敏度。(对应人眼刚能观察到的偏转 $\Delta n = 0.1$ 的 ΔE_x 就是电位差计所能判断的 ΔE_x 的极限。由此可估计出对测量结果带来误差的大小)。

(2)实验时，可利用图10-3，先用电位差计测电池的电动势 E_x ，然后按下“细”按钮，并调节III读数盘，给 E_x 一个增量 ΔE_{x1} ，使检流计光标在零点左边偏转5格，记下相应的 ΔE_{x1} ，求出 $\frac{\Delta n}{\Delta E_{x1}}$ （其中 $\Delta n = 5.0div$ ）；再次让检流计光标回到零点，并右偏5格，记录相对零

点的增量 ΔE_{x2} ，求出 $\frac{\Delta n}{\Delta E_{x2}}$ ，则电位差计的调节灵敏度为： $\left(\frac{\Delta n}{\Delta E_{x1}} + \frac{\Delta n}{\Delta E_{x2}}\right) / 2$ 。

3. 测量电池的内阻

测量线路如图10-4，在被测电池两端并联一只可变电阻箱，取值 $R=100\Omega$ ，设电池内阻为 r ，开关合上后，a、b间的电压为

$$U = E_x - Ir = IR,$$

所以

$$r = \frac{E_x - U}{U} R.$$

式中 E_x 和 U 均可用电位差计三次测出，然后求平均值得出。具体测量步骤请自拟。

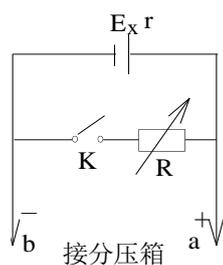


图10-4

[思考题]

1. 用UJ31型电位差计测量3V左右的干电池电动势？是否需要采用分压箱？为什么？分压比为多少合适
2. 测量结果时，测量盘上所示值是否可以表示被测电池的实际值，请加以说明（忽略误差）。

附录 1 标准电池

标准电池是测量电位差计的标准量具，它的电动势稳定，内阻高，并且它的内阻在相当大的程度上不随时间而变化。

标准电池是一种汞镉电池，常用的有H形封闭玻璃管式和单管式两种。前者只能直立放置，切忌翻荡，其结构如图1-1所示电池密封在H形的玻璃管内，标准电池中的电解

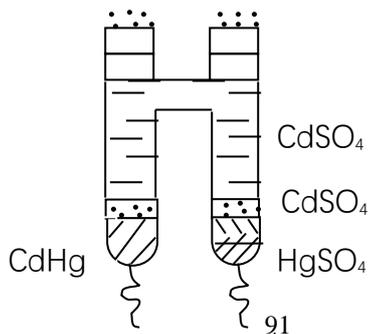


图1-1

液为硫酸镉溶液，正电极由汞和硫酸亚汞制成，负极由镉汞齐合金制成。用铂丝和两极接触作引出线。按电解液的浓度分为饱和式和不饱和式两种。饱和式的电动势最稳定，但随温度变化比较显著，其温度修正公式为

$$E_t = E_{20} - 4 \times 10^{-5}(t - 20) - 10^{-6}(t - 20)^2 V.$$

式中 E_{20} 是温度在 $20^{\circ}C$ 时的电动势值，不同型号的标准电池 E_{20} 各有不同，对于BC型饱和式标准电池有

$$E_{20} = 1.01855V.$$

使用标准电池，必须注意以下几点：

- (1) 标准电池绝不能当作电源来使用，在使用过程中最大瞬时电流不得超过 $1\mu A$ 。
- (2) 不能使标准电池短路，严禁用伏特表或万用表直接测量其两端的电压值。
- (3) 不能震动摇动，倒置或倾侧。

附录2 UJ31型直流电位差计

箱式电位差计的类型很多，现以UJ31型为例加以说明，这是一种测量低电势的电位差计。它的测量范围是：1微伏至17.1毫伏(R_0 旋至 $\times 1$)或10微伏至171毫伏(R_0 旋至 $\times 10$)，使用5.7伏-6.4伏的外接工作电源，总工作电流为10毫安，测量的准确度为 $\pm 0.05\%$ 。现将面板图2-1和工作原理图2-2的相应部分对照列表说明如下：

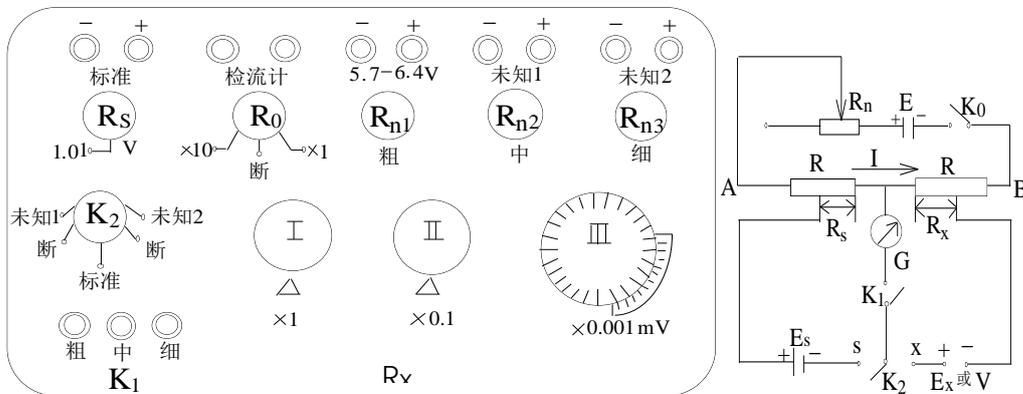


图2-1

图2-2

面板上方一排接线柱分别为外接标准电池、检流计、工作电源和两个未知电动势。左下方的短路按钮能使检流计两端连通。按下“短路”钮，摆动的检流计指针迅速停下来。

电位差计使用完毕，必须将开关“ R_0 ”旋至“断”位置，并把各个电键、按钮和开关恢复到初始位置。

原理图	UJ31型电位差计面板图
R_n	R_n 分成 R_{n1} (粗)， R_{n2} (中)和 R_{n3} (细)三个电阻旋钮，以保证迅速准确地调节工作电流。
R_s	标有 R_s 的旋钮，是为补偿温度不同时标准电池电动势的变化而设置的。当温度不同，标准电池电动势有所变化，通过调节 R_s 进而调节 R_s 两端的电压，使标准电池得到补偿。
R_x	R_x 被分成I(x1)、II(x0.1)、III(x0.001)三个电阻转盘，并在转盘上标出电压，电位差计处于补偿状态时，可以从三个转盘读出未知电动势。
K_1	标有 K_1 的按钮有二个，分别标记为“粗”和“细”。按下“粗”，保护电阻与检流计串联；按下“细”保护电阻被短路。操作时应先按“粗”，在检流计几乎不偏转时再按“细”。
K_2	标有 K_2 的旋钮的使用方法：校准电位差计时，应旋至“标准”，测定未知电动势时，旋至“未知1”或“未知2”。
R_0	有 R_0 的旋钮有“x1”和“x10”两档，测量范围为0—17.1mV时，应旋至“x1”；测量范围为0—171mV时，应旋至“x10”。

实验十一 用示波器法测绘铁磁材料的 磁化曲线和磁滞回线

[实验目的]

1. 了解用示波器法显示磁滞回线的基本原理；
2. 学习用示波器法测绘磁化曲线和磁滞回线。

[仪器用具]

示波器、信号发生器、磁环、电阻、电容等。

[实验原理]

1. 基本磁化曲线和磁滞回线

铁磁材料（如铁、镍、铝和其他铁磁合金）具有独特的磁化性质。取一块未磁化的铁磁材料，譬如以外面密绕线圈的钢圆环样品为例。如果流过线圈的磁化电流从零逐渐增大。则钢圆环中的磁感应强度 B 随励磁场强度 H 的变化如图 11-1 所示。这条曲线称为起始磁化曲线。继续增大磁化电流，即增加磁场强度 H 时， B 上升很慢，如图中的 a 点。如果 H 逐渐下降，则沿另一条曲线 ab 下降。

B 随 H 变化的全过程如下：

当 H 按 $0 \rightarrow H_c \rightarrow H_m \rightarrow 0 \rightarrow -H_c \rightarrow -H_m \rightarrow 0 \rightarrow H_c \rightarrow H_m$ 的顺序变化时， B 相应沿： $0 \rightarrow B_m \rightarrow B_r \rightarrow 0 \rightarrow -B_m \rightarrow -B_r \rightarrow 0 \rightarrow B_m$ 的顺序变化，将上述变化过程的各点连接起来，就得到一条封闭曲线 $abcdefa$ ，这条曲线称为磁滞回线。

从图中可以看出：

- 1) 在 b 点 $H=0$ 时， B 不为零，铁磁材料还保留一定值的磁感应强度 B_r ，通常称 B_r 为铁磁材料的剩磁。
- 2) 要消除 B_r ，使 B 降为零，必须加一个反方向磁场 H_c ，这个反向磁场强度 H_c 叫做该铁磁材料的矫顽磁力。
- 3) H 上升到某一个值和下降到同一数值时，

铁磁材料内的 B 值并不相同，即磁化过程与铁磁材料过去的磁化经历有关。

对于同一铁磁材料，若开始时不带磁性，依次选取磁化电流 I_1, I_2, \dots, I_m ($I_1 < I_2 < \dots < I_m$)，则相应的磁场强度为 H_1, H_2, \dots, H_m 。在每一个选定的磁场值下，使其方向发生两次变化 ($H_1 \rightarrow -H_1 \rightarrow H_1, \dots, H_m \rightarrow -H_m \rightarrow H_m$ 等)，则可等到一组逐渐增大的磁滞回线 (图 11-2)，我们把原点 O 和各个磁滞回线的顶点 a_1, a_2, \dots, a 所连成的曲线，称为铁磁材料的磁化曲线，可以看出，铁磁材料的 B 和 H 不是直线，即铁磁材料的磁化率 $\mu = \frac{B}{H}$ 不是常数。

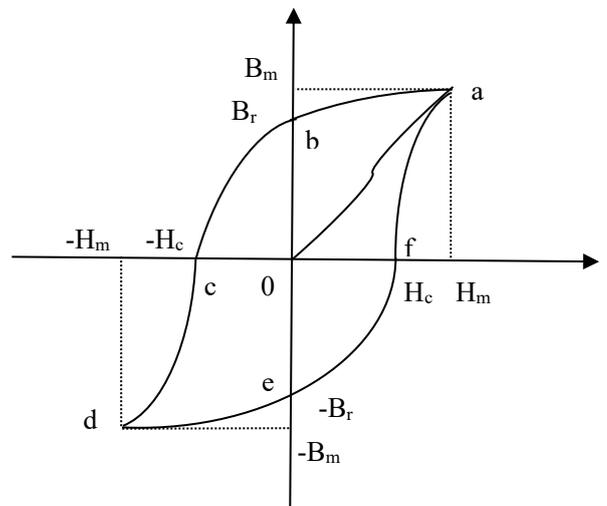


图 11-1

由于铁磁材料的磁化过程的不可逆及具有剩磁的特点，在测定磁化曲线和磁滞回线时，首先必须将铁磁材料预先退磁，以保证外加磁场 $H=0$ 时， $B=0$ 。其次，磁化电流在实验过程中只允许单调增加或减少，不可时增时减。

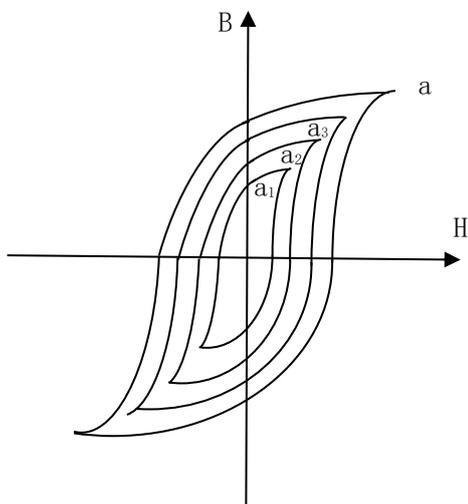


图 11-2 基本磁化曲线

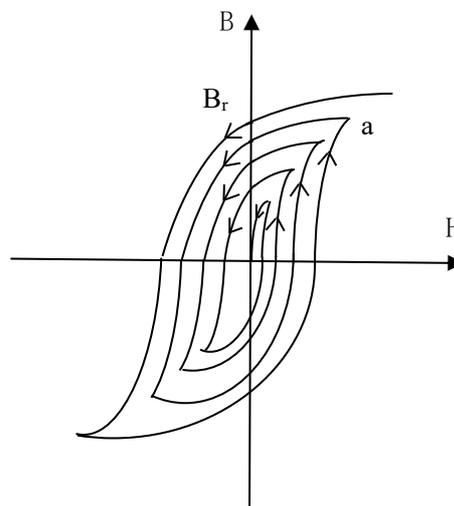


图 11-3 退磁过程：经一系列不同闭合的回线收缩至原点 0

在理论上，要消除剩磁 B_r ，只需通一反方向磁化电流，使外加磁场正好等于铁磁材料的矫顽磁力就行。实际上，矫顽磁力的大小通常并不知道，因而无法确定退磁电流的大小。我们从磁滞回线得到启示，如果使铁磁材料磁化达到饱和，然后不断改变磁化电流的方向，与此同时逐渐减小磁化电流，以至于零。那么该材料的磁化过程就是一连串逐渐缩小而最终趋于原点的环形曲线，如图 11-3 所示。当 H 减小到零时， B 亦同时降为零，达到完全退磁。

2. 示波器显示磁滞回线的原理和线路

铁磁材料的磁化曲线和磁滞回线可以用冲击法测绘。本实验中我们用示波器来显示，怎样才能使示波器显示出磁滞回线（即 $B-H$ 曲线）呢？显然，我们希望在示波器 X 偏转板上输入正比于样品励磁磁场强度 H 的电压，同时又在 Y 偏转板上输入正比于样品磁感应强度 B 的电压，结果在屏上得到样品的 $B-H$ 曲线。

图 11-4 是实验的电路。如果电阻 R_1 （要求 R_1 比线圈 N_1 的阻抗小得多，通常取 1~几欧姆）上的电压降 $U_x=I_1R_1$ (I_1 和 U_x 是交变的) 加在示波器 X 偏转板上，则电子束在水平方向的偏移跟磁化电流 I 成正比。根据安培环路定律

$$HL=NI, \quad \text{有} \quad I_1 = \frac{HL}{N_1}.$$

L 为圆环平均周长， N 为原线圈的匝数。所以

$$U_x = \frac{LR_1}{N_1} H \quad (11-1)$$

表示在交变磁场下，在任一瞬时如果将电压 U_x 接到示波器 X 输入端，则电子束的水平偏转

正比于励磁场强度 H 。

为了获得跟样品中磁感应强度瞬时值 B 成正比的电压 U_y ，我们采用电阻 R_2 和电容 C 组成的积分电路，并将电容 C 两端的电压 U_c 接到示波器 Y 输入端。因交变的磁场 H 在样品中产生交变的磁感应强度 B ，结果在副线圈内出现感应电动势，其大小

$$\varepsilon_2 = \frac{d\phi}{dt} = N_2 A \frac{dB}{dt} \quad (11-2)$$

式中 N_2 为副线圈匝数， A 为钢圆环的截面积。

$$B = \frac{1}{N_2 A} \int \varepsilon_2 dt$$

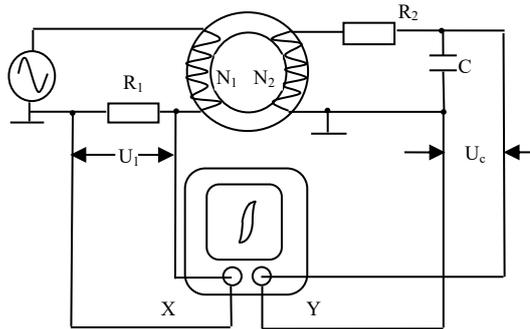


图 11-3

由于 ε 的积分不是一个电学量，而 i 对时间的积分是一个电学量，所以，先把 ε 转化为 i ，在次级线圈中串入电阻 R_2 ， R_2 的数值远大于线圈的感抗及电容的容抗，于是 $I_2 \approx \frac{\varepsilon}{R_2}$ ，根据

$$U_c = \frac{q}{C} = \frac{1}{C} \int I_2 dt,$$

得

$$U_c = \frac{1}{R_2 C} \int \varepsilon_2 dt = \frac{N_2 A}{C R_2} B \quad (11-3)$$

上式表明，接在示波器 Y 轴的输入端的电容 C 上的电压确实正比于 B 。这样，在磁化电流变化的一个周期内，电子束的径迹描写一条完整的磁滞回线，以后每个周期都重复此过程，结果在荧光屏上看到一条连续的磁滞回线。

我们还可以逐渐增大输出电压，使屏上磁滞回线由小到大扩展，把逐次在坐标纸上记录的磁滞回线顶点联成一条曲线，这条曲线就是样品的基本磁化曲线。

值得注意的是，电容 C 的数值选择要适当，为了使 $I_2 = \frac{\varepsilon_2}{R_2}$ 式成立，($\varepsilon_2 = U_c + I_2 R_2$) 电容

的容抗 $\frac{1}{2\pi f C}$ 必须远小于 R_2 ，这就要求 R_2 的数值很大或 C 值很大，但不论 R_2 值或 C 值增大，都会导致 U_c 的减小， U_c 值过小，显示也就困难，所以 C 值得大小必须适当，一般取 $R_2 C \approx \frac{100}{2\pi f C}$ 。

3. 测定磁滞回线上任一点的 B、H 值

为了得到磁滞回线上所求的 B、H 值。需测出该点的坐标 x、y（厘米），以及示波器在该增益下的 X 轴和 Y 轴的偏转因数（即电子束偏转一厘米所需外加的电压） D_x 和 D_y ，然后按式（11-1）和（11-3）算出：

$$H = \frac{N_1 D_x}{L R_1} X \quad B = \frac{R_2 C D_y}{N_2 A} y \quad (11-4)$$

式中各量单位：若 R_1, R_2 为欧姆，L 为米、A 为米²、C 为法拉、 D_x, D_y 为伏/厘米、x、y 为厘米、则 H 为安/米、B 为特。

D_x 的测定时采用图 11-4，信号源输出经三位半数字电流表的 com 端接采样电阻 R_1 的右端即示波器的 X 输入端，屏幕上显示一水平直线。数字电表开关选择 mA 档，调节输出幅度调节旋钮，使屏幕上显示的格数 X 分别为 2（-1，+1）cm，4（-2，+2）cm，6（-3，+3）cm，8（-4，+4）cm，10（-5，+5）cm，读取对应数字电流表的 5 组读数 I_x ，用直线拟合出 $D_x = \frac{2\sqrt{2}I_x}{X} R_1$ 。

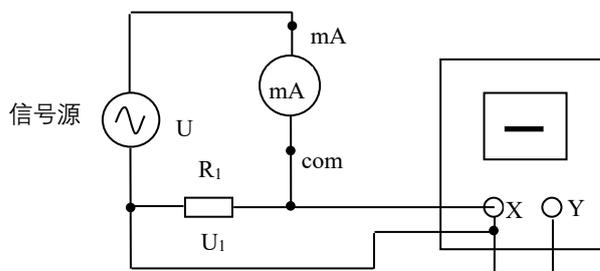


图 11-4

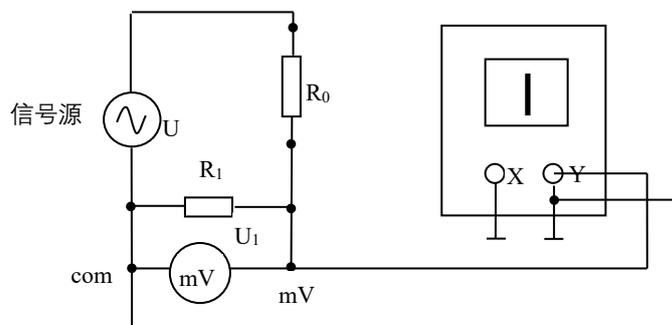


图 11-5

D_y 的测定，按图 11-5 接线，信号源输出经分压电阻 R_0 ($R_0=470\Omega$) 接采样电阻 R_1 的右端，数字电表拨向电压 mV 档，调节输出幅度调节旋钮，使屏幕上显示一垂直直线的格数 Y 分别为 2（-1，+1）cm，4（-2，+2）cm，6（-3，+3）cm，8（-4，+4）cm，10（-5，

+5）cm，读取对应数字电压表的 5 组读数 U_y ，用直线拟合出 $D_y = \frac{2\sqrt{2}U_y}{y}$ 。

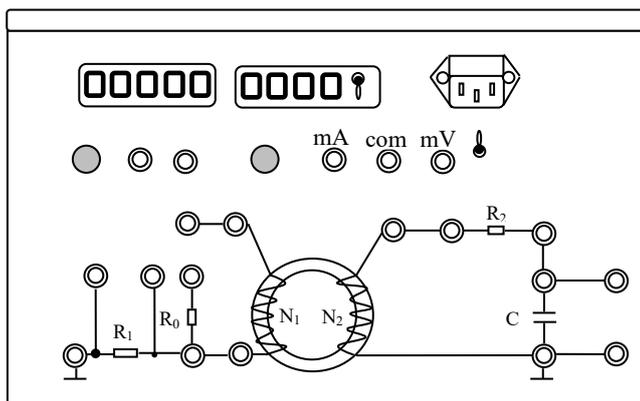


图 11-6

[实验内容]

测绘铁磁材料的基本磁化曲线和磁滞回线

1. 动态磁滞回线实验仪面板如图 11-6，按线路图 11-3 连接电路，其中 $R_1=10\Omega$ 、 $R_2=100K\Omega$ 、 $C=1.0\mu F$ 、 $L=0.141m$ 、 $A=9.1\times 10^{-5}m^2$ 、 $N_1=86$ 、 $N_2=86$ 。调节示波器的有关旋钮，使光点呈现在坐标网络中心。

2. 把低频信号发生器调到输出频率为 50Hz，输出电压为 0 位置，接通电源，逐渐升高信号发生器输出电压，屏上将出现磁滞回线的图像，待磁滞回线接近饱和后，调节示波器垂直增益和水平增益（包括配合微调旋钮），使图线显示大小接近 $(-5, +5)cm$ ，逐渐减少输出电压至零，目的是对被测样品退磁。此时，示波器屏上显示为一点，调节示波器相关位移旋钮，使该点位于示波器屏上的中心。

3. 保持水平和垂直增益不变，从零开始，分为 8 次，逐渐增加电压，使磁滞回线由小变大。分别读记输出电压的大小及相应每条磁滞回线顶点的坐标，描在坐标纸上，将所描各点联成曲线，就得到基本磁化曲线。

4. 在方格纸上按 1:1 的比例描绘屏上显示的一条磁滞回线，记下有代表性的某些点的坐标 x 、 y 。

5. 测定示波器的偏转因数 D_x 、 D_y ，按式 (11-4) 算出跟 x 、 y 点对应的 H 、 B 值，并标在描绘的磁滞回线的坐标轴上。

[数据处理]

1. 直线拟合出 D_x 、 D_y 。

2. 根据拟合的 D_x 、 D_y ，标记内容 (3) 中不同输出电压对应的磁滞回线顶点 H_m 和 B_m 的大小。

3. 算出内容 (4) 中坐标纸上磁滞回线各点 B_r 、 B_m 、 H_c 、 H_m 的大小，并标记在坐标纸上。

[思考题]

如何用冲击法测绘磁滞回线？

实验十二 交流电路的谐振现象

[实验目的]

1. 研究交流电路的谐振现象；
2. 了解电路品质因数对选择性和通频带的影响；
3. 学习常用电子仪器的使用方法。

[实验用具]

标准电感、电容箱、电阻箱、低频信号发生器、真空管毫伏表等。

[实验原理]

在无线电技术中广泛地利用谐振电路来选频，例如各广播电台以不同频率的电磁波向空间发射自己的信号，调节收音机中谐振电路的可变电容，可将不同频率的各个电台分别接收。

1. RLC 串联电路的谐振

R, L, C 串联电路如图 12-1 所示. 其中交流电压 U 与交流电流 I (均为有效值) 的关系为:

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}} \quad (12-1)$$

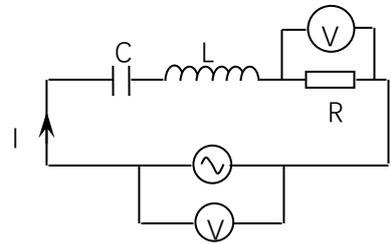


图 12-1

其中 Z 称为交流电路的阻抗。

电压与电流的相位差为:

$$\varphi = \arctg \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R} \quad (12-2)$$

由(12-1)、(12-2)式可见 Z 和 φ 都是圆频率 ω 的函数。当 $\omega L - \frac{1}{\omega C} = 0$ 时 $\varphi = 0$, 即电

压和电流间的相位差为零, 此时的圆频率称为谐振圆频率 ω_0 。

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (12-3)$$

本实验中我们从(12-1)式出发,研究当电压 U 保持不变时,电流 I 随 ω 的变化情况。当 $\omega = \omega_0$ 时, Z 有一极小值, I 有一极大值,作 $I-f$ 图,就可得到有一尖峰的谐振曲线(图 12-2)。

常用 Q 值标志谐振电路的性能,称为电路的品质因素,定义为谐振时电感的电压 U_L 和总电压 U 数值之比

$$Q = \frac{U_L}{U} = \frac{U_C}{U} = \frac{1}{\omega_0 CR} = \frac{\omega_0 L}{R} \quad (12-4)$$

可见谐振时,电容或电感上的电压 U_C 或 U_L 是电源电压的 Q 倍。因为 Q 往往是 $\gg 1$ 的,所以 U_C 和 U_L 可以比 U 大得多,故串联谐振常称为电压谐振。

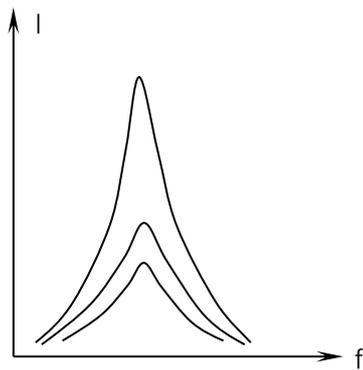


图 12-2

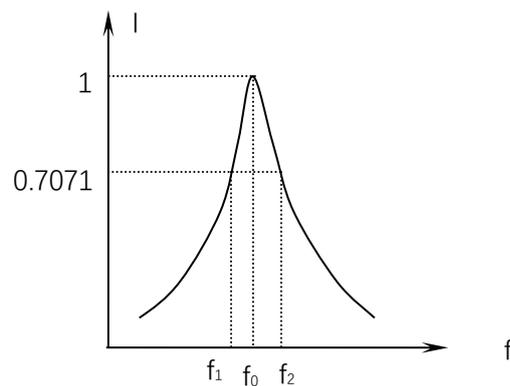


图 12-3

Q 值还标志着电路的频率选择性,即谐振的尖锐程度。通过规定 I 值为最大值 I_{\max} 的 $\frac{1}{\sqrt{2}}$ ($\approx 70\%$) 的两点 f_1 和 f_2 频率之差为“通频带宽度”(图 12-3)。根据这个定义,由式

(12-1) 出发可推出:

$$\Delta f = f_2 - f_1 = \frac{f_0}{Q} \quad (12-5)$$

可见 Q 越大带宽就越小,谐振曲线也就越尖锐。

2. RLC 并联谐振

如图 12-4 所示的电路, 其总电阻抗和相位差为

$$Z = \frac{R^2 + (\omega L)^2}{\sqrt{R^2 + [\omega CR^2 + \omega L(\omega^2 LC - 1)]^2}} \quad (12-6)$$

6)

$$\varphi = \arctg\left[\frac{\omega L - \omega CR^2 - \omega^3 L^2 C}{R}\right] \quad (12-7)$$

7)

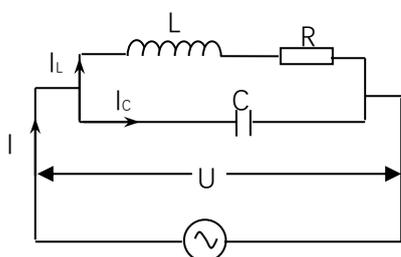


图 12-4

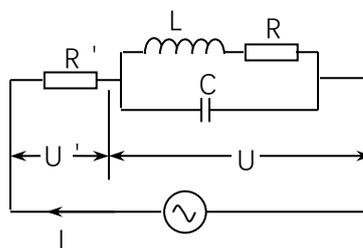


图 12-5

谐振时 $\varphi = 0$ 可由 (12-7) 式求出并联电路的谐振因数 ω_p 为

$$\omega_p = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{L}\right)^2} = \omega_0 \sqrt{1 - \frac{1}{Q^2}} \quad (12-8)$$

ω_0 为 RLC 串联时的谐振圆频率。当 $Q \gg 1$ 时, $\omega_p \approx \omega_0$, 由 (12-6) 式可知并联谐振时 Z' 近似为极大值, 若电压 U 保持不变, 则 I 为极小, 这和串联谐振电路的情况正好相反。和串联谐振电路一样, Q 越大, 电路的选择性越好。在谐振时, 两分支电路的电流几乎相等, 且近似为总电流 I 的 Q 倍, 因而并联谐振也称为“电流谐振”。

[实验内容]

1. 测定串联电路的谐振曲线

线路如图 12-1, 交流电源由低频信号发生器供给, 其频率由低频信号发生器得知。

(注意信号发生器所给的是频率 f , 它和圆频率 ω 之间的关系为 $f = \omega / 2\pi$)。

(1) 选择 $L = 0.1\text{H}$ 、 $C = 0.03\ \mu\text{F}$ 、 $R = 100\ \Omega$ 、信号发生器输出电压取 1V , 用毫伏表量

出 R 上的电压值即可算出 I 值。

(2) 频率从 2000Hz 开始, 每隔 100Hz 测一次电压值, 一直测到 3800Hz。在谐振频率

$$f_0$$

附近多测几个点。注意每次改变频率时都要重新调整信号发生器的输出电压, 使它保持为 1V。

(3) 当谐振时, 测量 L 和 C 的电压值。

(4) 改变 R 值, 使 $R=500\Omega$, 再测得另一曲线。

2. 测定并联电路的谐振曲线

电路见图 12-5, 为了使电路中保持恒定, 我们在电路中加入 R' , 使 R' 上的电压 U' 不随频率改变, 则 $I=\frac{U'}{R'}$ =常数, 而并联电路的阻抗是与频率有关的, 其大小为

$Z_p = \frac{U}{I}$, 故只要测出 U 的大小即可算出 Z_p , 因 I 为常数, 所以 Z_p 和 U 成正比, 当谐振时

Z_p 为极大, U 也为极大。

(1) L 、 C 仍用串联电路中所用的数值, R_L 是电感本身的电阻, R 取 500Ω 。调节信号发生器输入电压使 U' 维持为 0.4V。测出此时 U 的数据。

(2) 频率从 2000Hz 开始每隔 100Hz 测一个点, 直至 3800Hz, 在谐振峰附近多测几个点, 注意每次改变频率时都要重新调整信号发生器的输出电压 U 使维持 0.4V。

[数据处理]

(1) 整理实验数据并拟表格示出。

(2) 作串联谐振的两条 $I-f$ 曲线和并联谐振的 $U-f$ 曲线, 三条曲线作在同一坐标纸上进行比较。

(3) 将计算出的谐振频率和由实验曲线定出的谐振频率进行比较。

(4) 对串联谐振电路用 $Q = \frac{\omega_0 L}{R}$ 计算出的 Q 值和用 $Q = \frac{U_L}{U} = \frac{U_C}{U}$ 测出的 Q 值及

从谐振曲线上用 $Q = \frac{f_0}{f_2 - f_1}$ 计算出的三个 Q 值进行比较。

[思考题]

(1) 实验中如何判断电路达到了谐振?

(2) 为什么串联谐振称为电压谐振? 为什么并联谐振称为电流谐振?

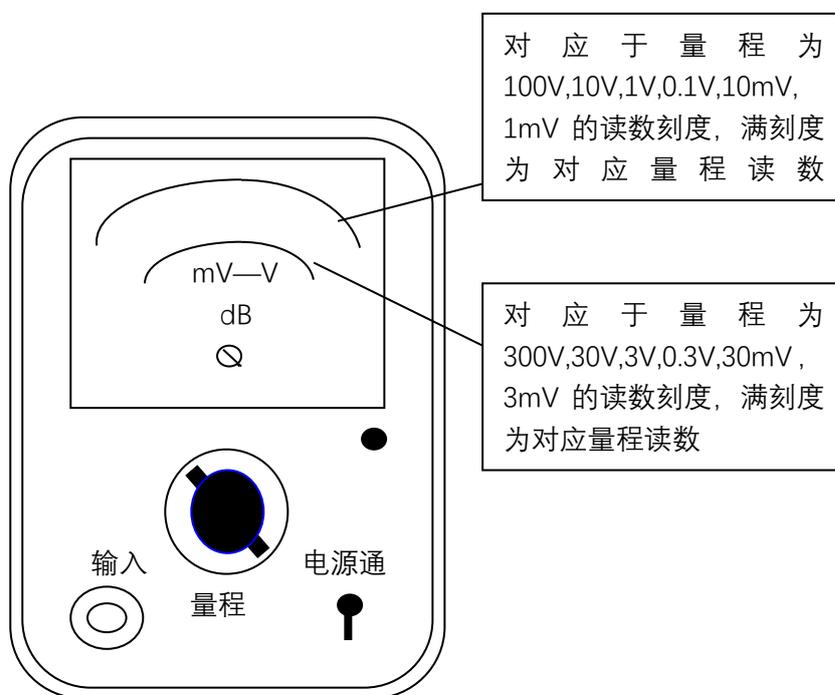
(3) 求 Q 值时选取的两个频率 f_1 、 f_2 是否对称于 f_0 ? 在什么条件下接近于对称?

(4) 解释现象:

做串联和并联谐振时, 为了保持输出电压为 1V 和 0.4V, 每次改变频率后总要调整信号发生器的输出电压, 而且越接近谐振频率, 电压输出旋钮越是往大的方向旋钮。

附录 1 毫伏表

毫伏表是一种测量正弦电压有效值的仪表, 它具有高灵敏度, 高输入阻抗及高稳定性, 测量频率范围宽, 测量电压范围广等优点, 缺点是准确度不高, 需要电源. 下面以 DA16 型毫伏表为例介绍其面板上的配置及使用方法.



DA-16 型毫伏表

使用方法: (1) 仪器在接通电源之前, 先观察指针是否在机械零位上, 如果不在零位上应调到零位上.

(2) 将量程开关预置于 300V 档.

(3) 接通电源, 数秒钟内有所摆动, 然后稳定.

(4) 将被测量信号输入, 将量程开关逆时针移动, 便可按档级及表针的位置读出被测电压值.

附录 2 低频信号发生器

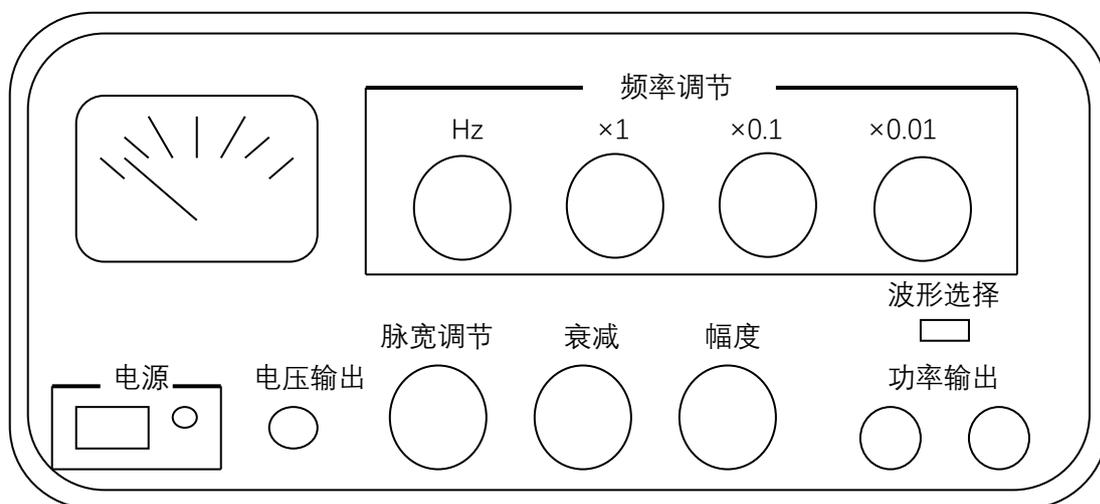
实验里常用的交流信号源如 DF1028B 型(如下图), 能产生 20Hz-10KHz 电压输出, 和 1Hz-100KHz 的功率输出(最大输出达到 20W), 具有正弦波输出和脉宽可调节的方波输出. 使用时应注意:

1. 将电源接入 220V, 50Hz 交流电源, 预热一段时间.
2. 根据使用的需要, 按下或弹出波形选择按钮, 选择正弦波和方波输出.
3. 根据所使用的频率范围, 合理地选择频率开关和倍乘, 尽可能多的设置有效位数, 以获得最佳频率精度.

4. 当电压输出阻抗负载不等于 50Ω 时, 负载上的电压值为:

$$V_L = V_0 \frac{R_L}{R_L + 50} \times (0.1)^{A dB / 20}$$

式中 V 为负载上的电压, V_0 为输出开路电压即电表指示值, R_L 为负载电阻值, A 为衰减值.



DF1028B 型信号发生器面板图

光学实验预备知识

光学实验是普通物理实验的一个重要部分。这里先介绍光学实验中常用到的知识和调节技术。初学者在做光学实验以前，应认真阅读这些内容，并且在实验中遵守有关规则和灵活运用有关知识。

实验须知

1.1 实验前须完成下述工作：

1.1.1 课前做好预习工作：了解实验的目的、原理、内容及所使用的仪器及设备，绘制好记录实验原始数据的表格等。

1.1.2 实验前认真对照器材设备配置清单，检查实验配置是否齐全，发现问题及时报告指导教师。

1.1.3 不要把与实验无关的东西带入实验室，注意保持实验室的环境卫生。

1.2 实验操作时须注意

1.2.1 要爱护实验仪器，不要用手去触摸光学元器件表面。开始实验时一定要先搞清楚仪器的使用规则和量程范围，然后按实验要求正确操作，发现问题及时报告指导教师。

1.2.2 以科学的态度，认真、客观、准确地记录实验数据。

1.2.3 实验操作完毕首先请指导教师检查实验数据，由教师在实验原始数据记录单上签字；然后拆开实验光路（电路）及组件；最后整理器材填写实验情况记录本，指导教师检查完毕并验收后方可离开实验室。

1.3 实验报告：

1.3.1 完成实验后须写完整的实验报告，并附教师签过字的实验原始数据，实验报告下次实验前交。

一、光学元件和仪器的维护

光学仪器的种类繁多，应用十分广泛。光学仪器一般由光学系统和机械系统两大部分组成（有些还有电部分）。光学仪器是一种具有较高精度的仪器，它结构精密、紧凑、动作轻便灵活。因此在使用过程中更应小心操作，经常进行维护，以保证仪器原有的精度并延长仪器的使用寿命。

1.1 光学系统

光学仪器的主要部分是由各种透镜、反射镜、棱镜、球面镜、平面镜、分划板等光学元件所组成的。它们是光学仪器的核心部件。它们的光学表面都是经过仔细的研磨和抛光，有些还镀有一层或多层薄膜。对这些元件或其材料的光学性能（例如折射率、反射率、透射率等）都有一定的要求，而它们的机械性能和化学性能可能很差，若使用和维护不当，则会降低光学性能甚至报废。造成损坏的常见原因有：

- a. 破损、磨损、划伤、裂纹；
- b. 脱胶、膜层损伤；
- c. 发霉、生雾、腐蚀；
- d. 污损、刻线脱色。

基于以上原因，光学仪器在使用和储藏时主要应注意：

- a. 避震；
- b. 防尘；
- c. 防潮；
- d. 防霉；
- e. 防锈。

1.2 机械系统

光学仪器中机械系统主要有下列三个作用：

- a. 固定光学元件；
- b. 按照光学系统的要求给予部分光学元件一定的调节自由度并使得光学仪器有一定的测量范围；
- c. 使光学元件处于某一特定位置上，以保证各光学元件间的共轴及确定的相对位置。

光学仪器中机械零件的特点：

- a. 薄壁；
- b. 细牙；
- c. 发黑；
- d. 精密。

二 使用光学仪器的注意事项

- 2.1 使用前必须仔细阅读仪器使用说明书，充分了解仪器的原理，结构及使用方法和操作要求。
- 2.2 了解电源和操作条件是否符合仪器使用条件。
- 2.3 仪器或光学元件轻拿轻放，勿使它们受到冲击或震动，特别是要防止摔落。
- 2.4 不准用手触摸光学元件表面，如必需用手拿光学元件时，只能接触其磨砂面，如透镜的边缘、棱镜的上下表面等。不能对着光学元件表面说话，以防口水溅在元件表面。
- 2.5 除实验室规定外，不允许任何溶液及物体接触光学元件表面。
- 2.6 光学表面如有灰尘及污痕，应在实验室的老师指导下处理。

2.7 调整光学仪器时，要耐心细致，边观察边调整，动作要轻、慢，严禁盲目及粗鲁操作。

仪器上的锁紧螺钉、螺母等不能拧得过紧，以免引入光弹效应。注意机械零件的保护。

2.8 在暗室中应先熟悉各种仪器用具安放位置，在暗环境下动作要轻缓。

2.9 仪器使用完毕，应加罩或回箱，注意防尘防污。

三 光学实验常用调节方法

3.1 消视差：

光学实验中经常要测量像的位置和大小。经验告诉我们，要测准物体的大小，必须将量度标尺与被测物体紧贴在一起。如果标尺远离被测物体，读数将随眼睛的位置不同而有所改变，难以测准，如图1所示。

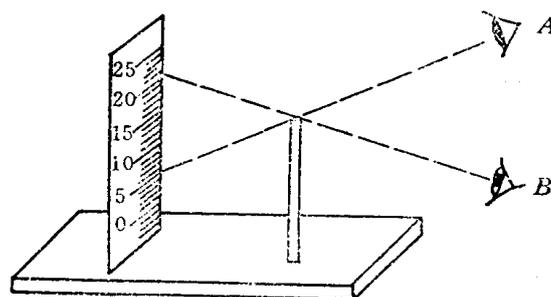


图 1

可是在光学实验中被测物体往往是一个看得见摸不着的像，怎样才能确定标尺和待测像是紧贴在一起

的呢？利用“视差”现象可以帮助我们解决这个问题。为了认识“视差”现象，我们可以作一简单实验：双手各伸出一只手指，并使一指在前，一指在后，相隔一定距离，且两指互相平行。

用一只眼睛观察，当左右（或上下）晃动眼睛时（眼睛移动方向与被观察手指垂直），就会发现两指间有相对移动，这种现象称为“视差”。而且还会看到，离眼近者，其移动方向与眼睛移动方向相反；离眼远者则与眼睛移动方向相同。若将两指紧贴在一起，则无上述现象，既无

“视差”。由此可以利用视差现象来判断待测像与标尺是否贴近。若待测像和标尺间有视差，说明它们没有紧贴在一起，则应该稍稍调节像或标尺位置，并同时微微晃动眼睛观察，直到它们之间无视差后方可进行测量。这一调节步骤，我们常称之为“消视差”。在光学实验中，“消视差”常常是测量前必不可少的操作步骤。

3.2 共轴调节：

光学实验经常要用一个或多个透镜成像。为了获得好的像，必须使各个透镜的主光轴重合（即共轴）并使物体位于透镜的主光轴附近。此外透镜成像公式中的物距、像距等都是沿主光轴计算长度的，为了测量准确，必须使透镜的主光轴与带有刻度的导轨平行。为达到上述要求的调节我们统称为共轴调节。

具体方法如下：

粗调：将光源、物体和透镜靠拢，调节它们的取向和

高低左右位置，凭眼睛观察，使物（或物屏）

和成像平面（或像屏）与导轨垂直。这一步因

单凭眼睛判断，调节效果与实验者的经验有关，故称为粗调。通常应再进行细调（要求不高时可只进行粗调）。

细调：这一步要靠其他仪器或成像规律来判断和调节。不同的装置可能有不同的具体调节方法。

下面介绍物与单个凸透镜共轴的调节方法：

使物与凸透镜共轴实际上是指将物上的某一点调到透镜的主光轴上，要解决这一问题，首先要知道如何判断物上的点是否在透镜的主光轴上。根据凸透镜成像规律即可判断。如图2所示，当物AB与像屏之间的距离 b 大于 $4f$ 时，将凸透镜沿光轴移到 O_1 或 O_2 位置都能在屏上成像，一次成大像 A_1B_1 ，另一次成小像 A_2B_2 ，物点A位于光轴上，则两次像的 A_1 和 A_2 点都在光轴上而且重合。物点B不在光轴上，则两次像的 B_1 和 B_2 点一定都不在光轴上，而且不重合。但是，小像的 B_2 点总是比大像的 B_1 点更接近光轴。据此可知，若要将B点调到凸透镜光轴上，只需记住像屏上小像的 B_2 点位置（可在屏上贴坐标纸，供记录位置时作参考物），调节透镜（或物）的高低左右，使 B_1 向 B_2 靠拢。这样反复调节几次直到 B_1 与 B_2 重合，即说明B点已调到透镜的主光轴上了。

若要调多个透镜共轴，则应先将物上B点调到一个凸透镜的主光轴上，然后同样根据轴上物点的像总在轴上的道理，逐个增加待调透镜，调节它们使之逐个与第一个透镜共轴。

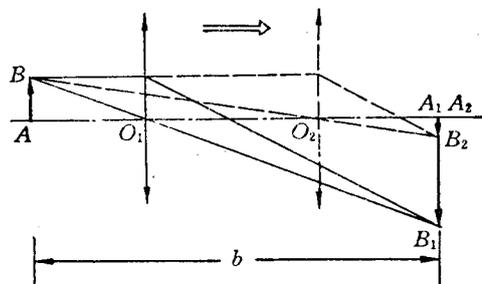


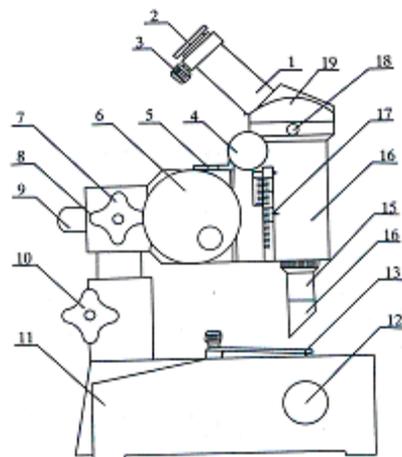
图 2

四、常用光学仪器简介：

4.1 读数显微镜

实验室常用测量显微镜来测量长度，其优点是：测量准确度高；可以做到无接触测量，在测量过程中对被测物体的影响较小。

读数显微镜的量程一般为几个厘米，分度值为 0.01mm 。常见的一种读数显微镜 JCD_3 型的机械部分是根据螺旋测微原理制造的，一个与螺距为 1mm 的丝杆联动的刻度圆盘上有100个等分格，因此它的分值是 0.01mm 。



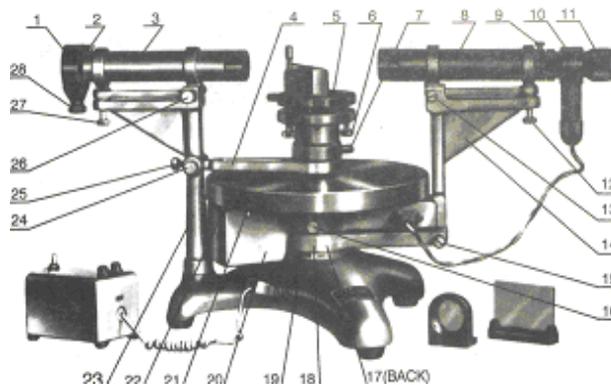
1. 目镜接筒 2. 目镜 3. 锁紧螺钉 4. 调焦手轮 5. 标尺 6. 测微鼓轮 7. 锁紧手轮I 8. 接头轴 9. 方轴 10. 锁紧手轮II 11. 底座 12. 反光镜旋轮 13. 压片 14. 半反镜组 15. 物镜组 16. 镜筒 17. 刻尺

4.2 分光计

分光计是正确测定光线偏转角的仪器，不少物理量如折射率、波长的测定都要用到它。分光计有各种类型，其结构也有不同，但它总是由三足底座，平行光管，载物台，望远镜和读数装置等所组成。

分光计在使用前一定要经过仔细的调整，使其处于正常工作状态：① 望远镜能接收平行光；② 平行光管能发出平行光；③

望远镜和平行光管共光轴，且均与分光计的中心轴(载物平台的法线)相垂直。只有这样才能使入射光和出射光的平面与刻度盘载物台相平行，而使分光计刻度盘上的读数正确反映出光线的偏转角。因此正确地调整分光计，对减少测量误差，提高测量的准确度是十分重要的。而分光计的调整方法对一般光学仪器的调整也有一定的通用性。



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. 转座与角度止动螺钉 17. 望远镜止动螺钉 18. 制动架(一) 19. 底座 20. 转座 21. 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

4.3 迈克尔逊干涉仪

迈克尔逊干涉仪其基本光路如图5所示。图中S为光源，A、B为平行平面玻璃板，A称为分束镜，在它的的一个表面镀有半透半反射金属膜M，B称为补偿板。C、D为互相垂直的平面镜。A、B与C、D均成 45° 角。迈克尔逊干涉仪在光学实验和计量技术中有着广泛的应用。例如：可用它测量光波的波长、微小长度、光源的相干长度，用相干性较好的光源可对较大的长度作精密长了测量，以及可用它来研究温度、压力对光传播的影响等。随着应用的需要，迈克尔逊干涉仪有多种多样的形式。

五、实验室常用光源：

5.1 He—Ne激光光源：

He—Ne激光光谱特性：光波单色性好，波长为 632.8nm ，橙红色；方向性好，光束发散角小；亮度高；是很好的定向光源和单色光源。使用时注意高压安全，不能触摸电极。应避免激光束直接射入眼睛以免损伤视力。实验室常用 $200\text{—}300\text{mm}$ 激光管。工作电压在 1.5kV 左右，工作电流 $4\text{—}6\text{mA}$ ，启辉电压为 5kV 。

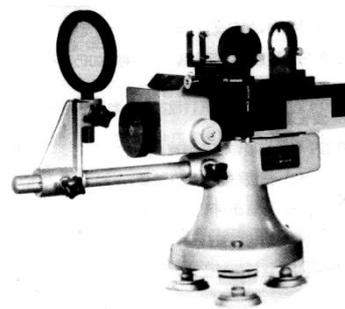


图 5

5.2 低压汞灯光源：

低压汞灯光谱特性：在可见光区辐射光波波长为： 577.0nm 、 579.0nm 、 546.1nm 、 404.7nm ，线光谱。实验室常用GD20低压汞，额定电压 220V ，工作电压 20V ，功率 20W 。

5.3 高压汞灯光源：

高压汞灯光谱特性：在可见光谱区辐射光波波长为： 404.6nm 、 435.8nm 、 491.6nm 、 546.0nm 、 576.9nm 、 579.0nm ，线光谱。实验室常用GGQ50高压汞灯，额定电压 220V ，工作电压 95V ，功率 50W 。

5.4 低压钠灯光源：

低压钠灯光谱特性：在可见光区辐射光波波长为： 589.6nm 、 589.0nm ，线光谱。实验室常用GP20Na型低压钠灯，额定电压 220V ，工作电压 15V ，功率 20W 。

5.5 白炽灯光源：

白炽灯光谱特性：在可见及近红外光谱区辐射的各种波长，并组成连续光谱。光呈白色偏黄红。

5.6 卤钨灯光源：

卤钨灯光谱特性：在可见光谱区辐射的各种波长，形成连续光谱。因光谱中短波成分增多，所以它所发的光较白炽灯的光更接近于白色。

实验十三 薄透镜焦距的测量

一、目的：

- 1、掌握薄透镜焦距的测量；
- 2、学会调节光学系统。

二、原理：

如图1所示，设薄透镜的第二焦距为 f' ，物距为 s ，对应的象距为 s' ，则由透镜成像公式

得：

$$\frac{1}{f'} = \frac{1}{s'} - \frac{1}{s} \quad \dots\dots (1)$$

$$f' = \frac{ss'}{s - s'} \quad \dots\dots (2)$$

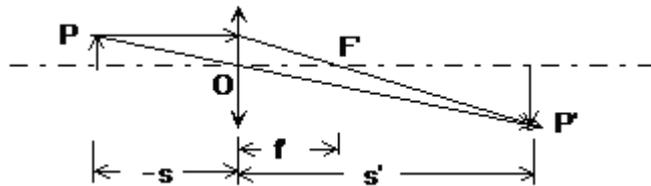


图 1

应用上式时，必须注意各物理量所适用的符号规则。

本讲义规定：光线自左向右进行；距离从参考点（薄透镜心）量起；向左为负，向右为正。即

距离与光线进行方向一致时为正，反之为负。运算时已知量须添加符号，未知量则根据结果中的符号判断其物理意义。

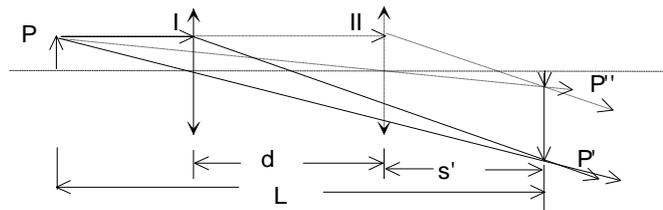


图 2

下面介绍测量会聚透镜的二种方法：

(1) 由物距与象距求距离：

取物与白屏之间的距离 L 大于 $4f'$ ，此后，固定物与白屏的位置，移动透镜则必能在白屏上两次成象，如图2所示。透镜在位置 I 时：物距 $s = (L - d - s'_2)$ ；象距 $s' = d + s'_2$ ，得放大、

倒立的实象 P' 。透镜在位置 II 时：物距 $s = -(L - s'_2)$ ；象距 $s' = s'_2$ ，得缩小、倒立的实象 P'' 。

由 (2) 式知：

对位置 I 而言： $f' = \frac{(L - d - s'_2)(d + s'_2)}{L} \dots\dots (A)$

对位置 II 而言： $f' = \frac{(L - s'_2)s'_2}{L} \dots\dots (B)$

从方程 (A) (B) 中不难解出： $f' = \frac{L^2 - d^2}{4L} \dots\dots (3)$

(3) 式表明：只要测出 d 和 L 就可以算出 f' 。由于 f' 是通过透镜两次成象而求得的，因而这种方法又称二次成象法。

(2) 由光的可逆性原理求焦距：

如图3所示，当物屏P放在透镜L的第一焦平面上时，由P发出的光经透镜后将成为平行光。如果在透镜后面放一与透镜光轴垂直的平面镜M，就可把这一束平行光反射回去，再经过原透镜L则必成象于物屏平面上。P与L之间的距离就是透镜L的第二焦距 f' 。这方法是利用调节实验装置本身使之产生平行光以达到调焦目的，所以又称为自准直法。

对于发散透镜，因为实物不能得到实象，所以不能应用白屏接取象的方法求得焦距。下面介绍二种测量发散透镜焦距的方法：

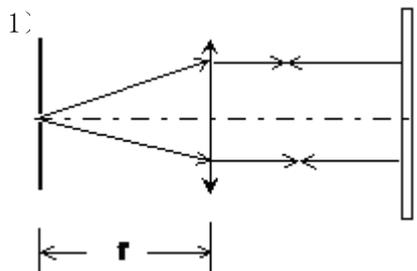


图 3

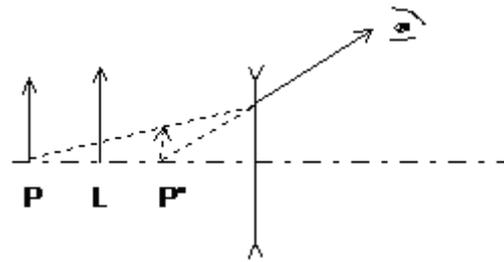
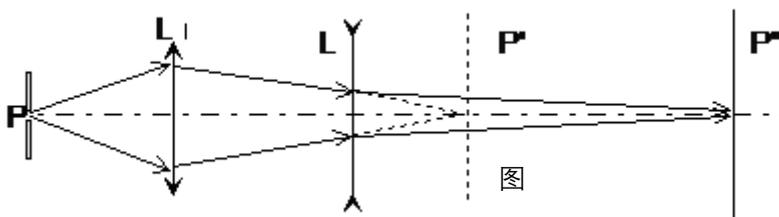


图 4

如图4所示，因为实物P经发散透镜成虚象P'在透镜另一侧并通过透镜观察，用视差法找出P'的位置，再利用公式(1)式即可算出 f' 。

2) 用辅助透镜成象焦距：



图

如图5所示，设物屏P经辅助会聚透镜 L_1 后成象于 P' ，而加待测焦距的发散透镜L后将成象于 P'' ，则 P' 与 P'' 相对于L来说是物象共轭的，分别测出L到 P' 和 P'' 的距离，根据(2)式即可算出L的第二焦距 f' 。

三、仪器及用具：

- 1、光具座；2、会聚透镜；3、发散透镜；4、光源；5、物屏；6、白屏；7、平面镜。

四、实验内容：

1、测量会聚透镜的 f 。(用二种方法)

2、测量发散透镜的 f 。

五、步骤和要求:

1、调节光学元件使物、透镜及象的中心在一直线上,并使这一直线与导轨严格平行。调节的方法是先把物屏、透镜、白屏等元件放置于光具座上,并使它们尽量靠拢。先用眼睛瞄准进行初调,使各元件的中心大致在与导轨平行的同一直线上。使物平面、象平面和透镜面相互平行且垂直于光具座导轨。然后,用其它仪器或依靠成像规律仔细调节,使各元件中心连线与导轨严格平行。(参照光学实验预备知识3.2共轴调节)

2、用单色光照亮物屏P,将物屏与白屏放置在光具座上,相隔一定距离(大于 $4f$)并固定好,测出他们之间的距离L。将待测会聚透镜放在物屏与白屏之间如图2所示,移动透镜使白屏上得到清晰的象,记录透镜位置 S_1 ;移动透镜至另一位置使屏上又得一清晰的象,再记录透镜的位置 S'_2 ;由二个位置算出距离 $d(d = S'_1 - S'_2)$ 并由(3)式求出 f' 。改变屏的位置,重复三次,求其平均值。

3、按图3所示,在光具座上将仪器放好。移动会聚透镜L和改变平面反射镜的方位,使在物屏上形成一个与物P大小相等,倒立的清晰的象,测出物屏到透镜的距离即得透镜的焦距 f' 。

重复三次,求其平均值。

4、按图5所示,先用辅助会聚透镜 L_1 把物P成象在P'处的屏上,记录P'的位置。然后将待测发散透镜L置于与P'之间的适当位置,并将屏向外移至P''处,使屏上重新得到清晰的象。分别测出P'、P''至发散透镜L的距离,这二个距离对L来讲分别表示物距和象距,代如(2)式,求出 f' (注意各量符号)。改变发散透镜位置,重复三次,求其平均值。数据表格自拟。

六、思考题:

1、如何利用光学方法区别凸、凹透镜。

2、设计一个利用自准直方法测薄凹透镜 f 的实验方法。

实验十四 分光计的调节和使用

第一部分：分光计的调节

一、实验目的：

1、了解分光计的构造和基本原理。

二、实验仪器：

1、分光计，2、汞灯，3、平面反射镜。

三、装置简介：

分光计是正确测定光线偏转角的仪器，不少物理量如折射率、波长的测定都要用到

它。分光计有各种类型，其结构也有不同，但它总是由三足底座，平行光管，载物台，望远镜和读数装置等所组成。如图1为JJY型分光计的结构图。分光计在使用前一定要经过仔细的调整，使其处于正常工作状态：① 望远镜能接收平行光；② 平行光管能发出平行光；③ 望远镜和平行光管共光轴，且均与分光计的中心轴（载物平台的法线）相垂直。只有这样才能使入射光和出射光的平面与刻度盘载物台相平行，而使分光计刻度盘上的读数正确反映出光线的偏转角。因此正确地调整分光计，对减少测量误差，提高测量的准确度是十分重要的。而分光计的调整方法对一般光学仪器的调整也有一定的通用性。

分光计的读数装置是用来测量角度的，量程为 360° ，JJY型分光计的分度值为 $1'$ 。分光计的刻度盘垂直于分光计主轴且可绕主轴转动。为消除刻度盘的偏心差，采用两个相差 180° 的窗口读数。刻度盘的分度值为 0.5° ， 0.5° 以下则需用游标来读数。游标上的30格与刻度盘上的29格相等，故游标的最小分度值为 $1'$ 。读数时应先看游标零刻线所

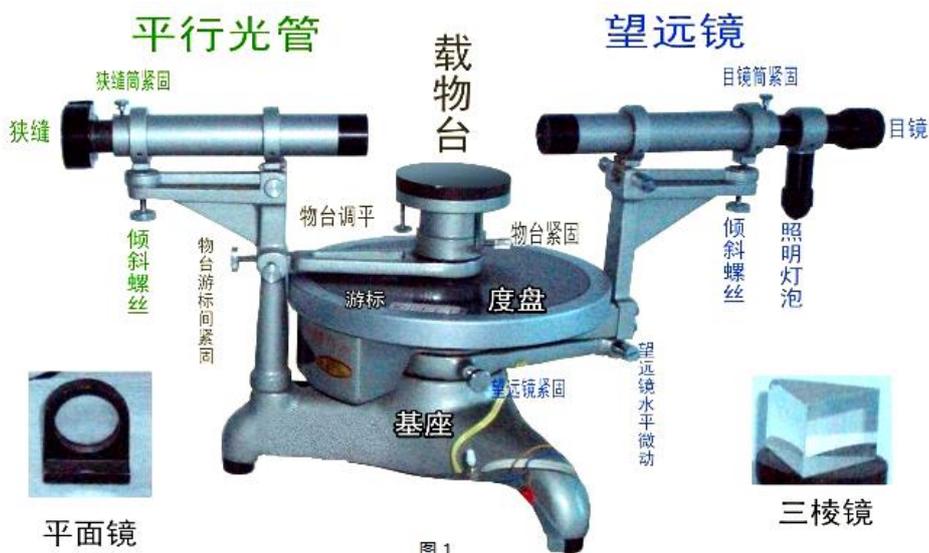


图 1

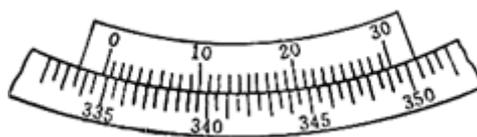


图 2

指的位置，例如，图2所示情形为 $334^{\circ}30'$ 稍多一点，而游标上的第17格恰好与刻度盘上的某一刻度对齐，因此该读数为 $334^{\circ}30' + 17' = 334^{\circ}47'$ 。

四、调整分光计

调节前，应先对照分光计的结构图和实物，熟悉分光计各部分的具体结构及作用。调节时，掌握分光计状态调节要领，熟悉调节步骤，要先粗调后细调。

1、分光计状态调节要领：

- 载物台水平，载物台法线铅垂直并与分光计转轴共轴。
- 望远镜光轴垂直于系统转轴，望远镜接受平行光。
- 平行光管出射平行光，平行光管光轴与望远镜光轴共轴。

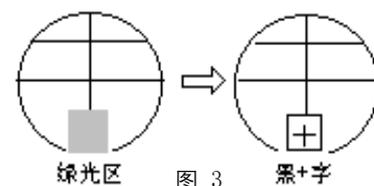


图 3

2、粗调（凭眼睛观察判断）

2.1、点燃汞灯（钠灯），接通分光计照明光源，在望远镜目镜中看到绿光，调试目镜，使“十”叉丝（准线）清晰，如图3所示。

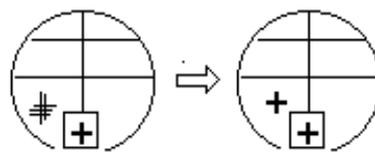


图 4

2.2、目测调节载物台水平（调节载物台下方三个螺钉），望远镜光轴和平行光管光轴水平（调节望远镜光轴倾斜调节螺丝，平行光管光轴倾斜调节螺丝）。使望远镜、平行光管和载物台大致垂直于仪器的主轴。

2.3、将平面反射镜置于载物台中央（将载物台上三条 120° 等分线与载物台下三个调节螺丝对齐，再将双面反射镜按图5（a）所示的位置放置在载物台上），转动内盘（游标盘），在目镜中寻找平面镜的反射“十”字像，仔细调节目镜，使绿“十”字像清晰，并与“十”叉丝（分划板）无视差，锁紧目镜紧固螺丝如图4所示。这一步粗调是细调的基础，必须反复、细心地调节到最好状态。

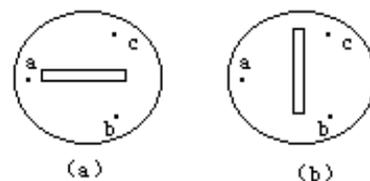


图 5

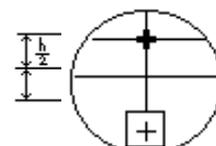


图 6

3、细调（必须在完成粗调后进行）

3.1、松开物台游标紧固旋钮，以目镜中的反射“十”字像为观察目标，仔细调节载物台下方的螺钉，转动内盘（游标盘），采用各半调节法，在目镜中观察，逐步将平面镜前后表面反射的“十”字调至重合（沿目镜中的分划板铅垂准线），如图6所示。

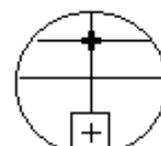


图 7

3.2、调节望远镜光轴倾斜调节螺丝，将重合的“十”字像调至“十”叉丝的上交叉点位，如图7所示。

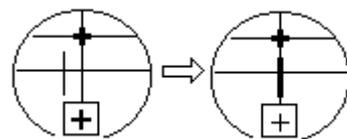


图 8

3.3、变换平面镜摆放位置，重复上述步骤，将重合的“十”字像调至“十”叉丝的上交叉点位。

3.4、将分光计平行光管对准光源，转动望远镜对准平行光管狭缝，仔细调节平行光管套筒，直至在望远镜中能看到清晰的狭缝像，且无视差（注意：此时望远镜不能再调焦）

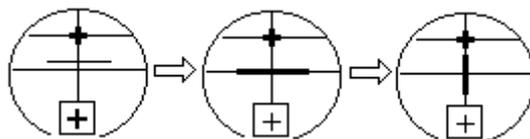


图 9

如图8所示，最后仔细左右转动望远镜，使目镜中的竖直叉丝对准平行光管狭缝。

3.5、缓慢转动夹缝头使夹缝像呈现水平状，如图

9所示，在目镜中观察，调节平行光管光轴倾斜调节螺丝，使狭缝像与中央水平准线重合。最后再缓慢转动夹缝头使夹缝像呈现竖直状，水平调节望远镜光轴，使目镜中的狭缝像与“十”叉丝铅垂准线重合，锁紧平行光管紧固螺丝。

3.6、当我们在望远镜目镜中可看到：“十”字像和“十”叉丝清晰，重合的“十”字像位于“十”叉丝的上交叉点位，狭缝像清晰并且狭缝像与“十”叉丝铅垂准线重合，分光计状态调整完毕。

第二部分 三棱镜顶角的测量

实验目的：

1. 学习使用分光计。

二、实验仪器：

1、分光计，2、汞灯，3、三棱镜。

三、实验步骤：

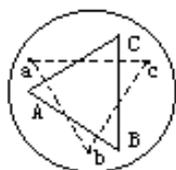


图 10

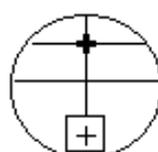


图 11

- 3.1、将三棱镜放在已调好的分光计的载物台上，正确的放置方法如图10所示。
- 3.2、调节三棱镜的主截面垂直于转轴。先将望远镜对准AB面调节螺丝b或c，使AB面垂直于望远镜的光轴，从望远镜目镜中可观察到如图11所示的图像。然后再将望远镜转向AC面，调节螺丝a，使AC面上望远镜的光轴垂直。两个面来回反复调节，逐次接近最终使AB面和AC面都能与望远镜光轴垂直。

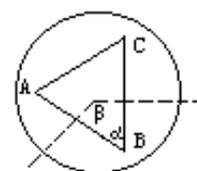


图 12

- 3.3、用自准直望远镜的自准直测量原理，测棱镜的顶角 α 。
- 方法是：如图12分别记下自准直望远镜光轴垂直于AB面和AC面的读数，二读数之差是二法线的夹角 β ，则棱角 $\alpha = 180^\circ - \beta$ 。仔细调节测量，重复五次，列表记录测量数据。

附：测量数据记录表：

测量次数	AB面 读数		AC面 读数	
	“1”窗 Φ_1	“2”窗 Φ_2	“1”窗 Φ_1'	“2”窗 Φ_2'
1				
2				
3				
4				
5				

$$\beta = \frac{(\varphi_1 - \varphi_1') + (\varphi_2 - \varphi_2')}{2} =$$

$$\alpha = 180^\circ - \beta =$$

五、思考题：

- 1、平面反射镜能否不按图5所示的位置放置在分光计载物台上，为什么？

实验十五 光波波长的测量及光栅特性的研究

一、目的：

- 1、观察光通过光栅的衍射现象，了解干涉条纹的特点。
- 2、进一步熟悉分光计的使用和调整方法。
- 3、用透射光栅测量测定汞灯在可见光范围内光谱的波长。

二、原理：

衍射光栅是一种分光元件，由于其基质材料不同而有透射光栅和反射光栅两类。它们都相当于一组数目很多，排列紧密，均匀的平行狭缝，透射光栅是用金刚石在一块平面玻璃上刻划而成的。反射光栅则是刻划在精研过的硬质金属面上，用这种方法刻制的光栅，由于要求非常精密，因而制造困难，所以价格非常昂贵，而平常所用的光栅大都是复制品。如今由于单色性好的激光的出现，应用其干涉原理制成了全息光栅，制造容易，价格便宜，从而使光栅实验得以普及。本实验用的光栅是一块全息光栅。

根据夫琅和费衍射理论，一束单色平行光垂直投射到光栅平面上，被衍射后，凡是衍射角适合条件：

$$d \cdot \sin \theta = K\lambda \quad (K = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots) \quad (1)$$

光会加强，其它方向将抵消，如图1所示。式中 θ 是衍射角， d 是缝距又常称为光栅常数 ($d = a + b$ ，其中 a 是刻痕宽度， b 为狭缝宽度)， k 为衍射光谱的级数， λ 是光的波长。 θ 、 k 、

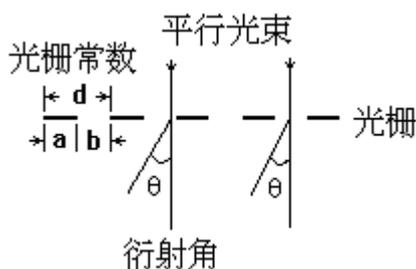


图 1

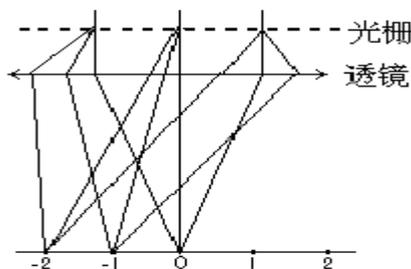


图 2

λ 分别表示波长为 λ 的光的第 k 级衍射光谱的衍射角。

如果用会聚透镜把这些衍射后的平行光会聚起来，则在透镜的焦平面上将出现明亮的条纹称为谱线。在 $\theta = 0$ 的方向上可以观察到中央极大，称为零级谱线，其它级数的谱线对称地分布在零级谱线的两侧，如图2所示。

如果入射光源中包含有几种不同的波长，则这束复色平行光通过光栅后形成的谱线将按级次序排列在该级谱线系列中，对不同的波长有一一对应的 θ 、 k 、 λ 从而在不同的位置上形成不同的彩色谱线，称为该入射光源的光谱。图3为汞灯光源通过光栅后所形成的光谱示意图。若光

栅常数d为已知，在实验中测定了某谱线的衍射角 $\theta_{k\lambda}$ 和对应的光谱级k，则可由公式(1)求该谱线的波长 λ ；反之，如果波长 λ 是已知的，则可求出光栅常数d。

衍射光栅的基本特性可以用它的“分辨本领”与“色散率”来表征。“分辨本领”R定义为：两条刚可以被分开的谱线的波长差 $\Delta\lambda$ 除该波长 λ ，

$$\text{即： } R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} \dots\dots\dots (2)$$

按照瑞利条件，所谓两条刚可以被分开的谱线可规定为：其中一根谱线的极强应落在另一根谱线的极弱上，如图4所示。

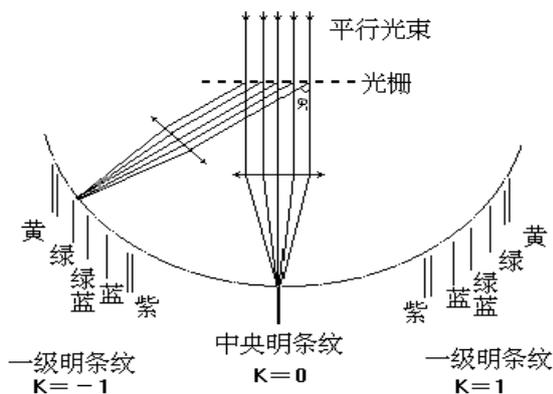


图 3

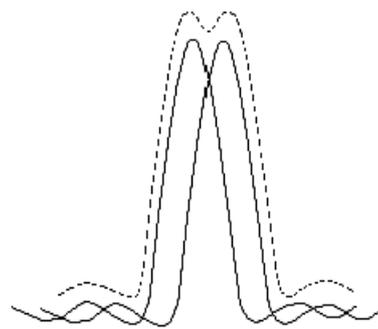


图 4

由此条件可推知：

$$\text{光栅的分辨本领 } R=KN \dots\dots\dots (3)$$

式中N是光栅的总刻痕数，因为级数不会高，所以光栅的分辨本领主要地决定于狭缝数目N。本实验所用的光栅每厘米约3000条缝。

“角色散率”D定义为两条谱线偏向角之差 $\Delta\theta$ 与其波长差 $\Delta\lambda$ 之比：

$$D = \frac{\Delta\theta}{\Delta\lambda} \dots\dots\dots (4)$$

对公式(1)进行微分，得：

$$D = \frac{\Delta\theta}{\Delta\lambda} = \frac{k}{d \cdot \cos\theta} \dots\dots\dots (5)$$

三、仪器及用具：

- 1、透射光栅；
- 2、分光计；
- 3、汞灯；
- 4、读数小灯。

四、实验内容：

- 1、测量光栅常数；
- 2、测量未知光波波长及色散率；
- 3、观察狭缝数目N和分辨本领的关系；

4、比较用光栅分光与用三棱镜分光得出的光谱的各自特点。

五、实验步骤:

1、参看关于分光计的调节方法，将分光计调节好（见105页）。

2、调节光栅平面（刻痕所在平面）使与仪器转轴平行，且光栅平面垂直与平行光管。调节方法是：先把平行光管的狭缝照亮，把望远镜叉丝对

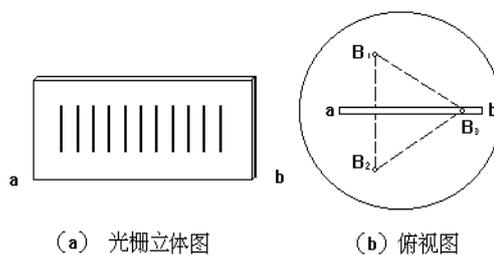


图 5

准狭缝，固定望远镜。然后把光栅放置在载物平台上，放置的位置如图5所示，尽可能做到光栅平面垂直平分 B_1B_2 ，调节 B_1B_2 ，直至从望远镜中观察到从光栅平面反射回来的叉丝像和叉丝重合。至此光栅平面与仪器转轴平行，并垂直于平行光管，随即固定圆盘。

3、调节光栅使其刻痕与转轴平行。步骤是点亮汞灯并使灯光照射在平行光管的狭缝上，然后转动望远镜，一般就可以看见一级谱线，正负分别位于零级两侧，注意观察叉丝交点是否在各条谱线的中央，如果不是，可调节图5中的螺丝（注意不要再动 B_1B_2 ）予以改正。调好后再回头检查光栅平面是否仍保持和转轴平行，如果有了改变，就要反复多次调节，直到两个要求都满足为止。

4、以汞灯为光源，测出 $K = \pm 1$ 波长为5460.7埃的绿光的衍射角，代入（1）式求 d 。但应注意+1与-1级的衍射角相差不能超过几分，否则应重新检查入射角是否为零。

5、用上法在 $K = \pm 1$ 时测出汞灯的两条黄线 λ_1 及 λ_2 的衍射角 θ_i ，代入（1）式中并算出 λ_1 及 λ_2 ，再由（4）式求出光栅的角色散率 D 。

6、设法挡住光栅的一部分，减少刻痕数目 N ，观察汞灯两条黄色谱线随 N 的减少所发生的变化。

7、比较用光栅分光和三棱镜分光得出的光谱各自的特点。

8、测出汞灯 $K=1$ 衍射光谱中各谱线的衍射角。然后由其它各谱线的衍射角 $\theta_{K\lambda}$ 和求得的光栅常数 d 算出相应的波长，并与过公认值比较，计算其测量误差。

六、实验表格:

1、测量值:

谱线	K=-1		K=0		K=1	
	$\phi 1$	$\phi 2$	$\phi 1$	$\phi 2$	$\phi 1$	$\phi 2$
白线						
紫线						
绿线						
黄线 1						
黄线 2						

2、计算各谱线对应的衍射角：

谱线	衍射角 (K=-1)		衍射角 (K=1)		θ 平均值
	θ 1	θ 2	θ 1	θ 2	
紫线					
绿线					
黄线 1					
黄线 2					

3、计算光栅常数d，紫光波长，双黄光波长及光栅的角色散率D。

七、思考题：

- 1、用(1)式测量d时，要满足什么条件？在实验中应根据什么现象来检查这些条件是否已经具备？

实验十六 用牛顿环测透镜曲率半径

一、实验目的：

- 1、学会使用牛顿环法测量透镜的曲率半径的实验方法；
- 2、通过实验加深对等厚干涉原理的理解；
- 3、能初步判断光学表面的形状，学会作光学检验；
- 4、学会用逐差法处理实验数据。

二、实验原理：

把一个曲率半径 R 很大的平凸透镜放在平板玻璃上，凸面和平板玻璃相接触，用单色光垂直照射透镜，如图1所示，如果以反射光的方向观察，就可以看到一组以透镜与平板玻璃接触点为中心，亮暗相间的圆形干涉条纹，且中心是暗斑，如果在透射方向观察，则看到的干涉环纹与反射光的干涉环纹的光强分布互补，如图2所示，这现象最早为牛顿所发现，故称牛顿环。

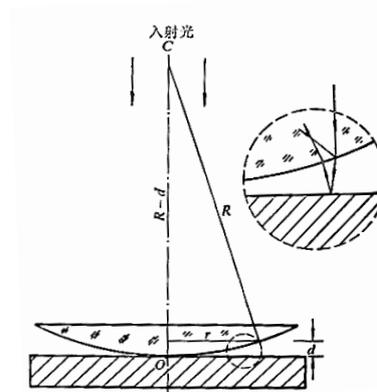


图 1

牛顿环是由光的干涉产生的，在透镜和平板玻璃之间有一层很薄的空气层，通过透镜的单色光一部分在透镜和空气的交界面上反射，另一部分通过空气层在平板玻璃上表面反射，这两部分反射光符合相干条件，故产生干涉现象。

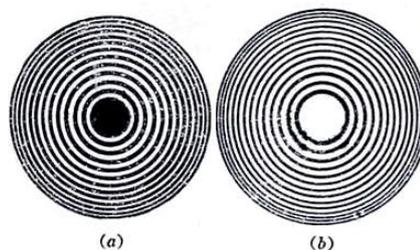


图 2

现在计算这两部分反射光的光程差 δ ，当光线垂直入射时，由空气膜上、下表面反射的光所产生光程差 δ 为：

$$\delta = 2d + \frac{\lambda}{2}$$

式中 $\frac{\lambda}{2}$ 的附加光程差是因为在平板玻璃面上反射时有 π 位相突变。

根据光的干涉条件，当

$$\delta = \begin{cases} 2d + \frac{\lambda}{2} = (2k + 1) \frac{\lambda}{2} & \dots\dots\dots(1) \\ 2d + \frac{\lambda}{2} = 2k \cdot \frac{\lambda}{2} & \dots\dots\dots(2) \end{cases}$$

$$k = 0, 1, 2, 3, \dots\dots\dots$$

注：（1）对应暗纹；（2）对应亮纹。

由几何关系可知：

$$d \approx \frac{r^2}{2R} \text{ 或 } d_k \approx \frac{r_k^2}{2R} \dots\dots\dots(3)$$

（∵R≫d 故可略去d²项而得）

式中d_k和r_k是第k个圆环处空气层的厚度和圆环半径。

从（1）式和（3）式得到第k个圆环的半径为（实验中通常用暗环）

$$r_k = \sqrt{kR\lambda} \dots\dots\dots(4)$$

若已知单色光的波长λ，测出第k个牛顿环半径r_k，从（4）式就可以计算出透镜的曲率半径R。相反，当R已知时，即可算出λ，但由于玻璃的弹性形变及两接触镜面之间难免有尘埃，因而接触处不可能是一个几何点，而是一个圆面，所以近圆心处环纹将变形，以致环纹的级数和序数不一致。这样，如果只测量一个环纹半径，因难以确切判定环纹的干涉级数k和精确测定其半径r_k，所以计算结果必然有较大的误差，为了减少误差，提高测量精度，必须在环心状态不变的情况下测量距中心较远，比较清晰的两个环纹的半径，例如测出第m个和第n个暗环（或亮纹）的半径（这里m，n均为环序数，不一定是干涉级数）再由这两个差值计算R或λ。由（4）式可得：

$$r_m^2 = (m + j)R\lambda \dots\dots\dots(5)$$

式中m为环序数，（m + j）为干涉级数，（j为干涉级数修正值不一定是整数），于是：

$$r_m^2 - r_n^2 = [(m + j) - (n + j)]R\lambda = (m - n)R\lambda$$

上式表明：在圆心状态不变情况下，任意两环的半径平方的差和干涉级以及环序数无关，只与两个环的序数之差（m - n）有关。因此，实验中只要精确测出r_m，r_n，由下式就能准确地算出R或λ，即：

$$R = \frac{r_m^2 - r_n^2}{(m - n)\lambda} \dots\dots\dots(6)$$

由(5)式不难看出： r_m^2 与 m 成直线关系，如图3所示，其斜率为 $R\lambda$ ，因此，也可以测出一组暗环（或亮环）的半径 r_m 和它们相应的环序数 m ，作 $r_k^2 \sim k$ 的关系曲线，然后以直

线的斜率： $tg\theta = R\lambda = \frac{r_m^2 - r_n^2}{m - n}$ ，算出 R 或 λ ，

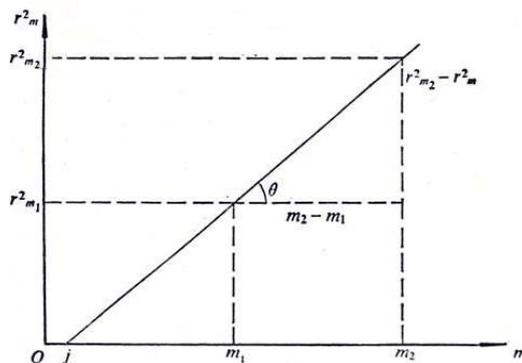


图 3

显然此法和(6)式的结果是一致的。

又因在实验中，环心位置不易确定，故取暗环的直径 D 替换，得：

$$R = \frac{D_m^2 - D_n^2}{4(m-n)\lambda} = \frac{(D_m + D_n)(D_m - D_n)}{4(m-n)\lambda} \dots\dots\dots (7)$$

三、仪器和用具：

- 1、牛顿环仪；
- 2、单色光源；
- 3、读数显微镜；
- 4、光学平面。

注：牛顿环仪是由待测平凸透镜 L 和磨光平玻璃板 P 叠合装在金属框架 F 中构成如图4所示，框架边上有三个螺旋 H ，用以调节 L

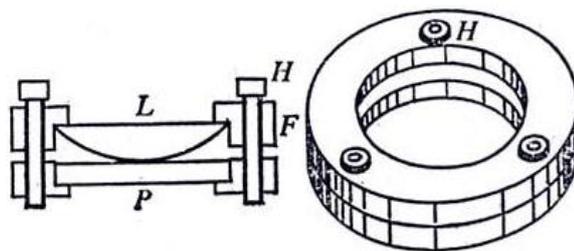


图 4

和 P 之间的接触，以改变干涉环纹的形状和

位置，调节 H 时，螺旋不可旋得过紧，以免接触压力过大，引起透镜弹性形变，甚至损坏透镜，过松则不易稳定接触点的状态。

四、实验内容：

- 1、用牛顿环测透镜的曲率半径 R 。

五、步骤和要求：

1、 将牛顿环仪按图5放置在读数显微镜的工作台上，先不用显微镜而用肉眼沿镜筒方向观察牛顿环仪装置，看到后移动牛顿环仪装置，使牛顿环落在显微镜筒的正下方。

2、 透镜目镜，使十字叉丝清晰。用单色光源（钠光 $\lambda = 589.3$ 纳米）照明，使半透半反镜G正对光源，使显微镜视场达到最亮。调节调焦旋钮镜筒由下向上运动，对牛顿环聚焦，使环纹清晰，并适当移动牛顿环装置，使牛顿环圆心处在视场正中央。

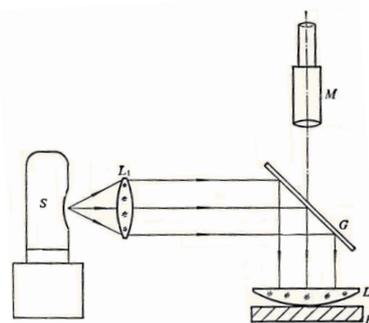


图 5

测量时，显微镜的叉丝应该调节成其中一根叉丝与显微镜的移动方向垂直，移动时始终保持这根叉丝与干涉环相切，这样才能测准。

3、 根据（7）式： $R = \frac{D_m^2 - D_n^2}{4(m-n)\lambda}$ 只要测出第m、n圈牛顿环的直径，即可求出透镜的曲率半径R，为提高测量结果的准确性，本实验采用逐差法处理数据，并要求 $m-n \geq 10$ 。例如：m取第30~26暗环纹，则n取第20~16暗环纹。

4、 测量时转动测微鼓轮，使十字叉丝先超过第30条暗环，然后再退回到第30条暗环（为什么要这样做？）并与第30条暗环相切，记下读数显微镜的读数，再转动测微鼓轮，依次测出第29~26圈，20~16圈的读数，并继续转动测微鼓轮，使叉丝越过圆心测出另一方对应的圈数和环纹读数，然后由左右两方的读数计算出各环直径。注意：圈数不能数错。

5、 根据逐差法处理数据，求出5组 $(D_m^2 - D_n^2)$ 的平均值，根据（7）式，计算出透镜的曲率半径R，并进行误差计算。

六、数据表格及误差计算：

六、数据表格及误差计算：

(1) 数据表格自拟。

(2) 误差计算：

$$\text{令 } D_m^2 - D_n^2 = \chi ; \text{ 求 } \bar{\chi} ; \text{ 则 } \bar{R} = \frac{\bar{\chi}}{4(m-n)\lambda} ;$$

$$\bar{\chi} \text{ 的标准误差: } \sigma_x = \sqrt{\frac{1}{j-1} \sum_{i=1}^j (x_i - \bar{x})^2} \quad (j=5)$$

$$\text{由误差传递公式: } \sigma_R^2 = \left(\frac{\partial R}{\partial \chi} \right)^2 \sigma_x^2 = \left[\frac{1}{4(m-n)\lambda} \right]^2 \sigma_x^2$$

R的平均标准误差:

$$\bar{\sigma}_R = \frac{\sigma_R}{\sqrt{j}} \quad R = \bar{R} \pm \bar{\sigma}_R$$

七、思考题:

- 1、用白光照射时能否看到牛顿环, 此时的条纹有什么特征?
- 2、在透射光方向观察牛顿环现象与在反射光方向观察有什么不同点? 请设计一个在透射光方向观察牛顿环现象的光路。
- 3、

附录: 读数显微镜的使用

读数显微镜的行程一般为几个厘米, 分度值为0.01mm。常见的一种读数显微镜 JCD II 型的机械部分是根据螺旋测微原理制造的, 一个与螺距为1mm的丝杆联动的刻度圆盘上有100个等分格, 因此它的分值是0.01mm。

读数显微镜的操作步骤如下:

- 1、将读数显微镜适当安装, 对准待测物。
- 2、调节显微镜的目镜, 以清楚地看到叉丝 (或标尺)。
- 3、调节显微镜的目镜 (调焦时显微镜应自下而上缓慢地上升) 或移动整个仪器使待测物成像清楚并消除视差, 即眼睛前后、左右移动时, 看到叉丝与待测物的象之间无相对移动。
- 4、调整被测物及目镜, 使叉丝中的一条丝、待测距离的二点之间的连线AB都和测距螺旋的轴

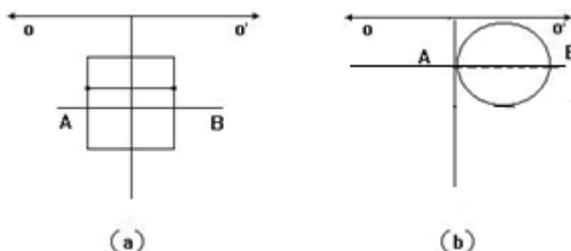


图 6

线 OO' 平行。如图 6(a)(b) 所示。

- 5、先让纵叉丝对准待测物上一点或 (一条线) A 记下读数 X_1 ; 转动测距丝杆叉丝移动并对准另一点 B 再记下读数 X_2 ; 两次读数差 $\Delta = |X_1 - X_2|$ 为即 A、B 二点之间的距离。注意两次读数时丝杆必须向同一个方向转动, 以避免螺距差。

- 6、读数显微镜由于丝杆和螺母的螺纹间必然存在的间隙 (使用时期越长, 间隙越长), 从不同方向转动鼓轮其读数均不同, 这就是 5、中提到的螺距差。它的消除方法是在测量时要求沿一个方向转动鼓轮, 测量时如需镜筒的移动方向改变, 需注意及时消除螺距差。具体做法是: 让纵丝先超过被测物的起始位置一段距离后再改变方向, 让纵丝对准被测物的起始位置, 沿同方向移动镜筒。

实验十七 用迈克尔逊干涉仪测量激光波长

一、目的：

- 1、熟悉迈克尔逊干涉仪的主要结构，掌握其调节方法。
- 2、学习一种测定光波波长的方法，加深对等倾、等厚干涉的理解。

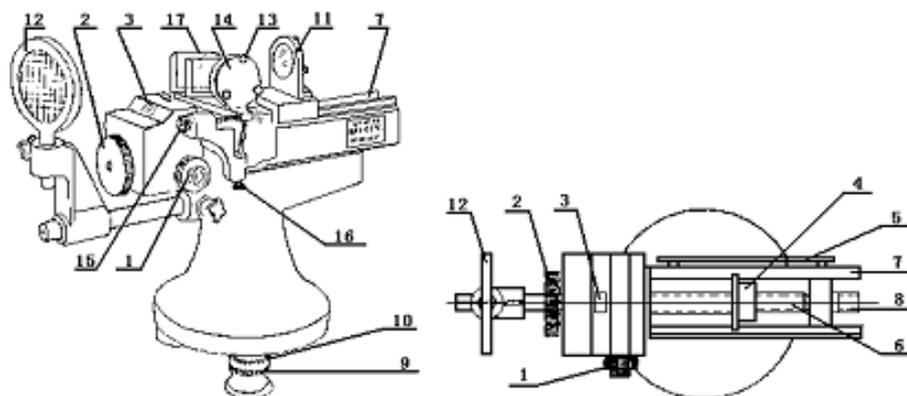
二、仪器及用具：

- 1、迈克尔逊干涉仪； 2、He-Ne 激光器； 3、毛玻璃； 4、透镜； 5、白光光源。

三、迈克尔逊干涉

仪：

迈克尔逊干涉仪在光学实验和计量技术中有着广泛的应用。例如：可用它测量光波的波长、微小长度、光源的相干长度，用相干性较好的光源可对较



1—微调手轮； 2—粗调手轮； 3—刻度盘； 4—丝杆啮合螺母； 5—毫米刻度尺； 6—丝杆； 7—导轨； 8—丝杆顶进螺母； 9—调平螺丝； 10—锁紧螺丝； 11—可动镜 M_2 ； 12—观察屏； 13—倾度粗调； 14—固定镜 M_1 ； 15—倾度微调； 16—倾度微调； 17— G_1 、 G_2

大的长度作精密长了测量，以及可用它来研究温度、压力对光传播的影响等。

图 1

随着应用的需要，迈克尔逊干涉仪有多种多样的形式，基本的元件和结构如图2与图1所示。 M_1 、

M_2 是一对精密磨光的平面反射镜， M_1 的位置是固定的， M_2 可沿导轨前后移动。 G_1 、 G_2 是厚度

和折射率都完全相同的一对平行玻璃板，与 M_1 、 M_2 均成

45° 角。 G_1 称为分光板，它的一个表面镀有半反射、半透

射膜A，使射到其上的光线分为光强度差不多相等的反射

光和透射光。 G_2 称为补偿板。当光照到 G_1 上时，在半透

膜上分成相互垂直的两束光，透射光(2)射到 M_1 经 M_1 反

射后，透过 G_2 ，在 G_1 的半透膜上反射后射向E；反射光

(1)射到 M_2 ，经 M_2 反射后，透过 G_1 射向E。由于光线(1)

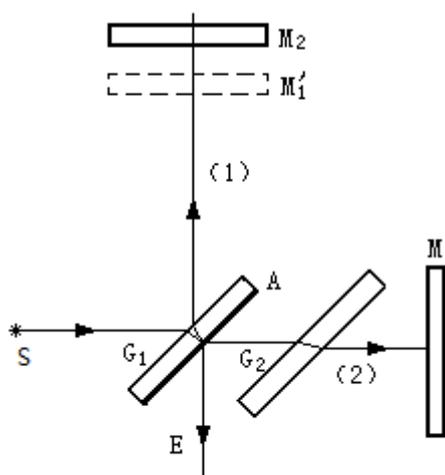


图 2

前后共通过 G_1 三次，而光线 (1) 只通过 G_1 一次，有了 G_2 ，它们在玻璃中的光程便相等了，于是计算这两束光的光程差时，只需计算两束光在空气中的光程差就可以了。当观察者从E处向 G_1 看去时，除直接看到 M_2 外还看到 M_1 的像 M_1' 。于是 (2)、(1) 两束光如同从 M_2 与 M_1' 反射来的，因此迈克尔逊干涉仪中所产生的干涉和 $M_1' \sim M_2$ 间“形成”的空气薄膜的干涉等效。

反射镜 M_2 的移动采用蜗轮蜗杆传动系统，转动粗调手轮 (2) 可以实现粗调。 M_2 移动的距离可在机体侧面的毫米刻度尺 (5) 上读得。通过读数窗口，在刻度盘 (3) 上可读到 0.01mm；转动微调手轮 (1) 可实现微调，微调手轮的分度值为 1×10^{-4} mm。可估读到 10^{-5} mm。 M_1 和 M_2 背面各有 3 个 (或 2 个) 螺钉可以用来粗调 M_1 和 M_2 的倾度，倾度的微调是通过调节水平微调 (15) 和竖直微调螺丝 (16) 来实现的。

1. 本实验室常用的 WSM-200 型迈克尔逊干涉仪的主要技术规格：

- a、动镜移动范围：200mm。
- b、动镜移动的最小读数 0.0001mm。

2. 在读数与测量时要注意以下两点：

a、转动微动鼓轮时，手轮随着转动，但转动手轮时，鼓轮并不随着转动。因此在读数前应先调整零点，方法是：将微动鼓轮沿某一方向 (例如顺时针方向) 旋转止零，然后以同方向转动手轮使之对齐某刻度。这以后，在测量时只能仍以同方向转动鼓轮使 M_1 镜移动，这样才能使手轮与鼓轮二者读数互相配合。

b、为了使测量结果正确，必须避免引入空程，也就是说，在调整好零点以后，应将鼓轮按原方向转几圈，直到干涉条纹开始移动以后，才可开始读数测量。

c、为了延长迈克尔逊干涉仪的使用寿命，以免反射镜长时间受到形变压力，实验完毕，需将反射镜背面的 3 个 (或 2 个) 三颗调节螺丝调至自然放松状态。

四、实验原理：

迈克尔逊干涉仪的非定域干涉现象：

激光通过短焦距透镜L汇聚成一个强度很高的点光源S（见图3），射向迈克尔逊干涉仪，点

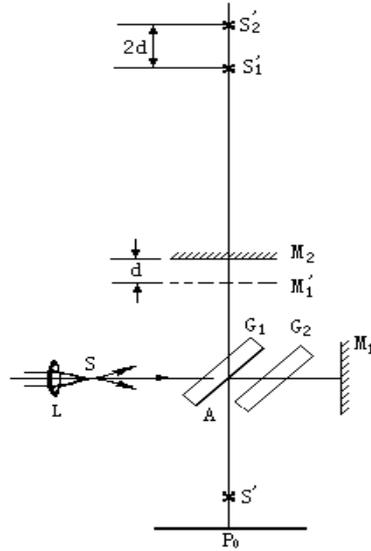


图 3

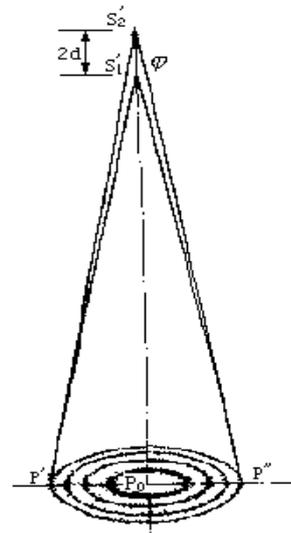


图 4

光源经平面镜 M_1 、 M_2 反射后，相当于由两个点光源 S_1' 和 S_2' 发出的相干光束。 S_1' 和 S_2' 是S的等效光源，是经半反射面A所成的虚像。 S_1' 是S经 M_1' 所成的虚像， S_2' 是S经 M_2 所成的虚像。由图3可知，只要观察屏放在两点光源发出光波的重叠区域内，都能看到干涉现象，故这种干涉称为非定域干涉。如果 M_2 与 M_1' 严格平行，且把观察屏放在垂直于 S_1' 和 S_2' 的连线上，就能看到一组明暗相间的同心圆干涉环，其圆心位于 S_1' 和 S_2' 轴线与屏的交点 P_0 处，从图4可以看出 P_0 处的光程差 $\Delta = 2d$ ，屏上其它任意点 P' 或 P'' 的光程差近似为

$$\Delta = 2d \cos \varphi \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中 φ 为 S_2' 射到 P'' 点的光线与 M_2 法线之间的夹角。

当 $2d \cdot \cos \varphi = k\lambda$ 时，为明纹；

当 $2d \cdot \cos \varphi = (2k + 1)\lambda/2$ 时，为暗纹。

由图4可以看出，以 P_0 为圆心的圆环是从虚光源发出的倾角相同的光线干涉的结果，因此，称为“等倾干涉条纹”。由（1）式可知 $\varphi = 0$ 时光程差最大，即圆心 P_0 处干涉环级次最高，越向

边缘级次越低。旋转干涉仪上精密丝杆，可使M₁沿平直导轨前后平移，当d增大时，干涉环中心级次就会相应增加，于是可观察到干涉环逐个从中心冒出来，反之，当d减小时，干涉环逐个向中心缩进去，每变化1个条纹，（即干涉仪中心由亮→暗→亮或由暗→亮→暗）d就变化 $\frac{\lambda}{2}$ 距离。由此可以精密地测量长度或光波波长。由明纹条件可知，当干涉环中心为明纹时， $\Delta = 2d = k\lambda$ 。此时若移动M₂（改变d），环心处条纹的级次相应改变，当d每改变 $\lambda/2$ 距离，环心就冒出或缩进一条环纹。若M₂移动距离为 Δd ，相应冒出或缩进的干涉环条纹数为N，则有

$$\Delta d = N \frac{\lambda}{2}$$

$$\lambda = \frac{2\Delta d}{N} = \frac{2(l_1 - l_2)}{N} \dots\dots\dots (2)$$

式中 l_1 、 l_2 分别为M₂移动前后的位置读数。实验中只要读出 l_1 、 l_2 和N，即可由（2）式求出波长。

由明纹条件推知，相邻两条纹的角间距为

$$\Delta\varphi = -\frac{\lambda}{2d \sin \varphi} \approx -\frac{\lambda}{2d\varphi}$$

当d增大时 $\Delta\varphi$ 变小，条纹变细变密；当d减小时 $\Delta\varphi$ 增大，条纹变粗变疏。所以离环心近处条纹粗而疏，离环心远处条纹细而密。

五、实验步骤：

1、点亮He—Ne激光器，使激光稳定出光半小时后再测量。

观察部分：

2、调节粗调手轮，使活动镜大致移至导轨45~55mm刻度处；调节倾度微调螺丝，使其拉簧松紧适中。使He—Ne激光束大致垂直于M₁，在C处放一块毛玻璃屏，即可看到两排激光光斑，每排都有几个光点，这是由于G₁上与反射面相对的另一侧面的平玻璃面上亦有部分反射的缘故。调节M₁背面的螺丝，使两排中两个最亮的光斑大致重合，则M₂与M₁'平行。

3、用短焦距透镜（或磨砂玻璃）扩展激光束，即能在屏上看到弧形条纹，再调节M₁镜座下的微调螺丝，可使M₂与M₁'趋向严格平行，而弧形条纹逐渐转化为圆条纹。

4、转动微调手轮，使M₂前后移动，可看到干涉条纹的冒出或缩进。仔细观察，当M₂位置改变时，干涉条纹的粗细、疏密与d的关系。

测量激光波长：

(1) 测量前，先按以下方法校准手轮刻度的零位：先以逆时针方向转动微调手轮，使读数准线对准零刻度线；再以逆时针方向转动粗调手轮，使读数准线对准某条刻度线。当然也可以都以顺时针方向转动手轮来校准零位。**但应注意：测量过程中的手轮转向应与校准过程中的转向一致。**

(2) 按原方向转动微调手轮（改变d值），可以看到一个一个干涉环从环心冒出（或缩进）。当干涉环中心最亮时，记下活动镜位置读数 l_1 ，然后继续缓慢转动微调手轮，当冒出（或缩进）的条纹数 $N_i=100$ 时，再记下活动镜位置读数 l_2 ，反复测量多次。由（2）式，用逐差法算出波长，并与标准值（ $\lambda_0=632.8\text{nm}$ ）比较，计算相对不确定度。

(3) 数据处理：

测量数据表 $\lambda_0=632.8\text{nm}$, $N=500$ 单位：mm

测量次数	l_1 (l_2)
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	
...	

$$\lambda = \frac{2\Delta d}{N} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ nm}, \quad E = \frac{|\lambda - \lambda_0|}{\lambda_0} = \underline{\hspace{2cm}} \%$$

六、思考题：

1. 在单色光干涉的条件下，去掉补偿镜是否影响实验的正常进行？
2. 测He-Ne激光波长时，要求N尽可能大，为什么？测量数据的处理方法是什么？

实验十八 棱镜玻璃折射率的测量

一、目的：

学会用分光计测量三棱镜玻璃的折射率。

二、仪器用具：

1、分光计； 2、汞灯； 3、三棱镜； 4、读数小灯； 5、钠灯；

三、原理：

棱镜玻璃折射率的测量，如图1所示，光线PO经待测棱镜的两次折射后，沿OP'方向射出时产生的偏向角为 δ ，在入射光线和出射光线处于光路对称情况下，

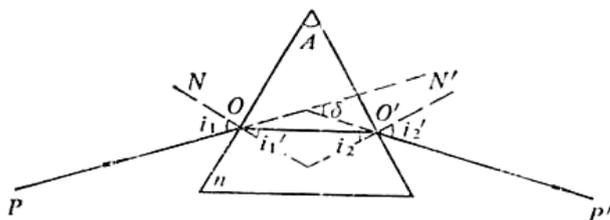


图 1

即： $i_1 = i_2'$ 偏向角为最小，记为 δ_{\min} 有如下关系：

$$n = \frac{\sin \frac{A + \delta_{\min}}{2}}{\sin \frac{A}{2}} \quad \dots\dots\dots (1)$$

因此，只要测出A与 δ_{\min} 就可依 (1) 式求出折射率n。

由于透明材料的折射率是光波波长的函数，同一棱镜对不同波长的光具有不同的折射率，所以当复色光经棱镜折射后，不同波长的光将产生不同的偏向角而被分开，通常在不考虑色散的情况下，棱镜的折射率是对钠光波长5893埃而言。

本实验要求测定棱镜对 $\lambda_1 = 4358 \text{ \AA}$ ； $\lambda_2 = 5461 \text{ \AA}$ ； $\lambda_3 = 5893 \text{ \AA}$ 。三条光谱线的折射率。

四、步骤和要求:

- 1、按《分光计的调节和使用》实验中的分光计调节要求,把分光计调节好(见105页)。
- 2、将已知棱镜角 A 的待测棱镜按图2所示放置在载物平台上,放松望远镜止动螺钉和游标盘止动螺钉,把载物台及望远镜转至如图2中所示位置 T_1 处,再左右微微转动望远镜,找出棱镜出射的各种颜色的汞灯的光谱线。
- 3、轻轻转动载物台(改变入射角 i_1),在望远镜中将看到谱线跟着移动,改变 i_1 应使谱线往 δ 减小的方向移动(向顶角 A 方向移动)。望远镜要跟

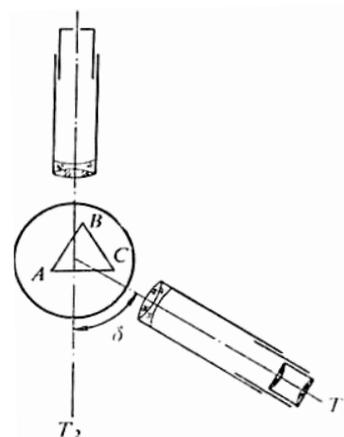


图 2

动,改变 i_1 应使谱线往 δ 减小的方向移动(向顶角 A 方向移动)。望远镜要跟

直到棱镜继续转动,而谱线开始要反向移动(即偏向角反而变大)为止。这个反向移动的转折位置,就是光线以最小偏向角射出的方向。固定载物台,再使望远镜微动,使其分划板上的中心竖线对准其中的绿色谱线(5461 \AA)。

- 4、测量最小偏向角:记下此时两游标处的读数 θ_1 和 θ_2 ,拿下三棱镜(载物台保持不动),转动望远镜对准平行光管,即图2中所示位置 T_2 处,以确定入射光的方向,再记下两游

标处的读数 θ'_1 和 θ'_2 ,此时绿谱线的最小偏向角:
$$\delta_{\min} = \frac{|\theta_1 - \theta'_1| + |\theta_2 - \theta'_2|}{2}$$
,将

δ_{\min} 值代入公式(1)计算 n 。

- 5、将望远镜对准汞的明亮的紫谱线($\lambda=4358 \text{ \AA}$)重复上述步骤,找出棱镜对该谱线的最小偏向角的位置。

五、思考题:

- 1、测量最小偏向角位置稍有偏差带来的误差,为什么对实验结果仅产生较小的影响?