



# 大学物理实验 (1)

物理与天文学院  
物理实验教学中心

2025.02

# 目录

绪    论	2
第一章 实验数据及误差理论误差与数据处理（一）	4
第二章 基础物理实验（一）	18
实验一 基本测量工具的使用	18
实验二 液体表面张力系数的测量	24
实验三 电流场模拟静电场	26
实验四 理想气体状态方程	31
实验五 冷却法测量金属的比热容	36
实验六 弦线上波的传播规律	40
实验七 分光计的调整和使用	45
实验八 金属杨氏弹性模量的测量	51
实验九 声速的测量	57
实验十 惠斯通电桥测电阻	62
实验十一 电势差计	67
实验十二 薄透镜焦距的测量	73
实验十三 仿真实验——基本电学量的测量	78

# 绪 论

## 一、实验的意义，物理实验课的教学目的

物理实验教学大纲指出：物理学是一门实验科学。物理概念的确立，物理规律的发现，都必须以严格的科学实验为基础，必须概括大量的实验结果，并且为以后的生产实践和科学实验所检验。离开了科学实验，就谈不上物理学的建立和发展。在当前物理学各个领域的发展中，实验更有着特殊重要的地位。为了培养合格的物理工作者，必须贯彻理论联系实际的原则，加强实验教学，对同学们的实验工作能力进行严格的训练和培养。所以，实验应单独设课，进行系统教学。

物理实验是物理类专业的主要基础课之一，它的教学目的主要是：

1. 学习物理实验的基本知识，培养实验技能（包括仪器使用、测量技术、实验方法、实验数据的处理、实验结果的判断和分析等）。
2. 通过实际的观察和测量，从理论和实际的结合上深入认识物理现象，学习和掌握基本的物理概念和规律。
3. 培养认真严肃、实事求是的科学态度和工作作风。

总之，通过实验课教学，培养同学的实验技能，更好地培养同学分析问题和解决问题的能力。

## 二、实验课各教学环节及其要求

物理实验是主要基础课之一，要求同学以认真、严肃的态度，在教师的指导下，充分发挥积极性，主动地克服困难，努力学好，为了做好每一个实验，必须做好三个环节的工作。

1. 预习：预习就是在实验前仔细自学实验讲义。其任务是：明确本次实验的目的和要求；弄懂实验原理或方法；弄清楚要测量哪些量，用什么仪器测和怎样测；了解仪器的规格、工作原理和使用方法；留心注意事项。经验证明，预习的好坏，常常关系到做实验的成败、有无收获、超不超时、出不出事故等。因此，没有预习好的学生，就无权进行实验。
2. 做实验，一般说来有以下过程：

（一）调整仪器：在对所用仪器了解清楚的基础上，根据测量要求和操作方便的原则，将仪器放在合理的位置，并注意整齐美观。然后按操作规程，有目的、有步骤地调节仪器，使其达到能正式测量的要求。仪器没有调整好，常常无法进行测量或得出错误的结果。实际上操作的困难，往往也就在于调整仪器。因为调整仪器，除了必须懂得方法外，还需丰富的经验和熟练的技巧。要战胜这个困难，必须在实践中勤学苦练。如果十分仔细地完成了调整工作，那么，测量的进行就很简单，并且很快就会得出正确的结果。

（二）测量：在考虑好整个实验的测量程序以后（如哪些量先测，哪些量后测）。就要有条不紊地顺序测量，并认真读取数据和记录数据。测量的整个过程中，都要保持仪器的正常和安全。

（三）处理数据：根据所测数据，用适当的方法，算出测量结果，或作出所要求的实验曲线。数字计算也应条理分明，便于复查。如课堂上处理不完，可带下去处理。

应当指出：堂上的实际操作，是锻炼实际工作能力的决定性环节。因此，不只是要求完成测量

和得出结果，而且要求通过对实际现象的观察、测量和分析，获得实际知识，提高观察能力、操作能力和分析能力，这就不应当只是机械地执行测量步骤或抱单纯任务观点，而是应当联系和运用理论知识，认真观察，积极思考，加深对物理现象，物理规律的认识。结合实际操作，反复捉摸测量方法和使用仪器的技巧。

3. 写实验报告：写实验报告是对一个实验进行总结，它可起到巩固和深化实验收获，训练概括和表达能力的作用。报告中，一般包括下列几项：

- （一）实验者姓名、院系、年级、组别。
- （二）实验进行的时间、地点。
- （三）实验名称及目的要求。
- （四）实验原理简述及公式。
- （五）主要仪器（记下名称、规格和编号）。
- （六）数据处理表格和必要的实验曲线。
- （七）讨论和意见等。

报告要求字迹清楚，句段分明，图表整洁。

以上是每一次实验的三个教学环节。在做完几个实验或一个阶段的实验后，可进行复习，讨论和小结。

# 第一章 实验数据及误差理论误差与数据处理（一）

## § 1 有效数字

### 1.1 有效数字

进行物理实验，总是要对某些物理量进行测量，而测得的数值（或数据）称为测定值（或实验值）。由于人的判断能力有限和仪器的精度各不相同等等主要客观因素的存在，因而在任何测定值与其“真值”之间都存在着某种程度的差异。即是说测量会有某种程度的误差发生。因此，测定值一般都是写到开始发生误差的那个数字为止。这样可以反映测量是在那一个数位上开始发生误差。例如，用正常的最小分格为毫米的米尺去测量一段金属丝的长度，测量结果表为 5.46 厘米，这就意味着该测定值在毫米的下一位“6”这个位数上开始发生误差，其中“5.4”这两个数字称为可靠数字。而“6”是估计出来的，不一定可靠，故称“6”为可疑数字，但它还有参考价值，应给以保留。5.46 厘米这个测定值有三个数字，就称该测定值有三位有效数字，如果用米作单位，写为 0.0546 米，仍为三位有效数字，因为数字“5”前面的“0.0”不算有效数字，它们只表示单位不同而出现的数位。若是用微米作单位（1 微米= $10^{-4}$  厘米），写成  $5.46 \times 10^4$  微米，还是三位有效数字。“ $10^4$ ”只表示单位不同而出现的数量级。但是，一定不能写为 54600 微米，因为，这种写法是五位有效数字，表示误差在微米数位（最末尾“0”）上开始发生，与测量时误差在 100 微米数位“6”上开始发生的实际情况不符合。从测量的观点来说，54600 微米和  $5.46 \times 10^4$  微米这两种不同的写法，表示两者的准确度时大不相同的。前者的准确程度比后者约高 100 倍。

综上所述，测量中的有效数字，一般是指测定值从第一个不为“0”的数字起写到开始有误差的数字为止的那群数字。它有几位就叫做几位有效数字。有效数字是从测量既准确而又不能绝对准确的客观现实提出的，它表示测量的大致准确程度。对同一个量来说，有效数字的位数愈多，就表示测量的准确度愈高。一个科学技术工作者，若对有效数字的概念不清楚或对它重视不够，任意增减有效数字的位数是脱离实际的表现，因此，实验中的测量数据，都要求用有效数字来表示。

### 1.2 有效数字概念应用举例

1. 判别测定值（或手册中所列物理学常数）有几位有效数字时，注意数值前的“0”不算有效数字，而在中间的“0”和末尾的“0”要算有效数字。例如，测定值“0.3020”有四位有效数字；“ $1.60 \times 10^3$ ”有三位有效数字。又如从手册中查到水在  $11.5^\circ\text{C}$  时的密度为 0.999580 克/厘米<sup>3</sup>，有六位有效数字。

2. 从仪器上直接读取数据时，一般都读到仪器最小分格的下一位。例如，经常用的最小分格为  $1^\circ\text{C}$  的温度计测量室温下水的温度，应记录到  $1^\circ\text{C}$  的下一位，若温度计上的示数恰为  $19^\circ\text{C}$ ，也必须记录为“ $19.0^\circ\text{C}$ ”。这个小数点后的“0”是有效数字，是有意义的，不能任意去掉。将末尾的有效数字的“0”随便去掉，这是初学者最容易犯的毛病，请注意！如果误差确实在仪器最小分格数位上开始

发生，就记录到最小分格值。

3. 当测定值本身很大而有效数字位数又少发生矛盾时，就采用“科学式”写法来表示。例如，测定值 65 米，是两位有效数字，若用厘米作单位，就写成科学式  $6.5 \times 10^3$  厘米，仍是两位有效数字，采用科学式不仅解决了上述矛盾，而且还有简单明了的作用。又如测定值 0.0000184，写成  $1.84 \times 10^{-5}$  这就简单明了多了。所以测定值一般都用科学式表示。

### 1.3 有效数字运算规则

实验中最终要测定的物理量，常常不是象上面所举的例子那样简单，而是要经过数字运算才能得到最后的结果（见后面运算规则应用举例），由于参加运算的数据绝大多数都是位数有限的有效数字，因而运算所得的结果也只能是位数一定有效数字。位数算多了既浪费时间，又不符合测量的实际情况；位数少了，必然牺牲测量的准确程度，也违反实际。为此，人们在实践中，根据确保计算质量而又省事的原则，总结出有效数字（或近似数）的运算规则。我们不去讨论总结的过程，只把常用到的两条规则介绍如下：

1. **加减规则：**几个数值相加减时，先以小数点后位数最少的那个数值作为“基准”，将其他数值的小数点后的位数调整到比“基准”的多一位，再进行计算，其结果中应保留的小数点后的位数与“基准”的相同，例如：

$$43.346 + 36.2 - 18.751 = 43.35 + 36.2 - 18.75 = 60.8$$

2. **乘除规则：**几个数值相乘除时，先以有效数字位数最少的那个数值作为“基准”，将其他数值的有效位数调整到比“基准”的多一位，再进行计算，中间结果应保留的有效位数也比“基准”多一位，最终结果应保留的有效位数与“基准”的相同，或少一位（若最终结果第一个数字比“基准”的第一个数字小得多时，则多一位；反之，大得多时，则少一位）。例如：

①  $1.583 \times 7.4 \div 1.796 = 1.58 \times 7.4 \div 1.80 = 6.5$

②  $9.6 \times 1.349 = 9.6 \times 1.35 = 13.0$ （比“基准”的多一位）

③  $1.8976 \div 2.06 = 1.898 \div 2.06 = 0.92$ （比“基准”的少一位）

有效数字的乘方和开方，其结果中应保留的有效位数与乘除规则相同。

再说明几点：

①尾数的舍入现在都采用更合理的“四舍五入五凑偶”法则。“四舍”：若舍去部分第一个数字为 4 或小于 4 则舍。

“五入”：若舍去部分第一个数字大于 5 及等于 5 且后面的数字不为“0”则入。

“五凑偶”：若舍去部分第一个数字为 5，且 5 后面的数字为“0”则凑偶。即 5 前面的一个数字为奇数则入，凑成偶数，5 前面的数字为偶数则不入，保持原来的偶数。

②如果估算了实验最终结果的误差，则最终结果的有效位数由误差决定（见后述）。

③在数字运算中，除了有效数字外，还经常出现另一类数。例如：计算圆面积

$$S = \frac{1}{4} \pi d^2 \quad (d \text{ 为圆的直径})$$

公式中的 1, 4 和  $\pi$  这些数，可认为有效位数是无限的，需要几位就可

以写几位。因此,在运算中,不能把这类数选作“基准”。

④测量中的有效数字,它的末位可疑数字上可能有 $\pm 1$ 到 $\pm 9$ 个单位的误差,当没有具体指明它的误差有多大时,有时讨论问题,可假定可疑数字上的误差是 $\pm 1$ 个单位。

#### 1.4 有效数字运算规则应用举例

例 1:用静止液体中称衡法测一固体的密度,计算公式为:

$$\rho = \frac{m}{m - m'} \rho_0$$

测得  $m = 3.93$  克.  $m' = 2.32$  克

在室温  $11.5^\circ\text{C}$  下水的密度  $\rho_0 = 0.999580$  克/厘米<sup>3</sup>

1. 按有效数字运算规则运算:

因  $m - m' = 3.93 - 2.32 = 1.61$  克(三位)

故取  $\rho_0 = 1.000$  克/厘米<sup>3</sup>,代入公式计算

$$\rho = \frac{3.93}{1.61} \times 1.000 = 2.44 \text{ 克/厘米}^3 \text{ (取三位)}$$

欲考查这样运算是否符合实际,我们可假定  $m'$  的测量在末位上发生一单位的误差,即令  $m' = 2.33$  克,则  $m - m' = 1.60$  克,由此算得:

$$\rho = \frac{3.93}{1.60} \times 1.000 = 2.46 \text{ 克/厘米}^3$$

可见,上述测量密度 $\rho$ 的结果算到三位有效数字是符合实际的。

2. 墨守成规地搬用绝对准确数的方法计算:

$$\rho' = \frac{3.93}{1.61} \times 0.999580 = \frac{3.9283494}{1.61} = 2.439968 \dots \text{ 克/厘米}^3$$

可见第二种计算方法,既浪费时间,结果又不符合实际,多保留了一些不必要的数字,增多了计算手续,数字愈来愈复杂,因而在计算过程中引起误差的机会也增多,致使算出的结果往往还是错误的。显然,这是少慢差费的道路。

例 2:单摆测量重力加速度  $g$ ,计算公式为

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

式中  $l$  为摆长,  $T$  为周期,测定值  $l = 100.0$  厘米,  $T = 2.009$  秒。

因  $l$  和  $T$  均为四位有效数字,故  $\pi$  取五位,即  $\pi = 3.1416$ ,代入公式

$$g = 4\pi^2 \frac{l}{T^2} = 4 \times (3.1416)^2 \times \frac{100.0}{(2.009)^2} = 4 \times 9.8696 \times \frac{100.0}{4.0360} = 39.478 \times \frac{100.0}{4.0360} \\ = 978.2 \approx 978 \text{ 厘米/秒}^2$$

这里最终计算结果的第一个数字为“9”,它比作为“基准”的  $l = 100.0$  厘米的第一个数字“1”大得

多，按有效数字运算规则， $g$  的最终结果取三位有效数字就足够了（比基准的少一位，这样处理是符合实际的）。因为，无论是  $l$  或  $T$  的测量在末位发生一个单位的误差，都会影响到  $g$  的测量结果在个位数字“8”上开始发生误差（同学可自行演算）。

脱离实际者，觉得周期 2.009 秒有四位有效数字。而在计算中它既是分母（除数），又有平方，把 2.009 代入去计算嫌太麻烦，就马虎从事，用 2 取代，其结果

$$g' = 4 \times (3.1416)^2 \times \frac{100.0}{2^2} = 987 \text{ 厘米/秒}^2$$

这样，计算到省事一些，但与上述按规则运算的结果比较差别较大，即无谓地牺牲了测量的准确程度，违反了实际。这就不是实事求是的科学态度。

目前在实验室，大多采用计算器对测量数据进行运算，由于计算器具有运算快速准确等特点，所以计算手续大为简化。计算时根据有效数字运算规则选定好“基准”，将所测数据（不必取舍）直接输入计算器进行运算，其结果的位数与基准相同或多一位或少一位。

## § 2 误差及基本数据处理

### 2.1 误差的来源及分类

用有效数字来表示测量的准确程度，其优点是比较省事，而且也能满足某些测量的实际要求。但是对于要求较高的测量，除了有效数字外，还必须指出误差范围。在讨论如何估算误差之前，本节先简单介绍测量误差的来源和分类。

待测之量的测定值与其“真值”之间的差异，叫做测量误差，即

$$\text{测量误差} = \text{测定值} - \text{“真值”}$$

误差的来源是很多的，主要的有：仪器的缺陷，实验者的习惯不良和感觉器官判别能力有限，环境的影响以及实验方法不周到等等。根据误差的来源，可把误差分为仪器误差，个人误差和外界误差等。

为了便于估算误差和分析处理误差问题，根据误差的性质，一般分为三类：系统误差，偶然误差和粗差（过失误差）。

#### 一、系统误差：分为恒定系统误差和可变系统误差。

（一）恒定系统误差：在同样实验条件（同一情况、同一人、同一仪器，同一方法）下，对某个量反复进行多次测量时，各次测量值都比“真值”大一个一定的数值，或者都比“真值”小一个一定的数值，即是说各次测量误差的正负和大小都相同。具有此种性质的误差叫恒定系统误差。产生恒定系统误差的原因有如下几个因素：

1. 实验者方面例如，从仪器上读取数值，每次都以差不多的角度斜视，显然，各次测量误差也是大致相同的。

2. 仪器方面：例如，尺子长了或短了一点，天平两臂不等长等，则各次测量误差常是相同的。

3. 外界因素和实验理论（或方法）方面：例如，用天平称质量时，没有考虑空气的浮力，用静止液体中称衡法测物体密度时，没有考虑水的密度随温度变化，没有满足在使公式成立的条件下作实



验的情形等，可见这些因素，对各次测量所引起的误差，也常是相同的。

**（二）可变系统误差：**在实验条件改变时。按某一确定规律变化的误差，叫可变系统误差。根据变化的规律不同，又可分为线性系统误差，周期性系统误差和复杂规律系统误差等等，

1. 周期性系统误差：例如刻度盘偏心所引起的误差。
2. 线性系统误差：例如尺子长度随温度变化引起的误差。
3. 规律复杂的系统误差：例如仪表各条刻度线不正确而引起的误差。

对系统误差，只有查明产生的原因及其规律，才有可能找出适当的方法，使之消除或减小。

## 二、偶然误差（随机误差）

在同样实验条件下，对某个量反复进行多次测量时，各次测量值有些比“真值”大，大多少不一样，有些比“真值”小，小多少，也不相同。即是说各次测量误差的正负和大小都不固定。具有此种性质的误差，叫偶然误差。

产生偶然误差的原因，主要是实验者的观测判断能力有限。以及随着测量而来的不能预料的许多其他偶然（随机）因素（如干扰等）。例如，测透镜焦距，我们很难判断把透镜放在什么位置上而屏上的像恰好明显，因此，各次测量透镜所在位置的误差的正负和大小是不固定的。又如，电源时高时低，这样给实验带来的误差也是不相同的。

偶然误差虽然大小和正负都不固定，但是在同样实验条件下重复多次测量时，可以发现偶然误差服从统计规律，其特点之一是：**绝对值相等的正误差和负误差出现的机会相等**。由此可以想到，随着测量次数增多，偶然误差的算术平均值将愈来愈趋近于零，多次测量的算术平均值愈来愈接近“真值”，这就意味着偶然误差可用增加测量次数的方法来使其减小。

## 三、粗差（过失误差）

**明显歪曲测量结果的误差叫粗差。**

粗差是实验者的错误或过失所造成的。例如，仪器还未调整到正常工作状态就进行测量，数字读错（3 读成 8）记错（1243 记成 1234）以及计算错误等等。含有粗差的测量值称为坏值或异常值。

强调一点：**正确的测量结果，不应包含粗差**。因为粗差是可以避免的，其方法是提高对工作的责任感，克服粗枝大叶的作风，耐心重复检查和核对数据，包含粗差的坏值还可用适当的判别方法加以剔除（以后再介绍）。所以，在误差分析时，要估计的误差，只有系统误差和偶然误差两类。

## 四、测量的精密度、准确度、精确度

在测量中往往会出现这种情况，即两个人对同一个物理量进行多次测量，一个人测得的数据很集中、而另一个人测得的数据很分散、但他们的平均值相同或者很接近、这是不是就能说他们的测量结果（或水平）是一样呢？不是的，因为对一个测量结果要用精密度、准确度、精确度三个指标来评价，这三个指标的涵义是不同的。现加以分别叙述。

**精密度：**是指测量数据分散和集中的程度，精密度高测量数据比较集中，随机误差较小，但系统误差大小不明确。

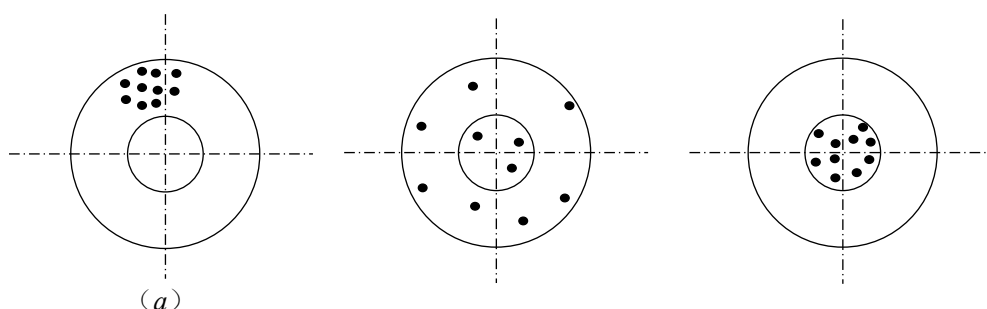
**准确度：**是指测量数据的平均值偏离“真值”的程度，偏离真值越小准确度越高，测量结果的

系统误差也较小，但数据分散的情况或者说随机误差的大小不明确。

**精确度：**是指测量数据集中在“真值”附近的程度，集中在真值附近的数据越多越密，测量的精确度就越高；此时测量的系统误差和随机误差都较小，精确度是对测量的系统误差和随机误差的综合评定。

图 1-1 以打靶时弹着点的情况为例，说明三个指标的意义：

- (a) 表示射击的精密度高但准确度较差；
- (b) 表示射击的准确度高，但精密度较差；
- (c) 表示精密度和准确度较好，即精确度高。



## 2.2 直接测量的数据处理

### 一、直接测量和间接测量

按获得测量结果的方式不同可把测量分为直接测量和间接测量两大类。

**直接测量：**例如用米尺测量长度、天平称质量等。即是被测量的数值可以从仪器上直接读得的测量。

**间接测量：**例如用单摆测重力加速度，静止液体中称衡法测固体的密度等。即是把被测量用一定公式联系起来，其它量可以直接测得或查表而得，然后，再按公式算出被测量的数值，绝大多数物理量的测量，都是间接测量，但它以直接测量为基础，其数据处理也是如此。

### 二、同样实验条件下，多次等精度测量的数据处理

数据处理的任务，是根据各次所测数据算出测量结果的最佳值和误差范围，以及正确表达测量结果，最关键的问题是误差范围的确定。这里我们只介绍偶然误差的一种处理方法（假定系统误差甚小，可以忽略），并且还是比较简单、比较粗略的方法即计算偶然误差中的平均绝对误差（或称平均绝对偏差）的方法。

假设对某个量进行了  $K$  次测量，其数据为  $n_1, n_2, \dots, n_k$ 。其“真值”设为  $n_0$ ，则各次测量的误差为：

$$\Delta n_1 = n_1 - n_0, \quad \Delta n_2 = n_2 - n_0, \quad \dots, \quad \Delta n_k = n_k - n_0$$

根据偶然误差的性质，当  $k \rightarrow \infty$  时，绝对值的正误差和负误差出现的机会相等。则有  $\Delta n_1 + \Delta n_2 + \dots + \Delta n_k = 0$

即  $(n_1 - n_0) + (n_2 - n_0) + \dots + (n_k - n_0) = 0$

由此得  $n_0 = \frac{n_1 + n_2 + \dots + n_k}{k}$  或  $n_0 = \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{\sum n_i}{k}$

这就说明无限多次测量的算术平均值，即是被测之量的“真值”。但是，实际测量只能是有限次，所以我们得不到“真值”，不过，有限次测量的算术平均值比各次测量值更接近于真值，因而把它作为测量结果的最佳值（或最可靠值），令  $N$  为有限  $K$  次测量的算术平均值，则测量结果的最佳值为

$$N = \frac{n_1 + n_2 + \cdots + n_k}{k} \quad (1-1)$$

$N$  与“真值”之间仍有误差，但我们无法求得这个误差。可是根据偶然误差服从统计规律这一性质，可以计算各种误差范围。用平均值  $N$  取代“真值”，则各次测量的绝对误差（或称偏差）为： $\Delta N_1 = n_1 - N$ ,  $\Delta N_2 = n_2 - N, \cdots, \Delta N_k = n_k - N$ 。则平均绝对误差为

$$\Delta N = \frac{|\Delta N_1| + |\Delta N_2| + \cdots + |\Delta N_k|}{k} \quad (1-2)$$

在要求不高的测量中，这时测量结果可粗略地表示为：

$$n_0 = N \pm \Delta N \quad (1-3)$$

（3）式说明被测量的“真值”  $n_0$  很可能在  $N - \Delta N \rightarrow N + \Delta N$  之间。

### 三、相对误差

测量结果的相对误差  $E$  定义为

$$E_N = \frac{\Delta N}{N} \quad (1-4)$$

表示测量结果的相对精确度。相对误差都用百分数表示，并且它更能确切地表示测量的精确程度[ 见下举例中的（4）]。

### 四、举例

我们以列表的方法（列表法），处理圆柱高度  $h$  和球体直径  $D$  的测量结果，如下表 1-1 和表 1-2，只考虑偶然误差：

表 1-1 测量圆柱高度  $h$

测量次数	$h_i$ (厘米)	$ \Delta h_i $ (厘米)
1	7.32	0.02
2	7.34	0.00
3	7.36	0.02
4	7.35	0.01
5	7.33	0.01
平均	7.34	0.012
测量结果	$h=7.34 \pm 0.01$ 厘米	
相对误差	$E_h = \frac{0.01}{7.3} = 0.14\%$	

表 1-2 测球体直径  $D$

测量次数	$D_i$ (厘米)	$ \Delta D_i $ (厘米)
1	1.21	0.008
2	1.22	0.002
3	1.21	0.008
4	1.23	0.012
5	1.22	0.002
平均	1.218	0.006
测量结果	$D=1.218 \pm 0.006$ 厘米	
相对误差	$E_D = \frac{0.006}{1.2} = 0.5\%$	

说明处理过程中的几个问题：

1. 算术平均值比各次测量值更准确，因此，算术平均值有时可比各次测量值多取一位有效数字（见表 1-2）。
2. 误差一般只需取一位有效数字就够了（见表 1-1、表 1-2）。在下述情况下，误差可以取二位有效

数字。

a.对于重要的或者极端精确的测量。

b.误差第一个数字很小，如 1~3。

c.误差处于中间计算过程。

3. 由绝对误差决定有效数字，这是处理一切有效数字问题的依据，测量结果的最佳值的有效数字末位应与绝对误差的末位对齐。如果绝对误差取了两位有效数字，例如表 1-1 中取平均绝对误差  $h=0.012$  厘米，则测量结果的表达式为

$h=7.34_0 \pm 0.01_2$  厘米，或  $h=7.340 \pm 0.012$  厘米，前者把绝对误差多取的一位数字，用小字表示。以强调最佳值有效数字的位数只计算到开始发生的那位为止，即三位有效数字。这两种写法的共同点，都是最佳值的末位与绝对误差末位对齐。如果写为

$h=7.34 \pm 0.012$  厘米或  $h=7.34_0 \pm 0.01$  厘米都是不允许的或错误的。

4. 测量结果的精确程度，可用有效数字的位数，绝对误差和相对误差来表示。但是，比较不同的两个量的测量精确程度时，用相对误差来比较最恰当，例如表 1-1 和表 1-2 的测量结果：

	有效数字	绝对误差	相对误差
测 $h$	3 位	0.01 厘米	0.14%
测 $D$	4 位	0.005 厘米	0.5%

正确的结论是，测量  $h$  比测量  $D$  更精确。

## 五、一次测量结果误差的估计

对一个量进行多次测量不总是可能的，有时我们只可能对某一量测量一次（如测量正在冷却的物体的不同时刻温度）；多次测量也不总是必要的，有时，由于某些原因，只需测量一次就便够了。这样对所测值便无法算出它的误差，而要估计误差，估计时是估计该值的最大误差。估计一次测量结果误差的主要依据是，所用仪器的精密度，观察时的环境条件以及实验者感官辨别能力等。在一般情况下，估计为仪器最小刻度的  $1/10$ ，甚至  $5/10$ 。例如：用米尺测量长度，测了一次，得  $l=10.23$  厘米，则可估计为  $\Delta l=0.02$  厘米， $\therefore l=10.23 \pm 0.02$  厘米；倘若观测是在黄昏进行，室内又无足够照明则  $\Delta l$  可估计为  $0.05$  厘米，又如所测的是悬挂线之长，由于挂得高观察不清。则估计的误差可以超过米尺的最小刻度  $1$  毫米。总之要根据实际情况来估计。

在估计了误差之后，测量结果即可表为：

$$n=N \pm \Delta N$$

## 2.3 直接测量的数据处理间接测量的误差计算

间接测量之量  $N$  是一些直接测量之量（如  $A, B, \dots$ ）的函数即  $N=f(A, B, \dots)$ 。由于有误差  $\Delta A, \Delta B, \dots$  存在，因而测量  $N$  也必然有误差  $\Delta N$ 。计算  $\Delta N$  的方法甚多，这里只介绍从最不利的情况出发，计算间接测量的极限误差（最大误差范围）。其计算程序，是先求出误差公式（ $\Delta N$  与  $\Delta A, \Delta B, \dots$  的关系式），再代数字计算。对于一些简单函数误差公式，可运用以下两个基本定理求得（一般函数关系的误差公式的求法，可参阅附录）。

**定理一：和或差的绝对误差等于各分量的绝对误差之和**

即：若  $N=A+B$  或  $N=A-B$ ，则

$$\Delta N = \Delta A + \Delta B$$

**定理二：积或商的相对误差等于各分量的相对误差之和**

即：若  $N = A \times B$  或  $N = \frac{A}{B}$ ，则  $\frac{\Delta N}{N} = \frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta B}{B}$

以上两个定理，我们不予分别证明，只以定理一中  $N = A - B$  的情况为例，简单说明如下：  
从最不利的情况出发（即假定  $\Delta A$ ， $\Delta B$  对  $\Delta N$  的影响是互相增强的）。

$$N \pm \Delta N = (A \pm \Delta A) - (B \mp \Delta B) = (A - B) \pm (\Delta A + \Delta B) = N \pm (\Delta A + \Delta B)$$

$$\therefore \Delta N = \Delta A + \Delta B$$

根据上述两个基本定理可得到以下的几个理论：

①若  $N = A + B + C + \dots$ ，则  $\Delta N = \Delta A + \Delta B + \Delta C + \dots$

②若  $N = A \times B \times C \times \dots$ ，则  $\frac{\Delta N}{N} = \frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta B}{B} + \frac{\Delta C}{C} + \dots$

③若  $N = A^k$  ( $k$  为常数)，则  $\frac{\Delta N}{N} = \frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta A}{A} + \dots = k \frac{\Delta A}{A}$

④若  $N = \sqrt[k]{A}$  ( $k$  为常数)，则  $\frac{\Delta N}{N} = \frac{1}{k} \frac{\Delta A}{A}$

⑤若  $N = KA$  ( $k$  为常数)，则  $\frac{\Delta N}{N} = \frac{\Delta K}{K} + \frac{\Delta A}{A} = \frac{\Delta A}{A}$  (常数的误差  $\Delta K = 0$ )

最后指出一点，上述定理和推论，是在  $A, B, C \dots$  于计算公式只出现一次的情况下而得出的，因此，在应用时应注意到这一点。

### 应用举例：

1、根据在具体实验条件下的测量结果算出误差范围。例如，测一铝杆的线胀系数  $\alpha$ ，计算公式如下：

$$\alpha = \frac{l_1 - l}{l_0(t_1 - t)}$$

式中  $(l_1 - l)$  表示温度由  $t$  变化到  $t_1$  时，铝杆长度的微量变化，这个长度微量变化用测微螺旋测量， $l_0$  为铝杆在  $0^\circ\text{C}$  时的长度。

上式中各量的测量结果如下：

$$t = (24.2 \pm 0.2)^\circ\text{C}, \quad t_1 = (93.5 \pm 0.2)^\circ\text{C}$$

$$l = (0.904 \pm 0.001) \text{ 厘米}, \quad l_1 = (0.997 \pm 0.001) \text{ 厘米}, \quad l_0 = (60.0 \pm 0.1) \text{ 厘米}$$

计算  $\alpha$  的测定值  $\bar{\alpha}$ ：

$$\bar{\alpha} = \frac{0.997 - 0.904}{60.0 \times (93.5 - 24.2)} = 2.24 \times 10^{-5} \text{ } 1/^\circ\text{C}$$

计算误差范围：按定理一， $(l_1 - l)$  和  $(t_1 - t)$  的绝对误差为

$$\Delta(l_1 - l) = \Delta l_1 + \Delta l = 0.001 + 0.001 = 0.002 \text{ 厘米}$$

$$\Delta(t_1 - t) = \Delta t_1 + \Delta t = 0.2 + 0.2 = 0.4^\circ\text{C}$$

按定理二， $\alpha$  的相对误差  $E_\alpha$ ，而

$$\begin{aligned} E_\alpha &= \frac{\Delta \alpha}{\alpha} = \frac{\Delta l_0}{l_0} + \frac{\Delta(l_1 - l)}{l_1 - l} + \frac{\Delta(t_1 - t)}{t_1 - t} \\ &= \frac{0.1}{60.0} + \frac{0.002}{0.093} + \frac{0.4}{69.3} = 0.17\% + 2.2\% + 0.57\% \approx 3.0\% \end{aligned}$$

$$\therefore \Delta \alpha = \bar{\alpha} \times 3.0\% = 0.07 \times 10^{-5} \text{ } 1/^\circ\text{C}$$

最后测量结果

$$\alpha = (2.24 \pm 0.07) \times 10^{-5} \text{ } 1/^\circ\text{C}$$

2、根据事先提出测量的精确程度来选定仪器和测量方法。例如：用单摆测重力加速度  $g$ ，要求测量  $g$  的相对误差  $E_g \leq 0.2\%$ ，我们应如何来实现这一要求

因  $g = 4\pi^2 l / T^2$  ( $l$  为摆长,  $T$  为周期), 根据定理二和推论 (3) 及 (5), 则  $g$  的相对误差为:

$$E_g = \frac{\Delta g}{g} = \frac{\Delta l}{l} + 2 \frac{\Delta T}{T} = 0.2\%$$

$\pi$  的取舍误差可以忽略不计。以上一个方程不能解出两个未知数  $\Delta l$  和  $\Delta T$ 。因而实际中, 人们常常采用“等效解法”。即假定:

$$\frac{\Delta l}{l} = 2 \frac{\Delta T}{T} \quad \text{由此可得}$$

$$\frac{\Delta l}{l} = 0.1\%, \quad 2 \frac{\Delta T}{T} = 0.1\%$$

或  $\Delta l = l \times 0.1\%, \quad \Delta T = \frac{T}{2} \times 0.1\%$

一般书上所列  $g$  值为 980 厘米/秒<sup>2</sup>, 当摆长  $l$  选取在 1 米左右, 则周期约为 2 秒, 这样

$$\Delta l = 100 \times 0.1\% = 0.1 \text{ 厘米}$$

$$\Delta T = \frac{2}{2} \times 0.1\% = 0.001 \text{ 秒}$$

由此可见, 测量  $l$ , 选用正常的毫米刻度尺, 就能达到要求。测量周期  $T$ , 若用 0.1 秒的停表只测一个周期, 是不能满足  $\Delta T = 0.001$  秒的要求。因为人们按停表时, 往往不能即时, 所产生的误差已经在 0.1 秒以上了。但是, 可以改进测量方法, 测量  $n$  个连续周期的时间来求平均值, 若测量  $n$  个周期的时间误差为 0.1 秒或 0.2 秒, 则周期数  $n$  取为 100 或 200, 就能达到  $\Delta T = 0.001$  秒的要求。

附:

一般函数  $N = f(A, B, \dots)$  的误差公式, 可借用全微分的方法再加上“最不利的条件”而求出, 即

$$\text{绝对误差} \quad \Delta N = \left| \frac{\partial f}{\partial A} \Delta A \right| + \left| \frac{\partial f}{\partial B} \Delta B \right| + \dots$$

$$\text{相对误差} \quad \frac{\Delta N}{N} = \frac{1}{f} \left[ \left| \frac{\partial f}{\partial A} \Delta A \right| + \left| \frac{\partial f}{\partial B} \Delta B \right| + \dots \right] = \left| \frac{\partial \ln f}{\partial A} \Delta A \right| + \left| \frac{\partial \ln f}{\partial B} \Delta B \right| + \dots$$

## § 3 不确定度

### 3.1 不确定度

误差与不确定度是不可分的, 二者紧密联系, 但在处理数据时又要有所侧重。两者之间的联系包括: 一是误差的来源决定了不确定度的类型, 也即由于测量有误差, 因而才要评定不确定度; 二是误差和不确定度都由系统和随机性造成。两者也是有区别的, 主要体现在: 误差是测量结果和客观的真值之间总有一定的差异, 是不可避免的, 而不确定度是对误差的评估方法, 包括对测量结果残存误差的评估和评定误差的范围。

**测量不确定度**是评定作为测量质量指标的此量值范围, 即对测量结果残存误差的评估。设测量值为  $x$ , 其测量不确定度为  $u$ , 则真值可能在量值范围  $(x-u, x+u)$  之中, 显然此量值范围越窄, 即测量不确定度越小, 用测量值表示真值的可靠性就越高。

不确定度分为两类: A 类标准不确定度和 B 类不确定度。

A 类标准不确定度：由于偶然效应，A 类标准不确定度用统计方法来评定。假定实验中对某一物理量进行多次测量某物理量，得  $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 。测量次数  $n$  充分多时，结果服从一定的统计规律——正态分布。这时的测量结果为：

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1-5)$$

相应的 A 类标准不确定度

$$u_A = S(\bar{x}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (1-6)$$

B 类评定的标准不确定度：非统计因素的不确定度，一般是由系统效应导致，它的来源较多。完整、准确地评定 B 类不确定度是一项复杂的工作。在本讲义中，仪器允许的极限误差是 B 类不确定度的主要来源，即  $u_B = \Delta_{\text{仪}}$ 。（ $\Delta_{\text{仪}}$  是指仪器的极限误差，误差与数据处理第二部分中详细介绍）

未标注时，仪器误差的估计方法：连续分度的仪器，仪器误差为最小刻度的一半；游标类仪器或数字表，仪器误差通常取最小刻度。

B 类评定的标准不确定度一般按如下规范计入不确定度：国家计量技术规范；计量仪器说明书或检定书；仪器准确度等级；仪器分度值或经验（粗略估计）等。

常见情况的 B 类不确定度评定如下：

- 当估计值受多个独立因素的影响，且影响大小相近时，可假设为正态分布  $u_x = \frac{a}{k_p}$ ；
- 当估计值取自相关资料，所给出的测量不确定度  $U_x$  为标准差的  $k$  倍时  $u_x = \frac{U_x}{k}$ ；
- 若  $x$  服从均匀分布，即若在区间  $(x-a, x+a)$  内的概率为 1，且在各处出现的机会相等，则

$$u_x = \frac{a}{\sqrt{3}};$$

- 当  $x$  受到两个独立且皆满足均匀分布的因素影响时，则  $x$  服从区间为  $(x-a, x+a)$  内的三角分布  $u_x = \frac{a}{\sqrt{6}};$

$$u_x = \frac{a}{\sqrt{6}};$$

- 当  $x$  服从区间  $(x-a, x+a)$  内的反正弦分布时，则其标准不确定度为  $u_x = \frac{a}{\sqrt{2}}$ 。

### 3.2 不确定度的合成及处理

介绍了不确定度及分类，我们更关心的是如何在实验中运用它来处理数据，下面我们介绍基于不确定度的测量结果评定，可以看到不确定的数据处理是基于误差的数据处理，他们之间有很多相似性。

#### 一、直接测量不确定度的合成

不确定度分成了 A 类和 B 类，在报导最终的结果时通常是将两者合成：

$$u_c(x) = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \approx \sqrt{S^2(\bar{x}) + \Delta_{\text{仪}}^2} \quad (1-7)$$

测量结果可以表示为：待测量=（近真值±标准不确定度）（单位）即

$$x = [\bar{x} \pm u_c(x)] \text{（单位）} \quad (1-8)$$

书写测量结果时应注意：

- （1）平均值、标准不确定度、单位三者缺一不可；
- （2）标准不确定度一般取一位有效数字，最多取两位有效数字；
- （3）平均值和不确定度二者的末位必须对齐；
- （4）平均值和不确定度的单位、数量级必须统一；

例 2：用最小分度为 0.01mm 千分尺多次测量某圆柱体的直径 D，得到数据：  
4.552mm、4.570mm、4.564mm、4.578mm、4.574mm，写出测量结果。

解：①计算平均值（中间过程多保留一位）

$$\bar{D} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n D_i = \frac{1}{5} (4.552 + \dots + 4.574) = 4.5676 \text{ (mm)}$$

②计算合成不确定度

A 类不确定度：

$$\begin{aligned} u_A = S(\bar{D}) &= \sqrt{\frac{\sum (D_i - \bar{D})^2}{n(n-1)}} \\ &= \sqrt{\frac{(4.552 - 4.5676)^2 + \dots}{5 \times 4}} = 0.0045 \text{ (mm)} \end{aligned}$$

B 类不确定度：  $u_B = \Delta_{\text{仪}} = 0.005 \text{ mm}$

$$\text{合成不确定度： } u_c(D) = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = \sqrt{0.0045^2 + 0.005^2} = 0.0067 \text{ (mm)}$$

③测量结果：  $D = (4.5676 \pm 0.0067) \text{ mm}$

或  $D = (4.568 \pm 0.007) \text{ mm}$

相对不确定度的计算和之前的相对误差相似，这里不再赘述。

## 二、间接测量不确定度的合成

如果一个物理量是由多个直接测量数据计算而来，那么利用函数可以计算他的不确定度。假设已测得数据  $\{x_i\}$ 、 $\{y_i\}$ 、 $\{z_i\}$ ，……利用函数关系  $N = f(x, y, z, \dots)$  求 N 的不确定度。这里的计算和前面介绍的误差传递方法是类似的，区别在于传递函数发生了变化。

1. 计算并写出各直接测定量的测量结果。

$$x = [\bar{x} \pm u_c(x)] \text{（单位）}, y = [\bar{y} \pm u_c(y)] \text{（单位）}, \dots$$

2. 将各直接测定量的算术平均值代入函数关系计算 N 的平均值。

$$\bar{N} = f(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, \dots) \quad (1-9)$$

3. 由函数关系推导不确定度的传递公式并计算。



$$u_c(N) = \sqrt{\left[\frac{\partial f}{\partial x} u_c(x)\right]^2 + \left[\frac{\partial f}{\partial y} u_c(y)\right]^2 + \left[\frac{\partial f}{\partial z} u_c(z)\right]^2 + \dots} \quad (1-10)$$

或者先计算相对不确定度，再计算不确定度的方法，如下式：

$$E(N) = \sqrt{\left[\frac{\partial \ln f}{\partial x} u_c(x)\right]^2 + \left[\frac{\partial \ln f}{\partial y} u_c(y)\right]^2 + \left[\frac{\partial \ln f}{\partial z} u_c(z)\right]^2} \quad (1-11)$$

$$u_c(N) = \bar{N} \cdot E(N)$$

4. 测量结果  $N = [\bar{N} \pm u_c(N)]$  (单位)

## 绪论课习题

1. 为什么要进行课前预习，课前预习有那些要求？

2. 什么叫有效数字？

3. (必做) 指出下列各数值中有几位有效数字。

① 0.0001 ( )      ② 1.0 ( )

③ 0.860 ( )      ④ 0.03010 ( )

⑤  $6.80 \times 10^2$  ( )      ⑥  $2.21 \times 10^{-5}$  ( )

⑦  $978.3 \text{cm}^2$  ( )      ⑧  $0.999580 \text{g/cm}^3$  ( )

4. (必做) 指出下列的表示式，哪些是正确的，哪些是错误的，并将错误的改正。(注：误差只取一位有效数字)

①  $(19.0 \pm 0.1)^\circ\text{C}$  ( )  $\rightarrow$  ( )  $^\circ\text{C}$

②  $(18.235 \pm 0.02) \text{cm}$  ( )  $\rightarrow$  ( )  $\text{cm}$

③  $(32.1 \pm 0.01) \text{g}$  ( )  $\rightarrow$  ( )  $\text{g}$

④  $(2.35 \pm 0.19) \text{s}$  ( )  $\rightarrow$  ( )  $\text{s}$

⑤  $10 \text{km} \pm 100 \text{m}$  ( )  $\rightarrow$  ( )  $\text{km}$

5. (必做) 测量线胀系数的公式为：

$$\alpha = \frac{d(h_1 - h)}{2Dl_0(t_1 - t)}$$

式中测量各量所用的仪器分别为：

$D, l_0, h_1, h$  用最小分格为毫米的米尺进行测量；温度  $t_1, t$  用最小分格为  $1^\circ\text{C}$  的温度计测量。

(注：以上的测量均测量到最小分格的下一位)； $d$  用精密度为  $0.05 \text{mm}$  的游标卡尺进行测量（在精密度上可能发生误差）。若对某一金属棒进行测量，那么（1）以上各量的测量的精确数值应是几位有效数字？并写出具体的值。（2）根据有效数字的运算规则，指出  $\alpha$  应取几位有效数字。（可不必算出数值）【说明：粗测  $D$  的大约数值为  $110 \text{cm}$ ， $l_0$  大约  $60 \text{cm}$ ， $h_1$  大约  $80 \text{cm}$ ， $h$  大约  $84 \text{cm}$ ， $d$  大约  $7 \text{cm}$ ， $t_1$  大约  $94^\circ\text{C}$ ， $t$  大约  $19^\circ\text{C}$ 。精确测量的数值在粗测的基础上你可以假设（注意：测量值在实验中是由测量仪器上读得的）】

6. (必做) 单位换算:

①  $t = (1.50 \pm 0.05) \text{ min} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ s} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ ms} = \underline{\hspace{2cm}} \mu\text{s}$

②  $m = (1.75 \pm 0.01) \text{ kg} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ g} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ mg}$

③  $h = (8.54 \pm 0.03) \text{ cm} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ mm} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ m}$

7. (必做) 有一柱形圆筒, 测得: 外半径  $R = (23.75 \pm 0.02) \text{ cm}$ ; 内半径  $r = (16.20 \pm 0.02) \text{ cm}$ ; 高  $h = (8.84 \pm 0.02) \text{ cm}$ 。[注:  $R$ 、 $r$ 、 $h$  均已表成  $N = \bar{N} \pm \Delta \bar{N}$ ; 下面遇到的三连等号分别填公式、数式、结果]。那么,

① 此圆筒的壁厚  $L = R - r$  的绝对误差  $\Delta L = \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ cm}$ 。

② 外圆周长  $P = 2\pi R$ , 其绝对误差  $\Delta P = \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ cm}$ ;

相对误差  $E_P = \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{2cm}}$ 。

③ 外侧面积  $S = 2\pi Rh$ , 其最佳值  $\bar{S} = \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ cm}^2$ ;

其相对误差  $E_S = \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{2cm}}$ ;

绝对误差  $\Delta S = \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ cm}^2$ ;

计算结果表为  $S = \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ cm}^2$ 。

④ 内外半径比值  $k = r/R$  的相对误差  $E_k = \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{2cm}}$ 。

⑤ 内体积  $V = \pi r^2 h$ , 其最佳值  $\bar{V} = \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ cm}^3$ ;

相对误差  $E_V = \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{2cm}}$ ;

绝对误差  $\Delta V = \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ cm}^3$ ;

计算结果表为  $V = \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ cm}^3$ 。

8. (必做) 用最小分度为  $0.01 \text{ mm}$  千分尺多次测量某圆柱体的直径  $D$ , 得到数据  $10.075 \text{ mm}$ 、 $10.085 \text{ mm}$ 、 $10.095 \text{ mm}$ 、 $10.060 \text{ mm}$ 、 $10.085 \text{ mm}$ 、 $10.080 \text{ mm}$ , 用不确定度写出测量结果, 其中  $u_B = \Delta_{\text{仪}} = 0.005 \text{ mm}$ 。

## 第二章 基础物理实验（一）

本章安排力学、热学、电学、光学等方面的基础实验。实验内容包括基本物理量的测量，常用实验仪器的调整和使用。通过这部分实验教学，加强学生实验操作技能的训练，学习正确记录测量数据，初步掌握几种常用的实验数据处理方法和误差估算的方法。

### 实验一 基本测量工具的使用

长度和质量是重要的基本物理量，也是最基本的测量对象之一。

长度测量应用广泛，物理实验中往往通过各种转换，把其他的物理量通过长度来表示。因此，有关长度测量的方法和技术具有普遍的意义。生活中我们常常用卷尺或者皮尺来测量身高或者距离，这类长度都以米（m）作为计量单位，但使用时很少有人注意到所用卷尺可以精确到毫米（mm），实验更倾向于数据的精度分析。对于长度小至 0.01mm 的测量，需要更高精度的仪器，比如千分尺（螺旋测微器）或者游标卡尺，它们的计数原理和直接读数的米尺有明显区别，从中体现的物理思想和测量原理是学习的重点。

不易直接测量的长度，还可以借助光学手段进行测量，如光杠杆法、干涉法等，把光学原理运用到微小长度的测量当中。

质量测量可以使用物理天平或者精度更高的分析天平，本实验使用的是 0.01g 精度的电子天平。

#### 一、实验目的

1. 学习游标卡尺、螺旋测微计、读数显微镜、电子天平等仪器的测量原理；
2. 正确使用刻度尺、游标卡尺、螺旋测微计、读数显微镜、电子天平等仪器；
3. 测量规则物体的密度；
4. 正确记录有效数字并进行运算，计算不确定度。

#### 二、实验原理

物体质量为  $m$ ，体积  $V$ ，那么它的密度为

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2.1.1)$$

密度是物质的重要物理参数之一。具有规则形状的固体只要测量出外观尺寸，计算出该固体的体积，再用电子天平测出质量，即可求得该固体的密度。

如图 2.1.1 所示长方体，利用直尺、游标卡尺、测微螺旋计等测出长、宽、高即可得知体积，使用天平测量质量即可计算出它的密度。

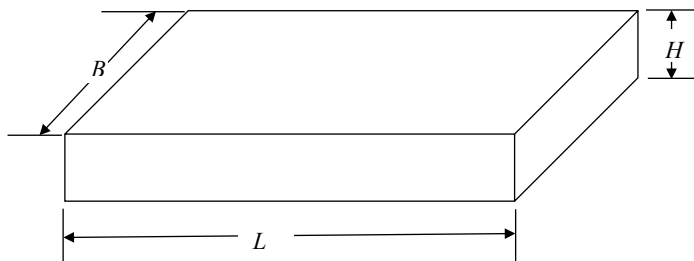


图 2.1.1 长方体的示意图

#### 三、实验仪器与用具

刻度尺、游标卡尺、千分尺、读数显微镜、电子天平。

#### 四、实验量具介绍

### (一) 刻度尺

在实验室中进行一般的长度测量，使用的是受环境条件（湿度、压力等）影响小、由不锈钢或铁镍铬合金等材料制成的直尺，即钢尺。它的量程有 15 cm、30 cm、100 cm 等多种规格，其最小分度值一般为 1 mm。测量长度时常估读 1/5 分度（0.2 mm）或 1/2 分度（0.5 mm）。

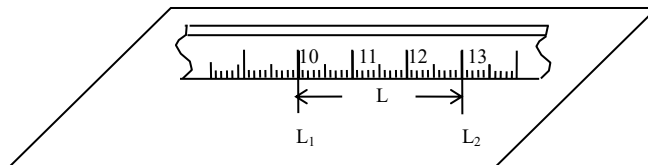


图 2.1.2 刻度尺测量长度

由于刻度尺有一定的厚度，为避免从不同角度观测时造成读数的偏差，应将刻度尺的刻度线紧贴在待测物体上方可读数（如图 2.1.2 所示）。在测量时，一般不用刻度尺的端边作为测量的起点，而选择某一刻度线（如 10 cm 刻线等）作为起点，以免由于边缘磨损而引入误差。

在测量垂直的或水平悬空长度时，由于刻度尺自重而造成的刻度尺弯曲变形会影响测量，因此要注意保持刻度尺尽量不变形，同时可适当将测量不确定度估计的大一些（如取 1/2 分度，即 0.5 mm）。

### (二) 游标卡尺

游标卡尺是用来测量内径、外径、长度和深度等长度量的工具，它的外形如图 2.1.3 所示。游标上一个最小分格与主尺上一个（或二个）最小分格之差的绝对值，称为游标的精密度。一切游标，都是根据游标上  $m$  个最小分格与主尺上  $m \pm 1$  个（或  $2m \pm 1$  个）最小分格等长来刻制的。游标原理还可用于角度的精确测量中。

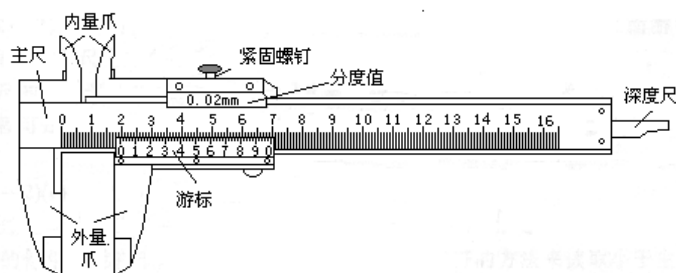


图 2.1.3 游标卡尺实物图

#### 1. 游标卡尺的结构

如图 2.1.3 所示，游标卡尺由主尺和游标两部分构成，游标套于主尺上并紧贴着主尺滑动，外量爪用于测量厚度和外径，内量爪用于测量内径，深度尺用于测量槽的深度，紧固螺钉用于固定量值读数。游标上根据不同的规格刻有 10，20 及 50 个小格等几种，刻有 10 格的游标称十分游标尺，其它的分别称为二十分游标尺及五十分游标尺。

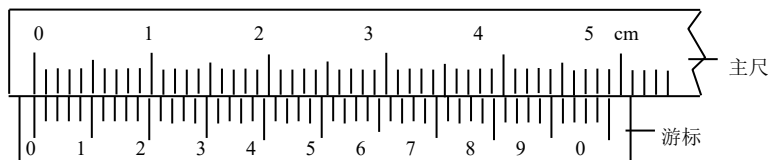


图 2.1.4 五十分游标尺

以五十分游标尺为例，见图 2.1.4。主尺最小分格值为 1 mm，游标上有 50 个分格，当量爪靠紧闭拢时，游标上“0”刻度线与主尺上“0”刻度线对齐，这时游标上最后一条刻度线“50”与主尺上 49 mm 对齐，即游标上 50 个小格的长度等于 49 mm，则每小格的长度为  $49/50 = 0.98$  mm，主尺上 1 小格与游标上 1 小格之差 = 0.02 mm，这个值称为“游标精密度”，用  $\Delta x$  表示。

#### 2. 读数原理

##### (1) 确定游标的精密度 $\Delta x$

任何游标的精密度都由下式确定

$$\Delta x = \frac{y}{m} \quad (2.1.2)$$

式中  $y$  为主尺上最小分格的长度； $m$  为游标最小分格数，例如图 2.1.4 的游标， $y=1\text{mm}$ ， $m=50$ ，故该游标的精密度  $\Delta x=0.02\text{mm}$ ，称为五十分游标卡尺；如  $y=1\text{mm}$ ， $m=10$ ，则  $\Delta x=0.1\text{mm}$ ，称为十分游标卡尺。

## (2) 读数

将被测物置于量爪间卡住，读出此时游标“0”线在主尺上的位置  $M$ ，若游标“0”线与主尺上的第  $k$  ( $k=0、1、2 \dots\dots$ ) 条刻度线对齐，则读值为  $ky$ ；如果游标“0”线在主尺上第  $k$  和  $(k+1)$  条刻度线之间，若游标上第  $n$  条刻度线与主尺上某条刻度线对齐（或最接近），这时的读数值为

$$M = ky + n\delta x \quad (2.1.3)$$

例如图 2.1.5，游标“0”线在主尺上第 3 和第 4 条刻度线之间，而游标上第“37”条刻度线与主尺上某条刻度线对齐，故  $M = 3 \times 1 + 37 \times 0.02 = 3.74$  (mm)。

由上述过程可知，被测物体的长度  $l$  等于游标“0”线在主尺上移动的距离。因此，图 2.1.5 中  $l=3.74\text{mm}$  或  $0.374\text{cm}$ 。

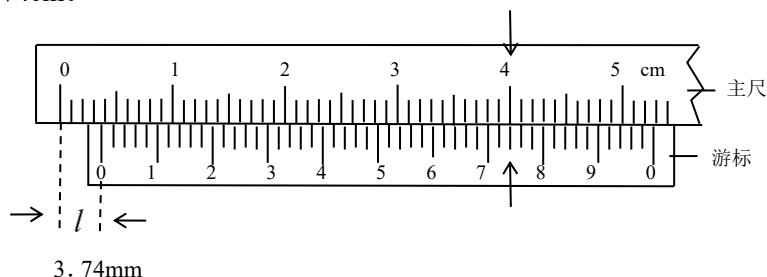


图 2.1.5 游标读数

## 使用游标卡尺应注意：

1. 主尺的单位和游标的单位要统一。
2. 被测物长边必须与主尺平行，不能使被测的物体卡得过紧使之变形，防止磨损钳口和污染刻度线。
3. 使用游标卡尺时，一手拿物体，一手持游标卡尺，将物体轻轻卡住，即可读数。注意保护抓不被磨损，决不允许被卡住的物体在量爪间挪动。游标卡尺的外量爪用来测量厚度或外径，内量爪用来测量内径，深度尺用来测量槽或筒的深度，紧固螺丝用来固定读数。

## (三) 测微螺旋计

测微螺旋计是一种利用测微螺杆的角位移转变为直线位移来测量微小长度的长度测量仪器，其构造如图 2.1.6 所示，在一个固定套筒上套有一个活动套筒，两者由高精度密纹紧密咬合。活动套筒与测量轴相连，转动活动套筒可带动测量轴伸出与缩进。活动套筒转动一周 ( $360^\circ$ )，测量轴伸出或缩进 1 个螺距。因此，可根据活动套筒转动的角度求得测量轴移动的距离。这就是所谓“机械放大”。在活动套筒的尾端装有一个棘轮，它转动时可

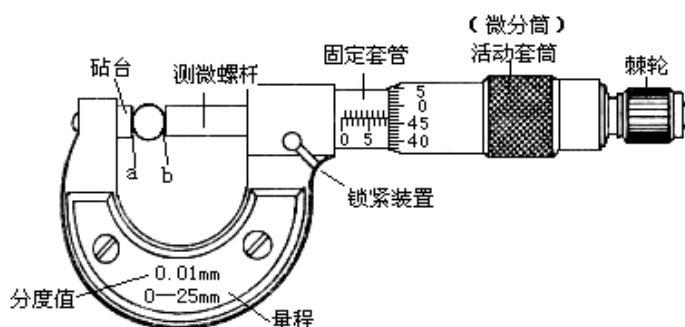


图 2.1.6 测微螺旋计

带动活动套筒旋转，但阻力过大时，棘轮会空转，即不带动套筒旋转。这保证了待测物体在砧台口与测量轴间不会被夹得太紧而变形，从而影响测量结果。固定套筒与砧台以一个弓形的支架相连，称为“弓架”，测量时一般左手持弓架，右手转棘轮。在弓架上还装有一个锁紧手柄，把它向左扳动，

可锁住测量轴。

如图 2.1.6 所示的千分尺螺距为 0.5mm，活动套筒的周界被等分为 50 格，故活动套筒转动一格，测量轴相应地移动  $0.5/50=0.01\text{mm}$ ，再加上估读，其测量精度可达到 0.001mm。读数时，先读固定套筒上标尺的数值，再加上活动套筒上标尺的数值。读数时应特别注意活动套筒上的读数是否过“0”（整刻度）和“0.5”（半刻度），下面以半刻度为例来说明。如图 2.1.7（a）所示，结合活动套筒上的读数和固定套筒上的标尺刻度，可以判断出活动套筒标线已经通过“0.5”刻度线，因此读数应为  $5.5+0.157=5.657\text{mm}$ ；而如图 2.1.7（b）所示，结合套筒上读数可知，活动套筒标线尚未通过固定套筒上“0.5”刻度线，因此读数应为  $5+0.458=5.458\text{mm}$ 。当活动套筒的标线在整刻度（如 0，1，2...）附近时，同样需要注意活动套的读数来确定活动套筒的标线是否通过整刻度。



2.1.7 螺旋测微计读数示意图

#### 使用千分尺应注意：

（1）要使测量轴向砧台靠近以夹住待测物，必须使用棘轮而不可直接转活动套筒，听到“咯咯”声即表示已夹住待测物体，棘轮在空转了，这时应停止转动棘轮，进行读数；不应将被夹住的待测物拉出，以免磨损砧台和测量轴。

（2）当砧台和测量轴间无任何物体时，转动棘轮至听到“咯咯”声，此时的读数为“零读数”（系统误差）。以后的测量读数要减去此“零读数”，才是真正的长度测量值。

（3）不使用千分尺时，要在砧台与测量轴留出少量空隙，以防砧台与测量轴受热胀冷缩而引起形变。

#### （四）读数显微镜

读数显微镜是可以测量微小长度的光学仪器，它的结构如图 2.1.7 所示，主要由显微镜部分和读数装置组成。

在使用读数显微镜前，应先仔细调节显微镜，消除视差。光学测量仪器的视差是由于被测物体的像与进行度量的标尺（或标线、网格）不处于同一平面，因此当观察者的眼睛移动时，象与标尺之间会产生相对位移。读数显微镜由物镜和目镜组成，它的标线（通常称为十字准线）位于物镜和目镜之间。为消除误差，应先调节（旋转）目镜，使十字准线清晰；再调节升降旋钮，使被测物的像也清晰。移动眼睛，如被测物的像与十字准线像没有相对位移，则表明它们已处于同一成像面。

读数显微镜的读数装置与千分尺类似，也应用了螺旋测微的原理。它的主尺量程是 50mm，最小分度是 1mm。鼓轮上有 100 个分度，鼓轮转动一周，整个显微镜水平移动 1mm，即鼓轮上的 1 个分度对应 0.01mm，其不确定度限值是 0.02mm。由于任何螺旋测量装置的内螺距误差之间必有间隙，故不同旋转方向所对应的读数必有差别，这种差别称为螺距误差。因此在用读数显微镜进行长度测量时应使十字准线沿同一个方向前进，与被测物两端对齐，中途不要倒退，从而消除螺距误差。

#### （五）电子天平

实验室常用的电子天平如图 2.1.8 所示。在使用电子天平时，按下开关钮，先进行 5 分钟左右的预热。在测量前先要调节天平立脚的高低，观察水平泡的位置；当水平泡位于中央时，天平即已调水平。称量前应先清零。

在使用电子天平称量时，应注意：

- (1) 电子天平应在无风、防震的环境中使用。
- (2) 不能用电子天平直接称量具有腐蚀性的物品。
- (3) 使用后，关断电源，将罩子盖好。



图 2.1.7 读数显微镜



图 2.1.8 电子天平

### 五、实验内容

1. 调节电子天平的水平，待天平稳定后，即可测量相机胶片的质量。（注意天平的清零）
2. 用钢尺测量相机胶片的长度。
3. 用游标卡尺测量相机胶片的宽度。
4. 用千分尺测量相机胶片的厚度。
5. 用读数显微镜测量齿孔的尺寸。（长和宽，计算齿孔的面积。齿孔四周的圆弧状量可忽略）
6. 计算相机胶片的平均密度及不确定度。

表 2.1.1 胶片密度测量数据 孔数  $n =$

物理量	测量仪器	分度值	测量次数					平均值
			1	2	3	4	5	
长 $L$	钢尺							
$\Delta L$								
宽 $B$	游标卡尺							
$\Delta B$								
厚 $H$	千分尺							
$\Delta H$								
齿孔长 $l$	读数显微镜							
$\Delta l$								
齿孔宽 $b$	读数显微镜							
$\Delta b$								
质量 $m$	电子天平							

$\Delta m$								
------------	--	--	--	--	--	--	--	--

体积  $V$  的平均值:  $\bar{V} = \bar{L} \times \bar{B} \times \bar{H} - (n \times \bar{H} \times \bar{l} \times \bar{b}) =$

质量  $m$  的平均值:  $\bar{m} =$

密度的平均值:  $\bar{\rho} = \frac{\bar{m}}{\bar{V}} =$

不确定度计算: A 类不确定度公式  $u_A = S(\bar{x}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}}$

直尺的 B 类不确定度为 0.3mm

游标卡尺的 B 类不确定度为 0.01mm

螺旋测微计的 B 类不确定度为 0.002 mm

读数显微镜的 B 类不确定度为 0.002 mm

电子天平的 B 类不确定度为 0.006g

以此计算各直接测量数据  $L$ 、 $B$ 、 $H$ 、 $l$ 、 $b$ 、 $m$  的合成不确定度

间接不确定度公式  $E(N) = \frac{u_c(N)}{\bar{N}} = \sqrt{\left[ \frac{\partial \ln f}{\partial x} u_c(x) \right]^2 + \left[ \frac{\partial \ln f}{\partial y} u_c(y) \right]^2 + \left[ \frac{\partial \ln f}{\partial z} u_c(z) \right]^2}$   
 $u_c(N) = \bar{N} \cdot E(N)$

密度相对不确定度:  $E_\rho =$

不确定度:  $u_\rho = E_\rho \times \bar{\rho} =$

密度测量结果:  $u_\rho = \bar{\rho} \pm \Delta \rho =$

## 六、思考题

1. 游标卡尺的精密度取决于哪些量?
2. 简述游标卡尺的三条使用原则。
3. 使用千分尺时, 棘轮的转动应注意什么?
4. 如何正确使用读数显微镜?



## 实验二 液体表面张力系数的测量

液体的表面张力是表征液体性质的一个重要参数。测量液体的表面张力系数有多种方法，拉脱法是测量液体表面张力系数常用的方法之一，拉脱法测定液体表面张力系数是基于液体与固体接触时的表面现象提出的。由分子运动论可知，当液体分子和与其接触的固体分子之间的吸引力大于液体分子的内聚力时，就会产生液体浸润固体的现象。该方法的特点是，用秤量仪器直接测量液体的表面张力，测量方法直观，概念清楚。用拉脱法测量液体表面张力，对测量力的仪器要求较高，由于用拉脱法测量液体表面的张力约在  $1 \times 10^{-3}$  至  $1 \times 10^{-2}$  N 之间，因此需要有一种量程范围较小，灵敏度高，且稳定性好的测量力的仪器。硅压阻式力敏传感器张力测定仪能满足测量液体表面张力的需要。

### 一、实验目的

1. 掌握用拉脱法测量微小力的原理和方法。
2. 了解液体表面的性质，测量室温下水的表面张力系数。

### 二、实验仪器

液体表面张力系数测定仪、力敏传感器支架、吊环、砝码等。

### 三、实验原理

测量一个已知周长的金属片从待测液体表面脱离时需要的力，求得该液体表面张力系数的实验方法称为拉脱法。若金属片为环状吊片时，考虑一级近似，可以认为脱离力为表面张力系数乘上脱离表面的周长，即

$$f = \alpha \cdot \pi(D_1 + D_2) \quad (1)$$

式中， $f$  为脱离力， $D_1, D_2$  分别为圆环的外径和内径， $\alpha$  为液体的表面张力系数，国际制中单位为牛顿/米，记为  $N \cdot m^{-1}$ ，数值上等于作用在液体表面单位长度上的力的大小。

硅压阻式力敏传感器由弹性梁和贴在梁上的传感器芯片组成，其中芯片由四个硅扩散电阻集成一个非平衡电桥。当外界压力作用于金属梁时，在压力作用下，电桥失去平衡，此时将有电压信号输出，输出电压大小与所加外力成正比。即

$$\Delta U = Kf \quad (2)$$

式中， $f$  为外力的大小， $k$  为硅压阻式力敏传感器的灵敏度， $\Delta U$  为传感器输出电压的大小。

### 四、实验装置

图 1 为实验装置图。其中，液体表面张力测定仪包括硅扩散电阻非平衡电桥的电源和测量电桥失去平衡时输出电压大小的数字电压表。其它装置包括铁架台、微调升降台、装有力敏传感器的固定杆，盛液体的玻璃皿和圆环型吊片。实验证明，当环的直径在 3cm 附近而液体和金属环接触的接触角近似为零时，运用公式 (1) 测量各种液体的表面张力系数的结果较为正确。

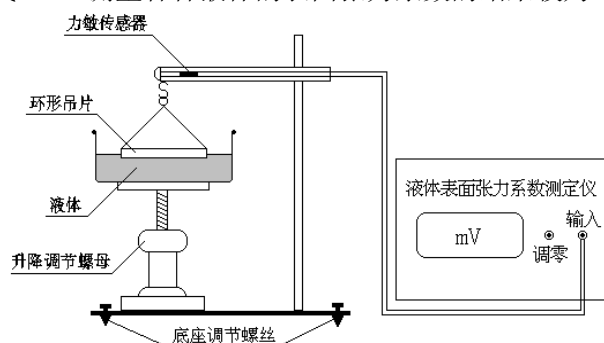


图 1 液体表面张力测定装置

## 五、实验内容及步骤

### 1. 力敏传感器的定标

每个力敏传感器的灵敏度都有所不同，在实验前，应先将其定标。步骤如下：

- 1) 打开仪器的电源开关，将仪器预热。若整机已预热 15 分钟以上，可对力敏传感器定标，在加砝码前应首先对仪器调零，安放砝码时应尽量轻。
- 2) 在传感器梁端头小钩中，挂上砝码盘，调节电子组合仪上的补偿电压旋钮，使数字电压表显示为零。
- 3) 在砝码盘上分别加 0.5g, 1.0g, 1.5g, 2.0g, 2.5g, 3.0g 等质量的砝码，记录相应这些砝码力  $f$  作用下，数字电压表的读数值  $U$ 。
- 4) 用最小二乘法作直线拟合，求出传感器灵敏度  $K$  及相关系数  $r$ 。

### 2. 环的清洁与测量

- 1) 用游标卡尺测量金属圆环的外径  $D_1$  和内径  $D_2$ 。
- 2) 环的表面状况与测量结果有很大的关系。实验前应将金属环状吊片在  $NaOH$  溶液中浸泡 20—30 秒，然后用清水洗净。
3. 测量液体的表面张力系数
  - 1) 将金属环状吊片挂在传感器的小钩上，调节升降台，将液体升至靠近环片的下沿，观察环状吊片下沿与待测液面是否平行。如果不平行，将金属环状吊片取下后，调节吊片上的细丝，使吊片与待测液面平行。
  - 2) 调节容器下面的升降台，使其渐渐上升，将环片的下沿部分全部浸没于待测液体。然后反相调节升降台，使液面逐渐下降。这时，金属环片和液面间形成以环形液膜，继续下降液膜，测出环形液膜即将拉断前一瞬间数字电压表读数值  $U_1$  和液膜拉断后一瞬间数字电压表读数值  $U_2$ ，

$$\Delta U = U_1 - U_2$$

- 3) 换另一个玻璃器皿，测量乙醇的表面张力系数，重复 1) 和 2)，。(表格自拟)
4. 将实验数据代入式 (1) 和 (2)，求出液体的表面张力系数，并与标准值进行比较。

#### 1. 传感器灵敏度的定标

重力加速度  $g = 9.783 \text{ m/s}^2$

砝码质量/g	0.500	1.000	1.500	2.000	2.500	3.000
输出电压/mV						

经最小二乘法拟合得  $K = \quad \text{mV/N}$ ，拟合的线性相关系数  $r = \quad$

#### 2. 水的表面张力系数的测量

金属环外径  $D_1 = \quad \text{cm}$  内径  $D_2 = \quad \text{cm}$  水的温度:  $\quad$

测量次数	$U_1/\text{mV}$	$U_2/\text{mV}$	$\Delta U/\text{mV}$	$F/\text{N}$	$\alpha/\text{N}\cdot\text{m}$
1					
2					
3					
4					
5					

平均值:  $\alpha = \quad \text{N/m}$

#### 3. 酒精的数据表格自拟。

附: 水的表面张力系数的标准值:

	0.07422	0.07349	0.07275	0.07197	0.07118
水的温度	10	15	20	25	30

### 注意事项

- 1、吊环水平须调节好，注意偏差  $1^\circ$ ，测量结果引入误差为 0.5%；偏差  $2^\circ$ ，则 误差 1.6%。
- 2、在旋转升降台时，尽量使液体的波动要小。
- 3、在加砝码前应首先对仪器调零，安放砝码时应尽量轻。
- 4、在玻璃器皿内放入被测液体并安放在升降台上。

### 实验三 电流场模拟静电场

在工程技术中，经常会碰到一些不易被测试或测试条件不足的物理量，这时，往往采用模拟法来进行测量。如对飞行器的性能进行测试，利用运动的相对性原理，把飞行器固定在风洞内进行鼓风，根据模拟飞行器的飞行来测试其有关性能。

模拟法是科学研究的一种方法。它不直接研究物理现象或过程的本身，而用与这些现象或过程相似的模型来进行研究。例如用振动台模拟地震对工程结构物强度的影响；用电流场模拟水坝渗流，用光测弹性法模拟工程构件内应力分布等。以上的模拟称为物理模拟，它们在模拟过程中保持物理现象或过程的本质不变。本实验介绍另一种模拟，称为数学模拟，它是指两个不同本质的物理现象或过程可以用类似的数学方程来描述的模拟。

模拟法本质上是用一种易于实现、便于测量的物理状态或过程，模拟不易实现、不便测量的状态或过程，只要这两种状态或过程有一一对应的两组物理量，并且它们所满足的数学形式基本相同。静电场传递一些带电体对另一些带电体的作用，它是物质存在的一种形式。一般说来，静电测量要比直流电测量复杂。尽管稳恒电流场与静电场是本质上不同的物理现象，但是在一定条件下导电介质中稳恒电流场与静电场的描述具有类似的数学方程，因而可以用稳恒电流场来模拟静电场。

在科学实验中我们常需要了解各种电极或带电体周围的静电场。但在多数情况下很难求出电场分布的解析解，大都采用实验的方法来确定静电场的分布。本实验仪就是采用模拟法来描绘静电场，即用稳恒电流场模拟描绘静电场。

仿制所要研究的电极，用模拟实验方法研究静电场分布，在电子管、示波管、显象管和电子显微镜等电子束器件的设计和研制中，具有实用意义。

#### 一、实验目的

1. 了解模拟法描绘静电场的理论依据。
2. 学会用模拟法研究静电场，在导电纸上描绘静电场分布的方法。
3. 描绘几种静电场的等位线，根据等为线画出电力线。
4. 加深对静电场，稳恒电流场的了解。

#### 二、实验原理

模拟法描绘静电场的理论依据，带电体在其周围空间所产生的电场，可用电场强度  $E$  和电位  $U$  的空间分布来描述。为了形象的表示电场的分布情况，常采用等位面 and 电力线来描述电场。电力线是按空间各点电场强度的方向顺次连成的曲线，等位面是电场中电位相等的各点所构成的曲面。电力线和等位面相互正交的，有了等位面的图形就可以画出电力线，反之亦然。我们所说的测量静电场，指的是测绘出静电场中等位面和电力线的分布图形，它是了解电场中一些物理现象或控制带电粒子在电磁场中运动所必须解决的问题，对科研和生产都是十分有用的。

但是直接对静电场进行测量是相当困难的。首先静电场不会有电流存在，这样一来磁电式电表就失去了效用，其次是仪器和测量探针引入静电场时，必将在静电场的作用下出现感应电荷，而感应电荷产生的电场与原电场叠加，必使原电场发生畸变，得到的结果必然严重失真。所以，直接测量是不可行的，只有采取间接的方法，仿造另一个场，使它与原静电场相似，当用探针对这种模拟场进行测量时，它不受干扰，就可间接测量被模拟的静电场。

用模拟法描绘静电场的方法之一是用电流场代替静电场。本实验仪采用稳恒电流场模拟描绘静电场。由电磁学理论可知电解质（或水液）中稳恒电流场与电介质（或真空）中静电场具有相似性。

当空间中不存在自由电荷时，各向同性介质中静电场满足下列微分方程及边界条件

$$\begin{cases} \nabla \cdot D = 0; D_{1n} = D_{2n} \\ \nabla \times D = 0; D_{1t} = D_{2t} \end{cases} \quad (1)$$

式中  $D$  为电位移矢量， $E$  为电场强度矢量；下标中  $n$  表示法向， $t$  表示切向，1、2 代表边界两边的介质。 $D$  和  $E$  的关系为

$$D = \epsilon E = \epsilon_r \epsilon_0 E \quad (2)$$

式中  $\varepsilon$  为介质介电系数,  $\varepsilon_0$  为真空介电系数,  $\varepsilon_r$  为介质的相对介电系数。

在静电场的无源区域中, 电场强度矢量  $E$  满足

$$\begin{cases} \oiint E \cdot dS = 0 \\ \oint E \cdot dl = 0 \end{cases} \quad (3)$$

各向同性导电介质中稳恒电流场满足下列微分方程及边界条件

$$\begin{cases} \nabla \cdot J = 0, J_{1n} = J_{2n} \\ \nabla \times E = 0, E_{1t} = E_{2t} \end{cases} \quad (4)$$

式中  $J$  为电流密度矢量。 $J$  和  $E$  的关系为

$$J = \sigma E \quad (5)$$

式中  $\sigma$  为各向同性导电介质的电导率。

在电流场的无源区域中, 电流密度矢量  $J$  满足

$$\oint J \cdot dl = 0 \quad (6)$$

由 (3) 式和 (6) 式可看出静电场中电场强度矢量  $E$  和电流场中电流密度矢量  $J$  所遵循的物理规律具有相同的数学形式, 所以这两种场具有相似性。在相似的场源分布和相似的边界条件下, 它们的解的表达式具有相同的数学模型。

模拟法测定静电场的理论依据是因为静电场与稳恒电流场这两种场所遵循的物理规律具有完全相同的数学形式。表 1 所示为静电场和稳恒电流场所遵循的物理规律。比较两组方程可知,  $D$ ,  $E$ ,  $\varepsilon$  与  $J$ ,  $E$ ,  $\sigma$  成一对对应关系。因而我们就可用相应的在导电介质中分布的电流场来模拟相应电解质中的静电场, 当静电场中的导体与稳恒电流场中的电极形状相同, 并且边界条件相同时, 静电场在介质中的电位分布与稳恒电流场在介质中的电位分布完全相同, 所以可以用稳恒电流场来模拟静电场, 这是本实验的模拟依据。

表 1 静电场与稳恒电流场数学方程

静电场	稳恒电流场
$\vec{D} = \varepsilon \vec{E}$	$\vec{J} = \sigma \vec{E}$
$\oiint \vec{D} \cdot d\vec{S} = 0$	$\oiint \vec{J} \cdot d\vec{S} = 0$
$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = 0$	$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = 0$
$U_{ab} = \int_a^b \vec{E} \cdot d\vec{l}$	$U_{ab} = \int_a^b \vec{E} \cdot d\vec{l}$

电流场中有许多电位彼此相等的点, 测出这些电位相等的点, 描绘成面就是等位面, 这些面也是静电场中的等位面。当等位面变成等位线, 根据电力线和等位线正交的关系, 即可画出电力线, 这些电力线上每一点的切线方向就是该点电力线的方向, 这就可以用等位线和电力线形象的表示静电场的分布。

### 1. 同轴带电圆柱面电场的模拟

现在用同轴带电圆柱面具体说明稳恒电流场和静电场的相似性。

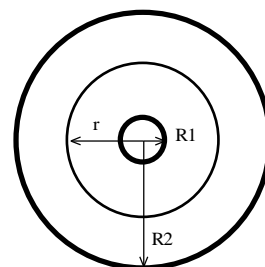
#### (1) 静电场

设同轴圆柱面是“无限长”的, 内、外半径分别为  $R_1$  和  $R_2$ , 电荷线密度为  $+\lambda$  和  $-\lambda$ , 圆柱面间介质的介电系数为  $\varepsilon$ , 如图 1 所示。根据高斯定理, 同轴圆柱面间的电场强度  $E$  为

$$E = \frac{\lambda}{2\pi\varepsilon r} \quad (7)$$

式中  $r$  为圆柱面间任一点距轴心的距离。

若取外圆柱面的电位为零, 则内圆柱面的电位  $V_0$  就是两圆柱面间的电位差



$$V_0 = \int_{R_1}^{R_2} E dr = \int_{R_1}^{R_2} \frac{\lambda}{2\pi\epsilon} \cdot \frac{dr}{r} = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon} \ln \frac{R_2}{R_1} \quad (8)$$

在两圆柱面间任一点  $r (R_1 \leq r \leq R_2)$  的电位  $V(r)$  是

$$V(r) = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon} \ln \frac{R_2}{r} \quad (9)$$

比较上两式，可得

$$V(r) = V_0 \frac{\ln\left(\frac{R_2}{r}\right)}{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)} \quad (10)$$

## (2) 电流场

为了计算电流场的电位差，先计算两圆柱面间的电阻，然后计算电流，最后计算两点间的电位差。设导电介质厚度为  $t$ ，电阻率为  $\rho$ ，则任意半径  $r$  到  $r+dr$  圆柱面间电阻为

$$dR = \rho \frac{dr}{S} = \frac{\rho}{2\pi t} \cdot \frac{dr}{r} \quad (11)$$

将 (11) 式积分得到半径为  $r$  到半径为  $R_2$  圆柱面间电阻为

$$R_{rR_2} = \frac{\rho}{2\pi t} \int_r^{R_2} \frac{dr}{r} = \frac{\rho}{2\pi t} \ln\left(\frac{R_2}{r}\right) \quad (12)$$

同理，可得半径为  $R_1$  到半径为  $R_2$  圆柱面间电阻为

$$R_{12} = \frac{\rho}{2\pi t} \int_{R_1}^{R_2} \frac{dr}{r} = \frac{\rho}{2\pi t} \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right) \quad (13)$$

则从内圆柱面到外圆柱面间的电流为

$$I_{12} = \frac{V_0}{R_{12}} = \frac{2\pi t}{\rho \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)} \quad (14)$$

半径为  $r$  圆柱面电位

$$V(r) = I_{12} R_{rR_2} = \frac{R_r R_2}{R_{12}} V_0 \quad (15)$$

将 (12)、(13) 式代入 (15) 式，得

$$V(r) = V_0 \frac{\ln\left(\frac{R_2}{r}\right)}{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)} \quad (16)$$

比较 (10) 式和 (16) 式，可知静电场与电流场的电位分布是相同的。

以上是外界条件相同的静电场与电流场的电位分布相同的一个实例。电极形状复杂的静电场用解析法计算是很困难的，甚至是不可能的，这时用电流场模拟静电场将显示出更大的优越性。

现在要设计一稳恒电流场来模拟同轴带电圆柱面电场，其要求为：(1) 设计的电极与带电圆柱面电极相似，尺寸可以按比例并具有相同的边界条件，(2) 导电介质的电阻率比电极要大得多，并且各向同性且均匀分布。当两个电极间施加电压时，其中间形成一稳恒电流场。设径向电流为  $I$ ，则电流密度为  $j = I/2\pi r \delta$ ，这里导电介质厚度取  $\delta$ 。根据欧姆定律的微分形式

$$J = \sigma E$$

可得

$$E = I/2\pi\sigma r\delta$$

显然电流场的形式与静电场相同，都是与  $r$  成反比。因此两极间电位差与式 (8) 相同，电位分布与式 (10) 相同。在本实验中， $R_1=1\text{cm}$ ， $R_2=10\text{cm}$ ， $V_0=10\text{V}$ ，由 (10) 式可得等位线分布公

式

$$r = R_2 \left( \frac{R_1}{R_2} \right)^{\frac{V(r)}{V_0}} \quad (17)$$

## 2. 两平行线电荷电场的模拟

若有两平行线带电导线，其截面直径为  $D$ ，两导线的间距为  $l$ ，当  $l \gg D$  时，在离导线较远处电场和线电荷的电场近乎相同。

设有两个无限长线电荷 A 和 B，它们的电荷密度分别为  $+\lambda$  和  $-\lambda$ ，P 点离 A 的垂直距离为  $r$ ，离 B 的垂直距离为  $r_1$ ，我们来计算 P 点的电位  $V$ 。

先求 A 在 P 点产生的电位  $V$ 。对于无限长线电荷，它在空间某点产生的电场强度方向是垂直于该线电荷的，由高斯定律可得，A 在 P 点产生的电场强度

$$E_A = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0 r_1} \quad (18)$$

式中  $\epsilon_0$  为真空介电系数。

设在离 A 和 B 很远的地方有一点 Q，Q 与 A 的垂直距离为  $r_1$ ，与 B 的垂直距离为  $R_1$ 。假定 Q 点的电位为 0，那么由于 A 的存在，在 P 点产生的电位  $V_1$  为

$$V_1 = -\int_{R_1}^r E_A dr = -\int_{R_1}^r \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0 r_1} dr = -\frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \ln r_1 + \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \ln R_1 \quad (19)$$

同理，线电荷在 P 点产生的电位  $V_2$  为

$$V_2 = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \ln r_2 - \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \ln R_2 \quad (20)$$

我们知道，对于一线电荷来说， $R_1=\infty$  或 0 是不可以的，因为此时积分将发散而失去意义。但是，对于两平行的等值异号线电荷，其总电荷等于 0，在带电导线可视为无限长的情况下，仍可将距线电荷无限远处的电位假定为 0，由 (19)、(20) 式可得 P 点电位为

$$V_P = V_1 + V_2 = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{R_1}{R_2} \quad (21)$$

当 Q 点移至无限远处时， $R_2=R_1$ ，上式第二项变为 0。因此，如果规定与线电荷相距为无限远处各点电位为 0，则所有离 A 和 B 为有限距离  $r_1$  和  $r_2$  处电位为有限值，即

$$V_P = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (22)$$

对于等势面，因为  $V$ ，都是常量，所以有

$$\frac{r_2}{r_1} = C(\text{常数}) \quad (23)$$

## 4. 电场描绘方法

在用模拟法描绘静电场的实际过程中，由于电场强度这个物理量较难测量，测定电位（标量）比测定场强（矢量）容易实现，所以我们先测定等电位线，然后根据等电位线与电力线的正交关系，就可以描绘出电力线分布图。

## 三、实验装置

本实验由稳压电源和测量模板组成（见右图），采用导电模板模拟电场，分别有四种电极情况可实现电场分布测量。

## 四、实验内容与步骤

1. 描绘两个带电系统静电场的等位线和电力线



- (1) 取两个点电荷的电极板，接入电源。
  - (2) 取两极间的电位差为 10V，分别记录 1V、3V、5V、7V、9V 的等位线各点的坐标。每条等位线至少取 10 个等电位点。
  - (3) 将电位相等的点连成光滑的曲线即成为一条等位线。共描绘 5 条等位线。
  - (4) 根据电力线与等位线正交的关系画出相应的电力线分布图。
  - (5) 将电极板改为点电荷与条形电极和条形与条形电极。重复步骤 (2)、(3)、(4)。
2. 描绘同轴带电圆柱面电极间的等位线和电力线
- (1) 取同轴带电圆形面电极板，接入电源。
  - (2) 取电位差  $V_0 = 10V$ ，记录  $V=2V、4V、6V、8V$  的等电位线各点的坐标。每条等电位线至少取 10 个等电位点。
  - (3) 分别描绘各等电位线和电力线。
  - (4) 用 (17) 式理论公式计算各条等电位线的半径  $r$ ，与记录的坐标相比较。

## 五、数据处理

将测量数据填入表 3.16.2，按公式 17 计算各条等电位线的半径理论值  $r$ ，计算测量值相对误差。

### 1. 数据表格

表 3.16.2 同轴带电圆柱面电极间的等位线

电位差 (V)	等电位线半径			绝对误差 $\Delta r =  r - \bar{r} $	相对误差 $E_r = \Delta r / r$
	理论值 $r$ (cm)	测量值 $r'$ (cm)	$\bar{r}$ (cm)		
2					
4					
6					
8					

## 六、习题

1. 用稳恒电流场模拟静电场的理论依据是什么？
2. 电力线与等位线有何关系？电力线起于何处？止于何处？
3. (必做) 电压表内阻对测量结果有何影响？
4. 本实验可否采用交流电源？
5. (必做) 等位线的疏密说明了什么？
6. 静电场的空间分布是三维的，为什么可以用二维平面的稳恒电流场来模拟？
7. (必做) 实验时电源电压取不同值，等位线的形状是否发生变化？电场强度和电位是否发生变化？
8. 本实验仪为什么采用高阻抗输入数字电压表，实验时如改用万用表或电压表来描绘电位分布好不好，为什么？
9. (必做) 稳恒电流中导电介质的电导率发生变化，电流场中的电位和电场强度分布是否会发生变化？

## 实验四 理想气体状态方程

### 一、实验目的

1. 研究等温条件下，一定质量气体的压强与体积的关系，验证波义耳-马略特定律
2. 研究等容条件下，一定质量气体的温度与压强的关系，验证查理定律
3. 研究等压条件下，一定质量气体的温度与体积的关系，验证盖·吕萨克定律
4. 计算一定气体的物质的量
5. 计算普适气体常量

### 二、实验原理

当一定质量的气体处于热平衡状态时，表征该气体状态的一组参量——压强  $p$ 、体积  $V$  和温度  $T$ ——各有一定值。如果没有外界的影响，这些参量将维持不变，当气体与外界交换能量时，气体将从一个状态不断地变化到另一个状态。实验事实表明，表征平衡状态的三个参量之间存在着一定的关系，满足该关系的方程称为气体的状态方程。一般气体，在压强不太大（与大气压比较）和温度不太低（与室温比较）的实验范围内，遵守波义耳-马略特定律、查理定律和盖·吕萨克定律的气体称为理想气体。理想气体实际上是不存在的，它只是真实气体的初步近似，很多真实气体如氢、氧、氮、氦等，在一般温度和较低的压强下，都可看作理想气体。

理想气体状态方程，又称理想气体定律、普适气体定律，是描述理想气体在处于平衡态时，压强、体积、物质的量、温度间关系的状态方程。它建立在波义耳-马略特定律、查理定律、盖·吕萨克定律等经验定律之上。

理想气体状态方程是由研究低压下气体的行为导出的。但各气体在适用理想气体状态方程时多少有些偏差；压力越低，偏差越小，在极低压力下理想气体状态方程可较准确地描述真实气体的行为。极低的压强意味着分子之间的距离非常大，此时分子之间的相互作用非常小，因而分子可近似被看作是没有体积的质点。于是从极低压力气体的行为出发，抽象提出理想气体的概念。

1662 年，英国化学家、物理学家波义耳根据实验结果提出：“在密闭容器中的定量气体，在恒温下，气体的压强和体积成反比关系。”这是人类历史上第一个被发现的“定律”。14 年后，法国物理学家马略特也独立地发现了这一定律，而且比波义耳更深刻地认识到这个定律的重要性。后人把他俩的发现合称为波义耳-马略特定律。

查理定律指出，一定质量的气体，当其体积一定时，它的压强与热力学温度成正比。

1802 年，盖·吕萨克发现气体热膨胀定律，即盖·吕萨克定律，指出：压强不变时，一定质量气体的体积跟热力学温度成正比。

上述三个定律中各物理量间的关系曲线如图 1 所示：

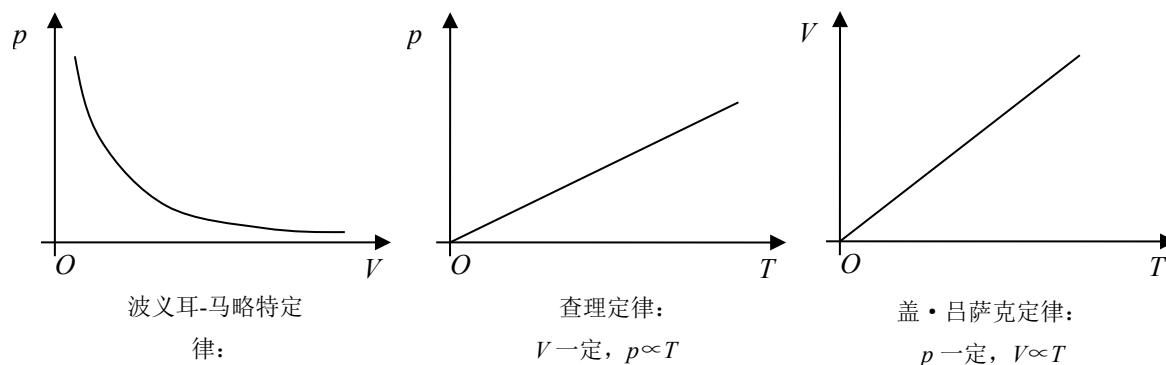


图 1 三定律各物理量之间的关系曲线



根据上述三定律，以及阿伏伽德罗定律和理想气体温标定义，可以推导出理想气体状态方程，具体如下：

气体的体积随压强  $p$ 、温度  $T$  以及气体分子的数量  $N$  而变，写成函数形式是： $V=f(p,T,N)$ ，或

$$dV = \left( \frac{\partial V}{\partial p} \right)_{T,N} dp + \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_{p,N} dT + \left( \frac{\partial V}{\partial N} \right)_{T,p} dN \quad (1)$$

对于一定量的气体， $N$  为常数， $dN=0$ ，所以：

$$dV = \left( \frac{\partial V}{\partial p} \right)_{T,N} dp + \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_{p,N} dT \quad (2)$$

根据波义耳-马略特定律， $V = \frac{C}{p}$ ， $C$  为常数，于是有：

$$\left( \frac{\partial V}{\partial p} \right)_{T,N} = -\frac{C}{p^2} = -\frac{V}{p} \quad (3)$$

根据盖·吕萨克， $V = C'T$ ， $C'$  为常数，于是有：

$$\left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_{p,N} = C' = \frac{V}{T} \quad (4)$$

代入上式后得：

$$dV = -\frac{V}{p} dp + \frac{V}{T} dT \text{ 或 } \frac{dV}{V} = -\frac{1}{p} dp + \frac{1}{T} dT \quad (5)$$

上式积分得：

$$\ln V + \ln p = \ln T + C'' \quad (6)$$

故有：

$$\frac{pV}{T} = \text{恒量}, \quad (\text{气体质量一定}) \quad (7)$$

该方程表示，对于一定质量的理想气体，任一状态下， $pV/T$  的值都相等。

进一步的实验表明，在一定温度和压强下，气体的体积  $V$  和它的质量  $m$  或物质的量  $n$  成正比。

阿伏伽德罗定律指出，在相同温度和压强下，1mol 的各种理想气体的体积都相同。在标准状态 ( $p_0=101.3\text{kPa}$ ,  $T_0=273.16\text{K}$ ) 下，1mol 的理想气体的体积  $V_m=22.4\text{L}$ ，于是可定义：

$$R = \frac{p_0 V_m}{T_0} = 8.31 \text{ J/(mol} \cdot \text{K)} \quad (8)$$

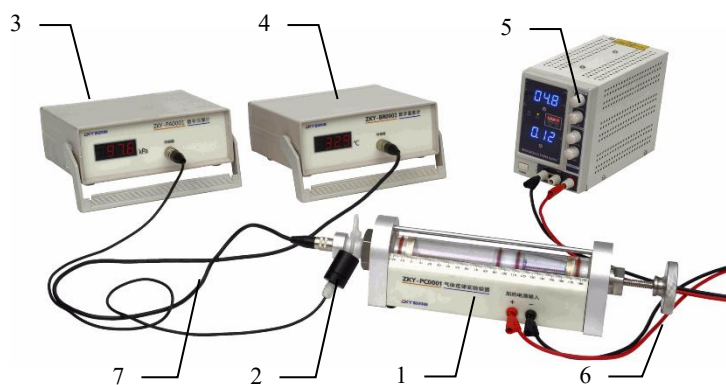
$R$  称为普适气体常数。对于任一物质的量为  $n$  mol 的理想气体，有：

$$\frac{pV}{T} = \frac{p_0 n V_m}{T_0} = nR \text{ 或 } pV = nRT \quad (9)$$

该方程称为理想气体状态方程。

### 三、实验仪器

理想气体状态方程实验仪组成如图 2 所示：



1—气体定律实验装置 2—压强传感 3—数字压强计 4—数字温度计  
5—直流稳压电源 6—单芯连接线 7—多芯连接线

图 2 理想气体状态方程实验仪

#### 四、实验步骤

实验前准备：

拔下气体定律实验装置与压强传感器连通的气管，使玻管内外气压相等，然后将活塞旋至标尺上 90mL 处。将气管与压强传感器重新接通，使玻管内气体处于密封状态。将气体定律实验装置的温度传感器接口与数字温度计相连。然后将活塞旋至标尺上 60mL 处。打开直流稳压电源（不外接电路，仅预热），打开数字温度计和数字压强计，预热约 10min。等待用电装置和密闭气体温度压强稳定。

##### 1. 研究等温条件下，一定质量气体的压强与体积的关系，验证波义耳-马略特定律

- 1) 以稳定后的温度作为室温并记录在表 1 中。
- 2) 然后改变活塞位置，在表 1 中记录体积视值  $V'$  在 60/70/80/90/100/110/120mL 各处时的压强值  $p_i$ ，每个状态下待温度恢复到室温  $\pm 0.2^\circ\text{C}$  后记录压强值。
- 3) 计算表 1 中各压强值的倒数  $1/p$ 。
- 4) 根据表 1 数据绘制室温下密封气体的  $V'-1/p$  关系曲线，用直线拟合该曲线并得到纵坐标截距  $V_0$ ， $V_0$  即是由于结构原因无法准确给出的密封气体的体积零差。直线斜率即为  $nRT$ ，根据温度  $T$ （绝对温度）和  $R$  的参考值，计算出密封气体的物质的量  $n$ 。

##### 2. 研究等容条件下，一定质量气体的温度与压强的关系，验证查理定律

- 1) 保持前述密封气体的质量（或物质的量）不变，即切勿断开气管。将活塞旋至  $V'=90\text{mL}$ ，待温度稳定后再次记录室温下及该体积下的压强值  $p$ 。
- 2) 将直流稳压电源电流调节旋钮顺时针调至最大（以避免在实验过程中出现限流保护），在恒压模式（即 C.V 模式）下再将直流稳压电源在开路状态下电压调为  $30.0 \pm 0.1\text{V}$ ，然后关闭直流稳压电源开关，待用导线将直流稳压电源输出端与气体定律实验装置的加热电源输入端连接后，再打开直流稳压电源开关。此后数字温度计显示气体温度逐渐升高。
- 3) 在表 2 中记录各温度下（温度间隔可采用大约  $10^\circ\text{C}$ ）的压强值，直到记录到温度达到  $90^\circ\text{C}$  后停止记录。但不断开加热电源，须继续升温直到温度保持在  $98 \sim 100^\circ\text{C}$  之间（若发现有超出该范围的趋势，可改变直流稳压电源输出电压来保持，此步骤为下一实验做准备）。
- 4) 将记录的各摄氏温度换算成绝对温度。
- 5) 根据表 2 数据绘制定容条件下密封气体的  $p-T$  关系曲线，用直线拟合该曲线。直线斜率即为  $nR/(V'+V_0)$ 。根据体积视值  $V'$ 、前述实验得到的体积零差  $V_0$  和物质的量  $n$ ，计算  $R$  并与参考值进行比较计算相对误差。

##### 3. 研究等压条件下，一定质量气体的温度与体积的关系，验证盖·吕萨克定律

1) 保持前述密封气体的质量(或物质的量)不变,即切勿断开气管。移动活塞扩大气体体积,使得压强降低到接近室温下体积视值 90mL 时对应的压强  $p$  附近 ( $\pm 1\text{kPa}$ )。当温度在  $98\sim 100^\circ\text{C}$  之间时关闭直流电源,待玻管自然降温。

2) 及时改变气体体积,使得压强随时都在  $p\pm 0.2\text{kPa}$  范围内,当温度降低至  $90^\circ\text{C}$  时,在根据表格数据绘制  $p$ - $T$  关系曲线:

3) 线性拟合直线的斜率  $k_2=\underline{\hspace{2cm}}$  ( $\text{kPa/K}$ )。

根据表 1 所得  $n$  及  $V'+V_0=\underline{\hspace{2cm}}$  (mL), 可得  $R=\underline{\hspace{2cm}}$  J/(mol·K)

4) 中记录压强  $p$  对应的气体体积视值  $V'$ 。

5) 记录降温过程中不同温度下(温度间隔可采用大约  $10^\circ\text{C}$ ) 压强  $p$  对应的气体体积视值,直到降至  $40^\circ\text{C}$ 。

6) 据根据表格数据绘制  $p$ - $T$  关系曲线:

7) 线性拟合直线的斜率  $k_2=\underline{\hspace{2cm}}$  ( $\text{kPa/K}$ )。

根据表 1 所得  $n$  及  $V'+V_0=\underline{\hspace{2cm}}$  (mL), 可得  $R=\underline{\hspace{2cm}}$  J/(mol·K)

8) 数据绘制定压条件下密封气体的  $V'$ - $T$  关系曲线,用直线拟合该曲线。直线斜率即为  $nR/p$ 。根据气体压强  $p$  和已计算出的物质的量  $n$ , 计算  $R$  并与参考值进行比较计算相对误差。

实验完成后,拔下气体连通管和相关连接线并收纳,并断开所有电源。

## 五、数据处理

表 1 同一温度下,测量气体的压强与体积的关系

室温:  $\underline{\hspace{2cm}}$   $^\circ\text{C}$

体积视值 $V'$ (mL)	60.0	70.0	80.0	90.0	100.0	110.0	120.0
压强 $p$ (kPa)							
$1/p$ ( $\text{kPa}^{-1}$ )							

根据表格数据绘制  $V'$ - $1/p$  关系曲线:

根据拟合直线的截距可知气体体积零差  $V_0=\underline{\hspace{2cm}}$  mL。

线性拟合直线的斜率  $k_1=\underline{\hspace{2cm}}$  (mJ)。

已知参考值  $R=8.31\text{ J/(mol·K)}$ , 根据室温,可以计算出密封气体的物质的量为  $n=\underline{\hspace{2cm}}$  mmol。

表 2 同一体积下,测量气体压强与温度的关系

体积视值  $V'$ :  $\underline{\hspace{2cm}}$  mL

温度 $T$ ( $^\circ\text{C}$ )		40.0	50.0	60.0	70.0	80.0	90.0
温度 $T$ (K)							
压强 $p$ (kPa)							

根据表格数据绘制  $p$ - $T$  关系曲线:

线性拟合直线的斜率  $k_2=\underline{\hspace{2cm}}$  ( $\text{kPa/K}$ )。

根据表 1 所得  $n$  及  $V'+V_0=\underline{\hspace{2cm}}$  (mL), 可得  $R=\underline{\hspace{2cm}}$  J/(mol·K)

表 3 同一压强下,测量气体体积与温度的关系

压强:  $\underline{\hspace{2cm}}$  kPa

温度 $T$ ( $^\circ\text{C}$ )		40.0	50.0	60.0	70.0	80.0	90.0
温度 $T$ (K)							
体积视值 $V'$ (mL)							

根据表格数据绘制  $V-T$  关系曲线:

线性拟合直线的斜率  $k_3 =$  \_\_\_\_\_ (mL/K)

根据表 1  $n$  及压强  $p$ , 可得  $R =$  \_\_\_\_\_ J/(mol·K)

## 实验五 冷却法测量金属的比热容

根据牛顿冷却定律用冷却法测定金属或液体的比热容是量热学中常用的方法之一。若已知标准样品在不同温度的比热容,通过作冷却曲线可测得各种金属在不同温度时的比热容。本实验以铜样品为标准样品,而测定铁、铝样品在  $100^{\circ}\text{C}$  时的比热容。通过实验了解金属的冷却速率和它与环境之间温差的关系,以及进行测量的实验条件。热电偶数字显示测温技术是当前生产实际中常用的测试方法,它比一般的温度计测温方法有着测量范围广,计值精度高,可以自动补偿热电偶的非线性因素等优点;其次,它的电量数字化还可以对工业生产自动化中的温度量直接起着监控作用。

### 一、实验目的

1. 掌握冷却法测量金属的比热容的方法;
2. 了解金属的冷却速率和它与环境之间温差的关系;
3. 了解热电偶数字显示测温技术。

### 二、实验仪器及装置

DH4603 型冷却法金属比热容测量仪

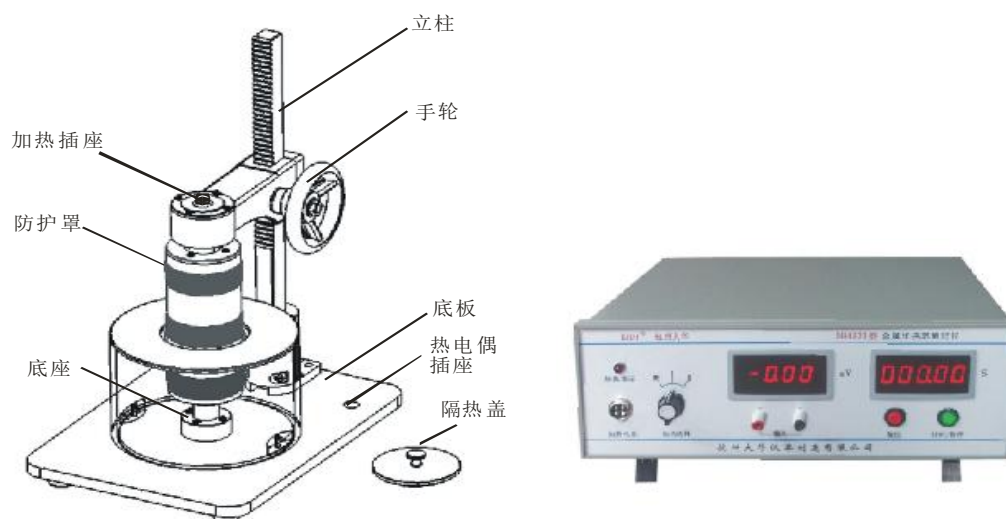


图 1 DH4603 型冷却法金属比热容测量仪

本实验装置由加热仪和测试仪组成。加热仪的加热装置可通过调节手轮自由升降。被测样品安放在有较大容量的防风圆筒即样品室内的底座上,测温热电偶放置于被测样品内的小孔中。当加热装置向下移动到底后,对被测样品进行加热;样品需要降温时则将加热装置移上。仪器内设有自动控制限温装置,防止因长期不切断加热电源而引起温度不断升高。

测量试样温度采用常用的铜—康铜做成的热电偶(其热电势约为  $0.0410\text{mV}/^{\circ}\text{C}$ ),将热电偶的冷端置于冰水混合物中,带有测量扁叉的一端接到测试仪的“输入”端。热电势差的二次仪表由高灵敏、高精度、低漂移的放大器放大加上满量程为  $20\text{mV}$  的三位半数字电压表组成。这样当冷端为冰点时,由数字电压表显示的  $\text{mV}$  数查表即可换算成对应待测温度值。

### 三、实验原理

单位质量的物质,其温度升高  $1\text{K}$  (或  $1^{\circ}\text{C}$ ) 所需的热量称为该物质的比热容,其值随温度而变化。将质量为  $M_1$  的金属样品加热后,放到较低温度的介质(例如室温的空气)中,样品将会逐渐冷却。其单位时间的热量损失 ( $\Delta Q/\Delta t$ ) 与温度下降的速率成正比,于是得到下述关系式:

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = c_1 M_1 \frac{\Delta \theta_1}{\Delta t} \quad (1)$$

(1) 式中  $C_1$  为该金属样品在温度  $\theta_1$  时的比热容,  $\frac{\Delta \theta_1}{\Delta t}$  为金属样品在  $\theta_1$  的温度下降速率, 根据冷却定律有:

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \alpha_1 S_1 (\theta_1 - \theta_0)^m \quad (2)$$

(2) 式中  $\alpha_1$  为热交换系数,  $S_1$  为该样品外表面的面积,  $m$  为常数,  $\theta_1$  为金属样品的温度,  $\theta_0$  为周围介质的温度。由式 (3-1) 和 (3-2), 可得

$$c_1 M_1 \frac{\Delta \theta_1}{\Delta t} = \alpha_1 S_1 (\theta_1 - \theta_0)^m \quad (3)$$

同理, 对质量为  $M_2$ , 比热容为  $C_2$  的另一种金属样品, 可有同样的表达式:

$$c_2 M_2 \frac{\Delta \theta_2}{\Delta t} = \alpha_2 S_2 (\theta_2 - \theta_0)^m \quad (4)$$

由式 (3) 和 (4), 可得:

$$\frac{c_2 M_2 \frac{\Delta \theta_2}{\Delta t}}{c_1 M_1 \frac{\Delta \theta_1}{\Delta t}} = \frac{\alpha_2 S_2 (\theta_2 - \theta_0)^m}{\alpha_1 S_1 (\theta_1 - \theta_0)^m}$$

所以

$$c_2 = c_1 \frac{M_1 \frac{\Delta \theta_1}{\Delta t}}{M_2 \frac{\Delta \theta_2}{\Delta t}} \frac{\alpha_2 S_2 (\theta_2 - \theta_0)^m}{\alpha_1 S_1 (\theta_1 - \theta_0)^m}$$

假设两样品的形状尺寸都相同 (例如细小的圆柱体), 即  $S_1=S_2$ ; 两样品的表面状况也相同 (如涂层、色泽等), 而周围介质 (空气) 的性质当然也不变, 则有  $\alpha_1 = \alpha_2$ 。于是当周围介质温度不变 (即室温  $\theta_0$  恒定), 两样品又处于相同温度  $\theta_1 = \theta_2 = \theta$  时, 上式可以简化为:

$$c_2 = c_1 \frac{M_1 \left( \frac{\Delta \theta}{\Delta t} \right)_1}{M_2 \left( \frac{\Delta \theta}{\Delta t} \right)_2} \quad (5)$$

如果已知标准金属样品的比热容  $C_1$ 、质量  $M_1$ ; 待测样品的质量  $M_2$  及两样品在温度  $\theta$  时冷却速率之比, 就可以求出待测的金属材料的比热容  $C_2$ 。几种金属材料的比热容见表 1:

表 1

比 热 容 温 度 $^{\circ}\text{C}$	$C_{\text{Fe}} (\text{cal/g}^{\circ}\text{C})$	$C_{\text{Al}} (\text{cal/g}^{\circ}\text{C})$	$C_{\text{Cu}} (\text{cal/g}^{\circ}\text{C})$
100 $^{\circ}\text{C}$	0.110	0.230	0.0940

#### 四、实验内容及步骤

开机前先连接好加热仪和测试仪, 共有加热四芯线和热电偶线两组线。

1、选取长度、直径、表面光洁度尽可能相同的三种金属样品 (铜、铁、铝) 用物理天平或电子天平称出它们的质量  $M_0$ 。再根据  $M_{\text{Cu}} > M_{\text{Fe}} > M_{\text{Al}}$  这一特点, 把它们区别开来。

2、使热电偶端的铜导线与数字表的正端相连；冷端铜导线与数字表的负端相连。当样品加热到 150℃（此时热电势显示约为 6.1mV）时，切断电源移去加热源，样品继续安放在与外界基本隔绝的

有机玻璃圆筒内自然冷却（筒口须盖上盖子），记录样品的冷却速率  $(\frac{\Delta\theta}{\Delta t})_{\theta=100^\circ\text{C}}$ 。具体做法是记录数

字电压表上示值约从  $E_1 = 4.20\text{mV}$  降到  $E_2 = 4.00\text{mV}$  所需的时间  $\Delta t$ （因为数字电压表上的值显示

数字是跳跃性的，所以  $E_1$ 、 $E_2$  只能取附近的值），从而计算  $(\frac{\Delta E}{\Delta t})_{E=4.00\text{mV}}$ 。按铁、铜、铝的次序，

分别测量其温度下降速度，每一样品应重复测量 6 次。因为热电偶的热电动势与温度的关系在同一

小温差范围内可以看成线性关系，即  $\frac{(\frac{\Delta\theta}{\Delta t})_1}{(\frac{\Delta\theta}{\Delta t})_2} = \frac{(\frac{\Delta E}{\Delta t})_1}{(\frac{\Delta E}{\Delta t})_2}$ ，式（5）可以简化为：

$$c_2 = c_1 \frac{M_1 (\Delta t)_2}{M_2 (\Delta t)_1} \quad (6)$$

3、仪器的加热指示灯亮，表示正在加热；如果连接线未连好或加热温度过高（超过 200℃）导致自动保护时，指示灯不亮。升到指定温度后，应切断加热电源。

4、注意：测量降温时间时，按“计时”或“暂停”按钮应迅速、准确，以减小人为计时误差。

5、加热装置向下移动时，动作要慢，应注意要使被测样品垂直放置，以使加热装置能完全套入被测样品。

## 五、数据处理与分析

样品质量：  $M_{\text{Cu}} =$  g；  $M_{\text{Fe}} =$  g；  $M_{\text{Al}} =$  g。

热电偶冷端温度： °C

样品由 4.20mV 下降到 4.00mV 所需时间（单位为 S）

表 2

次数 样品	1	2	3	4	5	平均值 $\Delta t$
Fe						
Cu						
Al						

以铜为标准：  $C_1 = C_{\text{Cu}} = 0.0940 \text{ cal}/(\text{g}^\circ\text{C})$

铁：  $c_2 = c_1 \frac{M_1 (\Delta t)_2}{M_2 (\Delta t)_1} = \text{Cal}/(\text{g}^\circ\text{C})$

铝：  $c_3 = c_1 \frac{M_1 (\Delta t)_3}{M_3 (\Delta t)_1} = \text{Cal}/(\text{g}^\circ\text{C})$

## 六、思考题

1. 为什么实验应该在防风筒（即样品室）中进行？（必作）
2. 测量三种金属的冷却速率，并在图纸上绘出冷却曲线，如何求出它们在同一温度点的冷却速率？



## 实验六 弦线上波的传播规律

弦线上波的传播规律的研究是力学实验中的一个重要实验。波动的研究几乎出现在物理学的每一领域中，如果在空间某处发生的扰动，以一定的速度由近及远向四处传播，则称这种传播着的扰动为波。机械扰动在介质内的传播形成机械波，电磁扰动在真空或介质内的传播形成电磁波。不同性质的扰动的传播机制虽不相同，但由此形成的波却具有共同的规律性。本实验要求验证弦线上横波的传播规律：横波的波长与弦线中的张力的平方根成正比，与其线密度（单位长度的质量）的平方根成正比，而与波源的振动频率成反比。

### 一、实验目的

1. 观察在弦上形成的驻波，并用实验确定弦线振动时驻波波长与张力的关系；
2. 在弦线张力不变时，用实验确定弦线振动时驻波波长与振动频率的关系；
3. 学习对数作图或最小二乘法进行数据处理。

### 二、实验仪器

可调频率的数显机械振动源、平台、固定滑轮、可调滑轮、砝码盘、米尺、弦线、砝码、分析天平。

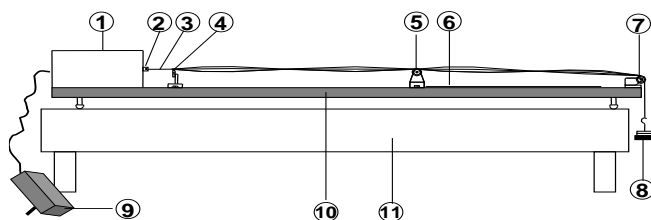


图1 实验仪器图

- 1、可调频率数显机械振动源；2、振动簧片；3、弦线；4、可动刀口支架；5、可动滑轮支架；6、标尺；7、固定滑轮；8、砝码与砝码盘；9、信号源；10、实验平台；11、实验桌

### 三、实验原理

#### 1. 弦线上横波传播规律

在一根拉紧的弦线上，其中张力为 $T$ ，线密度为 $\mu$ ，则沿弦线传播的横波应满足下述运动方程：

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = \frac{T}{\mu} \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \quad (1)$$

式中 $x$ 为波在传播方向（与弦线平行）的位置坐标， $y$ 为振动位移。将（1）式与典型的波动方程

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = V^2 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \text{ 相比较，即可得到波的传播速度： } V = \sqrt{\frac{T}{\mu}}。$$

若波源的振动频率为 $f$ ，横波波长为 $\lambda$ ，由于 $V = f\lambda$ ，故波长与张力及线密度之间的关系为：

$$\lambda = \frac{1}{f} \sqrt{\frac{T}{\mu}} \quad (2)$$

为了用实验证明公式（2）成立，将该式两边取对数，得：

$$\log \lambda = \frac{1}{2} \log T - \frac{1}{2} \log \mu - \log f \quad (3)$$

若固定频率  $f$  及线密度  $\mu$ ，而改变张力  $T$ ，并测出各相应波长  $\lambda$ ，作  $\log \lambda - \log T$  图，若得一直线，计算其斜率值（如为  $1/2$ ），则证明了  $\lambda \propto T^{1/2}$  的关系成立。同理，固定线密度  $\mu$  及张力  $T$ ，改变振动频率  $f$ ，测出各相应波长  $\lambda$ ，作  $\log \lambda - \log T$  图，如得一斜率为-1 的直线就验证了  $\lambda \propto f^{-1}$ 。

将（2）式变形，可得：

$$f = \frac{1}{\lambda} \sqrt{\frac{T}{\mu}} \quad (4)$$

实验中测出  $\lambda$ 、 $T$ 、 $\mu$  的值，利用公式（4）可以定量计算出  $f$  的值；若计算值和试验值相吻合，也可以定量地证明了式（4）成立。

## 2. 弦线上横波传播规律

实验装置如图1所示，金属弦线的一端系在能作水平方向振动的可调频率数显机械振动源的振簧片上，频率变化范围从0-200Hz连续可调，频率最小变化量为0.01Hz，弦线一端通过定滑轮⑦悬挂一砝码盘⑧；在振动装置（振动簧片）的附近有可动刀口④，在实验装置上还有一个可沿弦线方向左右移动并撑住弦线的动滑轮⑤。这两个滑轮固定在实验平台⑩上，其产生的摩擦力很小，可以忽略不计。若弦线下端所悬挂的砝码（包含砝码盘）的质量为  $m$ ，张力  $T = mg$ 。当波源振动时，即在弦线上形成向右传播的横波；当波传播到可动滑轮与弦线相切点时，由于弦线在该点受到滑轮两壁阻挡而不能振动，波在切点被反射形成了向左传播的反射波。这种传播方向相反的两列波叠加即形成驻波。当振动端簧片与弦线固定点至可动滑轮⑤与弦线切点的长度  $L$  等于半波长的整数倍时，即可得到振幅较大而稳定的驻波，振动簧片与弦线固定点为近似波节，弦线与动滑轮相切点为波节。

取  $x$  轴沿弦线向右，并将波源取为坐标原点，波源传出的入射波沿  $x$  正向传播，入射波在⑤处受阻，产生半波损失并反射回来。入射波可表示为： $y_1 = A \cos 2\pi(vt - \frac{x}{\lambda})$ ；

反射波表示为： $y_2 = A \cos 2\pi(vt + \frac{x}{\lambda})$ ；

则合成波为： $y = y_1 + y_2 = (2A \cos \frac{2\pi x}{\lambda}) \cos 2\pi vt$ 。

上式中， $\left| 2A \cos \frac{2\pi x}{\lambda} \right|$  为驻波的振幅，是  $x$  的函数：

(1) 当  $\left| \cos \frac{2\pi x}{\lambda} \right| = 1 \Rightarrow x = \pm 2k \frac{\lambda}{4}$ ,  $k=0,1,2,\dots$ , 振幅最大, 为波幅处;

(2) 当  $\left| \cos \frac{2\pi x}{\lambda} \right| = 0 \Rightarrow x = \pm (2k+1) \frac{\lambda}{4}$ ,  $k=0, 1, 2, \dots$ , 振幅为零, 为波节处。

相邻两波幅或相邻波节的距离都是半波长  $\lambda/2$ 。

当波源振动时, 即在弦线上形成向右传播的横波; 当波传播到可动滑轮与弦线相切点时, 由于弦线在该点受到滑轮两壁阻挡而不能振动, 波在切点被反射形成了向左传播的反射波。这种传播方向相反的两列波叠加即形成驻波。当振动端簧片与弦线固定点至可动滑轮⑤与弦线切点的长度  $L$  等于半波长的整数倍时, 即可得到振幅较大而稳定的驻波, 振动簧片与弦线固定点为近似波节, 弦线与动滑轮相切点为波节。它们的间距为  $L$ , 则

$$L = n \frac{\lambda}{2} \quad (5)$$

其中  $n$  为任意正整数。利用式 (5), 即可测量弦上横波波长。由于簧片与弦线固定点在振动不易测准, 实验也可将最靠近振动端的波节作为  $L$  的起始点, 并用可动刀口④指示读数, 求出该点离弦线与动滑轮⑤相切点距离  $L$ 。

#### 四、实验内容及步骤

(一) 验证横波的波长与弦线中的张力的关系 ( $f$  不变)

固定一个波源振动的频率 (波源的频率可固定在 80~120Hz 之间的某一个值上), 在砝码盘上添加不同质量的砝码, 以改变同一弦上的张力。每改变一次张力 (即增加一次砝码), 均要左右移动可动滑轮⑤的位置, 使弦线出现振幅较大而稳定的驻波。用实验平台⑩上的标尺⑥测量  $L$  值, 实验结果记录表 1。根据式 (2) 算出波长  $\lambda$ , 并将其填入表 2 中, 作  $\log \lambda - \log T$  图, 求其斜率。

(二) 验证横波的波长  $\lambda$  与波源振动频率  $f$  的关系 ( $T$  不变)

在砝码盘上放上一定质量的砝码, 以固定弦线上所受的张力, 改变波源振动的频率 (波源振动频率的调节范围可控制在 60~160Hz), 将数据填入表 3 中。用驻波法测量各相应的波长, 将计算得到的数据填入表 4 中, 作  $\log \lambda - \log f$  图, 求其斜率。

##### 注意事项:

(1) 要准确求得驻波的波长, 必须在弦线上调出振幅较大且稳定的驻波。在固定频率和张力的条件下, 可沿弦线方向左、右移动可动滑轮⑤的位置, 找出“近似驻波状态”, 然后细细移动可动滑轮位置, 逐步逼近, 最终使弦线出现振幅较大且稳定的驻波。

(2) 调节振动频率, 当振簧片达到某一频率 (或其整数倍频率) 时, 会引起整个振动源 (包括弦线) 的机械共振, 从而引起振动不稳定。此时, 可逆时针旋转面板上的输出信号幅度旋钮, 减小振幅, 或避开共振频率进行实验。

(3) 须在弦线上出现振幅较大而稳定的驻波时, 再测量驻波波长。

(4) 张力包括砝码与砝码盘的质量, 砝码盘的质量用分析天平称量。

(5) 当实验时, 发现波源发生机械共振时, 应减小振幅或改变波源频率, 便于调节出振幅大且稳定的驻波。

##### 附: 信号源面板简介及使用

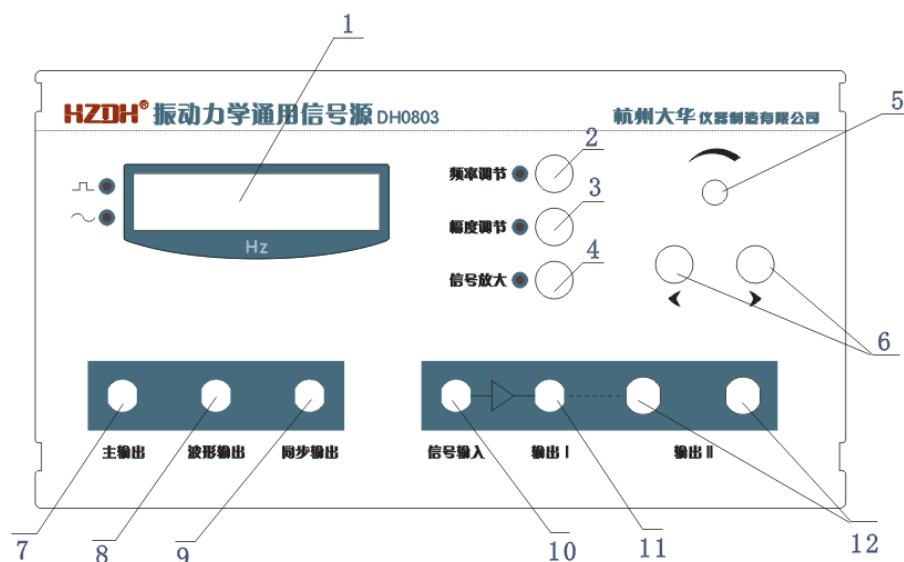


图2 振动力学信号源面板

#### (一) 信号源面板按键功能

1. 频率显示窗口；2. 频率调节：按键按下后，对应指示灯亮，表示可以用编码开关调节输出频率，编码开关下面的按钮用于切换频率调节位。
3. 幅度调节：按键按下后，对应指示灯亮，表示可以用编码开关调节输出信号幅度，可在 0~100 档间调节，输出幅度不超过  $V_{p-p}=20V$ 。
4. 信号放大：按键按下后，对应指示灯亮，表示可以用编码开关调节信号放大倍数，可在 0~100 档间调节，实际放大倍数不超过 55 倍。
5. 编码开关：可以单击或者旋转，单击旋钮可用于切换正弦波和方波输出；旋转旋钮可用于调节输出信号频率、幅度以及信号放大倍数。正弦波输出频率范围是 20~100000Hz，方波的输出频率是 20~1000Hz。
6. 按钮开关：用于切换频率调节位，仅用于信号频率调节。
7. 主输出：功率信号输出，接驱动传感器；
8. 波形输出：可接示波器观察主输出的波形；
9. 同步输出：为输出频率同主输出，且与主输出相位差固定的正弦波信号；
10. 信号输入：连接接收传感器，对磁电信号进行放大；
11. 输出 I：接示波器通道 1，接收传感器信号放大输出；
12. 输出 II：接收传感器信号放大输出，可接耳机或其它检测设备。

#### (二) 信号源的使用

1. 打开信号源的电源开关，信号源通电。单击“编码开关 5”使输出为正弦波；调节频率，频率表应有相应的频率指示；用示波器观察“主输出、波形输出和同步输出”端，应有相应的正弦波；调节幅度，波形的幅度产生变化；这时仪器已基本正常，再通电预热 2 分钟左右，即可进行弦振动实验。
2. 将实验平台信号输入接至本仪器的“主输出”端，用于驱动机械振动（本实验采用正弦波作为驱动信号）。
3. 仪器的频率调节最小分辨率达到 0.001Hz。由于弦线的共振频率的范围很小，故应细心调节，不可过快，以免错过相应的共振频率。
4. 当弦线振动幅度过大时，应减小信号输出幅度；振动幅度过小时，应加大信号输出幅度。

### 五、实验数据记录及处理

表 1 给定频率的实验数据表

给定频率为  $f=100\text{Hz}$ 

$m/\text{g}$						
$L/\text{cm}$						
$n$						

由表 1 计算数据填入表 2 中并作数据处理:

表 2 波长与弦线中张力的关系

重力加速度  $g = 9.783\text{N/Kg}$ 

$\lambda/\text{cm}$						
$T/\text{N}$						
$\log \lambda/\text{cm}$						
$\log T/\text{N}$						

在报告上作  $\log \lambda - \log T$  直线经作图曲线拟合得  $\log \lambda - \log T$  的斜率为:

相关系数为:

表 3 给定张力的实验数据表

砝码加上挂钩的总质量  $m =$ 张力  $T =$ 

$f/\text{Hz}$							
$L/\text{cm}$							
$n$							

由表 3 计算数据填入表 4 中并作数据处理:

表 4 波长与频率的关系

$\lambda/\text{cm}$						
$\log \lambda/\text{cm}$						
$\log f/\text{Hz}$						

在报告上作  $\log \lambda - \log f$  直线经作图法拟合得  $\log \lambda - \log f$  的斜率为:

相关系数为:

## 六、思考题

- (1) (必做题) 实验中可能存在哪些误差? 弦线的粗细和弹性对实验各有什么影响, 应如何选择?
- (2) (必做题) 求  $\lambda$  时为何要测几个半波长的总长?
- (3) 测量半波长时, 为什么不测驻波波腹间的距离, 而测波节之间的距离?
- (4) 为了使  $\log \lambda - \log T$  直线图上的数据点分布比较均匀, 砝码盘中的砝码质量应如何改变?

## 实验七 分光计的调整和使用

分光计是把多色光分解为单色光的仪器，它通常利用棱镜或光栅把一束多色入射光分解为不同角度的出射光；通过对出射光角度的测量来得到它的波长等信息。由于分光计对角度的测量精度较高，它有时也作为一种用光学方法测量角度的精密仪器。在光学实验中常用来测定光线的方向及各种角度。由于有些物理量如折射率、光栅常数、色散率等往往可以通过直接测量有关的角度（如最小偏向角、衍射角、布儒斯特角等）来确定，所以在光学技术中，分光计的应用十分广泛。

分光计的基本部件和调节原理与其他更复杂的光学仪器（如单色仪、摄谱仪等）有许多相似之处，因此学习和使用分光计能为今后使用更为精密的光学仪器打下良好基础，本实验要求学会对它的调节和使用，并通过测量棱镜的顶角等应用，了解分光计的基本原理、结构及调整思想。

分光计结构复杂、构件精密、调节要求高，对初学者有一定难度，但只要了解其结构和光路，严格按照要求步骤耐心调节，就能掌握。

### 一、实验目的

- 1、了解分光计的主要构造，正确掌握调整分光计的要求和方法，
- 2、测量三棱镜的顶角。

### 二、实验仪器和器具

分光计 钠光灯 玻璃三棱镜 平面反射镜。

### 三、分光计结构及调节简介

分光计主要由望远镜、平行光管、载物台、读数装置（刻度盘和游标盘）四部分组成，其外形如图1所示。分光计的下部是金属底座，中央竖轴是分光计的旋转主轴（中心轴），轴上有可绕轴转动的望远镜、载物台、刻度盘和游标盘，在立柱上固定有平行光管。

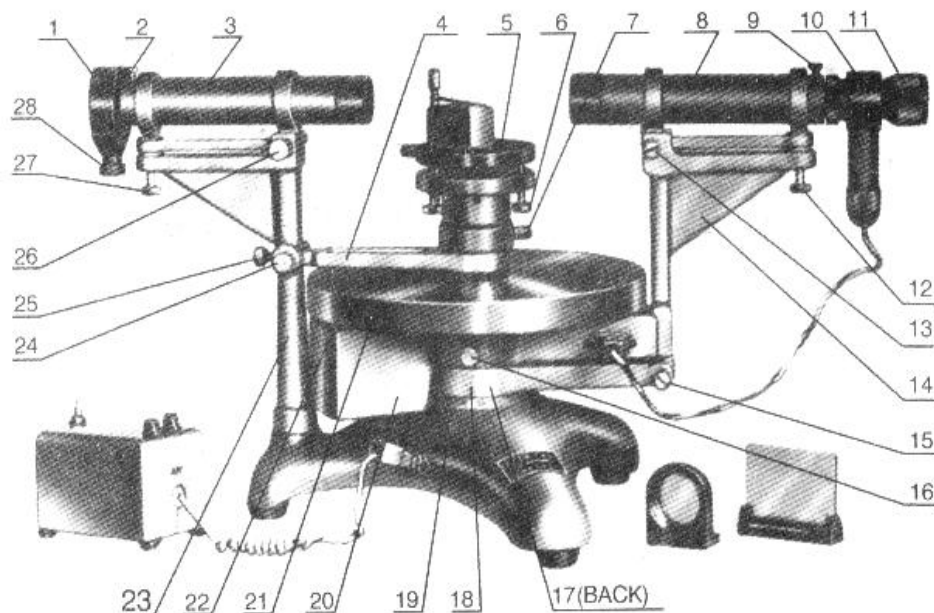


图1 分光计外型图

1. 狭缝装置 2. 狭缝装置锁紧螺钉 3. 平行光管 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 9. 目镜锁紧螺钉 10. 阿贝式自准直目镜 11. 目镜视度调节手轮 12. 望远镜光轴高低调节螺钉 13. 望远镜光轴水平调节螺钉 14. 支臂 15. 望远镜微调螺钉 16. 转座与度盘止动螺钉 17. 望远镜止动螺钉 18. 制动架（一） 19. 底座 20. 转座 21. 度盘 22. 游标盘 23. 立柱 24. 游标盘微调螺钉 25. 游标盘止动螺钉
26. 平行光管锁紧螺钉 27. 平行光管高低调节螺钉 28. 狭缝装置调平螺钉

1. 望远镜：由物镜、阿贝目镜、分划板三部分组成，如图 2 所示。分划板是刻有双十字准线的透明玻璃板，在分划板的双十字垂线下方紧贴一块  $45^\circ$  全反射小三棱镜，其表面涂不透明薄膜，薄膜上刻有一个空心十字透光窗口，当小电珠光射入后，调节目镜调焦手轮，在望远镜视场中可见清晰的准线像。在载物台上放一平面镜，使望远镜垂直对准平面反射镜镜面，松开螺丝

(9)，伸缩目镜筒，调节目镜（连同分划板一起）与物镜的距离，使分划板（空心绿十字像）处于物镜焦平面上，小电珠照亮空心绿十字像的光经物镜后成平行光射在平面镜上，从平面镜反射经物镜在分划板上形成亮十字像。若平面镜与望远镜光轴垂直，此反射像将落在准线上方的交叉点上。上述调节方法称自准直法、望远镜也叫阿贝式自准直望远镜。

阿贝目镜是采用几何分光的办法，光源通过  $45^\circ$  的反射棱镜照亮分划板上的标尺刻线(小十字)，由标尺中心发出的主光线(通过物镜—望远镜系统的孔径光栏，入瞳—中心的光线)与自准直光轴成  $\alpha$  角，并经物镜成像于无穷远，再被物镜前面垂直于光轴的平面反射镜反射后，其反射像的主光线与光轴的夹角为一对称的  $\alpha$  角，因此，再经物镜成像时，像点 A “与原标尺中心 A 以光轴为对称，这种目镜的视场有一小半被棱镜遮挡。(由阿贝目镜的构造可知，操作时不得用手转动分划板下面的通光管，否则引起小孔错位，将无法将小孔照亮)

自准直望远镜安装在支臂上，支臂与转座固定在一起，并套在度盘上，当松开止动螺钉时。转座与度盘一起旋转，当旋紧止动螺钉时，转座与度盘可以相对转动。旋紧制动架与底座上的止动螺钉时，借助制动架末端上的调节螺钉，可以对望远镜进行微调。望远镜系统的光轴位置，可以通过螺钉进行微调。望远镜系统的目镜可以沿光轴移动和转动，目镜的视度可以调节。

2. 平行光管：由会聚透镜及宽度和位置均可调的狭缝装置组成，如图 3 所示，用于产生平行光束，二者通过螺钉连接和固定。用光照亮狭缝（狭缝的宽度在  $0.02-2\text{mm}$  内可以调节）。伸缩狭缝筒使狭缝位于会聚透镜焦平面上时，从狭缝进入平行光管的光，经会聚透镜射出，均为平行光。注意不要随便乱调狭缝宽度，要在望远镜中看到狭缝后方可适当调节狭缝。平行光管的光轴倾度可以通过螺钉来进行微调，

3. 载物台：放置反射镜、棱镜、光栅等光学元件的平台。载物台套在游标盘上，可

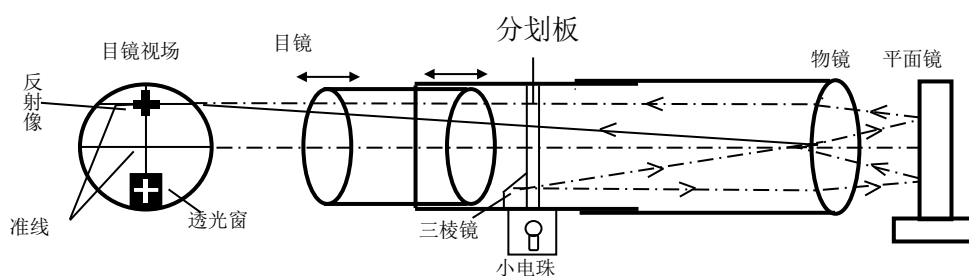


图 2 阿贝式自准直望远镜

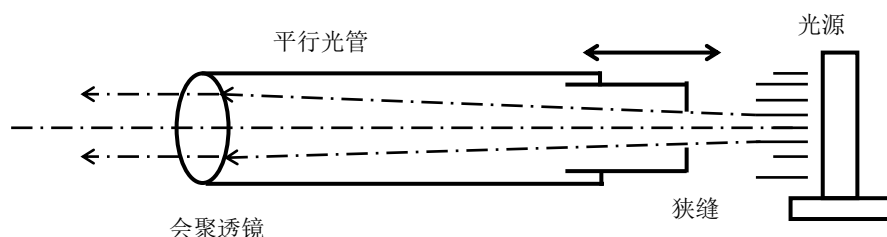


图 3 平行光管

以绕中心轴旋转，载物台侧边有压紧螺钉，用来升高或固定台面不对中轴转动。若旋紧螺钉，载物台与游标盘则连成一个整体而转动。若放松螺钉，载物台可单独转动。台底的三个调平螺丝处在正三角形顶点，用来调节台面斜度和高度，使台面平行于刻度盘。

4. 读数装置：

由刻度盘和角游标盘组成，刻度盘上刻有 720 等分的刻线，每一格的格值为 30 分（即半度），它的 29 格与游标的 30 格相对应，故分光计测角时可以准确读数到  $1'$ 。角游标的读数方法与游标卡尺读数方法类似，首先看清角游标上 0 刻线对在刻度盘上哪个角度（精确到半度），然后根据角游标上哪一根刻线与刻度盘上某根刻线对得最准，就可读出半度以内精确到  $1'$  的读数。为了消除

刻度盘与分光计中心轴线之间的偏心差，在刻度盘同一直径的两端各装有一个游标。测量时，两个游标都应读数，然后算出每个游标两次读数的差，再取平均值。这个平均值可作为望远镜（或载物台）转过的角度。如图4所示读数为 $116^{\circ}12'$ 。旋紧角游标盘，固定螺钉25（图1）调节游标微调螺钉24（图1）可使角游标作微小转动。

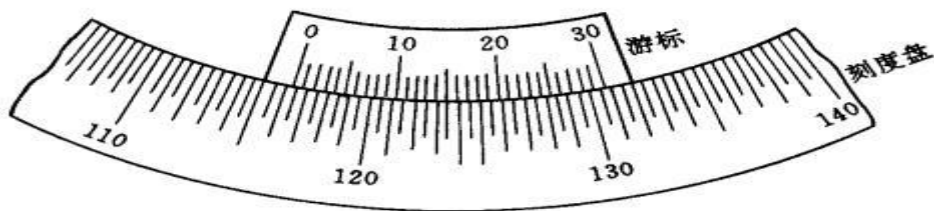


图4 刻度圆盘

测量转角的一般原则是：角游标（与载物台连在一起）固定不动，转动刻度盘（与望远镜连在一起）进行读数，为了读数方便，将游标盘的二个读数装置左右放置，刻度盘 $0^{\circ}$ 刻线固定在望远镜正下方。

注意：测量时，若要大范围转动，必须放松相应的固定螺钉，若要作微小转动，必须旋紧相应的固定螺钉后，再微调相应的微调螺钉就可作微小转动。

分光计的调整要求是：

1. 望远镜聚焦于无穷远即望远镜能接收平行光。
2. 平行光管能发出平行光束。
3. 望远镜、平行光管的光轴同轴等高且垂直于分光计中心轴；
4. 载物台平行于刻度盘。

为了达到上述要求，通常先调整望远镜，并以望远镜为准去调其它的部件。

分光计的调整步骤如下：

1. 调整之前应熟悉分光计的结构，各调节螺丝的位置和作用
  - 1) 望远镜部分：目镜调焦手轮（看清分划板准线）、望远镜对分划板调焦螺钉（看清物体：绿十字像）、倾斜调节螺丝、望远镜（连同游标）的转动止动调螺丝。
  - 2) 平行光管部分：狭缝宽度调节螺丝、管轴倾斜调节螺丝、狭缝与平行光管 透镜间距离调节螺丝。
  - 3) 载物台：台面与中心轴垂直的三个调节螺丝、载物台面升降调节螺丝、
  - 4) 游标盘止动螺丝，望远镜转动调节螺丝，刻度盘转动调节螺丝。
2. 粗调 沿不同方位观察，将望远镜、平行光管、载物台调成水平，并与中心轴垂直，调载物台只需把三个竖直螺丝放松。
3. 用自准直法调整望远镜聚焦于无穷远（能接收平行光）
  - 1) 接通电源，从目镜中观察分划板准线，调目镜手轮，至分划板准线清晰为止。
  - 2) 在载物台上放一平面反射镜，位置如图5所示，这样放置的好处是：若要改变平面镜倾斜度，只要调节载物台下方“a”或“b”螺丝即可，“c”螺钉的调节与平面镜的俯仰无关。
  - 3) 把望远镜筒垂直对准平面反射镜，调节望远镜镜筒的俯仰，使绿十字像通过物镜发出的平行光经反射镜反射后，又返回物镜筒中。于是，在分划板上形成模糊的绿像斑，调节物镜与分划板距离，绿十字像逐渐清晰，最后，应使绿色十字像与分划板无视差，这时望远镜聚焦于无穷远，可以发出平行光和接收平行光了。若没有观察到绿十字像斑，一般是平面反射镜与望远镜光轴不垂直。应进行垂直方位的粗调，也有可能是聚焦不对，要调望远镜的聚焦手轮。

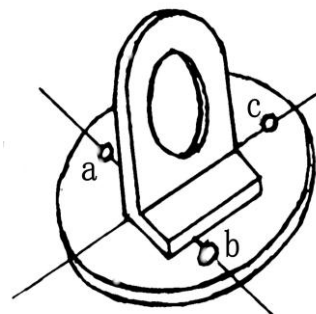


图5 镜放置位置



#### 4. 调节望远镜的光轴垂直于分光计的中心轴

1) 使望远镜垂直对准平面反射镜, 分划板上的绿十字小像位于视场内, 在目镜视场中应看到如 6 图 (a) 或图 6 (b) 的像, 此时采取各半调整法, 使分划板上的绿十字像与分划板准线的上部十字叉丝重合, 如图六 (c) 所示。所谓各半调整法, 就是把绿十字像调到“目的”应有两个步骤, 首先调载物台下螺丝, 让绿十字像向“目的”位置移动一半路程, 接着调望远镜倾斜调节螺丝, 使绿十字像到达“目的”位置 (与分划板准线的上部十字叉丝重合)。

2) 把游标盘连同载物台转  $180^\circ$ , 使望远镜对准平面反射镜的另一面, 用上述各半调整法, 使绿十字像与分划板准线上十字叉丝重合 (如图 6 (c) 所示)。如此重复调整, 直至转动载物台时从平面反射镜前后两表面反射回来的绿十字像都能与分划板准线的上部十字重合, 这时望远镜的光轴与分光计的中心轴垂直, 载物台与刻度盘也达到平行了。

#### 5. 调整平行光管的光轴与分光计中心轴垂直:

1) 使平行光管产生平行光。用光源照亮狭缝, 沿管轴方向前后移动狭缝, 直到在望远镜中看到一条清晰 (边界不模糊), 与准线无视差, 竖直位于视场正中对称位置的狭缝像。这时狭缝位于平行光管透镜的焦平面上, 发出的光是平行光。调节缝宽至望远镜视场中约 1mm。

2) 调整平行光管光轴垂直于分光计中心轴。转动狭缝成水平 (但缝不能沿管轴方向移动), 调节平行光管倾斜调节螺丝, 使水平缝像被分划板中央水平准线上下平分如 (图 7) 所示。至此, 平行光管光轴与仪器中心轴垂直, 发出的平行光平行于刻度盘。

测量时狭缝像是竖立垂直的。经过以上几个步骤, 分光计已调好, 取下平面反射镜, 可以进行

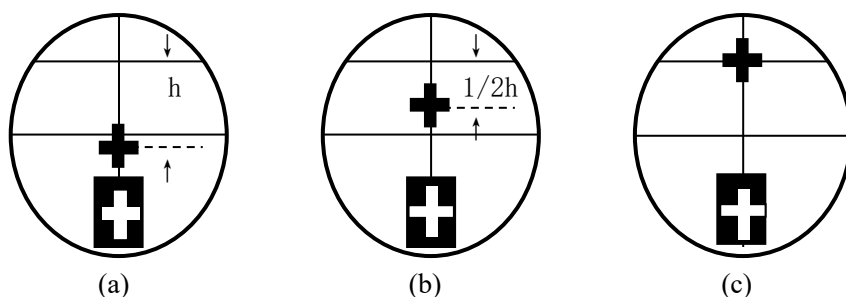


图 6 各半调整法

测量了。**注意：此时望远镜倾斜螺钉切不可再调节了！**

#### 注意事项

1. 望远镜、平行光管上的镜头, 三棱镜、平面镜的镜面不能用手摸、揩。如发现有尘埃时, 应该用镜头纸轻轻揩擦。三棱镜、平面镜不准磕碰或跌落, 以免损坏。

2. 分光计是较精密的光学仪器, 要加倍爱护, 不应在制动螺丝锁紧时强行转动望远镜, 也不要随意拧动狭缝。

3. 在测量数据前务须检查分光计的几个制动螺丝是否锁紧, 若未锁紧, 取得的数据会不可靠。

4. 测量中应正确使用望远镜转动的微调螺丝, 以便提高工作效率和测量准确度。

5. 在游标读数过程中, 由于望远镜可能位于任何方位, 故应注意望远镜转动过程中是否过了刻度的零点。

6. 调整时应调整好一个方向, 这时已调好部分的螺丝不能再随便拧动, 否则会造成前功尽弃。

7. 望远镜的调整是一个重点。首先转动目镜手轮看清分划板上的十字线, 而后伸缩目镜筒看清亮十字。

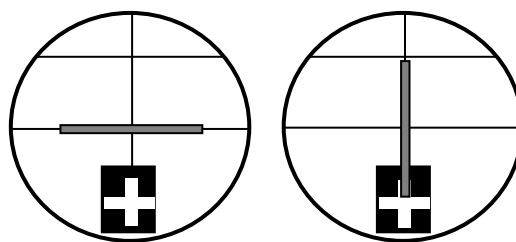


图 7 狭缝调节

## 四、实验内容

三棱镜是分光仪器中的色散元件, 其主截面是等边三角形, 顶角 (即两个折射面的夹角) 称为

棱镜角。测三棱镜顶角一般用自准法和平行光法两种方法。

1. 调整分光计，熟悉分光计结构，学会调节的方法和步骤，调好分光计处于待用状态。
2. 用自准法或平行光法（二种方法任选一种），测量三棱镜的顶角  $A$ ，要求稍微移动三棱镜位置后，重复测三次，根据相应公式，计算顶角  $A$ ，估算误差。

### 3. 测三棱镜顶角 $A$

#### (1) 自准法测量三棱镜顶角

三棱镜放置如图 8 所示，顶角正对观测者，在调节好的分光计载物台上放置三棱镜，固定载物台与游标盘不动，转动望远镜（刻度盘与望远镜固定为一体，且刻度盘的  $0^\circ$  刻度置于望远镜下方）分别垂直对准顶角的二个界面， $AB$  面和  $AC$  面，使垂直反射回来的绿十字像与准线重合。（若反射回来的绿十字像不在准线位置，则只能调节载物台相应螺钉， $AB$  面调节螺钉“ $C$ ”， $AC$  面调节螺钉“ $b$ ”直至  $AB$  面和  $AC$  面的反射绿十字像与准线重合），测出反射光的角坐标  $a_1$ 、 $b_1$  和  $a_2$ 、 $b_2$ ，即可求出这两次反射光夹角  $\varphi$ ，

$$\varphi = (|b_2 - b_1| + |a_2 - a_1|) \div 2$$

$$A = 180^\circ 0' 0'' - \varphi$$

#### (2) 平行光反射法测顶角

三棱镜放置及光路如图 9 所示，在调好的分光计载物台上放置三棱镜，顶角  $A$  正对平行光管，让平行光管射出的平行光直射顶角  $A$ ，转动望远镜测出二反射面反射光的角坐标，即可算出二反射光之夹角  $\varphi$ 。由简单几何关系可知顶角  $A$  等于  $\varphi$  的一半：

$$A = \frac{\varphi}{2} = \frac{1}{4} (|b_2 - b_1| + |a_2 - a_1|)$$

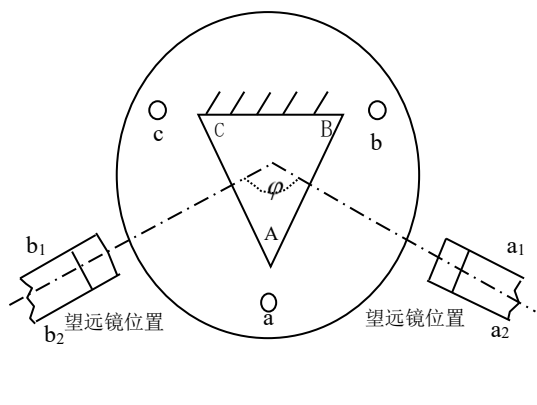


图 8 自准法测棱镜顶角

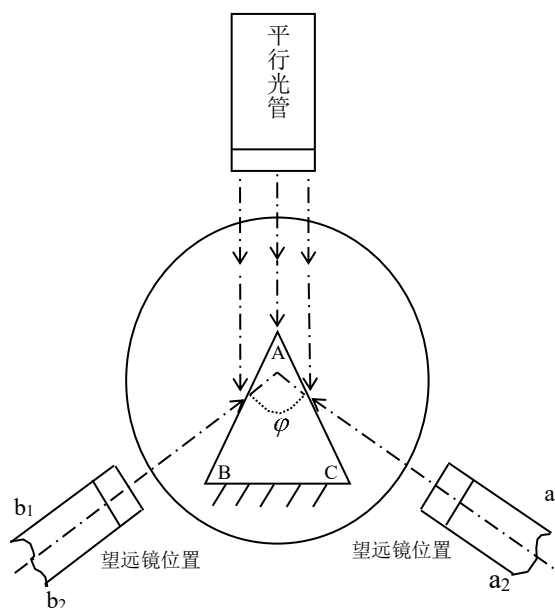


图 9 平行光法测棱镜顶角

表 1 顶角测量数据表格

测量方法

次数	$AC$ 面		$AB$ 面		$ b_2 - b_1 $	$ a_2 - a_1 $	$\varphi$	$A$	$\Delta A$
	左 $b_1$	右 $a_1$	左 $b_2$	右 $a_2$					
1									
2									
3									
平 均									
结果: $A = \bar{A} \pm \Delta \bar{A} =$					相对误差: $E_A = \frac{\Delta A}{A} \times 100\% =$				

平行光法的表格同上, 请自拟。

### 五、思考题

1. 分光计由哪几个部分组成? 其主要作用是什么?
2. (必做) 分光计的调整要求是什么?
3. (必做) 分光计为什么要调整到望远镜光轴与分光计旋转主轴垂直? 不垂直对测量有何影响?

## 实验八 金属杨氏弹性模量的测量

任何物体在外力的作用下，都会发生形变。对于弹性物体，若作用的外力不太大时，则在外力作用停止后，由此引起的形变亦随之消失，这种形变称为弹性形变。

杨氏模量是反映物体在外力作用下发生形变难易程度的重要物理量，它仅仅与材料的性质有关，而与材料形状、长短等无关，它是工程技术中机械构件选材时的重要参数。本实验不仅介绍了如何测定此参数，更重要的是通过实验可以领会仪器的配置原则，了解为什么对不同的长度测量应选用不同的测量仪器，以及在测量中由于测量对象及方法的改变如何估算其系统误差。在实验方法上，通过本实验可以看到，用对称测量法消除系统误差的思路在其他类似的测量中极具普遍意义。在实验装置上的光杠杆镜放大法，由于它的性能稳定，精度高，而且是线性放大，所以，在设计各类测试仪器中得到广泛的应用。

### 一、实验目的

1. 测定金属丝的杨氏模量并理解测量原理；
2. 掌握测量长度微小变化的“光杠杆法”；
3. 学习用逐差法和作图法处理数据。

### 二、实验仪器

伸长法杨氏模量测定仪一套（包括支架，反光镜，尺读望远镜，砝码）、钢卷尺、螺旋测微器等。

### 三、实验原理

#### （1）杨氏弹性模量定义式

设有一横截面积为  $S$ ，长度为  $L_0$  的均匀金属丝（或棒），金属丝（或棒）一端固定，另一端施以拉力  $F$ ，结果伸长了  $\Delta L$ 。若用相对伸长  $\Delta L / L_0$  表示其形变，根据胡克定律：在弹性限度内，伸长形变与胁强  $F / S$  成正比即：

$$\frac{\Delta L}{L_0} = \frac{1}{E} \times \frac{F}{S} \text{ 或 } E = \frac{FL_0}{S\Delta L} \quad (5-1)$$

式中  $E$  为金属丝的杨氏模量（简称弹性模量），它表征材料的强度性质，只与材料的质料有关，而与材料的形状大小无关。并且在数值上， $E$  等于相对伸长为 1 时的胁强，所以它的单位与胁强的单位相同，称为杨氏弹性模量，它的单位为： $\text{N/m}^2$ 。

实验证明：弹性模量  $E$  与外力  $F$ 、物体长度  $L_0$  以及截面积的大小均无关，而只取决于物体的材料本身的性质，它是表征固体性质的一个物理量。本实验是测定某一种型号钢丝的杨氏弹性模量，其中  $F$  可以由所挂的砝码的重量求出，截面积  $S$  可以通过螺旋测微计测量金属丝的直径计算得出， $L_0$  可用米尺等常规的测量器具测量，但  $\Delta L$  由于其值非常微小，用常规的测量方法很难精确测量。本实验将用放大法——“光杠杆法”来测定这一微小的长度改变量  $\Delta L$ ，图 5.1 是光杠杆镜的实物示意图。

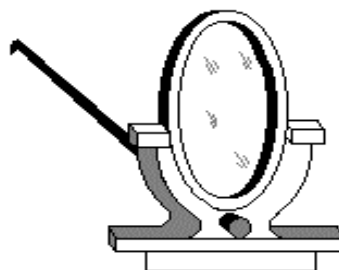


图 5.1 光杠杆

#### （2）光杠杆放大原理

光杠杆由平面反射镜、前足、后足组成，如图 5.1 所示。用光杠杆法测量  $\Delta L$ ，实验装置如图 5.2，光杠杆是在由一刀片和与刀片垂直的金属杆（后足）组成的成“L”形的底座上直立放置一平面镜而构

成的，（有的光杠杆将刀片换成两个“足”，所以光杠杆也称为三足镜），使用时刀片（或前足）放在平台上，后足放在平台小园孔中用于夹紧金属丝的夹头上，若系统已调节到最佳状态，通过望远镜可以从小镜中看到附在望远镜架上的标尺的像，利用望远镜内的分划板上的叉丝  $a$ 、 $b$ （或  $b$ 、 $c$ ）在标尺像上的读数之差再乘 100，即得标尺到平面镜镜面的距离  $D$ ，如图中圆内部分所示。当金属丝的初负荷（为了拉直金属丝所加的砝码重量）为  $F_0$  时，叉丝  $b$ （或  $a$ 、 $c$ ）在标尺上的示数为  $x_0$ ，若增加一重量  $F$ ，设长为  $L_0$  的金属丝伸长了  $\Delta L$ ，光杠杆后足就下降了  $\Delta L$  见图 5-3，则平面镜以刀口线为轴旋转了  $\varphi$  角。由光学的反射定律可知，入射线与反射线之间的夹角为  $2\varphi$ ，于是叉丝  $b$ （或  $a$ 、 $c$ ）移

到了标尺上的  $x$  处，当  $\varphi$  角甚小时，根据图中的几何关系有  $\Delta L = \varphi d$ ， $2\varphi = \frac{x - x_0}{D}$ 。

$$\therefore \Delta L = \frac{d(x - x_0)}{2D} \quad (5-2),$$

式中  $d$  为光杠杆后足足尖到刀口线的垂直距离， $D$  为平面镜到标尺的距离。

设金属丝的直径为  $d_0$ ，则截面积  $S = \frac{1}{4}\pi d_0^2$ ，将  $F$  和  $\Delta L$  代入（5-1）式，得

$$E = \frac{8LDF}{\pi d_0^2 d(x - x_0)} \quad (5-3).$$

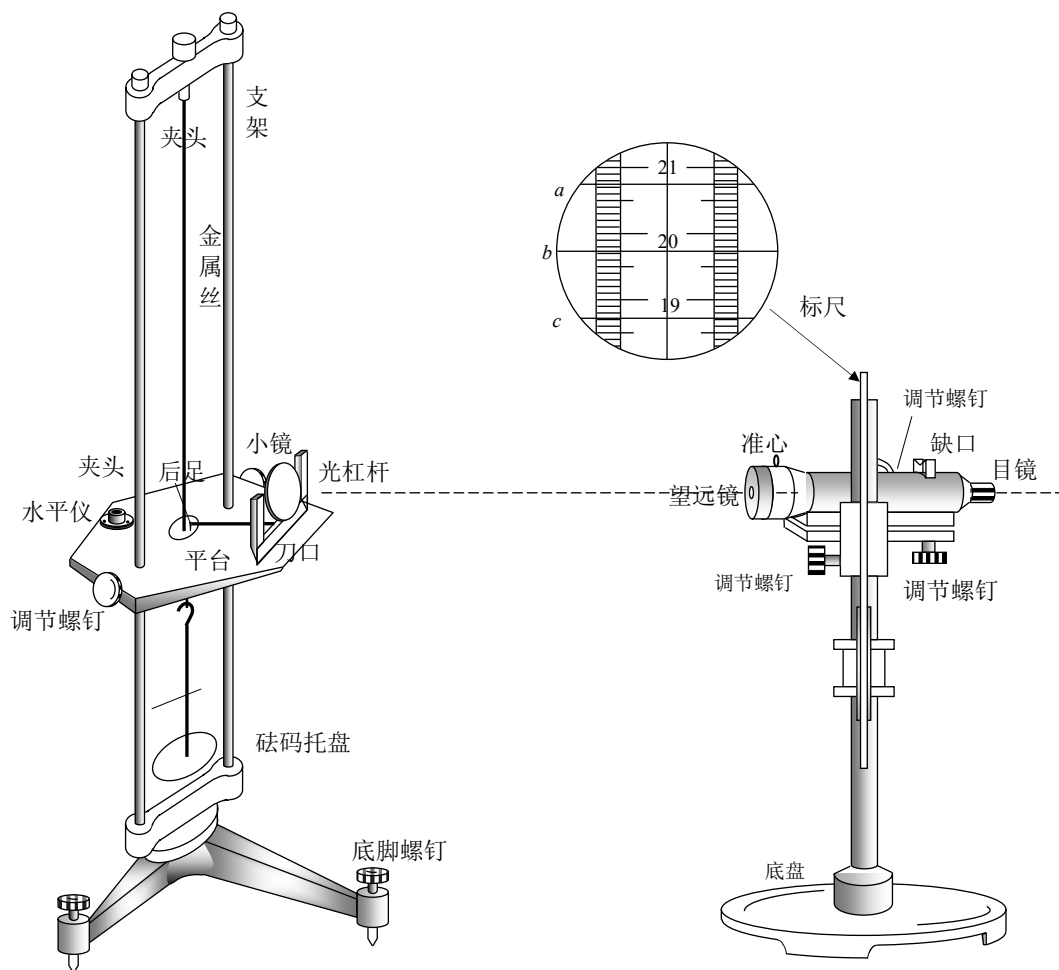


图 5.2 实验装置图

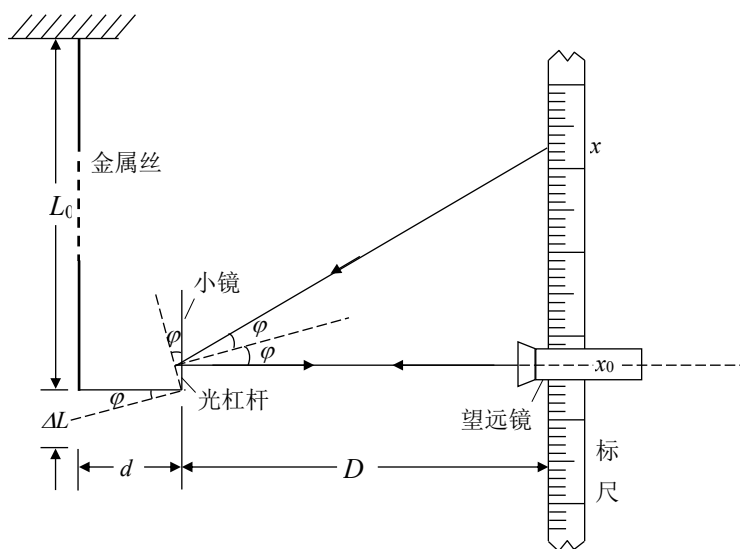


图 5.3 光光杠杆工作原理图

#### 四、实验内容及步骤

##### 1. 调节仪器

按图 5.2 装置仪器，在砝码托盘上加上初负荷  $F_0$  (1~2kg)，然后按下述步骤调节仪器：

(1) 调节金属丝支架的底脚螺钉使平台中央圆孔内的夹头与圆孔壁无摩擦，调节平台上的调节螺钉使平台水平且与夹头顶面等高；

(2) 如图放置光杠杆，注意后足必须落在夹子上，不能与钢丝相碰，小镜必须铅直；

望远镜系统置于金属丝支架正前方 1 米以上的的位置；

(3) 调节相应的螺钉使：①标尺面与小镜面对正，②望远镜的光轴与小镜中心等高，且垂直镜面（可借助准心和缺口进行调节）；

(4) 由缺口处向小镜观察，应当看到标尺的像，若看不到，则从左、右、上、下去看，若在左边看到，说明镜面偏左，可轻轻向右移动一下光杠杆（必须注意什么问题？），再观察，若已看到，再从望远镜中去看，一面看，一面调节调焦螺钉，此时就能看到十分清晰的标尺像了，再旋转一下目镜使叉丝清晰，若叉丝（例如  $b$  线）所对标尺刻度数过高或过低（相对光轴位置而言），再轻轻调节一下小镜的倾角，使叉丝所对刻度尽量在光轴位置附近，调好的状态如图中园内所示，调好后的系统不能随意碰触它。

##### 2. 测量过程

(1) 记下此时叉丝  $b$ （或  $a$ 、 $c$ ）所对标尺上的示数  $x_0$ （初负荷  $F_0$  视为零）。用重量  $M=1000$  克的砝码 5 个，依次加于托盘上，同时依次读下相应的示数  $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5$ （此为加重过程的测量）。

(2) 再用一砝码加于托盘上，但不读数，稍后，将此砝码取下，记下此时示数  $x_5'$ ，再依次减去所加的 5 个砝码，同时依次读下相应的  $x_4', x_3', x_2', x_1', x_0'$ ，（此为减重过程的测量）。

(3) 用适当的仪器和方法测出  $L_0$ 、 $d_0$ 、 $d$  和  $D$  的值。

测  $d$  时，将光杠杆（或三足镜）放于平整的纸上印出刀口和后足尖的印迹，在纸上测出后足尖到刀口线的垂直距离即为  $d$ ；利用叉丝在标尺上的读数差测出  $D$ （ $D = |x_a - x_b| \times 100$  或

$D = \frac{|x_a - x_c|}{2} \times 100\%$ ), 在测  $D$  时最好在系统调好时进行。

## 五、数据处理

将所测数据填入下表, 并按公式  $\bar{x}_i = (x_i + x'_i)/2$  求平均值 ( $i=0, 1, 2, 3, 4, 5$ ), 然后用以下两种方法处理数据, 分别求出所测金属丝的杨氏模量。

1. 逐差法处理数据: 表中  $\Delta x_i = \bar{x}_{i+3} - \bar{x}_i$  ( $i=0, 1, 2$ ) 一栏, 要求算出以下三个差值。

$$\text{当 } i=0 \text{ 时, } \Delta x_0 = \bar{x}_3 - \bar{x}_0$$

$$\text{当 } i=1 \text{ 时, } \Delta x_1 = \bar{x}_4 - \bar{x}_1$$

$$\text{当 } i=2 \text{ 时, } \Delta x_2 = \bar{x}_5 - \bar{x}_2$$

对照表中负重  $F_i$  的数据, 可以看出  $\Delta x_0, \Delta x_1$  和  $\Delta x_2$  表示负重为 0 克, 1000 克和 2000 克时依次增加 3 个砝码 (即  $3M=3000$  克), 在标尺上示值之差。按胡克定律可知, 增重一样,  $\Delta x_0, \Delta x_1$  和  $\Delta x_2$  就应相等, 但是由于测量不可能绝对准确, 因此它们之间有差异, 为了减小实验误差, 求  $\Delta x_0, \Delta x_1$  和  $\Delta x_2$  的平均值, 用  $\overline{\Delta x}$  表示。将  $\overline{\Delta x}$  和已知对应的  $F=3Mg$  代入 (5-3) 式, 即得逐差法处理的结果:

$$E_1 = \frac{24L_0DMg}{\pi d_0^2 d \Delta x} \quad (5-4)$$

上述逐差法实际上是分组逐差法 (简称逐差法), 即将 6 个  $\bar{x}_i$  值平均分为两组 (若  $\bar{x}_i$  为奇数个值, 前组多一个值), 对应项逐次相减。此方法的优点在于所有  $\bar{x}_i$  的测量值都用上了, 起到了在大量数据中求平均以减小实验误差的作用, 并且在计算中  $\bar{x}_i$  出现的几率都一样, 显然这是比较合理的。如果采用后项减前项依次逐差来求平均值, 即

$$\overline{\Delta x'} = \frac{1}{5}[(\bar{x}_1 - \bar{x}_0) + (\bar{x}_2 - \bar{x}_1) + (\bar{x}_3 - \bar{x}_2) + (\bar{x}_4 - \bar{x}_3) + (\bar{x}_5 - \bar{x}_4)] = \frac{1}{5}(\bar{x}_5 - \bar{x}_0)$$

结果只用了首尾两个值  $\bar{x}_0$  和  $\bar{x}_5$ , 这显然是不恰当的。因此应当避免采用这种方法。

2. 作图法处理数据: 由数据表可知, 负重为  $P_i$  时, 得对应的值为  $\bar{x}_i$ , 故 (5-3) 式可改写为

$$\bar{x}_i - \bar{x}_0 = \frac{8L_0D}{\pi d_0^2 d E} F_i \text{ 或 } \bar{x}_i = \bar{x}_0 + mF \quad (5-5)$$

$$m = \frac{8LD}{\pi R^2 d E} \quad (5-6)$$

由 (5-5) 式可知,  $\bar{x}_i$  与  $F_i$  是直线关系,  $m$  为该直线的斜率。据此, 以  $F_i$  为横坐标, 以  $\bar{x}_i$  为纵坐

标, 作出  $\bar{x}-F$  的直线关系图, 并从图上取两点求出直线斜率  $m$ , 将  $m$  代入 (5-6) 式, 即得作图法处理数据的结果

$$E_2 = \frac{8L_0 D}{\pi d_0^2 dm} \quad (5-7)$$

### 注 意

- 1、在整个测量过程中, 都要保持系统的稳定状态。
- 2、被测钢丝长度调整好后, 一定要用锁紧螺钉将钢丝紧固在钢丝夹头之中, 防止钢丝偏斜与滑长。
- 3、光杠杆, 望远镜标尺调好后, 整个实验中防止位置变动。
- 4、加取砝码要轻取轻动, 待钢丝不动时再观测数据。

表 1 数据表格

依次增加一个砝码的质量 $M=1000$ 克			$D =$ (cm)		$d =$ (cm)
丝的质料			$L_0 =$ (cm)		$d_0 =$ (cm)
次数 $i$	负 重 $F_i$ (克)	加重过程 $x_i$ (cm)	减重过程 $x'_i$ (cm)	平均值 $\bar{x}_i$ (cm)	$\Delta x_i = \bar{x}_{i+3} - \bar{x}_i$ (cm)
0	0				
1	1000				
2	2000				
3	3000				$\overline{\Delta x} =$ (cm)
4	4000				
5	5000				

$$\text{逐差法处理的结果 } E_1 = \frac{24L_0 DMg}{\pi d_0^2 d \overline{\Delta x}} =$$

$$\text{作图法处理的结果 } E_2 = \frac{8L_0 D}{\pi d_0^2 dm} = \quad \text{直线斜率 } m =$$

以  $Mg$  为横坐标,  $\Delta x_i$  纵坐标在实验报告上组做图, 计算直线斜率  $m$ 。

### 六、思考题

1. 利用公式 (5-3) 求  $E$ , 必须满足哪些条件? 怎样做才能满足这些条件?
2. 在测量过程中, 如果不慎碰触了光杠杆或望远镜系统, 这样的测量还有效吗? 想一想, 影响光杠杆稳定性的因素有那些? 怎样才能避免这些因素。



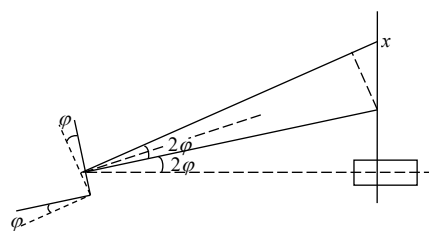
3. (必作) 利用光杠杆测微小变化量 $\Delta L$ , 变为测 $\Delta x$ , 若把 $\beta = \frac{\Delta x}{\Delta L}$ 称作光杠杆的“放大率”, 根据

光杠杆原理 $\beta = \frac{2d_0}{d}$ , 请计算一下你作实验时的 $\beta$ 是多少?能否用

增加 $d_0$ 和减小 $d$ 来提高 $\beta$ , 这样做有什么好处?有没有限度?

4. 如果系统状态调节良好, 操作无误, 测得一组 $(x, F)$ 的数据, 根据理论, 作 $x-F$ 曲线应为一直线, 但往往作出的直线起始段总是向下弯曲一些, 这是什么原因?能否消除它?如果不能, 用什么方法处理这组数据, 才能使 $E$ 计算得更准确些?

5. (必作) 为什么要把在初负荷时, 叉丝在标尺上的示数 $x_0$ , 调在光轴附近?如果没有调在光轴附近(如小镜倾斜), 而使 $x_0$ 在图 5 中 A 点, 根据几何光学原理, 试分析此时对测量结果有何影响?据此分析, 你认为 $x_0$ 的位置应选在什么地方最佳?



习题 5 光路图

## 实验九 声速的测量

声波是一种在弹性媒质中传遍的机械波，振动频率在 20–20000Hz 的声波称为可闻声波，频率低于 20Hz 的声波称为次声波，频率高于 20000Hz 的声波称为超声波。声波的波长、频率、强度、传播速度等是声波的特性。对这些量的测量是声学技术的重要内容。由于超声波具有波长短、能定向传播等特点，所以在超声波段进行声速测量是比较方便的。本实验就是测量超声波在空气中的传播速度。超声波的发射和接收一般通过电磁振动与机械振动的相互转换来实现，最常见的是利用压电效应和磁致伸缩效应。在实际应用中，对于超声波测距、定位测液体流速、测量材料弹性模量、测量气体温度的瞬间变化等方面，超声波传播速度都有重要意义。

### 一、实验目的

1. 学习测量超声波在空气中的传播速度的方法
2. 加深对驻波和振动合成等理论知识的理解
3. 了解压电换能器的功能和培养综合使用仪器的能力

### 二、实验仪器

声速测量仪，示波器，声速信号源

### 三、实验原理

声速  $V$ ，声源振动频率  $f$  和波长  $\lambda$  之间的关系为：

$$V = f \cdot \lambda \quad (1)$$

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

#### 1、驻波法

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

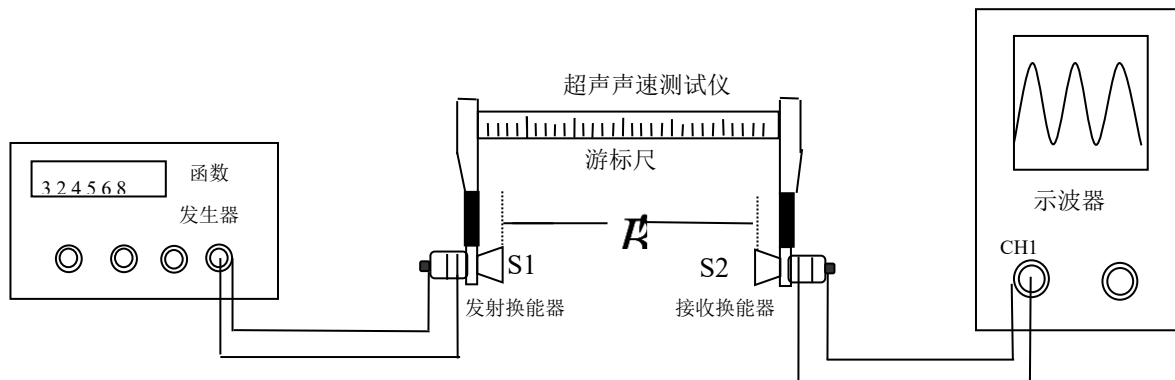


图 1 驻波法测声速装置图

时, 会产生驻波共振, 波腹处的振幅达到最大值。

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

## 2. 相位法

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

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

利用这个公式可精确测量波长。

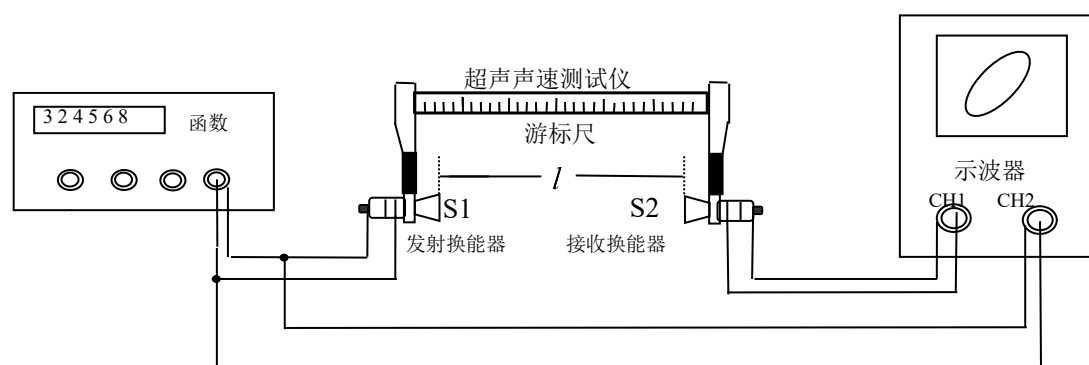


图 2 相位法测声速实验装置图

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

需要说明的是, 在实际操作中, 用示波器测定电信号时, 由于换能器振动的传递或放大电路的相移, 接受器端面处的声波与声源并不同相, 总是有一定的相位差。为了判断相位差并测量波长, 可以利用双踪示波器直接比较发射器的信号和接收器的信号, 进而沿声波传播方向移动接收器寻找同相点来测量波长; 也可以利用李萨如图形寻找同相或反相时椭圆退化成直线的点。

## 四、实验内容及步骤

### (一) 声速测试仪系统的连接与调试

在通电后, 信号源自动工作在连续波方式, 选择的介质为空气的初始状态, 预热 15min。声速测试仪和声速信号源及双踪示波器之间的连接如图 1 所示。

### (二) 测定压电陶瓷换能器系统的最佳工作点

只有当换能器 S1 和 S2 发射面与接收面保持平行时才有较好的接收效果; 为了得到较清晰的接收波形, 应将外加的驱动信号频率调节到发射换能器 S1 谐振频率点处, 才能较好地进行声能与电能的相互转换, 提高测量精度, 以得到较好的实验效果。

超声换能器工作状态的调节方法如下: 各仪器都正常工作以后, 调节信号频率 (在 33~37kHz), 观察频率调整时接收波的电压幅度变化, 在某一频率点处电压幅度最大, 同时声速测试仪信号源的信号指示灯亮, 此频率即是压电换能器 S1、S2 相匹配的频率点, 记录频率  $f$ , 改变 S1 和 S2 之间的距离, 适当选择位置 (即: 至示波器屏上呈现出最大电压波形幅度时的位置), 再微调信号频率,

如此重复调整，再次测定工作频率，共测 6 次，取平均值  $\bar{f}$ 。

(三) 测量声速

1. 用驻波法测声速

- (1) 按图 1 连接电路，使 S1 和 S2 靠近并留有适当的空隙，两端面平行且与游标尺正交。
- (2) 将信号发生器的输出频率调至换能器的工作频率  $f$  附近，缓慢移动 S2，当在示波器上看到正弦波首次出现振幅较大处，固定 S2，再仔细微调信号发生器的输出频率，使荧光屏上图形振幅达到最大，读出共振频率  $f$ 。
- (3) 在共振条件下，将 S2 移近 S1，再缓慢移开 S2，当示波器上出现振幅最大时，记下 S2 的位置  $L_1$ 。
- (4) 由近及远移动 S2，逐次记下各振幅最大时 S2 的位置为  $L_2$ 、 $L_3$ 、 $\cdots$ 、 $L_{12}$ ，共测 12 个。
- (5) 用逐差法算出声波波长的平均值。

2. 用相位法测声速

- (1) 按图 2 连接电路。
- (2) 将示波器“秒/格”旋钮旋至 X-Y 档，信号发生器接示波器 CH2 通道，用李萨如图形观察发射波与接收波的位相差。
- (3) 在共振条件下，使 S2 靠近 S1，然后慢慢移开 S2，当示波器上出现  $45^\circ$  倾斜线时，微调游标卡尺的微调螺丝，使图形稳定，记下 S2 的位置  $L_1$ 。
- (4) 继续缓慢移开 S2，依次记下示波器上出现直线时游标卡尺的读数  $L_2$ 、 $L_3$ 、 $\cdots$ 、 $L_{12}$ ，共测 12 个。
- (5) 用逐差法算出声波波长的平均值。

注意事项

- 1. 实验前应了解压电换能器的谐振频率。
- 2. 实验过程中要保持谐振频率不变。

五、数据处理

表 1 陶瓷换能器系统最佳工作频率

室温  $t =$              $^\circ\text{C}$

次数	1	2	3	4	5	平均
$f$ (KHz)						
$\Delta f$ (KHz)						

表 2 共振干涉法测量声速

标 尺 读 数 (mm)		相距 6 个 $\lambda/2$ 的距离 (mm)	$\Delta(\Delta L)$ (mm)
$L_1 =$	$L_7 =$	$\Delta L_1 = L_7 - L_1 =$	
$L_2 =$	$L_8 =$	$\Delta L_2 = L_8 - L_2 =$	
$L_3 =$	$L_9 =$	$\Delta L_3 = L_9 - L_3 =$	
$L_4 =$	$L_{10} =$	$\Delta L_4 = L_{10} - L_4 =$	
$L_5 =$	$L_{11} =$	$\Delta L_5 = L_{11} - L_5 =$	
$L_6 =$	$L_{12} =$	$\Delta L_6 = L_{12} - L_6 =$	

	$\overline{\Delta L} =$	$\overline{\Delta(\Delta L)} =$
--	-------------------------	---------------------------------

$$\bar{\lambda} = \frac{2}{6} \overline{\Delta L} = \quad \text{mm} \qquad \overline{\Delta \lambda} = \frac{2}{6} \overline{\Delta(\Delta L)} = \quad \text{mm}$$

$$\bar{V} = \bar{\lambda} \cdot \bar{f} = \quad \text{m/s} \qquad E_V = \frac{\overline{\Delta \lambda}}{\bar{\lambda}} + \frac{\overline{\Delta f}}{\bar{f}} = \quad \%$$

$$V = \bar{V} \pm \Delta V = \quad \text{m/s} \qquad \Delta V = \bar{V} \times E_V = \quad \text{m/s}$$

已知声速在标准大气压下与传播介质空气的温度关系为：

$$V_s = (331.45 + 0.59 t) = \quad \text{m/s} \quad (t \text{ 为室温})$$

$$\overline{\Delta V} = |\bar{V} - V_s| = \quad \text{m/s} \qquad E = \frac{\overline{\Delta V}}{V_s} \times 100\% = \quad \%$$

表 3 相位比较法测量声速

标 尺 读 数 (mm)		相距 6 个 $\lambda$ 的距离 (mm)	$\Delta(\Delta L)$ (mm)
$L_1 =$	$L_7 =$	$\Delta L_1 = L_7 - L_1 =$	
$L_2 =$	$L_8 =$	$\Delta L_2 = L_8 - L_2 =$	
$L_3 =$	$L_9 =$	$\Delta L_3 = L_9 - L_3 =$	
$L_4 =$	$L_{10} =$	$\Delta L_4 = L_{10} - L_4 =$	
$L_5 =$	$L_{11} =$	$\Delta L_5 = L_{11} - L_5 =$	
$L_6 =$	$L_{12} =$	$\Delta L_6 = L_{12} - L_6 =$	
		$\overline{\Delta L} =$	$\overline{\Delta(\Delta L)} =$

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{6} \overline{\Delta L} = \quad \text{mm} \qquad \overline{\Delta \lambda} = \frac{1}{6} \overline{\Delta(\Delta L)} = \quad \text{mm}$$

$$\bar{V} = \bar{\lambda} \cdot \bar{f} = \quad \text{m/s} \qquad E_V = \frac{\overline{\Delta \lambda}}{\bar{\lambda}} + \frac{\overline{\Delta f}}{\bar{f}} = \quad \%$$

$$V = \bar{V} \pm \Delta V = \quad \text{m/s} \qquad \Delta V = \bar{V} \times E_V = \quad \text{m/s}$$

$$V_s = (331.45 + 0.59 t) = \quad \text{m/s}$$

$$\overline{\Delta V} = |\bar{V} - V_s| = \quad \text{m/s} \qquad E = \frac{\overline{\Delta V}}{V_s} \times 100\% = \quad \%$$

## 六、思考题

1. (必做) 用逐差法处理数据的优点是什么？
2. (必做) 如何调节与判断测量系统是否处于共振状态？
3. 分析压电换能器的工作原理。
4. (必做) 为什么在共振状态下测定声速？

## 附：声速测量仪

### 压电陶瓷换能器

SV-DH 系列声速测试仪主要由压电陶瓷换能器和读数标尺组成。压电陶瓷换能器是由压电陶瓷片和轻重两种金属组成。

压电陶瓷片是由一种多晶结构的压电材料（如石英、锆钛酸铅陶瓷等），在一定温度下经极化处理制成的。它具有压电效应，即受到与极化方向一致的应力  $T$  时，在极化方向上产生一定的电场强度  $E$  且具有线性关系： $E=CT$ ；当与极化方向一致的外加电压  $U$  加在压电材料上时，材料的伸缩形变  $S$  与  $U$  之间有简单的线性关系： $S=KU$ ， $C$  为比例系数， $K$  为压电常数，与材料的性质有关。由于  $E$  与  $T$ ， $S$  与  $U$  之间有简单的线性关系，因此我们就可以将正弦交流电信号变成压电材料纵向的长度伸缩，使压电陶瓷片成为超声波的波源。即压电换能器可以把电能转换为声能作为超声波发生器，反过来也可以使声压变化转化为电压变化，即用压电陶瓷片作为声频信号接收器。因此，压电换能器可以把电能转换为声能作为声波发生器，也可把声能转换为电能作为声波接收器之用。

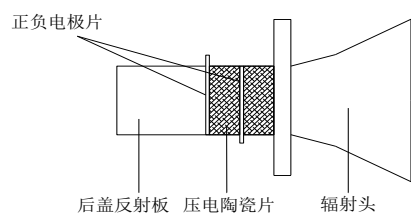


图3 压电陶瓷换能器的结构简图

压电陶瓷换能器根据它的工作方式，可分为纵向（振动）换能器、径向（振动）换能器及弯曲振动换能器。图3所示为纵向换能器的结构简图。

## 实验十 惠斯通电桥测电阻

电桥测量法是一种典型的比较测量法,即把被测量与同类性质的已知标准量进行比较,从而确定被测量的大小,具体实施这种方法的仪器就是电桥。电桥在电磁测量中有着广泛而重要的应用。电桥可以测量电阻、电容、电感、温度、频率及压力等许多物理量。电桥可分为直流电桥和交流电桥,直流电桥又分为单臂电桥和双臂电桥,单臂电桥又称惠斯登电桥,惠斯登电桥是最简单的一种。主要用于精密测量中值( $10 \sim 10^5 \Omega$ )电阻。掌握电桥测量工作原理,对电气测量工作具有十分重要的意义。

电桥法测电阻的主要优点是精确度高,但缺点是操作稍感麻烦。也不能用它测量非线性电阻。现在数字式欧姆表已广泛应用,在要求不十分高的情况下,数字式欧姆表测量方法简单,精确度适中,可以用它代替电桥测电阻。

### 一、实验目的

1. 了解惠斯通电桥的原理和桥式电路的特点
2. 掌握电桥法测电阻的原理和调节电桥平衡的要领,学会使用电桥测电阻的方法
3. 学习消除系统误差的一种方法——交换测量法

### 二、仪器用具

箱式电桥、电阻箱、滑线变阻器、检流计、开关、电源、待测电阻和导线若干

### 三、实验原理

#### 1. 惠斯通电桥

惠斯通电桥的原理性线路如图10.1所示。四个电阻 $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_x$ 、 $R_0$ 组成电桥的四个臂,连成一个四边形 $ABCD$ ,每条边称为电桥的一个桥臂。在四边形的对角 $A$ 和 $C$ 之间接有电源 $E$ ,故称之为电源对角线;在对角 $B$ 和 $D$ 之间接上检流计 $G$ ,称之为测量对角线。所谓电桥的“桥”就是指这条对角线而言,其作用是将桥的两个端点的电位进行比较。 $DC$ 称为标准臂, $BC$ 称为待测臂。 $G$ 的作用就是比较 $B$ 、 $D$ 两点的电位。当 $B$ 、 $D$ 两点电位相等时,检流计中无电流通过,这种状态称作电桥平衡。电桥平衡时,有:

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} R_0 \quad (10-1)$$

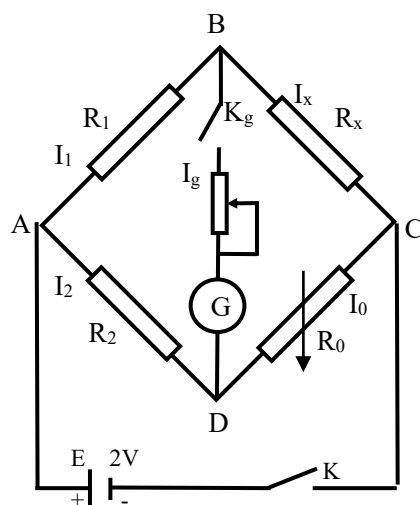


图 10.1 电桥原理

若已知 $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_0$  (或 $R_0$ 及比率 $R_1/R_2$ ), 则可由(10-1)式求出 $R_x$ 。

由(10-1)式可知,通过电桥用比较法能够测量电阻。未知电阻 $R_x$ 可与已知电阻比较而求出。测量过程中,对电源的稳定度要求不高,也不要求检流计给出定量读数,测量结果由精密电阻箱给出。因此,电桥能准确地测量电阻。在实际操作中,一般先选定 $R_1/R_2$ 的数值,再调节 $R_0$ 就可使电桥达到平衡。

#### 2. 电桥测量电阻的误差来源

##### 1) 桥臂电阻带来的误差

由于电桥存在着接线电阻、接触电阻、漏电阻等,将给测量结果带来误差。因此,它不适用于

小电阻的测量。对于一般中等电阻（如  $10\sim 10^5\Omega$ ），上述因素对结果精度的影响可以忽略不计，即使使用普通的惠斯登电桥也能达到较高的准确度。

### 2) 交换法消除比率臂的误差影响

当电桥灵敏度较高时，由（10-1）式看出：被测电阻  $R_x$  的准确程度取决于  $R_0$  和  $R_1/R_2$  的准确程度。若保持  $R_1$  和  $R_2$  不变，把  $R_0$  和  $R_x$  的位置交换，再调节  $R_0$  使电桥平衡，设电桥平衡时  $R_0$  变为  $R'_0$ ，根据电桥原理则有：

$$R_x = \frac{R_2}{R_1} R'_0 \quad (10-2)$$

$$\text{联立 (10-1) 式、(10-2) 式可得} \quad R_x = \sqrt{R_0 \times R'_0} \quad (10-3)$$

由于（10-3）式中没有  $R_1$  和  $R_2$ ，就可以消除由于  $R_1$  和  $R_2$  的数值不准而带来的系统误差。这种将测量中的某些条件（例如被测物的位置）相互交换，使产生系统误差的原因对测量的结果起相反的作用，从而抵消了系统误差，是处理系统误差的基本方法之一，称为交换法。

### 3) 电桥灵敏度带来的误差

平衡条件（10-1）式的成立，通过检流计指零来判断。由于判断时存在着视差，因而给结果引进一定的误差。这个影响的大小取决于电桥的灵敏度。

什么是电桥的灵敏度呢？在已经平衡的电桥里，当调节臂电阻  $R_x$  变动其值  $\Delta R_x$  时，检流计的指针离开平衡时位置  $\Delta n$  格，定义电桥灵敏度  $S$  为：

$$S = \frac{\Delta n}{\left(\frac{\Delta R_x}{R_x}\right)} \quad (10-4)$$

它表示电桥平衡后， $R_x$  的相对改变量  $\frac{\Delta R_x}{R_x}$  所引起检流计指针有  $\Delta n$  的偏离格数。 $S$  愈大，对平衡的判断也愈灵敏，对电桥平衡的判断就越准，带来的误差就愈小。电桥灵敏度的高低取定与电源电压的高低、检流计本身的灵敏度、四个桥臂的搭配及桥路电阻的大小。因此它并非定值，需随上述因素的变动作具体测定。

### 3. 测量结果的有效数字

由（10-1）式可知， $R_x$  决定于  $(R_1/R_2) \times R_0$ 。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  $N = R_1/R_2$  为比例臂倍率，

$$\text{则有} \quad R_x = NR_0 \quad (10-5)$$

由于  $N$  是两个标准电阻的比值，可以认为它是足够准确的。于是由（10-5）式可知， $R_x$  的有效数字位数决定于  $R_0$  的阻值的位数，若  $R_0$  为一个  $0\sim 999.9\Omega$  的电阻箱，那么要将  $R_x$  测准，就要适当选择  $N$ ，使  $R_0$  保持四位有效数字。例如，假设  $R_x = 5.023\Omega$ ，若选  $N=1$ （ $R_1 = R_2$ ），则由于电阻箱所限， $R_0$  只能调到  $5.0\Omega$  桥路最接近平衡，调不出  $5.023\Omega$  来，所以  $R_x$  仅有两位有效数字。若选  $N=0.001$ ，电桥平衡时，测得  $R_0 = 5023\Omega$ ， $R_x = 0.001 \times 5023 = 5.023\Omega$ ，可以得到四位有效数字，由此可见，对应于大小不同的待测电阻，比例臂倍率  $N$  的选择应有所不同。

### 4. 箱式惠斯通电桥的结构（QJ23 型直流单电桥）

QJ23 型箱式直流单臂电桥采用惠斯通电桥线路，线路及板面布置见图 10.2 所示。比率臂  $N$ （相当于图 10.1 中的  $R_1/R_2$ ）、比较臂电阻  $R_0$ 、检流计及电池组等都装在一个箱子内，测量  $1\sim 10^6$  欧姆范围内的电阻时极为方便。该电桥准确度等级为 0.2 级，被测电阻为  $1.0\sim 9999$  欧姆时，用内部电源和内附检流计，测量结果的相对误差可近似为  $\pm 0.2\%$ 。



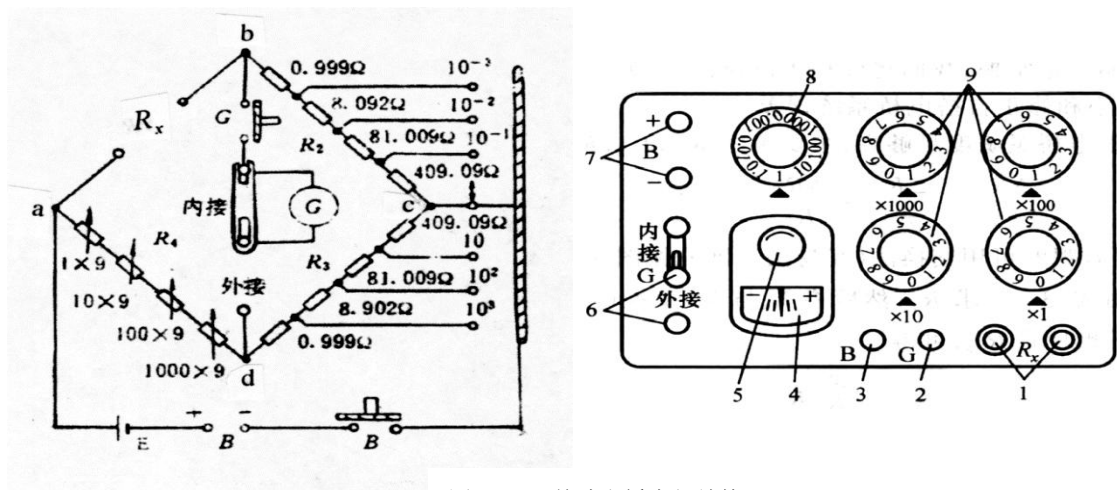


图 10.2 单臂电桥内部结构

1) QJ 23 型箱式电桥板面各旋钮和接线柱的功能如下:

$R_x$ : 被测电阻接线柱。B+、B-: 外接电源接线柱。如用增加电源电压的办法作测量时, 在这里按正、负接上电源, 此电源即与内部 4.5 伏电源串联。若只用内部电源时, 应用连接片接于该两接线柱之间。

G 外接: 外接检流计接线柱。当嫌电桥灵敏度不够高时, 可在这里另接灵敏度更高的检流计。当用内附检流计时, 应用联接片接于该两接线柱之间。

G 内接: 用外接检流计时, 需用联接片接于该两接线柱之间。使用完电桥或搬动电桥时, 也应将联接片接于该两接线柱之间, 使内附检流计短路。

B 按钮: 电源按接开关。按下 B 则电源接入电路。若需长时间接通电源, 按下 B 顺时针转 90 度即可锁住。

G 按钮: 检流计按接开关。按下 G 则检流计接入电路。若需长时间接通检流计, 可按下 G 顺时针转 90 度锁住。调节臂旋钮  $R_0$ : 用法同于电阻箱。

比率臂旋钮 N: N 等于原理图中的  $R_1 / R_2$ , 其值可以直接从比率臂旋钮上读出。被测电阻  $R_x = N \cdot R_0$ 。调零旋钮: 利用检流计上面的圆形旋钮, 可左右微调检流计指针位置, 使指针指在零点, 转动时要轻微、缓慢, 以免扭断检流计悬丝。

2) 箱式电桥的使用方法如下:

①在  $R_x$  两接线柱间接上被测电阻。

②根据待测电阻的标称数值, 选择合适的比率臂, 使测量结果保持四位有效数字, 亦即使调节臂电阻  $R_0$  保持千欧姆的数量级, 例如被测电阻约几十欧姆,  $R_0$  要保持几千欧姆, 根据  $R_x = N \times R_0$ , N 应取 0.01。测量时用跃接法按下 B 和 G 按钮 (按下后立即松开), 若指针偏向“+”方向, 则增加  $R_0$  的数值; 若偏向“-”方向, 则减小  $R_0$ , 反复调节直至电桥平衡。

③使用完毕, 必须断开“B 和 G”按钮, 并将检流计连接片接在“内接”位置, 以保护检流计。

### QJ23 型直流电阻电桥

1. 检流计 (指零仪)
2. 外接检流计接线端
3. 内接检流计转换开关
4. 测量读数调节旋钮 4 位 ( $R_0$ )
5. 电源按钮
6. 检流计按钮
7. 被测电阻接线端 ( $R_x$ )
8. 电源转换开关 (内、外)
9. 外接电源接线端
10. 比例臂电阻倍率调节旋钮 ( $R_1 / R_2$ )
11. 指零仪零位调整器 12. 灵敏度调节

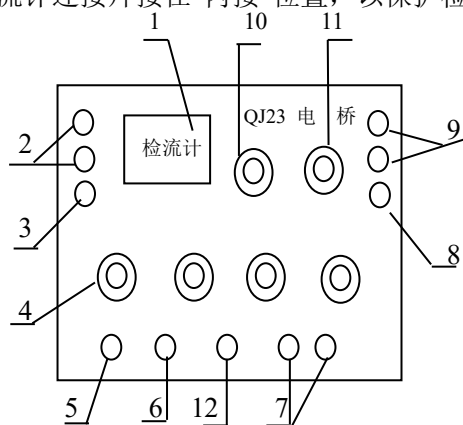


图 10.3 电桥面板

#### 四、实验内容及步骤

##### 1. 用自组电桥测量电阻

按图 10.1 位置放置好各元件，再进行接线。保护电阻（滑线变阻器） $R_h$  应调至最大，各臂阻值应成比例，使电桥通电时尽可能接近平衡，这样既有利于保护电桥上的检流计不受损坏，又便于很快达到平衡。找平衡的正确方法是用逐步逼近法，先使  $R_0$  取较小数值  $r_1$ ，设检流计指针向“+”方向偏转，然后让  $R_0$  取较大数值  $r_2$ ，设检流计指针向“-”方向偏转，则可断定平衡点在阻值  $r_1$  和  $r_2$  之间，再取  $R_0$  为上述两电阻值的中间值  $r_3$ ，判断检流计指针偏转方向，设为“+”，这样平衡点一定在  $r_3$  和  $r_1$  之间。重复这种调节方法使电阻值范围不断缩小，即可较快地找到平衡点。记下检流计指针指零时  $R_0$  值。交换  $R_0$  和  $R_x$  的位置，重复上述测量步骤测得  $R'_0$ 。

计算待测电阻  $R_x$  和误差  $\Delta R_x$ 。（提示：计算  $\Delta R_x$  时，要用电阻箱的准确度等级）。

##### 2. 用箱式电桥测电阻

选择适当的比率倍，对三个电阻测一次。并计算测量误差。

（用仪器内部电源和检流计），箱式电桥测电阻的误差由箱式电桥的准确度等级  $f$  计算。即

$$\Delta(R_x) = R_x \times f \% \quad 10\Omega < R_x < 10^5\Omega$$

##### 3. 测量箱式电桥的灵敏度

在已经平衡的电桥里，当调节臂电阻  $R_x$  变动值  $\Delta R_x$  时，检流计的指针离开平衡时位置  $\Delta n$  格，定义电桥灵敏度  $S$  为：

$$S = \frac{\Delta n}{\left(\frac{\Delta R_x}{R_x}\right)}$$

实验中，把电阻箱的阻值分别调节为 5.1、51、510、5100、51000 欧姆，按照实验内容 2 的方法选择合适的比例臂，先测量出电阻箱的准确阻值，在电桥平衡状态下改变  $R_x$ （也可以改变  $R_0$  但要注意比例臂）的大小，使检流计向左和向右分别偏转 5 格（如果在实验中由于检流计灵敏度过高使得偏转很难控制在 5 格，那么自己修改表格中的偏转格数即可，注意偏转不超过 10 格）

注意：检流计十分灵敏，不允许通过较大的电流，因此在测量时要特别注意：

（1）待测电阻要看清楚其标称阻值。

（2）接通检流计时，先跃接粗调开关，观察电流指示。只有偏转较小时才可接下细调开关，顺序不可颠倒。

（3）注意检流计的正确使用，实验结束后必须把“B和G”按键弹起。

表 10.1 自组电桥测电阻

电阻箱准确度等级  $f =$

其中  $R_x$ （实测值）指的是表 10.2 中箱式电桥的测量值

比例臂 $N$	$R_1 : R_2 = 500\Omega : 500\Omega$					
标称值 $R_x (\Omega)$	$R_x$ (实测值) ( $\Omega$ )	$R_0 (\Omega)$	$R'_0 (\Omega)$	$R_x (\Omega)$	$\Delta R_x (\Omega)$	$R_x \pm \Delta R_x (\Omega)$

$$R_x = \sqrt{R_0 \times R'_0}$$

$$\Delta R_x = R_x \times f \% (\Omega)$$

表 10.2 箱式电桥测电阻

电桥型号

电阻标称值			
比例臂 $N$			
$R_0 (\Omega)$			
$R_x = N \times R_0 (\Omega)$			
准确度等级 $f$			
$\Delta R_x = R_x \times f \% (\Omega)$			
$R_x \pm \Delta R_x (\Omega)$			

表 10.3 测量箱式电桥灵敏度

$R_x$ (标称值) ( $\Omega$ )	$R_x$ (实测值) ( $\Omega$ )	$\Delta n$ (格)	$\Delta R_x'$ (左) ( $\Omega$ )	$\Delta R_x''$ (右) ( $\Omega$ )	$\overline{\Delta R_x} = (\Delta R_x' + \Delta R_x'') / 2 (\Omega)$	$S$
5.1		5				
51		5				
510		5				
5100		5				
51000		5				

由表 10.3 可以得出电桥灵敏度在比例臂等于\_\_\_\_\_时最高。

## 五、思考题

1. (必做) 电桥由那几部分组成? 电桥平衡的条件是什么?
2. (必做) 用箱式电桥测电阻时, 选择合适比率臂的原则是什么?
3. 交换法为什么能消除比率臂误差的影响?
4. (必做) 用自组电桥测电阻的操作中, 检流计指针始终不指零 (即电桥不能达到平衡) 是什么原因? 检流计始终指零, 又是什么原因?

## 实验十一 电势差计

电势差计是利用补偿原理来精确测量电动势或电位差的一种精密仪器，其突出优点是在测量电学量时，它不从被测量电路中吸取任何能量，也不影响被测电路的状态和参数，所以在计量工作和高精度测量中被广泛利用。电势差计又叫电位计，它有多种类型，其中十一线电势差计是一种教学仪器，它结构简单、直观性强，便于学习和掌握；而箱式电势差计是测量电位差的专用仪器，它使用方便、测量准确、稳定性好，在科学实验和工业生产中经常用到。电势差计是电磁学测量中用来直接精密测量电动势或电位差的主要仪器之一。它用途很广泛，不但可以用来精确测量电动势、电压，还可以与标准电阻配合精确测量电流和电阻和功率等，也可以用来校准精密电表和直流电桥等直读式仪表，有些电器仪表厂则用它来确定产品的准确度和定标，而且在非电参量（如温度、压力、位移和速度等）的电测法中也占有极其重要的地位。它不仅被用于直流电路，也用于交流电路。因此，在工业测量自动控制系统的电路中得到普遍的应用。

### 一、实验目的

1. 学习和掌握电势差计的补偿工作原理、结构和特点；
2. 学习用十一线式电势差计来测量未知电动势或电位差的方法和技巧；
3. 培养正确连接电学实验线路、分析线路和实验过程中排除故障的能力。

### 二、实验仪器

1. 电势差计实验仪，实验仪集成了 4.5V 直流稳压电源、1.0186V 标准电动势、 $E_{x1}$ 、 $E_{x2}$  两个待测电动势、数字检流计  $G$ 、0~999 $\Omega$  可调变阻器（电阻箱）、保护电阻  $R_P$  等。
2. 滑线式十一线电势差计。

### 三、实验原理

#### 1. 补偿原理

在直流电路中，电源电动势在数值上等于电源开路时两电极的端电压。因此，在测量时要求没有电流通过电源，测得电源的端电压，即为电源的电动势。但是，如果直接用伏特表去测量电源的端电压，由于伏特表总要有电流通过，而电源具有内阻，因而不能得到准确的电动势数值，所测得的电位差值总是小于电位差真值。为了准确的测量电位差，必须使分流到测量支路上的电流等于零，直流电势差计就是为了满足这个要求而设计的。

补偿原理就是利用一个电压或电动势去抵消另一个电压或电动势，其原理可用图 11.1 来说明。两个电源  $E_n$  和  $E_x$  正极对正极、负极对负极，其中  $E_n$  为可调标准电源电动势， $E_x$  为待测电源电动势，

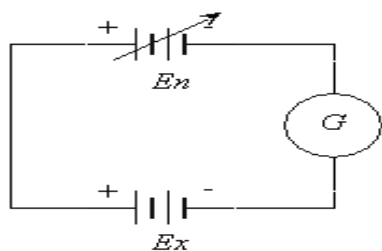


图 11.1 补偿原理示意图

中间串联一个检流计  $G$  接成闭合回路。如果要用图 14.1 的补偿原理来测电源  $E_x$  的电动势，可通过调节电源  $E_n$ ，使检流计读数为 0，电路中没有电流，此时表明  $E_x = E_n$ ， $E_x$  两端的电位差和  $E_n$  两端的电位差相互补偿，这时电路处于补偿状态。若已知补偿状态下  $E_n$  的大小，就可确定  $E_x$ ，这种利用补偿原理测电位差的方法称为补偿法，该电路称为补偿电路。由上可知，为了测量  $E_x$ ，关键在于如何获得可调节的标准电源，并要求该电源：（1）便于调节；（2）稳定性好，能够迅速读出其准确的数值。

#### 2. 电势差计原理

根据补偿法测量电位差的实验装置称为电势差计，其测量原理可分别用图 11.2 和图 11.3 来说明。图 11.2 为电势差计定标原理图，其中 ABCD 为辅助工作回路，由电源  $E$ 、限流电阻  $R$ 、十一米长粗细均匀电阻丝  $AB$  串联成一闭合回路；MN 为补偿电路，由待测电源  $E_n$  和检流计  $G$  组成。电阻箱  $R$  用来调节回路工作电流  $I$  的大小，通过调节  $I$  可以调整每单位长度电阻丝上电位差  $V_0$  的大小，M、N 为电阻丝  $AB$  上的两个活动触点，可以在电阻丝上移动，以便从  $AB$  上取适当的电位差来与测量支路上的电位差补偿，它相当于补偿电路 11.1 图中的  $E_n$ ，提供了一个可变电源。当回路接通时，

根据欧姆定律可知，电阻丝  $AB$  上任意两点间的电压与两点间的距离成正比。因此，可以改变  $MN$  的间距，使检流计  $G$  读数为 0，此时  $MN$  两点间的电压就等于待测电动势  $E_x$ 。要测量电动势（电位差） $E_x$ ，必须分两步进行：

### 1) 定标

利用标准电源  $E_n$  高精度的特点，使得工作回路中的电流  $I$  能准确地达到某一标定值  $I_0$ ，这一调整过程叫电势差计的定标。

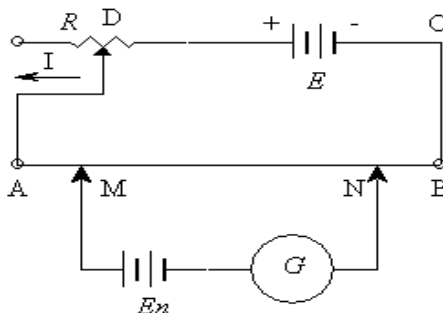


图 11.2 电势差计定标原理图

本实验采用学生式电势差计，电阻  $R_{AB}$  是 11m 长粗细均匀电阻丝。根据定标原则，按图 11.2 连线，移动滑动触头  $M$ 、 $N$ ，将  $M$ 、 $N$  之间的长度固定在  $L_{mn}$  上，调节工作电路中的电阻  $R$ ，使补偿回路中的定标回路达到平衡，即流过检流计  $G$  的电流为零，此时

$$E_n = V_{mn} = I_0 R_{mn} = I_0 \frac{\rho}{S} L_{mn} \quad (11-1)$$

在工作过程中， $ABCD$  中工作电流保持不变，因电阻  $R_{AB}$  是均匀电阻丝，令

$$V_0 = \frac{\rho}{S} I_0 \quad (11-2)$$

那么，有

$$E_s = V_0 L_{mn} \quad (11-3)$$

很明显， $V_0$  是电阻丝  $R_{AB}$  上单位长度的电压降，称为工作电流标准化系数，单位是  $V/m$ 。在实际操作中，只要确定  $V_0$ ，也就完成了定标过程。

由 (11-3) 式可知，当  $V_0$  保持不变时（即  $ABCD$  中工作电流保持不变），可以用电阻丝  $MN$  两点间的长度  $L_{mn}$ （力学量）来反映待测电动势  $E_x$ （电学量）的大小。为此，必须确定  $V_0$  的数值。

为使读数方便起见，取  $V_0$  为 0.1 或 0.2, .....1.0V/m 等数值。由于  $V_0 = \frac{\rho}{S} I_0$ ，而且电阻丝阻值稳定，所以只有调节  $ABCD$  中工作电流  $I_0$  的大小，才能得到所需的  $V_0$  值，这一过程通常称作“工作电流标准化”。

### 2) 测量 $E_x$

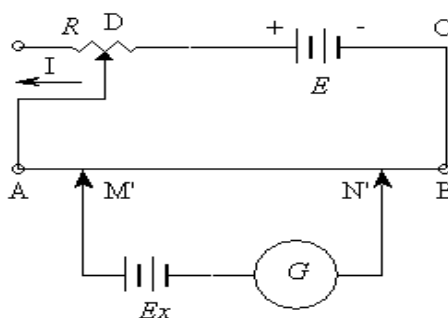


图 11.3 电势差计测量原理图

测量待测电动势  $E_x$  的过程与工作电流标准化的过程正好相反。当上面的定标结束后，按图 11.3 连线，调节  $M'$ 、 $N'$  之间长度  $L_{m'n'}$ ，使  $M'$ 、 $N'$  两点间电位差  $V_{m'n'}$  等于待测电动势  $E_x$ ，达到补偿，此时流过检流计  $G$  的电流为零，即

$$E_x = V_{m'n'} = I_0 \frac{\rho}{s} L_{m'n'} \quad (11-4)$$

结合 (11-3) 式得

$$E_x = V_0 L_{m'n'} \quad (11-5)$$

下面用例子说明定标和测量过程，标准电源  $E_n = 1.0186\text{V}$ ，取  $V_0 = 0.10000\text{V/m}$ 。

① 定标：为了保证  $R_{AB}$  单位长度上的电压降  $V_0 = 0.10000\text{V/m}$ ，则要使电势差计平衡的电阻丝长度  $L_{mn} = \frac{E_n}{V_0} = 10.1860\text{m}$ ，调节限流电阻  $R$  使  $V_{mn} = E_n$ ，即检流计  $G$  的电流为 0，此时  $R_{AB}$  上的单位长度电压降就是  $0.10000\text{V/m}$  了。

② 测量：经过定标的电势差计就可用来测量待测电位差，调节  $L_{m'n'}$ ，使  $V_{m'n'}$  和  $E_x$  达到补偿，即  $E_x = V_{m'n'} = V_0 L_{m'n'}$ 。若  $L_{m'n'} = 14.864\text{m}$ ，则  $E_x = 0.10000 \times 14.864 = 1.4864 (\text{V})$ 。

### 3. 电势差计的优缺点

(1) 十一线电势差计测量的准确度主要取决于下列因素：

- ① 十一米电阻丝每段长度的准确性和粗细的均匀性；
- ② 标准电源的准确度；
- ③ 检流计的灵敏度；
- ④ 工作电流的稳定性。

(2) 电势差计测量电位差具有下述优点：

① 准确度高，仅依赖于标准电阻、检流计、标准电源，因为本实验仪精密电阻丝  $R_{AB}$  很均匀准确，标准电源的电动势准确稳定，检流计很灵敏，而且是数字式，读数方便，故可作为标准仪器来校验电表。

② 测量范围宽广，灵敏度高，可测量小电压或电压的微小变化。

③ “内阻”高，不影响待测电路，避免了伏特计测量电位差时总要从被测电路上分流的缺点。由于采用电位补偿原理，测量时不影响待测电路的原来状态。用伏特表测量电压时总要从被测电路上分出一部分电流，从而改变了待测电路的原来状态，伏特表内阻越低，这种影响就越大。而用电势差计测量时，补偿回路中电流为零（当然不是绝对的，检流计灵敏度越高，越接近于零），对待测电路的影响可以忽略不计。

(3) 电势差计测量的缺点：

电势差计在测量过程中，其工作条件易发生变化（如辅助回路电源  $E$  不稳定、可变电阻  $R$  变化等），所以测量时为保证工作电流标准化，每次测量都必须经过定标和测量两个基本步骤，且每次达到补偿都要进行细致的调节，所以操作繁琐、费时。

### 4. 电势差计的标准化

为了使回路的工作电流等于设计时规定的标准值  $I_0$ ，必须对电势差计进行校准，方法如图 11.4 所示。 $E_S$  是已知的标准电动势，根据它的大小，取  $cd$  间电阻为  $R_{cd}$ ，使  $R_{cd} = E_S / I_0$ ，将开关  $K$  倒向  $E_S$ ，调节  $R$  使检流计指针无偏转，电路达到补偿，这时  $I_0$  满足关系  $I_0 = E_S / R_{cd}$ ，由于已知的  $E_S$ 、 $R_{cd}$  都相当准确，所以  $I_0$  就被精确地校准到标准值，要注意测量时  $R$  不可再调，否则工作电流不再等于  $I_0$ 。

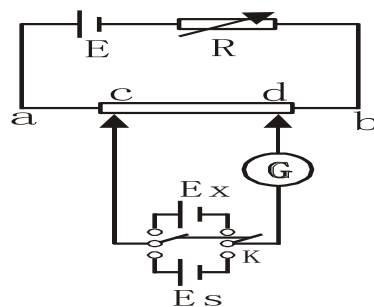


图 11.4 校准原理

## 四、实验仪器介绍

学生式电势差计的内部电路如图 11.5 虚线内所示,电阻  $R_A$ 、 $R_B$ 、 $R_C$  相当于图 11.4 中的电阻  $R_{ab}$ , 可见  $BA'$  和  $R$  两个接头相应于图 11.4 的  $b$ 、 $a$  两点,  $E^-E^+$  两个接头则相应于  $c$ 、 $d$  两点。 $R_A$  全电阻是 320 欧姆, 分 16 档, 每档 20 欧姆;  $R_B$  全电阻是 20 欧姆, 分 10 档, 每档 2 欧姆电阻;  $R_C$  为滑线盘电阻, 电阻值为 2.2 欧姆。 $R_B$  电阻在测量时, 会随测量档的变化而变化, 这势必引起如图 11.4 中  $a$ 、 $b$  间电阻变化, 破坏了工作电流  $I_0$  的不变的规定。为此, 引入  $R'_B$  所谓的替代电阻。 $R_B$  和  $R'_B$  同轴变化。当  $R_B$  每增加一档电阻时,  $R'_B$  则减少一档电阻, 反之亦然。保证  $R_B$  不论处于哪一档,  $R_B + R'_B = 20\Omega$  不变。

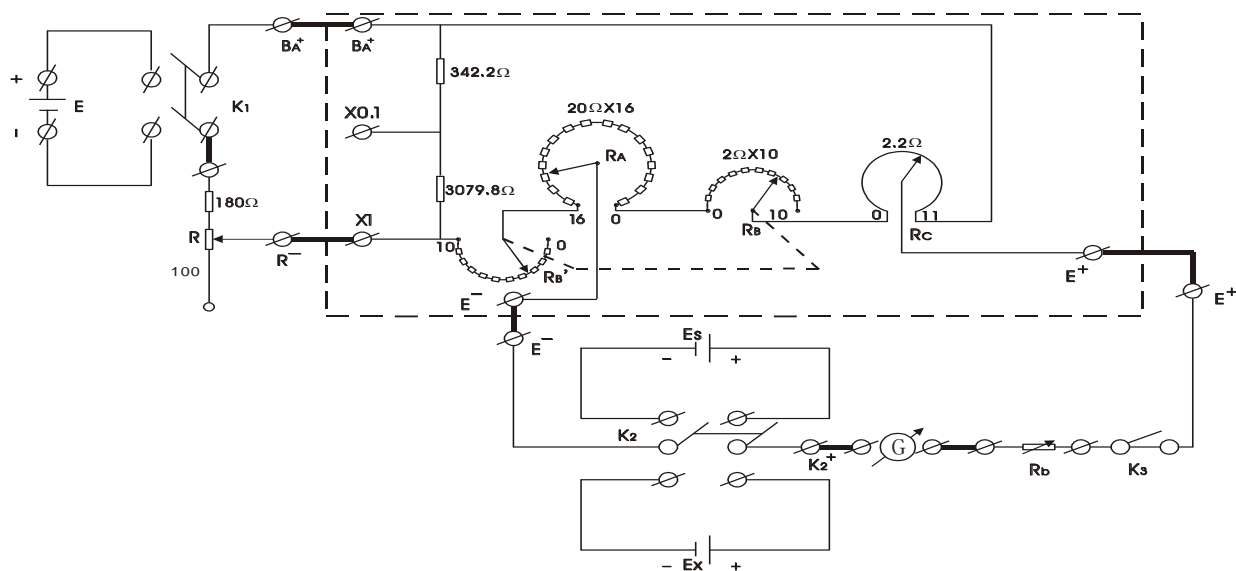


图 11.5 电势差计原理图

为了确保图 11.4 中  $a$ 、 $b$  间总电阻值不变, 可实施量程变换, 在产生测量补偿电压支路上并联了一条分流支路。当  $\times 1$  时, 流过测量补偿电压支路的电流为 5mA, 分流支路电流为 0.5 mA; 当  $\times 0.1$  时, 流过补偿电压支路电流为 0.5 mA, 流过分流支路电流 5mA。显然, 后者量程由于电流减少到十分之一, 量程也变小十分之一。

在使用学生电势差计时, 必须加接外电路, 如图 11.5 所示。而  $R_A$ 、 $R_B$ 、 $R_C$  (由  $c$  到  $d$ ) 和外电路的检流计  $G$ 、保护电阻  $R_b$  等组成补偿回路。 $K_1$  为电源开关,  $K_2$  可保持  $E_n$  和  $E_x$  相互迅速替换,  $K_3$  作检流计的开关,  $R_b$  是可变电阻箱, 用以保护检流计和标准电池。

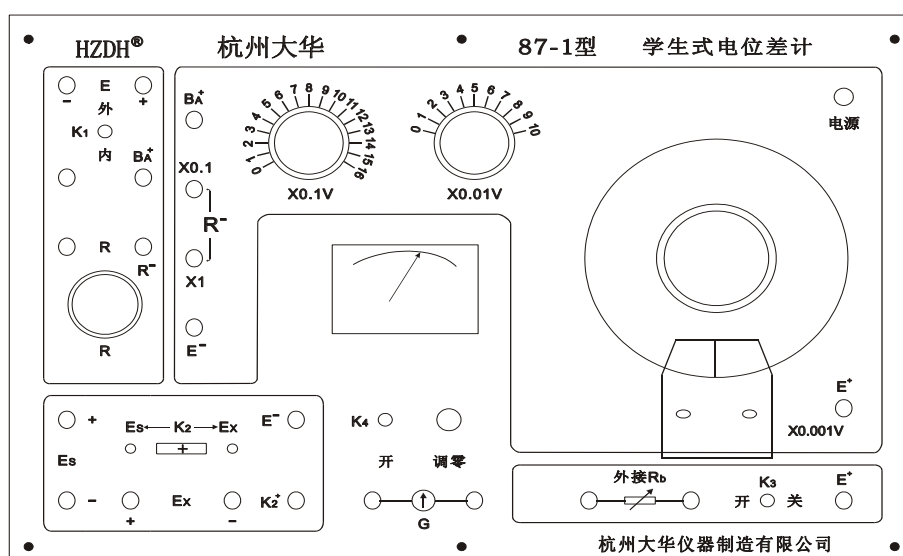


图 11.6 学生式电势差计

学生式电势差计的外电路所需配套件, 除了电源  $E$ 、标准电池和  $R_b$  可变电阻箱要外配外, 其它

均已安装在同一木箱内，各部分之间连接导线也成套供应。

五、实验内容

1. 校准学生式电势差计（称校准）

在使用电势差计之前，先要进行校准化，使电流达到规定值。先放好  $R_A$ 、 $R_B$  和  $R_C$ ，使其电压刻度等于标准电池电动势，取掉检流计上短路线，用所附导线将  $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$ 、 $G$ 、 $R$ 、 $R_b$  和电势差计等各相应端钮间按原理线路图进行连接，经反复检查无误后，接入工作电源  $E$ ，标准电池  $E_S$  和待测电动势  $E_X$ ， $R_b$  先取电阻箱的最大值，（使用时如果检流计不稳定，可将其值调小，直到检流计稳定为止），合上  $K_1$ 、 $K_3$ ，将  $K_2$  推向  $E_n$ （间歇使用），并同时调节  $R$ ，使检流计无偏转（指零），为了增加检流计灵敏度，应逐步减少  $R_b$ ，如此反复开、合  $K_2$ ，确认检流计中无电流流过时，则  $I_0$  已达到规定值。

2. 测量电池电动势（称测量）

按待测电动势的近似值放好  $R_A$ 、 $R_B$ 、 $R_C$ ， $R_b$  先取最大值， $K_2$  推向  $E_X$  并同时调电势差计  $R_A$ 、 $R_B$ 、 $R_C$  和  $R_b$  使检流计无偏转（在测  $E_X$  的步骤中  $R$  不能变动）此时  $R_A$ 、 $R_B$  和  $R_C$  显示的读数即为  $E_X$  值，测量结束应打开  $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$ 。

重复“校准”与“测量”两个步骤。共对  $E_X$  测量三次，取  $E_X$  的平均值作为测量结果。

3. 测量电池的内阻

（1）打开  $K_2$ 、 $K_3$ ，将图 11.5 中  $E_X$  换成图 14.7 所示线路，其余部分不变， $R'$  为电阻箱；

（2）同上述测量步骤，合上  $K_4$  测得  $R'$  和两端电压  $E'$ ；

由  $E' = E_x - Ir = E_x - \frac{E_x}{R' + r} \cdot r$  化简后，可得：

$$r = \left( \frac{E_x}{E'} - 1 \right) R' \tag{11-6}$$

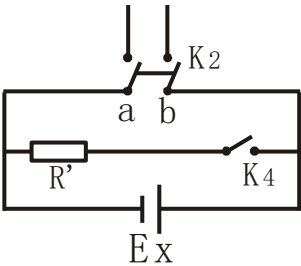


图 11.7 测量电池内阻电路图

式中：  $r$ ——电池内阻， $\Omega$ ；  $E_x$ ——电池电动势，V；  
 $E'$ —— $K_4$  合上时端电压，V；  $R'$ ——与电池并联的电阻箱阻值， $\Omega$ 。

由于  $R'$  已知，只要分别测出当开关  $K_4$  打开和合上时  $ab$  两端的电压  $E_x$  和  $E'$ ，然后代入公式(14-6)即可求得电池内阻  $r$ 。

注意事项

- （1）七根连线为图 14.5 中的粗线部分，当进行“校准”时取掉短路线，不使用本仪器时，检流计一定要短路，否则检流计处于开路状态。
- （2）使用电势差计须先接通其他电路，然后再接补偿回路，断电时须先断开补偿回路，再断开其他电路。
- （3）标准电池只能短时间通过  $1\mu A$  左右的电流，否则将影响标准电池的精度直到造成永久性电动势衰落。所以，校准中要注意选用“ $R_b$ ”，使用  $K_2$  要短促，以保护标准电池，不能用伏特计测它的电动势，要防止标准电池震动。
- （4）待测电池不能供给大电流，所以测其内阻时  $R'$  值不能太小。应先定好  $R'=100\Omega$  再接入路。
- （5）实验中只在测量  $E'$  时才合上开关  $K_4$ ，测量完毕立即断开，以免干电池放电过多。

4. 数据表格

表 11.1 电势差计测电动势

标准值 $E_x$ (V)	测量值			测量平均值 $\overline{E_x}$ (V)	绝对误差 $ \overline{E_x} - E_x $	相对误差 $\frac{ \overline{E_x} - E_x }{\overline{E_x}} \times 100\%$
	1(V)	2(V)	3(V)			
0.05						
0.10						
0.15						
0.30						



0.60						
0.90						
1.20						
1.50						
1.70						

电阻箱阻值  $R' = \underline{\hspace{2cm}} \Omega$

电池电动势  $E_x = \underline{\hspace{2cm}} \text{V}$       端电压  $E' = \underline{\hspace{2cm}} \text{V}$

电池内阻  $r = \underline{\hspace{2cm}} \Omega$

## 六、思考题

1. （必做）为什么用伏特计测量电位差时，所得的值必小于未接伏特计时的初始值？用什么方法可以测得精确的电位差？
2. 为什么要进行电势差计工作电流标准化的调节， $V_0$  值的物理意义是什么？ $V_0$  值选取的根据是什么？当工作电流标准化后，在测量  $E_x$  时，电阻箱为什么不能再调节？
3. （必做）要使电势差计能达到电位补偿的必要条件是什么？若工作电源电动势小于待测电源电动势将产生什么结果？
4. 工作电源的不稳定对电势差计的测量有什么影响？

## 实验十二 薄透镜焦距的测量

### 一、实验目的

1. 了解光学元件的布置和像的接收；
2. 光具座上各元件的共轴调节、薄透镜焦距的测量。

### 二、实验仪器和用具

光具座、白炽灯、毛玻璃片、箭头形孔板、平面反射镜、凸透镜、凹透镜、像屏

### 三、实验原理和方法

薄透镜焦距测量的方法很多，下面仅介绍其中常用的四种。

#### 1. 平行光会聚法测薄凸透镜的焦距

根据焦距的定义，用一束平行光垂直射入薄凸透镜，则必然在透镜后面会聚成为一个很小的亮点，此点即为凸透镜焦点，用像屏可直接接收亮点，测出像屏到透镜的距离就是它们的焦距。如太阳光可近似认为平行光。

#### 2. 自准法（平面镜法）测薄凸透镜焦距

如同 12.1 所示，位于凸透镜焦平面上的物  $P_1P_2$  所发出的光，经透镜折射后成为平行光，如用一平面镜  $M$  把平行光反射回去，在经过凸透镜，则必成像于原焦平面上。因此，在实验时，按图 15.1 布置好光路，移动透镜，当物与透镜距离刚好等于透镜焦距时，由平面镜反射回来的光束，在物平面上成为等大倒立清晰的像  $P_1'P_2'$ 。这时，分别读出物与透镜位置  $x_1$  及  $x_2$ ，即得焦距：

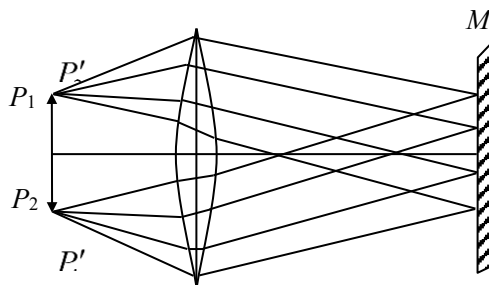


图 12.1 自准法测薄凸透镜焦距光路图

$$f' = x_1 - x_2 \quad (12-1)$$

从理论上讲，自准法中透镜与平面镜间距离可以任意选取。但实际测试时，二者要相距近一点测试效果才好。否则，当二者离得太远，由于透镜孔径有限，傍轴光线损失过多，只有光轴附近很小范围能成像，其他部分成像很差或者根本不能成像。然而，像与物等大倒立重合在一起不便观察，测试时可稍许转动平面镜使像在物旁边。另外，若被测透镜为对称双凸透镜，当它位于物后面大约二分之一焦距附近时，由透镜第二介面反射也能在物平面上生成一个光度较弱的等大倒立实像，与平面镜存在与否无关，在实验测试时要注意区分。

#### 3. 共轭法（位移法）测薄凸透镜的焦距

根据透镜的成像特点，取物  $P$  与像屏  $C$  之间的距离  $D$  大于待测薄凸透镜焦距  $f$  的四倍，则透镜在  $PC$  之间有两个位置均会生成倒立实像：

- (a) 在靠近物的  $A$  处生成放大倒立实像；
- (b) 在靠近像的  $B$  处生成缩小倒立实像。

由物像公式：

$$\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f'} \quad (12-2)$$

结合图 12.2 可推导出如下公式：

$$f' = \frac{D^2 - d^2}{4D} = \frac{(D+d)(D-d)}{4D} \quad (12-3)$$

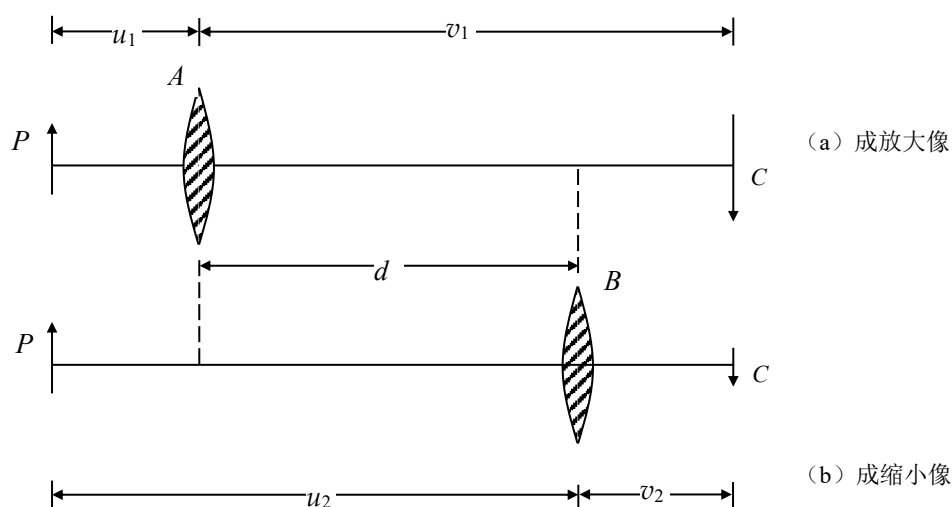


图 12.2 共轭法测薄凸透镜焦距光路图

因此，只要测出物像间距离  $D$  和两次成像透镜所移动距离  $d$ ，即可算出焦距  $f'$ 。

以上三种方法不能直接测凹透镜的焦距，因为凹透镜为发散透镜，只有虚物能成实像。

#### 4. 物像公式法测薄凹透镜的焦距

此方法对凸透镜和凹透镜均适用，对凸透镜而言，物距、像距可直接测出；对凹透镜而言，必须借助凸透镜生成一虚物（虚物是对凹透镜而言），如图 12.3 所示。

物  $AB$  经凸透镜  $L_1$  成像  $B'A'$ ，在  $B'A'$  和  $L_1$  间放上待测凹透镜  $L_2$ 。就  $L_2$  而言，虚物  $B'A'$  又成像  $B''A''$ 。若  $u$ 、 $v$ 、 $f'$  分别代表物距、像距、凹透镜焦距的绝对值，则

$$f' = \frac{uv}{v-u} \quad (12-4)$$

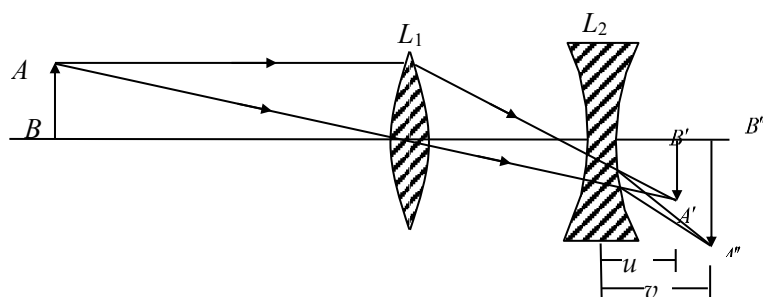


图 12.3 物像公式法测薄凹透镜焦距光路

在实际测量时应注意：

- (1) 凸透镜  $L_1$  所生成像须为缩小像；
- (2) 凹透镜至虚物的距离  $u$  绝对值小于它的焦距的绝对值，即凹透镜放置尽可能靠近  $B'A'$  像屏；

(3) 在重复测量时凸透镜、凹透镜位置不动。

#### 四、光源及物、像的要求，共轴调节

##### 1. 光源及物、像的要求

光源要有足够的强度便于观察，最好是用指定的单色光源以减少色差带来的测量误差。一般光源沿光轴方向尺寸较大，它和它所生成的像的位置很难准确确定，所以不适宜直接用来作物。按几何光学理论要求发光物体为理想的面发光体，它和它所生成的像的位置可完全确定。因此一般用毛玻璃面与一网格面或者一定形状的孔板面紧贴在一起用强光照射，由毛玻璃面漫射就构成一个面发光物体。用人眼直接观察透镜成的像是不方便，有时甚至是不适宜的或者是困难的。最好选用能产生较强较均匀漫射光的白纸屏或毛玻璃屏作为像屏来间接观测像的情况较好。

##### 2. 光具座上各元件共轴的调节

构成透镜的两个球面的中心的连线称为透镜的光轴。在几何光学理论推导中，透镜的焦距、物距、像距和它们所移动距离都沿着透镜光轴方向进行计算的。因此在进行实验测试前必须对整个光学系统进行所谓“共轴调节”使各个透镜的光轴重合，并且物和像的中心也在这个共同的光轴之上，而且这个共同光轴还要平行于光具座的导轨，具体调节方法如下：

(1) 粗调：把透镜、物、像等用光具夹夹好后，先将它们靠拢，调节高低、左右，使光源、物的中心、透镜中心、屏中央大致在一条和导轨平行的直线上，并使物、透镜、屏的平面相互平行并且垂直于导轨。这一步骤靠眼睛观察判断，比较粗糙。

(2) 细调：靠其他仪器或几何光学成像规律来判断进行调节。如用共轭法生成放大像和缩小像，若二者中心不重合，则根据具体情况适当调节透镜上下左右位置可使二者中心重合，用此法可逐个调节所有光学元件共轴。

#### 五、实验内容

##### 1. 用自准法测薄凸透镜的焦距（实验方法见原理部分）

表 12.1 自准法测薄凸透镜焦距数据表格

单位：cm

次数	物位置	透镜位置	焦距 $f'$	$ \Delta f' $
1				
2				
3				
4				
5				
平 均 值				

$$f' = \overline{f'} \pm \Delta f' = \underline{\hspace{2cm}} \text{ cm}$$

##### 2. 共轭法测薄凸透镜的焦距

按图 15.2 进行测量，物像距离  $D$  ( $4f' < D < 6f'$ ) 成放大像、缩小像所在的位置为 A、B。

物像距离  $D = \underline{\hspace{2cm}} \pm 0.01 \text{ cm}$  ( $4f' < D < 6f'$ )

表 12.2 共轭法测薄凸透镜焦距数据表格

单位：cm

次数	放大像位置 A	$ \Delta A $	缩小像位置 B	$ \Delta B $
1				
2				
3				
4				
5				

平均值				
-----	--	--	--	--

$$d = |\overline{A} - \overline{B}| = \underline{\hspace{2cm}} \text{ cm} \quad \Delta d = |\overline{\Delta A}| + |\overline{\Delta B}| = \underline{\hspace{2cm}} \text{ cm}$$

$$\overline{f'} = \frac{D^2 - d^2}{4D} \underline{\hspace{2cm}} \text{ cm} \quad \Delta \overline{f'} = \frac{d}{2D} \Delta d + \frac{D^2 + d^2}{4D^2} \Delta D = \underline{\hspace{2cm}} \text{ cm}$$

$$f' = \overline{f'} + \Delta \overline{f'} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ cm}$$

### 3. 用物像公式法测凹透镜的焦距

按图 15.3 进行测量，凹透镜位置为  $L_2$ ，虚物位置为  $P_1$ （即为凸透镜的实像位置），凹透镜实像位置  $P_2$ 。凸透镜、凹透镜位置不动。

凹透镜位置  $L_2 = \underline{\hspace{2cm}} \pm 0.01 \text{ cm}$

表 12.3 物像公式法测薄凹透镜焦距数据表格

单位: cm

次数	虚物位置 $P_1$	$ \Delta P_1 $	实像位置 $P_2$	$ \Delta P_2 $
1				
2				
3				
4				
5				
平均值				

$$u = |\overline{P_1} - L_2| = \underline{\hspace{2cm}} \text{ cm} \quad v = |\overline{P_2} - L_2| = \underline{\hspace{2cm}} \text{ cm}$$

$$|\overline{f'}| = \frac{uv}{v - u} \underline{\hspace{2cm}} \text{ cm}$$

$$\Delta \overline{f'} = \frac{1}{(\overline{P_2} - \overline{P_1})^2} \sqrt{(\overline{P_2} - L_2)^4 (\Delta \overline{P_1})^2 + (\overline{P_1} - L_2)^4 (\Delta \overline{P_2})^2} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ cm}$$

$$f' = \overline{f'} + \Delta \overline{f'} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ cm}$$

### 4. 选做题目

表 12.4 研究薄凸透镜成像规律

单位: cm

物距 $u$ 的范围	$ u  > 2f^*$	$ u  = 2f^*$	$f^* <  u  < 2f^*$	$ u  = f^*$	$ u  < f^*$
像距 $v$ 的范围					
成像情况					

所谓成像情况是指能否成像、像的虚实、放大或缩小以及正倒。

## 六、思考题

- （必做）用共轭法作共轴调节发现大像中心在小像中心正上方，若保持物和像屏不动，则应将透镜向上还是向下移动才有可能使大小像中心重合？
- （必做）凹透镜使虚物生成实像，其虚物距应满足什么条件？

3. (必做) 证明: 物和像之间的距离  $D \geq 4f$ , 方能使凸透镜实物生成的像成倒立实像。
4. 证明: 共轭法中公式

$$f' = \frac{D^2 - d^2}{4D} = \frac{(D+d)(D-d)}{4D}$$

5. 根据凸透镜成像情况, 联系放大镜、幻灯机、照相机, 它们成像情况有何不同?
6. 为什么测焦距时最好用单色光?

## 实验十三 仿真实验——基本电学量的测量

认识并熟练使用基本电学仪器，不仅是学习电磁学知识的基础，也是电子电路相关实验的基础。电压表、电流表无论是指针式，还是数字式，都是构成测量电路的基本单元；万用表在基本测量中是经常用到的工具，它不仅可以测量交、直流量，还可以测量常用的元器件如二极管、电容等的参数。

### 一、实验目的

1. 学习使用基本电路元件；
2. 正确使用数字式万用电表；
2. 测量交流阻抗和直流阻抗；
3. 用内接法和外接法测量电阻。

### 二、实验原理

#### （一）基本电学仪器

##### 1. 电源

电源是为电路提供电能的设备，按类型可分为交流电源和直流电源两大类。直流电源包括电池、直流稳压电源、蓄电池等等，直流电源的输出电压恒定不变；交流电源有低压交流电源、可编程交流电源等，常用的交流电源是 220V、50Hz 的市电。虽然电源的种类繁多，但是在电路图中的电路符号时相对固定的，常见的电源符号如图 2.2.1 所示，在使用电源时切记不能短路。

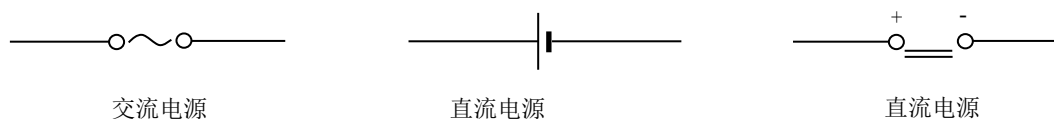


图 2.2.1 常见电源符号

##### 2. 开关

开关的作用是控制电路通断，可以在主回路中使用，也可以在支路电路中使用。常用的开关有如图 2.2.2 所示几种。使用开关时，除根据线路需要选用不同种类开关外，同时应根据通断电流之大小，选用容量合适的开关。

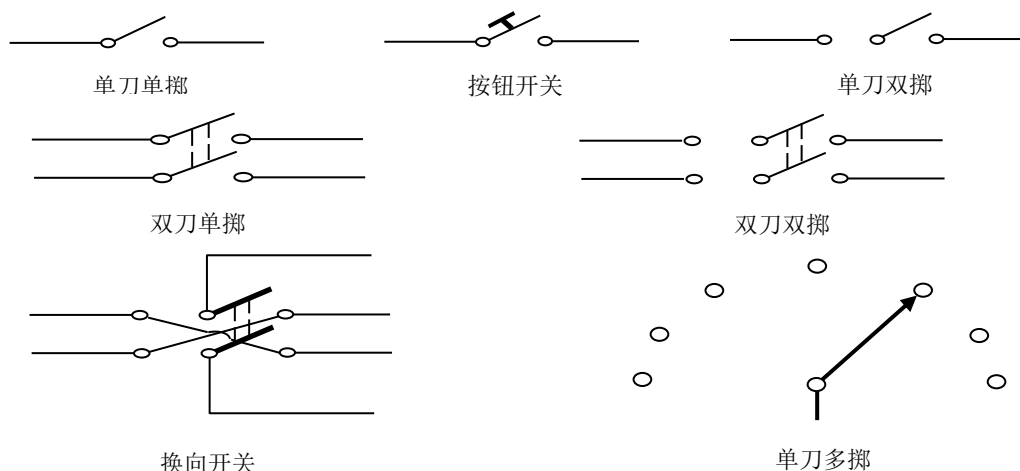


图 2.2.2 各种开关的电路符号

##### 3. 电阻

电阻的种类繁多，有箱式电阻、金属膜电阻、滑动电阻器、电位器等等不同类型，不同类型中又有很多分类。物理实验室中常用的是电阻箱和滑动变阻器，下面以它们为例介绍电阻。

(1) 电阻箱：电阻箱的面板见图 2.2.3 (a)，图 2.2.3 (b) 是电阻箱在电路图中的电路符号。利用电阻箱的取值旋钮“ $\times 10000$ 、 $\times 1000$ 、 $\times 100$ 、 $\times 10$ 、 $\times 1$ 、 $\times 0.1$ ”，电阻箱的取值范围为  $0\sim 99999.9\Omega$ 。

若要用电阻箱取一阻值为  $75023.8\Omega$  的电阻。只要从最大倍率开始，依次将各旋钮上的数字对准读数标记即可，如图 2.2.3 (a) 所示。电阻箱上有四个接线柱，在接线柱旁分别注有“ $99999.9\Omega$ ”、“ $9.9\Omega$ ”

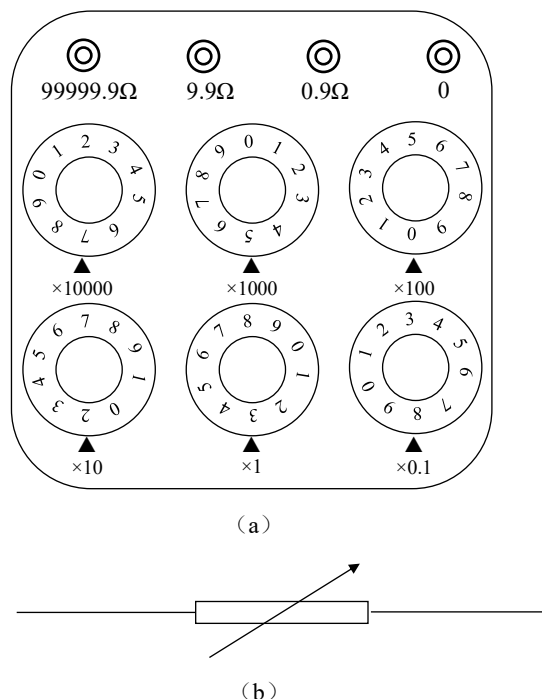


图 2.2.3 电阻箱及电阻符号

“ $0.9\Omega$ ”、“ $0$ ”。，根据电阻取值大小，选择不同的接线柱，“ $0$ ”是公共端子必须选择。如电阻箱取值小于  $0.9$  欧姆，则选择“ $0$ ”和“ $0.9\Omega$ ”接线柱；若取值小于  $9.9\Omega$ ，则选择“ $0$ ”和“ $9.9\Omega$ ”接线柱。

(2) 滑动变阻器：滑动变阻器是用来连续改变电路中电流、电压的电阻元件。它的主要规格包括——总阻值、额定电流、额定功率等，图 2.2.4 是滑动变阻器的电路符号。

另外还有构造原理与滑动变阻器类似的变阻器称为电位器，电位器的体积比较小，承受的功率小，它广泛用于电子仪器中调节电压。

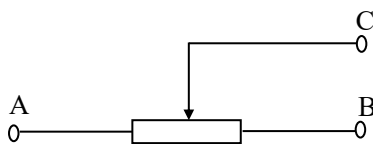


图 2.2.4 滑动变阻器电路符号

滑动变阻器有两种用法，限流和分压。

a. 限流：将变阻器 A 端（或者 B 端）和滑动接头 C 与用电器串联。如图 2.2.5 所示，接成一闭合回路。当滑动 C 时，改变了 A、C 间电阻的大小，从而也就改变了通过用电器的电流，起到了控制电流的作用。此时可称变阻器为限流器（或制流器）。



为了保证安全，在接通电源前，C 应滑到使整个回路电流最小的到 B 端，使 A、C 间电阻最大、电流最小。

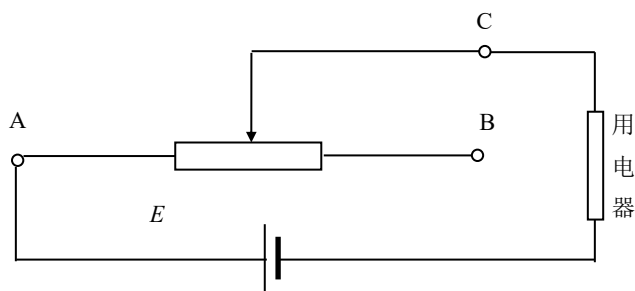


图 2.2.5 限流电路

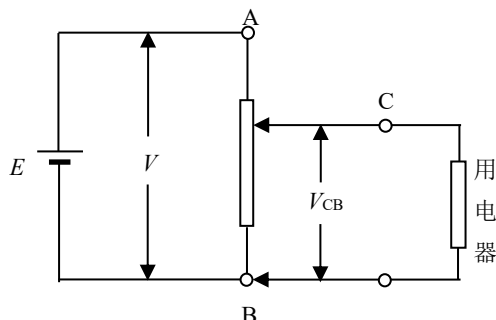


图 2.2.6 分压电路

b. 分压：连接方法如图 2.2.6 所示。将电源电压  $V$  由变阻器的两固定端 A、B 输入，即是将电源与变阻器的总电阻  $R_{AB}$  串联成一回路，然后再从 B 端（或 A 端）和滑动接头 C 引出两根接线于用电器两端，或者说将 C、B 间的输出电压  $V_{CB}$  加到用电器上。若用电器的电阻比  $R_{AB}$  大很多，则通过  $R_{AB}$  的电流  $I \approx V / R_{AB}$ ，从而输出电压

$$V_{CB} = IR_{CB} \approx \frac{V}{R_{AB}} R_{CB} \quad (2.2.1)$$

$R_{CB}$  为 C、B 间的电阻值。从上式看出，当 C 滑到 A 端时， $R_{CB} = R_{AB}$ ，则  $V_{CB} = V$ ；当 C 滑到 B 端时， $V_{CB} = 0$ ，可见，滑动 C 可使输出电压  $V_{CB}$  从 0 连续改变到  $V$ 。变阻器起到了将电源电压  $V$  分出一部分或全部输出的作用。此时可称变阻器为分压器。为了保证安全，在接通电源前，应将 C 滑到使输出电压  $V_{CB}$  为 0 的位置，即滑到 B 端。

作为限流器，变阻器的全电阻  $R_{全}$  比用电器  $R$  大得愈多，其电流调节范围也愈大；作为分压器， $R_{全}$  比  $R$  小得愈多，其电压调节的线性程度也愈好。为了增加限流调节或者分压调节的“细调程度”，可用两个电阻之比约为十比一的滑动变阻器组合成限流器或者分压器。

#### 4. 电表

(1) 指针式电表是机械电表

按其工作原理可分为磁电式仪表，电磁式仪表和电动式仪表等等，以机械电流表为例，其面板如图 2.2.7 和图 2.2.8 所示。磁电式电流计的结构和工作原理见附录 2-1。电表在电路图中的符号如图 2.2.9。

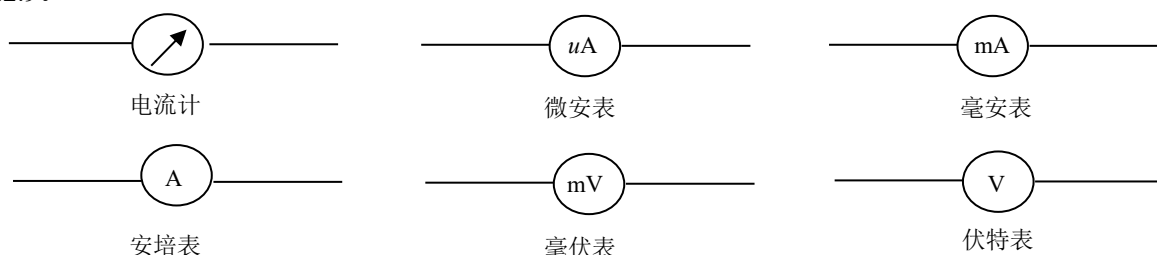


图 2.2.9 电表符号

为了在使用中保护电表，并准确读数，使用电表要求如下：

① 正确选择量程：量程太小，加上过大的电压或通入过大的电流，会使电表烧坏；量程太大，指针偏转不大，测量结果的误差较大。若事先不知待测量的大小，可先用较大的量程试测一下，如不合适，再改用合适的量程。一般应使指针尽量偏转到满刻度的三分之二以上。

② 正确连接电表：电流表应串联于电路中，电压表应并联于被测对象的两端。如果接错，除了烧坏电流表外，还可能损坏电路中其它仪器。

对于机械直流电表，指针的偏转方向与电流的方向有关，所以分正负接线柱。联接电流表时。应使电流从电表“+”接线柱流入，由“-”接线柱流出；联接电压表时，“+”接线柱与高电位点相

联接，“一”接线柱与低电位点相联接。

③正确读数：读数前，应根据所用量程、分度格数确定最小分格代表的数值。读数时必须使视线垂直于刻度表面，以减少视差。精密的电表，其刻度尺旁附有一反射镜，用它来读数时指针应该与镜中的像重合，以提高读数的准确度。

### (2) 数字式电表

近年来数字电表得到了广泛应用，它具有准确度和灵敏度均高、测试快速和读数方便等优点，并且可以很方便地和计算机配合实现自动化测量和控制。数字式电表一般由信号采集单元、数/模（A/D）转换单元、微处理器（MCU）、键盘、显示等部分组成，其基本原理和磁电式电表不同，就目前来说，因其操作简单、读数直观、成本低而广泛应用。

以数字电压表为例，主要规格是量程、内阻和精确度。它的常用绝对误差  $\Delta$  可以表示为：

$$\Delta = \pm(a\%U_x + b\%U_m) \quad (2.2.2)$$

其中  $U_m$  是满量程， $U_x$  为测量显示值， $a$  为误差的相对项系数， $b$  为误差的固定项系数（类似于指针式电表的级别）。数字显示部分误差一般由数显的末位决定。

数字电表和机械指针式电表相比，数字电流表存在较小内阻（一般小于  $10\Omega$ ，取决于具体规格），数字电压表的内阻通常大于  $10M\Omega$ ，在分析电路时要注意区别。

### (3) 万用电表

#### ①指针式万用电表

指针式万用电表是常用的电学测量工具，可以用来测量电阻、电压、电流、交直流信号、电容等电学量，结构上由表头、调零旋钮、档位旋钮、插孔、红黑表笔构成，如图 2.2.9(a)所示。

指针式万用电表的工作原理是利用灵敏度较高的磁电式直流电流表做表头，通过不同的电路改装，利用表头来测量其他电学量如：电压、电阻等。通常有 4 个量类，共 18 个量程，能测量直流电流、直流电压、交流电压和直流电阻。表内设有二极管保护装置和熔丝保护措施，可以减少错误测量而引起的损坏事故，量程上设有直流小电流和直流低电压，以适合测量晶体管电路的需要。

指针式万用电表的正负是不能接错的，如果在测量电压或者电流时红黑表笔接错，则会损坏电表。随着数字技术的发展，数字万用电表克服了这一缺点，同时读数更加方便。

#### ②数字式万用电表

数字万用电表功能上比指针式万用电表更强大，读数更直观，还可以测量三极管的放大倍数。利用数字采样的手段，数字万用电表还可以负值，这样既保护了电表，同时扩展了电表的应用范围。其面板如图 2.2.9(b)所示。

数字万用电表的内部结构及原理这里不做详述，操作方法和注意事项请参看附录 2-3。



(a) 指针式万用电表



(b) 数字式万用电表

图 2.2.9 指针式万用电表和数字万用电

## (二) 伏安法测电阻原理

伏安法测电阻是测量电阻的常用方法，是基本的电学实验内容。

伏安法测电阻用电压表测量被测电阻两端的电压，用电流表测量其电流，根据欧姆定理算出它的实验值。

$$R'_x = \frac{U}{I} \quad (2.2.3)$$

式中  $U$ 、 $I$  为伏特计、安培计的读数。

测量时，电路的连接有两种方案，如图 2.2.11 和图 2.2.12 所示。由于电压表有内阻  $R_V$ ，电流表有内阻  $R_A$ ，所以不论采用哪种电路，测量结果都存在系统误差。

在图 2.2.11 中，电流表测得的是通过被测电阻中的电流  $I$ ，而电压表测得的  $U$  是被测电阻的电压降  $U_x$  与电流表的电压降  $U_A$  之和（可称为电压近似法）。由 (2.2.3) 式

$$R'_x = \frac{U}{I} = \frac{U_x + U_A}{I} = R_x + R_A \quad (2.2.4)$$

可见  $R'_x$  是被测电阻与电流表内阻之和。其相对误差。

$$E_1 = \frac{R'_x - R_x}{R_x} = \frac{R_A}{R_x} \quad (2.2.5)$$

在图 2.2.12 中，电压表测得的是被测电阻两端的电压  $U_x$ ，而电流表测得的  $I$  是通过被测电阻的电流  $I_x$  与通电压表的电流  $I_V$  之和（可称为电流近似法）。按 (2.2.3) 式

$$R''_x = \frac{U_x}{I_x + I_V} = \frac{1}{\frac{I_x}{U_x} + \frac{I_V}{U_x}} = \frac{1}{\frac{1}{R_x} + \frac{1}{R_V}} = \frac{R_x R_V}{R_x + R_V} \quad (2.2.6)$$

可见  $R''_x$  是被测电阻与电压表内阻的并联电阻。其相对误差

$$E_2 = \frac{R_x'' - R_x}{R_x} = \frac{-R_x}{R_x + R_V} \quad (2.2.7)$$

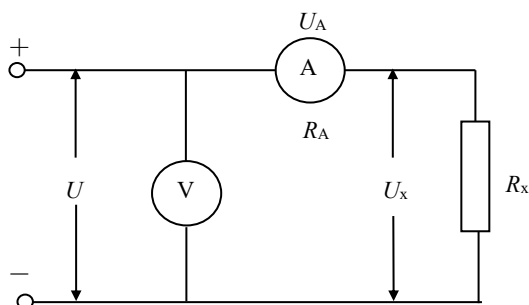


图 2.2.11 电压近似法原理图

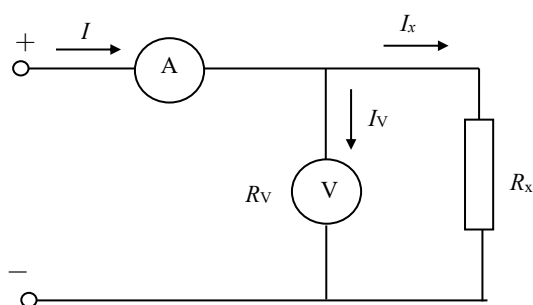


图 2.2.12 电流近似法原理图

从 (2.2.5) 和 (2.2.7) 式来看，图 2.2.11 适宜于测量较大的电阻。而图 2.2.12 适宜于测量较小的电阻。如果知道了  $R_A$  和  $R_V$ ，则可用 (2.2.4) 或 (2.2.6) 式进行修正，得到消除方法上的系统误差的测量值  $R_x$ 。如要用伏安法来测量电阻，可根据电阻阻值的大小，选择适当的测量方式进行测量。

### 三、实验仪器

数字万用电表，指针式多量程电表，直流稳压电源等。

### 四、实验内容

#### (一) 万用电表的使用

##### 1. 元件电阻的测量

测量电阻  $R_1$ 、 $R_2$ 、灯泡直流电阻、变压器初级线圈的直流电阻、变压器次级线圈直流电阻。

##### 2. 测量二极管和电容

测量二极管  $D_1$  的正向压降、二极管  $D_1$  的反向压降、二极管  $D_2$  的正向压降、二极管  $D_2$  的反向压降、电容  $C$ 。

##### 3. 测量干电池电动势

测量 A 电池和 B 电池的电动势。

#### (二) 直流阻抗和交流阻抗的测量

##### 1. 直流阻抗的测量

测量电源电动势、灯泡上的直流压降、直流电流  $I$ 、灯泡的直流阻抗  $R$ 、电源内阻  $r$ 。

##### 2. 交流阻抗的测量

测量交流电压的空载电压  $u_0$ 、灯泡上的交流压降、交流电流  $i$ 、灯泡的交流流阻抗  $Z_R$ 、变压器的输出阻抗  $Z_r$ 。

#### (三) 作图法求电阻

##### 1. 实验数据

表 2.2.1 伏安法测电阻数据表格

电压 $U(V)$	1.000	2.000	3.000	4.000	5.000
电流 $I(mA)$					

##### 2. 作图

根据作图可得电阻  $r = \underline{\hspace{2cm}} \Omega$

3. 分别用机械电表和数字电表测量  $5\Omega$  的电阻和  $500\Omega$  的电阻，比较两种电表在内接法、外接法

中的测量偏差，进行分析。

## 五、研究扩展性实验内容

1. 滑动变阻器可以作为控制电路的元件，常用作分压和限流。通过多个滑动变阻器可以实现电路的精细分压和限流，设计实验方案，通过实验数据分析在那种情况下，电路兼具效率和较高的调节精细度。

2. 用电表测量电阻，电表的内阻不可避免的影响测量结果，试研究能够降低或者消除电表影响的测量方法。

## 六、思考题

1. 用下面图 2.2.13 和图 2.2.14 的电路来测电阻，如使用的是机械电表，说明它们各适宜测多大阻值的电阻，是什么近似法？为什么图 2.2.13 的滑动变阻器要用作限流？而图 2.2.14 要用作分压？

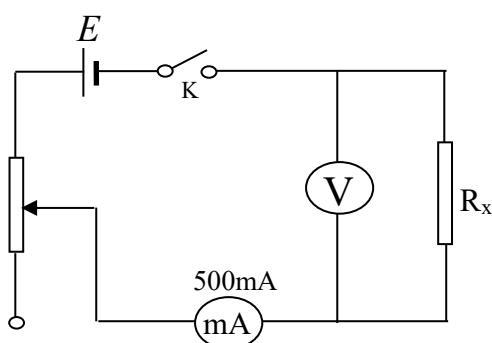


图 2.2.13 限流电路测电阻

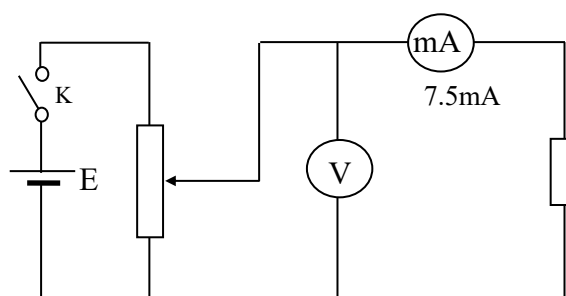


图 2.2.14 分压电路测电阻

2. 用图 2.2.13 和图 2.2.14 的电路测量一只  $500\Omega$  的电阻，若图中的电压表内阻  $R_V=1k\Omega$ ，电流表内阻  $R_A=10\Omega$ ，用图 2.2.13 的电路测得之阻值为  $330\Omega$ ，用图 2.2.14 的电路测得之阻值为  $511\Omega$ ，为什么图 2.2.13 的电路测得之阻值误差很大。

3. 如果上题中测量用的电流表和电压表换成数字电压表，对测量结果又何影响？如果有影响，是什么原因造成的呢？