

大学物理实验

计算机用

华南师范大学

物理实验教学示范中心

大学物理实验室编

2022.8

目 录

绪论	(01)
测量误差及数据处理	(01)
测量结果的评定和不确定度	(05)
有效数字及其运算法则	(09)
数据处理方法	(11)
实验 1 等厚干涉---牛顿环.....	(15)
实验 2 伏安法测电阻.....	(17)
实验 3 横波在弦线上传播的研究.....	(20)
实验 4 用电流场模拟静电场.....	(22)
实验 5 用落球法测液体的粘滞系数.....	(25)
实验 6 示波器的使用.....	(28)
实验 7 惠斯登电桥测电阻.....	(36)
实验 8 电表的改装及多用表的使用.....	(40)
附录：常用测量仪器的使用.....	(44)
附：实验报告样板	(49)

绪 论

大学物理实验课是高等院校理科的一门必修基础课程，是对学生进行科学实验基本训练，提高学生分析问题和解决问题能力的重要课程。它与物理理论课具有同等重要的地位。

这里主要介绍测量误差理论、实验数据处理、实验结果表述等初步知识，这是进入大学物理实验前必备的基础。

物理实验可分三个环节：

- 1) 课前预习，写预习报告。
- 2) 课堂实验，要求亲自动手，认真操作，详细记录。
- 3) 课后进行数据处理，完成实验报告。

预习报告的要求：

- 1) 实验题目、实验目的、实验原理（可作为正式报告的前半部分）。
- 2) 画好原始数据表格（单独用一张纸）。

实验报告内容：（要用统一的实验报告纸做）

- 1) 实验题目；
- 2) 实验目的；
- 3) 实验原理：主要公式和主要光路图、电路图或示意图，简单扼要的文字叙述；
- 4) 主要实验仪器名称、规格、编号
- 5) 实验步骤：写主要的，要求简明扼要；
- 6) 数据处理、作图（要用坐标纸）、误差分析。要保留计算过程，以便检查；
- 7) 结论：要写清楚，不要淹没在处理数据的过程中；
- 8) 思考题、讨论、分析或心得体会；
- 9) 附：原始数据记录。

测量误差及数据处理

误差分析和数据处理是物理实验课的基础，是一切实验结果中不可缺少的内容。实验中的误差分析，其目的是对实验结果做出评定，最大限度的减小实验误差，或指出减小实验误差的方向，提高测量结果的可信赖程度。对低年级大学生，重点放在几个重要概念及最简单情况下的误差处理方法。

一、测量与误差

1、**测量**：把待测量与作为标准的量（仪器）进行比较，确定出待测量是标准量的多少倍的过程称为测量。测量得到的实验数据应包含测量值的大小和单位。

2、测量的分类

测量可以分为两类。按照测量结果获得的方法来分，可分为**直接测量**和**间接测量**两类；而从测量条件是否相同来分，又可分为等**精度测量**和**非等精度测量**。

直接测量就是把待测量与标准量直接比较得出结果。如用米尺测量物体的长度，用电流表测量电流等。

间接测量是借助函数关系由直接测量的结果计算出的物理量。例如已知了路程和时间，根据速度、时间和路程之间的关系求出的速度就是间接测量。

一个物理量能否直接测量不是绝对的。随着科学技术的发展，测量仪器的改进，很多原来只能间接测量的量，现在可以直接测量了。

等精度测量是指在相同条件下进行的多次测量，即：同一个人，用同一台仪器，每次测量时周围环境条件相同，所取参数相同。等精度测量每次测量的可靠程度相同。

注意：**重复测量**必须是重复进行测量的整个操作过程，而不是仅仅重复读数。物理实验中大多采用等精度测量。

反之，若每次测量时的条件不同，如测量仪器改变，或测量方法条件改变，或不同的人。这样所进行的一系列测量叫做**非等精度测量**。

3、描述仪器性能的基本概念

描述仪器性能的基本概念有仪器精密度、准确度和量程等。

仪器精密度：是指仪器能分辨的物理量的最小值，一般是仪器的最小分度值。仪器最小的分度越小，仪器精密度就越高，所测量物理量的精密度也越高。对测量读数最小一位的取值，一般在仪器最小分度范围内再估读一位数字。如米尺的最小分度为毫米，其精密度就是 1 毫米，应估读到毫米的十分位。

仪器准确度：是指仪器测量读数的可靠程度。一般标在仪器上或写在仪器说明书上。如电学仪表所标示的级别就是该仪器的准确度。对不同的仪器准确度是不一样的，如对测量长度的常用仪器：米尺、游标卡尺和螺旋测微器，它们的仪器准确度依次提高。

量程：是指仪器所能测量的物理量最大值和最小值之差，即仪器的测量范围（有时也将所能测量的最大值称量程）。测量过程中，超过仪器量程使用仪器是不允许的，轻则仪器准确度降低，使用寿命缩短，重则损坏仪器。

4、误差与偏差

在一定条件下，任何物理量的大小都有一个客观存在的真实值，称为**真值**。

测量的目的就是得到了被测物理量所具有的客观真实数据，但由于受测量方法、测量仪器、测量条件以及观测者水平等多种因素的限制，只能获得该物理量的近似值，即测量值 x 与真值 a 之间总是存在着这种差值，这种差值称为**测量误差**，即 $\varepsilon = x - a$ ，显然误差 ε 有正负之分，常称为**绝对误差**。注意，绝对误差不是误差的绝对值！

设某个物理量真值为 a ，进行 n 次等精度测量，测量值分别为 x_1, x_2, \dots, x_n ，（不考虑系统误差）。可证明其算术平均值为**最佳估计值**：

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

当测量次数 $n \rightarrow \infty$ 时， $\bar{x} \rightarrow a$ ，即 \bar{x} 为测量值的**近似真实值**。

为了估计误差，定义测量值与近似真实值的差值为**偏差**。即 $\Delta x_i = x_i - \bar{x}$ 。实验中真值是得不到，因此误差也无法知道，而测量的偏差可以准确知道，实验误差分析中常用偏差来描述测量结果的精确程度。

5、系统误差与随机误差

根据误差的性质和产生的原因，可分为系统误差和随机误差。

1) **系统误差**是指在一定条件下多次测量的结果总是向一个方向偏离，其数值一定或按一定规律变化。系统误差的特征是具有一定的规律性。系统误差的来源有以下几个方面：

(1) 仪器误差。由于仪器本身的缺陷或没有按规定条件使用仪器而造成的误差；例如，用秒表测量运动物体通过某一段路程所需要的时间，若秒表走时偏快，即使测量多次，测量的时间 t 总是偏大为一个固定的数值，这是仪器不准确造成的误差。

(2) 理论误差。由于测量所依据的理论公式本身的近似性，或实验条件不能达到理论公式所规定的要求，或测量方法等所带来的误差；

(3) 观测误差。由于观测者本人生理或心理特点造成的误差。通常与观测者反应和观察习惯有关，它因人而异，并与观测者当时的精神状态有关。例如，按秒表时习惯提前或滞后。

在任何一项实验工作和具体测量中，必须要想尽一切办法，最大限度的消除或减小一切可能存在的系统误差，或者对测量结果进行修正。以下介绍几种常用的方法。

(1) 检定修正法：指将仪器、量具送计量部门检验取得修正值，以便对某一物理量测量后进行修正。

(2) 替代法：指测量装置测定待测量后，在测量条件不变的情况下，用一个已知标准量替换被测量来减小系统误差。

(3) 异号法：指对实验时在两次测量中出现符号相反的误差，采取平均值后消除的一种方法。例如在外界磁场作用下，仪表读数会产生一个附加误差，若将仪表转动 180° 再进行一次测量，外磁场将对读数产生相反的影响，引起负的附加误差。两次测量结果平均，正负误差可以抵消，从中可以减小系统误差。

2) **随机误差**是指在实际测量条件下，多次测量同一量时，误差时大时小、时正时负，以不可预定方式变化着的误差叫做随机误差，也叫**偶然误差**。当测量次数很多时，随机误差就显示出明显的规律性。实践和理论都已证明，随机误差服从一定的统计规律（正态分布，如图1），其特点是：

绝对值小的误差出现的概率比绝对值大的误差出现的概率大（单峰性）；

绝对值相等的正负误差出现的概率相同（对称性）；

绝对值很大的误差出现的概率趋于零（有界性）；

误差的算术平均值随着测量次数的增加而趋于零（抵偿性）。

因此，增加测量次数可以减小随机误差，但不能完全消除。

引起随机误差的原因也很多。它与仪器精密度和观察者感官灵敏度有关。如仪器显示数值的估计读数位偏大和偏小；测量环境扰动变化以及其它不能预测不能控制的因素，如空间电磁场的干扰等。

由于测量者过失、实验方法不合理、用错仪器、操作不当、读错数值或记错数据等引起的误差，是一种人为的过失误差，不属于测量误差。过失误差是可以避免的。

6、随机误差的估算

标准差：设在等精度测量中，一组 n （无限）次测量的值分别为： x_1, x_2, \dots, x_n ，这组测量值称为测量列。误差理论证明，测量列的“标准差”为：

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

其意义表示某次测量值的随机误差在 $-\sigma \sim +\sigma$ 之间的概率为 68.3%。即真值落在 $(\bar{x} - \sigma) \sim (\bar{x} + \sigma)$ 之间的概率是 68.3%。

标准偏差：根据统计学推得，当 n 为有限次时，测量列的标准偏差为：

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (3)$$

(3) 式称为**贝塞尔公式**。其意义表示当测量次数非无穷大时，某次测量值的随机误差在 $-S_x \sim +S_x$ 之间的

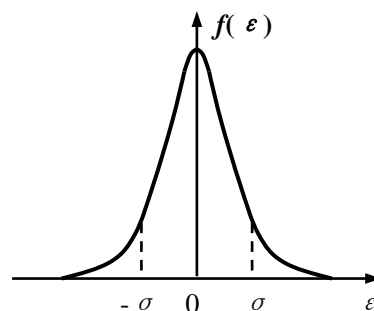


图 1

概率为 68.3%，这个概率叫置信概率（置信度），用 p 表示。真值落在 $(\bar{x} - S_x) \sim (\bar{x} + S_x)$ 之间的置信概率是 $p=0.683$ 。

7、算术平均值的标准偏差

m 组 n 次测量值，每组的算述平均值分别为：

$$\bar{X}_1, \bar{X}_2, \dots, \bar{X}_m,$$

很显然这些算述平均值更接近真值，用这组算述平均值来计算的标准偏差称为“算术平均值的标准偏差”：

$$S_{\bar{x}} = \frac{S_x}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (4)$$

其意义是测量平均值的随机误差在 $-S_{\bar{x}} \sim +S_{\bar{x}}$ 之间的概率为 68.3%。

$S_{\bar{x}}$ 是反映了平均值接近真值的程度。但不要误认为真值一定会落在 $(\bar{x} - S_{\bar{x}}) \sim (\bar{x} + S_{\bar{x}})$ 之间。

类似地，待测量的真值在 $(\bar{x} - 2S_{\bar{x}}) \sim (\bar{x} + 2S_{\bar{x}})$ 范围内的概率为 95.4%，此时的置信概率 $p=0.954$ 。

8、 t 分布

由于在实际工作中，考虑测量次数较少时，随机误差服从的规律不是正态分布，而是 t 分布。 t 分布的曲线比正态分布的要平坦，两者的分布函数不同， n 较小时， t 分布偏离正态分布较多， n 较大时，趋于正态分布。如图 2 所示。

对 t 分布，只要在公式 (4) 的基础上乘以一个 t 因子，即

$$\Delta_A = tS_{\bar{x}} = t \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (5)$$

或：

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

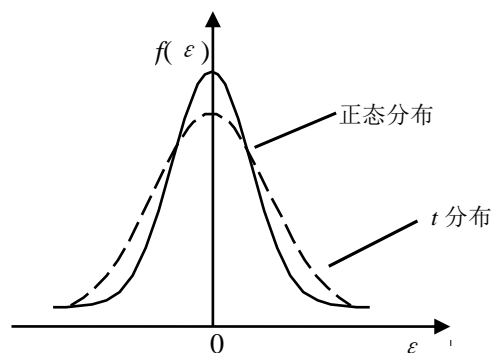


图 2

t 值是与测量次数等有关的，如下表是不同测量次数时的 t 值：

n	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20	≥ 100
t	4.30	3.18	2.78	2.57	2.45	2.36	2.31	2.26	2.14	2.09	≤ 1.97
t/\sqrt{n}	2.48	1.59	1.204	1.05	.926	0.834	0.770	0.715	0.553	0.467	≤ 0.139

由该表可知，当 $5 \leq n \leq 10$ 时， t/\sqrt{n} 接近 1，由 (6) 式可知 $\Delta_A \approx S_x$ 。对教学实验，测量次数一般取 5~10 次，所以可用 (3) 式作为估算偏差的公式。

9、异常数据的剔除

剔除测量列中异常数据的标准有几种，有 3Δ 准则、肖维准则、格拉布斯准则等。下面是 3Δ 准则：

统计理论表明，测量值的偏差超过 3Δ 的概率已小于 1%。因此，可以认为偏差超过 3Δ 的测量值是其他因素或过失造成的，为异常数据，应当剔除。剔除的方法是将多次测量所得的一系列数据，算出各测量值的偏差 Δx_i 和标准偏差 Δ ，把其中最大的 Δx_j 与 3Δ 比较，若 $\Delta x_j > 3\Delta$ ，则认为第 j 个测量值是异常数据，舍去不计。剔除 x_j 后，对余下的各测量值重新计算偏差和标准偏差，并继续审查，直到各个偏差均小于 3Δ 。

为止。

测量结果的评定和不确定度

一、不确定度的含义

在物理实验中，因真值得不到，测量误差也就不能肯定。为此，1992 年国际计量大会以及四个国际组织制定了《测量不确定度表达指南》。1993 年此《指南》经国际理化等组织批准实施。

对一个物理实验的具体数据来说，不确定度是指测量值（近真值）附近的一个范围，测量值与真值之差（误差）可能落于其中。它是对误差的一种量化估计，是对测量结果可信赖程度的具体评定。不确定度小，测量结果可信赖程度高；不确定度大，测量结果可信赖程度低。所以用不确定度的概念对测量数据做出评定比用误差来描述更合理。

二、测量结果的表示和不确定度

1、测量结果的不确定度

在做物理实验时，要求表示出测量的最终结果。即

$$x = \bar{x} \pm \Delta \quad (\text{单位}) \quad (7)$$

式中 x 为待测量； \bar{x} 是测量的近似真实值， Δ 是总的不确定度，三者的数量级、单位要相同。简单起见，**不确定度一般保留一位有效数字，多余的位数一律进位。** \bar{x} 的末尾数与不确定度的所在位数对齐。

这种表达形式反应了三个基本要素：测量值、不确定度和单位，缺一不可，否则就不能全面表达测量结果。

2、相对不确定度

相对不确定度定义为

$$E = \frac{\Delta}{\bar{x}} \times 100\% \quad (8)$$

有时候还需要将测量结果与公认值或理论值进行比较（百分偏差）：

$$E_0 = \frac{|\bar{x} - x_{\text{理}}|}{x_{\text{理}}} \times 100\% \quad (9)$$

$x_{\text{理}}$ 可以是公认值，或高级精密仪器的测量值。

相对不确定度一般**取 2 位有效数字**。

3、测量结果

在物理实验中，直接测量时若不需要对被测量进行系统误差的修正，一般就取多次测量的算术平均值 \bar{x} 作为近似真实值；

若在实验中有时只需测一次或只能测一次，该次测量值就被认为是测量的近似真实值。

如果要求对被测量值进行一定系统误差的修正，通常是将一定系统误差（即绝对值和符号都确定的可估计出的不确定度分量）从算术平均值 \bar{x} 或一次测量值中减去，从而求得被修正后的直接测量结果的近似真实值。例如，用螺旋测微器来测量长度时，从被测量结果中减去螺旋测微器的零点读数。

4、测量结果的表示

表示测量最后结果时，一般要求绝对和相对的不确定度同时表示出，才能较全面的结果表示。即

$$\left\{ \begin{array}{l} x = \bar{x} \pm \Delta \quad (\text{单位}) \\ E = \frac{\Delta}{\bar{x}} \times 100\% \quad \text{或} \quad E_0 = \frac{|\bar{x} - x_{\text{理}}|}{x_{\text{理}}} \times 100\% \end{array} \right. \quad (10)$$

三、不确定度的两类分量

在不确定度的合成问题中，主要是从系统误差和随机误差等方面进行综合考虑的，将各种来源的误差按计算方法分为两类：统计不确定度（A类）和非统计不确定度（B类）。总的总不确定度 Δ 是由两类分量（A类和B类）求“方和根”计算而得。为使问题简化，此处只讨论简单情况下（即A类、B类分量保持各自独立变化，互不相关）的不确定度的合成。

A类不确定度是指可以采用统计方法（即具有随机误差性质）计算的不确定度，即是前面所说的偶然误差，可以用（6）式或（3）式计算，用 Δ_A 表示。

B类不确定度如实验室中的测量仪器不准确，量具磨损老化等等引起的不确定度，用 Δ_B 表示。

本书对B类不确定度的估计作简化处理，只考虑仪器不确定度。即： $\Delta_B = \Delta_I$

Δ_I 为仪器不确定度。一般的仪器说明书中都以某种方式注明仪器不确定度，由制造厂或计量检定部门给定。物理实验教学中，可由实验室提供。

仪器不确定度一般可分两种情况处理：

已知仪器准确度时，这时以其准确度作为不确定度大小。如一个量程150mA，准确度0.2级的电流表，测某一次电流，读数为131.2mA。可估算出最大绝对不确定度为=量程 \times 级别 $\% = 150 \times 0.2\% = 0.3\text{mA}$ ，因而该次测量的结果可写成 $I = 131.2 \pm 0.3\text{mA}$ 。其相对不确定度为 $E_I = 0.3/131.2 = 0.23\%$ ，大于0.2%。因此，测量值越接近量程，相对不确定度越小。

对于没有标明准确度的仪器，因在制造仪器时，其最小的分度数值是受仪器准确度约束的。所以，对连续读数的仪器，最大读数不确定度可取仪器最小刻度值的1/10、1/5、1/2或最小刻度，具体可根据所用仪器的精密度、仪器灵敏度、测试者感觉器官的分辨能力，以及观测时的环境条件等因素来考虑。而无法进行估计的非连续读数的仪器，如数字式仪表，可简单取其最末位数的1作为仪器不确定度。（若末位或末两位不稳定，可记录稳定的数值加一位不稳定的，或根据其变化规律，四舍五入到稳定的那位。仪器不确定度则取稳定位的1，或根据不稳定位变化的程度来取。）

合成不确定度为A类不确定度和B类不确定度的合成

$$\Delta = \sqrt{\Delta_A^2 + \Delta_B^2} \quad (11)$$

在计算总的总不确定度中求“方和根”时，若某一平方值小于另一平方值的1/9，则这一项就可以略去不计。这一结论叫做微小误差准则。在进行数据处理时，利用微小误差准则可减少不必要的计算。

对于单次测量，一般是以最大不确定度进行估计。可用仪器不确定度作为合成不确定度，即： $\Delta = \Delta_I$ 。

四、直接测量的不确定度

直接测量的不确定度的合成，用（6）式或（3）式计算A类不确定度。对B类不确定度，主要讨论仪器的不确定度。

例1. 用感量为0.1g的物理天平称量某物体的质量，其读数值为35.41g，求物体质量的测量结果。（感量：在仪器上有标出，一般为最小分度值）

[解]：用物理天平称物体的质量，重复测量读数值往往相同，故一般只须进行单次测量即可。单次测量的读数即为近似真实值， $m = 35.41\text{g}$ 。

对物理天平通常取感量的1/2，作为仪器不确定度，即

$$\Delta_B = \Delta_I = 0.05 \text{ (g)}$$

测量结果为

$$m = 35.41 \pm 0.05 \text{ (g)}$$

因为是单次测量，总的总不确定度 $\Delta = \sqrt{\Delta_A^2 + \Delta_B^2}$ 中 Δ_A 无法估算，所以 $\Delta = \Delta_B$ 。但是这个结论并不表

明单次测量的 Δ 就小，因为 $n=1$ 时， $S_{\bar{x}}$ 是发散的。

例 2. 用螺旋测微器测量小钢球的直径，五次的测量值分别为

d (mm)	11.922	11.923	11.924	11.921	11.920
----------	--------	--------	--------	--------	--------

螺旋测微器的最小分度数值为 0.01mm 试写出测量结果的标准式。

[解]:

(1) 求直径 d 的算术平均值

$$\begin{aligned}\bar{d} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^5 d_i = \frac{1}{5} (11.922 + 11.923 + 11.924 + 11.921 + 11.920) \\ &= 11.922 \text{ (mm)}\end{aligned}$$

(2) 计算 B 类不确定度

螺旋测微器的仪器不确定度（取最小刻度值的 1/2）为 $\Delta_I = 0.005 \text{ (mm)}$

$$\Delta_B = \Delta_I = 0.005 \text{ (mm)}$$

(3) 计算 A 类不确定度

$$\begin{aligned}\Delta_A &= t \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^5 (d_i - \bar{d})^2}{n(n-1)}} \\ &= 2.78 \times \sqrt{\frac{(11.922 - 11.922)^2 + (11.923 - 11.922)^2 + \cdots}{5(5-1)}} = 0.002 \text{ (mm)}\end{aligned}$$

(4) 合成不确定度 $\Delta = \sqrt{\Delta_d^2 + \Delta_B^2} = \sqrt{0.002^2 + 0.005^2} = 0.006 \text{ (mm)}$

(5) 相对不确定度: $E = \frac{\Delta}{\bar{x}} \times 100\% = \frac{0.006}{11.922} \times 100\% = 0.050\%$

(6) 测量结果: $d = \bar{d} \pm \Delta = 11.922 \pm 0.006 \text{ (mm)}$

$$E = 0.050\%$$

测量不确定度表达涉及到深广的知识领域和误差理论问题。因此，在保证科学性的前提下，在教学中尽量把方法简化，为初学者易于接受。以后在工作需要时，可以参考有关文献继续深入学习。

五、间接测量结果的不确定度

间接测量的近似真实值和不确定度是由直接测量结果通过函数式计算出来的，既然直接测量存在不确定度，那么间接测量也必有不确定度，这就是不确定度的传递。由直接测量值及其不确定度来估算间接测量值的不确定度之间的关系式称为不确定度的传递公式。设间接测量的函数式为

$$N = F(x, y, z, \cdots)$$

N 为间接测量的量，它有 K 个直接测量的物理量 $x, y,$

z, \cdots ，各直接观测量的测量结果分别为 $x = \bar{x} \pm \Delta_x$ ，

$y = \bar{y} \pm \Delta_y$ ， $z = \bar{z} \pm \Delta_z$ ，。……

(1) 若将各个直接测量量的近似真实值 \bar{x} 代入函数表达式中，即可得到间接测量的近似真实值。

附表：常用函数的不确定度传递公式

函数关系式	不确定度传递公式
$N = ax \pm by$	$\Delta_N = \sqrt{(a\Delta_x)^2 + (b\Delta_y)^2}$
$N = axy$	$E_N = \frac{\Delta_N}{N} = \sqrt{\left(\frac{\Delta_x}{\bar{x}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_y}{\bar{y}}\right)^2}$
$N = a \frac{x}{y}$	$E_N = \frac{\Delta_N}{N} = \sqrt{\left(\frac{\Delta_x}{\bar{x}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_y}{\bar{y}}\right)^2}$
$N = kx^a \frac{y^b}{z^c}$	$E_N = \sqrt{\left(a \frac{\Delta_x}{\bar{x}}\right)^2 + \left(b \frac{\Delta_y}{\bar{y}}\right)^2 + \left(c \frac{\Delta_z}{\bar{z}}\right)^2}$

$$\bar{N} = F(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, \dots)$$

(2) 求间接测量的不确定度, 由于不确定度均为微小量, 相似于数学中的微小增量, 对函数式 $N=F(x, y, z, \dots)$ 求全微分, 即得

$$dN = \frac{\partial F}{\partial x} dx + \frac{\partial F}{\partial y} dy + \frac{\partial F}{\partial z} dz + \dots$$

式中 dN, dx, dy, dz, \dots 均为微小量, dN 的变化由各自变量的变化决定, $\frac{\partial F}{\partial x}, \frac{\partial F}{\partial y}, \frac{\partial F}{\partial z}, \dots$ 为函数对自变量的

偏导数, 将上面全微分式中的微分符号 d 改写为不确定度符号 Δ , 并将微分式中的各项求“方和根”, 即为间接测量的合成不确定度

$$\Delta_N = \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial x} \Delta_x\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial y} \Delta_y\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial z} \Delta_z\right)^2 + \dots} \quad (12)$$

这里 x, y, z, \dots 各量应**相互独立**。

当间接测量的函数表达式为积和商(或含和差的积商形式)时, 为了使运算简便起见, 可以先将函数式两边同时取自然对数, 然后再求全微分。即

$$\frac{dN}{N} = \frac{\partial \ln F}{\partial x} dx + \frac{\partial \ln F}{\partial y} dy + \frac{\partial \ln F}{\partial z} dz + \dots$$

同样改写微分符号为不确定度符号, 再求其“方和根”, 即为间接测量的相对不确定度 E_N , 即

$$E_N = \frac{\Delta_N}{N} = \sqrt{\left(\frac{\partial \ln F}{\partial x} \Delta_x\right)^2 + \left(\frac{\partial \ln F}{\partial y} \Delta_y\right)^2 + \left(\frac{\partial \ln F}{\partial z} \Delta_z\right)^2 + \dots} \quad (13)$$

已知 E_N, \bar{N} , 由(13)式可以求出不确定度

$$\Delta_N = \bar{N} \cdot E_N \quad (14)$$

今后在计算间接测量的不确定度时, 对函数表达式仅为“和差”形式, 可以直接利用(12)式, 求出间接测量的不确定度 Δ_N , 若函数表达式为积和商(或积商和差混合)等较为复杂的形式, 可直接采用(13)

式, 先求出相对不确定度, 再求出不确定度 Δ_N 。附表为常用函数的不确定度传递公式, 可直接应用。(注意各变量是**相互独立的**)

例 1. 已知电阻 $R_1=50.2 \pm 0.5 (\Omega)$, $R_2=149.8 \pm 0.5 (\Omega)$, 求它们串联的电阻 R 和不确定度 Δ_R 。

[解]: 串联电阻的阻值为

$$R = R_1 + R_2 = 50.2 + 149.8 = 200.0 (\Omega)$$

由附表第一行公式求得不确定度为

$$\Delta_R = \sqrt{\Delta_1^2 + \Delta_2^2} = \sqrt{0.5^2 + 0.5^2} = 0.7 (\Omega)$$

$$\text{相对不确定度} \quad E_R = \frac{\Delta_R}{R} = \frac{0.7}{200.0} \times 100\% = 0.35\%$$

测量结果为 $R = 200.0 \pm 0.7 (\Omega)$

(注意: 不确定度保留一位有效数字, 相对不确定度保留 2 位有效数字。)

例 2. 测量金属环的内径 $D_1=28.80 \pm 0.04 (\text{mm})$, 外径 $D_2=36.00 \pm 0.04 (\text{mm})$, 厚度 $h=25.75 \pm 0.04 (\text{mm})$ 。试求环的体积 V 。

[解]:

(1) 环体积的近似真实值为

$$V = \frac{\pi}{4} h(D_2^2 - D_1^2) = \frac{3.1416}{4} \times 25.75 \times (36.00^2 - 28.80^2) = 9436(\text{mm}^3)$$

(2) 首先将环体积公式两边同时取自然对数后, 再求全微分

$$\ln V = \ln\left(\frac{\pi}{4}\right) + \ln h + \ln(D_2^2 - D_1^2)$$

$$\frac{dV}{V} = 0 + \frac{dh}{h} + \frac{2D_2 dD_2 - 2D_1 dD_1}{D_2^2 - D_1^2} = \frac{1}{h} dh + \frac{2D_2}{D_2^2 - D_1^2} dD_2 + \frac{-2D_1}{D_2^2 - D_1^2} dD_1$$

则相对不确定度为

$$E_V = \frac{\Delta_V}{V} = \sqrt{\left(\frac{\Delta_h}{h}\right)^2 + \left(\frac{2D_2 \Delta_{D_2}}{D_2^2 - D_1^2}\right)^2 + \left(\frac{-2D_1 \Delta_{D_1}}{D_2^2 - D_1^2}\right)^2}$$
$$= \left[\left(\frac{0.04}{25.75}\right)^2 + \left(\frac{2 \times 36.00 \times 0.04}{36.00^2 - 28.80^2}\right)^2 + \left(\frac{-2 \times 28.80 \times 0.04}{36.00^2 - 28.80^2}\right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = 0.81\%$$

(3) 合成不确定度为

$$\Delta_V = V \cdot E_V = 9436 \times 0.0081 \approx 8 \times 10(\text{mm}^3)$$

(4) 环体积的测量结果为

$$V = (9.44 \pm 0.08) \times 10^3(\text{mm}^3)$$

$$E_V = 0.81\%$$

注意: 结果的末尾数与不确定度的所在位对齐。

有效数字及其运算法则

一、有效数字的概念

1、有效数字的定义

若用最小分度值为 1mm 的米尺测量某物体的长度, 读数为 56.3mm。其中 5 和 6 这两个数字是从米尺的刻度上准确读出的, 可以认为是准确的, 叫做可靠数字。末尾数字 3 是从米尺最小分度值上估计出来的, 是不准确的, 叫做欠准数 (或称可疑数字)。显然有一位可疑数字, 使测量值更接近真实值, 更能反映客观实际。因此, 测量值保留到这一位是合理的, 即使估计数是 0, 也不能舍去。故测量数据的有效数字定义为几位可靠数字加上一位可疑数字称为有效数字, 有效数字数字的个数叫做有效数字的位数。注意: 有效数字的位数不要与小数点后的位数混淆。如上述的 56.3mm 称为 3 位有效数字, 但小数后只有 1 位。

有效数字的位数与十进制单位的变换无关, 即与小数点的位置无关。因此, 用以表示小数点位置的 0 不是有效数字。当 0 不是用作表示小数点位置时, 0 和其它数字具有同等地位, 都是有效数字, 即有效数字中间与末尾的 0, 均应算作有效位数。如 0.0135 m 和 1.05cm 及 13.0mm 都是三位有效数字。

从有效数字的另一面也可以看出测量用具的最小刻度值, 如 0.0135m 是用最小刻度为毫米的尺子测量的, 而 1.030m 是用最小刻度为厘米的尺子测量的。

2、结果的表示

由于最后一位可疑位是不确定的, 即是不确定度所在位。所以, 若把测量结果写成 $542.817 \pm 0.5(\text{mm})$ 是错误的, 由不确定度 $0.5(\text{mm})$ 可以得知, 数据的小数 0.8 已不可靠, 把它后面的数字也写出来没有多大意义, 正确的写法应当是: $542.8 \pm 0.5(\text{mm})$ 。即, 结果的尾数应与不确定度的所在位对齐, 后面的位数可以简单地四舍五入。

二、直接测量的有效数字记录

物理实验中通常仪器上显示的数字均为有效数字 (包括最后一位估计读数) 都应读出, 并记录下来。

仪器上显示的最后一位数字是 0 时，此 0 也要记录。仪器不确定度在哪一位发生，测量数据的可疑位就记录到哪一位。对于有分度式的仪表，读数要根据人眼的分辨能力读到最小分度的十分之几。

例如，测出物体长为 52.4 mm 与 52.40 mm 是不同的两个测量值，也是属于不同仪器测量的两个值，从这两个值可以看出测量前者的仪器精度低，测量后者的仪器精度高出一个数量级。

在记录直接测量的有效数字时，常用科学表达式。如 0.0451 m 或 45.1 mm，可表示为 $4.51 \times 10^{-2} \text{m}$ 。

三、有效数字的运算法则

测量结果的有效数字，只能允许保留一位可疑数字。根据这一原则，为了简化有效数字的运算，约定下列规则：

1. 加法或减法运算

若个数进行加法或减法运算，其和或者差的结果的可疑数字的位置与参与运算各个量中的可疑数字的位置最高者相同。因此，几个数进行加法或减法运算时，可先将多余数修约（四舍五入），将应保留的可疑数字的位数多保留一位进行运算，最后结果按保留一位可疑数字进行取舍。

2. 乘法和除法运算

有效数字进行乘法或除法运算时，乘积或商的结果的有效数字的位数，一般与参与运算的各个量中有效数字的位数最少者相同，或多一位。实际运算过程，可比参与运算的位数最少者多取一位，最后由结果的不确定度决定。

如： $7.65 + 8.268 = 15.92$

$$\begin{array}{r} 7.65 \\ + 8.268 \\ \hline 15.918 \end{array}$$

$3.841 \times 8.42 = 32.34$

$$\begin{array}{r} 3.841 \\ \times 8.42 \\ \hline 7682 \\ 15364 \\ \hline 30728 \\ 3234122 \end{array}$$

式中有下划线的表示可疑数字。

3. 乘方和开方运算

$$(7.325)^2 = 53.66$$

$$\sqrt{32.8} = 5.73$$

乘方和开方运算的有效数字的位数与其底数的有效数字的位数相同。

4. 三角函数：结果有效数字由度数的有效位数决定

例： $\sin 30^{\circ} 07' (4 \text{ 位}) = \sin 30.12^{\circ} = 0.5018$ (注意：不写成 $\sin 30^{\circ} 7'$)

5、指数：结果的有效数字，与指数小数点后的位数相同。例： $10^{5.75} = 5.6 \times 10^5$ ；对数：结果的有效数字，其尾数（小数点后的位数）与真数的位数相同，或多取一位。

例： $\ln 1.550 = 0.4383$

7、对任意函数：可将数值末位改变 1，运算后，看结果是哪一位变化了，就保留到开始变化那位。

例： $\ln 1.550 = 0.43825$ ，末位改变 1： $\ln 1.551 = 0.43890$ ，所以，可取小数后 4 位：0.4383。

8、自然数 1, 2, 3, 4, ... 不是测量而得，因此，可以视为无穷多位有效数字的位数，书写也不必写出后面的 0，如 $D = 2R$ ， D 的位数仅由 R 的位数决定。

9、无理常数 π ， $\sqrt{2}$ ， $\sqrt{3}$ ，... 的位数也可以看成很多位有效数字。例如 $L = 2\pi R$ ，若测量值 $R = 2.35 \times 10^{-1} (\text{m})$ 时， π 应比参加运算的最少位数多取一位，取为 3.142。即 $L = 2 \times 3.142 \times 2.35 \times 10^{-2} = 1.48 \times 10^{-1} (\text{m})$ 。用计算器计算，可直接输入 π 。

上述规定和方法，是为了简化有效数字的运算，及作为不需算不确定度时，有效位数取值的参考，但并非完全准确。在实际的不确定度估算时，作为中间过程，可比上述规定取多1~2位，**最后由结果的不确定度决定有效位数。**

数据处理方法

物理实验中测量得到的许多数据需要处理后才能表示测量的最终结果。数据处理是指从获得数据起到得出结果为止的加工过程。数据处理包括记录、整理、计算、分析、拟合等多种处理方法，常用有列表法、作图法、图解法、最小二乘法等。

一、列表法

列表法是记录数据的基本方法。是记录的最好方法。设计记录表格要求：

1. 列表要简单明了，利于记录、运算处理数据和检查处理结果，便于一目了然地看出有关量之间的关系。
2. 表中各栏中的物理量都要用符号标明，并写出数据所代表物理量的单位及量值的数量级。单位写在符号标题栏，**不要重复记在各个数值上。**
3. 记录的数据，应正确反映测量结果的有效数字。一般记录表格还有序号和名称。

例如：要求测量圆柱体的体积，圆柱体高 H 和直径 D 的记录如下：

测柱体高 H 和直径 D 记录表

测量次数 i	1	2	3	4	5	平 均
H_i (mm)	35.32	35.30	35.32	35.34	35.30	35.326
D_i (mm)	8.135	8.137	8.136	8.133	8.132	8.1347

说明：测 H_i 是用精度为 0.02mm 的游标卡尺，仪器不确定度为 $\Delta_I=0.02\text{mm}$ ；测 D_i 是用精度为 0.01mm 的螺旋测微器，其仪器不确定度 $\Delta_I=0.005\text{mm}$ 。

由表中所列数据，可计算出高、直径和圆柱体体积测量结果：

$$H=35.33\pm0.02\text{ (mm)}$$

$$D=8.135\pm0.005\text{ (mm)}$$

$$V=(1.836\pm0.003)\times10^3\text{ (mm}^3\text{)}$$

二、作图法

用作图法处理实验数据是数据处理的常用方法之一，它能直观地显示物理量之间的对应关系，揭示物理量之间的联系。作图法是在现有的坐标纸上用图形描述各物理量之间的关系，将实验数据用几何图形表示出来，叫做作图法。在作图时要注意以下几点：

1. 作图一定要用坐标纸。当决定了作图的参量以后，根据函数关系选用直角坐标纸，单对数坐标纸，双对数坐标纸，极坐标纸等，本教材主要要求学会用直角坐标纸。
2. 坐标纸的大小及坐标轴的比例。应当根据所测得的有效位数和结果的需要来确定，原则上数据中的可靠数字在图中应当标出，数据中可靠位的最后一位在图中应是**整数格**。除特殊需要外，数值的起点一般不必从 0 开始， X 轴和 Y 轴的比例可以采用不同的比例，使作出的图形大体上能**充满**整个坐标纸，图形布局美观、合理。
3. 标明坐标轴。对直角坐标系，一般是自变量为横轴，因变量为纵轴，采用粗实线描出坐标轴，并用箭头表示出方向，注明所示物理量的名称，单位。坐标轴上标的量值的有效位数应与测量值的有效位数相同，且标整数。
4. 描点。根据测量数据，用直尺和笔尖使其函数对应的实验点准确地落在相应的位置，一张图纸上画上几条实验图线时。每条图线应用不同的标记如“ \times ”、“ $+$ ”等符号标出，以免混淆。
5. 连线。根据不同函数关系对应的实验数据点分布，把点连成直线或光滑的曲线或折线，连线必须用直尺或曲线板，校准曲线中的数据点则连成折线。由于每个实验数据都有一定的不确定度，所以将实验数据点连成直线或光滑曲线时，绘制的图线不一定通过所有的点，应让多数实验点落在曲线上，其余的点均

匀分布在曲线的两侧，即尽可能使曲线两侧所有点到直线的距离之和最小并且接近相等，个别偏离很大的点应当应用异常数据的剔除中介绍的方法进行分析后决定是否舍去，原始数据点应保留在图中。

6. 写图名。作完图后，在图纸下方或空白的明显位置处，写上图的名称、作者和作图日期，有时还要附上简单的说明，如实验条件等，使读者一目了然。作图时，一般将纵轴代表的物理量写在前面，横轴代表的物理量写在后面，中间用“—”联接。

7. 最后将图纸贴在实验报告的适当位置，便于教师批阅实验报告。

三、图解法

在物理实验中，实验图线做出以后，可以由图线求出经验公式。图解法就是根据实验数据作好的图线，用解析法找出相应的函数形式。实验中经常遇到的图线是直线、抛物线、双曲线、指数曲线、对数曲线。特别是当图线是直线时，采用此方法更为方便。

1. 由实验图线建立经验公式的一般步骤：

- (1) 根据解析几何知识判断图线的类型；
- (2) 由图线的类型判断公式的可能特点；
- (3) 利用半对数、对数或倒数坐标纸，把原曲线改为直线；
- (4) 确定常数，建立起经验公式的形式，用实验数据来检验所得公式的准确程度。

2. 用直线图解法求直线的方程

如果做出的实验图线是一条直线，则经验公式应为直线方程

$$y=kx+b$$

要建立此方程，由实验直接求出 k （斜率）和 b （截距），一般有两种方法。可用斜率截距法和端值求解法。

其中斜率截距法：在图线上选取两点 $P_1(x_1, y_1)$ 和 $P_2(x_2, y_2)$ ，其坐标值最好是整数，或横坐标取整数。用特定的符号表示所取的点，与实验点相区别。一般**不要取原实验点**。所取的两点在实验范围内应尽量彼此分开一些，以减小不确定度。根据两点的坐标求出斜率 k 为：

$$k = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$$

其截距 b 为 $x=0$ 时的 y 值；若原实验中所绘制的图形并未给出 $x=0$ 段直线，可将直线用虚线延长交 y 轴，则可量出截距。如果起点不为零，也可以由式

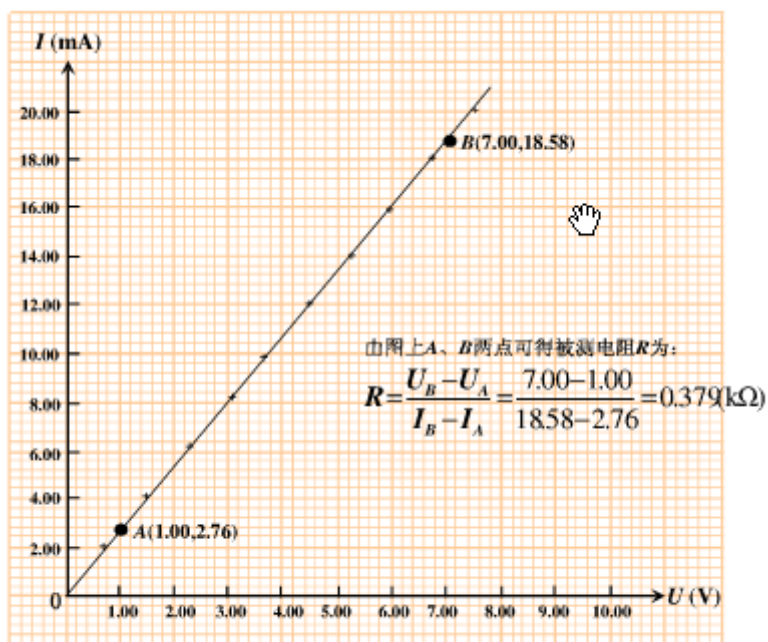
$$b = \frac{x_2 y_1 - x_1 y_2}{x_2 - x_1}$$

求出截距，求出斜率和截距的数值代入方程中就可以得到经验公式。

例：电阻伏安特性测量，测量数据如下表

$U(V)$	0.74	1.52	2.33	3.08	3.66	4.49	5.24	5.98	6.76	7.50
$I(mA)$	2.00	4.01	6.22	8.20	9.75	12.00	13.99	15.92	18.00	20.01

根据所测数据绘出 $I \sim U$ 图



电阻伏安特性曲线

求出直线的斜率，

$$k = \frac{I_B - I_A}{U_B - U_A} = \frac{18.58 - 2.76}{7.00 - 1.00} = 2.64$$

其倒数即为电阻值：

$$R = \frac{1}{k} = 0.379 (K\Omega)$$

其截据从图上直接读出为“0.00”。

此直线的方程为： $I = 2.64U$

3. 曲线改直，曲线方程的建立

在实验工作中，许多物理量之间的关系并不都是线性的，由曲线图直接建立经验公式一般是比较困难的，但仍可通过适当的变换而成为线性关系，即把曲线变换成直线，再利用建立直线方程的办法来解决问题。这种方法叫做曲线改直。

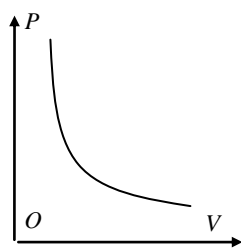


图4 $P \sim V$ 曲线

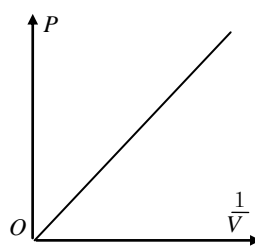


图5 $P \sim 1/V$ 曲线

例如： $PV=C$ ，式中 C 为常量，要变换成 $P=C(1/V)$ ， P 是 $1/V$ 的线性函数，斜率为 C 。

习 题

1. 指出下列各量是几位有效数字？

(1) 63.74 cm; (2) 0.302 cm; (3) 0.0100 cm; (4) 12.61s;

2. 试用有效数字运算法则计算出下列结果

(1) $107.50 - 2.5$; (2) $273.5 \div 0.100$; (3) 1.50×0.500 ; (4) $\frac{8.0421}{6.038 - 4.034} + 30.9$;

3. 一圆柱体, 已知高 $h=4.120 \pm 0.001$ (cm), 直径 $d=2.040 \pm 0.001$ (cm), $m=149.18 \pm 0.05$ (g)。求 V 和密度 ρ 的测量结果。

4. 改正下列错误, 写出正确答案

- (1) $L=0.01040$ (km) 的有效数字是五位;
- (2) $d=12.435 \pm 0.02$ (cm);
- (3) $h=27.3 \times 10^4 \pm 2000$ (km);
- (4) $R=6371 \text{ km}=6371000\text{m}=637100000$ (cm);
- (5) $t=8.50 \pm 0.452\text{s}$
- (6) $\theta=60^\circ \pm 2'$ 。

5. 单位变换

- (1) 将 $L=4.25 \pm 0.05$ (cm) 的单位变换成 μm , mm , m , km 。
- (2) 将 $m=1.750 \pm 0.001$ (kg) 的单位变换成 g , mg , t 。

6. 利用单摆测重力加速度 g , 当摆角 $\theta < 5^\circ$ 时, $T=2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$, 式中摆长 $L=97.69 \pm 0.02$ (cm), 周期 T

$=1.9842 \pm 0.0002$ (s)。求 g 和 Δ_g , 并写出结果的标准式。

7. 准确度等级为 0.5 级, 量程为 10mA 的电流表, 使用时可能产生的仪器不确定度为 _____ mA, 若要求测量的相对不确定度不超过 1%, 则被测电流应不小于 _____ mA。

8. 现有两只伏特表甲和乙, 分别为 0.5 级 0~300V 和 1.0 级 0~100V, 欲测 100V 左右的电压, 宜选用表。

9. 设 $N=ax+by-cz$, 则下列表达正确的是()

A. $\Delta_N = \sqrt{a^2\Delta_x^2 + b^2\Delta_y^2 + c^2\Delta_z^2}$

B. $\Delta_N = \sqrt{a^2\Delta_x^2 + b^2\Delta_y^2 + c^2\Delta_z^2}$

C. $\frac{\Delta_N}{N} = \frac{1}{N} \sqrt{a^2\Delta_x^2 + b^2\Delta_y^2 + c^2\Delta_z^2}$

D. $\frac{\Delta_N}{N} = \frac{1}{N} \sqrt{a^2\Delta_x^2 + b^2\Delta_y^2 + c^2\Delta_z^2}$

10. 用精密天平称一物体的质量 m , 共称五次, 结果分别为 3.6127 克、3.6122 克、3.6120 克、3.6121 克、3.6125 克。试求这些数据的算术平均值、不确定度和相对不确定度。

11. 用米尺测得正方形某一边长为 $a_1=200.1\text{mm}$, $a_2=200.0\text{mm}$, $a_3=200.4\text{mm}$, $a_4=198.4\text{mm}$, $a_5=197.3\text{mm}$ 求正方形的边长和面积的平均值、不确定度和相对不确定度。

12. 用图解法处理数据, 若实验图线为直线, 则应让 _____ 落在直线上, _____ 分布在直线的两侧。确定直线斜率时, 所选的两点在实验范围内应尽量 _____, 一般 _____ 选用实验点, 而应在直线上选两点。数据中的准确位在图中应是 _____ 格。

13. 坐标轴上标的量值的有效位数应与测量值的有效位数 _____, 且标整数。

实验一 等厚干涉——牛顿环

牛顿环是一种典型的用分振幅方法实现的等厚干涉现象。它是牛顿在 17 世纪研究肥皂泡及其他薄膜的光学现象时，把一个玻璃三棱镜压在一个曲率半径已知的凸透镜时发现的，随后进行了仔细的研究和测量。牛顿发现：用一个曲率半径大的凸透镜和一个平面玻璃相接触，用白光照射时，其接触点周围出现明暗相间的彩色同心圆环；用单色光照射时，则出现明暗相间的单色同心圆环，而且通过测量同心圆的半径就可求出凸透镜和平面玻璃之间对应位置的空气层厚度。但由于牛顿主张“光的微粒说”以至于他对此现象未能作出正确解释。直到十九世纪初，托马斯·杨用光的干涉原理才正确解释了牛顿环现象，并第一个近似地测出了七种色光的波长。牛顿环实验为 19 世纪初确立“光的波动学说”提供了重要依据。牛顿环可用于判断透镜表面的凸凹、检验光学器件的表面质量、测量透镜的曲率半径、光的波长和液体的折射率。

【预习要点】

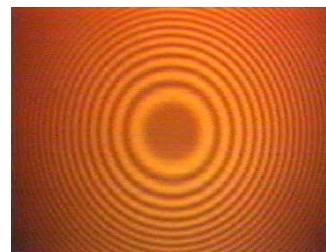
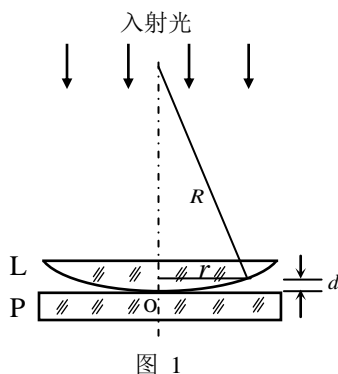
- 1 普通光源获取相干光的方法及半波损失。
- 2 牛顿环的形成机理及其干涉条纹的特点。
- 3 读数显微镜的正确使用。
- 4 逐差法处理数据。

【实验目的】

- 1 观察牛顿环干涉条纹，加深对等厚干涉现象的认识。
- 2 测量平凸玻璃透镜的曲率半径。
- 3 掌握用逐差法处理数据的方法。

【实验原理】

如图 1 所示，牛顿环装置是由一块曲率半径为 R 的平凸玻璃透镜 L 和平面玻璃 P 叠放而成，在两者之间会形成一厚度不同且很薄的空气层。若以波长为 λ 的单色平行光垂直照射到牛顿环装置上时，由空气层上、下两表面反射的光在空气表面层附近形成干涉。牛顿环以接触点 O 为圆心的一系列同心圆处的空气层厚度相同，而厚度相同的空间点对应同一级的干涉条纹，因此从透镜上方观察到的干涉图样是以接触点 O 为圆心的一系列明暗相间的圆环，如图 2 所示。



下面分析干涉条纹半径 r 、光波波长 λ 和平凸透镜曲率半径 R 之间的关系。由于空气的折射率 ($n \approx 1$) 小于玻璃的折射率，因此当一束单色平行光垂直照射牛顿环装置时，在厚度为 d 处，由空气层上、下表面反射的两束光之间的光程差为

$$\Delta = 2d + \frac{\lambda}{2} \quad (1)$$

式中 $\frac{\lambda}{2}$ 为光在平面玻璃的上表面反射时因半波损失而产生的附加光程差。

根据图 1 中的几何关系

$$R^2 = (R - d)^2 + r^2 \quad (2)$$

由于 $R \gg d$ ，所以式(2)可简化为

$$r^2 = 2Rd \quad (3)$$

由光的干涉条件可知

$$\Delta = 2d + \frac{\lambda}{2} = \begin{cases} k\lambda & k = 1, 2, 3, \dots \\ (2k+1)\frac{\lambda}{2} & k = 0, 1, 2, \dots \end{cases} \quad \begin{array}{l} \text{明条纹} \\ \text{暗条纹} \end{array} \quad (4)$$

联合式(3)和(4)可得, 明环和暗环的半径为

$$r_k = \begin{cases} \sqrt{(2k-1)R\frac{\lambda}{2}} & k = 1, 2, 3, \dots \\ \sqrt{kR\lambda} & k = 0, 1, 2, \dots \end{cases} \quad \begin{array}{l} \text{明环} \\ \text{暗环} \end{array} \quad (5)$$

由式(5)可知, 若单色光的波长 λ 已知, 则可通过测量第 k 级暗环(或亮环)的半径 r_k 求出透镜的曲率半径 R 。实验中通常选择测量暗环的半径。但在测量过程中, 由于平凸透镜和平面玻璃之间的接触压力会引起局部形变, 使得干涉环的中心不再是一个暗点而是暗斑, 测量时难以准确确定干涉环的中心, 从而影响半径的准确测量, 因而实验中通常测量彼此相隔一定环数的暗环直径 D 。因此, 由式(5)中的暗环公式可得

$$R = \frac{D_m^2 - D_n^2}{4(m-n)\lambda} \quad (6)$$

式中 m, n 为干涉条纹的暗环序数。式(6)表明, 平凸透镜的曲率半径 R 仅与任意两环的直径的平方差和相应的环数差有关, 而与干涉级次无关。

【实验仪器】

读数显微镜, 牛顿环装置, 低压钠光灯。

【实验内容】

1 调节牛顿环装置

借助室内灯光直接观察牛顿环装置, 并轻轻调节牛顿环装置上的三个螺丝 H (如图 3 所示), 使牛顿环面上的中心部位出现清晰细小的同心圆环。

2 调节读数显微镜并观察干涉图样

① 开启钠光灯 S 的电源使灯管预热。

② 将牛顿环装置放在读数显微镜镜筒下方的载物台上, 并将读数显微镜的反射镜置于背光位置。

③ 待钠光灯正常发光后, 调节钠光灯和读数显微镜的相对位置, 使出光口正对半透半反镜 G (图 4 所示)。微调半透半反镜 G, 使目镜中可观察到明亮的黄光视场 (若使用扩展钠光灯, 则无需透镜 L' 产生平行光)。

④ 调节读数显微镜的目镜, 使目镜中可观察到清晰的十字叉丝的像(有关读数显微镜的使用见.....)。

⑤ 转动物镜调焦手轮, 使读数显微镜的镜筒 M 靠近牛顿环装置的上表面但不接触, 然后自下而上缓慢的移动镜筒, 直至观察到清晰的牛顿环, 并使其与目镜中十字叉丝的像无视差, 即眼睛左右移动时, 十字叉丝与牛顿环间无相对位移。

3 测量暗环直径

① 移动牛顿环装置或调节读数显微镜镜筒的位置, 使牛顿环的暗斑中心与十字叉丝像的交点尽可能对准。转动目镜, 使十字叉丝像中的横刻线与镜筒的移动方向平行。

② 转动测微鼓轮, 观察整个牛顿环干涉图样的范围和清晰度, 确定干涉条纹的测量区间。

③ 选择合适的暗环序数差 ($\Delta_{mn} = m - n$, 如 $\Delta_{mn} = 10$)。转动测微鼓轮, 使十字叉丝线从中央缓慢向左 (或向右) 移动, 直至第 32 暗环, 然后反方向转动测微鼓轮, 使十字叉丝依次对准第 30 到第 16 环, 并记录各环对应的位置读数 x_{30}, \dots, x_{26} 和 x_{20}, \dots, x_{16} 。继续沿原方向转动测微鼓轮, 经过暗斑中心后依次测出暗环另一侧对应的位置读数 x'_{16}, \dots, x'_{20} 和 x'_{26}, \dots, x'_{30} 。

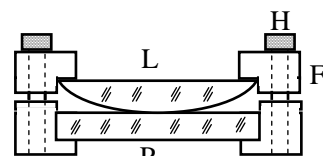


图 3

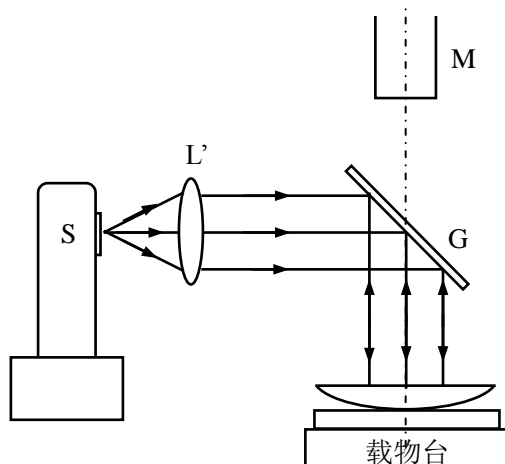


图 4

【数据记录及处理】

① 利用测量的数据计算各暗环的直径 D 和 $D_m^2 - D_n^2$, 如表 1 所示。

② 用逐差法求平凸透镜的曲率半径。

求出 $D_m^2 - D_n^2$ ，根据式 (3-6) 求出平凸透镜的曲率半径 \bar{R} 和不确定度 $\sigma_{\bar{R}}$ 。（钠光的平均波长为 589.3 nm）

【注意事项】

1 牛顿环装置上的螺丝不能拧得过紧，以防镜片变形和压坏镜片。

2 调节读数显微镜焦距时，正确的方法是使物镜镜筒自下往上调节，以免损坏物镜和牛顿环装置。

3 测量过程中不能移动牛顿环装置，而且测微鼓轮只能沿同一方向转动，以免出现空程误差。

【思考题】

1. 从牛顿环装置下方透射上来的光能形成干涉环吗？如果能形成干涉环，则与反射光形成的干涉环有何不同？
2. 实验中为什么要测量牛顿环的直径，而不测量其半径？
3. 在测量过程中，如果牛顿环的暗斑中心与十字叉丝的交点没有对准，此时测得的是牛顿环的弦而不是其直径，这一测量结果对平凸透镜曲率半径测量有无影响，为什么？
4. 若牛顿环装置是两个平凸透镜的组合（两个凸面相接触），则干涉条纹将是怎样的？

表 1 牛顿环数据表

环数	m	30	29	28	27	26
环的位置 (mm)	左 侧					
	右 侧					
环的直径 D_m (mm)						
环数	n	20	19	18	17	16
环的位置 (mm)	左 侧					
	右 侧					
环的直径 D_n (mm)						
$D_m^2 - D_n^2$ (mm ²)						

实验二 伏安法测电阻

用伏安法测电阻，就是用电压表测量加于待测电阻 R_x 两端的电压 V ，同时用电流表测量通过该电阻的电流强度 I ，再根据欧姆定律计算该电阻的阻值。因为电压的单位为“伏”，电流的单位为“安”，所以这种方法称为伏安法。

【预习要点】

1. 分压器与限流器的异同。本实验中的滑线变阻器电阻应该用什么接法。
2. 伏安法测电阻中电流表内接和外接的选择依据，及接入的系统误差。
3. 二极管的结构和伏安特性，及与线性电阻的伏安特性有什么不同。

【实验目的】

1. 掌握滑线变阻器分压器与限流器的使用；
2. 掌握电压表、电流表的使用；
3. 掌握伏安法测电阻的内外接法。

【实验原理】

1. 分压器、限流器的组成及其应用
滑线变阻器的接法有两种，分别可组成分压器和限流器。

(1) 限流器电路及其变压范围

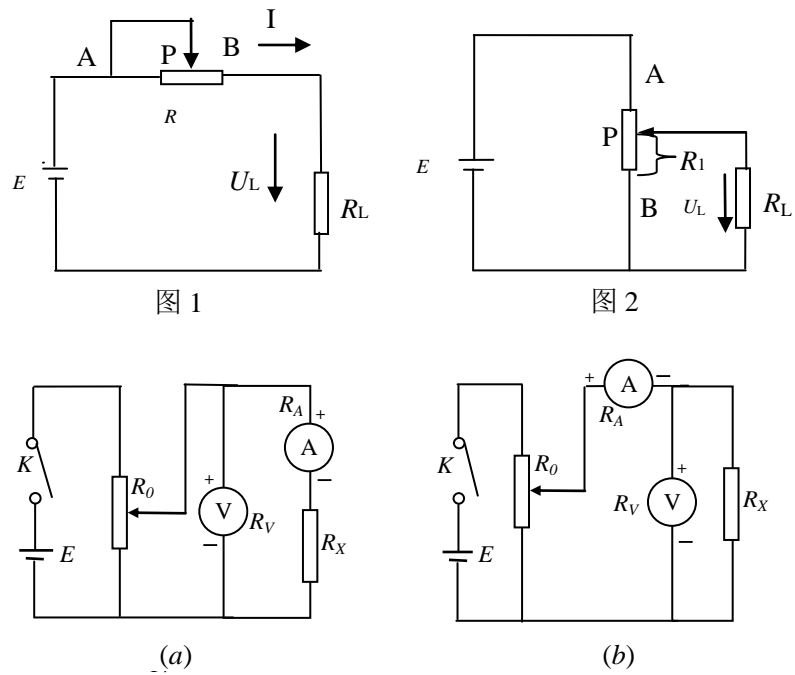


图 3

图 1 所示为限流器电路，从电路中可以看出，若 P 点在 B 端， R_L 所得电压 $U_L=E$ ，随 P 向左滑动，有用电阻 R 逐渐增大，则 R_L 的分压 U_L 逐渐减小，P 在 A 端时达最小值 $U_L=R_LE/(R_L+R)$ ，不难看出， R_L 两端电压变化范围在 $\frac{R_LE}{R+R_L} \sim E$ 之间，它调压的范围较小，且是非线性变化。但通过负载 R_L 的电流的调节范围比较宽。

(2) 分压器电路及其变压范围

图 2 所示为分压器电路，从电路中可以看出，若 P 在 B 端， R_L 所得电压 $U_L=0$ ；P 向上滑动的过程中， U_L 逐渐增大；当 P 在 A 端时， $U_L=E$ 。不难看出： R_L 两端电压的变化范围在 $0-E$ 之间。当 $R_L \gg R$ 时， U_L 随着 P 的移动基本呈现线性变化。

2. 伏安法测电阻

用伏安法测电阻，可采用图 3 所示 (a) 和 (b) 两种电路。但由于电流表的内阻为 R_A ，伏特表的内阻为 R_V ，所以上述两种电路无论哪一种，都存在接入误差（系统误差）。

(1) 电流表内接

如图 3 (a) 所示的电路，电流表测出的 I 是通过待测电阻 R_x 的电流 I_x ，但伏特表测出的 V 就不只是待测电阻 R_x 两端的电压 V_x ，而是 R_x 与电流表两端的电压之和，即 $V=V_x+V_A$ ，那么测得的待测电阻值为 $R_{x测}$ ，即

$$R_{x测} = \frac{V}{I} = \frac{V_x + V_A}{I} = R_x + R_A \quad (1)$$

因此，这种电路测得的电阻值 $R_{x测}$ 要比实际值大。如果电流表的内阻已知，可用下式进行修正

$$R_x = \frac{V - V_A}{I} = R_{x测} - R_A \quad (2)$$

电流表内接给测量带来的接入误差（系统误差）为：

$$\delta = \frac{R_{x测} - R_x}{R_x} \times 100\% = \frac{R_A}{R_x} \times 100\% \quad (3)$$

当 $R_x \gg R_A$ 时，相对误差 R_A / R_x 很小。因电流表的内阻一般都较小，所以，当待测电阻较大时，使用电流表内接较合适。

(2) 电流表外接

如图 3 (b) 所示的电路，伏特表测出的 V 是待测电阻 R_x 两端的电压 V_x ，但电流表测出的 I 是流过 R_x 的电流 I_x 和流过伏特表的电流 I_V 之和，即 $I=I_x+I_V$ 。因此，这种电路测得的电阻值 $R_{x测}$ 要比实际值 R_x 小。若待测电阻的测量值为 $R_{x测}$ ，则有

$$R_{x测} = \frac{V}{I} = \frac{V_x}{I_x + I_V} = \frac{V_x}{I_x \left(1 + \frac{I_V}{I_x} \right)} = \frac{R_x}{1 + \frac{R_x}{R_V}} \quad (4)$$

如果电压表的内阻是已知的，则可以求得修正后的待测电阻值为：

$$R_x = \frac{R_{x测} R_V}{R_V - R_{x测}} \quad (5)$$

则由于电流表外接带来的接入误差（系统误差）：

$$\delta = \frac{R_{x测} - R_x}{R_x} \times 100\% = \frac{-R_x}{R_x + R_V} \times 100\% = \frac{-1}{1 + \frac{R_V}{R_x}} \times 100\% \quad (6)$$

当 $R_V \gg R_x$ 时，系统误差很小。一般伏特表的内阻都较大，所以，当待测电阻小时，使用电流表外接较合适。

由以上分析可知用伏安法测电阻时，由于存在着接入误差（系统误差），所以测得的电阻值不是偏大就是偏小，两个相比较，当 $R_A < R_x$ 时，采用电流表内接电路有利；当 $R_V \gg R_x$ 时，采用电流表外接电路有利。

一般情况，都应根据式（2）和式（5）进行修正，求得待测电阻 R_x 。

3. 线性电阻和非线性电阻的伏安特性曲线

若一个电阻元件两端的电压与通过电流成正比，则以电压为横轴，以电流为纵轴所得到的图像是一条通过坐标原点的直线，如图 4（a）所示，这种电阻称为线性电阻。

若电阻元件电压与电流不成比例，则由实验数据所描绘的 $I \sim V$ 图线为非直线，这种电阻称为非线性电阻。晶体二极管的特性就属于这种非线性情况，如图 4（b）所示。

晶体二极管，它的结构和符号如图 5 所示。把电压加在二极管的两端，如它的正极接高电位点，负极接低电位点，即加正向电压，则电路中有较大的电流（毫安级）且电流随电压的增加而增加，但不成正比，若二极管的正极接低电位点，负极接高电位点，即加反向电压，则电流非常微弱（微安级），电流与电压也不成正比，当反向电压高到一定数值时，电流急剧增加，以致击穿，在使用二极管时，应了解允许通过它的最大正向电流和允许加于它两端的最高反向电压。

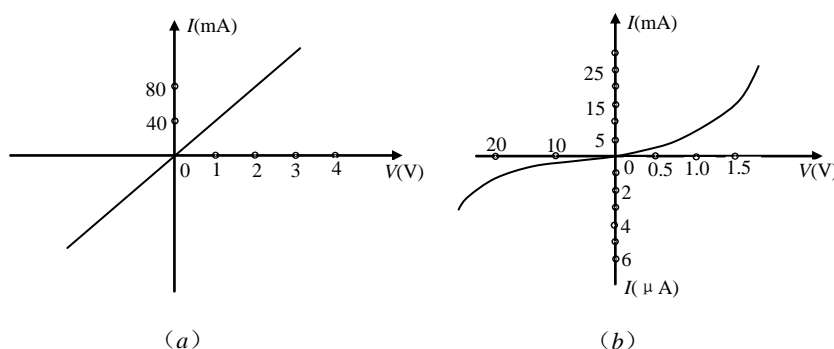


图 4



图 5

【实验仪器】

直流稳压电源，滑线变阻器，直流电压表、直流电流表、待测电阻（电阻箱）、二极管等。

【实验内容及数据记录】

1. 伏安法测电阻

用电阻箱作待测电阻，分别取 50Ω 和 $1k\Omega$ ，根据被测电阻的大小，选择内或外接法，按图 6 或图 7 所示接好电路。

（1）用作图法求 50Ω 的待测电阻值：

- ① 滑线变阻器，记录所用电表量程和接法（内接还是外接），选电表量程的原则：当数值最大时，指针能超过 $2/3$ 量程值。

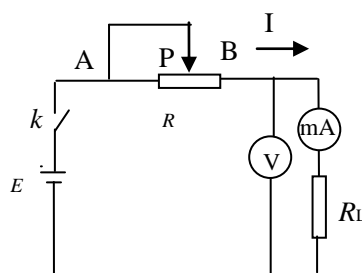


图 6

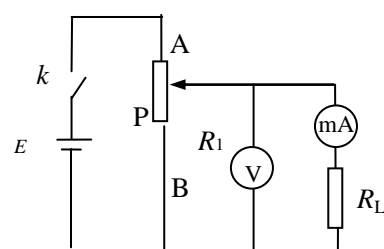


图 7

- ② 调节滑线变阻器 R ，分别改变电压表的读数从 $5 \sim 0$ 伏，测量相应的电流表的读数，记录测量数据。要求学会直接从板面读出测量值，注意：**读到估读位**。表格自己设计。
- ③ 以电压为横坐标，电流为纵坐标，用作图纸作伏安特性曲线。
从图上取 2 点，求斜率，并由斜率求被测电阻值。
- ④ 记录电表内阻，按（5）算 R_x 的修正值，由（6）式算系统误差。

（2）测电阻箱 $1k\Omega$ 的阻值：

- ① 根据被测电阻的大小，按图 6 或图 7 所示电路，选择内或外接法
- ② 调节滑线变阻器 R ，选择合适的电表量程，使电压表和电流表的读数均尽量接近满偏。记录电压表和电流表的数据（注意读到估读位）。

- ③ 记录所用电表量程和接法（内接还是外接），及电表的等级；
- ④ 用欧姆定律求被测电阻值 R_x ，估算电压、电流的仪器不确定度，并由不确定度传递公式估算被测电阻值的不确定度。
- ⑤ 记录电表内阻，按（2）算 R_x 的修正值，由（3）式算系统误差。

3. 测量二极管的伏安特性

（1）**用外接法测正向特性：**将图 3（b）中的待测电阻换成二极管(正向接入)，接好电路，把电键 K 合上。实验自零伏开始，调节滑线变阻器滑动触头，电压每增加 $0.1V$ 读取一次电流值，共读取 6—10 组数据，并填入事先准备好的数据表格内。注意在曲线拐弯处，电压间隔应取小一些。

U (V)	0.00	0.10	0.20	...	...	...	...	...	...
I (mA)	...	...	...	...	...	...	...	...	...

（2）画伏安特性曲线：以电压为横坐标，电流为纵坐标，根据实验所得的数据作出被测二极管的伏安特性曲线（正向）。

【思考题】

1. 什么是分压器和限流器？两者有何异同？
2. 何时使用电流表的内接法？何时使用电流表的外接法？
3. 当待测电阻的阻值和电流表、电压表的内阻未知时，可用试触法来判断：将电压表的一端分别试触电流表的两端，使电流表分别为内接和外接。试分析这一判断原理？
4. 二极管的正向电阻是否定值？与什么有关系？

实验三 横波在弦线上传播的研究

用驻波原理测量横波波长的方法，不仅在力学中有重要应用，在声学、无线电学和光学学科的实验中都有许多应用，是力学实验中的一个重要实验。

【预习要点】

- 1、什么是驻波？形成驻波要满足的条件是什么？
- 2、什么是波腹、波节？相邻两波节（或波腹）的距离与波长的关系是什么？
- 3、验证横波的波长与弦线中的张力，及波长与振动频率的关系时，哪些量是不变的？

【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。

【实验原理】

当在同一直线上沿相反方向传播的两个振幅相同的相干波叠加时，在一定条件下可形成驻波。如图 1 所示。

弦线上出现的静止点，称为波节，振幅最大的点称为波腹；相邻两波节（或波腹）的距离为半个波长。在两端固定的弦线上形成驻波，要满足的条件是：

$$\lambda = 2L/n. \quad (1)$$

式中 L 为弦长， n 为 L 上出现的驻波个数（半波数，如图 1 中 $n=4$ ）。由上式可测出波长 λ 。

在弦线上传播的横波满足下列规律：

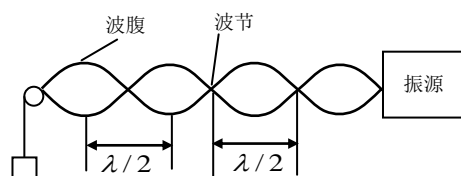


图 1 驻波现象

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

其中 f 为频率， μ 为弦的线密度（单位长度的质量）， T 为弦的张力。

上式两边取对数：

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

因此改变 T 或 f ，作 $\lg \lambda - \lg f$ 或 $\lg \lambda - \lg T$ 曲线，可验证弦线上横波的传播规律。即固定频率 f 和线密度 μ ，改变张力 T ，并测出各相应波长 λ ，作 $\lg \lambda - \lg T$ 曲线，若得一直线，且计算其斜率值为 $1/2$ ，则证明 $\lambda \propto T^{1/2}$ 的关系成立。同理，固定线密度 μ 和张力 T ，改变振动频率 f ，测出相应波长 λ ，作 $\lg \lambda - \lg f$ ，如得一斜率为 -1 的直线就验证了 $\lambda \propto f^{-1}$ 。

【实验仪器】

实验装置如图 2 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，弦线一端通过定滑轮⑦悬挂一砝码盘；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上，其产生的摩擦力很小，可以忽略不计。

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。由于簧片与弦线固定点在振动不易测准，实验时一般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，观察可动刀口支架与可动滑轮支架之间形成的驻波。

附：仪器使用方法：实验时，接通电源，输出端(五芯航空线)与主机上的航空座相连接。打开数显振动源①面板上的电源开关，面板上数码管显示振动源振动频率 $\times \times \times . \times \times \text{Hz}$ 。根据需要按频率调节中 ▲（增加频率）或 ▼（减小频率）键，改变振动源的振动频率，调节面板上幅度调节旋钮，使振动源有振动输出；当不需要振动源振动时，可按面板上复位键，数码管显示清零。

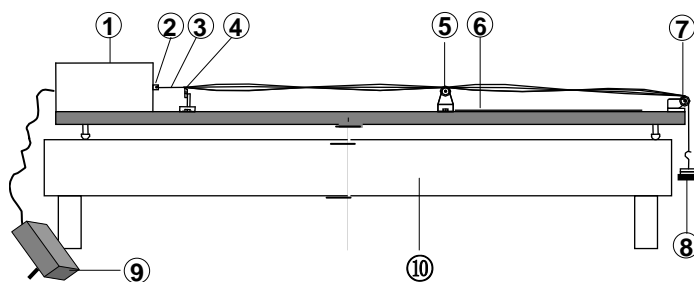


图 2 仪器结构图

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 可动滑轮架; 6 标尺; 7 固定滑轮; 8 砝码与砝码盘; 9 变压器; 10 实验桌

【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，再测量驻波波长。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、实验时调节振动频率，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。可逆时针旋转面板上的输出信号幅度旋钮，或改变波源频率，避开共振频率，便于调节出振幅大且稳定的驻波
- 3、张力包括砝码与砝码盘的质量，砝码盘的质量用天平称量（见附录）。

【实验内容】

1、验证横波的波长与弦线中的张力的关系

固定波源振动的频率（可取 80-90Hz），改变砝码盘上所挂砝码的个数，以改变弦上的张力。每改变一次张力，均要左右移动可动滑轮支架的位置，使两支架间的弦线出现振幅较大而稳定的驻波。调好后，记下驻波个数 n ，从标尺上读出 L 值，即可根据公式（1）算出波长 λ 。作 $\lg \lambda - \lg T$ 图，求其斜率并与理论值比较，验证（3）式。

2、验证横波的波长与波源振动频率的关系

在砝码盘上放上一定质量的砝码（可取 2-3 个），以固定弦线上所受的张力，改变波源振动的频率，调节滑轮支架的位置，使两支架间的弦线出现振幅较大而稳定的驻波，记下 n 和 L 。作 $\lg \lambda - \lg f$ 图，求其斜率并与理论值比较，验证（3）式。

【思考题】

- 1、测量时，应如何操作才能减少误差？
- 2、为何波源的簧片振动频率尽可能避开振动源的机械共振频率？
- 3、如何操作才能使 $\lg \lambda - \lg T$ 直线图上的数据点分布比较均匀？
- 4、为何要将（2）式转变成（3）式？是否一定要将（2）式取对数？

实验四 用电流场模拟静电场

在物理实验中，往往会遇到一些难以直接测量的物理量，通常的办法是用容易测量，便于观察的量代替它，并找出它们之间的对应关系并进行测量，这种实验方法叫模拟法。它在工程设计中有着广泛的应用。

【预习要点】

1. 本实验对静电场的测绘采用的是什么方法？为什么要用此方法？
2. 用恒定电流场模拟静电场的理论依据是什么？
3. 实验中如何做测量点以及如何绘制电场分布图？

【实验目的】

1. 学习用模拟方法来测绘具有相同数学形式的物理场。
2. 加深对静电场概念的理解。

【实验仪器】

GVZ-3 型导电微晶静电场描绘仪（包括导电微晶，双层固定支架，同步探针等）

【实验原理】

本实验用稳恒电流场模拟长同轴圆柱形导体的静电场。

稳恒电流场与静电场是两种不同性质的场，但是它们两者在一定条件下具有相似的空间分布，即两种遵守规律在形式上相似，都可以引入电势 U ，电场强度 E ，都遵守高斯定理。

如图 1(a) 所示，在真空中有一半径为 r_a 的长圆柱体 A 和一内半径为 r_b 的长圆筒形导体 B，它们同轴放置，分别带等量异号电荷。由高斯定理知，在垂直于轴线的任一截面 S 内，都有均匀分布的辐射状电场线，这是一个与坐标 Z 无关的二维场。在二维场中，电场强度 E 平行于 XY 平面，其等势面为一簇同轴圆柱面。因此只要研究 S 面上的电场分布即可。

1. 同轴电缆及其静电场分布

由静电场中的高斯定理可知，距轴线的距离为 r 处（见图 1 (b)）的各点电场强度为

$$E = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0 r}$$

式中 λ 为柱面单位长度的电荷量， r 处的电势为

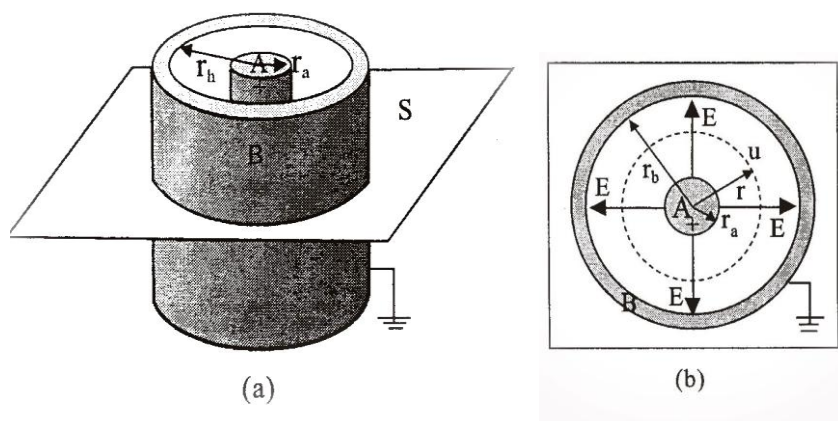


图 1 同轴电缆及其静电场分布

$$u_r = U_a - \int_{r_a}^r \vec{E} \cdot d\vec{r} = U_a - \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r}{r_a} \quad (1)$$

设 $r=r_b$ 时, $U_b=0$, 由上式得
$$\frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} = \frac{U_a}{\ln \frac{r_b}{r_a}}$$

代入 (1) 式, 得
$$u_r = U_a \frac{\ln \frac{r_b}{r}}{\ln \frac{r_b}{r_a}} \quad (2)$$

上式变形可写为
$$\ln r = \ln r_b - \frac{u_r}{U_a} \ln \frac{r_b}{r_a} \quad (3)$$

即 $\ln r$ 与 u_r 成线性关系。

那么
$$E_r = -\frac{du_r}{dr} = \frac{U_a}{\ln \frac{r_b}{r_a}} \cdot \frac{1}{r} \quad (4)$$

即 E_r 与 r 成反比。

2. 同轴圆柱面电极间的电流分布

若上述圆柱形导体 A 与圆筒形导体 B 之间充满了电导率为 σ 的不良导体 (绝缘体), A、B 与电源

电流正负极相连接 (见图 2), A、B 间将形成径向电流 (由 A 流向 B), AB 间建立稳恒电

流场 E_r , 可以证明不良导体中的电场强度 E_r 与原真空中的静电场 E_r 的分布是相等的。

取厚度为 t 的圆轴形同轴不良导体片为研究对象, 设材料电阻率为 $\rho (\rho = 1/\sigma)$, 则

任意半径 r 到 $r+dr$ 的圆周间的电阻是

$$dR = \rho \cdot \frac{dr}{s} = \rho \cdot \frac{dr}{2\pi r t} = \frac{\rho}{2\pi t} \cdot \frac{dr}{r}$$

则半径为 r 到 r_b 之间的圆柱片的电阻为
$$R_r = \frac{\rho}{2\pi t} \int_r^{r_b} \frac{dr}{r} = \frac{\rho}{2\pi t} \ln \frac{r_b}{r}$$

总电阻为 (半径 r_a 到 r_b 之间圆柱片的电阻)
$$R_{ab} = \frac{\rho}{2\pi t} \ln \frac{r_b}{r_a}$$

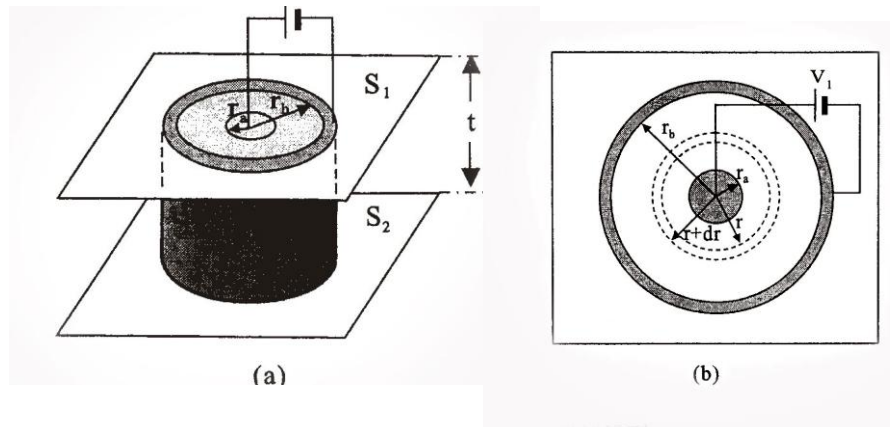


图 2 同轴电缆的模拟模型

设 $U_b=0$, 则两圆柱面间所加电压为 U_a , 径向电流为

$$I = \frac{U_a}{R_{ab}} = \frac{2\pi U_a}{\rho \ln \frac{r_b}{r_a}} \quad (5)$$

距轴线 r 处的电势为

$$u'_r = IR_r = U_a \frac{\ln \frac{r_b}{r}}{\ln \frac{r_b}{r_a}} \quad (6)$$

则

$$E'_r = -\frac{du'_r}{dr} = \frac{U_a}{\ln \frac{r_b}{r_a}} \cdot \frac{1}{r} \quad (7)$$

即 E'_r 与 r 成反比。以上分析可见, u_r 与 u'_r , E_r 与 E'_r 的分布函数完全相同。

为什么这两种场的分布相同呢? 可以从电荷产生场的观点加以分析。在导电质中没有电流通过的, 其中任一体积元 (宏观小, 微观大, 其内仍包含大量原子) 内正负电荷数量相等, 没有净电荷, 呈电中性。当有电流通过时, 单位时间内流入和流出该体积元内的正或负电荷。这就是说, 真空中的静电场和有稳恒电流通过时导电质中的场都是由电极上的电荷产生的。不同的是, 真空中电极上的电荷是不动的, 在有电流通过的导电质中, 电极上的电荷一边流失, 一边由电源补充, 在动态平衡下保持电荷的数量不变。所以这两种情况下电场分布是相同的。

3、模拟条件

模拟方法的使用有一定的条件和范围, 不能随意推广, 否则将会得到荒谬的结论。用稳恒电流场模拟静电场的条件可以归纳为下例三点:

- (1) 稳恒电流场中的电极形状应与被模拟的静电场中的带电体几何形状相同;
- (2) 稳恒电流场中的导电介质是不良导体且电导率分布均匀, 并满足 $\sigma_{\text{电源}} \gg \sigma_{\text{导电质}}$ 才能保证电流场中的电极 (良导体) 的表面也近似是一个等势面;
- (3) 模拟所用电极系统与模拟电极系统的边界条件相同。

【实验内容与方法】

1、测绘方法

考虑到 E 是矢量, 而电势 U 是标量, 测定电势比测定场强容易实现, 所以可先测绘等势线, 然后根据电场线与等势线正交的原理, 画出电场线。

2、实验仪器介绍:

支架采用双层式结构, 上层放记录纸, 下层放导电微晶。电极已直接制作在导电微晶上, 并将电极引线接到外接线柱上, 电极间制作有导电率远小于电极且各项均匀的导电介质。

在导电微晶和记录纸上方各有一探针, 通过金属探针臂把两探针固定在同一手柄座上, 两探针始终保持同一铅垂线上。移动手柄座时, 可保证两探针的运动轨迹是一样的。

测量时, 由导电微晶上方的探针找到待测点后, 按一下记录纸上方的探针, 在记录纸上留下一个对应的标记。移动同步探针在导电微晶上找出若干电势相同的点, 由此即可描绘出等势线。

3、实验内容

- (1) 利用图 2 (b) 所示的模拟模型，将导电微晶的内(A 极)外(B 极)两电极分别与直流稳压电源的正负极相连接，电压表正极与同步探针正极相连接（负极不需连接，因仪器内部负极是相通的）。

表 1

电势	直径	1	2	3	4	d 平均值	半径 r
	d_1 (mm)						
	d_2 (mm)						
	d_3 (mm)						
	d_4 (mm)						
	d_5 (mm)						

- (2) 接通直流电源，调节直流电源为 10V，宜可调中心 A 极处为 10V。
 (3) 移动同步探针测绘同轴电缆的等势线簇。要求相邻两等势线间的电势差为 1 伏，测 5 条以上等势线（电势小的易测），点间的距离适中（约 1cm），以能绘出圆为宜。

表 2

次数	1	2	3	4	5
$u_{\text{实}}$ (V)					
$\bar{r}_{\text{实}}$ (mm)					
$\ln \bar{r}_{\text{实}}$					
$u_{\text{计}}$ (V)					
$|u_{\text{实}} - u_{\text{计}}|$ (V)					
$\frac{|u_{\text{实}} - u_{\text{计}}|}{u_{\text{实}}} \times 100\%$					

- (4) 直接由测量点用平滑的曲线描出等势线的同心圆簇，并由测量点确定同心圆簇的圆心，并画出半径为 r_a 和 r_b 的电极位置。
 (5) 根据电场线与等势线正交原理，再画出电场线。注意：电场线是从半径 r_a 画到 r_b ，因导体（A、B 极）内部，静电场的场强为零。
 (6) 用米尺测出图中各等势线的直径（注意估读），每条等势线测 3 个直径以上，用平均值求出相应的半径 r 。填入表 1
 (7) 由（2）式求出各 r 对应的电势 u_r （即 $u_{\text{计}}$ ）和 $\ln r$ （注意：小数后的位数与真数的位数相同）， $u_{\text{实}}$ 是实验值，是仪器上显示的值（注意有效位数）。填入表 2。
 (8) 在坐标纸上作出电势 $u_{\text{实}}$ （为横坐标）和 $\ln \bar{r}$ 的关系曲线，由图验证（3）是否成立，即：曲线是否为一直线。

【思考题】

- 根据测绘所得等势线和电场线的分布，分析哪些地方场强较强，哪些地方场强较弱？
- 如何确定圆形等势线簇的圆心？

实验五 用落球法测液体的粘滞系数

液体粘滞系数又称液体粘度，是液体的重要性质之一，它反应液体流动的特征。液体粘滞系数与液体的性质、温度和流速有关，在工业生产和科学研究中（如流体的传输、液压传动、机器润滑、船舶制造、化学原料、医学、材料学及国防建设等方面）都需要测定粘滞系数。测定液体粘滞系数的方法有多种，落球法（也称斯托克斯法）是最基本的一种。它是利用液体对固体的摩擦阻力来确定粘滞系数的，可用来测量粘滞系数较大的液体。

【预习要点】

- 斯托克斯定理成立的条件是什么？本实验算粘滞系数是用哪个公式？为什么？
- 搞清公式中每个物理量的含义。
- 预习读数显微镜和密度计的使用。

4、什么是空程误差？实验中如何避免？

【实验目的】

学会用落球法测液体的粘滞系数

【实验原理】

由于液体具有粘滞性，固体在液体内运动时，附着在固体表面的一层液体和相邻层液体间有内摩擦阻力作用，这就是粘滞阻力的作用。对于半径 r 的球形物体，在无限宽广的液体中以速度 v 运动，并无涡流产生时，小球所受到的粘滞阻力 F 为

$$F = 6\pi\eta rv \quad (1)$$

公式 (1) 称为斯托克斯公式。其中 η 为液体的粘滞系数，它与液体性质和温度有关。

如果让质量为 m 半径为 r 的小球在无限宽广的液体中竖直下落，它将受到三个力的作用，即重力 mg 、液体浮力 $f = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho g$ 、粘滞阻力 $F = 6\pi\eta rv$ ，这三个力作用

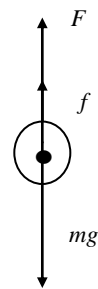


图 1

在同一直线上，方向如图 1 所示。

小球刚开始下落时，速度 v 很小，阻力不大，重力大于其余两个力之合，因而小球向下作加速运动；随着速度的增加，粘滞阻力也相应的增大，当小球的速度达到一定大小时，浮力与粘滞阻力之和等于重力，此时，小球的加速度等于零即小球开始匀速下落，这个匀速运动的速度称为收尾速度。当小球达到收尾速度 v_0 时有

$$mg - \frac{4}{3}\pi r^3 \rho g - 6\pi\eta rv_0 = 0 \quad (2)$$

整理可得

$$\eta = \frac{(m - \frac{4}{3}\pi r^3 \rho)g}{6\pi v_0} \quad (3)$$

或

$$\eta = \frac{(\rho_0 - \rho)gd^2}{18v_0} \quad (4)$$

其中 ρ_0 、 ρ 分别为小球及液体密度， d 为小球直径。

当小球达到收尾速度后，通过路程 L 所用时间为 t ，则 $v_0 = L/t$ ，将此公式代入公式 (3)、(4) 又得

$$\eta = \frac{(m - \frac{4}{3}\pi r^3 \rho)gt}{6\pi L} \quad (5)$$

或

$$\eta = \frac{(\rho_0 - \rho)gd^2t}{18L} \quad (6)$$

上式成立的条件是小球在无限宽广的均匀液体中下落，但实验中小球是在内半径为 R 的玻璃圆筒中的液体里下落，筒的直径和液体深度都是有限的，故实验时作用在小球上的粘滞阻力与由斯托克斯公式给出的存在差异。当圆筒直径比小球直径大很多、液体高度远远大于小球直径时，这种差异是微小的。为此只要对斯托克斯公式加以修正，就可描述小球实际上所受的粘滞阻力。考虑到这个修正，式 (5) 及式 (6) 应变成

$$\eta = \frac{(m - \frac{4}{3}\pi r^3 \rho)gt}{6\pi L \left(1 + 2.4 \frac{r}{R}\right)} \quad (7)$$

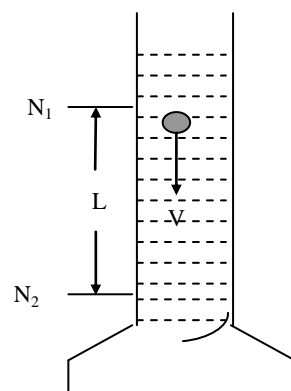


图 2

$$\text{和} \quad \eta = \frac{(\rho_0 - \rho)gd^2t}{18L(1 + 2.4\frac{d}{D})} \quad (8)$$

式中 R 、 D 分别为玻璃圆筒的内半径、内径。

如果式右边各量的单位是： g 用 m/s^2 ； d 和 D 用 m ； ρ_0 和 ρ 用 kg/m^3 ；

L 用 m ； t 用 s ；则 η 的单位为 $\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。

本实验中所用铁质小球的密度为 $\rho_0 = 7874\text{kg/m}^3$ ，（广州）重力加速度 $g = 9.788\text{m/s}^2$ 。

【实验仪器】

读数显微镜，秒表，游标卡尺，温度计，液体密度计，米尺，镊子，落球，玻璃圆筒，蓖麻油等。

【实验内容与步骤】

1. 调整盛有蓖麻油的玻璃圆筒底座，使玻璃圆筒的中心轴铅直。
2. 用读数显微镜（附录）测出小球的直径 d ，测 3 次取其平均值。共测 6 个小球，记录每个小球的测量结果，编号待用。
3. 在盛有蓖麻油的玻璃圆筒上选定小球作匀速下落的一段距离。将上、下标志线 N_1 、 N_2 分别置于距液面和筒底均为 10cm 左右。并通过测试判断小球下落到筒上标记线 N_1 时已达到匀速，若不是则应将线 N_1 适当下移。测出 N_1 、 N_2 之间的距离 L 。
4. 用游标卡尺（附录）测量圆筒内径 D ，测三次取平均。
5. 用镊子夹起小球，使其从圆筒液面中心开始自由下落，用秒表分别测出各小球匀速经过路程 L 所用时间 t_1 、 t_2 、... t_6 。
6. 用密度计（附录）测量蓖麻油的密度 ρ 和实验前后蓖麻油的温度。

【数据处理】

1. 将所测数据填入自拟的表格内；
2. 根据每个小球的数据，利用（8）式分别计算蓖麻油的粘度 η_1 、 η_2 、... η_6 ，求出蓖麻油粘度的平均值 $\bar{\eta}$ 及其标准误差 $\sigma_{\bar{\eta}}$ ，并与公认值比较计算百分误差。（注：小球密度 $\rho = 7.90 \times 10^3 \text{Kg/m}^3$ ）
3. 将 η 的结果表示为标准式。

【思考题】

1. 标志线 N_1 可否与液面对齐？ N_2 是否可靠近筒底？为什么？
2. 如何判断小球已进入匀速运动阶段？
3. 小球是否可沿内壁下落？为什么？
4. 斯托克斯公式的应用条件是什么？本实验是怎样去满足这些条件的？又如何进行修正的？

附表：

蓖麻油的粘滞系数随

温度变化

注：1 P(Poise 泊)=0.1 Pa·s

温度/°C	粘度 η/P	温度/°C	粘度 η/P
0.00	53.00	25.00	6.21
10.00	21.18	30.00	4.51
15.00	15.14	35.00	3.12
20.00	9.50	40.00	2.31

实验六 示波器的使用

示波器是利用示波管内电子束在电场中的偏转来反映电压的动态过程，显示电信号波形的一种观测仪器。它不仅能定性地观察电路的动态变化，还可以定量地测量电信号的电压、电流、周期和相位差等。随着微电子技术与计算机技术在示波器中的应用，示波器具有了更加强大的功能如记录、存储和信号处理等。相应地，高性能、多用途的新型示波器不断出现，如慢扫描示波器、各种频率范围的示波器、取样示波器、记忆示波器、数字示波器等。示波器已成为科学研究、实验教学、电工电子和仪器仪表等研究领域和行业中最常用的仪器。

【预习要点】

- 1 示波器的主要结构和显示波形的基本原理。
- 2 示波器的同步。
- 3 振动的合成及李萨如图。

【实验目的】

- 1 了解示波器的主要结构和显示波形的基本原理。
- 2 学会使用示波器观察波形以及测量电压、周期和频率。

【实验仪器】

GOS-620 型双踪示波器，SP1641B 型函数信号发生器。

【实验原理】

1 示波器的基本结构

示波器的型号很多，但其基本结构类似。示波器主要是由示波管、X 轴与 Y 轴衰减器和放大器、锯齿波发生器、整步电路和电源等几部分组成。其结构框图如图 1 所示，虚线框内为示波管。

(1) 示波管

示波管由电子枪、偏转板、荧光屏（显示屏）组成，全部密封在高真空的玻璃外壳内。

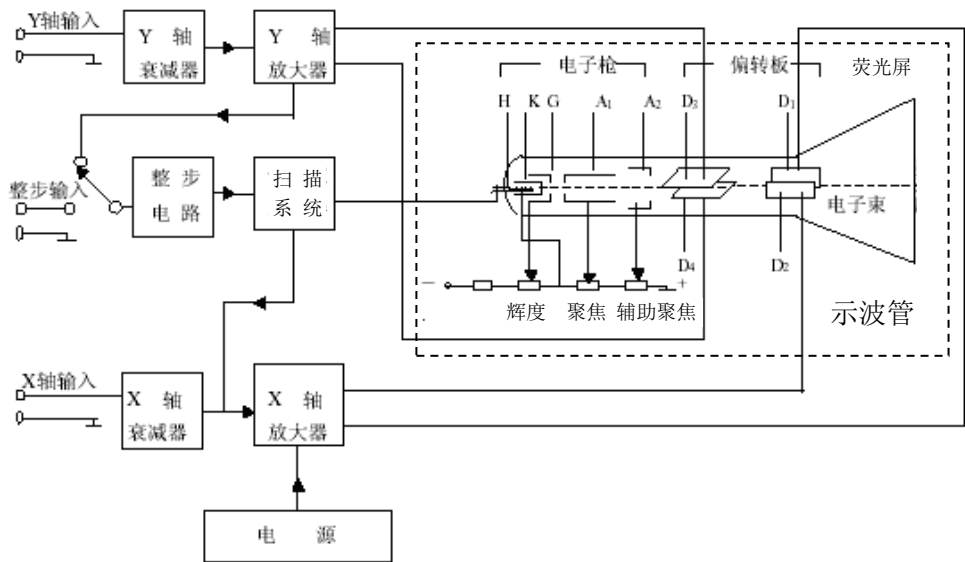


图 1 示波器的结构方框图

电子枪：电子枪由灯丝 H、阴极 K、控制栅极 G、第一阳极 A₁、第二阳极 A₂ 组成。灯丝通电后加热阴极。阴极是一个表面涂有氧化物的金属筒，被加热后发射电子。控制栅极是一个顶端有小孔的圆筒，套在阴极外面，其电位比阴极的低。调节栅极电压可控制从小孔出射的电子束的电子数量，从而改变荧光屏上光斑的亮度，即“辉度”调节。阳极电位比阴极电位高很多，电子被它们之间的电场加速向荧光屏高速运

动。由于同性电荷相互排斥，电子束逐渐散开。当控制栅极和阳极之间的电位调节合适时，电子枪内的电场将电子束聚焦，并使焦点正好落在荧光屏上，从而在荧光屏上形成清晰的光斑，所以阳极也称作聚焦阳极。

偏转系统：偏转系统由两对相互垂直的偏转板组成，分别控制电子束在水平方向和垂直方向的偏转。水平(X 轴)偏转板由 D_1 和 D_2 组成，垂直(Y 轴)偏转板由 D_3 和 D_4 组成。偏转板加上适当电压后形成电场，这一电场将使电子束的运动方向发生偏转，从而使电子束在荧光屏上的光斑位置发生改变。电子束偏转的距离与偏转板两极板间的所加电压成正比，因此可以将电压的测量转化为屏上光点偏移距离的测量，这正是示波器测量电压的原理。

荧光屏：荧光屏的作用是将电子束轰击点的轨迹显示出来。在荧光屏的内壁涂有荧光物质，加速聚焦后高速电子打在荧光物质上时就会发出荧光。当电子停止作用后，荧光物质的发光需要持续一段时间才会停止，这一效应称为余辉效应。

(2) X 轴与 Y 轴衰减器和放大器

示波管本身相当于一个多量程电压表，这一作用是靠信号放大器和衰减器实现的。当输入信号电压过小时，荧光屏上的光点偏移很小而无法观测，因而要对信号电压放大后再加到偏转板上，为此在示波器中设置了 X 轴和 Y 轴的放大器。衰减器的作用是使过大的输入信号电压变小以适应放大器的要求。X 轴与 Y 轴衰减器和放大器配合使用，以满足对各种信号观测的要求，即是示波器面板上的灵敏度调节旋钮。

(3) 扫描系统

扫描系统也称时基电路，用来产生一个随时间作线性变化的扫描电压，这种扫描电压随时间变化的关系如同锯齿，故称锯齿波电压，这个电压经 X 轴放大器放大后加到示波管的水平偏转板上，使电子束产生水平扫描，锯齿波频率的调节可由示波器面板上的扫描时间选择旋钮控制。这样，屏上的水平坐标变成时间坐标，Y 轴输入的被测信号波形就可以在时间轴上展开。扫描系统是示波器显示被测电压波形必需的重要组成部分。

2 示波器显示波形的基本原理

示波器能使随时间变化的电压波形显示在荧光屏上，是靠两对偏转板产生的电场对电子束的控制作用

来实现的。如果只在垂直的偏转板上加一交变的正弦电压，则电子束的亮点将随电压的变化在垂直方向来回运动，如果电压频率较高，则看到的是一条垂直的亮线 cd，如图 2 (b) 所示。要能显示波形，必须同时在水平偏转板上加一扫描电压，使光点沿水平方向拉开。这种扫描电压的特点是电压随时间成线性关系增加到最大值，最后突然回到最小，此后再重复地变化。这种扫描电压即前面所说的“锯齿波电压”，如图 2 (a) 所示。只有锯齿波电压加在水平偏转板上时，如果频率足够高，则荧

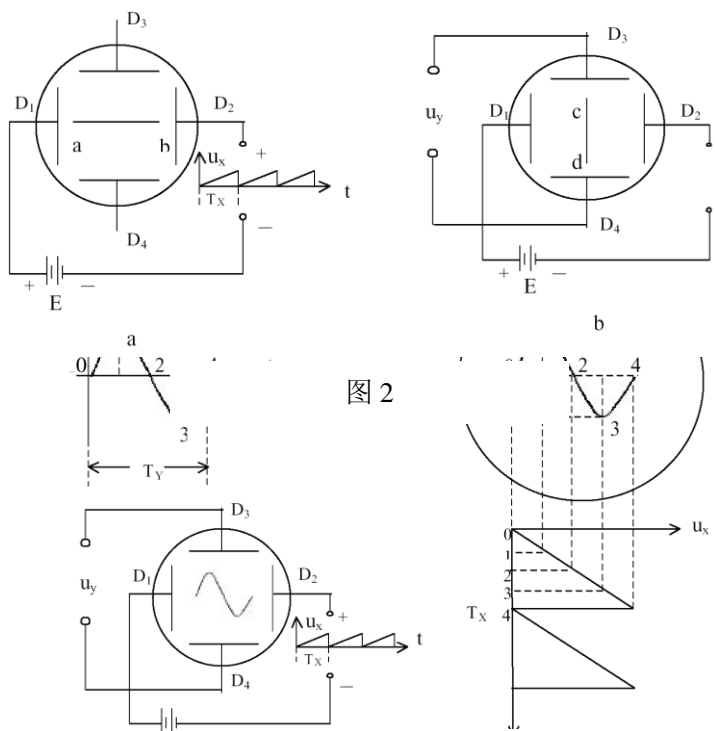


图 3 显示波形的原理

光屏上只显示一条水平的亮 ab 线.

如果在垂直偏转板上加正弦电压，同时在水平偏转板上加锯齿波电压，此时电子受到垂直和水平两个方向力的共同作用，电子的运动就是两个相互垂直运动的合成。当锯齿波电压的变化周期比正弦电压的周期稍大时，在荧光屏上就能显示出完整周期的所加正弦电压的波形图，如图 3 所示。

3 同步 (整步)

如果扫描电压的周期和正弦波的周期稍不同时, 则荧光屏上显示的波形是不稳定的. 设扫描电压的周期 T_x 比正弦波电压的周期 T_y 稍小, 如图 4 所示. 在第一扫描周期内, 屏上显示正弦信号 0-4 点之间的曲

线段；在第二周期内，显示 4-8 点之间的曲线段，起点在 4 处；第三周期内，显示 8-11 点之间的曲线段，起点在 8 处。这样，屏上显示的波形每次都不重叠，波形好象在向右移动。同理，如果 T_x 比 T_y 稍大，则波形好象在向左移动。其原因是扫描电压的周期与正弦波的周期不相等或不成整数倍，以致每次扫描开始时波形曲线上的起点均不一样，造成了每次扫描路径的不重合。为了使荧光屏上的图形稳定，必须满

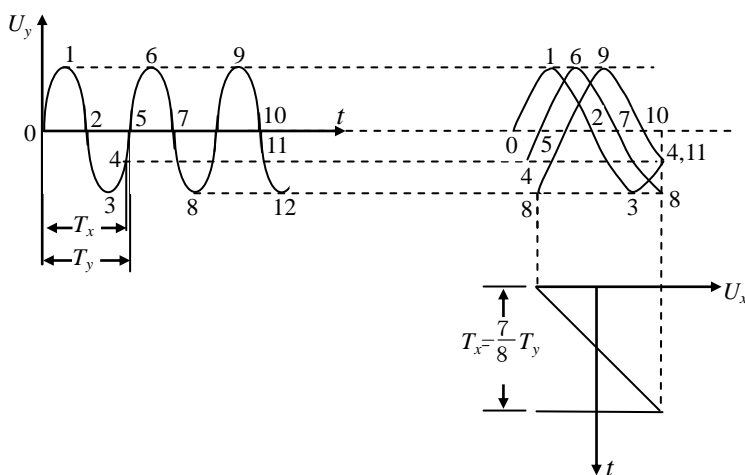


图 4 同步

足 $T_x/T_y=f_y/f_x=n$ ($n=1, 2, 3, \dots$), n 是屏上显示完整波形的个数。即当待测信号的频率 f_y 与扫描电压的频率 f_x 相等或是其整数倍时, 才可以使被测信号的起点与扫描信号的起点保持“同步”, 这一功能由图 1 中的“整步电路”完成。

【实验内容】

1 示波器的调节

打开电源开关，触发模式选择开关（TRIGGER MODE）设定在“Auto”时，经过预热后荧光屏上出现扫描亮线。

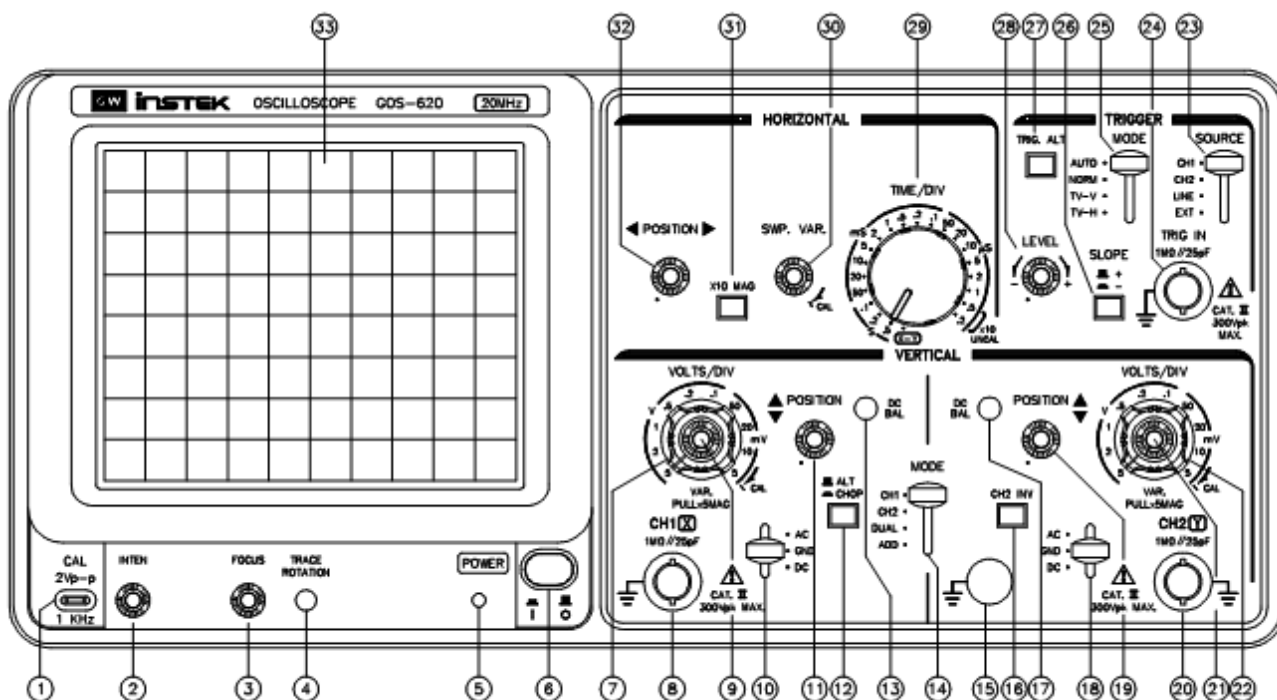
- (1) 调节“辉度 (INTEN)”旋钮, 使扫描线亮度适中.
- (2) 调节“聚焦 (FOCUS)”旋钮, 使扫描线清晰.
- (3) 调节“Y 轴位移”和“X 轴位移”旋钮, 使扫描线上下.

2 测量正弦交流信号的电压

在荧光屏上调节出大小适中、稳定的正弦波形，选择其中一个完整周期的波形，测量正弦波电压的峰值 U_{p-p}

$$U_{p-p} = (\text{垂直距离 DIV}) \times (\text{档位 V/DIV}) \quad (1)$$

则正弦波电压的有效值 U 为 $U = \frac{U_{p-p}}{2\sqrt{2}}$.



示波器版面图

GOS-620 前面板说明

CRT 显示屏

- ② INTEN 轨迹及光点亮度控制钮
- ③ FOCUS 轨迹聚焦调整钮
- ④ TRACE ROTATION 使水平轨迹与刻度线平行的调整钮
- ⑥ POWER 电源主开关，压下此钮接通电源，电源指示灯⑤会发亮；再按一次，开关凸起时，切断电源。
- ③③ FILTER 滤光镜片，可使波形易于观察。

VERTICAL 垂直偏向

- ⑦ ②② VOLTS/DIV 垂直衰减选择钮，以此钮选择 CH1 及 CH2 的输入信号衰减幅度，范围为 5mV/DIV~5V/DIV(1 “DIV”为 1cm)，共 10 档。
- ⑩ ①⑧ AC-GND-DC 输入信号耦合选择按键组
 - AC 垂直输入信号电容耦合，截止直流或极低频信号输入。
 - GND 按下此键则隔离信号输入，并将垂直衰减器输入端接地，使之产生一个零电压参考信号。
 - DC 垂直输入信号直流耦合，AC 与 DC 信号一齐输入放大器。
- ⑧ CH1(X)输入 CH1 的水平输入端；在 X-Y 模式中，为 X 轴的信号输入端。
- ⑨ ②① VARIABLE 灵敏度微调控制，至少可调到显示值的 1/2.5。在 CAL 位置时，灵敏度即为档位显示值。当此旋钮拉出时(×5 MAG 状态)，垂直放大器灵敏度增加 5 倍。
- ②② CH2(Y)输入 CH2 的垂直输入端；在 X-Y 模式中，为 Y 轴的信号输入端。
- ⑪ ①⑨ POSITION 轨迹及光点的垂直位置调整钮
- ⑭ VERT MODE CH1 及 CH2 选择垂直操作模式
 - CH1 设定本示波器以 CH1 单一频道方式工作。
 - CH2 设定本示波器以 CH2 单一频道方式工作。

DUAL 设定本示波器以 CH1 及 CH2 双频道方式工作, 此时并可切换 ALT/CHOP 模式来显示两轨迹。

ADD 用以显示 CH1 及 CH2 的相加信号; 当 CH2 INV 键⁽¹⁶⁾为压下状态时, 显示 CH1 及 CH2 的相减信号。

- ⑬ ⑰ CH1&CH2 调整垂直直流平衡点, 详细调整步骤请参照 4-11 DC BAL 的调整。
- DC BAL.
- ⑫ ALT/CHOP 当在双轨迹模式下, 放开此键, 则 CH1&CH2 以交替方式显示. (一般使用于较快速之水平扫描文件位)
当在双轨迹模式下, 按下此键, 则 CH1&CH2 以切割方式显示. (一般使用于较慢速之水平扫描文件位)
- ⑯ CH2 INV 此键按下时, CH2 的讯号将会被反向. CH2 输入讯号于 ADD 模式时, CH2 触发截选讯号(Trigger Signal Pickoff)亦会被反向。

TRIGGER 触发

- ⑳ SLOPE 触发斜率选择键
+ 凸起时为正斜率触发, 当信号正向通过触发准位时进行触发。
- 压下时为负斜率触发, 当信号负向通过触发准位时进行触发。
- ㉕ EXT TRIG IN TRIG IN 可输入外部触发信号. 欲用此端子时, 须先将 SOURCE 选择器⁽²³⁾置于 EXT 位置。
- ㉗ TRIG ALT 触发源交替设定键, 当 VERT MODE 选择器⁽¹⁴⁾在 DUAL 或 ADD 位置, 且 SOURCE 选择器⁽²³⁾置于 CH1 或 CH2 位置时, 按下此键, 本仪器即会自动设定 CH1 与 CH2 的输入信号以交替方式轮流作为内部触发信号源。
- ㉓ SOURCE 内部触发源信号及外部 EXT TRIG IN 输入信号选择器。
CH1 当 VERT MODE 选择器⁽¹⁴⁾在 DUAL 或 ADD 位置时, 以 CH1 输入端的信号作为内部触发源。
CH2 当 VERT MODE 选择器⁽¹⁴⁾在 DUAL 或 ADD 位置时, 以 CH2 输入端的信号作为内部触发源。
LINE 将 AC 电源线频率作为触发信号。
EXT 将 TRIG IN 端子输入的信号作为外部触发信号源。
- ㉔ TRIGGER MODE 触发模式选择开关
AUTO 当没有触发信号或触发信号的频率小于 25Hz 时, 扫描会自动产生。
NORM 当没有触发信号时, 扫描将处于预备状态, 屏幕上不会显示任何轨迹. 本功能主要用于观察 $\leq 25\text{Hz}$ 之信号。
TV-V 用于观测电视讯号之垂直画面讯号。
TV-H 用于观测电视讯号之水平画面讯号。
- ㉘ LEVEL :触发准位调整钮, 旋转此钮以同步波形, 并设定该波形的起始点. 将旋钮向 “+” 方向旋转, 触发准位会向上移; 将旋钮向 “-” 方向旋转, 则触发准位向下移。

水平偏向

- ㉙ TIME/DIV 扫描时间选择钮, 扫描范围从 $0.2\mu\text{S}/\text{DIV}$ 到 $0.5\mu\text{S}/\text{DIV}$ (1 “DIV” 为 1cm) 共 20 个档位。
X-Y: 设定为 X-Y 模式。
- ㉚ SWP. VAR 扫描时间的可变控制旋钮, 若按下 SWP. UNCAL 键⁽¹⁹⁾, 并旋转此控制钮, 扫描时间可延长至少为指示数值的 2.5 倍; 该键若未压下时, 则指示数值将被校准。
- ㉛ $\times 10 \text{ MAG}$ 水平放大键, 按下此键可将扫描放大 10 倍。
- ㉜ ◀ POSITION ▶ 轨迹及光点的水平位置调整钮

其它功能

- ① CAL(2Vp-p) 此端子会输出一个 2Vp-p, 1kHz 的方波, 用以校正测试棒及检查垂直偏向的灵敏度。
- ⑮ GND 本示波器接地端子

3 测量正弦交流信号的周期和频率

在第二步的基础上, 测量正弦交流信号的周期 T

$$T = (\text{水平距离 DIV}) \times (\text{档位 } t/\text{DIV}) \quad (2)$$

正弦交流信号的频率 $f = \frac{1}{T}$.

4 观察李萨如图

当示波器的 X 轴和 Y 轴分别输入正弦交流信号时，若两正弦交流信号的频率之比 $f_y / f_x = n_x / n_y$ 为简单整数比且两信号间相位差恒定不变时，这两个信号的叠加将会形成一系列稳定的、特殊的封闭曲线，其形状随两个信号的频率和相位差的不同而不同，如图 5 所示. n_x 为水平线与图形相交的点数， n_y 为垂直线与图形相交的点数. 若其中一个信号的频率 f_y 已知，则另一信号的频率可以通过李萨如图形得出.

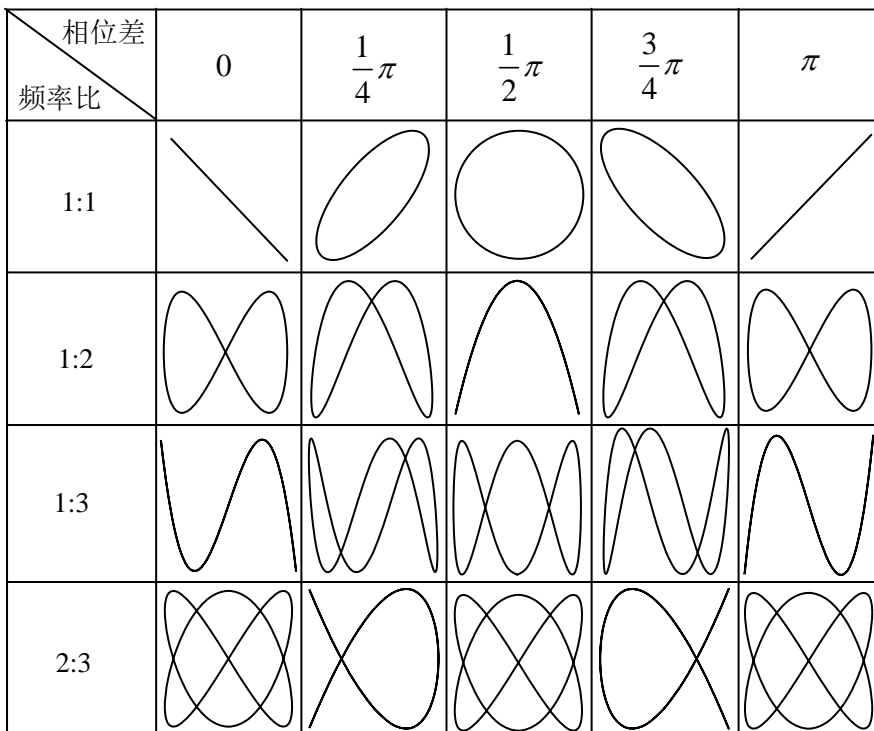


图 5 李萨如图形

用李萨如图形不仅能测未知频率，还可以测量两信号间的相位差. 设沿 y 和 x 方向的振动可分别为

$$y = a \sin(\omega t) \quad (3)$$

$$x = b \sin(\omega t + \phi) \quad (4)$$

y 与 x 的相位差为 ϕ . 在图 6 所示的图形中，图形与 X 轴线交点为 P，对于 P 点，由于 $y = a \sin(\omega t) = 0$ ，因此 $\omega t = 0$. 代入 (4) 式可得

$$x_0 = b \sin(\omega t + \phi) = b \sin \phi \quad (5)$$

则两信号间的相位差 ϕ 为 $\phi = \arcsin \frac{x_0}{b}$ 和 $\pi - \arcsin \frac{x_0}{b}$.

自行设计观察李萨如图形的实验方案. 描绘图形，验证 $f_y / f_x = n_x / n_y$ ，并根据图 6 测量两信号间相位差.

【数据记录及处理】

1 测量正弦交流电压

待测正弦电压 V_{P-P} (/V)	灵敏度选择 VOLTS/DIV	峰-峰垂直距离 (/cm)	电压 V_{P-P} (/V)	交流电压有效值 (/V)
10.0				

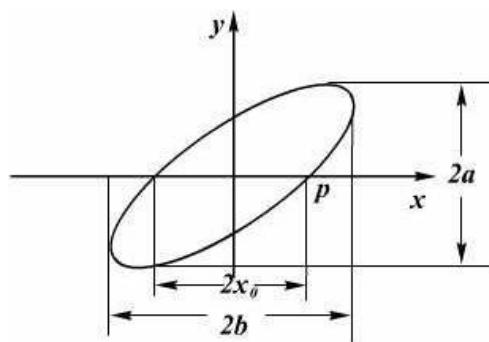


图 6 相位差的计算

1.0				
0.10				

2 测量信号频率与周期

待测频率 (/ kHz)	周期数 n	n 个周期长度 (/ cm)	扫描档位选择 TIME/DIV	周期 T (/ s)	实测频率 f (/ kHz)

3 观察李萨如图形

频率 f_x (/ Hz)	频率 f_y (/ Hz)	X 方向切点数 n_x	Y 方向切点数 n_y	n_y/n_x	f_x/f_y
100.0	50.0				
100.0	100.0				
100.0	200.0				

【注意事项】

- 1 示波器的信号线要规范连接，严禁强行拔线损坏信号线。
- 2 扫描线或光点的亮度适中，不要使亮度太亮，以免造成荧光屏的老化。
- 3 示波器的标尺刻度盘与荧光屏不在同一平面上，之间有一定距离，读数时要尽量减小视差，即眼睛垂视屏幕。荧光屏上小方格的边长均为 1cm，可估读到 0.1cm。

【思考题】

- 1 用示波器观察正弦交流信号的波形时，荧光屏上不出现信号波形的原因有哪些？如何调节才能出现波形？
- 2 用示波器观察波形时，波形移动不稳定的原因有哪些？应如何调节才能使波形稳定？
- 3 测量时，为什么要将波形尽可能调到满屏？
- 4 如何用示波器测量直流电压？
- 5 查阅参考文献 6 和 7，尝试用 MATLAB 模拟李萨如图形并进行分析讨论。

【附录】

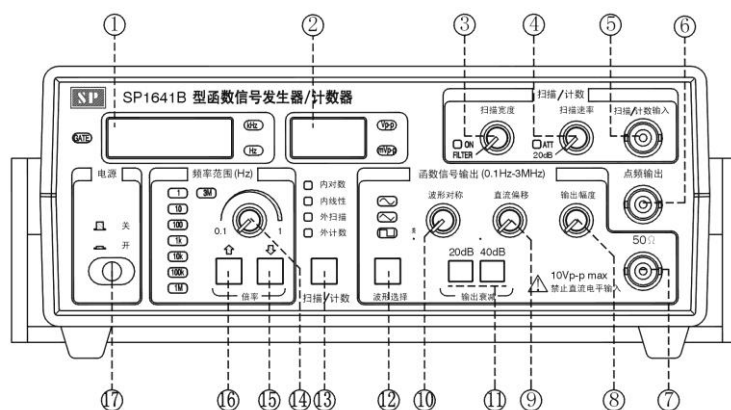
SP1641B 系列函数信号发生器前面板说明

- ① 频率显示窗口：显示输出信号的频率或外测频信号的频率。
- ② 幅度显示窗口：显示函数输出信号的幅度。

③ 扫描宽度调节旋钮：调节此电位器可调节扫频输出的频率范围。在外测频时，逆时针旋到底（绿灯亮），为外输入测量信号经过低通开关进入测量系统。

④ 扫描速率调节旋钮：调节此电位器可以改变内扫描的时间长短。在外测频时，逆时针旋到底（绿灯亮），为外输入测量信号经过衰减“20dB”进入测量系统。

⑤ 扫描/计数输入插座：当“扫描/计数键” ⑬功能选择在外扫描状态或外测频功能时，外扫描控制信号或外测频信号由此输入。



SP1641B 系列函数信号发生器前面板

⑥ 点频输出端：输出频率为 100Hz，幅度为 2 V_{p-p} 的标准正弦波信号。

⑦ 函数信号输出端：输出多种波形的函数信号，输出幅度 20V_{p-p} (1MΩ 负载)，10V_{p-p} (50Ω 负载)。

⑧ 函数信号输出幅度调节旋钮：调节范围 20dB。

⑨ 函数输出信号直流电平偏移调节旋钮：调节范围：-5V~+5V(50Ω 负载)，-10V~+10V(1MΩ 负载)。当电位器处在关位置时，则为 0 电平。

⑩ 输出波形对称性调节旋钮：调节此旋钮可改变输出信号的对称性。当电位器处在关位置时，则输出对称信号。

⑪ 函数信号输出幅度衰减开关：“20dB”、“40dB”键均不按下，输出信号不经衰减，直接输出。“20dB”、“40dB”键分别按下，则可选择 20dB 或 40dB 衰减。“20dB”，“40dB”同时按下时为 60dB 衰减。

⑫ 函数输出波形选择按钮：可选择正弦波、三角波、脉冲波输出。

⑬ “扫描/计数”按钮：可选择多种扫描方式和外测频方式。

⑭ 频率微调旋钮：调节此旋钮可微调输出信号频率，调节基数范围为从<0.1 到>1。

⑮ 倍率选择按钮：每按一次此按钮可递减输出频率的 1 个频段。

⑯ 倍率选择按钮：每按一次此按钮可递增输出频率的 1 个频段。

⑰ 电源开关：此按键按下时，机内电源接通，整机工作。此键释放为关掉电源。

实验七 惠斯登电桥测电阻

测量电阻的方法很多，其中最常见的是伏安法和电桥法。伏安法测电阻，除了因电压表、电流表准确度不高带来误差以外，测量方法本身也会引入的不确定度。1843 年惠斯登用克里斯蒂原理设计了一种电桥电路，不使用电压表，电流表，大大地提升了测量电阻的精度。

电桥有很多种，惠斯登电桥是其中一种，是测量中值电阻的重要仪器。电桥不仅可以测电阻，不同的

电桥还可以测电容，电感，温度，压力等许多物理量，广泛应用于工业生产的自动化控制中。

【预习要点】

- 1、惠斯登电桥测电阻的原理和方法。
- 2、箱式惠斯登电桥的倍率和电源的选择。
- 3、电桥灵敏度的概念，并且自己设计实验方案测量电桥的灵敏度。

【实验目的】

1. 掌握用惠斯登电桥测电阻的原理和方法
2. 了解电桥灵敏度的概念与测量不确定度的关系

【实验原理及方法】

1. 惠斯登电桥原理简述

惠斯登电桥的原理如图 1 所示。如果 B、D 两点的电位相等，检流计中没有电流通过，此时电桥达到平衡。此时有

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} R_3 = kR_3 \quad (1)$$

式子中， $k = R_1/R_2$ ，称为比率臂的倍率， R_3 称为比较臂。式（1）称为电桥的平衡条件。由此测出未知电阻。

2. 惠斯登电桥测电阻

如图 1 所示，被测电阻 R_x 和两个固定电阻 R_1 ， R_2 及一个可调电阻 R_3 （称为比较臂），组成一个四边形。四边形每一个边称为一个“桥臂”。合上 K_1 后给电桥的四个臂供电，合上 K_2 ，接通检流计。由检流计中是否由电流通过可以判断电桥 B、D 两点的电位 V_B 及 V_D 是否相等。

设通过桥臂 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_x 的电流分别为 I_1 、 I_2 、 I_3 、 I_x 。当电桥平衡时， $I_G=0$ ，且 $V_B=V_D$ ，有

$$V_{AB}=V_{AD}, \quad V_{BC}=V_{DC}; \quad I_x=I_3, \quad I_1=I_2$$

于是

$$I_x R_x = I_1 R_1, \quad I_3 R_3 = I_2 R_2$$

即

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_x}{R_3};$$

由此得（1）式。可见，电桥平衡条件与工作电流 I 的大小无关。因此，用电桥法测电阻的突出优点是：

- （1）用电桥法测电阻，只要检流计足够灵敏，且选用标准电阻为桥臂，通过与标准电阻相比较，即可以确定待测电阻的大小。
- （2）电桥电路中，不用电压表，电流表，只用一只检流计作为指零装置，并不要求提供读数，只要检流计灵敏度足够即可。

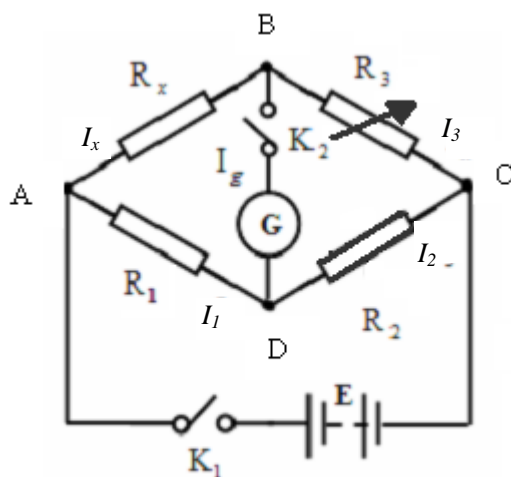


图 1

3. 惠斯登电桥的调节方法

调节电桥平衡的方法有两种，一种是比率臂的倍率固定的，调节 R_3 ，使电桥达到平衡；另一种是保持 R_3 不变，调节倍率 k 的值。

4. 电桥灵敏度

电桥是否达到平衡，是以桥路里有无电流来进行判断的，而桥路中有无电流又是以检流计的指针是否发生偏转来确定的。但检流计的灵敏度总是有限的，这就限制了对电桥是否达到平衡的判断。例如，若使指针偏转一格所对应的电流为 $1 \mu A$ 的检流计，那么当桥路里的电流小于 $0.1 \mu A$ 时，检流计指针偏转不到 0.1 格，很难觉察出指针的偏转，因此，引入电桥灵敏度的概念。定义为

$$s = \frac{\Delta n}{\Delta R_3} \quad (\text{格}/\Omega) \quad (2)$$

即， S 在数值上等于 R_3 变化单位阻值时，检流计指针的偏转格数。

测量电桥灵敏度的方法：把电桥调节到“平衡状态”后，改变 R_3 的阻值，改变量为 ΔR_3 ，观察检流计指针偏离原来平衡位置的分格数 Δn ，代入 (2) 计算。

显然，电流计灵敏度越大，则当比较臂电阻 R_3 改变单位值时，检流计指针偏转也越大，对电桥的平衡判断也越容易，测量结果也就越准确。

灵敏度 S 的定义也可以写为

$$s = \frac{\Delta n}{\Delta R_3} = \frac{\Delta n}{\Delta I_3} \cdot \frac{\Delta I_3}{\Delta R_3} = s_i \cdot s_L$$

式中， s_i 为检流计的灵敏度， s_L 为电桥电路灵敏度，可见电桥灵敏度不仅与检流计有关，还与电路参数有关，适当加大电桥的供电电压，合理配置电桥倍率，使用高灵敏度的检流计和高精度的电阻都是提高电桥灵敏度的有效方法。

5. 滑线式惠斯登电桥

滑线式惠斯登电桥 (也叫板式电桥) 结构如图 2 所示。其基本特征是采用一根均匀电阻 AC 作比率臂电阻 R_1 和 R_2 ，而 D 点是可以沿着电阻丝 AC 滑动的。

因为电阻丝处处均匀，则比率臂的比率为

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{l_1}{l_2}$$

所以，移动电键，改变 D 点位置，即改变 l_1 和 l_2 的比值。当电桥平衡时，将上式代入 (1) 式得

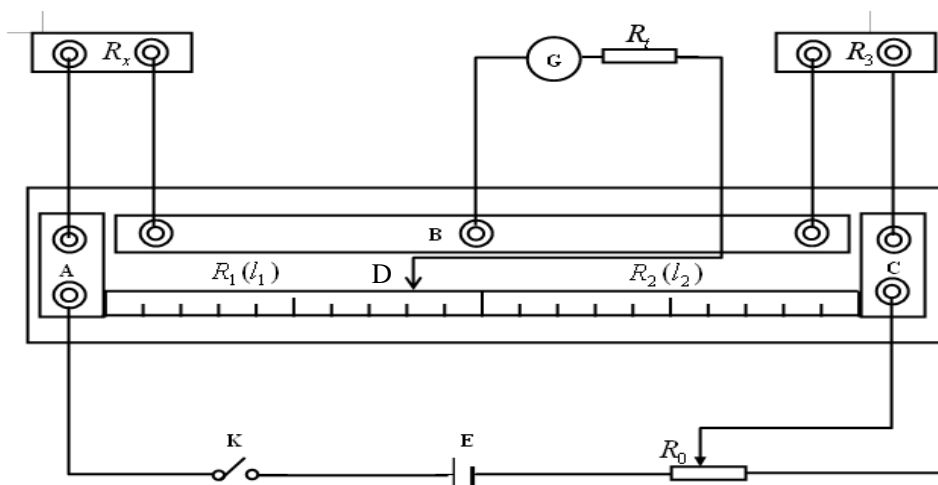


图 2

$$R_x = \frac{l_1}{l_2} R_3 \quad (3)$$

由于 $l_1 + l_2 = l$ 为定长, 有

$$R_x = \frac{l_1}{l - l_1} R_3 \quad (4)$$

实验时适当选择 R_3 的阻值, 然后通过改变长度 l_1 来测出 R_x 。

6. QJ23 型箱式惠斯登电桥

板式电桥对于了解电桥的工作原理形象而直观, 但是在实际工作中使用的是便于携带、使用方便、准确度高的箱式电桥。

图 3 为 QJ23 型箱式电桥的面板示意图。板面下方有四个标有“ $\times 1000$ ”、“ $\times 100$ ”、“ $\times 10$ ”和“ $\times 1$ ”的旋钮, 是用来调节比较臂的电阻, 若这四个旋钮分别指在“4”、“5”、“1”、“2”, 则比较臂电阻为 4512Ω 。面板右上角的旋钮用来调节比率, 它分 7 档, 测量时应根据被测电阻选择适当的档位。选择原则是使比较臂电阻中“ $\times 1000$ ”位的示数不为零, 使测量值有 4 位有效位数。

面板右下角有两个“ R_x ”的接线柱, 用来接被测电阻。左侧下方有三个接线柱, 使用箱内的检流计时, 用连接片将“外接”和“G”两个接线柱短接; 外部需要加接检流计时, 先用连接片将“内接”和“G”两个接线柱短接, 再将“外接”和“G”两个接线柱和外部检流计相连。应该特别注意, 在使用完毕后必须用连接片将“内接”和“G”两接线柱短接, 以保护电流计。

面板下方两个写着“B”和“G”的按钮, 前者用来接通电源支路, 后者用来接通电流计 (也叫检流计) 支路, 即分别是电源和电流计的开关按钮。在测量时应该先按下“B”, 然后点触“G”, 观察电流计指针是否在 0 处, 即电桥是否平衡, 然后松开“G”, 再松开“B”。在特殊情况下, 若需要长时间地接通电源或者电流计, 可以在按下“B”或“G”后再逆时针转动一定角度就能实现。

被测电阻 R_x 由下式计算:

$$R_x = \text{比率} \times R_3 \quad (5)$$

比率和 R_3 均可以由面板读出。

【实验仪器】

QJ23 型电桥, 滑线式电桥, 电阻箱, 检流计, 滑线变阻器, 直流稳压电源等。

【实验内容与步骤】

1. 注意事项

- ①测量过程中, 电路不能长直接通, 以免线路中某些原件因为过热而使阻值改变。
- ②观察电桥平衡应该采用“点触法”, 观察后应该断开检流计再进行调节。

2. 用滑线式惠斯登电桥测量电阻 R_x (可先用万用表对其阻值进行测量)

- ①按照图 2 接好电路, 并把滑动变阻器 R_0 和电阻箱 R_t 的阻值调到最大。
- ②用万用电表粗测 R_x 的大小, 或者由电阻标称值读出 R_x , 然后选取 R_3 , 使其接近或者等于 R_x 的数值。

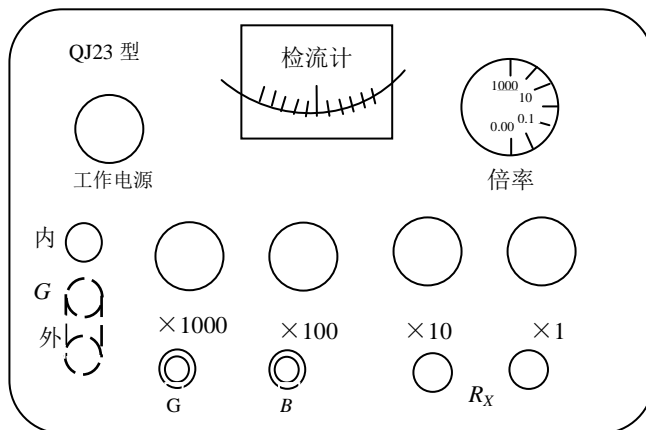


图 3

③接通电源（电源电压调到 3 至 5 伏），将电键 D 由 AC 的中点向左边（或右边）稍稍移动，并快速按一下 D 键（一触即离），同时注意观察电流计指针的偏转方向。然后把 D 键由 AC 线中点稍向相反方向移动，若此时按下电键 D，电流计指针偏转与上一次不同，说明电路正常，可以继续往下进行测量；否则，检查原因才能接着做下面步骤。

④把电键 D 大约放在 AC 线的中点，改变比较臂 R_3 ，使 R_3 与 R_x 基本相等（即使电流计指针基本不偏转），然后把限流电阻 R_t 的阻值逐步调小，使检流计有足够的灵敏度。同时 R_0 的阻值适当调小（但不能太小）。

⑤慢慢调节电键 D 的位置，使电桥达到平衡。在米尺上读出 $l_1(l_2 = l - l_1)$ ，然后断开电源。（注意米尺可估读到 0.1mm）

⑥将 R_x 与 R_3 的位置对调，重复⑤，注意对调后原 l_1 处为 l_2 了（即读出 l_2 ， $l_1 = l - l_2$ ）。

⑦再略改变 R_3 的阻值（ $\Delta R_3 \leq 5\%R_x$ ），重复⑤⑥。测出 3-6 组数据。先分别算出每组的平均值 R_x ，再算总平均值、绝对不确定度（将每组的 R_x 看成直接测量量，不考虑 B 类不确定度）和相对不确定度，并表示结果。

3. 用 QJ23 型箱式惠斯登电桥测量三个数量级不同的电阻阻值

①用连接片将“外接”两个接线柱短接，接通电源，调节灵敏电流计的零点调节旋钮，使电流计指针准确指零。

②选择工作电压的大小（参见附表）。

③接待测电阻 R_x ，根据原则正确选择比率臂的位置，即：使比较臂电阻“ $\times 1000$ ”指示值始终不为 0。

④先按下电源按钮 B，然后轻而快地按下按钮 G（一触即离），同时注意观察电流计指针的偏转方向，若指针向右偏转，则表示需要加大倍率或者 R_3 ，反之则表示需要减少倍率或者 R_3 。这样反复调节，直到电流计准确指零。

⑤选择三个不同数量级的待测电阻，重复上述步骤进行测量（自己设计表格）。

⑥测量结束后，用连接片将“内接”两接线柱短接。

⑦用（5）式计算测量值，并估算仪器不确定度（参见附表）表示结果。

⑧算与标称值的相对不确定度。

4. 测量电桥灵敏度(选做)

自己设计实验方案。

【思考题】

- 1.使用电桥时应该怎样保护灵敏电流计？
- 2.用惠斯登电桥测量电阻时，为什么要改变电源的极性？为什么要将 R_3 ， R_x 的位置互换？
- 3.箱式惠斯登电桥的倍率若选择不当会出现什么问题？
- 4.能否用惠斯登电桥测毫安表或伏特表的内阻？测量时要特别注意什么问题？
- 5.类似 R_3 与 R_x 的位置互换，你还能设计出什么方法来减少误差？

附表：

本实验室 QJ23 型箱式惠斯登电桥的基本不确定度允许极限为（由厂家提供）：

量程倍率	有效量程	分辨力	基本不确定度允许极限(Ω)	电源
$\times 0.001$	$0\sim 9.999\ \Omega$	$0.001\ \Omega$	$\Delta = \pm(2\%X + 0.002)$	3V
$\times 0.01$	$0\sim 99.99\ \Omega$	$0.01\ \Omega$	$\Delta = \pm(0.2\% X + 0.002)$	
$\times 0.1$	$0\sim 999.9\ \Omega$	$0.1\ \Omega$	$\Delta = \pm(0.2\% X + 0.02)$	
$\times 1$	$0\sim 9.999\text{k}\ \Omega$	$1\ \Omega$	$\Delta = \pm(0.2\% X + 0.2)$	
$\times 10$	$0\sim 99.99\text{k}\ \Omega$	$10\ \Omega$	$\Delta = \pm(0.5\% X + 5)$	6V
$\times 100$	$0\sim 999.9\text{k}\ \Omega$	$100\ \Omega$	$\Delta = \pm(0.5\% X + 50)$	15V
$\times 1000$	$0\sim 9.999\text{M}\ \Omega$	$1\text{k}\ \Omega$	$\Delta = \pm(2\% X + 2\text{k})$	

注：1、表中 X 为电桥平衡后的测量盘置数（亦称标度盘），即比较臂数值乘以量程倍率所得的数值，即测出的 R_x 值。

2、仪器不确定度，如用倍率 $\times 0.1$ 测出结果为 $154.9\ \Omega$ ： $\Delta_I = 154.9 \times 0.2\% + 0.02 = 0.4\ \Omega$

实验八 电表的改装及多用表的使用

电表在电测量中得到广泛的应用，因此如何了解电表和使用电表就显得十分重要。电流计（表头）是用来测量微小电流的，它是非数字式测量仪器的一个基本组成部分，用它可改装成毫安表、伏特表、欧姆计及多用表。

【预习要点】

1. 改装电路中分流电阻和分压电阻的作用。
2. 微安表内阻和量程的概念。
3. 电表校准的概念和方法。
4. 使用多用表要注意的问题。

【实验目的】

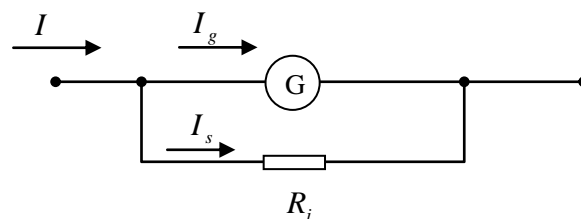
1. 掌握将微安表改装成电流表和电压表的原理和方法。
2. 了解欧姆表的测量原理和刻度方法。
3. 掌握电表的校准方法。
4. 熟练掌握万用电表的使用。

【实验原理】

当微小电流通过表头，就会有电流指示。但表头不能通过大电流，所以，必须在表头上并联与串联一些电阻进行分流或降压，从而测出电路中的电流、电压和电阻等。这就是电表改装的原理。

1. 将微安表改装成电流表

微安表改装成电流表是利用并联电阻的分流原理，只要在微安表的两端并联一个分流电阻 R_i 如图 1 所示。使被测电流中的大部分电流从 R_i 中流过，而流过微安表的电流不大于微安表所允许的最大电流 I_g ，就可把微安表改装成电流表进行测量。



设微安表改装后的量程后为 I ，若 $I = nI_g$ ，则

$$R_i = \frac{R_g}{n-1}。 \quad (1)$$

2. 将微安表改装成电压表

微安表改装成电压表是利用串联电阻的分压原理，将微安表与一个电阻 R_v 串联，如图 2 所示。使被测电压的大部分电压降落在串联的 R_v 上，而降落在微安表两端的电压不大于微安表所允许的最大电压。

设微安表的量程和内阻分别为 I_g 和 R_g 欲改装成量程为 U 的电压，所以串联的电阻为

$$R_v = \frac{U}{I_g} - R_g \quad (2)$$

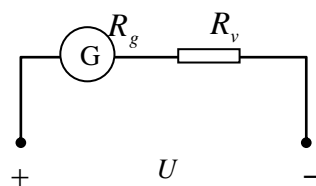


图 2

3. 将微安表改装成欧姆表

微安表改装成欧姆表的原理线路如图 3 所示。当 a, b 两端短路时，调节 R' ，使微安表指针偏转到满刻度所对应的电流为 I_s 。当 a, b 两端接入待测电阻 R_x 后，电路中的电流 I 为

$$I = \frac{E}{R_g + R' + R_x} \quad (3)$$

(3) 式中 $R' + R_g$ 为改装后欧姆表的内阻。从 (3) 式中可以看出 I 和 R_x 不再是线性关系，因此欧姆表表面刻度是不均匀的。若 E 不变时，则被测电阻 R_x 与电流 I 有一一对应的关系，即接入不同的电阻 R_x 表头指针有不同的偏转，即有不同的电流相对应。利用这种对应关系可以制作出欧姆表的标度尺，电阻值越小指针偏转越大，当 $R_x = \infty$ 时， $I = 0$ 指针不偏转；当 $R_x = 0$ 时，指针偏转最大。因此欧姆表标度尺为反向刻度，且刻度不均匀，电阻 R_x 越大间隔越密。

由 (3) 式可知，当 $R_x = 0$ 时， $I = \frac{E}{R_g + R'}$ ，指针偏转到满刻度，回路中电流达到最大值 I_s ，一般用

$R_{\#}$ 表示此时的 $R' + R_g$ ，称 $R_{\#}$ 为欧姆表的中值电阻。

$$I_s = \frac{E}{R_{\#}} \quad (4)$$

当 $R_x = R_{\#}$ 时，

$$I = \frac{E}{R_{\#} + R_x} = \frac{1}{2} \frac{E}{R_{\#}} = \frac{1}{2} I_s \quad (5)$$

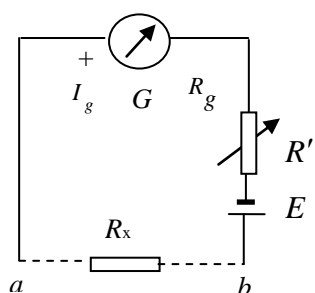


图 3

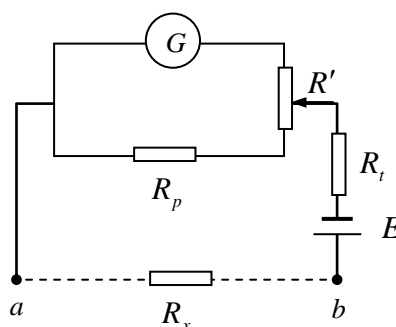


图 4

即指针偏转为满度的一半，换句话说：欧姆表标度尺上正中的刻度值就是中值电阻 $R_{\text{中}}$ 。

欧姆表的电源一般为干电池，其端电压不是恒定值。实用电路中，一般采用图 4 的方式，这样可以减少由于 R' 的改变所引起的误差。

4、电表的校准

电表改装好后，还要进行校准，看是否准确，由于各种原因，可能使量程不准，这时可调节分流电阻 R_i 或分压电阻 R_v 。而刻度不准，又无法改变刻度，可以作校准曲线（测量点之间以折线相连）。日后，用改装表测量时，根据测得的数据，可在校准曲线上查出相应的标准值，以提高改装表的测量准确性。如，用改装表测出一电流值为 4.00mA，查校准曲线（图 6）可知，实际值应为 4.10mA。

5、万用表

万用表的基本原理是集上述各表为一体，方便使用。但精度较低。

万用表的使用的**注意事项**：

（1）在使用万用表之前，应先进行“机械调零”，即在没有被测电量时，使万用表指针指在零电压或零电流的位置上。（一般实验室已将此工作做好，可免）

（2）在使用万用表过程中，**不能用手去接触表笔的金属部分**，这样一方面可以保证测量的准确，另一方面也可以保证人身安全。

（3）表笔的**插孔、档位、量程不能选错**！注意测电流表要**串入电路**，被测电阻要**断离电路**。

（4）测量前可先采用**跃接法**试测。

（5）在测量某一电量时，**不能在测量时换挡**，尤其是在测量高电压或大电流时，更应注意。否则，会使万用表毁坏。如需换挡，应先断开表笔，换挡后再去测量。

（6）万用表在使用时，应**水平放置**，以免造成误差。同时，还要注意到避免外界磁场对万用表的影响。

（7）万用表使用完毕，应将转换开关置于交流或者直流电压的最大挡。如果长期不使用，还应将万用表内部的电池取出来，以免电池腐蚀表内其它器件。

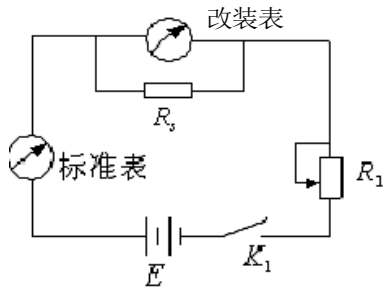


图 5 电流表的改装与校准电路图

【实验仪器】

微安表、毫安表、伏特表、电阻箱、滑线变阻器、直流电源、交流电源、万用电表、电阻器、开关等。

【实验内容】

1. 电流表的改装与校准

（1）电流表的改装

a) 将量程为 $100\mu\text{A}$ ，内阻为 R_g 的微安表改装成 5mA 量程的电流表，按（1）式算出 R_i ，按图 5 所示接线。

b) 选择合适的标准表量程（**选量程的原则**：当电流最大时，指针能超过 $2/3$ 量程值），并记下所用量程。（注意：**量程值**即是**指针满偏**时所表示的量值。）

（2）电流表的校准

a) 量程的校准：调节 R_1 ，使改装表的示数为 5mA，看标准表是否也是 5mA，若不是，调节则调节 R_1 和 R_i ，使两表均为 5mA。

b) 刻度的校准：调节 R_1 ，使待校表的示数从 5mA 到 0mA 变化，每 1mA 记下相应的标准表示数。然后再从 0mA 变到 5mA 做一次。注意：**读到估读位**，要求学会直接从板面读出测量值。

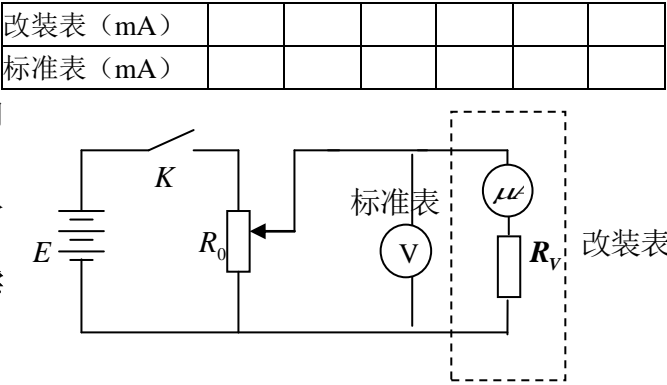


图 6 电压表的改装与校准

(3) 用两次的平均值作校准曲线。注意按作图要求（见绪论）作图。

2. 电压表的改装与校准

(1) 电压表的改装

a) 将量程为 $100\mu\text{A}$ ，内阻为 R_g 的微安表改装成 5V 量程的电压表，按 (2) 式算出分压电阻 R_V ，按图 6 所示接线。

b) 选择合适的标准表量程（选量程的原则：当电压最大时，指针能超过 $2/3$ 量程值），并记下所用量程。（注意：**量程值即是指针满偏时所表示的数值。**）

(2) 电压表的校准

a) 量程的校准：合上 K ，移动滑线变阻器 R_0 使标准伏特表满度。检查被改装的电流表是否恰好满度。若不够满度就要略为改变 R_V （同时也要调节滑线变阻器 R_0 ），使其恰好满度。

b) 刻度的校准：调节 R_0 ，使得改装表（电流表）的示数从满刻度到 0 变化，每隔 1V 记下相应的标准表示数。然后再从 0V 变到 5V 做一次。注意：**读到估读位**，要求学会直接从板面读出测量值。

(3) 用两次的平均值作出校准曲线（参见图 7）。

改装表 (V)						
标准表 (V)						

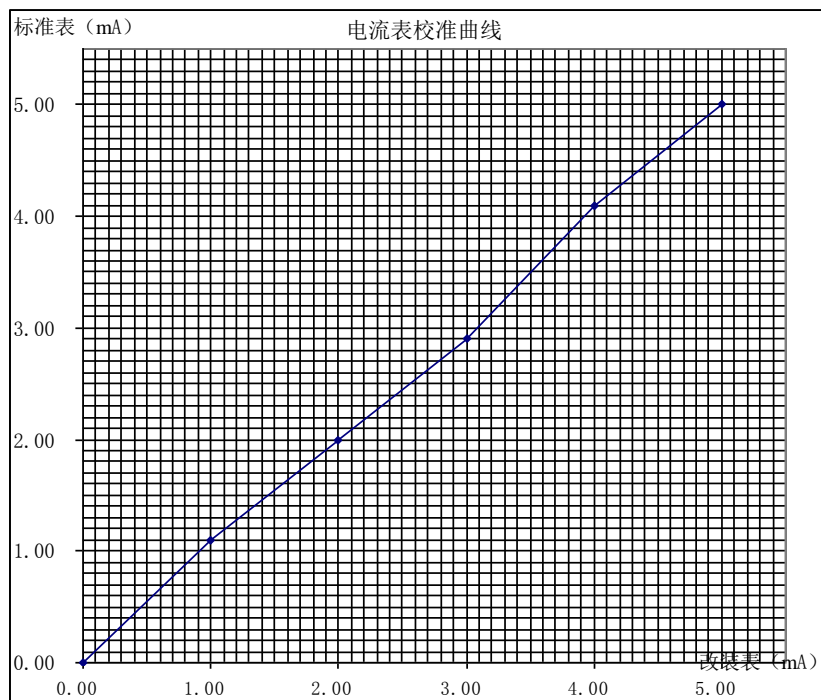


图 7 电流表的校准曲线

3. 万用表的使用（注意：量程和档不要选错!!!）

① 用万用表测直流电流：

1. 将万用表置于直流电流档，选择合适的量程（选量程的原则：指针能超过 $2/3$ 量程值）；
2. 将电流表(万用表)串接入电路，测通过改装表的电流（移动滑线变阻器将改装表调到满偏）；
3. 记下所用万用表量程和万用表电流读数，改装表电流读数。

② 用万用表测直流电压

1. 将万用表置于直流电压档，选择合适的量程；
2. 将万用表并联接入电路，测电压表两端的电压。
3. 记下所用量程。

③ 用万用表测电阻

1. 将万用表置于电阻档，选择合适的档（选档的原则与电流表和电压表不同：指针尽量在刻度中间区域），记下所选的档。
2. 先将两表笔短路，看指针是否指在 0 处（电阻档的 0 在板面的右端）。若不在 0 处，则调节调零旋钮，使之为零。注意：每换一次档都要调零。
3. 测电阻箱 1500.0Ω 的阻值。注意：要将从板面读出的示值乘以所选档的倍数，如所选档为： $\times 100$ ，读出示值为 15.0Ω ，则测量值为 $15.0\Omega \times 100 = 1.50\text{K}\Omega$ 。

④ 用万用表交流电压

- (1) 将万用表置于**交流**电压档，选择合适的量程；
- (2) 测实验台上插座的市电电压。（**注意安全**）

【思考题】

1. 假定表头内阻不知道，你能否在改变电压的同时确定表头的内阻？
2. 为什么按（2）式算出的 R_V 仍需调整，试分析其原因。
3. 校准曲线的作用是什么？。
4. 使用万用表，要注意什么？写出你认为最重要的两条。

附录：常用测量仪器的使用方法

一．读数显微镜的使用

读数显微镜既可以将微小被测物体放大成一虚像进行观察，又可以对它的大小作精密测量。其结构如图 1 所示。它由一个附有叉丝的显微镜、测量架和底座三部分组成。显微镜是放大部分，用于观测，由目镜和物镜组成，目镜中有十字形叉丝（它有两个作用：1.目镜调好的标志就是能否清楚看见叉丝。2.作为测量时的参照）。显微镜固定在测量架上，转动鼓轮时，丝杆带动测量架及显微镜在导轨槽中移动。

转动鼓轮，左右移动测量架，显微镜中的叉丝依次对准被测物像上的两个位置，从读数装置（与千分



图 1 读数显微镜

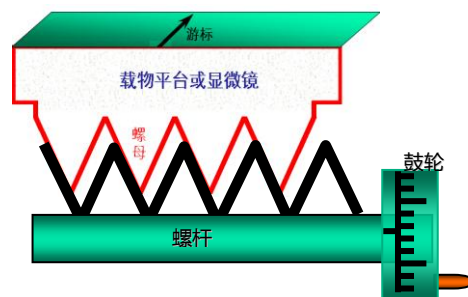


图 2

尺相类似）上可读出对应读数，两者之差就是被测物体上的两个位置间的距离。

旋转物镜调节手轮可以使显微镜筒上下移动，达到调焦的目的。转动测微鼓轮一周，可使测量架平移 1mm。测微鼓轮的周边等分为一百小格，所以鼓轮转过一小格，测量架平移 0.01mm。读数可估读到 0.001mm。

注意：用读数显微镜测量时，鼓轮要采用**同一方向旋转测量**，以避免**空程误差**。空程误差是由螺母与螺杆间的间隙造成的（如图 2 所示）。旋转目镜（最上面那层），使在目镜中能看到清晰的十字叉丝线的像。

（2）放松目镜紧固螺丝，转动目镜使十字叉丝线中的一条线与标尺平行，即与镜筒移动方向平行。

（3）转动物镜调节手轮（注意：要**两个手轮一起转动**），调节显微镜镜筒与被测物之间的距离。（可先将镜筒下降，使之接近被测物但不能碰上，然后缓慢上升，直至在目镜中看到清晰的被测物。）

二．游标卡尺

游标是为了提高角度、长度微小量的测量精度而采用的一种读数装置。长度测量用的游标卡尺就是用游标原理制成的典型量具。

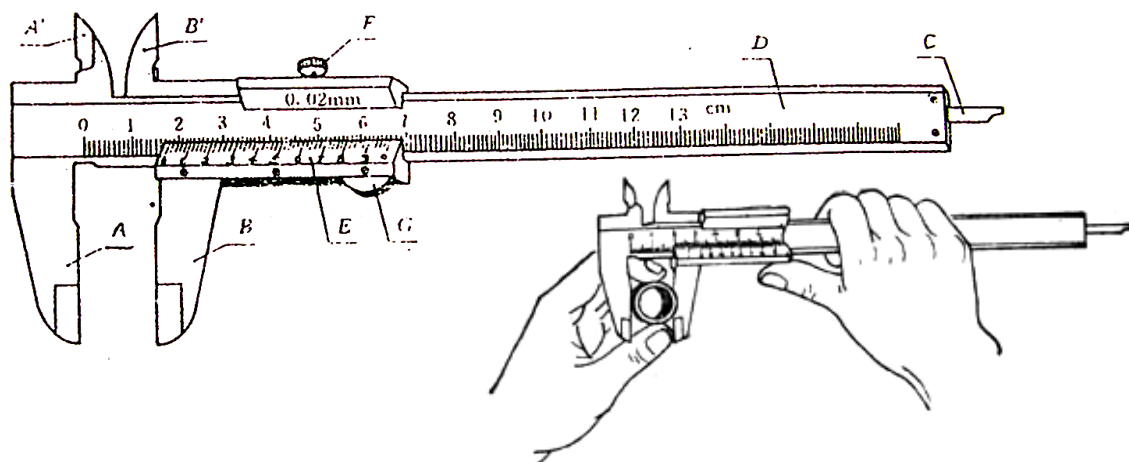


图3 游标卡尺

1、结构

如3所示，游标卡尺主要由主尺D及套在主尺上并能沿主尺滑动的副尺E（又称游标）组成。分度值为毫米的主尺实际上是普通的钢制米尺，其上有两个垂直于主尺的固定量爪A和A'。副尺上除了有个垂直于主尺的活动量爪B和B'，还有尾尺C，紧固螺钉F及推把G。松开F，副尺可沿主尺滑动。量爪A、B（也叫外卡）用来测量物体长度和外径，量爪A'、B'（也叫内卡）用来测量内径，尾尺C则用来测量槽、孔深度。当量爪AB紧密合拢时，量爪A'B'的直边处在同一平面上，而且尾尺的尾端与主尺尾端、副尺上的零线与主尺上的零线也刚好分别对齐。

(2) 读数原理

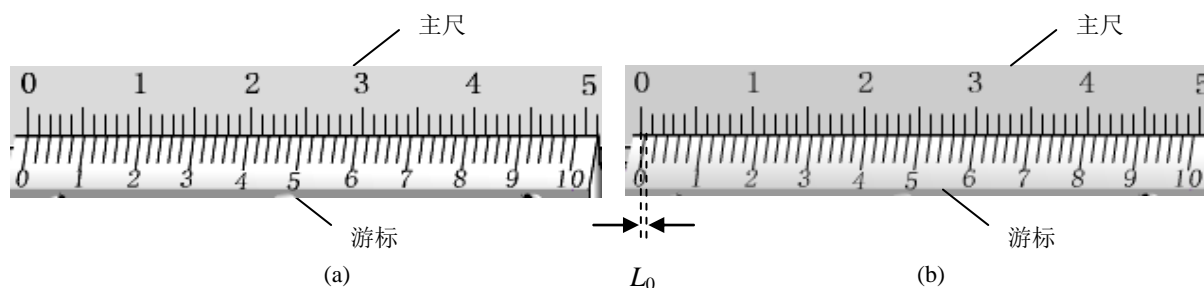


图4 50分度游标的主尺与游标尺

游标量具是由主尺（固定不动）和沿主尺滑动的游标尺组成的。

主尺一格（两条相邻刻线间的距离）的宽度与游标尺一格的宽度之差，称为游标分度值。目前，游标卡尺的主尺刻度为每格1mm，游标分度值有0.10mm，0.05mm，0.02mm三种，分别对应10分度、20分度、50分度三种游标分度。

把游标卡尺等分为五十分格，叫“五十分游标”。图4是它的读数原理示意图。游标上有50个分格，其总长正好等于主尺的49个分格。主尺上一个分格是1mm，因此游标上50个分格的总长等于49mm，它一个分格长度是0.98mm，与主尺一格的宽度之差（即游标分度值）为0.02mm。

从图4(a)中两尺（游标尺和主尺）的“0”线对齐开始向右移动游标尺，当移动0.02mm时，两尺上的第一根线对齐，两根“0”线间相距为0.02mm。以此类推，当游标卡尺移动0.98mm时，两尺的第49根线对齐，这时两根“0”线相距为0.98mm，该值就是游标卡尺在该位置时主尺的小数值。

(3) 游标卡尺的读数

a. 零点修正。测量之前，检查游标卡尺和主尺在量爪合拢时，零线是否重合，如不重合，读出两条刻度线间的距离 L_0 。在此情况下，若测量物体长度后的读数为 L' ，则物体的长度 L 为

$$L = L' \pm L_0$$

当量爪 A、B 合拢时，若副尺零刻度在主尺零刻度左边，上式取正号，反之取负号。

b. 读数。游标尺的“0”线是读毫米的基准。主尺上靠近游标“0”线左边最近的那根刻线的数字就是主尺的毫米值(整数值)；然后，再看游标尺上哪一根线与主尺上的刻度线对齐，将该线的序号乘游标分度值之积，就是主尺的小数值。将整数和小数相加，就是所求的数值。

读数时要注意，主尺上刻的数字单位是厘米，读数应将其单位转换为毫米。

例如，从图 5 中看到，整数是 21mm，因为主尺上靠近游标“0”线左边最近的那根刻线是 21mm；小数是 $0.02\text{mm} \times 31 = 0.62\text{mm}$ ，因为游标的刻线与主尺上的一根刻线对齐。故两次读数之和为 21.62mm。

但实际读数不必用对齐条数乘以 0.02mm，**可直接读数**。由于游标上的 3 格： $5 \times 0.02\text{mm} = 0.1\text{mm}$ ，所以游标上的数字是表示小数后的第一位（毫米为单位）。每两格之间有 5 格，每格表示的就是 0.02mm。如图 5 中对齐的第 31 根即是游标上 6 右面的第一根，所以小数位为 $0.6\text{mm} + 0.02\text{mm} = 0.62\text{mm}$

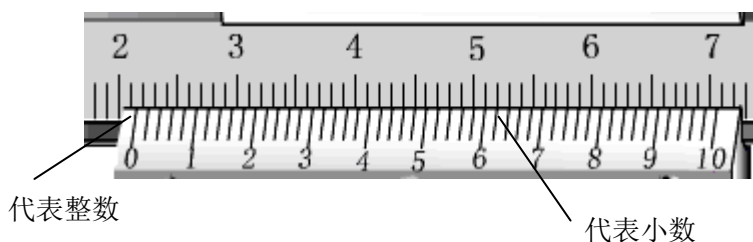


图 5 游标卡尺的读数方法

三. 密度计的使用

密度计（比重计）是根据阿基米德定律和物体浮在液面上平衡的条件制成的，是测定液体密度的一种仪器。它用一根密闭的玻璃管，一端粗细均匀，内壁贴有刻度，另一头稍膨大呈泡状，泡里装有小铅粒或水银，使玻璃管能在被检测的液体中竖直的浸入到足够的深度，并能稳定地浮在液体中，也就是当它受到任何摇动时，能自动地恢复成垂直的静止位置。当密度计浮在液体中时，其本身的重力跟它排开的液体的重力相等。于是在不同的液体中浸入的深度不同，所受到的压力不同，密度计就是利用这一关系刻度的。

常用的密度计有两种。一种用来测量密度大于 1 的液体的密度，称“重表”。它的下端装的铅丸或水银多一些。最小刻度线是“1”，它在标度线的最高处，由上而下，顺次是、1.1、1.2……。把这种密度计放在水里，它的大于 1 的标度线，全部在水面下。

另一种用来测量密度小于 1 的液体的密度，称“轻表”。它的下部装的铅丸或水银少一些，最大标度线是“1”，这个标度线是在最低处，由下而上顺次是、0.9、0.8……。把这种密度计放在水里时，它小于 1 的标度线全部在水面上（本实验室是这种）。

使用时，将密度计轻轻铅直放入待测液体中央，让它自行下沉，**稳定**后，以液面为基准读数（注意：数字是下大上小）。

四. 螺旋测微计

(1) 结构

螺旋测微计（又称千分尺）是比游标卡尺更精密的长度测量仪器。其外形如图 6 所示。固定套筒上的标尺刻度在水平基线的上下，其上面刻度线(主尺)是毫米数，下面刻度线（副尺）在上面二刻度线之中，每相邻两上下刻度线的距离为 0.5mm。

活动套筒端部圆周上等分 50 个刻度。由于活动套筒转动一周时，测微螺杆移动 0.5mm，所以，它转动一个分度（即一周的五十分之一）时，测微螺杆移动的距离为 $0.5\text{mm}/50 = 0.01\text{mm}$ 。它就是测微计的分度值。

用螺旋测微计测量物体的长度时，被测物体被夹在螺旋测微计的砧台和螺杆的端面之间。端面施于被测物体的压力不同，读数也会有差异。为消除这个缺点，必须用棘轮带动活动套筒转动。由于棘轮是借助与它和活动套筒之间的摩擦力来带动活动套筒，所以，当端面施于被测物体压力达到某值时，棘轮就会打滑，并发出“咯咯”声。

锁紧手柄用来固定测微螺杆，这就便于轻轻地把被测物体取去而方便读数。

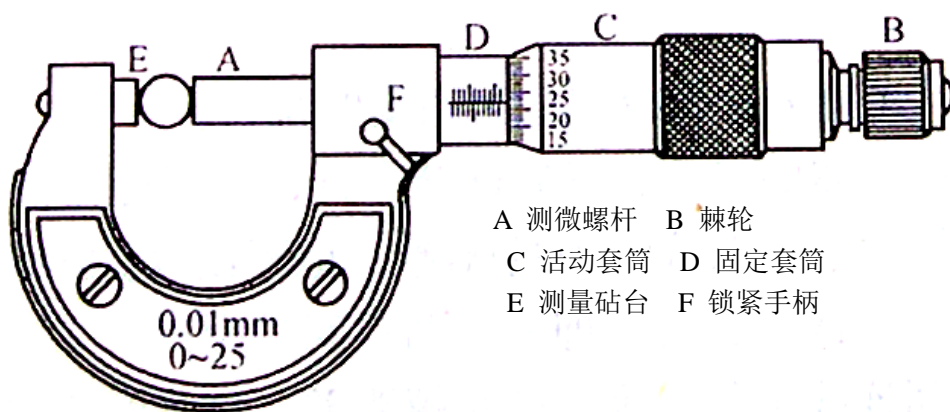


图 6 螺旋测微计

（2）读数

图 7 给出了读数范例。读螺旋测微器和游标卡尺一样，也分为 3 个步骤

- 读整数。看活动套筒端面左边固定套筒上露出的刻线的数字，该数字就是主尺的读数，即整数。若副尺的刻线露出了(如图 7(b))，则要加 0.5mm。
- 读小数。固定套筒的基线是读取小数的基准。读数时应估读到小数点后第三位数。
- 求和。将上述两次读数相加，即为所求的测量结果。

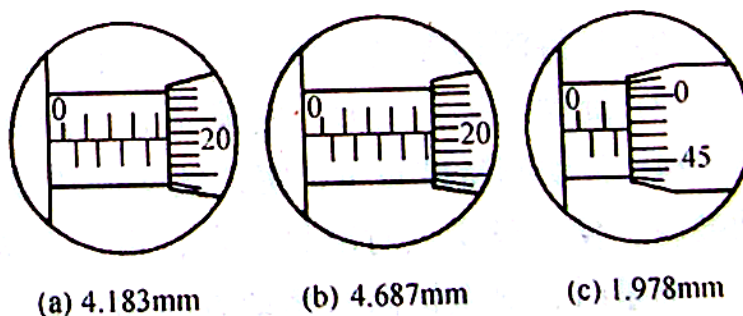


图 7 螺旋测微计的读数范例

（3）使用方法及注意事项

- 检查零点读数。为此，转动棘轮，使测微螺杆端面与砧台端面接触，听到“咯咯”响声时，活动套筒上的“0”线与测微基准线应对齐，即读数为 0.000mm。若不对齐，要记下零点读数，以便对测量物体长度时所得到的读数进行修正。
- 如图 8(a)所示，若活动套筒上的“0”线在测微基准线上方，最后测量结果应减去初读数的绝对值。如图 8(b)所示，若活动套筒上的“0”线在测微基准线下方，最后测量结果应加上初读数的绝对值。
- 将待测物置于螺杆和砧台的端面之间，轻轻转动棘轮，当听到“咯咯”声时，可进行读数。
 - 用毕时应使测微螺杆和砧台的端面相距 1mm 左右。这样做的目的是避免端面压得太紧而损坏螺纹。

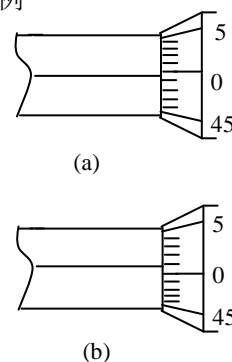


图 8 零点修正

五．数字多用电表

DT-830 型数字多用电表是一种采用大规模集成电路的数字式仪表。它具有输入阻抗高（电压档内阻为 $10M\Omega$ ）、读数方便、测量精度高和可在强磁场中进行测量等优点。

1. 面板分布

图 9 为 DT-830 型数字多用电表面板图。自上而下分别是：1.液晶显示屏；2.电源开关； 3.晶体管 hFe 测量插口； 4.功能/量程选择旋钮； 5 表笔插。

2. 使用方法

使用时，黑色表笔插入“COM”插孔，红色表笔根据被测量的类型分别插入“V、Ω”、“mA”和“10mA”插孔。

(注：对于无法估计的待测量，要先选择最大量程，再根据读数调整为合适的量程。)

①测量直流电压

使用时将量程开关 4 置于“DCV”挡，并指向合适量程，黑笔插入“COM”孔，红笔插入“V·Ω”孔，打开电源开关，两只表笔另外两端接入被测电路。

②测量交流电压：

将量程旋钮置于“ACV”挡合适量程上，其它操作同直流电压的测量。

③测量直流电流

- a. 将仪表串联接入被测电路中；
- b. 将量程旋钮置于“DCA”挡合适的量程上；当被测电流小于 200 mA，红表笔应接“mA”插口，黑笔接“COM”插孔。量程置于“200 μ”时，读数单位为 μA；当量程开关置于“200 m”、“20 m/ 10 A”、“2 m”三挡时，读数单位为 mA。

当被测电流大于 200 mA 时，量程旋钮必须选择“20 m/10 A”，且红表笔应接“10 A”插口，此时读数单位为 A。若显示为“1. ”，就需要加大量程；如果在数值左边出现“-”，则表明电流是从黑表笔流进万用表的。

④测量交流电流

将量程旋钮置于“ACA”挡，选择合适量程，测量方法与测直流电流相同。

⑤测量电阻

将量程旋钮拨至“Ω”挡适当量程，勿必调“0”，由插孔“V·Ω”和“COM”接入被测电阻。

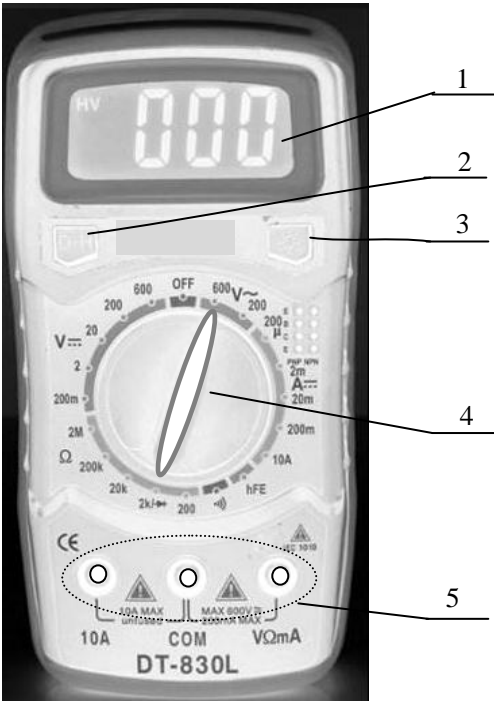


图 9 DT-830 型数字多用电表
1.液晶显示屏； 2.电源开关；
3.晶体管 hFe 测量插孔；
4.功能/量程转换旋钮；
5.表笔插孔；

华南师范大学

物理与电信工程学院 大学物理 实验报告
09 年级 物理 专业 实验日期 2011 年 2 月 25 日
姓名 张三 教师评定
实验题目 单 摆

一、实验目的

- (1) 学会用单摆测定当地的重力加速度。
- (2) 研究单摆振动的周期和摆长的关系。
- (3) 观察周期与摆角的关系。

二、实验原理

当单摆摆动的角度小于 5 度时，可证明其振动周期 T 满足下式

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}} \quad (1)$$

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

若测出周期 T 、单摆长度 L ，利用上式可计算出当地的重力加速度 g 。

从上面公式知 T^2 和 L 具有线性关系，即 $T^2 = \frac{4\pi^2}{g} L$ 。对不同的单摆长度 L 测量得出相对应的周期，

可由 $T^2 \sim L$ 图线的斜率求出 g 值。

当摆动角度 θ 较大 ($\theta > 5^\circ$) 时，单摆的振动周期 T 和摆动的角度 θ 之间存在下列关系

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}} \left[1 + \left(\frac{1}{2} \right)^2 \sin^2 \frac{\theta}{2} + \left(\frac{1}{2} \right)^2 \left(\frac{3}{4} \right)^2 \sin^4 \frac{\theta}{2} + \dots \right]$$

三、实验仪器

单摆，秒表，米尺，游标卡尺。

四、实验内容

1、用给定摆长测定重力加速度

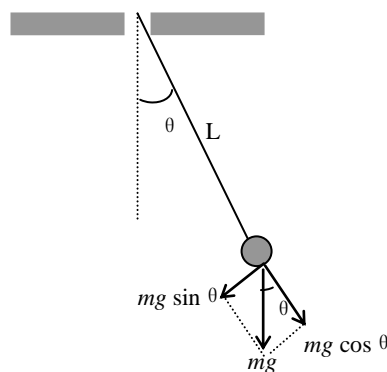
- ①选取适当的摆长，测出摆长；
- ②测出连续摆动 50 次的总时间 t ；共测 5 次。
- ③求出重力加速度及其不确定度；
- ④写出结果表示。

2、绘制单摆周期与摆长的关系曲线

- ①分别选取 5 个不同的摆长，测出与其对应的周期。
- ②作出 T^2-L 图线，由图的斜率求出重力加速度 g 。

3、观测周期与摆角的关系

定性观测：对一定的摆长，测出 3 个不同摆角对应的周期，并进行分析。



五、数据处理

1、用给定单摆测定重力加速度

次数	1	2	3	4	5	平均值
直径 $d(\text{mm})$	10.85	10.84	10.86	10.87	10.88	10.86
线长 $l(\text{mm})$	915.6	915.4	915.8	915.5	915.7	915.6
$50T$ (s)	96.50	96.43	96.56	96.71	96.80	96.60

摆长: $\bar{L} = \bar{l} + \bar{d} / 2 = 915.6 + 5.43 = 921.03 \text{ mm} = 0.92103 \text{ m}$

$$\bar{T} = 96.60 / 50 = 1.932 \text{ s}$$

$$\text{重力加速度: } \bar{g} = 4\pi^2 \frac{\bar{L}}{\bar{T}^2} = 4\pi^2 \frac{0.92103}{1.932^2} = 9.742 \text{ m/s}^2$$

$$\begin{aligned} \Delta_d &= t \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^5 (d_i - \bar{d})^2}{n(n-1)}} \\ &= 2.78 \times \sqrt{\frac{(10.85 - 10.86)^2 + (10.84 - 10.86)^2 + (10.86 - 10.86)^2 + (10.87 - 10.86)^2 + (10.88 - 10.86)^2}{5(5-1)}} = 0.02 \text{ mm} \end{aligned}$$

取游标卡尺的仪器不确定度为 $\sigma_B = 0.02 \text{ mm}$, 则

$$\sigma_d = \sqrt{\Delta_d^2 + \sigma_B^2} = \sqrt{0.02^2 + 0.02^2} = 0.03 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} \Delta_l &= t \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^5 (l_i - \bar{l})^2}{n(n-1)}} \\ &= 2.78 \times \sqrt{\frac{(915.6 - 915.6)^2 + (915.4 - 915.6)^2 + (915.8 - 915.6)^2 + (915.5 - 915.6)^2 + (915.7 - 915.6)^2}{5(5-1)}} = 0.2 \text{ mm} \end{aligned}$$

取米尺的仪器不确定度为 $\sigma_B = 0.5 \text{ mm}$, 则

$$\sigma_l = \sqrt{\Delta_l^2 + \sigma_B^2} = \sqrt{0.2^2 + 0.5^2} = 0.6 \text{ mm}$$

因线长的不确定度远大于直径的 0.03 mm , 所以

$$\sigma_L = \sigma_l = 0.6 \text{ mm}$$

$$\Delta_{\bar{50T}} = t \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^5 (50T_i - \bar{50T})^2}{n(n-1)}}$$

$$= 2.78 \times \sqrt{\frac{(96.50 - 96.60)^2 + (96.43 - 96.60)^2 + (96.56 - 96.60)^2 + (96.71 - 96.60)^2 + (96.80 - 96.60)^2}{5(5-1)}} = 0.2s$$

$$\sigma_{\bar{T}} = \Delta_{\bar{T}} / 50 = 0.004s$$

$$E_g = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\bar{L}}}{\bar{L}}\right)^2 + \left(2\frac{\sigma_{\bar{T}}}{\bar{T}}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{0.6}{915.6}\right)^2 + \left(2 \times \frac{0.004}{1.932}\right)^2} = 0.42\%$$

$$\sigma_{\bar{g}} = \bar{g} E_g = 9.742 \times 0.42\% = 0.05 \text{m/s}^2$$

$$\text{重力加速度: } g = \bar{g} \pm \sigma_{\bar{g}} = (9.74 \pm 0.05) \text{m/s}^2$$

$$\text{广州的重力加速度: } g = 9.788 \text{m/s}^2$$

$$\text{百分误差: } E_0 = \frac{|9.788 - 9.742|}{9.788} \times 100\% = 4.7\%$$

3. 绘制单摆周期与摆长的关系曲线

$$\text{小球半径 } r = 5.43 \text{mm} = 0.00543 \text{m}$$

$$L = l + r$$

次数	1	2	3	4	5
$l(\text{m})$	0.4996	0.6004	0.7015	0.7994	0.9004
$L(\text{m})$	0.5050	0.6058	0.7069	0.8048	0.9058
$20T(\text{s})$	28.53	31.15	33.69	35.96	38.16
$T^2(\text{s}^2)$	2.035	2.426	2.838	3.233	3.641

在曲线中取 A、B 两点，得：

$$k = \frac{3.95 - 2.00}{(0.900 - 0.500)} = 3.99 (\text{s}^2/\text{m})$$

$$g = 4\pi^2 / k = 4\pi^2 / 3.99 = 9.89 (\text{m/s}^2)$$

$$\text{百分误差: } E_0 = \frac{|9.788 - 9.89|}{9.788} \times 100\% = 1.1\%$$

次数	1	2	3
θ	小	中	大
$50T(\text{s})$	95.39	95.43	95.47
$T(\text{s})$	1.908	1.909	1.910

4. 周期与摆角关系的定性研究

$$\text{小球半径 } r = 0.00543 \text{m}$$

$$L = l + r = 0.9058 \text{m}$$

结论：由表中数据可知，周期随着角度的增加而略为变大。

六、思考题：

1. 测量单摆周期要测几十次，而不测一次是为什么？

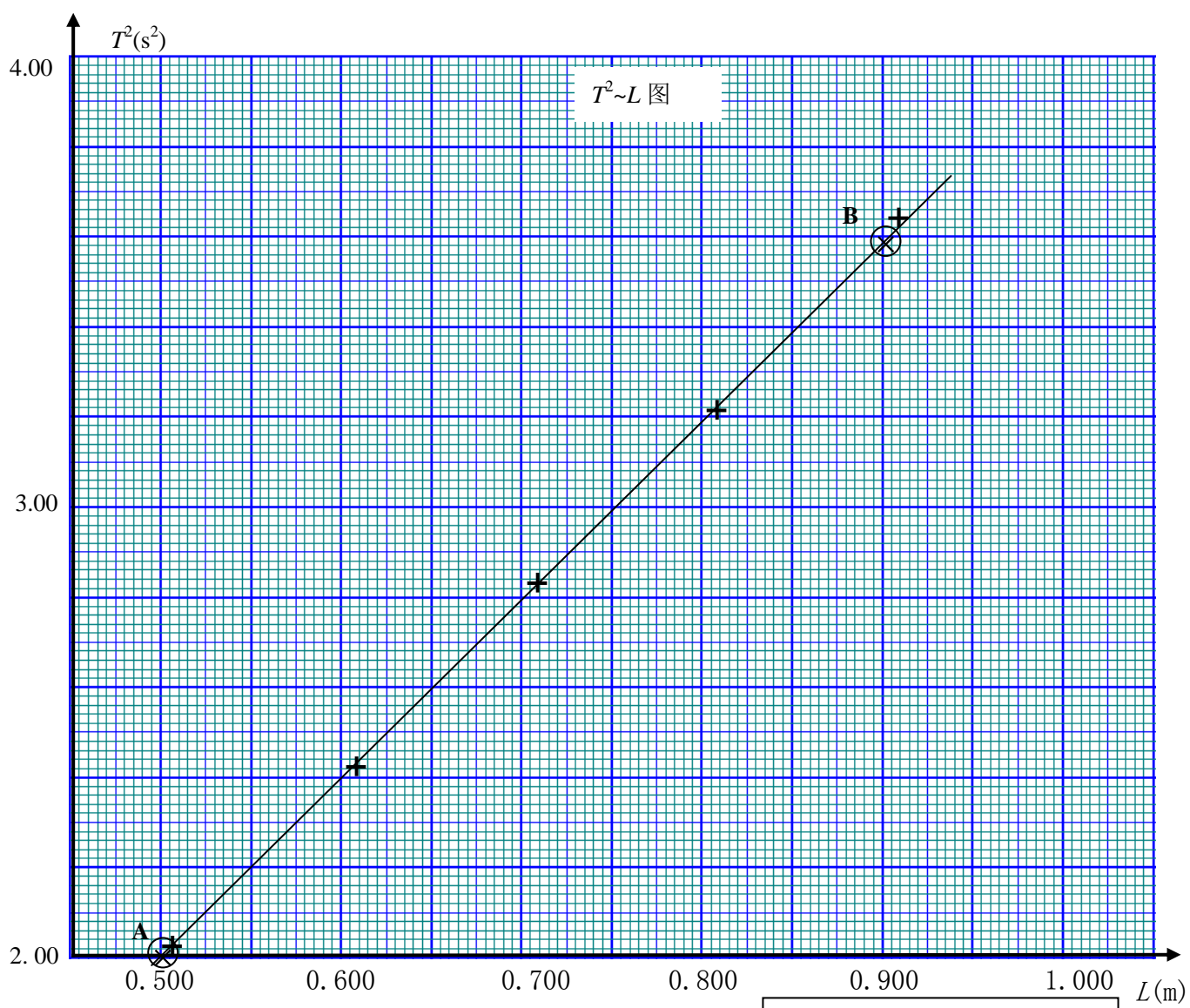
答：因为测一次周期的误差大，用累计放大法（累积法）测量多次周期可减小误差。

2. 摆长是指哪两点间距离？如何测量？

答：摆长是指摆球的质心到悬点的长度。用游标卡尺测定摆球的直径 d ，再用米尺测量摆线长度 l ，则摆长 $L = l + d/2$ 。

3. 为什么计时应以摆球通过平衡位置开始计算？

答：平衡位置的速度最大，可较准确的确定计时起始点，减少误差。



作者：张三 2011.2.25.