

物 理 实 验

第一册

(八一级用)

物理实验室

上 海 工 业 大 学

一九八二年三月

目 录

绪 论

实验数据的处理

实验一：长度的测量

实验二：物体速度和加速度的测定

实验三：重力加速度的测量

实验四：单摆与符合摆

实验五：杨氏弹性模量

实验六：线膨胀系数的测定

实验七：电学预备实验

实验八：静电场的描绘

实验九：惠斯顿电桥

实验十：凯尔文电桥

实验十一：电位差计

实验十二：电流表的改装

绪 论

一、物理实验的重要性和目的:

科学实验是研究和探索客观世界规律性的研究工作中最基本、最主要的方法。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,它为生产提供最先进的技术和最新产品。在当前各生产和科研领域中,实验更有着特殊重要的地位。为了培养又红又专的合格的技术人才,必须贯彻理论联系实际的原则,加强实验教学,十分重视对学生进行实验的基本知识、基本方法和基本技能的训练。

物理实验是工科院校的主要基础课之一,有它一定的独立性。其主要目的是:

1. 学习物理实验的基本知识,基本方法和培养实验的基本技能,学会最常用的物理量的测量方法和物理实验中常用仪器的构造原理、性能並掌握其使用方法。

2. 培养对实验数据处理的能力(包括有效数字的计算、误差估计方法和实验结果的分析),並能写出一份整洁和比较完备的实验报告。

3. 培养严肃认真,实事求是的科学态度和工作作风,逐步训练具有独立的实验工作能力,为后继专业实验打下基础。

不言而喻,在实验中爱护仪器设备,节约实验用品,这是爱护国家财产、尊重别人劳动的具体表现,是一代新人应该具备的优良品德。

二、实验方法与规则

每做一只实验,大致上可以分为预习、实验和总结三个阶段。

(一)预习阶段:充分预习是做好实验的前提,同学们必须十分重视这一环节。在实验之前,应仔细阅读实验讲义,通过预习了解该

项实验的目的和要求，掌握基本原理和主要实验步骤及注意事项。

(二)实验阶段，为了在三节课的实验时间内，能在操作技能方面得到一定的训练，必须认真操作，仔细观察，注意掌握仪器的正确使用方法，如实而有条理地记录数据。并且，不放过对可能出现的一些反常现象的注意，操作要胆大心细，注意培养独立工作能力，克服一有问题就问教师的依赖思想。实验时切忌对着讲义看一步做一步，更反对草率贪快的敷衍态度。

(三)总结阶段，整理原始数据，写好实验报告，实验报告包括以下几个内容：

- (1)实验目的
- (2)仪器名称
- (3)主要公式及线路图（如果有电学线路的话）
- (4)数据记录表（须划出表格）
- (5)数据处理（计算、作图等）及误差计算
- (6)心得体会或讨论

其中(1)~(4)必须在预习阶段完成，并写入实验报告，实验前交教师检查。

报告必须力求整齐美观，一律用统一的报告纸。作图必须用毫米方格纸。坚决反对在报告中相互抄袭和修改数据的不良行为。

为了保证同学们更好地做好实验，制定规章制度如下，应遵照执行。

物理实验室规则

一、必须保持实验室的安静、整洁。爱护仪器设备，非本组实验所用的仪器设备，未经同意，不准动用调换。

二、进行实验前必须做好预习，并交上次实验报告，经教师检查同意后，才能参加实验。

三、使用仪器前，应先了解其性能和操作方法。遵守操作规程，切实注意安全。

四、实验时要敢于实践，胆大心细，力求做到有的放矢，反对粗枝大意，盲目操作。

五、实验中若发生仪器损坏等事故，应立即控制现场，并报告指导教师，酌情处理（如需赔偿，按校统一规定办理）。

六、实验完毕，不应妨碍他组实验工作进行。整理好仪器设备、桌椅等，经指导教师同意后才可离开实验室。值日生应做好清洁整理工作。

七、本规则适用于一切进入本实验室人员。

学 生 实 验 须 知

一、物理实验是一门必修的基础课程，需经考试后评定成绩，以“优”、“良”、“中”、“及格”和“不及格”五级评分。

二、实验课不得迟到、早退，因故不能按时参加实验者，必须持证明（医务室病假单或系办公室盖章请假单）向指导教师请假，并约定补做日期，否则作旷课论，旷课者不得补做实验，旷课三次以上，本课程作“不及格”论。

三、实验前必须仔细阅读实验讲义，写好预习报告，经指导教师检查认为预习合格者方能进行实验。

四、做完实验，应请教师检查数据，签字批准后才能整理仪器离开实验室。

五、按时完成实验报告，下次实验时交给指导教师，无故不交者，不得做下次实验。

六、实验报告有严重错误的退回，订正后补交，不补交者仍作缺交论。缺交达四分之一以上者，本课程作“不及格”论。实验报告要妥善保存，以备查考。

七、实验报告中不准相互抄袭和修改原始数据，若有发现，该实验不给分数。实验报告一律用校印的实验报告纸。

物理实验课考试内容和方式

考试应从属于教学，考试的内容和方式应从教学的要求出发来考虑，考试能促进教学质量提高，但又受其他条件的制约。本课程启发性地揭示一些物理实验的理论和实践的各个方面，对学生进行实验基本知识、方法和技能技巧方面的初步训练。为后继实验课程打下一定的基础。因此考试的内容和方式是基本的和综合性的，靠一朝一日的“突击”无济于事，必须平时重视每一次实验。

考试内容：

1. 牢记实验室规则，保证人身和仪器的安全。
2. 了解已做实验中常用物理量的测量原理和方法。
3. 了解已做实验中常用物理仪器的正确使用方法。
4. 使用仪器设备是否细致谨慎，读数时是否校核避免差错？是否有初步分析实验故障原因的能力？
5. 能正确无误地按图连接电路和调整光路。
6. 能简洁清楚地记录数据，会列表格表示数据。
7. 记录和计算是否注意有效数字和单位？
8. 测量结果的误差估计，测量结果的正确表达。
9. 实验数据的图解法，掌握正确的作图方法。
10. 实验时的严肃认真态度和实事求是的科学作风。

考试方式：

1. 物理实验分二学期进行，第一学期末进行笔试一次，占总成绩的15%；第二学期末进行一次考试，占总成绩的25%；平时成绩占60%。
2. 综合分数在90分以上评为“优”，80-89分评为“良”，70-79分评为“中”，60-69分评为“及格”，60分以下为“不及格”。
3. 平时成绩的分数按各次实验内容的轻重和难度分配，从三方面考核进行综合评分：

①预习的充分程度。

②实验操作的认真熟练程度，实验态度的优劣。

③实验报告的正确性、完整性和整洁性。

4. 第二学期末的考试形式是：

在已做的全部实验中出题，每人抽一题进行操作和面试。

实验数据的处理

§ 1 测量和测量的分类

在物理实验中经常要进行各种物理量的测量，并以测量结果为依据，研究各种物理现象之间的数量关系，加以概括，发现其中的规律性。

所谓测量乃是一个认识过程，这个过程就是将被测的量与某一个被选作单位的同类量进行比较，求出它对单位的倍数，这个倍数就是我们所需要量度的数值。任何一个物理量可以看作是它的数值和所选定单位的乘积。

测量可以分为直接测量和间接测量二种。直接测量就是用直接的方法测量所得的量，如用米尺测量长度，用天平测量质量，用电压表测量电压等。

间接测量就是先测出与待测量有一定关系的诸量，然后根据有关定律或公式计算出该待测量。例如必须通过测量单摆的摆长 l 和

周期 T ，并利用公式 $T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$ ，才能求得重力加速度 $g = \frac{4\pi^2 l}{T^2}$ ，对于 g 的这种测量就属于间接测量。

§ 2 真值和算术平均值

在测量中，我们所要测的对象总有一个客观的真正大小，称为“真值”。但在实际测量中，由于测量仪器、测量的原理和方法的不完善、人们观察能力的限制等等，所得的结果和“真值”总有一定的出入，即“真值”不能得到。实验中，常对被测量进行多次测量，求出其“算术平均值”，作为“近似真值”，通常就用“近似真值”来表示测量结果（除“算术平均值”外还有“均方根平均值”等，这里不详述）。

“算术平均值”的求法：测量 n 次，测量结果为 $l_1, l_2, \dots, l_i, \dots, l_n$ ，则“算术平均值”

$$\bar{l} = \frac{l_1 + l_2 + \dots + l_i + \dots + l_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n l_i}{n}$$

例1：对某物体的长度进行五次测量： $l_1 = 2.34$ 厘米， $l_2 = 2.34$ 厘米， $l_3 = 2.35$ 厘米， $l_4 = 2.32$ 厘米， $l_5 = 2.35$ 厘米，求其算术平均值 $\bar{l}$ 。

解：
$$\bar{l} = \frac{2.34 + 2.34 + 2.35 + 2.32 + 2.35}{5} = 2.34 \text{ 厘米}$$

§ 3 误差和误差的分类

如前所述，任何测量不能得到“真值”，即测量所得的结果和“真值”总有一定的偏差，这种偏差就称为误差。

产生误差的来源是多方面的，按其产生的原因和性质，可以分为三大类：

(一)系统误差，它一般是由于(1)测量仪器的缺点（例如仪器刻度不准，仪器安置不正确等）；(2)实验理论和实验方法不够完善（例如测量物体重量时没有考虑到空气阻力和支架与落体间的摩擦力的影响等）；(3)实验过程中没有严格遵守操作规程（例如用端部磨损的米尺量长度，没有用米尺的中部测量等）等等原因而引起的。这类误差的特点是它具有一定的规律性，在同样条件下重复测量时所得结果常常是偏大或是偏小。因此它可以通过一定的方法检查出来，而且有办法使它避免或减小。

(二)偶然误差，这是由于我们的视觉、听觉或其他感觉器官的缺点和限制，以及在实验过程中随时会遇到的一些不能预料的因素所引起的。这类误差和系统误差有很大的区别，由于引起这类误差的都是一些不能掌握和预料的偶然因素，所以不能用防止和修正的办法排除这种误差，通常采用多次重复测量的方法来减小偶然误差的

影响。实践的经验 and 概率论理论都证明了在反复多次进行同一测量的情况下，每一次所测得的结果比真值偏大或偏小是同样可能的，同时，在这许多次测量中，得到与真值相近的结果的次数总是比较多的。根据概率论理论还可以证明：多次测量结果的算术平均值将较接近于该物理量的真值，随着测量次数的增加，这种接近程度也相应提高。因此为了消除偶然误差，处理实验数据时常常以多次测量的算术平均值作为实验最终结果。

(三) 过失误差。由于实验时的疏忽，导致记录错误或读数错误而引起的误差称为过失误差，例如把 53.2 厘米误读成 58.2 厘米等。这种误差的出现往往会使得实验结果和理论估计值偏离很大，此结果显然是不合理的，在最后计算中应将它们剔除。

§ 4 直接测量结果的误差

由例 1，测出某物体的长度 $\bar{l} = 2.34$ 厘米，这样来表示测量的结果是不完整的，因为它没有指出测量结果的准确性和可靠程度。通常用绝对误差和相对误差来表示测量结果的优劣，可由下法求得：

1. 绝对误差： $\Delta l_1 = \bar{l} - l_1$ (单位) 称第一次测量的绝对误差
 $\Delta l_2 = \bar{l} - l_2$ (单位) 称第二次测量的绝对误差

 $\Delta l_i = \bar{l} - l_i$ (单位) 称第 i 次测量的绝对误差

 $\Delta l_n = \bar{l} - l_n$ (单位) 称第 n 次测量的绝对误差

$$\Delta \bar{l} = \frac{\sum_{i=1}^n |\bar{l} - l_i|}{n} \quad \text{(单位) 称平均绝对误差 (简称绝对误差)}$$

2. 测量结果的表示：

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

此式表示该测量结果 $\bar{l}$ 在 $\bar{l} + \Delta\bar{l}$ 和 $\bar{l} - \Delta\bar{l}$ 范围之内，显然绝对误差的大小可评价测量结果的准确程度。常称为“真值表达式”。

3. 相对误差：

绝对误差常常还不能表示出误差的严重程度，因此在实验中还要采用相对误差来评价测量结果。

$$\delta = \frac{\Delta\bar{l}}{\bar{l}} \times 100\%$$

δ 称相对误差，它表示绝对误差在整个物理量中所占的百分比。在表示测量结果时，既要写出绝对误差，又要写出相对误差，其原因是二者从不同角度反映了测量的误差特性。

4. 百分差：

有时在实验中，还常用一种百分差，它是将测量值 $\bar{l}$ 与公认值（或理论值）比较得到的。表示方法为：

$$\delta = \frac{|\bar{l}_0 - \bar{l}|}{\bar{l}_0} \times 100\%$$

$\bar{l}_0$ 为理论值（或公认值），显然，百分差表示了测量值与理论值（或公认值）的偏离程度。

百分差也是一种相对误差。

注意：绝对误差有单位，相对误差没有单位。

例2. 总结前面的讨论，可将例1的直接测量结果的误差计算步骤如下：

①把测量值填入表格中

次 数 \ 项 目	l_i (厘米)	Δl_i (厘米)
1	2.34	0
2	2.34	0
3	2.35	-0.01
4	2.32	0.02
5	2.35	-0.01
平均	2.34	0.01

②应用 $\bar{l} = \frac{\sum_{i=1}^n l_i}{n}$ 计算算术平均值，填入表格中。

③应用 $\Delta l_i = \bar{l} - l_i$ 计算各次测量的绝对误差，填入表格中。

④应用 $\overline{\Delta l} = \frac{\sum_{i=1}^n |\Delta l_i|}{n}$ 计算绝对误差，填入表格中。

⑤其相对误差为 $\frac{\overline{\Delta l}}{\bar{l}} = \frac{0.01}{2.34} = 0.4\%$

⑥将测量结果表示成

$$l = (2.34 \pm 0.01) \text{ 厘米}$$

$$\delta = 0.4\%$$

5. 仪器误差：

直接测量的结果还受到所用仪器精度的限制，这就是所谓仪器误差。仪器误差一般定为仪器最小分度的 $\frac{1}{2}$ ，例如：以毫米为最小

分度的米尺，其仪器误差为 0.5 毫米，外径千分卡的仪器误差为 0.005 毫米。但对一些无法进行估读的仪器，例如：游标卡尺，停表等，就取仪器的最小刻度作为仪器误差。通常仪器误差由实验室给出。

仪器误差是仪器固有的，多次测量只能消除或减小偶然误差而不能消除或减小仪器误差。因此，我们总是取绝对误差和仪器误差二者中较大的那一个作为测量结果的误差。若某一物理量在实验中只测一次，测量结果的误差就取该仪器的仪器误差。

若例 2 中，测量仪器为米尺（仪器误差为 0.05 厘米），则最后测量结果为 $l = (2.34 \pm 0.05) \text{ 厘米}$
 $\delta = 2\%$

§ 5 间接测量结果的误差：

只需要测量一个物理量就可以得到所要求的实验结果，这种情况是很少的，在大多数情况下是间接测量的实验。

例如，长方形的边长各为： $A = \bar{A} \pm \overline{\Delta A}$ ， $B = \bar{B} \pm \overline{\Delta B}$ 。
 那么其面积 $S = ?$ $\Delta S = ?$ 要回答这些问题得先掌握四则运算的误差计算公式。

1. 和的误差计算

设： $A = \bar{A} \pm \overline{\Delta A}$ ， $B = \bar{B} \pm \overline{\Delta B}$ ， $N = A + B$

求： ΔN ， $\frac{\Delta N}{N}$

解： $\because N \pm \Delta N = (\bar{A} \pm \overline{\Delta A}) + (\bar{B} \pm \overline{\Delta B})$
 $= (\bar{A} + \bar{B}) \pm (\overline{\Delta A} \pm \overline{\Delta B})$

$\therefore N = (\bar{A} + \bar{B})$

$\pm \Delta N = \pm (\overline{\Delta A} \pm \overline{\Delta B})$

在误差计算时，应当考虑最坏情况——误差最大情况，显然如果在 $\overline{\Delta A}$ 与 $\overline{\Delta B}$ 前取相同符号，就得到最大的误差。

$$\therefore \pm \Delta N = \pm (\overline{\Delta A} + \overline{\Delta B})$$

$$\frac{\Delta N}{N} = \frac{\overline{\Delta A} + \overline{\Delta B}}{\overline{A} + \overline{B}}$$

例 3. 设: $A = (2.73 \pm 0.02)$ 厘米, $B = (3.77 \pm 0.02)$ 厘米,

$$N = A + B$$

则: $N \pm \Delta N = (6.50 \pm 0.04)$ 厘米

$$\frac{\Delta N}{N} = 0.6\%$$

2. 积的误差计算

设: $A = \overline{A} \pm \overline{\Delta A}$, $B = \overline{B} \pm \overline{\Delta B}$, $N = A \cdot B$

求: ΔN , $\frac{\Delta N}{N}$

$$\begin{aligned} \text{解: } \therefore N \pm \Delta N &= (\overline{A} \pm \overline{\Delta A})(\overline{B} \pm \overline{\Delta B}) \\ &= \overline{A} \cdot \overline{B} \pm \overline{A} \cdot \overline{\Delta B} \pm \overline{B} \cdot \overline{\Delta A} \pm \overline{\Delta A} \cdot \overline{\Delta B} \\ &= \overline{A} \cdot \overline{B} \pm \overline{A} \cdot \overline{\Delta B} \pm \overline{B} \cdot \overline{\Delta A} \end{aligned}$$

$$\therefore N = \overline{A} \cdot \overline{B}$$

$$\pm \Delta N = \pm \overline{A} \cdot \overline{\Delta B} \pm \overline{B} \cdot \overline{\Delta A}$$

考虑到最不利的情况, 得到

$$\pm \Delta N = \pm (\overline{A} \cdot \overline{\Delta B} + \overline{B} \cdot \overline{\Delta A})$$

$$\frac{\Delta N}{N} = \frac{\overline{A} \cdot \overline{\Delta B} + \overline{B} \cdot \overline{\Delta A}}{\overline{A} \cdot \overline{B}} = \frac{\overline{\Delta A}}{\overline{A}} + \frac{\overline{\Delta B}}{\overline{B}}$$

例 4. 设: $A = (3.00 \pm 0.03)$ 厘米, $B = (5.00 \pm 0.05)$ 厘米,

$$N = A \cdot B$$

则 $N = 3.00 \times 5.00 = 1.50 \times 10$ 厘米²

$$\frac{\Delta N}{N} = \frac{0.03}{3.00} + \frac{0.05}{5.00} = 2\%$$

$$\Delta N = N \cdot \frac{\Delta N}{N} = 1.50 \times 10 \times 0.02 = 0.3 \text{ 厘米}^2$$

$$= 0.03 \times 10 \text{ 厘米}^2$$

$$\therefore N \pm \Delta N = (1.50 \pm 0.03) \times 10 \text{ 厘米}^2$$

至于减法和除法，分别为加法和乘法的逆运算，必然也会得到同样的结论。

间接测量误差的四则运算规则，可以归纳如下：

(1) 和与差的绝对误差等于各量绝对误差之和。简述为加减时绝对误差相加。

(2) 积和商的相对误差等于各量相对误差之和。简述为乘除时相对误差相加。

3. 常用间接测量误差计算公式表：

计算关系式	间接测量误差公式	
	绝对误差	相对误差
$N = A + B + C + \dots$	$\pm(\Delta A + \Delta B + \Delta C + \dots)$	$\frac{\Delta A + \Delta B + \Delta C + \dots}{A + B + C}$
$N = A - B$	$\pm(\Delta A + \Delta B)$	$\frac{\Delta A + \Delta B}{A - B}$
$N = A \cdot B \cdot C$	$\pm(AB\Delta C + BC\Delta A + AC\Delta B)$	$\frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta B}{B} + \frac{\Delta C}{C}$
$N = A^n$	$\pm nA^{n-1} \Delta A$	$n \frac{\Delta A}{A}$
$N = \sqrt[n]{A}$	$\pm \frac{1}{n} A^{\frac{1}{n}-1} \Delta A$	$\frac{1}{n} \frac{\Delta A}{A}$
$N = \frac{A}{B}$	$\pm \frac{B\Delta A + A\Delta B}{B^2}$	$\frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta B}{B}$
$N = \sin A$	$\pm \cos A \cdot \Delta A$	$\operatorname{ctg} A \cdot \Delta A$
$N = \cos A$	$\pm \sin A \cdot \Delta A$	$\operatorname{tg} A \cdot \Delta A$
$N = \lg A$	$\pm \frac{\Delta A}{A}$	$\frac{\Delta A}{A \lg A}$

在更复杂的情况下，设 N 是 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 的函数

$$N = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

则利用微分方法，可得最大的绝对误差

$$\pm \Delta N = \pm \left(\left| \frac{\partial f}{\partial x_1} \right| \Delta x_1 + \left| \frac{\partial f}{\partial x_2} \right| \Delta x_2 + \dots + \left| \frac{\partial f}{\partial x_n} \right| \Delta x_n \right)$$

§ 6 有效数字的一般概念

任何测量结果都只能是被测物理量的近似值而非真值。这一事实，在量度结果上的反映是所得的读数其位数不能无限制增加而只能是有限的位数。以米尺量长度为例，如图 1 所示，我们很容易读出棒的长度大于 32.3 厘米，而小于 32.4 厘米。作进一步的估计，可以得到读数 32.38 厘米，其中 32.3 是从刻度上准确读出的，称之为可靠数字。而 0.08 是估计出来的，它可能有 0.01 的误差，称之为可疑数字。我们把可靠数字和一位可疑数字合称为有效数字。这样读数 32.38 厘米不仅表示了长度的数值和单位，而且还表示了测量进行到 0.01 厘米的准确度。

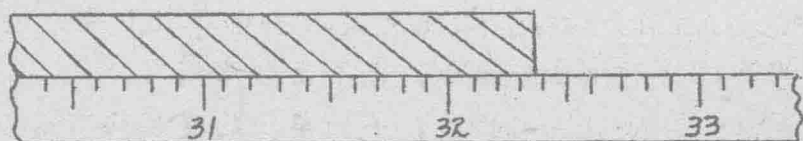


图 1

有效数字的问题与计算也有密切关系，仍以测量棒的长度为例。测量了六次，得到如下的结果。

l_1	l_2	l_3	l_4	l_5	l_6
2.32 厘米	2.34 厘米	2.36 厘米	2.33 厘米	2.35 厘米	2.35 厘米

则长度 l 的算术平均值按计算为：