

高等学校数学用书
浙江大学出版社



物理实验

南扬苏 编

高等学校教学用书

物 理 实 验

南 扬 苏 编

浙 江 大 学 出 版 社

内 容 提 要

本书根据原教育部1980年颁发的高等师范院校非物理类各专业的物理实验教学大纲和近年来教学改革的成功经验编写而成。

全书共选编了三十一个物理实验，原理简要，叙述清楚，内容丰富且有选择余地。在实验的仪器选型方面照顾了多数院校的现状，适用面广。既可供高等师范院校非物理类各专业作物理实验教材使用，也可供电大、职大、夜大等有关专业作教材或参考书。

物 理 实 验

南 扬 苏 编

责任编辑 陈晓嘉

* * *

浙江大学出版社出版

余杭三墩印刷厂印刷

浙江省新华书店发行

* * *

开本850×1168 1/32 9印张 字数227千字

1988年8月第一版 1988年8月第一次印刷

印数1-6500

ISBN 7-308-00085-0

O·034 定价：2.00元

GF 37/08

前 言

目前，高等师范院校非物理类专业的物理实验，大多是从物理专业的实验教材中摘选的，因而很难适应非物理类各专业的教学需要。我们从多年的教学实践中意识到，为非物理类各专业学生编写一本合适的实验教材，是提高实验教学质量的一个关键。为此，我们南京师大、扬州师院、苏州大学从事实验教学的人员，在有关方面的支持下组成了编写组。

高师院校非物理专业目前开设物理实验的有化学、生物、数学、地理、体育、哲学等系科，其中课时较多、要求较高的是化学、生物两系。因此，在教材编写过程中，我们主要考虑了他们的需要，同时兼顾到数学、地理等专业。考虑到各专业各学科的不断更新和发展，本书选编的实验题目与原教育部1980年颁发的大纲选题相比，电学与光学的比重有所增加，而且编排了历来缺门的原子物理实验，以适应非物理类各专业后续课程的需要。当然，作为一门基础课程，本教材的出发点，仍然是加强基础训练。

此外，考虑到不同专业对物理实验的要求不尽相同，以及各学校的条件也有差别，我们在实验内容安排上有必作和选作（用*号标出）两部分；有些栏目则安排学生自行设计。每个实验末附有思考题，以启迪思维。

本书物理量的计量单位，全部使用法定计量单位。为便于使用，书末附有常用物理量的常数表。

参加本教材编写工作的有南京师范大学的顾志敏（绪论和实验一）、兰鸿志（实验四、十三、十四、十六、二十及附录I）、

金昌祚（实验五、十一、十五、十七、十八、十九、二十一及附录Ⅲ），扬州师范学院的宋福海（实验二、九、二十四、二十五、三十、三十一）、平乃彬（实验三、六、七、八、十、十二）和苏州大学的王定兴（实验二十二、二十六及附录Ⅱ）、金雅静（实验二十三、二十七、二十八、二十九）。由平乃彬（力、热学部分）、金昌祚（电磁学部分）、王定兴（光学，原子物理学部分）修改定稿，最后由金昌祚和平乃彬校阅修订，并统一了全文的符号和计量单位。浙江大学的张森副教授为本教材的修改提出了很多宝贵意见，不少学校的同行也提出了有益的建议，在此一并表示感谢。由于我们水平有限，教材中错误疏漏之处难免，还望广大读者批评指正。

编者

1987年12月

目 录

绪论	
§1 物理实验课的目的	1
§2 测量与误差	2
§3 误差的估计	7
§4 有效数字及其运算规则	14
§5 实验图线的描绘	17
实验一 随机误差的正态分布	22
实验二 长度和质量的测量	30
实验三 重力加速度的测定	42
方法(一) 单摆法	
方法(二) 自由落体法 (光电计时)	
实验四 学习使用万用电表	52
实验五 示波器的使用	64
实验六 验证动量守恒定律	76
实验七 振动的研究	82
实验八 用三线扭摆法测定物体的转动惯量	87
实验九 弦振动的研究	93
实验十 冰的溶解热的测定	96
实验十一 液体粘滞系数的测定	101
方法(一) 落球法	
方法(二) 毛细管法	
实验十二 液体表面张力系数的测定	108
方法(一) 毛细管法	
方法(二) 拉脱法	
实验十三 非线性元件的伏安特性	115
实验十四 电表的改装和校准	120

实验十五	静电场的描绘	125
实验十六	惠斯登电桥测电阻	126
实验十七	用直流电位差计测电动势	135
	方法(一) 用滑线型电位差计	
	方法(二) 用箱式电位差计	
实验十八	霍尔效应	145
实验十九	RLC 串联谐振电路的研究	150
实验二十	温度的电测法	159
实验二十一	简单恒温自动控制	169
实验二十二	透镜成像的特性及其实用光路	175
实验二十三	阿贝折射仪的原理及应用	185
实验二十四	光的薄膜等厚干涉	193
	方法(一) 牛顿环	
	方法(二) 劈尖	
实验二十五	迈克尔逊干涉仪的调节和使用	200
实验二十六	单缝和光栅的衍射	206
实验二十七	偏振现象的观察和研究	217
实验二十八	光电效应	229
实验二十九	激光全息	235
实验三十	用分光计观测原子光谱	242
实验三十一	放射性的观察和测量	248
附录 I	电学基本仪器简介	258
	Ⅰ 光源	266
	Ⅱ 物理常数表	271
	1 基本物理常数	
	2 在20℃时常用固体和液体的密度	
	3 在标准大气压下不同温度时水的密度	
	4 某些城市的重力加速度	
	5 在不同温度下水与空气接触时的表面张力系数	
	6 在20℃时与空气接触的液体表面张力系数	
	7 不同温度时水的粘滞系数	
	8 液体的粘滞系数	

9 某些金属和合金的电阻率及温度系数

10 常用光源的谱线波长

11 旋光物质在不同波长下的旋光率

绪 论

§ 1 物理实验课的目的

物理学是一门建立在实验基础上的学科，物理学的原理、定律是在总结大量实验事实的基础上概括出来的，即使根据理论推导得出的结论，也必须通过实验加以检验。只有被可重复的实验证明是正确的理论，才能被公认为科学理论。

在自然界中，物质的运动总是以比较复杂的形式进行的。对某一现象的观察会因受到其它现象的掩盖，而使这一现象的本质不易暴露，有时还因发生条件的限制，而不能在短时间内对某一现象进行多次重复的观察。物理实验就是用人工的方法创造出各种特定条件的环境，以暴露事物发展的本质，进而研究事物中各种因素之间的关系，使我们能够可靠地作出科学的结论。概括地讲，物理实验就是通过观察、测量或验证物理量之间的定量关系得到物理规律。但规律的正确与否，还要再到实践中去检验。由此可知物理实验既是物理学理论的源泉，又是检验物理理论真理性的标准。

对非物理专业学生开设物理实验课的目的如下：

1. 学习物理实验的基本知识、基本方法，培养实验技能，具体包括：

(1) 在实验中能对观察到的现象、测量的数据进行正确的记录，并能对实验结果进行分析，写出完整的实验报告；

(2) 弄懂实验的基本原理，熟悉一些物理量（例如长度、

质量、重力加速度、温度、比热容、电阻、电压、波长、折射率等)的测量方法;

(3) 熟悉常用仪器及测量工具的基本原理和结构,并能正确使用。

2. 通过实际的观察和测量,加深对物理概念和规律的认识和理解。

3. 培养严格的科学工作态度、严谨的工作作风及良好的实验习惯。

§ 2 测量与误差

2-1 测量的分类

测量是物理实验必不可少的重要手段。所谓测量就是将被测量与已知量进行比较,用已知量来表示被测量。如被测量是已知量的几倍或几分之几等。这些已知量称作计量单位。本来计量单位的选择具有任意性,因此在人类历史上的不同时期、不同国家或地区,同一物理量有许多不同的计量单位。为了便于国际贸易以及科技文化的交流,国际计量大会于1960年确定了国际单位制(它的国际符号是SI)。国际单位制中有七个基本单位,它们是长度的单位米(m),质量的单位千克(kg),时间的单位秒(s),电流强度的单位安培(A),温度单位开尔文(K),物质的量的单位摩尔(mol),发光强度的单位坎德拉(cd)。除基本单位以外,还有辅助单位以及由七个基本单位组成的导出单位等。

在测量时,待测量与已知量比较得到的倍数(或分数)称为测量值。从测量方法来看,测量一般分为直接测量与间接测量。

通过仪器可以直接读出被测量数值的,称为直接测量。例如用米尺测长度,用天平测物体的质量,用温度计测温度,用伏特

计测电压等等。

由直接测得量通过公式计算而求得待测量的方法称为间接测量。例如测定物体的密度 ρ ，先测出物体的质量 M 和体积 V ，然后用公式 $\rho = M/V$ 计算出密度。再如测量导体的电阻 R ，可以用伏特计测得导体两端的电压 U 和用电流计测得通过该导体的电流 I ，然后用公式 $R = U/I$ 计算出导体的电阻。用上述方法得到的密度 ρ 和电阻 R ，都是间接测得量。

有些物理量既可以间接测量，也可以直接测量，这取决于实验的方法和使用的仪器。如上面讲的导体电阻，用伏安法测量是间接测量，若改用欧姆表测量，就成为直接测量了。尽管科学技术的发展，已为直接测量提供了更多、更精密的各种仪器，但到目前为止，直接测量的物理量还是少数，大多数物理量仍需要通过间接测量。

2-2 误差及其分类

物理量客观存在的值称为真值。测量就是为了获得被测物理量的真值。但是实际上任何一种测量，无论所用的仪器有多么精密、方法如何至臻完善、实验者多么细心，测量的结果与真值总有差异，这种差异称之为误差。

根据误差的性质和产生的原因，可将误差分为系统误差、随机误差（偶然误差）和粗差三种。

系统误差

这种误差表现为测量的结果向某一方向偏离，或者按确定的规律变化，产生的原因有以下几方面：

（1）仪器的误差 例如由天平两臂不等，米尺、仪表盘面、温度计等的刻度不均匀等产生的误差。

（2）理论或实验方法的误差 这是由理论计算公式的近似

或测量方法考虑不周带来的误差。例如，用单摆测重力加速度的实验，计算公式是近似的；热学实验中热量散失的忽略等等。

(3) 测量者个人因素带来的误差 这是指测量者本人生理上的特点（譬如反应的快慢、个人的固有习惯）使得测量值偏大或偏小所引入的误差。

造成上述系统误差的各种原因，在某个具体的实验中并非是等量齐观的。有时可能仪器引起的误差是主要的，其它因素是次要的；有时则可能由测量者的个人因素引起的误差是主要的。因此必须对产生系统误差的主要原因作具体分析并加以克服。这有赖于实验者的理论水平与经验。

随机误差（偶然误差）

随机误差是由于某些偶然因素或不确定因素造成的，它来源于人的感官灵敏度的限制或外界环境的干扰等。例如每人的估读数不一致，空气的流动、温度的起伏以及仪器受到振动影响等等。因此，某一次测量值误差的大小难以预料。但是在相同条件下对同一物理量进行大量的观测将显示出统计规律：

①绝对值相等的正误差和负误差出现的次数相同；

②绝对值小的误差比绝对值大的误差出现的机会多；

③误差超出一定范围的可能性（几率）很小。这种规律可用图0-1所示的曲线表示。此曲线称为误差的正态分布曲线，此曲线的函数形式为

$$f(\epsilon) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{\epsilon^2}{2\sigma^2}\right)$$

式中 ϵ 是绝对误差， σ 为标准误差。

根据上述特点，我们可以用增加测量次数，取平均值的方法来减少随机误差。

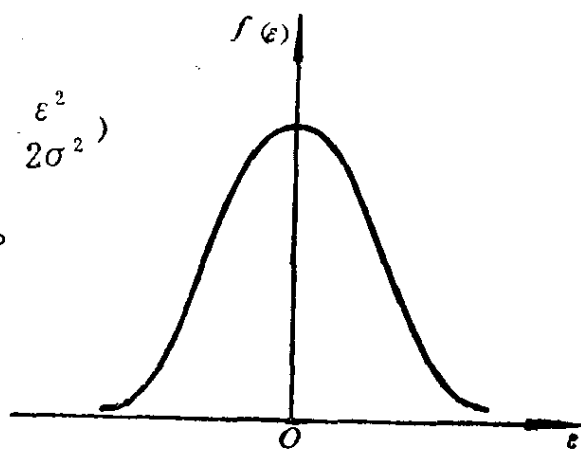


图0-1

粗差

这是由于实验者在实验过程中犯有某种不应有的错误引起的误差。例如读错数字、记录写错、计算错误等等。此种误差只要多方警惕，细心操作，是完全可以避免的。

2-3 绝对误差与相对误差

绝对误差是待测物理量的测量值（用 x 表示）与真值（用 μ 表示）之差，用 ε 表示绝对误差，则

$$\varepsilon = x - \mu \quad (1)$$

它反映了测量值偏离真值的大小。绝对误差只能评价在相同条件下，对同一物理量测量的可靠性，对不同的物理量或在不同条件下测量的同一物理量，绝对误差值不能反映测量的可靠程度。故引入误差的另一种表示方法——相对误差。

相对误差定义为绝对误差与测量值之比，用 d 表示相对误差，即：

$$d = \frac{\varepsilon}{x} \quad (2)$$

显然绝对误差的单位与被测量相同，而相对误差是无量纲的。因此，相对误差适用于各种不同场合、不同物理量测量的误差大小的比较。例如用米尺测得物体长度为10.00cm，它的绝对误差为0.05cm；用分析天平称得物体的质量为50.015g，它的绝对误差为0.001g。要比较这两种测量结果的可靠性，只能用相对误差。前者为 0.5×10^{-2} ，后者为 0.2×10^{-4} ，因此后者可靠性比前者大得多。再如用同一天平称物体的质量，一为5.000g，另一为50.000g，它们的绝对误差均为0.001g，而相对误差，前者为 0.2×10^{-3} ，后者为 0.2×10^{-4} ，所以在这里要用相对误差去评价测量结果的可靠性。

在普通物理实验中，有些物理量，例如物体的密度、物质的比热、电阻率等有公认的标准值，称为约定真值（用 A 表示）。

因此，相对误差表示为

$$\delta = \frac{|x - A|}{A} \times 100\% \quad (3)$$

此相对误差又称为百分误差。

2-4 测量的精密度 准确度 精确度

精密度、准确度和精确度都是评价测量结果好坏的指标，但这三个指标的涵义不同，使用时应加以区别。

测量的精密度高，是指测量数据比较集中，随机误差较小，但系统误差大小不明确。

测量的准确度高，是指测量数据的平均值偏离真值较少，测量结果的系统误差较小，但数据分散的情况即随机误差的大小不明确。

测量的精确度高，是指测量数据集中在真值附近，即测量的系统误差和随机误差都比较小，精确度是对测量的随机误差与系统误差的综合评定。

图 0-2 以打靶时弹着点的情况为例，说明了这三个指标的

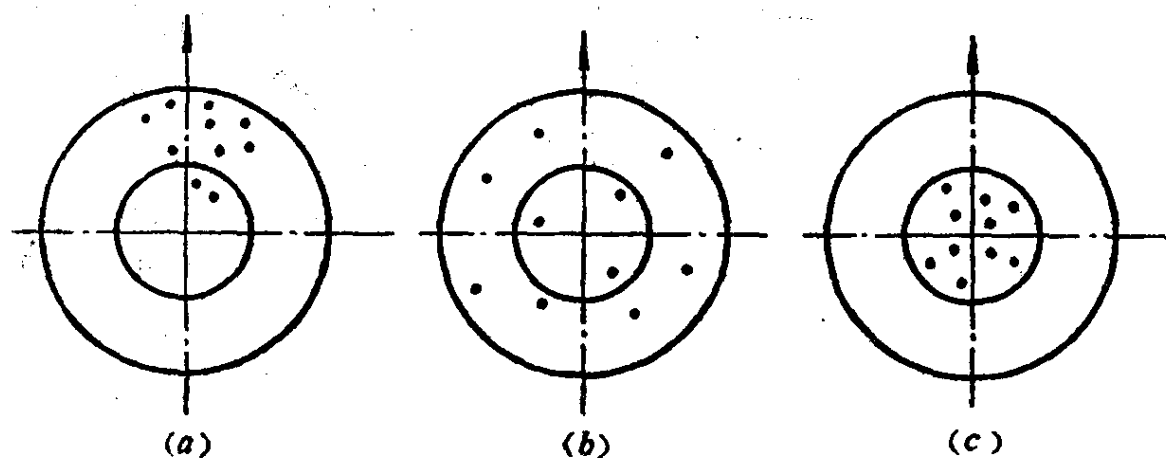


图 0-2

意义：图 0-2 (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均较好，即精确度高。

§ 3 误差的估计

3-1 直接测量值的误差估计

单次直接测量的误差估计

有时，由于条件不许可，对某物理量只能进行一次测定，例如测定某状态下物体的温度；有时，对于精度要求不高，测量也无需多次重复。这些情况下的测量误差要根据仪器的精度来估计。一般，仪器误差在出厂鉴定书或仪器铭牌上直接注明，这个误差可以作为单次直接测量误差的估计值。若有些仪器没有注明，也可取仪器最小刻度的一半作为单次测量的误差估计，例如用米尺测量长度，米尺最小刻度为 1 mm，则可估计误差为 0.5 mm。

用天平称衡物体质量时，空载时天平指针的停点和加载后天平指针的停点一般是不一致的，其差异将引起测量误差。当两停点之差不超过一个分度时，可取天平指针移动一分度时，两侧的质量差额为测量误差。

多次测量的算术平均值与误差估计

(1) 算术平均值

在相同条件下，对某一物理量 x 进行 n 次重复测量，其测量值分别为 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ ，则算术平均值为

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (4)$$

根据误差的统计理论，在一组 n 次测量的数据中，算术平均值最接近于真值，因而称为测量的最佳值或近真值。在忽略系统误差的情况下，测量次数无限增加，算术平均值无限接近于真值。

在相同条件下进行实验时，由于偶然误差的存在，使重复测量值互不相同。那么如何来评价测量值的好坏呢？物理实验中常用平均绝对误差和标准误差来评价测量的优劣。

(2) 平均绝对误差

各次测量值与算术平均值之差称为绝对误差，即

$$\Delta x_i = |x_i - \bar{x}| \quad (i=1, 2, \dots, n)$$

平均绝对误差（用 η 表示）定义为各次测量绝对误差的平均值，即

$$\eta = \frac{1}{n} \sum |x_i - \bar{x}| \quad (5)$$

(3) 测量列的标准误差（均方误差）

测量列的标准误差（用 σ 表示）定义为

$$\begin{aligned} \sigma &= \sqrt{\frac{(x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + \dots + (x_n - \bar{x})^2}{n-1}} \\ &= \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \end{aligned} \quad (6)$$

式中 $(x_i - \bar{x})^2$ 为第 i 次测量值绝对误差的平方， n 为测量次数。

平均绝对误差和标准误差都可以作为测量值误差的量度，它们都表示在一组多次测量的数据中，各个数据分散的程度。如果各个数据之间差别较大，那么平均绝对误差与标准误差也都较大，这说明测量不精密，偶然误差较大。但是，用标准误差比用平均绝对误差好，因为单次测量的误差平方之后，较大的误差更显著的反映出来，这就更能说明数据的分散程度，例如甲、乙二人打靶，甲击中处离靶心为1，2，3，4 cm，如图0-3(a)所

示，乙击中的四点都在离靶心 2.5cm 处，如图 0-3(b) 所示，两人的平均绝对误差都为 2.5，但乙的射击精密度比甲要高，他们的标准误差甲为 $\sqrt{10}$ ，乙为 $\sqrt{25/3}$ 。目前，

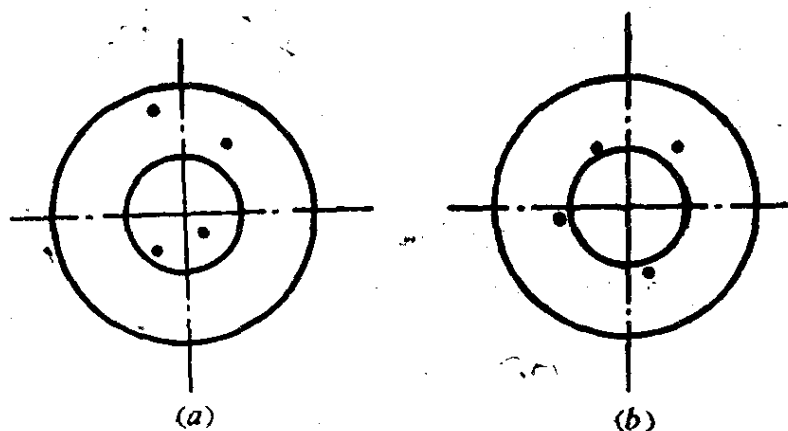


图 0-3

世界上多数国家的物理科学论文都是采用标准误差去评价数据的。

(4) 算术平均值的误差

1) 算术平均值的标准误差

一测量列 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 的标准误差为 σ ，算术平均值的标准误差为 S 。因为算求平均值的可靠性高于任何测量值，所以 S 必定小于 σ 。理论分析表明，一组 n 个测量值的标准误差 σ 与算术平均值的标准误差 S 之间的关系是

$$S = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (7)$$

由(7)式可看出，增加测量次数可以提高测量结果的精密度。但由于 S 与 $\sqrt{n}$ 成反比，所以 n 不必测得过多。在普通物理实验中，一般 n 在 4 ~ 20 次之间即可。

2) 算术平均值的平均绝对误差

算术平均值的平均绝对误差是测量列的平均绝对误差 η 的 $\sqrt{n}$ 分之一，即

$$T = \frac{\eta}{\sqrt{n}} \quad (8)$$