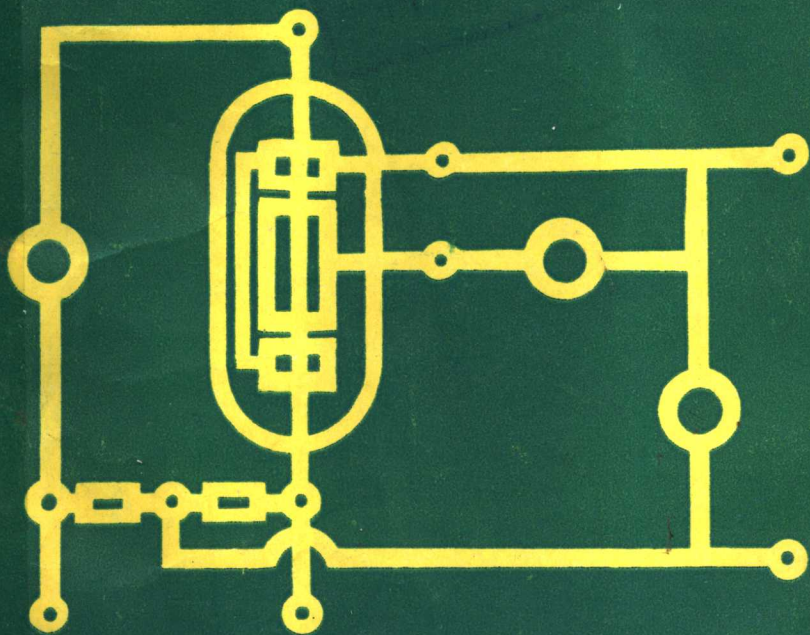


物理实验

PHYSICS
LABORATORY

● 潘人培 主编
● 高等学校教学用书



● 南京工学院出版社

物 理 实 验

(工 科 用)

潘人培 主编

南京工学院出版社

内 容 提 要

本书是根据高等工业学校物理学实验教学大纲,并参照工科物理实验课程教学基本要求编写的。内容包括:实验绪论、力学和热学实验、电磁学实验、光学实验、近代和综合物理实验等五部分,共88个实验。大部分实验分基本内容和提高内容两部分,以适应不同教学要求。书末附录给出了部分实验的计算机程序和全书实验仪器的配置表。

本书可作为工科各专业的物理实验教材,也可供函授大学、职工大学使用。

特约编辑 吴宗汉

物 理 实 验

潘人培 主编

南京工学院出版社出版

南京四牌楼2号

江苏省新华书店发行 泗阳印刷厂印刷

开本850×1168毫米 1/32 印张11.875 字数307千字

1986年9月第一版 1986年11月第一次印刷

印数1—10000册

书号: 13409·004 定价: 2.10元

前 言

本书是根据高等工业学校物理学实验教学大纲，并参照1985年10月重庆会议和1986年5月杭州会议讨论的工科物理实验课程教学基本要求，结合南京工学院物理教研组开设的普通物理实验课程和使用的教材，整理编写而成的。

本书内容包括实验绪论、力学和热学实验、电磁学实验、光学实验、近代和综合物理实验等五部分，共33个实验。鉴于目前大多数高等工业学校的现状各异，本书在编写时注意了以下几个方面的问题：

1 本书的总学时约为90学时，较工科物理实验课教学基本要求规定的60学时多50%的内容。以便各校在使用本书时可根据实际情况和实验总学时数予以取舍。

2 按照循序前进的原则，全书由浅入深，逐步提高。在各实验的编写上为“前详后略”。并注意使各实验相对独立，便于不同循环的安排。

3 本书着重加强基本技能的培养和实验方法的训练。对大多数实验都包括基本内容和选做内容（带*号）两部分，以适应不同课时（2学时或3学时）的学校和不同水平学生的需要，便于因材施教。在各部分实验后面，又安排了设计性或综合性实验（实验9、21、28、33）。最后安排了四个近代物理实验（实验29、30、31、32），以利于进一步培养和提高学生的实验能力。

4 书后提供了全部实验仪器的配置表。所用的仪器既注意到目前大多数高等工业学校的现有条件，又考虑到新建院校筹建物理实验室的需要。

本书由潘人培主编。参加本书编写的有李士微（实验19、20、31、32），董宝昌（绪论，实验4、7），钱锋（实验16、

17)，朱桐华（实验10），赵念泽（实验14），胡建华（实验6），潘人培（其余22个实验）。胡光鲁为本书部分实验编写了计算机程序，李士徵为本书绘制了全部插图。

叶善专，朱桐华对本书作了全面审阅和修改，我们谨向他们以及对在本书使用过程中提出过宝贵意见的同志，一并致以衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中错谬之处，在所难免，谨希读者批评指正。

编 者
一九八六年八月

目 录

第一部分 绪 论

I 物理实验课程的地位、作用和任务	(1)
II 误差和有效数字	(2)
III 图示法和图解法	(16)

第二部分 力学和热学实验

实验一 游标尺、螺旋测微计的原理和使用方法	(24)
实验二 物体密度的测定	(39)
实验三 金属杨氏弹性模量的测定	(49)
实验四 用自由落体仪测定重力加速度	(58)
实验五 液体表面张力系数的测定	(67)
实验六 用三线扭摆法测定物体的转动惯量	(77)
实验七 驻波实验	(84)
实验八 弹簧振子周期公式的研究	(91)
实验九 金属线胀系数的测定 (简单设计性实验)	(97)
实验十 (A) 气垫导轨上的实验 (一)	(101)
实验十 (B) 气垫导轨上的实验 (二)	(109)

第三部分 电磁学实验

实验十一 电磁学实验中的常用基本仪器	(118)
实验十二 惠斯通电桥的原理和使用	(134)
实验十三 电位差计的原理和使用	(142)
实验十四 金属电阻温度系数的测定	(153)
实验十五 电子荷质比的测定	(166)
实验十六 示波器的使用	(179)
实验十七 RLC 串联电路的暂态过程	(196)
实验十八 学习灵敏电流计的使用	(206)

实验十九	用模拟法测绘静电场·····	(216)
实验二十	用霍耳法测量磁场·····	(227)
实验二十一	改装电表(简单设计性实验)·····	(235)

第四部分 光学实验

实验二十二	薄透镜焦距的测定·····	(238)
实验二十三	光电效应——光电管特性的研究·····	(245)
实验二十四	分光计的调整和三棱镜折射率的测定·····	(253)
实验二十五	用分光计进行光谱定性分析·····	(263)
实验二十六	牛顿环和劈尖干涉实验·····	(272)
实验二十七	单缝衍射实验·····	(281)
实验二十八	氢原子光谱(简单设计性实验)·····	(290)

第五部分 近代与综合物理实验

实验二十九	电子电荷的测定——密立根油滴实验·····	(292)
实验三十	金属电子逸出功的测定·····	(302)
实验三十一	夫兰克—赫兹实验·····	(316)
实验三十二	用光电效应测定普朗克常数·····	(329)
实验三十三	用动态悬挂法测定金属材料的杨氏模量 (综合性实验)·····	(341)

附录一	部分实验的计标机程序·····	(347)
-----	-----------------	---------

附录二	物理实验仪器配置表·····	(364)
-----	----------------	---------

第一部分 绪 论

I 物理实验课程的地位、作用和任务

科学实验是科学理论的源泉，是工程技术的基础。作为培养德、智、体、美全面发展的高级工程技术人才的工科大学，不仅要使学生获得比较深广的理论知识，而且要训练学生具有较强的从事科学实验的能力，以适应科学技术不断进步和社会主义建设迅猛发展的需要。

物理实验是对工科学生进行科学实验基本训练的一门独立的必修课程，是工科学生进入大学后受到系统实验方法和实验技能训练的开端，是对学生进行科学实验训练的重要基础。

本课程的具体任务

1. 培养与提高学生的物理实验技能，并通过对实验现象的观察、分析和对物理量的测量，学习物理实验知识，加深对物理学原理的理解。

2. 培养与提高学生的实验能力，包括：

1) 能够自行阅读实验教材和参考资料，正确理解实验内容；

2) 能够借助教材或仪器说明书，正确使用常用仪器；

3) 能够运用物理学理论对实验现象进行初步分析；

4) 能够正确记录和处理实验数据，绘制曲线，说明实验结果，写出合格的实验报告；

5) 能够完成简单的设计性实验。

3. 培养与提高学生的科学实验素养。要求学生具有理论联系实际和实事求是的科学作风，严肃认真的工作态度，主动研究的探索精神和遵守纪律、爱护公共财产的优良品德。

对学生的要求

1. 实验前必须认真预习实验教材及有关参考资料, 做到初步掌握实验的原理和方法, 并写出预习报告。

2. 实验开始时, 应首先检查和熟悉仪器, 根据操作规程正确调试。学生应在规定的仪器上进行实验, 未经教师同意, 不得任意调换他组仪器。

3. 实验时, 应集中精力仔细观察和思考所研究的物理现象, 及时记录数据, 字迹要清楚。不可凭事后回忆“追记”数据, 更不可为拼凑结果而涂改原始数据。

4. 实验完毕, 应将仪器整理好, 凳子放好, 桌子抹干净, 经指导教师同意后, 方可离开实验室。

5. 严格遵守实验室规则, 爱护实验仪器。实验过程中如果仪器损坏, 应及时报告指导教师。凡属学生责任事故者, 应根据“物理实验室赔偿制度”酌情处理。

6. 实验后, 应及时整理实验数据。如发现原始数据有错、漏, 应重测或补测, 绝不允许抄袭他人数据和实验报告。实验报告必须在下次实验时交指导教师, 不得拖欠。

实验报告是学生实验成果的书面反映。应力求文字简炼、通顺, 数据齐全, 图表正确。一份完整的实验报告一般应包括以下内容:

1) 实验名称和日期, 2) 实验目的, 3) 实验仪器 (包括仪器名称、型号、规格), 4) 实验原理, 5) 操作步骤, 6) 数据表格, 7) 数据处理及结果, 8) 问题讨论。

物理实验虽然是在教师指导下进行的, 但在实验中, 学生不应是完全按照“操作指令”运转的“机器人”, 而应该积极发挥自己的主观能动性去思考问题, 进行观测与分析, 探讨最佳的实验方案, 不断改进实验方法, 增强自己的才干和实验技巧。

II 误差和有效数字

在物理实验中, 是用实验的方法研究各种物理规律, 因此

要定量地测出有关物理量的大小。所谓测量就是借助仪器用某一计量单位把待测量的大小表示出来。即待测量是该计量单位的多少倍。测量可分为两类：一类是用计量仪器和待测量直接进行比较，称为直接测量；另一类是从几个直接测量结果按一定的函数关系求出，称为间接测量。例如，用单摆测定重力加速度，可以由摆长和周期的测量根据周期公式算出。

每一个物理量都是客观存在，在一定的条件下具有不依人的意志为转移的一定的数值，这个客观数值称为该物理量的真值。进行测量是想要获得待测量的真值。但是测量是依据一定的理论和方法，使用一定的仪器，在一定的环境中，由一定的人进行的。由于实验理论的近似性，实验仪器灵敏度和分辨能力的局限性，以及环境的不稳定性等等因素的影响，待测量的真值是不可能测得的，测量结果和待测量的真值之间总会存在或多或少的偏差，这种偏差就称为待测量的误差。

某一量的误差 ε 定义为该量的测量值（测得值） x 与其真值（真实值） a 的差，即

$$\varepsilon = x - a$$

由于在测量中误差是不可避免的，因此测量中应力求

1. 设法将测量值的误差减至最小。
2. 求出在测量条件下，被测量的最近真值（最佳值）。
3. 估计最近真值的可靠程度。

为此，必须研究误差的性质、来源，以便采取适当的措施，得到最好的结果。

一、误差的分类

由于误差来源和性质不同，一般可将误差分为系统误差、偶然误差和粗大误差（过失误差）三类。在实验数据中，这三类误差常常是混杂在一起出现的，现分别讨论之。

1. 系统误差

在同一条件下（方法、仪器、环境和观测者不变）多次测量

同一量时，其结果的符号和大小按一定规律变化的误差称为系统误差。其来源有以下几方面：

1) 仪器误差 这是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。

2) 方法误差 这是由于实验方法本身或理论不完善导致的误差。

3) 环境误差 由于外界环境（如光照、温度、湿度、电磁场等）的影响而产生的误差。

4) 人身误差 由于观测者的感官或习惯所引入的误差。

系统误差的出现一般都有较明确的原因，因此，可以采取适当措施使之降低到可忽略的程度。如校准仪器，对测量结果作合理修正等。但是怎样找到产生系统误差的原因，却是比较复杂的问题。我们将在某些实验中作些定性分析和讨论。

2. 偶然误差

在同一条件下多次测量同一物理量时，在极力消除或改正一切明显的系统误差之后，测量结果仍会出现一些无规律的起伏。这种绝对值和符号随机变化的误差，称为偶然误差。偶然误差是由于实验中许多难以确定的因素（如温度、湿度、电源电压的起伏、空气流动、振动等的影响）而引起的。从表面看，似乎杂乱无章，但若测量次数足够多，偶然误差就显示出明显的统计规律。在多数物理实验中，偶然误差呈正态分布（高斯分布）。如图 0-1 所示。

图中横坐标表示偶然误差 ε ，纵坐标 $f(\varepsilon)$ 表示该误差出现的概率。由图可知，偶然误差有如下的性质

1) 单峰性 绝对值小的误差出现的概率比绝对值

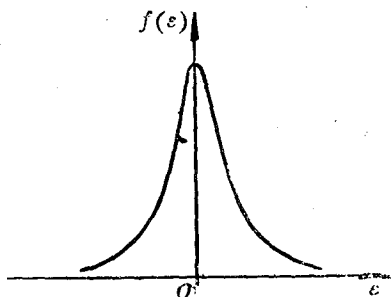


图 0-1

大的误差出现的概率大。

2) 对称性 绝对值相等的正负误差出现的概率相同。

3) 有界性 在一定测量条件下, 误差的绝对值不超过一定限度。

4) 抵偿性 偶然误差的算术平均值随着测量次数的增加而越来越趋向于零。即

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varepsilon_i = 0 \quad \text{或} \quad \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 0$$

即多次测量的算术平均值可以作为直接测量的最近真值(最佳值)。在一定条件下增加测量次数可以减小偶然误差。但是在实际测量中, 并不是测量次数越多越好, 在一般的科学研究中重复测量次数取10到20次, 而在物理实验中则取6到10次。

3. 粗大误差(过失误差)

凡是测量中用客观条件不能解释的突出的误差, 可称为粗大误差或过失误差。它是由于测量者在观察、测量、记录和整理数据过程中, 缺乏经验、粗心大意、疲劳等原因引起的。因此, 实验者在实验时应集中精力, 防止出现粗大误差。

二、测量的精密度、准确度和精确度

精密度、准确度和精确度都是评价测量结果好坏的量。但这三个词的涵义不同, 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, 偶然误差较小。

测量的准确度高, 是指数据的平均值偏离真值较少, 测量结果的系统误差较小。

测量的精确度高, 是指测量数据比较集中在真值附近, 即测量的系统误差和偶然误差都较小。

我们以打靶为例说明三者的意义和区别。

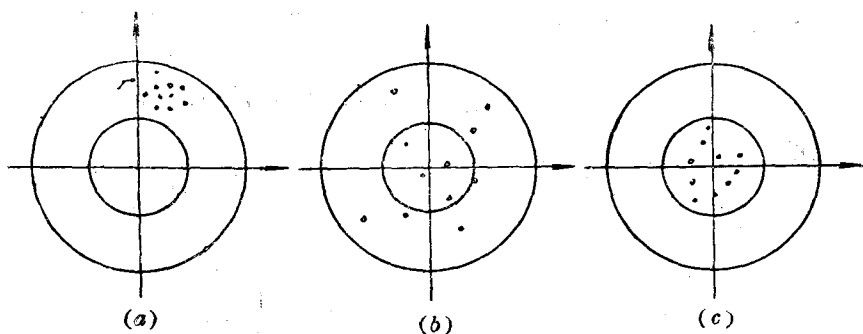


图 0-2

图 0-2(a) 弹着点比较集中，但都偏离靶心，表示精密度较高而准确度较差；图 0-2(b) 虽然弹着点比较分散，但平均值较接近中心，表示准确度较高而精密度较差；图 0-2(c) 则表示精密度和准确度均较好，即精确度较高。

三、直接测量值误差的估计

1. 多次测量值的算术平均值

设某物理量的各次测量值为

$$x_1, x_2, x_3, \dots, x_n,$$

则其算术平均值 $\bar{x}$ 为

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

根据误差理论，多次测量值的算术平均值比各个测量值更能接近真值。我们可以将 $\bar{x}$ 看作该物理量的近似真值。

2. 平均绝对误差

算术平均值比较接近真值，但它仍非真值。它与真值之间的误差可以这样来估计：

我们将每次测量值 x_i 与平均值 $\bar{x}$ 之差的绝对值称为该次测量的绝对误差〔注1〕。

再将一系列测量的绝对误差求平均，称为平均绝对误差，即

$$\eta = \frac{|x_1 - \bar{x}| + |x_2 - \bar{x}| + |x_3 - \bar{x}| + \cdots + |x_n - \bar{x}|}{n}$$

$$= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\Delta x_i|$$

按照高斯误差理论可以证明，测量列中任一测量值的误差 ε_i 有 57.5% 的可能性是在 $(-\eta, +\eta)$ 区间内，而平均值与真值在 $(-\eta, +\eta)$ 区间内的可能性就更大。所以，我们可以认为真值在 $\bar{x} - \eta$ 与 $\bar{x} + \eta$ 之间。最后应将该测量结果写成 $x = \bar{x} \pm \eta$ (单位)〔注2〕。

3、标准误差和极限误差

根据误差理论，还可以得出估计偶然误差的更精确的方法。这就是采用标准误差来代替平均绝对误差。所谓标准误差就是将各测量值的误差的平方和求平均后再开平方，所以又称为方均根误差，用 η 来表示。即

〔注1〕 严格说，测量值与平均值之差，称为偏差或残差，测量值与真值之差称为误差。但由于真值是无法测到的，实际计算时用偏差来代替误差。

〔注2〕 这里的 η 是测量列的平均绝对误差。对多次测量的算术平均值，其绝对误差应为 $\eta_{\bar{x}} = \frac{\eta}{\sqrt{n}}$ ，与测量次数 n 有关，测量次数越

多，算术平均值的偶然误差越小。仅当测量次数较少时， $\eta_{\bar{x}} \approx \eta$

本书中用 η 来代替 $\eta_{\bar{x}}$ 是在测量次数较少时的近似，实际上是扩大了误差范围。

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - a)^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2}{n}}$$

在有限次测量中，标准误差常用下式表示

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

理论证明，测量列中任一测量值的误差落在 $\pm \sigma$ 区间内的可能性有68.3%，落在 $\pm 3\sigma$ 区间内的可能性为99.7%。因此一般将 3σ 称为极限误差。在测量次数有限的情况下，如果某一测量值的误差超过 $\pm 3\sigma$ 可以认为是粗大误差，应予以剔除。

上述三种误差都是用来描述偶然误差的。由于标准误差随测量次数 n 的变化小，具有一定稳定性，且多数计算器都有计算标准误差的功能，所以许多科学论文和报告都是用标准误差去评价数据。标准误差 σ 和平均绝对误差 η 的关系为 $\sigma = 1.253\eta$ 。在物理实验中，误差既可用平均绝对误差 η 表示，也可用标准误差 σ 表示。在最初阶段我们只要求计算平均绝对误差。而极限误差 $\pm 3\sigma$ 一般仅用在特殊的技术报告和数据的取舍中。

平均绝对误差、标准误差和极限误差都是有单位的，它们的单位和测定值的单位相同。它反映测量值偏离真值的范围，这种误差称为绝对误差。

相对误差是绝对误差与最佳值（平均值、标准值等）的比，是没有单位的，常用百分数表示。相对误差是用来比较不同测量对象可靠性程度的指标。

上述估计偶然误差的方法只能用于测量次数较多的情况。有些实验对某一物理量只进行一次测量，这时偶然误差的计算，一

般是根据所用仪器、测量对象、实验方法和实验者的经验来估计误差。

如果多次测量值都一样，并不表示误差为零，而是仪器的精度不足以反映测量值的微小起伏，这时可将误差估计为仪器最小分度值的一半。

四、间接测量结果误差的估计

在实际工作中，多数物理量都是通过间接测量得到的。在计算间接测量结果时，是将各直接测量值的最佳值（而不是真值）代入测量公式求出间接测量结果。由于直接测量值的最佳值有一定的误差，因此，求得的间接测量结果也必然具有误差。表达直接测量误差与间接测量误差之间的关系式，称为误差传递公式。

我们先讨论只有两个直接测量值的几个基本运算

设 A 、 B 为二个直接测量值的算术平均值， ΔA 、 ΔB 为其偶然误差， N 为间接测量值， ΔN 为间接测量值的偶然误差。

1. 加法

$$N = A + B$$

在考虑误差后，可以写成

$$\begin{aligned} N \pm \Delta N &= (A \pm \Delta A) + (B \pm \Delta B) \\ &= (A + B) \pm \Delta A \pm \Delta B \end{aligned}$$

后两项是不确定项，它们有四种可能的组合。在这里我们考虑最坏情况，即最大的误差 $+\Delta A + \Delta B$ ， $-\Delta A - \Delta B$ ，所以有

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

故

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

$$\text{相对误差} \quad E = \frac{\Delta N}{N} = \frac{\Delta A + \Delta B}{A + B}$$

2. 减法

$$N = A - B$$

同样考虑到最大的可能误差

$$\begin{aligned} N \pm \Delta N &= (A \pm \Delta A) - (B \pm \Delta B) \\ &= (A - B) \pm (\Delta A + \Delta B) \end{aligned}$$

故 $\Delta N = \Delta A + \Delta B$

相对误差 $E = \frac{\Delta N}{N} = \frac{\Delta A + \Delta B}{A - B}$

由上讨论可知：几个直接测量值相加、相减结果的平均绝对误差等于各直接测量值平均绝对误差之和。

3. 乘法

$$N = AB$$

$$\begin{aligned} N \pm \Delta N &= (A \pm \Delta A)(B \pm \Delta B) \\ &= AB \pm A \Delta B \pm B \Delta A \pm \Delta A \Delta B \end{aligned}$$

由于 ΔA 、 ΔB 与 A 、 B 相比可视为微小量，最后一项 $\Delta A \Delta B$ 为二阶微小量，可以忽略不计，又考虑到最大可能误差，因此

$$\begin{aligned} N \pm \Delta N &\approx AB \pm A \Delta B \pm B \Delta A \\ &= AB \pm (A \Delta B + B \Delta A) \end{aligned}$$

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

相对误差
$$\begin{aligned} E &= \frac{\Delta N}{N} = \frac{A \Delta B + B \Delta A}{AB} \\ &= \frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta B}{B} = E_A + E_B \end{aligned}$$

4. 除法

$$N = \frac{A}{B}$$

$$\begin{aligned} N \pm \Delta N &= \frac{A \pm \Delta A}{B \pm \Delta B} = \frac{(A \pm \Delta A)(B \mp \Delta B)}{B^2 - \Delta B^2} \\ &\approx \frac{AB \pm B \Delta A \mp A \Delta B}{B^2} = \frac{A}{B} \pm \frac{B \Delta A \mp A \Delta B}{B^2} \end{aligned}$$