

# 大学物理学 与 实验物理学

第四卷

实验物理学

全书主编

刘宏清 胡修愚 周武光

本卷主编

尹邦勇 黄兴鼎 李守源

武汉大学出版社

PDG

# 大学物理学与实验物理学

## 第四卷

全书主编

刘宏清 胡修愚 周武光

本卷主编

尹邦勇 黄兴鼎 李守源

武汉大学出版社

大学物理学与实验物理学

第四卷

武汉大学出版社

湖北省安陆市印刷厂印刷

## 大学物理学与实验物理学

第四卷

全书主编

刘宏清 胡修愚 周武光

本卷主编

尹邦勇 黄兴鼎 李守源

\*

武汉大学出版社出版发行

(430072 武昌 珞珈山)

湖北省安陆市印刷厂印刷

\*

850×1168 1/32 7.625印张 194千字

1993年2月第1版 1993年2月第1次印刷

印数:1-3000

ISBN 7-307-01448-3/O·120

定价:2.35元

(鄂)第9号

## 编者的话

本书是武汉大学物理系第二基础物理教研室的教师，根据多年的教学经验，参考教学大纲的要求，集体编写而成。此书可作为综合性大学、师范院校、工院校非物理专业的普通物理学教材。全书共分四卷，各卷自成体系，各卷为：

第一卷 力学与热学

第二卷 电磁学

第三卷 光学与近代物理学

第四卷 实验物理学

在编写过程中，我们力求做到以下几点：首先，在高中物理和大学物理间有一个较大的台阶，能引起读者对学习大学物理学的兴趣。其次，在系统编写经典物理的基础上，适当增加近代物理和现代物理的内容，使本书能反映时代性，其中，特别注意我国目前在物理学方面的发展和应。同时，为了把大学物理的讲授和实验结合起来，特编辑实验物理卷，使本书能有较完善的体系。最后，为使一部分读者在学习普通物理学的基本内容时，还有趣深入学习，我们编辑了部分较难的内容，在书中用“\*”号表示，以供参考与选用。

担任全书各卷编写人员有：

全书主编 刘宏清 胡修愚 周武光

第一卷主编 杨宣东

第二卷主编 赵有伦 张少平

第三卷主编 徐斌富 马莉

第四卷主编 尹邦勇 黄兴鼎 李守源

全书各章的编者分别为：

杨宣东 (第一卷 第1—7章)  
胡修愚

周武光 (第一卷 第8—10章)

刘宏清 (第二卷 第1、2章)

张少平 (第二卷 第4、5章)

赵有伦 (第二卷 第3、6、7章)

马莉 (第三卷 第1—3章)

徐斌富 (第三卷 第4—8章)

黄兴鼎 (第四卷 实验1—10、26、27)

李守源 (第四卷 实验11—19, 28)

尹邦勇 (第四卷 实验20—25, 29—34)

本书各卷特请有关教师审阅：石展之教授(第一卷)，李琪副教授(第二卷)，刘福庆教授(第三卷)，周孝安副教授(第四卷)。本书出版过程中，得到武汉大学教务处、物理系领导的关心和支持，我们在此表示感谢！

本书由于出版时间较紧，有不当之处，敬请读者批评指正。

编者

于武汉大学物理系

1991年8月

(141)	.....	三十二课
(142)	.....	三十二课
(143)	.....	三十二课
(144)	.....	三十二课
(145)	.....	三十二课
(146)	.....	三十二课
(147)	.....	三十二课
(148)	.....	三十二课

# 目 录

(149)	绪 论.....	(1)
(150)	实验一 测量长度.....	(11)
(151)	实验二 质量和密度的测定.....	(22)
(152)	实验三 重力加速度的测量.....	(30)
(153)	实验四 用伸长法测钢丝的杨氏模量.....	(42)
(154)	实验五 固体线膨胀系数的测定.....	(48)
(155)	实验六 液体表面张力系数的测定.....	(55)
(156)	实验七 气垫导轨实验.....	(61)
(157)	实验八 用混合法测金属的比热容.....	(71)
(158)	实验九 刚体转动.....	(77)
(159)	实验十 弦振动的研究.....	(83)
(160)	实验十一 电学实验基本知识.....	(88)
(161)	实验十二 万用电表的使用.....	(95)
(162)	实验十三 万用电表的研究(一).....	(99)
(163)	实验十四 万用电表的研究(二).....	(103)
(164)	实验十五 静电场的模拟描绘.....	(109)
(165)	实验十六 用惠斯登电桥测电阻.....	(113)
(166)	实验十七 用滑线式电位计测电池的电动势 和内阻.....	(118)
(167)	实验十八 UJ-31型直流电位差计的原理和运用.....	(122)
(168)	实验十九 复射式检流计特性研究.....	(131)
(169)	实验二十 交流阻抗的测定.....	(137)

实验二十一	三相电负载的连接.....	(142)
实验二十二	交流电路中功率和功率因数的测量.....	(146)
实验二十三	用交流电桥测电容和电感.....	(153)
实验二十四	共振法测电感和电容.....	(159)
实验二十五	示波器的使用.....	(166)
实验二十六	晶体管及电压放大器实验.....	(174)
实验二十七	集成电路简介与集成运算放大器.....	(184)
实验二十八	摄影技术.....	(194)
实验二十九	薄透镜焦距的测定及显微镜的组成.....	(201)
实验三十	用光电分光光度计研究液体的吸收 光谱.....	(207)
实验三十一	JJY 分光计的使用及棱镜玻璃折射率的 测定.....	(212)
实验三十二	用透射光栅测定光波波长.....	(223)
实验三十三	用牛顿环测定透镜的曲率半径.....	(226)
实验三十四	迈克耳逊干涉仪.....	(231)
附录	著名的理论与实验物理学家吴健雄简介.....	(236)

# 绪 论

## 一、物理实验课的目的

物理学是一门基础科学，它是在长期实践和大量物理实验的基础上产生、发展和逐渐完善起来的。因此，物理学是一门理论与实践紧密结合的科学。物理实验就是用人工的方法创造出一些具有特定条件的环境，去观察、测量、验证物理规律，解决科学实践中的物理问题。

物理实验课是一门独立设课的基础课程。对非物理专业学生开设物理实验目的如下。

1. 学习物理实验的基本知识，基本方法和基本技能，即三基训练。具体内容包括：

(1) 弄清物理实验的基本原理，熟悉、掌握一些物理量的测量方法；

(2) 熟悉一些常用仪器及测量工具的基本原理和结构，并能正确使用；

(3) 对物理实验中环境的特定条件、观察到的现象和测量的数据，能正确地记录，进行数据处理和分析，写出完整的实验报告。

2. 培养严格的科学态度，严谨的工作作风。

3. 培养理论联系实际和独立工作的能力。

4. 培养从事集体工作和紧密合作的良好习惯。



## 二、物理实验课的要求

物理实验课必须认真贯彻四点要求：

1. 预习。实验前要求每个学生写好预习报告。预习报告内容包括：实验名称、实验目的、实验原理、电路图、测量内容和数据表格。

2. 良好的课堂表现。这是学生提高实际能力的一个重要方面。这包括线路的正确连接，正确地使用仪器和测量用具，数据的测量和记录，遵守实验室规则，培养良好的科学作风。

3. 写实验报告。内容包括实验名称、实验目的、实验原理、电路图、测量内容和数据表格。这几项同预习报告一样。此外，还应包括实验仪器、用具及规格型号、操作步骤、数据处理、回答问题。

4. 学生实验能力的考核。可进行考查、笔试或操作测验，根据情况采用。

学生物理实验成绩也根据上面几个方面决定，在平时成绩中，预习占 20%，课堂表现占 40%，实验报告占 40%。

## 三、测量与测量误差

物理实验需要测量许多物理量以研究物理学规律。从测量方法来讲可以分为直接测量和间接测量。由于测量仪器、用具、实验条件以及种种因素的限制，不管用什么方法测量都是不能无限精确的。测量结果与客观存在的值总有一定的差异，也就是说总存在一定的误差。测量结果都有误差，误差自始至终存在于实验和测量过程之中，这就是所谓误差公理。下面我们对测量及测量误差的有关知识分别加以说明。

### 1. 测量方法

测量的方法一般分为直接测量和间接测量。

(1) 直接测量：能通过仪器直接进行比较并读出测量值的称

为直接测量。例如用米尺、游标卡尺测长度，天平测质量，电流表测电流都可以直接进行比较并读出测量值。

(2) 间接测量。由直接测量得到的值，通过一定的公式运算，求得待测量，这种方法称为间接测量。例如测密度  $\rho$ ，要先测出其质量  $M$  和体积  $V$ ，由公式  $\rho = \frac{M}{V}$  算出密度。

## 2. 测量误差

产生误差的原因很多，根据其性质和产生的原因，归纳起来可分为系统误差、过失误差和随机误差三大类。

(1) 系统误差。它表现为在一定的条件下测同一物理量，其误差偏向一个方向或总按一确定的规律变化。来源如下：

(I) 仪器的误差，如螺旋千分尺零点不对，刻度不均匀等；

(II) 理论和实验方法的误差，例如单摆法测重力加速度，计算公式就是近似的；

(III) 个人误差，由个人习惯造成的误差。

系统误差原则上应该给以修正，例如加修正值。但系统误差的发现和估计有赖于实验者的理论水平与经验，课堂上对学生不作严格要求。

(2) 过失误差。是指由明显错误引起的不应有的误差。如读错数、计算错误等。这种错误应该完全避免和及时纠正。

(3) 随机误差。在实验中即使避免了系统误差和过失误差，还存在一些偶然的因素或不确定的因素引起的误差。它表现为某一次测量的误差大小和方向的不可预料。这种误差称为随机误差。随着测量次数增加，从整体来看随机误差服从统计规律，服从正态分布。其特点有：

(I) 单峰性，绝对值小的误差出现的概率比绝对值大的出现的概率大；

(II) 对称性，绝对值相等的正负误差出现的概率相等；

(III) 有界性，绝对值很大误差出现的概率非常小。

我们在实验中主要讨论随机误差的计算方法。

### 3. 测量的精密度、准确度和精确度

(1) 精密度。它表示测量结果中随机误差大小的程度。

(2) 准确度。它表示测量结果中系统误差大小的程度。

(3) 精确度。它是测量结果中系统误差和随机误差的综合，表示测量结果与真值一致的程度。

现以打靶射中目标分布图 0-1 (a)、(b)、(c) 为例来说明。

(a) 表示精密度较高，但准确度较差；(b) 表示准确度较高，但精密度较差；(c) 表示精密度和准确度都较高，即精确度高。

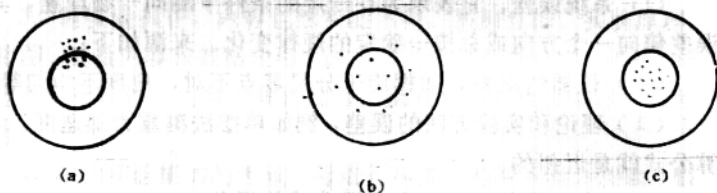


图 0-1

## 四、随机误差的数据处理

随机误差有许多处理方法，我们这里只作简单的介绍。

### 1. 基本概念

#### (1) 真值

在一定的条件下，任何一物理量都有自己客观存在的实际值。

一般来说，真值是未知的，是很难得到的。举个最简单的例子：教室里一张桌子，它是一个客观存在的实体，在一定的条件（如室温、压强）下，它的长、宽、高、体积有自己的客观存在的值。这就是它的真值。但我们不论用同一工具或不同的工具，测得这些量的数值，可能不同，其长度的真值到底是多少，却又知道了，也很难得到。我们如何确定真值呢？有如下几种办法。

(I) 理论真值。由理论上推导出来的，例如三角形内角和为  $180^\circ$ ； $R$ 、 $L$ 、 $C$  串联电路上， $L$ 、 $C$  相对于  $R$  的电压位相分别超前

和落后  $90^\circ$ 。

(I) 计量学约定真值。例如长度单位，1 米定为光在真空中在  $1/299792458$  秒时间间隔内行程的长度；1 秒定为 铯-133 原子特定状态（原子基态两个精细能级的跃迁）下辐射出 9192131770 个周期的电磁波所持续的时间。

(II) 标准器的相对真值。高级标准器测得的值作为低一级标准器测量时的相对真值。

(IV) 算术平均值。根据误差统计理论可知算术平均值的极限为真值，有限的算术平均值最接近真值，测量次数越多越接近真值。

显然，我们实际上用到的真值，有许多也只是近似的真值。

### (2) 绝对误差

绝对误差为测量值与真值之差。例如第  $i$  次测量值为  $x_i$ ，真值以  $x$  表示，则第  $i$  次测量的绝对误差  $\Delta x_i = x_i - x$ 。对于同一量的多次测量，绝对误差可以描述测量的精确度。用绝对误差来比较两个不同测量的准确度是不全面的。例如：我们用按毫米刻度的尺测量一个 1m 长的金属丝，测量 5 次分别为 1.0015m、1.0030m、0.9980m、1.0025m、0.9965m，它们的绝对误差分别为 0.0015m、0.0030m、-0.0020m、0.0025m、-0.0035m。绝对误差对同一量能体现它的误差大小，即精确度的大小。绝对误差是有量纲的量，且与测量量的量纲相同。

### (3) 相对误差

对于不同的量，绝对误差不能准确地说明问题，例如分别测一个长度为 1m 的物体，其绝对误差为 0.01m，测量另一个长 10m 的物体，其绝对误差也是 0.01m，其绝对误差相同，但两次测量的绝对误差与各自真值之比值是不同的。相对误差就是绝对误差与真值的比值。两次测量的相对误差为  $\frac{\Delta x_1}{x} = \frac{0.01\text{m}}{1\text{m}} = 0.01 = 1\%$ ，

$\frac{\Delta x_2}{x} = \frac{0.01\text{m}}{10\text{m}} = 0.001 = 0.1\%$ ，引进相对误差就可以说明测量不同

量的精确度了。

#### (4) 相对额定误差

仪表的级别是用相对额定误差表示的,相对额定误差是绝对误差与测量范围的上限值或量程之比,用百分数表示。例如仪表的级别为 0.5 级,就表示其相对额定误差为 0.5%,如果这个表是量程为 0~100V 的伏特表。那么这个表测得的电压的绝对误差 =  $100\text{V} \times 0.5\% = 0.5\text{V}$ 。只要你用的是这个级别、这个量程的表,其绝对误差都是 0.5V。

#### (5) 标准偏差

随机误差是符合统计规律的,根据统计理论我们可以求得标准偏差  $\sigma$ 。

$n$  次测量中某次测量结果的标准偏差

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

式中  $\bar{x}$  为  $n$  次测量的算术平均值。

$n$  次测量算术平均值  $\bar{x}$  的标准偏差

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

标准偏差能从统计理论的几率来说明误差问题。测量的次数以多为好。

## 2. 误差与数据的表达

### (1) 测量结果的有效数字

(I) 有效数字。我们把测量结果的几位可靠数字加上一位可疑的数字统称测量结果的有效数字。

(II) 确定测量结果的有效数字,由绝对误差来确定有效数字。直接测量取仪器最小分度值的读数为可靠的数字,估读一位作为可疑数字,共同组成测量结果的有效数字。

## (2) 尾数法则——尾数凑成偶数

通常用四舍五入法，实验中则应用尾数法则，即大于5入，小于5或等于5则把尾数凑成偶数。也可以说尾数是偶数后面的5则舍去，尾数是奇数后面的5则舍去5后，向前进一位尾数，使奇数变成偶数。

例：1.335和1.345保留3位有效数字时都写成1.34。

## (3) 测量结果的表达

### (I) 绝对误差表达法

例： $l = 1.024 \pm 0.011$ ，0.011表示绝对误差。

### (II) 标准偏差表达法

例： $l = 1.024(0.011)$ ，0.011表示标准偏差。

$$\sigma = 0.011$$

## (4) 误差的传递公式

直接测量的误差可以直接求出，间接测量的测量结果的误差是由直接测量的误差引起的，它们之间的关系与物理量间函数关系有关。我们以表0-1表示几种最简单的函数的绝对误差和相对误差的传递公式。

表 0-1

误差公式表

函数表达式	绝对误差	相对误差
$N = x + y$	$\pm \Delta N = \pm (\Delta x + \Delta y)$	$\frac{\Delta N}{N} = \frac{\Delta x + \Delta y}{x + y}$
$N = x - y$	$\pm \Delta N = \pm (\Delta x + \Delta y)$	$\frac{\Delta N}{N} = \frac{\Delta x + \Delta y}{x - y}$
$N = x \cdot y$	$\pm \Delta N = \pm (x \cdot \Delta y + y \cdot \Delta x)$	$\frac{\Delta N}{N} = \frac{\Delta x}{x} + \frac{\Delta y}{y}$
$N = \frac{x}{y}$	$\pm \Delta N = \pm \left( \frac{x \cdot \Delta y + y \cdot \Delta x}{y^2} \right)$	$\frac{\Delta N}{N} = \frac{\Delta x}{x} + \frac{\Delta y}{y}$

## (5) 逐差法

在实验中常有这种情况：在一物理量（自量变）作等间隔改变时测量另一物理量（函数）一序列的对应值。为了从这一序列

实验数据合理地求出自变量所引起函数值的改变，我们把这序列数据前后对半分成一、二两组，用第二组第一项与第一组的第一项相减，第二项与第二项相减……，即顺序逐项相减，然后取平均值求得结果，这就是一次逐差法。如果把一次逐差值再作逐差求出结果的，称为二次逐差法，……其余类推。下面举一例来具体说明一次逐差法。

例：用伸长法测金属丝的扬氏模量。设每次增加砝码均为  $m = 1000\text{g}$ ，测得金属丝在拉力  $p$  的作用下长度如表 0-2 所示。

表 0-2 加砝码次数与金属丝长度的关系

加砝码次数	1	2	3	4	5	6	7	8
金属丝长度	$l_1$	$l_2$	$l_3$	$l_4$	$l_5$	$l_6$	$l_7$	$l_8$

用逐差计算

$$\Delta l = \frac{1}{4} \left( \frac{l_5 - l_1}{4} + \frac{l_6 - l_2}{4} + \frac{l_7 - l_3}{4} + \frac{l_8 - l_4}{4} \right)$$

$$= \frac{1}{16} [ (l_5 - l_1) + (l_6 - l_2) + (l_7 - l_3) + (l_8 - l_4) ]$$

如用一般方法，则

$$\Delta l = \frac{1}{7} [ (l_2 - l_1) + (l_3 - l_2) + (l_4 - l_3) + (l_5 - l_4) + (l_6 - l_5) + (l_7 - l_6) ] = \frac{1}{7} (l_8 - l_1)$$

两种方法比较，逐差法的优点是：保证全部数据被充分利用；计算结果有最小的相对误差。

#### (6) 作图法

在数据处理中我们常常用作图来表示两个或两个以上物理量之间的关系，利用它求出经验公式或某些参量。作图时需要注意做到以下几点：

(1) 根据测量的有效数字及变量之间的函数关系选用适当的

坐标纸。有直角坐标纸、半对数坐标纸、对数坐标纸或极坐标纸等。

(I) 画出横纵坐标轴线，以横轴代表自变量，纵轴代表因变量，标明各自单位。

(II) 标度值不一定从零开始。

(IV) 数据各点用一种符号标出，例“×”、“o”等，不同曲线用不同符号。

(V) 直线或曲线的绘制必须光滑，各数据点均匀分布在图线两侧。

### (7) 误差计算的运用

前面我们已经介绍了绝对误差，相对误差的传递公式，可以由直接测量的误差求得最后结果的误差。不仅如此，在进行设计实验时，由最后结果的相对误差的要求，对测量仪器的绝对误差提出要求，以保证最后结果符合设计要求。

例：有一圆柱体直径为 12.0mm，长为 150mm，今要求测量其体积的相对误差不超过 1%，问对测直径  $d$  和长度  $l$  的仪器的绝对误差有何要求？

$$\text{解：} \because V = \frac{\pi}{4} d^2 l$$

$$\therefore \frac{\Delta V}{V} = 2 \frac{\Delta d}{d} + \frac{\Delta l}{l}$$

$$\text{已知 } \frac{\Delta V}{V} = 1\% = 0.01$$

$$2 \frac{\Delta d}{d} + \frac{\Delta l}{l} = 0.01$$

$$\text{根据误差均分原则有：} \frac{\Delta d}{d} = \frac{\Delta l}{l}$$

$$\text{可求得 } \frac{\Delta d}{d} = \frac{\Delta l}{l} \approx 0.0033$$

$$\text{又 } l = 150\text{mm} \quad d = 12.0\text{mm}$$

$$\therefore \Delta l \approx 0.0033 \times 150 = 0.50\text{mm}$$

$$\Delta d \approx 0.0033d = 0.04\text{mm}$$



