

DAXUE WULI SHIYAN JIAOCHEN

大学物理实验教程

杨幼桐 张元元 万鹏程 编著

东北林业大学出版社

大学物理实验教程

杨幼桐 张元元 万鹏程 编著

东北林业大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

大学物理实验教程/杨幼桐, 张元元, 万鹏程编著. —哈尔滨: 东北林业大学出版社, 2008. 7

ISBN 978-7-81131-287-4

I. 大… II. ①杨…②张…③万… III. 物理学—实验—高等学校—教材
IV. 04-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 108893 号

责任编辑: 戴 千

封面设计: 彭 宇



NEFUP

大学物理实验教程

Daxue Wuli Shiyān Jiāochéng

杨幼桐 张元元 万鹏程 编著

东北林业大学出版社出版发行

(哈尔滨市和兴路 26 号)

哈尔滨市工大节能印刷厂印装

开本 850 × 1168 1/32 印张 11.875 字数 296 千字

2008 年 7 月第 1 版 2008 年 7 月第 1 次印刷

印数 1—1 000 册

ISBN 978-7-81131-287-4

0 · 91 定价: 25.00 元

前 言

大学物理实验是高等学校学生进行科学实验基础训练的一门必修课,也是学生进入大学后较早接触到的一门系统全面的实验课程。为了使学生在有限的时间内能系统地掌握物理实验的基础知识和基本方法,培养学生的实验动手能力,为后续实验课程奠定基础,我们拓宽了大学物理实验的内容,增加了“近代物理实验和设计性实验”的题目。保证学生通过实验课能较好地掌握和运用理论知识,又能提高实验技能满足大多数学生的需要。本书共5章,内容分别为测量误差与数据处理、基础物理实验、近代物理实验、设计性实验、仿真实验等部分。《大学物理实验教程》教材是我们多年课程建设的产物,是十一五规划项目的研究成果(115C-337)。它凝聚着每位教师和实验技术人员的辛勤劳动,是集体智慧的结晶。

《大学物理实验教程》一书由杨幼桐、张元元和万鹏程三位同志撰写。其中,杨幼桐编写前言、第一章测量误差与数据处理、第三章近代物理实验;张元元编写第二章的力热实验、电磁学实验及第四章设计性物理实验;万鹏程编写第二章的光学实验、第五章仿真实验及附录。在本书的编写过程中得到了梁红副教授、刘群老师和苏春艳老师的大力支持和帮助,借此机会向他们表示衷心的感谢。

编写适合教学改革需要的实验教材是一种探索,它是一项凝聚教师集体劳动的工程。我们在编写本教材时,吸收了多年来在物理实验室工作过的许多同志的智慧和成果,也参考和借鉴了兄弟院校的有关教材,甚至引用了某些内容,在此深表感谢。

《大学物理实验教程》在使用时可结合具体的学时数、实验室条件和特长加以取舍,灵活变通,以满足不同的教学需求。本书为高等院校理工科各专业物理实验教材,也可作为相关技术人员的教学参考。

编者

于2008年5月

目 录

1. 测量误差与数据处理	(1)
1.1 测量与误差	(1)
1.2 误差的分类及其处理方法	(3)
1.3 不确定度	(12)
1.4 测量结果和不确定度的估计	(13)
1.5 有效数字	(19)
1.6 处理实验数据的常用方法	(22)
2. 普通物理基础实验	(35)
2.1 力学热学实验	(35)
实验一 霍耳位置传感器法测杨氏模量	(35)
实验二 固体和液体的密度测定	(39)
实验三 牛顿第二定律的验证	(45)
实验四 弦线振动的研究	(48)
实验五 扭摆法测定物体转动惯量	(51)
实验六 声速的测定	(57)
实验七 波尔共振实验	(66)
实验八 空气热机实验	(80)
实验九 液体粘滞系数的测定	(92)
实验十 谐振动的研究	(97)
2.2 电磁学实验	(100)
实验十一 静电场的描绘	(100)
实验十二 用箱式电势差计校正电表	(103)
实验十三 电子束实验	(107)

实验十四	PN 结正向压降温度特性	(117)
实验十五	LRC 电路谐振特性的研究	(126)
实验十六	磁场的测定	(134)
实验十七	霍尔效应及其应用	(140)
实验十八	磁悬浮	(152)
实验十九	冲击电流计	(155)
实验二十	用电势差计测量电池的电动势和 内阻	(160)
2.3	光学实验	(164)
实验二十一	薄透镜焦距的测定	(164)
实验二十二	分光计的调整及应用	(169)
实验二十三	固体折射率的测定	(177)
实验二十四	棱镜折射率的测定	(179)
实验二十五	杨氏双缝实验	(182)
实验二十六	迈克耳孙干涉仪的调节和使用	(185)
实验二十七	用牛顿环干涉测定透镜的曲率半径	(195)
实验二十八	用双棱镜干涉测定光波波长	(198)
实验二十九	用透射光栅测定光波波长和光栅的 角色散	(203)
实验三十	圆盘旋光仪的调整和使用	(209)
3.	近代物理实验	(213)
实验三十一	密立根油滴实验	(213)
实验三十二	夫兰克-赫兹实验	(226)
实验三十三	光电效应测定普朗克常数	(232)
实验三十四	塞曼效应	(242)
实验三十五	微波基本参量的测量	(247)

实验三十六	核磁共振	(267)
实验三十七	微波电子顺磁共振	(272)
实验三十八	X 射线衍射实验	(276)
实验三十九	气体放电中等离子体的研究	(285)
实验四十	快速电子相对论效应	(290)
4.	设计性物理实验	(295)
实验一	π 的测定及测量不确定度评定	(296)
实验二	光杠杆测试精度的评定及影响因素 分析	(297)
实验三	气垫导轨测试性能的评定	(298)
实验四	重力加速度的测量研究	(298)
实验五	验证机械能守恒定律	(299)
实验六	谐振弹簧的研究	(300)
实验七	谐振实验的研究	(301)
实验八	对转动惯量实验的研究	(303)
实验九	测量电阻的温度系数	(304)
实验十	准确测量电路中的带电电阻	(305)
5.	计算机仿真实验	(306)
5.1	计算机仿真实验简介	(306)
5.2	大学物理仿真实验系统的安装和配置	(308)
5.3	大学物理仿真实验	(310)
实验一	凯特摆测重力加速度	(310)
实验二	超声波测声速实验	(314)
实验三	电子荷质比的测定	(321)
实验四	迈克耳逊干涉仪	(327)
实验五	空气比热容比测定	(331)
实验六	杨氏模量	(335)

实验七 气垫上的直线运动	(341)
实验八 示波器	(347)
实验九 整流电路	(354)
实验十 霍尔效应	(359)
附录: 常用物理数据	(366)

1 测量误差与数据处理

物理实验是以测量为基础的,实验时要对一些物理量进行测量。各被测量在实验当时条件下均有不以人的意志为转移的真实大小,称此值为被测量的真值。测量的理想是真值,但是它是不能确知的。由于测量仪器、测量方法、测量环境、人员的观察力等多种因素的局限,测量不可能无限精确,测量结果与客观存在的真值之间总是存在一定的差异,即存在测量误差。因此分析测量中产生的各种误差,尽量消除或减小其影响,并对测量结果中未能消除的误差作出估计,给出测量结果的不确定度,是物理实验和科学实验中必不可少的工作。为此,本章主要介绍误差的概念、特性、产生的原因及测量结果的不确定度的概念与估算方法,以及测量数据的处理等有关知识。

1.1 测量与误差

1.1.1 测量

所谓测量就是将待测物理量与规定作为标准单位的标准物理量通过一定的比较,其倍数即为待测物理量的测量值。按测量方式的不同,可将测量分为直接测量和间接测量两类。

运用量具或仪表直接测得物理量的数值,称为直接测量或简单测量。例如,用米尺、游标卡尺、千分尺测量长度;用秒表测时间;用电流表测电路中的电流强度等。它的特点是测量结果直接

得到。

多数物理量不便或不能直接测量,于是我们可以先对可直接测量的相关物理量进行测量,然后依据一定的函数关系计算出待测的物理量,称为间接测量或复合测量。例如,用单摆测定重力加速度 g 时,可用米尺先测量出单摆的摆长 l ,用停表测量出单摆的摆动周期 T ,然后通过函数式 $g = \frac{4\pi^2 l}{T^2}$ 的计算得到。这里 g 是间接测量量, l 、 T 是直接测量量。

一个物理量应直接测量还是间接测量不是绝对的,要根据所用的仪器和测量方法来定。例如,测量一圆柱体的体积 V ,可以先用米尺(或卡尺)对直径 d 和高度 h 进行直接测量,然后根据公式 $V = \frac{1}{4}\pi d^2 h$ 计算出它的体积,这属间接测量;若把圆柱体积投入盛有一定量水的量筒中,从液面的上升直接得到体积,则属直接测量。再如,测液体密度(比重),可先用比重计直接测量,也可以先用天平和量筒间接测量。

根据测量条件的不同,也可将测量分为等精度测量和非等精度测量。对某一物理量在相同的测量条件(如同一观察者、同一组仪器、同一测量方法和同一样的环境条件等)下进行测量,并得到测量数据 $x_1, x_2, \dots, x_n$,称为等精度测量。在所有的测量条件中,只要一个发生变化,则所进行的测量就称为不等精度测量。

严格地说,在实验过程中保持测量条件完全相同的多次测量是极其困难的,但当某一条件的变化对结果的影响不大甚至可以忽略时,仍可将此种测量视为等精度测量。除特别指明外,一般在大学物理实验中的重复测量都认为是在相同条件下的等精度测量。

1.1.2 误差

任一物理量,在一定条件下都存在一个客观值,这个客观值称

为该物理量的真实值。而用实验手段测出来的值则称为该物理量的测量值。由于仪器准确度、测量方法、环境影响等条件的限制,任何实验测量都不可能得到真值,测得值与真值总是存在差异,这种差异称为测量误差或绝对误差。如以 x_0 表示某一物理量的真实值,以 x 表示该量的测得值,则误差的定义式为

$$\delta = x - x_0 \quad 1-1-1$$

随着科学技术水平的提高和人们的经验、技巧、专门知识丰富,误差可以控制得愈来愈小,但不能使误差降低为零。因此,误差始终存在于一切科学实验过程中。误差 δ 可正可负,是一代数,它只表示测得值偏离真实值的程度。

1.2 误差的分类及其处理方法

根据误差的性质和产生的原因,传统上把误差分为过失误差、系统误差和随机误差。

1.2.1 过失误差(粗大误差)

过失误差是由于测量者在测量过程中操作、读数、运算和记录等方面的差错而造成的误差。其特点是:测量结果偏离真实值(即误差“粗大”),并且使得数据的结构显著地偏离正常规律。

过失误差是由于观测者的疏忽大意,或对仪器的使用方法不当,或对实验原理不甚理解或记错数据造成的。这种误差毫无规律可循,有时可能造成极大的差错。因此,一旦发出含有粗大误差的测量数据,应将其剔除不用。

1.2.2 系统误差

在同一条件下多次测量同一物理量时,误差的大小和符号始终保持恒定,或在条件改变时,误差的大小和符号按一定规律变化,这种误差叫系统误差。其特点是:出现有规律,在测量条件不

变时有确定的大小和方向,增加测量次数并不能减小系统误差。

系统误差主要由以下几方面原因造成:

(1)仪器误差:由于仪器本身的固有缺陷、校正不完善或使用不当引起的误差。例如,仪器零点不准,标尺刻度不准,天平臂不等长,在 20°C 标定的标准电阻、标准电池在较高或较低温度下使用等。

(2)环境误差:外界环境因素造成的误差。如温度、湿度、气压、振动、电磁场、重力场等干扰造成的误差。

(3)方法误差或理论误差: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的要求,或测量方法所带来的误差。例如,单摆测重力加速度的实验中,公式 $T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$ 采用了 $\sin\theta \approx 0$ 的近似条件。

(4)个人误差:由于测量者个人特殊的生理特点造成的习惯性偏向。例如,用停表时操之过急,计时数偏小;读指针读数时总是偏向一方等。

因系统误差总是使测量结果向一个方向偏离,因此系统误差能够发现并消除或减小。其常见方法有:

(1)对于能掌握的系统误差,可取负值为修正值加到测量结果上,使测量结果得到修正;或者在计算公式上加上修正项消除某项系统误差;或者用更高一级的标准仪器校准一般仪器,得到修正值或修正曲线等。

(2)从测量方法上抵消系统误差。

①交换法(对置法):将被测量与标准量的位置互换进行两次测量,取两次测量的平均值作为测量结果,以达到消除系统误差的目的。如图 1-1-1 所示,用惠斯通电桥电阻,要求两臂长相等,即两臂 l_1 、 l_2 等长,但实际上做不到,所以在测量被测电阻 R_x 时,将

被测电阻与标准电阻 R_3 交换位置, 即有

$$l_1 R_{3\text{右}} = l_2 R_x, l_1 R_x = l_2 R_{3\text{左}}$$

即得 $R_x = \sqrt{R_{3\text{右}} R_{3\text{左}}}$

②替代法: 在测量装置上对被测量进行测量后, 再用已知标准量替换被测量进行同样的测量, 并使仪器指示不变, 则已知标准量就等于被测量。例如, 用惠斯通电桥测电阻时, 先测被测电阻, 使电桥平衡, 然后用标准电阻代替被测电

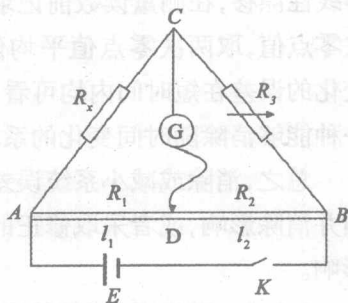


图 1-2-1 惠斯通电桥测电阻

阻, 保持所有条件与情况不变, 使电桥重新平衡, 则此时的标准电阻值即为待测电阻值。

③异号法(抵消法): 在对被测量进行两次测量时, 使系统误差一次出现正值, 另一次为负值, 取两次测量结果的平均值作为最后结果, 以达到消除系统误差的目的。例如, 测载流螺线管内的磁感强度 B 时, 为消除地磁 $B_{\text{地}}$ 的影响, 可使螺线管通正、反向电流, 分别测出 B_1 与 B_2 , 则

$$B_1 = B + B_{\text{地}}, B_2 = B - B_{\text{地}}$$

$$B = \frac{1}{2(B_1 + B_2)}$$

④半周期间测法: 该方法用于消除按周期性规律变化的系统误差。具体方法是按系统误差变化的半个周期间隔取值, 每周期内取两个观测值, 然后取平均作为结果。例如, 分光计刻盘偏心带来的角度测量误差是以 360° 为周期, 就采取相隔 180° 的一对游标, 每次测量读两个数, 并取此二值的平均数作为测量结果, 则可消除系统误差的影响。

⑤对称观测法: 若有随时间线性变化的系统误差, 可将观测程

序对某时刻对称地再做一次。例如,一只灵敏电流计零点随时间有线性漂移,在测量读数前记录一次零点值,测量读数后再记录一次零点值,取两次零点值平均值来修正测量值。由于很多随时间变化的误差在短时间内均可看成线性变化的,因此,对称观测法是一种能够消除随时间变化的系统误差的好方法。

总之,消除或减小系统误差的基本原则是:找出产生误差的原因并消除影响,或者采取修正的办法,或者在测量中设法抵消它的影响。

1.2.3 随机误差(偶然误差)

在同一条件下多次测量同一物理量时,由于一些随机因素的影响而出现时大时小、时正时负的误差,称为随机误差。其特点是:表面上单个误差值没有确定的规律,但进行足够多次的测量后可以发现,误差在总体上服从一定的统计分布,每一误差的出现都有确定的概率。

(1) 随机误差产生的原因

随机误差是由许多随机因素综合作用造成的,如人的感观灵敏程度和仪器精密程度有限、周围环境的干扰等。再如,用毫米刻度的米尺去测量某物体的长度时,往往将米尺去对准物体的两端并估读到毫米以下一位读数值,这个数值就存在一定的随机性,也就带来了随机误差。

(2) 随机误差的数学处理

由于随机误差的变化不能预先确定,所以对待随机误差不能像对待系统误差那样找出原因予以排除,即随机误差无法避免,也不能消除,只能按其所服从的统计规律进行适当的数学处理。

(3) 随机误差的正态分布规律

设某一物理量的真实值为 x_0 , 对其多次重复测量值分别为 $x_1, x_2, \dots, x_n$, 则各次测量的随机误差可表示为

$$\delta_i = x_i - x_0 \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

大量的实验事实和统计理论都证明,在绝大多数物理测量中,随机误差 δ_i 服从正态分布(高斯分布)规律,具有以下性质:

- ①对称性:绝对值相等正、负误差出现的概率接近相等。
- ②有界性:绝对值很大的误差出现的概率为零,即误差的绝对值不会超过某一界限。
- ③单峰性:绝对值小的误差出现的概率大,绝对值大的误差出现的概率小。
- ④抵偿性:当测量次数足够多时,由于绝对值相等的正、负误差出现的概率相等,因而随机误差的代数和趋于零。

这一统计规律在数学上可用概率密度函数(高斯误差分布函数)来描述,即

$$f(\delta) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}\right] \quad (1-2-1)$$

式中, $f(\delta)$ 为概率密度函数,此函数表示在单位误差间隔内出现误差 δ 的概率; δ 是高斯分布函数的唯一参量,表示在一定条件下随机误差的离散程度; σ 是一个与实验条件有关的常数,称之为标准误差或均方误差。由式(1-2-1)容易证明,标准误差 σ 正好处在正态分布曲线拐点的横坐标上(拐点是函数的二阶导数为零时解出的值)。

(4) 若以横轴表示误差值 δ ,纵轴表示误差的概率密度分布函数 $f(\delta)$,则由随机误差的分布特点可知,当测量次数足够多时,可得到图 1-2-2 所示的误差正态分布曲线。图中的坐标原点相当于 $\delta = 0$,对应着真

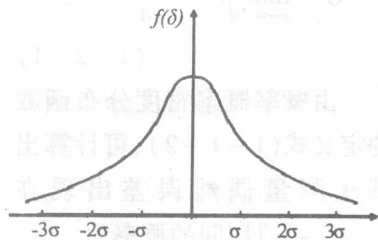


图 1-2-2 正态分布曲线

实值 X_0 的位置。按照概率理论,误差 δ 出现在区间 $(-\infty, +\infty)$ 的事件是必然事件,所以,曲线下的总面积表示各种误差出现的概率的总和,应等于 1,即

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(\delta) d\delta = 1 \quad (1-2-2)$$

注:在一定测量条件下,概率密度分布曲线是唯一确定的。测量条件不同,其概率密度分布曲线也就不同。

由式(1-2-2)可得,当 $\delta=0$ 时,有

$$f(0) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \quad (1-2-3)$$

由式(1-2-3)可知,若测量的标准误差 σ 很小,由 $f(0)$ 必然很大。由于曲线与横轴间围成的面积恒等于 1,所以,如果曲线中间凸较大,两侧下降较快,相应的测量必然是绝对值小的随机误差出现较多(即测得值的离散性小),重复测量所得的结果相互接近,测量的精密度高;相反,如果 σ 很大,则 $f(0)$ 就很小,误差分布的范围就较宽,说明测得值的离散性大,测量的精密度低。这两种情况的正态分布曲线如图 1-2-3 所示。因此可用 σ 来描述测得值可靠性程度,它是一个取决于具体测量条件的常数,称为标准误差,它的数学表达式为

$$\sigma = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_0)^2}{n}} \quad (1-2-4)$$

由概率密度分布函数的定义式(1-1-2),可计算出某次测量偶然误差出现在 $[-\sigma, +\sigma]$ 区间的概率为

$$P = \int_{-\sigma}^{+\sigma} f(\delta) d\delta = 0.683$$

同样可以计算,某次测量偶然误差出现在 $[-2\sigma, +2\sigma]$ 和

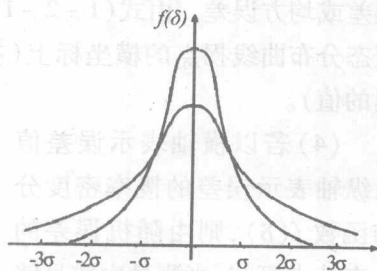


图 1-2-3 两种正态分布曲线

$[-3\sigma, +3\sigma]$ 区间的概率分别为

$$P = \int_{-2\sigma}^{+2\sigma} f(\delta) d\delta = 0.955$$

$$P = \int_{-3\sigma}^{+3\sigma} f(\delta) d\delta = 0.997$$

以上三式所表示的积分面积如图(1-2-4)所示,由此可见,对物理量 x 任做一次测量时,测量误差落在 $-\sigma \sim +\sigma$ 之间的可能性为 68.3%,落在 $-2\sigma \sim +2\sigma$ 之间的可能性为 95.5%,而落在 $-3\sigma \sim +3\sigma$ 之间的可能性为 99.7%。

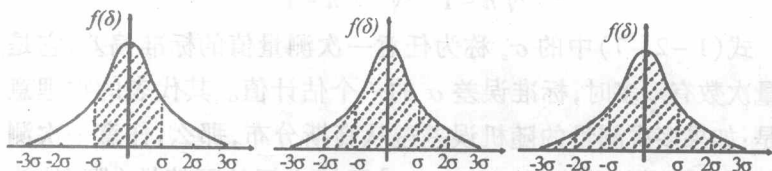


图 1-2-4 测量偶然误差概率图

(5) 算术平均值

设对一物理量的 n 次重复测量中,所测得的值分别为 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 。由于测量误差的存在,真值实际上是无法测得的。根据随机误差的正态分布规律,测得值偏大或偏小的机会相等,即绝对值相等的正负误差出现的概率是相等的,因此,在排除掉系统误差后,各次测值得的算术平均值为

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

由式(1-2-5)可知,当测量次数趋于无限多时($n \rightarrow \infty$),平均值无限接近真值,所以算术平均值是真值的最佳估计值。

(6) 任意一次测量值的标准偏差

某一次测量值 x_i 的误差 δ_i 是测量值 x_i 与真值 x_0 的差值。由于真值不知道、误差 δ_i 计算不出,因而,按照式(1-2-4),标准误差也无从估算。根据算术平均值是近真值的结论,在实际估算时常采用算术平均值 $\bar{x}$ 代替真值,用各次测量值与算术平均值的差