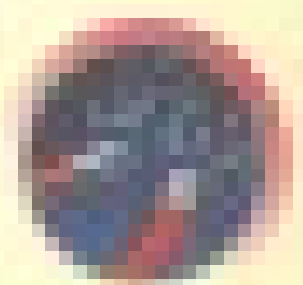
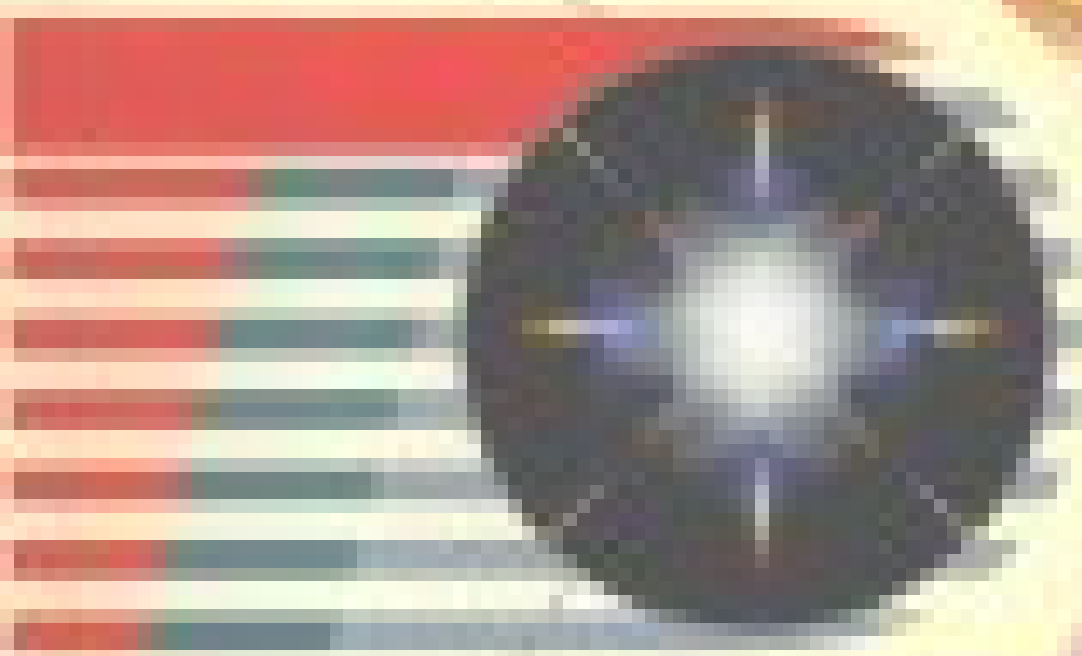


高等学校教材

# 大学物理实验

罗积军 徐 军 张清华 主编

西北工业大学出版社



普通物理学实验

# 大学物理实验

第二版

清华大学出版社

# 大学物理实验

罗积军 徐 军 张清华 主编

西北工业大学出版社

**【内容简介】** 本书是依据教育部高等学校非物理类专业物理基础课程教学指导分委员会和总参军队院校大学物理实验教学的基本要求而编写的,是第二炮兵工程学院多年物理实验教学的结晶。本书注重强化实验基本技能、基本方法和物理实验思想的训练,注重培养和提高科学实验素质,重点突出能力培养和创新意识的训练。

全书分为绪论、测量误差和实验数据处理、物理实验的基本方法、基础实验、综合设计性实验和附录六部分,共安排 31 个实验。

本书可作为高等工科大学各专业物理实验课程的教材,也可供其他有关专业选用。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

大学物理实验/罗积军,徐军,张清华主编. —西安:西北工业大学出版社,2008.3  
ISBN 978-7-5612-2352-9

I. 大… II. ①罗… ②徐… ③张… III. 物理学—实验—高等学校—教材  
IV. O4-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 020552 号

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路 127 号 邮编:710072

电 话:(029)88493844 88491757

网 址:www.nwpu.com

印 刷 者:陕西天元印务有限公司

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16

印 张:13.875

字 数:332 千字

版 次:2008 年 3 月第 1 版 2008 年 3 月第 1 次印刷

定 价:26.00 元

# 前 言

依据教育部高等学校非物理类专业物理基础课程教学指导分委员会和总参军队院校大学物理实验教学基本要求,结合第二炮兵工程学院新一代人才培养方案和大学物理实验课程标准,我们组织编写了《大学物理实验》。本教材吸收了国内外优秀物理实验教材的精华,融入了我们多年来物理实验教学改革的经验。物理实验是科学实验的先驱,体现了大多数科学实验的共性,在实验思想、实验方法以及实验手段等方面是各学科科学实验的基础,因此,在编写教材时我们注意了以下几点。

1. 物理实验教学内容整个体系贯穿着强化实验基本技能、基本方法和物理实验思想的训练,注意培养和提高科学实验素质,重点突出能力培养和创新意识的训练。

2. 大学物理实验是各工科院校对本科生进行实验技能系统训练的实验课程,因此,实验选题适当照顾了物理学的各个领域、不同实验方法及常用仪器使用,实验项目按由浅入深、循序渐进的原则安排教学内容和实验要求,使学生在全面掌握基本实验方法和技术的同时,适当地了解现代实验技术和现代测量测试技术。

3. 为便于学生预习和自学,在内容的叙述上,力求做到实验目的明确,实验原理清楚,仪器介绍实用、典型,实验要求简明可行。

每个实验概述了本实验的内容,介绍了这一实验技术在理论上或工程上的重要意义、应用范围以及该实验在方法上的特点,以扩大学生的眼界。每个实验都有思考题,学生做实验前后,考虑或回答与本实验原理、方法和数据处理等有关的问题,将有助于实验工作的深入开展。

实验教学是一项集体性的工作,实验室的建设和管理是基础,实验教材是核心。经过多年的教学实践,实验教材几经调整和修订,才达到现在的规模和水平,它是集体智慧和集体劳动的结晶,凝聚了许多老师(包括已退休和调离的同志)的心血。本书实际上是一项集体创作成果,在此,向对本书做出过贡献的所有同志表示衷心的感谢。

全书共分为绪论、测量误差和实验数据处理、物理实验的基本方法、基础实验、综合设计性实验和附录六部分,基础实验和综合设计性实验两章共 31 个实验。参加本书编写的同志有:罗积军、徐军、张清华、赵晓铭、刘长文、王莲芬、王红霞、侯素霞、李娟娟、赵云芳、周占荣等。李娟娟、赵云芳完成全书排版和部分插图绘制,全书由罗积军、徐军统稿,由赵晓铭审稿,何俊发教授对教材的编写提出过许多指导性的意见和建议。

本书在编写过程中得到了第二炮兵工程学院基础实验中心、物理教研室的全体教师及兄弟院校的支持,特别是西北大学姚合宏、冯忠耀的大力支持,在此表示衷心的感谢。

由于时间仓促,编者水平有限,难免有漏误之处,敬请批评指正,以便我们改进和提高。

编 者

2008 年 1 月

# 目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 大学物理实验的地位	1
1.2 大学物理实验的特点	2
1.3 物理实验必须把握的几个环节	2
第 2 章 测量误差和实验数据处理	4
2.1 测量及其分类	4
2.2 误差及其分类	6
2.3 不确定度	12
2.4 测量结果和不确定度的确定	13
2.5 有效数字及其运算法则	16
2.6 数据处理方法	19
习题	24
第 3 章 物理实验的基本方法	27
3.1 数量级估计法	27
3.2 比较测量法	29
3.3 转换测量法	30
3.4 积累放大法	32
3.5 模拟法	34
3.6 量纲分析法	37
习题	38
第 4 章 基础实验	39
4.1 基本测量(长度、质量、密度的测量)	39
4.2 杨氏弹性模量测量	46
4.3 刚体的转动惯量测量	49
4.3.1 扭摆法测量刚体的转动惯量	49
4.3.2 塔轮法测量刚体的转动惯量	53
4.3.3 三线摆测量刚体的转动惯量	56

4.4	落球法黏滞系数测量实验	59
4.4.1	线性拟合法测黏滞系数	59
4.4.2	黏滞系数测量仪测量黏滞系数	61
4.5	金属材料线胀系数测量	64
4.6	用电流场模拟静电场	66
4.7	电位差计综合实验	71
4.8	电桥平衡法测量电阻	74
4.8.1	用单臂直流电桥测电阻	75
4.8.2	用双臂直流电桥测低电阻	76
4.9	磁化曲线与磁滞回线的研究	80
4.10	等厚干涉现象的研究与应用	83
<b>第5章</b>	<b>综合设计性实验</b>	<b>88</b>
5.1	冷却法测定金属比热容	88
5.2	稳态法测量导热系数	91
5.3	热敏电阻的特性与应用	94
5.4	声速的测量	97
5.5	多普勒效应综合实验	100
5.5.1	多普勒效应及声速的测定	100
5.5.2	多普勒效应测量物体运动过程	102
5.6	温度传感器的温度特性测量实验	105
5.7	传感器综合实验	111
5.7.1	电阻应变式传感器特性的研究	111
5.7.2	交流全桥的应用——振幅测量	115
5.7.3	交流全桥的电子秤	116
5.7.4	霍尔传感器的直流激励特性实验	117
5.8	霍尔效应及其应用	118
5.9	磁阻传感器特性研究和地磁场测量	122
5.10	光电效应和普朗克常数测定	126
5.11	硅光电池特性研究	130
5.12	晶体的电光效应	134
5.13	夫兰克-赫兹实验	142
5.14	密立根油滴实验	146
5.15	数字万用表设计	151
5.16	调节分光计和测量三棱镜折射率	158
5.17	光强分布实验研究	164
5.18	用旋光仪测旋光性溶液的旋光率和浓度	168
5.19	光栅衍射原理与声速测量	172
5.19.1	超声光栅测声速	172

---

5.19.2 全息光栅衍射实验研究.....	176
5.20 迈克尔逊干涉仪.....	178
5.21 光学全息照相技术.....	183
5.21.1 三维物体的菲涅耳全息图制作与波前再现.....	184
5.21.2 白光再现反射体积全息图拍摄.....	189
附录.....	193
附录 1 中华人民共和国法定计量单位.....	193
附录 2 物理量及国际单位制(SI).....	197
附录 3 常用物理数据.....	198
参考文献.....	213



# 第1章 绪论

科学实验是科学理论的源泉,是工程技术的基础,是研究自然规律、认识客观世界、改造客观世界的基本手段。新的规律要靠实验来发现,科学理论要由实验来检验,工程技术和生产实践中的实际问题要用实验方法来解决。因此,为适应科学技术不断进步和迅速发展的需要,工科大学生不仅要具备比较深广的理论知识,而且要具有较强的从事科学实验的能力。

## 1.1 大学物理实验的地位

物理学是一门实验科学。物理规律的发现和物理理论的建立,都是以严格的物理实验为基础,并受到实验的检验。例如,赫兹的电磁波实验使麦克斯韦的电磁场理论获得普遍承认;杨氏的干涉实验使光的波动理论确立;卢瑟福的 $\alpha$ 粒子散射实验揭示了原子核的秘密;近代的高能粒子实验使人们深入到物质的更深层次——原子核和基本粒子内部探索其规律性。据调查统计,90%以上的物理学工作者是在实验物理学各个领域工作的。丁肇中教授在诺贝尔奖颁奖仪式上用汉语发表演说时说:“我是在旧中国长大的,因此,想借这个机会向发展中国家的青年强调实验工作的重要性。”“事实上,自然科学理论不能离开实验的基础,特别是,物理学是从实验产生的。”“我希望由于我这次得奖,能够唤起发展中国家的学生的兴趣,而注意实验工作的重要性。”爱因斯坦曾说过:狭义相对论“并不是起源于思辨;它们创立完全由于想要使物理理论尽可能适应于观察到的事实。”“物理学中没有任何概念是先验的必然的,或先验的正确的。唯一决定一个概念‘生存权’的是它同物理事件(实验)是否有清晰和单一无歧义的联系。”

从诺贝尔物理学奖获奖成果的情况看,因实验物理方面做出杰出贡献而获奖的占2/3以上。例如,1901年首届诺贝尔物理学奖得主德国物理学家伦琴因发现X射线而获奖,1902年荷兰物理学家塞曼因发现光谱线在磁场分裂现象而获奖,1903年法国的贝克勒尔和居里夫妇因发现天然放射性而获奖等。这些实验方面的发现已被公认为是物理学发展中的最伟大的成就,可见物理实验在物理学发展中的地位是多么重要。

物理实验在其发展过程中,形成了一套自己的理论、方法和技术,它们是进行各类科学实验的基础,因此,物理实验是高等工科院校对学生进行实验训练的一门独立的必修基础课,也是工科大学生进入大学后接受系统的实验方法和实验技能训练的开端,它使学生初步了解科学实验的主要过程和基本方法。

我国许多老一辈科学家也十分热爱、重视实验工作。钱临照教授说:“科学通过实验而获得真理,实验室是出真理的场所。”虞福春教授说:“理论、实验、技术具有不可分割的关系,其连接点是科学实验。”冯端教授说:“我认为对实验室的重要性再强调也不会显得过分。”“看一个高等学校是否水平高,首先是看它的实验室水平和工作状况。”

## 1.2 大学物理实验的特点

学生在物理实验课中主要是通过自己独立的实验实践来学习物理实验知识、培养实验能力和提高实验素养,这一学习任务决定了作为实验课程的物理实验有以下几个特点:

(1)实验带有很强的目的性。不论是验证性实验、应用性实验还是探索性实验,几乎都是在已经确立的理论指导下的实践活动,在有限的时间内,不但要完成实验课题(实验目的),而且还要完成学习任务(学习要求)。那种把实验课程看成是摆弄摆弄仪器、测测数据就达到目的的单纯实验观点是十分有害的。

(2)实验要采取恰当的方法和手段,以使所要观测的物理现象和过程能够实现,并达到符合一定准确度的定量测量要求。虽然方法和手段会随着科学技术和工业生产的进步而不断改进,但历史积累的方法仍是人类知识宝库精华的一部分,有了积累才能有创新,因此,从一开始就应十分重视实验方法知识的积累。

(3)实验中所包括的技能,其内容十分广泛。仪器的选择、使用和保养,设备的装校、调整和操作,现象的观察、判断和测量,故障的检查、分析和排除……有众多的原则和规律,可以说是知识、见解和经验的积累。唯有实践,既动手又动脑地不断实践,才有可能获得这种技能,单凭看书是不可能学到的。

(4)实验需要用数据来说明问题,数据是实验的语言。物理实验中数据处理有各种不同的方法和特定的表达方式。测量结果、验证理论、探索规律和分析问题,无一不用数据,它是学术交流和报告技术成果最有力的工具和最准确的语言。

实验集理论、方法、技能和数据于一个整体,它不但要求实验者弄懂实验内容与实验方法的道理,而且还要求实验者根据这些道理付诸实现,最后还要从获得的数据结果中得出应有的结论,这就是物理实验的特点。

## 1.3 物理实验必须把握的几个环节

做任何一个实验时,必须把握住以下三个重要环节。

### 1. 实验预习

预习至关重要,它决定着实验能否取得主动和收获的大小。预习包括阅读资料、熟悉仪器和写出预习报告。

仔细阅读实验教材和有关的资料,要重点解决三个问题。

- (1)做什么:这个实验的任务是什么,要达到什么目的;
- (2)根据什么去做:实验课题的理论依据是什么,用什么实验方法来完成实验;
- (3)怎么做:实验的方案、条件、步骤及实验的关键。

预习报告应该包括实验目的、实验原理简述、实验简要步骤、数据记录表格、电路图或光路图。设计性实验要拟出实验方案。

### 2. 实验过程

学生进入实验室按照编组使用相应的指定仪器。像一个科学工作者那样要求自己,井井有条地布置仪器,根据事先设想好的步骤演练一下,然后再按确定的步骤开始实验。要注意细

心观察实验现象,认真钻研和探索实验中的问题。不要期望实验工作会一帆风顺,要把遇到问题看做是学习的良机,冷静地分析和处理它。仪器发生故障时,也要在教师指导下学习排除故障的方法。总之,要把着力点放在实验能力的培养上,而不是测出几个数据就认为完成了任务。

要做好完备而整洁的记录,例如研究对象的编号,主要仪器的名称、规格和编号。原始数据要用钢笔或圆珠笔记入事先准备好的表格中,如确系记错,也不要涂改,应轻轻划一道,在旁边写上正确值(错误多的,须重新记录),使正确数据都能清晰可辨,以供在分析测量结果和误差时参考。不要用铅笔记录,给自己留有涂抹的余地。也不要先草记在另外的纸上,再誊写在数据表格里,这样容易出错,况且,这也不是“原始记录”了。希望同学们注意纠正自己的不良习惯,从一开始就注重培养良好的科学作风。

实验结束时,先将实验数据交教师审阅签字,然后再整理还原仪器,经教师验收后,方可离开实验室。

### 3. 实验总结

实验后要对实验数据及时进行处理。如果原始记录删改较多,应加以整理,对重要的数据要重新列表。数据处理过程包括计算、作图、误差分析等。计算要有计算式(或计算举例),代入的数据都要有依据,便于别人看懂,也便于自己检查。作图要按作图规则,图线要规范、美观。数据处理后应给出实验结果。最后要求撰写出一份简洁、明了、工整、有见解的实验报告。这些是每一个大学生必须具备的报告工作成果的能力。

实验报告内容一般应包括:

(1)实验名称。

(2)实验目的。

(3)实验原理。在理解的基础上,用简短的文字扼要地阐述实验原理,力求做到图文并茂。简要叙述有关物理内容(包括电路图或光路图或实验装置示意图)及测量中依据的主要公式,式中各量的物理含义及单位、公式成立所应满足的实验条件等。

(4)实验步骤。根据实际的实验过程,写明关键步骤和注意要点。

(5)数据报告与数据处理。根据主要原理公式计算出最后的结果,也可采用列表法和作图法表示实验结果。对所得数据能够进行不确定度分析,并能用有效数字正确的表示,一般均要求有主要的处理过程。

(6)小结和讨论。一篇好的实验报告,除了有准确的测量记录和正确的数据处理、结论外,还应该对结果作出合理的分析讨论,从中找出被研究事物的运动规律,并且判断自己的实验或研究工作是否可信或有所发现,因此必须对实验结果作出合理判断。最后,对书中提出的思考题作出回答,也可谈谈实验的心得体会等。

## 第2章 测量误差和实验数据处理

### 2.1 测量及其分类

物理实验中的主要内容之一就是进行观测。所谓“观”，就是认真观察实验中可能出现的各种物理现象，以便认识其规律。所谓“测”，就是定量地测出各物理量的数据。观察往往只能对物理现象做定性的分析，只有通过定量测量，得到各物理量，并找出它们之间的数量关系，才能对各种物理现象有深刻的、规律性的认识。可见，测量在物理实验中占有较重要的地位。

#### 一、测量的定义

测量就是用实验手段对客观事物获取定量信息的过程。具体地说，就是将待测量与标准量进行比较，确定被测量的量值。通俗地讲就是借助仪器、用某一计量单位把待测量的大小表示出来，确定待测量是该计量单位的多少倍。测量数据要写明数值大小和计量单位。

#### 二、测量的分类

##### 1. 按测量方式分为直接测量和间接测量

(1) 直接测量。用测量仪器能直接测出被测量的测量称为直接测量，相应的被测量称为直接测量量。例如，用米尺测物体长度、用天平称物体质量、用秒表测时间等，这些均是直接测量。相应的长度、质量、时间等称为直接测量量。直接测量按测量次数分为单次测量和多次测量。

① 单次测量：只测量一次的测量称为单次测量。主要用于测量精度要求不高、测量比较困难或测量过程带来的误差远远大于仪器误差的测量中。如在测杨氏弹性模量实验中，测钢丝长度用的是单次测量。

② 多次测量：测量次数超过一次的测量称为多次测量。多次测量按测量条件，主要分为等精度测量和非等精度测量。

(2) 间接测量。对于某些物理量的测量，由于没有合适的测量仪器，不便或不能进行直接测量，只能先测出与待测量有一定函数关系的直接测量量，再将直接测量的结果代入函数式进行计算，得到待测物理量的测量值，这个过程称为间接测量。即先进行直接测量，然后经过一定的数学运算才能得到测量结果的测量称为间接测量。相应的被测量称为间接测量量。

例如，用单摆法测量重力加速度，其公式为  $g = \frac{4\pi^2 L}{T^2}$ 。可以先用米尺和计时器对  $L$  和  $T$  分别进行直接测量，然后将  $L$  和  $T$  的值代入测量公式，计算出重力加速度  $g$ 。整个过程称为间接测量，其中  $g$  是间接测量量， $L$  和  $T$  是直接测量量。

国际制(SI)基本单位、辅助单位见表 2.1.1。

表 2.1.1 国际制(SI)基本单位、辅助单位

物理量	单位名称	单位符号	定 义	
基 本 单 位	长度	米	m	1 m 等于 $^{86}\text{Kr}$ 原子的 $2p_{10} \sim 5d_5$ 能级之间跃迁所对应的辐射在真空中的 $1.650\,763\,73 \times 10^6$ 个波长的长度
	质量	千克	kg	1 kg 等于国际千克原器的质量
	时间	秒	s	1 s 相当于 $^{133}\text{C}$ 原子基态两个超精细能级之间跃迁所对应辐射的 $9.192\,631\,770 \times 10^9$ 个周期的持续时间
	温度	开(尔文)	K	1 K 是水三相点热力学温度的 $1/273.16$
	电流	安(培)	A	强度相等的恒定电流通过真空中相距 1 m 的两根无限长且圆截面可忽略的平行直导线时,若此两导线间每米长度上产生的力为 $2 \times 10^{-7}$ N,则称此电流强度为 1 A
	物质的量	摩(尔)	mol	1 mol 是某物质系统的量,该系统中所含的结构粒子(原子、离子、分子等)数与 $1.2 \times 10^{-2} \text{kg}^{12}\text{C}$ 所含的原子数相等
	光强度	坎(德拉)	cd	在压力 $1.013\,25 \times 10^5$ N/m $^2$ 下,处于铂凝固点的黑体 $1/600\,000$ m $^2$ 光滑表面在垂直方向上的发光强度为 1 cd
辅 助 单 位	平面角	弧度	rad	1 rad 是一圆内两条半径之间的平面角,这两条半径在圆周上所截弧长与半径相等
	立体角	球面度	sr	球面度是一立体角,其顶点位于球心,它在球面上所截取的面积等于以球半径为边长的正方形的面积

## 2. 按测量条件分为等精度测量和非等精度测量

(1)等精度测量:在同等条件下进行的多次重复性测量称为等精度测量,即环境、人员、仪器、方法等不变,对同一个待测量进行多次重复测量。由于各次测量的条件相同,测量结果的可靠性是相同的,测量精度也是相同的,这样的测量就是等精度测量。

(2)非等精度测量:在特定的不同测量条件下,用不同的仪器、不同的测量方法、不同的测量次数、由不同的人员进行测量和研究,这种测量叫做非等精度测量。它主要用于高精度的测量中。

在实际测量中,常用的测量主要是单次测量、等精度测量和间接测量。当测量精度要求不高时,用单次测量;测量精度要求比较高时,用等精度测量;在无法使用直接测量时,才用间接测量。

## 三、测量方法

测量的方法很多,常用的有直读测量法、比较测量法、替代测量法、放大测量法、平衡测量法、模拟测量法、几何光学测量法、干涉测量法和衍射测量法等。

## 四、测量结果的确定

### 1. 直接测量值的确定——算术平均值

为提高测量的可靠程度,常常对同一物理量进行多次测量。如对物理量  $x$  等精度测量,得到一测量列 $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 。一般来说,各次测量值  $x_i$  并不可能完全一致,而且也不可能判断出哪一次的测量值恰好是真值(实际上,真值一般也是不可知的)。那么,如何确定测量值呢?通

常,在测量没有错误及符合统计规律的情况下,可以用测量列的算术平均值  $\bar{x}$  表示测量的最佳值,即

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2.1.1)$$

不难理解,对于有限次测量,平均值会随着测量次数的不同而有所改变,也会因不同列的测量数据而稍有差别。因此只能“期望”诸测量值的算术平均值为最可信赖值或最佳值。可以证明,当测量次数无限多时,算术平均值将无限接近真值。在数学上,称式

$$\langle x \rangle = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2.1.2)$$

为数学期望值。

## 2. 间接测量值的确定

对于间接测量值  $w = f(x, y, \dots)$ ,它由诸直接测量值  $x, y, \dots$  所确定。当多次测量时,有两种可能的情况:①各直接测量值分别独立地进行测量,且测量条件变化幅度很小;②每次都是差不多同时或同一条件下对各量测量一遍,而每次测量之间又都是相互独立的。严格说来,在不同的情况下计算间接测量算术平均值的方法是不同的。对情况①,各直接测量值  $x, y, \dots$  是相互独立地进行测量的。因此,先分别求出它们各自的算术平均值  $\bar{x}, \bar{y}, \dots$ ,然后将其代入函数关系式  $w = f(x, y, \dots)$  中求得  $w$  的测量值。即

$$\bar{w} = f(\bar{x}, \bar{y}, \dots) \quad (2.1.3)$$

对于情况②,每一次测量得一组  $x_i, y_i, \dots (i = 1, 2, \dots, k)$ ,相应地有  $w_i = f(x_i, y_i, \dots)$ ,然后以其多次测量算术平均值  $\bar{w}$  作为测量值。即

$$\bar{w} = \sum_{i=1}^k w_i / k = \sum_{i=1}^k f(x_i, y_i, \dots) / k \quad (2.1.4)$$

通常,当测量条件没有大幅度变化时,两种计算方法所得到的结果是极其相近的,因此,除了测量幅度过大时必须采用式(2.1.4)外,不论何种情况,都可以采用较简单的式(2.1.3)来计算。

## 2.2 误差及其分类

由于人类认识能力不足和科学技术水平的限制,仪器制造不可能十分精确,观测者的测量方法和技能技巧也会不同程度地受到主、客观条件的影响。由于外界环境条件的干扰,仪器的使用条件不易得到完全满足,物理量本身客观存在的真值也会发生变化。此外,任何理论公式都是建立在一定理论或一定条件基础上的抽象和简化,而实际测量都是在一定的、比理想模型复杂得多的客观环境中进行,因此,每一个测量要素对物理量的测量值均可能产生影响,使其与真值之间不可避免地产生差异。

### 一、误差的定义及表示

误差定义为测量值和真值之差。按表达方式,分为绝对误差和相对误差。

#### 1. 绝对误差

直接反映测量值的绝对值大小和方向的误差称为绝对误差,可表示为

$$\delta_x = x - x_0 \quad (2.2.1)$$

式中,  $\delta_x$  表示绝对误差,  $x$  表示测量值,  $x_0$  表示真值。

绝对误差反映了测量的准确度。由于误差存在于一切测量过程中, 真值虽然是客观存在的实际值, 但无法得到, 因此等精度测量中常用测量值和平均值之差估算误差, 其表达式为

$$\delta_x = x - \bar{x} \quad (2.2.2)$$

在估算绝对误差时, 有时用被测量的公认值、理论值或更高精度的测量值来代替真值  $x_0$ , 这些值叫做“约定真值”。

## 2. 相对误差

用绝对误差和真值比的百分数表示, 称相对误差, 也称为百分误差。

$$E = |\delta_x/x_0| \times 100\% \quad (2.2.3)$$

## 二、误差的分类及处理方法

测量中误差按其产生的条件, 可归纳为系统误差、随机误差和粗大误差三类。

### 1. 系统误差

在对同一物理量进行多次等精度测量时, 误差为常数或以一定规律变化的误差称为系统误差。系统误差分为可定系统误差和未定系统误差。

可定系统误差是测量中大小、正负可确定的误差。测值中应消除掉该误差。例如, 米尺零刻度线被磨损或弯曲, 若不注意, 会产生零点不为零的可定系统误差。因此, 测量时应该避开零刻度线, 用中间的某整刻度线作为测量的起始点, 再读出被测物的终止点, 两点相减就避开了零点不准的可定系统误差。再如, 千分尺(亦称螺旋测微器) 零点不为零, 测量时应先记下零点值  $d_0$ , 再测量被测量值的大小  $d_1$ , 两者相减( $d_1 - d_0$ ) 的结果就消除了千分尺  $d_0$  的可定系统误差。

未定系统误差是测量中只能确定大小, 不能确定正负的误差(如仪器不确定度产生的测量误差), 将其合成到测量结果的不确定度中。例如, 千分尺的示值误差、数字毫秒计的不确定度、分光计的不确定度、电表的精度(即准确度等级) 等产生的测量误差都是未定系统误差。

#### (1) 系统误差产生的原因。

1) 由仪器不确定度产生的系统误差: 即仪器本身缺陷、校正不完善或没有按规定条件使用而产生的误差。例如, 仪器刻度不准、刻度盘和指针安装偏心、米尺弯曲、天平两臂不等长等。

2) 由测量公式产生的系统误差: 测量公式本身的近似性或没有满足理论公式所规定的实际条件而产生的误差。例如, 单摆周期公式  $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$  的成立条件是摆角小于  $5^\circ$ , 用这个近似公式计算  $T$  时, 计算本身就带来了误差; 又如用伏安法测量电阻时, 忽略了电表内阻的影响等。

3) 由测量环境产生的系统误差: 在测量过程中, 因周围温度、湿度、气压、振动、电磁场等环境条件发生有规律的变化引起的误差。例如, 在  $25^\circ\text{C}$  时标定的标准电阻在  $300^\circ\text{C}$  环境下使用等。

4) 由操作人员产生的系统误差: 操作者因不良习惯或生理、心理等因素造成的误差。例如, 用米尺测长读数时斜视读出; 用秒表计时的掐表速度较慢等。

#### (2) 发现系统误差的方法。

1) 理论分析法: 从原理和测量公式上找原因, 看是否满足测量条件。例如, 实际中电压表内阻不等于无穷大、电流表内阻不等于零, 均会产生系统误差。

2) 实验对比法: 改变测量方法和条件, 比较差异, 从而发现系统误差。例如, 调换测量仪器

或操作人员,进行对比,观察测量结果是否相同,以此进行判断确认。

3) 数据分析法:分析数据的规律性,以便发现误差。例如残差法,对一组等精度测量数据,通过计算偏差、观察其大小和比较正、负号的数目,可以寻找系统误差。

(3) 可定系统误差的消除和减小方法。

下面列举一些例子:

交换法:用天平两次称衡一物体质量时,第二次称衡将被测物与砝码交换。两次称量结果分别为  $m_1, m_2$ , 则取  $m = \sqrt{m_1 m_2}$  为最终称量结果,可以克服天平不等臂误差。

替代法:在电表改装实验中测量表头内阻时,通过单刀双掷开关分别对表头和电阻箱进行同等测量,调节电阻箱阻值,保持电路总电流相同,此时电阻箱的阻值就是被测表头内阻,这样就避免了测量仪器内阻引入的误差,如图 2.2.1 所示。

零示法:电桥、电位差计均用此法,指零仪器两端等电位(即示零)时测量。减小仪器误差和避免指零仪器内阻引入的误差。

异号法:在霍尔效应实验中改变霍尔片上的电流方向进行测量,消除不等位误差。

半周期法:分光计的双游标读数,以克服中心轴的偏心误差。

## 2. 随机误差

多次等精度测量中误差变化是随机的,忽大忽小,忽正忽负,其总体遵从正态分布(也叫高斯分布),如图 2.2.2 所示。即满足高斯方程

$$f(\delta_x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}(\frac{\delta_x}{\sigma})^2} \quad (2.2.4)$$

(1) 正态分布的特性。高斯方程中  $\sigma$  称为标准差,是随机误差  $\delta_x$  的分布函数  $f(\delta_x)$  的特征量。其表达式为

$$\sigma = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x_0)^2} \quad (2.2.5)$$

$\sigma$  确定,  $f(\delta_x)$  就唯一确定;反之,  $f(\delta_x)$  确定,  $\sigma$  的大小也就唯一确定了。 $\sigma$  越小,测量精度高。曲线越陡,峰值越高,随机误差越集中,测量重复性越好; $\sigma$  越大则反之,如图 2.2.3 所示。

为了统计随机误差的概率分布,将概率密度函数在以下区间积分,得到随机误差在相应区间的概率值分别为

$$P(-\infty, +\infty) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(\delta_x) d(\delta_x) = 1$$

$$P(-\sigma, +\sigma) = \int_{-\sigma}^{+\sigma} f(\delta_x) d(\delta_x) = 68.3\%$$

$$P(-2\sigma, +2\sigma) = \int_{-2\sigma}^{+2\sigma} f(\delta_x) d(\delta_x) = 95.4\%$$

$$P(-3\sigma, +3\sigma) = \int_{-3\sigma}^{+3\sigma} f(\delta_x) d(\delta_x) = 99.7\%$$

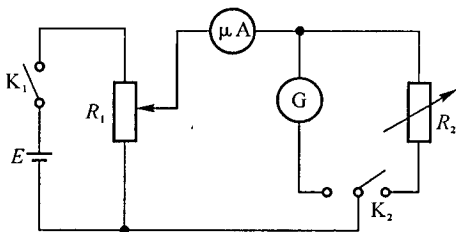


图 2.2.1 用替代法测电表内阻电路图

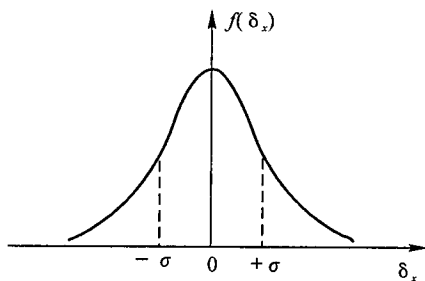


图 2.2.2 正态分布曲线



随机误差落在  $\pm 3\sigma$  之外的概率仅为 0.3%，是正常情况下不应该出现的小概率事件，因此将  $\pm 3\sigma$  定为误差极限。即： $X_i \geq |3\sigma|$  时为坏值，不是误差。

正态分布具有 4 个特点：

单峰性：小误差多而集中，形成一个峰值。

对称性：正、负误差出现的概率相同。

有界性： $|3\sigma|$  为误差界限。

抵偿性：正、负误差具有抵消性。当  $n \rightarrow \infty$  时， $\delta_x \rightarrow 0$ ， $\bar{x} \rightarrow x_0$ 。

对随机误差的处理方法是采取多次测量，取算术平均值作为测量结果，以减小随机误差，提高测量精度。

(2) 测量列的标准差。高斯方程中的标准差  $\sigma$  是理论值，当  $n \rightarrow \infty$  时，才趋于高斯分布。在实际测量中，只能进行有限次测量，而有限次测量的随机误差实际遵从  $t$  分布。 $t$  分布曲线较高斯分布曲线稍低而宽，两边较高，两者形状非常相近，如图 2.2.4 所示。

实验中，先用贝赛尔 (Bessel) 公式计算测量列的标准偏差

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2.2.6)$$

然后用  $t$  分布因子对标准偏差进行修正，估算出测量列的标准差

$$\sigma = S \times t_{0.683} \quad (2.2.7)$$

在测量次数选择时，要注意  $t$  因子的修正。由表 2.2.1 可见， $n = 6$  是拐点； $n > 6$ ， $t$  变化小而缓慢，可取

$$\sigma \approx S \quad (n \geq 6) \quad (2.2.8)$$

表 2.2.1 实验中常用的  $t$  因子

$n$	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$t_{0.683}$	1.84	1.32	1.20	1.14	1.11	1.09	1.08	1.07	1.06	1.05	1.03

(3) 平均值的标准差。平均值也是个随机变量，服从正态分布。如果对某被测量  $x$  进行多组多次等精度测量，每组测量列的平均值  $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots$ ，不尽相同，只是随机误差已很小。由最小二乘法可证明，平均值是真值的最佳估计值，因此实验中只需对被测量进行 1 组等精度测量，其平均值的标准差为

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = t \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2.2.9)$$

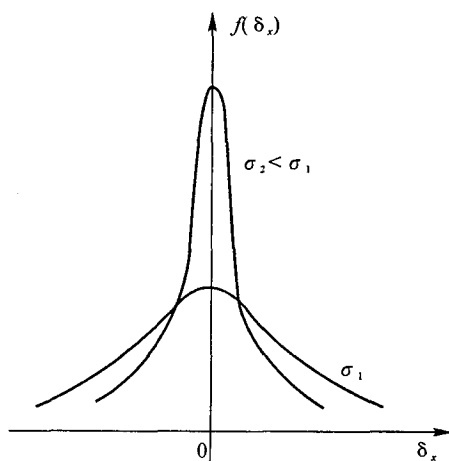


图 2.2.3  $\sigma$  对  $f(\delta_x)$  的影响示意图

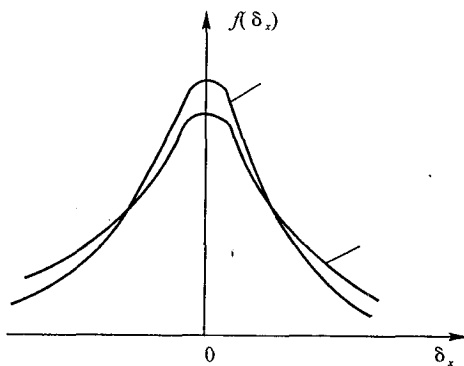


图 2.2.4  $t$  分布与高斯分布曲线的比较示意图