

大学物理实验

基础与综合部分

丁益民 徐扬子 主编

 科学出版社
www.sciencep.com

04-33/216

2008

大学物理实验

——基础与综合部分

丁益民 徐扬子 主编

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是依据高等学校理工科物理实验教学的基本要求和实际编写的物理实验教材。共分8章,分别介绍了误差与数据处理的有关知识、物理实验中基本的测量方法与常用测量仪器、实验数据的计算机处理方法与物理实验的计算机仿真方法,安排了基础性实验19个、综合性实验25个、设计性实验8个。

本书既可作为高等学校物理类教科书或参考书,也可供理工科其他专业使用。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验.基础与综合部分/丁益民,徐扬子主编.—北京:科学出版社,2008

ISBN 978-7-03-020811-8

I.大… II.①丁…②徐… 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001485号

责任编辑:张颖兵 吉正霞/责任校对:王望容

责任印制:董 丽/封面设计:方葵 GONGZUOSHI

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

武汉市新华印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2008年1月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2008年1月第一次印刷 印张:19 3/4

印数:1—3 000

字数:454 000

定价:29.80元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

为适应 21 世纪对高素质人才“厚基础、宽视野、富创新”的要求,多年来,我们在进行课程建设和教学改革的基础上,逐渐形成了自己的教学特色。本书将努力反映近年来物理实验教学改革的成果及其发展趋势。

传统的物理实验课程体系,在教学理念上,采用的是分科式、封闭式的教学,将物理学的有机整体割裂为力、热、电、光等部分进行教学,不利于学生综合素质的提高;在教学内容上,注重了传统的验证性实验,忽略了综合性、设计性实验,不利于学生创新意识的培养;在教学手段上采用的是传统的教学方式和手工式或计算器辅助的数据处理,既浪费时间又不利于学生信息素养的提高,不适应信息与知识社会对人才的需求,为此我们在大学物理实验的教学实践中作出了如下改革。

1) 实验内容的改革

教学内容的更新是物理实验教学改革的首要任务。为了适应社会发展的要求,在保持实验课原有的一些基础性实验内容的基础上,增加了一些综合性、应用性的实验项目,增设了一些研究性、设计性的实验项目,既保证了对学生的实验基本技能的培养,也开拓了学生的思维、激发了创新意识。

2) 课程体系的改革

课程体系的改革是物理实验教学改革的核​​心。改革以力、热、电、光等学科内容进行分科式教学的方式,以基础性实验、综合性实验、研究性实验和设计性实验等分级式教学的方式,满足不同专业、不同基础和不同能力学生的需求,有利于因材施教,使优秀学生脱颖而出。

3) 教学手段的改革

随着信息技术的高度发展,信息技术在教学领域中的应用越来越受到重视。教学手段的改革主要体现在三个方面:一是采用多媒体辅助实验教学提高实验教学的效果;二是利用计算机处理实验数据把学生从复杂的数值计算中解放出来,节省学生的时间;三是开发计算机仿真实验弥补实验设备的不足,扩展物理实验的空间。

4) 教学管理的改革

完善教学管理是物理实验教学改革的保证。建立学生实验网上预约、在线预习、电子报告和电子考评等制度不仅可以使学生在实验的时间和空间上有更大的自由度,还能使实验成绩的评定更科学、更合理、更准确。

本书共分 8 章,计 52 个实验。第一章为绪论,介绍实验课的目的与要求。第二章为测量与不确定度,介绍实验测量的一些基本概念和误差分析的有关理论。第三章为实验数据的计算机处理,介绍用 Excel 处理实验数据的方法。第四章为基本测量方法与常用物理量的测量,分别介绍了物理实验中基本的测量方法和常用物理量的测量仪器。第五章为基础性实验,由力、热、电、光等方面的 19 个基本实验组成。第六章为综合性实验,包括 25 个跨学科、多技术综合应用的实验。第七章为设计性实验,介绍设计性实验的目的、

任务、过程与要求,并安排了8个设计性实验项目。第八章为物理实验的计算机模拟,探讨物理实验仿真模拟的过程与方法。

参加本书编写的有丁益民(第一章、第二章、第三章、第四章的一部分、第八章、实验1~7、20~29、42、43、46、47)、徐杨子(第四章的一部分、实验10~13、15~19、30~32、36~41、48~52)、成元发(实验8、9、45)、肖海波(实验34、35)、王玮(实验14、33)、汤恒江(实验44),全书由丁益民负责策划和统稿。在编写的过程中得到了湖北大学物理学与电子技术学院、物理学科部和物理实验教学示范中心的有关领导和老师的大力支持。同时,我们还参阅了兄弟院校的有关教材,汲取了其中的宝贵经验,在此表示感谢。

限于编者的知识水平和教学经验,加之编写时间仓促,书中难免有疏误之处,请读者批评指正。

e-book 网址: <http://www.hubu.edu.cn/> → 实验中心 → 物理实验教学示范中心

编 者

2007.9 于武汉

目 录

第一章 绪论	1
第一节 物理实验的作用与地位	1
第二节 大学物理实验课的目的与任务	2
第三节 大学物理实验课的教学流程	3
第二章 测量与不确定度	5
第一节 测量	5
第二节 误差	7
第三节 不确定度与测量结果的表示	12
第四节 有效数字	18
第五节 实验数据的处理方法	21
第三章 实验数据的计算机处理	29
第一节 Excel 及其常用函数	29
第二节 用 Excel 求平均值及不确定度	30
第三节 用 Excel 处理直线拟合问题	32
第四节 用 Excel 图表工具作图	33
第五节 基于 Excel 的实验数据处理系统	34
第四章 基本测量方法与常用物理量测量	36
第一节 基本测量方法	36
第二节 长度的测量	40
第三节 质量的测量	44
第四节 时间的测量	47
第五节 温度的测量	48
第六节 电磁学物理量的测量	51
第七节 光学物理量的测量	58
第五章 基础性实验	70
实验 1 长度测量与物质密度的测定	70
实验 2 气垫导轨上弹簧振子的简谐运动	72
实验 3 气垫导轨上阻尼振动的研究	75
实验 4 三线摆法测定物体的转动惯量	78
实验 5 拉伸法测金属丝的杨氏模量	82
实验 6 气体比热容比的测定	86
实验 7 金属线膨胀系数的测定	90
实验 8 伏安法测电阻元件的特性	92
实验 9 用惠斯通电桥测电阻	95

实验 10	限流电路与分压电路	100
实验 11	用模拟法测绘静电场	104
实验 12	电位差计的原理与应用	108
实验 13	圆线圈与亥姆霍兹线圈的磁场	112
实验 14	示波器的使用	115
实验 15	薄透镜焦距的测定	124
实验 16	分光计的调节与使用	129
实验 17	等厚干涉的应用	134
实验 18	用双棱镜干涉测钠光波长	139
实验 19	衍射光栅	143
第六章 综合性实验		147
实验 20	动态法测金属的杨氏模量	147
实验 21	气垫导轨上物体碰撞的研究	152
实验 22	空气、液体及固体介质的声速测量	155
实验 23	液体表面张力系数的测定	161
实验 24	导热系数的测量	164
实验 25	冷却法测金属比热容	168
实验 26	干涉法测定金属的线膨胀系数	170
实验 27	用波尔共振仪研究受迫振动	174
实验 28	双光栅弱振动研究	179
实验 29	用落球法测量液体的黏度	184
实验 30	电子束的电偏转与磁偏转研究	186
实验 31	霍耳效应及其应用	194
实验 32	RLC 电路的暂态过程研究	197
实验 33	铁磁物质动态磁滞回线的测试	203
实验 34	用冲击电流计测磁感应强度、电容和电阻	209
实验 35	弗兰克-赫兹实验	215
实验 36	光电效应和普朗克常量的测定	219
实验 37	CCD 微机密立根油滴实验	227
实验 38	非线性电路振荡周期的分岔与混沌实验	233
实验 39	用磁阻传感器测量地磁场	236
实验 40	全息照相与观察	239
实验 41	光学材料折射率的测定	244
实验 42	迈克耳孙干涉仪的调节和使用	250
实验 43	单色仪的定标和滤光片光谱透射率的测定	256
实验 44	光偏振现象的研究	262
第七章 设计性实验		268
实验 45	固体、液体和气体密度的测量设计	270
实验 46	气垫导轨上滑块运动的研究	272

实验 47	重力加速度测量的研究	273
实验 48	导体的电阻率的测定	276
实验 49	万用电表的设计与制作	277
实验 50	望远镜与显微镜的组装	281
实验 51	透镜组基点的测定	283
实验 52	媒质折射率与波长关系的研究	285
第八章	物理实验的计算机模拟	287
第一节	计算机仿真模拟的过程	287
第二节	仿真实验的开发软件	288
第三节	物理模拟实验实例	290
参考文献		297
附录 A	中华人民共和国法定计量单位	298
附录 B	物理学常量表	301

第一章 绪 论

第一节 物理实验的作用与地位

物理学是研究物质运动的最一般规律及物质基本结构的科学,是实验科学。实验是物理学的基础,无论是物理概念的产生,还是物理规律的发现,都是建立在严格的科学实验基础上的;同时,建立起来的理论正确与否也必须通过实验来验证。因此,物理实验在物理学的发展过程中起着重要的作用。

1. 物理实验为物理规律的发现打下坚实的基础

真正把科学实验方法引入到物理学研究中的是 16 世纪的意大利物理学家伽利略,伽利略做了著名的比萨斜塔实验后又做了斜面实验,在设计思想巧妙的斜面实验中,他把当时难以直接测量的速度和时间的关系,转化为路程和时间的关系,并通过实验的研究和数学推理得到了反映匀加速直线运动重要特性的时间平方定律,从而断定斜面运动是匀加速直线运动;在改变斜面倾斜度实验时获得了同样的定律,推断出自由落体运动也是匀加速直线运动,从而揭示出自由落体运动之谜,彻底否定了亚里士多德关于速度与外力成正比等错误的运动学理论。由此可见物理规律的发现是以物理实验为基础的。

2. 物理理论的正确性需通过物理实验进行验证

1924 年法国人德布罗意在光波具有微粒性的启发下,明确提出实物粒子具有波动性,即通常人们所说的“波粒二象性”,假设粒子能量为 E ,动量为 p ,同时伴随着物质波的频率为 ν ,波长为 λ ,则它们之间的关系为 $E = h\nu$, $p = h/\lambda$,这是一个大胆而伟大的假设。伟大的物理学家爱因斯坦,对此给予充分的肯定:“他这是照亮我们最难解开的物理学之谜的第一缕微弱的光”,并提名德布罗意参评诺贝尔物理学奖。要强调说明的是,德布罗意本人当时指出,可以通过电子在晶体的衍射实验来证明上述假设。1927 年,美国科学家戴维森与革末用被电场加速的电子束打在镍晶体上得到的衍射图样算出电子束动量对应的物质波长与在晶体光栅上衍射极大值对应波长的关系,证实了德布罗意关于 p, λ 间的假设关系成立。最终德布罗意的假设得到公认,他本人也获得了 1929 年诺贝尔物理学奖。这一历史事实雄辩地说明了实验结果在物理理论的确立中所占有的重要地位和所起的关键作用。

由于物理实验在物理学中的重要地位,引人注目的诺贝尔奖常常奖给在物理实验中有重大发现的人。在诺贝尔物理学奖中,从 1901 年第一次授奖至今已有百余年的历史,有 160 余名获奖者,其中因实验物理学方面的伟大发现或发明而获奖的占三分之二以上,如 1901 年,首届诺贝尔物理学奖得主德国人伦琴,他因发现 X 射线而获奖;1902 年的得主荷

兰人塞曼,他在1894年发现光谱线在磁场中分裂的现象;1903年的得主法国人贝克勒尔和居里夫妇,他们发现了天然放射性,从而成为了核物理学的奠基人。由此看出,这些实验方面的发现已被公认为物理学发展中最伟大的成就。可见实验物理在物理发展中的地位是多么重要。

可以毫不夸张地说,没有物理实验就没有物理学的发展,正是由于实验手段的不断进步、实验精度的不断提高、实验设计思想的巧妙创新等,才使得人类在认识自然界的历程中不断前进,不断地攀上更高的高峰。

第二节 大学物理实验课的目的与任务

教学实验不同于科学实验,它是以教学为目的,其目标一般不在于探索,而在于培养人才,它是以传授知识、培养人才为目的的。因此,教学实验与科学实验无论从宗旨、内容和形式上都有所区别。教学实验一般都是理想化了的,是排除了次要干扰因素而简化过的,是经过精心设计准备,一定能成功的。尽管如此,教学实验的地位仍然非常重要,它在培养学生在实验中观察、分析和发现问题的能力,以及培养学生动手能力和创新精神等方面都起着重要的作用。

大学物理实验作为大学理工科专业学生的一门专业基础课,其作用不仅在于实验的内容,更重要的是实验进行的过程。在物理实验的过程中,学生不仅掌握了知识,培养了能力,而且通过实验过程了解了科学研究的方法,树立了严谨的科学态度和一丝不苟的工作作风,为将来的工作和学习打下了坚实的基础。物理实验课程作为一门独立的基础课程,有如下三个方面的目的与任务。

1. 加强学生对基础知识的掌握

通过对实验现象的观察、分析和对物理量的测量,使学生掌握物理实验的基本知识、基本方法和基本技能;同时通过对物理原理的运用、物理实验方法的训练,加深了学生对物理学基本原理的理解。

2. 培养和提高学生科学实验的能力

(1) 信息处理能力。通过自行阅读实验教材或网上资料,正确理解实验目的、原理、内容和方法,在实验前收集相关的实验信息,在实验后运用计算机处理实验数据。

(2) 动手实践能力。在教师的指导下,借助实验教材和仪器说明书,正确调整和使用常用仪器。

(3) 思维判断能力。运用物理理论,对实验现象进行分析和判断。

(4) 书面表达能力。正确记录和处理数据,撰写合格的实验报告。

(5) 综合设计能力。根据课题要求,确定实验方法和条件,合理选择实验仪器,拟定具体的实验步骤。

(6) 科技创新能力。通过进行研究性实验和设计性实验,了解知识的发现与创新的过程,强化创新意识,提高创新能力。

3. 培养学生的科学实验素养

物理实验的教学是注重学习过程的教学,在物理实验过程中,不仅使学生物理学知识得到加深、科学实验能力得到提高,而且还培养学生实事求是的科学作风、严肃认真的工作态度、主动进取的探索精神、相互协作的团队意识和爱护公物的优良品质,这些科学素养的培养为后续课程的学习,乃至终身教育奠定了良好的基础。

第三节 大学物理实验课的教学流程

大学物理实验课与理论课不同,它不是采用课表式教学的方式,而是采用开放式教学的方式。它的特点是学生在教师的指导下自己动手,独立地完成实验任务,因而在教学上学生具有更大灵活性和自由度。实验课的教学流程一般包括实验预约、实验预习、实验操作与数据记录、数据处理与实验报告。

1. 实验预约

每学期开学前,在校园网上发布本学期的实验项目与时间安排。学生可根据自己的实际情况,在物理实验中心网站的实验预约系统中或在物理实验中心一楼大厅的电脑触摸屏上预约实验,以后必须按照自己预约的时间,到相关实验室,在教师的指导下独立完成预约的实验。

2. 实验预习

实验课前应该认真预习,仔细阅读教材和实验中心网站上的实验指导,弄清实验目的、实验原理和实验方法,了解仪器的结构和调节要求。在充分预习的基础上拟定好实验方案,设计好实验数据记录表格并写好预习报告,为实验课做好准备。

3. 实验操作与数据记录

学生在认真预习的基础上,在相关实验室进行实验操作。在进入实验室后,首先要接受教师对预习情况的检查。实验开始前要仔细阅读实验指导书和仪器使用说明书,遵守实验有关规章制度,爱护仪器设备,务必牢记实验的注意事项,并在教师的指导下掌握实验仪器的调整方法。实验课是锻炼实践能力,培养创造精神的极好机会。应注重实验过程,认真观察,独立思考,手脑并用,提高运用理论知识和已有的经验分析解决问题的能力,培养严谨、耐心、实事求是的科学态度和探索、求真的科学精神。

在实验操作过程中,要仔细观察物理现象和测量数据,如实记录原始数据,原始数据必须是真实的,不允许抄袭和任意涂改。完成实验后全部数据应交指导老师检查,通过检查,教师在预习报告和数据记录草稿上签字后,才能整理好实验装置,结束本次实验。

4. 数据处理与实验报告

做完实验后应及时处理数据,完成报告并在规定的时间内交到相关实验室。实验报告要求清洁整齐,重点突出,语言简练,作图制表规范,字迹端正清晰。

实验报告分两次完成,预习报告即实验报告的前半部分(包括实验名称、实验目的、实验原理、实验仪器、实验内容),应在上实验课前写好,其余部分实验课后再接着完成。

完整的实验报告应包括下列项目:

- (1) 实验名称。
- (2) 实验目的。简单地写明本次实验的目的。
- (3) 实验原理。用简洁的语言说明实验原理,给出基本公式并说明公式及其中各物理量的意义,绘制重要的原理图。
- (4) 实验仪器。主要仪器及其型号、精度等有关参数。
- (5) 实验内容。简明扼要地写出实验研究的内容和重要步骤,绘制主要的线路图和光路图。
- (6) 数据处理。按要求设计科学、合理的表格,首先将整理好的原始数据填入表格内,再根据每个实验的具体要求进行数据处理。计算待测量要写明所用公式并代入数据。要求作图的必须用坐标纸。要求计算不确定度的必须给出每个不确定度分量及总不确定度的计算方法、计算过程和计算结果。最后应按教材要求给出完整的结果表述,数据处理提倡采用计算机处理。
- (7) 结果分析。认真分析、讨论本次实验的结果及问题,分析实验成功与不足之处,并对实验中的问题和实验方法提出改进的设想和建议。

第二章 测量与不确定度

第一节 测 量

一、测量的概念

测量是物理实验的基本操作,就其本质来说,测量就是将待测物理量与选作计量标准的同类物理量进行比较的过程。其中,倍数值称为待测物理量的数值,选作的计量标准称为单位。测量的结果应包括数值(即度量的倍数)、单位(即所选定的物体或物理量)以及结果可信信赖的程度(用不确定度来表示)。

作为比较标准的测量单位,其大小是科学地人为规定的。按照中华人民共和国法定计量单位的规定,物理量单位均是以国际单位制(SI)为基础的,由7个基本物理量组成,即长度(米)、质量(千克)、时间(秒)、电流(安培)、热力学温度(开尔文)、物质的量(摩尔)和发光强度(坎德拉)的单位是基本单位,其他物理量的单位可由这些基本单位导出,称为导出单位。

二、测量的分类

在科学实验中会遇到各种类型的测量,可以从不同的角度对测量进行分类:按获得数据的方法,可分为直接测量和间接测量;按测量的条件,可分为等精度测量和非等精度测量。

1. 直接测量和间接测量

(1) 直接测量。可以用测量仪器或仪表直接读出测量值的测量称为直接测量。例如,用游标卡尺测量长度、用温度计测量温度、用电流表测量电流等都是直接测量,所得的物理量如长度、温度、电流等称为直接测量量。

(2) 间接测量。有些物理量的测量没有直接测量的量具,无法进行直接测量,而需依据待测物理量与若干个直接测量量的函数关系算出被测量的大小,这样的测量就称为间接测量。例如,用单摆法测重力加速度 g 时,可利用函数关系 $g = 4\pi^2 L/T^2$,在用秒表和米尺等仪器直接测出 T (周期)、 L (摆长)的值后,代入公式,即可计算出间接测量量 g 。

2. 等精度测量和非等精度测量

(1) 等精度测量。在测量过程中,影响测量结果的各种条件不发生改变的(多次)测量称为等精度测量。例如,在相同的环境中,由同一个人同一台仪器上,采用同样的方法对同一物理量进行可靠程度相同的多次测量即为等精度测量。

(2) 非等精度测量。在测量过程中,由于仪器的不同、方法的差异、测量条件的改变以

及测量者素质差异而造成测量结果的变化,这样的测量称为非等精度测量。以上所述各项中,如有一项发生变化,导致明显影响实验结果,即为非等精度测量。非等精度测量通常是在科学研究、精密测量等工作中,为了获得更可靠的测量结果而采用的,在数据处理时也比较复杂,所以一般情况下不用它。本书若没有特别的要求,所指的测量都是等精度测量。

三、测量的过程

测量是物理实验过程中重要的环节,正确测量决定了实验的成败。为了在实验过程中正确地进行测量,一般要遵循以下基本过程。

1. 熟悉实验仪器

熟悉实验仪器的性能,掌握正确的使用方法和读数是每个学生进行实验的首要任务。例如,对仪器的级别、量程、稳定性以及对环境的要求等都要弄清。

2. 选择适当的测量仪器

根据对实验测量精度的要求和测量范围,合理地选择仪器和方法。例如对长度、温度测量,可根据实验对测量精度的要求选取恰当的测量仪器,见表 2-1。

表 2-1 测量仪器的测量精度与测量范围

长度测量精度要求	1 mm	0.02 mm	0.01 mm	0.0001 mm	0.0000001 mm
仪器	米尺	卡尺	螺旋测微器	激光干涉仪	电子显微镜
温度测量范围(度)	< 300	< 600	> 1600		
仪器	半导体或液体温度计	热电偶	红外高温计		

3. 选择实验方法

在实验中不仅要选择适当的测量仪器、了解仪器性能参数,而且还要学会采用正确的实验方法。实验方法的选择对测量结果有着重要的影响,例如用电压表测电路中的电压时,如果电表的内阻不变,无论使用级别多高的电压表,由测量方法引起的测量误差都不可避免,要减小上述测量方法引入的误差,可采用补偿法进行测量,或改用内阻很大($R_v \geq 200 \text{ M}\Omega$)的数字电压表进行测量。

4. 读数与记录

在进行测量时,正确的读数和记录是关键。对于不同仪器有多种读数方法,在以后的实验中将分别介绍,在此仅介绍一般规则。

(1) 如实记录仪器上显示的数值,作为原始数据。对指针式仪表和有刻度盘或标尺的仪器,通常在直接测量时,要求估读一位(该位是有效数字的可疑位)。估读数一般取最小分度的 $1/10 \sim 1/2$ 。

(2) 有一些仪表虽然也有指针和刻度盘,但指针跳动是以最小分格为单位的。例如,最常用的钟表有以秒为最小分度的时钟,也有以 $1/10$ 或 $1/100$ 秒为最小分度的秒表,因

此,对此类仪表不需要估读。

(3) 若仪表的示值不是连续变化而是以最小步长跳跃变化的,如数字式显示仪表,则只要记录全部数据即可。

(4) 对于各类带有游标(或角游标)的仪器装置,是依靠判断两个刻度中哪条线对齐来进行读数的,这时一般记下对齐线的数值,不必进行更细的估读。

第二节 误差

一、误差的概念及表示

1. 真值

任何一个物理量在一定客观条件下(某一时刻、某一位置或某一状态),都存在着一个不以人的意志为转移的客观值,这个客观值称为该物理量的真值。

由于“绝对真值”的不可知性,人们在长期的实践和科学研究中归纳出以下几种“真值”:① 理论真值,包括理论设计值、公理值、理论公式计算值;② 约定真值,国际计量大会规定的各种基本常数和基本单位标准;③ 算术平均值,指多次测量的平均结果,当测量次数趋于无穷时,算术平均值趋于真值。

2. 误差

测量结果与真值之间总是有一定的差异,这种差异称为误差。

3. 误差公理

误差是普遍存在的,误差自始至终贯穿在一切科学实验之中。误差只能减小,不可能完全消除。

4. 误差的表示

误差的表示方法一般有两种,即绝对误差和相对误差。

(1) 绝对误差。测量值与被测量的真值的差。若待测量的测量值为 x ,真值为 a ,则测量的绝对误差 ϵ 可表示为

$$\epsilon = x - a \quad (1)$$

由于真值不可知,所以绝对误差也是不可知的,于是研究分析误差应从“残差”着手。

设 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 为某物理量 x 的测量值, $\bar{x}$ 为其算术平均值,则各测量值 x_i 和 $\bar{x}$ 之间的差称为残差,即

$$\delta_i = x_i - \bar{x} \quad (2)$$

(2) 相对误差。相对误差为绝对误差与被测量的真值的比值,即

$$E = \frac{\epsilon}{a}$$

由于真值是一个理想量,实验中用测量的平均值来代替真值,即

$$E = \frac{\epsilon}{\bar{x}} \quad (3)$$

二、误差的分类

测量误差按其产生的原因与性质可分为系统误差、偶然误差和粗大误差三大类。

1. 系统误差

系统误差是指在同一条件下(方法、仪器、环境和观测者不变),多次测量同一物理量时,误差的大小和符号均保持不变,或当条件改变时,按某一确定的规律而变化的误差。

系统误差的特征是确定性,即实验条件一确定,系统误差就获得了一个客观上的确定值,一旦实验条件改变,系统误差也按一种确定的规律变化。

造成系统误差的原因有以下几个方面。

(1) 仪器误差。是指测量时由于所用的测量仪器、仪表不准确所引起的误差。

(2) 环境误差。是指因外界环境(如灯光、温度、湿度、电磁场等)的影响而产生的误差。

(3) 方法误差。是指由于测量所依据的理论、实验方法不完善或实验条件不符合要求而导致的误差。

(4) 个人误差。是指由实验者的分辨能力、感觉器官的不完善以及生理变化、反应速度和固有习惯的不同等引起的误差(如估计读数始终偏大或偏小)。

系统误差的产生一般有较明确的原因,因此只要采取适当的措施对测量值进行修正,就可以使之减至最小;但是,在实验中仅靠增加测量次数并不能减小这种误差。

2. 偶然误差

偶然误差是指在相同条件下多次重复测量同一物理量时,测量结果的误差大小、符号均发生变化,其值时大时小,其符号时正时负,无法控制,但总体来说又服从一定的统计规律的误差。

偶然误差的特征是随机性,即误差的大小和正负无法预计,但却服从一定的统计规律。

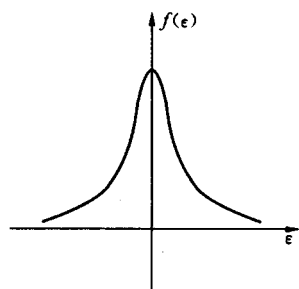


图 2-1 随机误差正态分布曲线

在对某一物理量进行大量次数的重复测量时,发现它服从正态分布(高斯分布),如图 2-1 所示,纵坐标表示概率,横坐标表示误差。

服从正态分布的偶然误差具有以下 4 大特性:① 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;② 对称性,绝对值相等的正负误差出现的概率相等,对称分布于真值的两侧;③ 有界性,在一定测量条件下,误差的绝对值是一定的;④ 抵偿性,当测量次数非常多时,正误差和负误差相互抵消,即随机误差的算术平均值随着测量次数的增加而趋近于零,即

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \epsilon_i = 0 \quad (4)$$

因此,可用多次测量的算术平均值作为直接测量的近真值。

偶然误差的产生主要是由于人们的感官灵敏程度和仪器精密程度有限,各人的估读能力不一致,外界环境的干扰等因素引起,这些因素不尽全知,无法估计。由于偶然误差的出现服从正态分布规律,因此可以通过用多次测量求平均值的办法来减小偶然误差。下面介绍有关算术平均值与偶然误差计算的几个概念。

(1) 算术平均值。设对一个物理量 x 进行了 n 次等精度测量,测量值为 $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n$, 则其算术平均值为

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

在实验中,可以用算术平均值作为被测量的最佳估计值。

(2) 标准偏差。具有偶然误差的测量值将是分散的,对分散情况的定量的表示用标准偏差 σ , 它的定义式为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (6)$$

式中 n 为测量值个数。

(3) 算术平均值的标准偏差。测量值有偶然误差,其算术平均值也必然有偶然误差。由于求和时偶然误差的抵偿效应,算术平均值偶然误差绝对值较小,其标准偏差也应小于由上式求出的值,可以证明

$$\sigma_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (7)$$

式中 n 为测量值个数。与 $\sigma_{\bar{x}}$ 相比又称 σ 为测量列标准偏差。

系统误差和偶然误差并不存在绝对的界限,其产生的根源均来自测量方法、设备装置、人员素质和环境的不完善。在一定条件下,这两种误差可以相互转化。例如,按一定基本尺寸制造的量块,存在着制造误差,对某一具体量块而言,制造误差是一确定数值,可以认为是系统误差;但对一批量块而言,制造误差属于偶然误差。掌握了误差转化的特点,可以将系统误差转化为偶然误差,用统计处理方法减小误差的影响,或将偶然误差转化为系统误差,用修正的方法减小其影响。

3. 粗大误差

粗大误差是由于测量者的过失(如使用方法不正确,实验方法不合理,粗心大意等)而引起的误差,简称粗差。

粗大误差的特征是人为性的,即误差的产生跟测量者的实验经验与实验技能、测量者的工作状态与学习态度密切相关。初学者容易产生这种误差,但是若采取适当的措施,这种误差完全可避免。例如,采取细心检查、认真操作、重复测量、多人合作等措施可有效地避免这类误差。粗大误差一般使实验结果远离物理规律,明显地歪曲测量结果,因此应努