



普通高等教育“十二五”规划教材

大学物理实验



DA XUE WULI SHI YAN

姜义 曹艳玲 贯丛 刘春清◎主编



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com



普通高等教育“十二五”规划教材

大学物理实验

主 编 姜 义 曹艳玲
贯 丛 刘春清

北京邮电大学出版社

• 北京 •

内 容 简 介

本书包括绪论;测量误差、不确定度及数据处理基础知识;力学和热力学实验;电磁学实验;光学实验;近代物理实验;设计性与研究性实验等内容。在具体实验安排上,遵照由浅入深、循序渐进的原则进行编写,保留了长期教学实践证明对培养学生科学实验能力行之有效的典型实验,又增加了近代科技中具有代表性的实验,增添了一些具有时代信息的综合性和设计性实验项目,以期进一步加强学生分析和解决实际问题能力同时,也让学生了解科学发展的新方向。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验 / 姜义等主编. -- 北京:北京邮电大学出版社, 2015.8(2016.12 重印)

ISBN 978-7-5635-4407-3

I. ①大… II. ①姜… III. ①物理学—实验—高等学校—教材 IV. ①O4-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 143375 号

书 名 大学物理实验
主 编 姜 义 曹艳玲 贯 丛 刘春清
责任编辑 张保林
出版发行 北京邮电大学出版社
社 址 北京市海淀区西土城路 10 号(100876)
电话传真 010-82333010 62282185(发行部) 010-82333009 62283578(传真)
网 址 www.buptpress3.com
电子信箱 ctrd@buptpress.com
经 销 各地新华书店
印 刷 北京泽宇印刷有限公司
开 本 787 mm×960 mm 1/16
印 张 22.5
字 数 479 千字
版 次 2015 年 8 月第 1 版 2016 年 12 月第 3 次印刷

ISBN 978-7-5635-4407-3

定价: 48.00 元

如有质量问题请与发行部联系

版权所有 侵权必究

前 言

本书是根据国家教育部《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》(2010年版)的规定,依照高等教学改革发展的需要和工程类院校人才培养的特点,并且在原有教材(《大学基础物理实验》高等教育出版社)的基础上,结合长春工程学院专业设置特点和大学物理实验开设实际情况,对原有的内容做了部分调整和修改,增加和删减了部分实验项目,使实验内容更加符合目前新常态下实验教学需求。本书是长春工程学院理学院物理实验教学中心全体教师长期辛勤劳动结果,是实验教学改革实践的经验总结。

物理实验课是工科院校学生进行科学实验的一门必修基础课程,全书包括绪论,测量误差、不确定度及数据处理基础知识,力学和热力学实验,电磁学实验,光学实验,近代物理实验,设计性与研究性实验等内容。在具体实验安排上,遵照由浅入深、循序渐进的原则进行编写,保留了长期教学实践证明对培养学生科学实验能力行之有效的典型实验,又增加了近代科技中具有代表性的实验,增添了一些具有时代信息的综合性和设计性实验项目,以期进一步加强学生分析和解决实际问题能力同时,也让学生了解科学发展的新方向。

本书由长春工程学院的物理实验教学中心教师编写,姜义老师统稿。参编作者分工如下:姜义(绪论、第一章、第四章、附表),曹艳玲(第二章、第三章1~7),贯丛(第五章),刘春清(第三章8~11、第六章)。本书的完成也要特别地感谢郑春,郭延生,刘志明,岳明,李素文,曹萍,岳巾英,刘莹,高金宇等教师,感谢他们在本书的编写过程中提供的教学讲义、相关文献、文字录入等工作的帮助。

在本书的编写过程中,编者也参阅了兄弟院校的大学物理实验教材,在此表示感谢。限于编者水平有限,疏漏之处在所难免,衷心希望专家及广大读者提出批评指正意见,以供我们再版时改正,提高本书的编写质量。

编 者

2015年5月

目 录

绪论	1
第一章 测量误差基础理论	4
第一节 测量误差的基本知识	4
第二节 测量不确定度的基本概念	14
第三节 间接测量的不确定度	20
第四节 有效数字及其运算规则	25
第五节 数据处理常用方法	29
第六节 物理实验基本测量方法	36
第七节 物理实验最佳方案选择	41
习题	47
第二章 力学和热力学实验	49
实验 2-1 长度的测量	49
实验 2-2 质量与密度的测量	56
实验 2-3 静态拉伸法测金属丝弹性模量	66
实验 2-4 固体线胀系数的测定	73
实验 2-5 声波速度的测量	77
第三章 电磁学实验	85
实验 3-1 电表的改装与校准	85

实验 3-2 电桥的使用	91
实验 3-3 电位差计测量电源电动势及电阻	102
实验 3-4 铁磁材料居里温度的测定	111
实验 3-5 模拟示波器的使用	117
实验 3-6 数字示波器的使用	125
实验 3-7 霍尔效应法测磁场	133
实验 3-8 铁磁材料动态磁滞回线和磁化曲线的测量	140
实验 3-9 毕奥-萨伐尔实验	147
实验 3-10 RLC 电路的谐振现象	156
实验 3-11 RLC 串联电路的暂态过程	161
第四章 光学	168
实验 4-1 光路调整与透镜焦距的测量	168
实验 4-2 分光计的调节与光栅常数测量	175
实验 4-3 用牛顿环测透镜的曲率半径	184
实验 4-4 双棱镜法测光波波长	190
实验 4-5 迈克耳孙干涉仪的调整与使用	197
第五章 近代物理实验	203
实验 5-1 光学全息照相	203
实验 5-2 光电效应及普朗克常量的测定	210
实验 5-3 密立根油滴实验	217
实验 5-4 液晶电光效应实验	226
实验 5-5 弗兰克-赫兹实验	232
实验 5-6 音频信号光纤传输技术实验	239
实验 5-7 光导纤维中光速的测定	250
实验 5-8 PN 结温度—电压特性的测定及数字温度计的设计	259
实验 5-9 数字信号光纤通信技术实验	266
实验 5-10 传感器实验	283

实验 5-10-1 金属箔式应变片——单臂电桥性能实验	284
实验 5-10-2 金属箔式应变片——单臂、半桥、全桥比较	288
实验 5-11 核磁共振测磁场	291
实验 5-12 光拍频法测量光速	296
第六章 设计性实验	305
实验 6-1 自组望远镜与显微镜	308
实验 6-2 转动惯量的测定	310
实验 6-3 双臂电桥测金属杆的电阻率	312
实验 6-4 电位差计测定电阻率	314
实验 6-5 电磁波综合实验	315
实验 6-6 磁光调制(法拉第效应)实验	317
实验 6-7 A 类超声诊断与超声特性	319
实验 6-8 超声 GPS 三维声纳定位	323
实验 6-9 太阳能电池特性研究	326
实验 6-10 热辐射与红外扫描成像	328
实验 6-11 多波段光栅单色仪	331
实验 6-12 塞曼效应与法拉第效应	333
实验 6-13 实验空气热机实验	336
实验 6-14 燃料电池综合特性实验	340
附表 1 常用基本物理常量表	345
附表 2 标准大气压下不同温度水的密度	346
附表 3 20℃时常用固体和液体的密度	347
附表 4 海平面上不同纬度处的重力加速度	347
附表 5 20℃时金属弹性模量	348
附表 6 液体黏度	348
附表 7 不同温度下水的黏度	349

附表 8 某些金属(或合金)的电阻率及其温度系数	349
附表 9 常用材料的导热系数	350
附表 10 某些物质中的声速	350
附表 11 常用光谱灯和激光器的可见谱线波长	351
附表 12 用于构成十进制倍数和分数单位的词头	352

绪 论

物理实验课程的目的

由于物理实验有它自身的特点和一套完备的实验知识、实验方法、实验技术等独特的内容,所以物理实验是高等院校学生进行科学实验基本训练的一门独立必修基础课程,是学生进入高等院校后受到系统实验方法和实验技能训练的开端。物理实验课的目的并不单纯是教会学生一些实验知识,也不单单是使其得到实验基本技能和方法的训练,其实最重要的是要使学生借助于实验手段,培养其观察、发现、分析、研究直至最终解决问题的能力,提高其自身的科学素养。因此,物理实验课的目的如下:

(1) 通过对物理实验现象的观测和分析,学习运用理论指导实验、分析和解决实验问题的方法。从理论和实验的结合上加深对理论的理解,同时激发学生对物理科学的兴趣。

(2) 培养和提高学生的科学实验能力,使学生学到物理实验的基本知识、基本方法和基本技能,它包括学会使用各种测量仪器,了解各种物理量的测量方法,学会观察分析各种实验现象,还要了解测量误差的理论知识,学会正确地记录和处理数据,正确地表达实验结果,对实验结果进行正确的误差分析评价。并在扎实的基本训练基础上,进一步进行设计实验,让学生通过自己独立设计完成的实验过程,去发现新物理现象,研究新问题,并总结出规律性的实验结果,提高科学实验能力,为将来的科学研究工作或其他工程技术工作打下良好的实验基础。

(3) 逐步培养起严肃认真、实事求是的科学态度和严谨踏实的工作作风,养成良好的科学实验习惯。科学是来不得半点虚假和马虎的。良好的科学实验习惯是做好实验的重要前提条件,一旦形成不好的习惯,以后就很难改正,要在每次实验中有意识地自我锻炼。

怎样做好物理实验

物理实验课不同于一般的书本理论课,它是在教师的指导下学生独立进行的一种实践活动,因此相应的学习方法也有很大的不同。为了能学好实验课,学生应做好以下的实验环节。

实验预习:每项实验之前,仔细阅读实验教材中有关内容(必要时需查阅相关的参考资料),了解本实验的原理和方法,了解测量仪器的使用方法和注意事项,并在此基础上写出预习报告。预习报告包括:①简要回答预习思考题;②画出实验的原理图(光路图、电路图 etc),列出实验依据的理论公式,画出实验数据的记录表格;③分析实验过程中不确定度

与误差产生的原因及其处理措施。(注意:指导教师将通过不同方式对预习情况予以检查,没有预习报告者,不得进入实验室进行实验操作。)

实验操作:进入实验室后应严格遵守实验室规则,注意安全。未经指导教师允许,不得擅动仪器;实验观测前应首先清点所需用仪器,稳拿妥放,防止损坏。对需要通电源的仪器或电路,必须在教师的允许下方可接通电源。在整个实验过程中,要脑手并用,一方面,要多动脑筋,头脑里要有清晰的物理图像,对实验原理有比较透彻的理解,对实验中出现的各种现象要仔细观测,要有意识地去学着分析实验,对实验得到的结果要想一想是否合乎物理规律及有没有道理,在进行某些操作之前,先想想可能会出现什么结果,然后再看看是否和预期的相符合。如果不相符合,要仔细分析原因,找出改进措施,绝不能拼凑数据,实验中不要只是机械地按讲义上或教师要求的实验步骤一步一步做完就算完事,实验过程中思想状态是积极主动的,还是消极被动的,对收获大小的影响极大。另一方面,要注意培养和锻炼自己的动手能力。在实验操作过程中,我们要做到准确、熟练、快速。实验中还要养成记录好原始数据的习惯,实验记录看上去很简单,做好却不容易,实验数据要做到记得准确、清楚、有次序。实验结束时,需将实验记录交给指导教师审阅,整理还原实验仪器,在《实验仪器记录本》上签名后,经指导教师同意方可离开实验室。

实验总结:实验报告是对实验的全面总结,学生做完实验后,应及时对实验数据进行处理,处理过程包括计算、作图、不确定度及误差分析等。

怎样撰写物理实验报告

物理实验除了使学生受到系统的科学实验方法和实验技能训练外,还能通过书写实验报告为学生将来从事科学研究和工程技术开发等工作时撰写论文打基础。当然,我们只是向初学者提供实验报告的一般格式,实际上一份成功的报告,完全可以按照自己的思路来写,只要理论正确、思路清晰、结果完整,都是可以的。因此,实验报告可以说是实验课学习的重要组成部分,请认真对待。

实验报告包含以下内容:(1)实验目的;(2)实验仪器设备;(3)实验原理;(4)实验步骤;(5)原始数据的记录;(6)实验数据处理及结论。具体的要求如下。

一、实验目的

每个实验有不一样的学习目的,通常书本上都给予明确阐述。但在具体实验过程中,有些内容并不涉及或实验内容作了改变,因此,不能完全照抄书本,要根据实际要求并结合自己的体会来写。

二、实验仪器设备

在科学实验中,仪器设备是根据实验原理及相对不确定度的要求来配置的,书写时应记录:仪器的名称、型号、规格和数量(根据实验情况如实记录);在科学实验中往往还要记录仪器的生产厂家、出厂日期和出厂编号,以便在核查实验结果时提供可靠依据等。

三、实验原理

实验原理是科学实验的基本依据。实验设计是否合理,实验所依据的测量公式是否严密可靠,实验采用什么规格的仪器,要求精度如何,应在原理中交代清楚。

(1) 必须有简明扼要的语言文字叙述,通常教材可能过于详细,目的在于方便学生阅读和理解。书写报考时不能完全照抄书本,应该用自己的语言进行归纳阐述,文字务必清晰、通顺。

(2) 写出所依据的原理公式,各物理量的含义,以及简要的推导过程。

(3) 画出必要的原理图或实验装置示意图。如果有多张图示,应依次编号,对应在相应的文字附近。

四、实验步骤

用自己的语言简明扼要地说明实验内容、关键步骤及操作要点和实验顺序。

五、原始数据记录

必须严格、慎重、准确、真实、清晰、详尽地把测量数据记录到预习报告的数据表格内,不要随意涂改数据,也不要打草稿再誊写上去,这是一种不科学的坏习惯。如果数据记错了,不要涂抹,应该在其上做一删除记号(必要时应注明删除原因)。实验数据的书写不准用铅笔。

六、实验数据处理及结论

(1) 对于需要进行数值计算而得出实验结果的,测量所得的原始数据必须如实代入计算公式,按有效数字运算法则进行计算,不能在公式后立即写出结果。

(2) 对测量结果进行测量不确定度误差分析。

(3) 写出实验结果的表达式(测量值、不确定度、相对不确定度、单位),实验结果的有效数字必须正确。

(4) 若所测量的物理量有标准值或标称值,则应与实验结果比较,求相对误差。

实验室注意事项

(1) 课前应完成指定的预习内容和预习报告,学生进入实验室需要带上记录实验数据的表格,经教师检查同意方可进行实验。

(2) 遵守课堂纪律,保持安静的实验环境。

(3) 使用电源时,务必经过教师检查线路后才能接通电源。

(4) 爱护仪器。进入实验室不能擅自搬弄仪器,实验中严格按仪器说明书操作,如有损坏按学校的规章制度赔偿。公用工具用完后应立即归还原处。

(5) 做完实验后学生应将仪器整理还原,将桌子和凳子收拾整齐。原始数据记录需指导教师签字后,方可离开实验室。

第一章 测量误差基础理论

大学物理实验的任务,一是定性地观察物理现象和变化过程;二是定量地测量物理量之间的关系;三是通过对测量数据的误差分析和数学处理,科学地评价测得的物理量或物理关系接近真实的程度。因此实验误差分析、不确定度估算、实验数据处理及实验结果评定是每一位实验者必备的知识 and 能力。限于篇幅,本章不可能对实验误差、不确定度概念以及数据处理和结果评定作出全面而详细的叙述,仅对这方面常用的基础知识作一介绍,以使学习者今后更高层次的科学实验研究打下坚实的基础。

第一节 测量误差的基本知识

测量的基本概念

科学实验是建立在对物理现象观察和对表征状态或过程物理量测量的基础上,测量是人类认识和改造世界必不可少的重要手段。“科学自测量开始,没有测量便没有精密科学”。所谓测量,就是将待测的物理量与一个选作标准的同类物理量(标准量)进行比较,得出它们之间的倍数关系。选作标准的同类物理量称之为单位,倍数数值称之为测量数值,两者的乘积即为被测物理量的测量值,也叫测得量。

一个物理量的大小是客观存在的,但选择不同的单位,却有不同的测量数据。对同一个物理量测量时,选用单位越大,数值就越小(例如一本普通书的厚度是 2.36 cm,若以 mm 为单位则为 23.6 mm,若以 m 为单位,则为 0.023 6 m)。因而在表示一个被测量的测量值时,应注意测量值包含数值和单位两部分,仅有数值而没有单位的测量结果是没有物理意义的。

测量的分类

根据获取测量数据方法的不同和测量条件的不同。测量可有多种分类:按获取数据的方法,可分为直接测量(direct measurement)和间接测量(indirect measurement);按照

测量条件,可以分为等精度测量(equal observations)和非等精度测量(unequal observations)。

直接测量又可分直读法和比较法两种。直读法就是使用有相应单位分度的量具或仪表直接读取测量值的直接测量,如用米尺测长度、用温度计测温度、用电表测电流或电压等。其特点是测量方便,但受仪器仪表准确程度的限制,其测量准确度一般较低。比较法是把被测对象直接与体现计量单位的标准器进行比较的直接测量,如用分析天平称质量,用直流电桥测电阻等。这种测量的操作比较麻烦,但因其准确度取决于标准器,只要仪器的选配与使用得当,可使测量准确度达到较高水平。直接测量又包括单次直接测量和多次直接测量。

某些物理量不能通过量具或仪器直接读取测量值,必须把一个或几个直接测量结果按照一定的函数关系计算出来的过程,称为间接测量。例如:测量圆柱体的体积时,需先用游标卡尺和螺旋测微器测出圆柱体的直径 d 和高 h ,然后将这两个直接测得量代入函数关系式 $V=\frac{\pi d^2 h}{4}$,从而计算出圆柱体的体积。像这种通过直接测得量而计算出待测值的物理量叫做间接测量。

等精度测量(也称重复性测量)是指在相同条件下,对某一物理量 x 进行多次测量得到一组测量值 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 。相同的条件是指同一个人,用同一台仪器、同一种方法,同一个测量对象,每次测量时周围环境条件相同。等精度测量每次测量的可靠程度相同。在物理实验课中提到对一个物理量进行多次重复测量,如无特殊说明,都是指等精度测量,因此应尽可能保持等精度测量条件不变。

非等精度测量(也称复现性测量)是指测量的五个要素除测量对象不能改变外,其他四个因素全部或者任意一个因素都可能发生改变所进行的测量。在测量过程中,由于改变测量条件,如由不同的观测者、用不同仪器或不同方法、在不同环境条件下对被测量进行不同次数的测量,影响和决定测量结果的因数各异,对测得的数据的可行程度不相同。不等精度测量常用于高准确度的测量中。

单位

无论何种测量,物理量的计量单位一律采用国际单位制(SI),也是我国法定计量单位。国际单位制是1971年第十四届国际计量大会确定的。国际单位制(SI)的七个基本单位是:长度单位米(m)、质量单位千克(kg)、时间单位秒(s)、电流单位安培(A)、热力学温度开尔文(K)、物质的量单位摩尔(mol)、发光强度单位坎德拉(cd),还规定了两个辅助单位:平面角单位弧度(rad)和立体角单位球面度(sr)。其余各种物理量,如力、功、能量、热容、电阻、电容、电感、磁感应强度、光通量等均可由上述基本单位导出,称为国际单位(SI)的导出单位。

某些具有重要作用和广泛使用的单位,如时间单位分(min)或时(h)、质量单位吨

(t)、体积单位升(L)、能量单位电子伏(eV)、长度单位埃(Å)、级差单位分贝(dB)等,常可与国际单位同时使用。

SI单位的国际符号,无论是拉丁字母还是希腊字母,也无论是大写字母还是小写字母,一律用正体印刷。为了避免单位的符号与物理量的符号相混淆,国际上规定,所有物理量的符号,一律用斜体印刷。

误差的基本概念

1. 绝对误差

每一个待测物理量都是客观存在的,在一定条件下具有不以人的意志为转移的数值,这个客观数值叫作该测量的真值(true value),记为 x_0 。无论是直接测量,还是间接测量,其目的都是希望获得被测量的真值。但是在任何一种测量的过程中,由于采用的测量方法和所使用的仪器均不可能绝对完善,同时由于测量条件、测量环境和测量人员种种因素的限制,都不可能使测量值与真值完全相同。这就意味着,任何测量值总会与真值存在一定的差值,这个差值就定义为测量值 x 与真值 x_0 的测量误差(measurement Error),记为 Δx ,即

$$\Delta x = x - x_0 \quad (1-1)$$

误差 Δx 表示的是测量值对真值绝对偏离的大小和方向,与被测量有相同单位,这种有单位的误差就称为绝对误差(absolute Error)。

2. 相对误差

绝对误差的大小只能反映对同一待测量误差的大小,但却不能反映误差的严重程度。例如:用米尺测量两个物体的长度时,测量值分别是 0.20 m 和 2 000 m,假定测量中出现的绝对误差分别是 0.02 m 和 2 m,虽然后者的绝对误差远大于前者,但是前者的绝对误差占测量值的 10%,而后者的绝对误差仅占测量值的 0.1%,说明后一个测量值的可靠程度远大于前者,故绝对误差并不能正确比较不同测量值的可靠性。为此,我们引出相对误差的概念:我们将测量值的绝对误差与测量值之比定义为相对误差(relative error),用 E_x 表示,即

$$E_x = \frac{\Delta x}{x} \times 100\% \quad (1-2)$$

相对误差是一个比值,没有单位,通常用百分比形式表示。相对误差不仅包含误差的大小,同时还表示误差对测量结果影响的严重程度,故它能全面评价测量质量的高低。

误差分类

由于测量误差是不可避免的,它存在于一切测量之中,而且贯穿于测量过程的始终。因此,正确地处理误差是非常重要的。其目的在于:①分析误差来源,以便找到减小和消

除误差的方法;②估算误差范围,以便于对实验结果进行修正和评价。

误差的产生有多方面的原因,如实验理论的近似性、实验仪器灵敏度和分辨能力的局限性、实验环境的不稳定性、实验者的实验技能以及判断能力等因素都可能导致测量误差。根据误差的性质和产生的原因,通常可将误差分为系统误差(systematic error)与随机误差(random error)。它们对测量结果的影响不同,处理方法也不同。

1. 系统误差

系统误差的特征是具有一定的规律性和确定性。即在一定实验条件下(实验的方法、仪器、环境和观测者均保持不变),多次测量同一物理量时,误差的大小与正负或恒定不变,或遵守某一规律(递增、递减、呈现周期性等)变化,而增加测量次数并不能减少这种误差的影响。凡具有上述特征的误差称为系统误差,其产生的原因主要来自以下几个方面。

仪器误差(instrumental error)——由测量仪器、装置不完善而产生的误差。通常有两种情况导致仪器误差的产生:一是任何量具、标准器、指示仪表等都存在一定的自身缺欠,如天平的不等臂、砝码标称的不准确、标尺刻度线的不均匀、检流计的灵敏度不足等;二是仪器在安装、调整和使用时,因水平、垂直、平行、准直、共轴、零点等状态没有达到规定的要求而引起误差。

方法误差(method error)——由于实验方法本身或理论不完善等原因所导致的误差。在物理理论中我们常常进行某种理想假定,比如创造出像“无质量”、“无摩擦”、“不可伸缩的弦线”等这样一些概念。这些理论模型可以大大简化理论问题研究的复杂性,但在实际测量中会带来误差。例如,称重时忽略了空气浮力的影响;测长时未考虑热胀冷缩的因素;伏安法测电阻时,没有考虑电表内阻的作用等,均要产生一定的误差。

环境误差(environment error)——由于外界条件变化所引起的误差。如温度、气压、湿度、电磁波、振动、光照等条件按一定规律的变化,引起环境与仪器要求的标准状态不一致,不仅会影响仪器的工作或各测量之间的关系,甚至会影响被测量的本身,如要求在20℃温度下使用的元器件,在50℃温度下使用就属于这种情况。

个人误差(personal error)——由于实验者的感官或习惯所引起的误差(也称人员误差)。个人误差取决于观测人员心理和生理的特点,通常与观测者的反应速度、固有习惯以及经验和能力等因素相关。如记录信息时习惯上的超前或滞后、对准目标读值时习惯上的偏左或偏右、估取数据时习惯上的偏大或偏小等。人为误差在测量中常表现为观测误差、估读误差、视差等。值得一提的是,随着数字化智能化仪器的不断普及,观测人员对测量的干预越来越少,因而人为误差一般可以不考虑。还需要注意的是,人为误差不包括由测量者粗心大意所造成的错误,如将7看成9,将12.5记成15.2。

总之,系统误差是在一定条件下由一些确定因素引起的,因此,通过在相同条件下多次测量来求平均,或者试图用增加测量次数来减少系统误差的方法都是行不通的。

系统误差的存在会影响测量结果的准确性,历史上就不止一次地发生过因系统误差处理不当而造成测量结果的不准确,几乎致使相关物理学理论出现谬误的教训。而且,对

系统误差的分析研究,不仅可使测量结果更加接近真值,同时还可以从中发现或获取某些新信息,从而导致物理理论的突破。但是发现和分析、修正、减少以至消除系统误差,既涉及较深的数学和误差理论知识,更需要丰富的科学实验专门知识。所以,在大学物理实验中,一般情况下只考虑两类系统误差。一类叫作可定系统误差。可定系统误差是指那些具有固定不变性,且能够确定其大小或影响因素的系统误差。对于可定系统误差,无论是来自仪器、方法,还是来自环境、测量者,要设法找到它,探求其规律,然后采取相应措施将其对测量结果的影响尽可能减少到可忽略程度。另一类叫作未定系统误差。未定系统误差是指那些只知道测量误差可能存在于某个大致范围而并不知道它的具体数值的系统误差,如仪器的最大允差。任何测量仪器在生产过程中,都会因种种原因,如结构或制造工艺的不完善、活动部件的摩擦、游丝弹性的不均、度盘分格的不准等因素而带来误差。为了综合评定某一仪器产生误差的大小,通常仪器在出厂时都会给出仪器的最大允差(也称为仪器最大误差)。不过最大允差只能使我们知道误差的极限范围,而无法知道其确切的大小和正负,所以,最大允差是一种未定系统误差。通常对于未定系统误差可以根据其分布的随机性而将其合并到我们下面要介绍的另一类误差(随机误差)中去,并以随机误差的形式报告出来。

2. 随机误差

随机误差的特征是其随机性。在一定的实验条件下多次测量某一物理量时,即使消除了一切引起系统误差的因素,测量结果仍会出现不同的数值。这些测量值在与真值的偏差上表现为忽大忽小、忽正忽负。表面看来,它既不可预知,又无法控制,没有确定的规律可循。因而把这种随时都在变化的误差称为随机误差,也叫作统计误差。

随机误差的产生,一方面是由于实验过程中存在着某些不可预知和无法控制的偶然因素的影响,如实验环境中的温度、湿度的起伏、杂散电磁场的干扰、空气的流动、地面的振动、电源电压的不稳定以及重复测量中观测者每次操作在对准、估读、判断、分辨上产生的微小差异等;另一方面是由被测对象本身的不稳定性所引起的,如被测物体本身存在微小差异等。

随机误差的出现,从表面上看似纯属偶然,但也并非无规律可循。实践和理论都证明,在等精度条件下,当重复测量次数很多时,随机误差显示出明显的统计规律。以 Δx 表示每一次测量的随机误差,以 $\rho(\Delta x)$ 表示某一随机误差出现的概率密度函数(probability density function),其数学表达式为:

$$\rho(\Delta x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(\Delta x)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1-3)$$

其中 $\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$ 是测量的标准误差(standard error),可得到图 1-1 所示的曲线,此曲线称为正态分布曲线(normal distribution)(或称为高斯分布曲线(Gaussian distribution),是德国物理学家高斯在 1795 年导出的)。当测量次数 $n \rightarrow \infty$ 时,正态分布曲

线完全对称。由高斯分布曲线分析,随机误差具有如下性质:

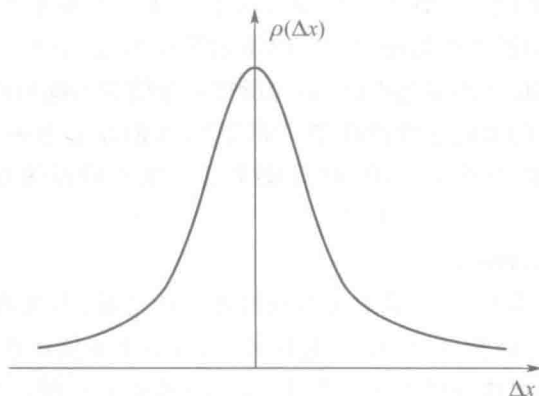


图 1-1

- ① 有界性(boundedness):绝对值很大的误差出现概率为零,即误差的绝对值不会超过一定的界限;
- ② 单峰性(unimodality):绝对值小的误差出现的概率比绝对值大的误差出现的概率大;
- ③ 对称性(symmetry):绝对值相等的正误差和负误差出现的概率相等;
- ④ 抵偿性(compensation):误差的算术平均随着测量次数的增加而越来越趋于零,即

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

随机误差的统计特性告诉我们,增加测量次数可以减小随机误差。这就是为什么我们在实验室工作中常常采用多次测量的原因。当然,实际的测量次数不可能无限多,所以随机误差是不可能完全消除的。而且,并非测量次数越多越好。因为增加测量次数必定延长测量时间,这会保持稳定的测量条件增加困难,同时,增加测量次数也会使测量者疲劳,从而导致较大观测误差的出现。一般在科学研究中,实验重复的次数取 50 次左右为佳;在大学物理实验中,取 10 次以内即可。

综上所述,系统误差与随机误差的性质不同,来源不同,处理的方法也不同。在实验中系统误差与随机误差往往是并存的,因而测量结果的总误差应为两者之和。在实际测量中,有时影响测量结果的因素是以系统误差为主,这时随机误差可以忽略不计;有时影响测量结果的因素是以随机误差为主,这时系统误差可以忽略不计;而有时两种误差都将影响测量结果,这时两者均不可忽略。因此,一般来说,在处理实验数据时系统误差与随机误差需加以区别,以便分别处理,最后再求出总的测量误差。但在很多情况下,系统误差和随机误差之间是相互联系的,两者并没有截然分明的界线。例如,测一个钢球的直径