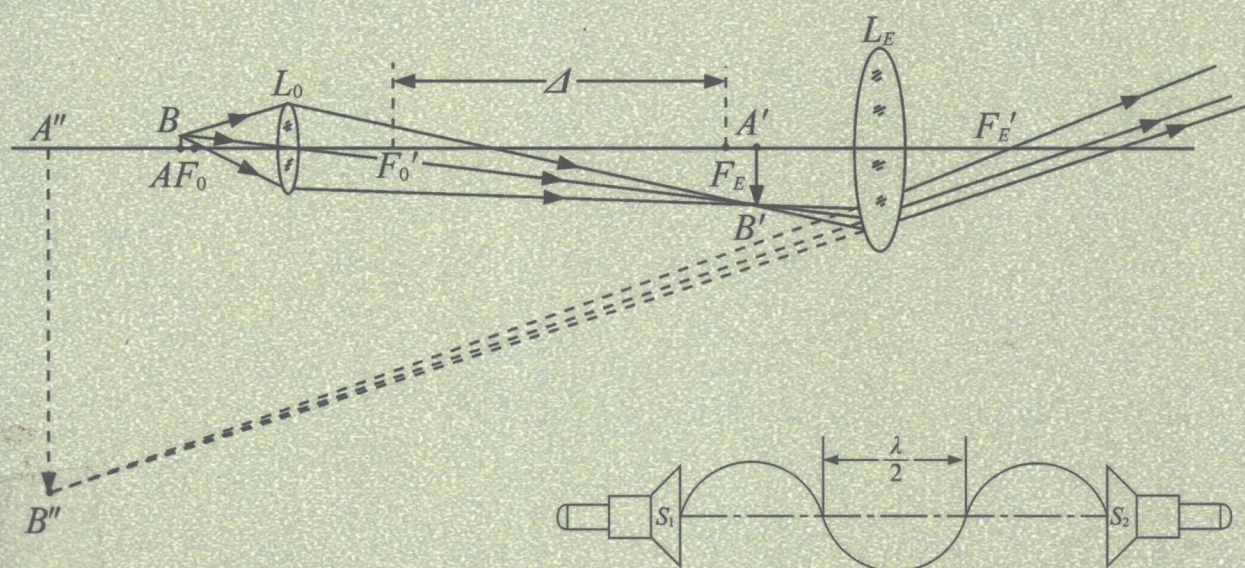


● 21世纪高等院校系列教材

PUTONG WULI SHIYAN

普通物理实验

彭菊村 孙春峰 主编



湖北科学技术出版社
HUBEI SCIENCE & TECHNOLOGY PRESS

21 世纪高等院校系列教材

普通物理实验

主编:彭菊村 孙春峰

参编:(以姓氏笔划为序)

丁占齐 王恒学 王军延 李丽霞

吴新燕 张 秀 童菊芳 鲁德初

湖北科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

普通物理实验 / 彭菊村, 孙春峰主编. —武汉: 湖北科学技术出版社, 2005.9

ISBN 7-5352-3442-9

I. 普... II. ①彭... ②孙... III. 普通物理学—实验

IV. 04-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 086787 号

21 世纪高等院校系列教材

普通物理实验

© 彭菊村 孙春峰 主编

策 划: 李海宁

封面设计: 喻 扬

责任编辑: 李海宁

出版发行: 湖北科学技术出版社

电话: 87679468

地 址: 武汉市雄楚大街 268 号湖北出版文化城 B 座 12-13 层

邮编: 430070

印 刷: 石首市印刷厂

邮编: 434400

787 毫米 × 1092 毫米

16 开

16.25 印张

395 千字

2005 年 9 月第 1 版

2005 年 9 月第 1 次印刷

印数 0 001-4 300

ISBN 7-5352-3442-9 / O · 54

定价: 26.00 元

本书如有印装质量问题 可找承印厂更换

内 容 提 要

本书是孝感学院物理系在多年教学研究和教改实践的基础上,结合本校物理实验教学内容和实验仪器配置的实际情况编写而成的。全书共分六部分:绪论;第一章为测量误差、不确定度和数据处理的基本知识;第二章至第四章分别为力、热实验,电磁学实验,光学实验,共编入实验 46 个;第五章为综合性、设计性实验,编入实验 18 个。全书共编入实验 64 个。

本书可供一般性本科院校、师范专科学校、教育学院的物理类专业学生作普通物理实验教材,也可作理科非物理类专业、工科院校学生基础物理实验教材,同时还可作高职高专院校、中学教师及物理实验工作人员的参考书。

前 言

普通物理实验是为理科学子开设的第一门物理实验课,它的任务是通过实验培养学生发现、分析、解决物理问题的能力和实验动手能力。它要求学生系统地掌握物理实验的基本知识、基本方法和基本技能,打好科学素质基础。我们是以这一任务和要求为主线来编写本教材的。

近十多年来,随着实验教学改革的不不断深入,普通物理实验课的教学从实验内容到课程体系,以及实验技术都在不断地更新和变化,适用不同层次、类型,体现不同实验教学改革特色的新的实验教材不断涌现。但编写一本“简明、实用”,既体现当前实验教学改革的一般要求,又具有自身改革和创新特色,适合一般理工科物理实验教学需要的实验教材,是几年来我们一直追求并付诸努力的目标。

在编写中,我们力求做到:

(1)着眼于学生能力和创新精神的培养,并遵循循序渐进的原则。我们对传统的实验选题作了审视和调整,注意保留了对物理学本身来说是基本的内容和物理测量的基本实验,加强了旨在提高学生实验能力和创新能力的综合性、设计性实验,补充了一些能较好反映和体现现代科技发展的有代表性的实验内容、方法和手段。这样既保证了基本训练,又提高了物理实验的综合性、创新性和实用性程度。

(2)简明性、实用性和灵活性并重。我们精简了实验选题个数,而在实验内容、方法和仪器使用上给予较宽介绍,在每个实验内容的编排体系上,突出一种实验方法,其他相关方法亦作简明介绍,以便不同学校 and 不同条件的实验室,可以根据仪器配置等自身条件灵活地选用。

(3)体现自身特点,加强与中学的衔接。考虑到目前中学实验的实际基础,以及师范教育专业服务基础教育的原则,在实验方法的选择特别是仪器配置上,既体现现代科技在实验中的应用,同时也介绍了一些基本的简单的仪器和实验方法,较好体现了与中学教育的有机衔接。

(4)对数据处理和测量误差的评定,全面采用不确定度评价体系。贯彻和全面采用国际通行的不确定度评价体系,是实验教学内容改革和更新的要求,但考虑到实验教学的具体要求,我们采用了现在较通行的简化处理方法。

本书可供一般性本科院校、师范专科学校、教育学院的物理类专业学生作普通物理实验教材,也可作理科非物理类专业、工科院校学生基础物理实验教材,同时可作高职高专院校、中学教师及物理实验工作人员的参考书。

参加本书编写工作的有:彭菊村(绪论,第一章,实验 2、8、9、15、23,附表),王恒学(实验 3、4、6、7、11、12、14),丁占齐(实验 5、13),童菊芳(实验 1、3、10),孙春峰(实验 21、22、24、25、26、27),吴新燕(实验 16、17、18、19、20、28、29、30、31、32),张秀(实验 33、34、40、42、43、45、46),李丽霞(实验 35、36、37、38、39、41、44),王军延(实验 47~64)。王恒学、孙春峰、张秀、彭菊村分别负责了实验的力热部分、电磁学部分、光学部分、综合性设计性实验部分及第一章的统稿和审稿,鲁德初参与了全书的策划和负责了全书的统稿。

物理实验课和课程改革是全体实验教师和技术人员的集体工作,本书的编写凝聚了孝感学院物理系实验教师和实验技术人员的智慧与劳动成果。熊平凡教授于百忙中抽出时间审阅

了书稿,并提出了宝贵的指导意见。本书的编写还参考了东北师范大学杨述武主编的《普通物理实验(电磁学)(综合及设计性部分)》;武汉大学周殿清主编的《大学物理实验》和马清茂主编的《物理实验教程》;华中科技大学是度芳主编的《基础物理实验》;张兆奎、廖连元、张立主编的《大学物理实验》;北京大学吕斯骅、段家祗主编的《基础物理实验》;刘尚晋、魏立生主编的《普通物理实验》;四川大学朱世国主编的《大学物理基础实验》,在此一并致谢。

本教材的编写和出版工作得到了孝感学院领导和教务处的热情关心和大力支持,同时也得到了湖北科学技术出版社李海宁副编审的支持和帮助,在此表示衷心感谢!

教学改革是一项长期和复杂的系统工程,需要不断地改革实践和长期研究探索。我们的实验教学改革探索才刚刚起步,加之水平有限,错漏和不当之处在所难免,还望使用、关心和阅读本教材的教师、学生和技术人员不吝指正。

编 者

2005 年 6 月

绪 论

1. 物理实验的地位和作用

科学理论来源于科学实验,并受科学实验的检验。物理实验是科学实验的重要组成部分,它在物理学建立和发展中起着十分重要的作用,物理学的理论是建立在严格的实验基础上的。如杨氏双缝干涉实验,确立了光的波动说;尔后的光电效应实验,又进一步揭示了光具有波粒二象性。再如赫兹的电磁波实验,使麦克斯韦的电磁场理论获得了普遍承认。而被称为“牛顿以来最伟大的发现之一”的能量量子化概念,就是在人们面对黑体辐射实验,遇到了经典理论无法克服的困难时,普朗克基于德国物理学家康尔鲍姆和鲁本斯对热辐射光谱所做的新的实验测量结果,大胆地提出了能量量子假设的思想,为量子论的创立和量子力学的发展开辟了道路。

物理实验和物理学在推动其他科学、工程技术的发展中也起着重要的作用。历史上每次重大的技术革命都源于物理学的发展。热力学、分子物理学的发展,使人类进入了热机、蒸汽机时代;电磁学的发展使人类跨入了电器化时代;原子物理学、量子力学的发展,促进了半导体、原子核、激光、电子计算技术的迅猛发展。而近代物理学与各学科的相互渗透,发展了许多交叉学科,物理学的原理、基本实验手段和精密的测试方法已越来越广泛地应用到科学研究、工程技术领域之中。

物理实验是对高等学校学生进行科学实验基本训练的一门独立的必修基础课程,它不仅可以对物理理论的理解,更重要的是使学生获得基本的实验知识,在实验方法和实验技能等方面受到较系统而严格的训练。物理实验在提高学生的科学素质及树立科学世界观方面都起着十分重要的作用。

2. 物理实验课的目的和任务

物理实验作为一门独立的基础课程,其目的和任务是:

(1)通过对实验现象的观察、分析和对物理量的测量,加深对物理学原理的理解。

(2)学习实验的基础知识、基本方法,培养基本的实验技能,即要求学生做到:弄懂实验原理,了解基本物理量的测量方法和测量技术;熟悉常用仪器的结构、原理和性能,掌握其使用方法;细致地观察实验现象,正确记录、处理实验数据,分析判断实验结果,撰写合格的实验报告,以及完成简单的具有设计性内容的实验等。

(3)培养理论联系实际、实事求是的科学态度和严谨踏实的工作作风,培养积极进取、坚忍不拔的探索精神以及遵守纪律、团结协作、爱护公物的优良品质。

3. 物理实验课的基本程序和实验报告

物理实验一般分为预习、课堂操作和完成实验报告三个阶段。

(1)预习 实验课前认真阅读教材,在弄清本次实验的目的、原理,明确观察哪些现象和测量哪些物理量,了解仪器的性能及测试方法和步骤的基础上,在报告纸上写出预习报告,并根据实验测量要求拟订数据记录表格。

(2)实验课堂操作 实验时严格遵守实验室的规章制度和实验操作规程,严格按实验步骤进行测试并采集数据,要仔细观察,积极思维,认真操作,细心记录,测量的原始数据应整齐地

记录(不要用铅笔)在实验笔记本上。此外,还应该记录环境温度、湿度、气压等实验条件、仪器型号规格,以及实验现象等。测试中仪器出了故障或发现异常现象,应及时请教指导教师。

(3)撰写报告 完成课堂操作后,接着预习报告并在报告纸上完成如下内容:

数据表格 设计科学合理的表格,将整理后的数据填入表格之中。

数据处理 按实验要求计算待测量的量值,该作图的要作图,应求出结果的不确定度,并正确运用不确定度表示实验结果(计算过程为公式→代入数据→结果,中间计算过程不写在报告上)。

结果分析 对本次实验结果及主要误差因素作简要的分析和讨论。也可对实验本身的设计思想、实验仪器的改进等提出设想和建议。报告要求文字通顺,语言简练,字迹端正,图表规则,结果正确,讨论认真。

目 录

前言	(I)
绪论	(III)
第一章 测量误差、不确定度及数据处理的基础知识	(1)
1.1 测量误差的基本知识	(1)
1.2 不确定度与测量结果不确定度的表示	(8)
1.3 有效数字及其运算	(14)
1.4 实验数据处理的几种方法	(16)
第二章 力学和热学实验	(23)
实验 1 用米尺、游标尺、螺旋测径器、读数显微器测量长度	(23)
实验 2 随机(偶然)误差的统计分布	(28)
实验 3 重力加速度的测定	(30)
实验 4 固体密度的测量	(35)
实验 5 速度和加速度的测量	(38)
实验 6 弦的振动实验	(42)
实验 7 碰撞实验	(44)
实验 8 杨氏弹性模量的测定(拉伸法)	(47)
实验 9 声速的测定	(49)
实验 10 测量液体的粘滞系数(落球法)	(53)
实验 11 刚体转动惯量的测定	(55)
实验 12 金属线胀系数的测定	(59)
实验 13 冰的溶解热的测定	(61)
实验 14 液体表面张力系数的测定	(64)
实验 15 用稳态平板法测定不良导体的导热系数	(66)
第三章 电磁学实验	(69)
电磁学实验的基本知识	(69)
实验 16 学习使用万用电表	(73)
实验 17 伏安法测电阻	(78)
实验 18 伏安法测晶体二极管的特性	(81)
实验 19 电表的扩程和校准	(84)
实验 20 用惠斯通电桥测电阻	(87)

实验 21	静电场的模拟与描绘	(91)
实验 22	低电阻的测量	(96)
实验 23	交流电路中功率和功率因数的测量	(99)
实验 24	用板式电位差计测量电池的电动势与内阻	(103)
实验 25	磁场的描绘	(108)
实验 26	霍尔效应实验	(112)
实验 27	示波器的原理及应用	(118)
实验 28	电子束线的偏转	(125)
实验 29	电子束线的聚焦	(129)
实验 30	交流电桥	(134)
实验 31	LRC 电路的暂态过程研究	(138)
实验 32	RLC 电路的谐振特性研究	(142)
第四章	光学实验	(146)
	光学实验的基本知识	(146)
实验 33	薄透镜焦距的测定	(150)
实验 34	显微镜	(154)
实验 35	分光计的调节和使用	(158)
实验 36	用阿贝折射仪测定物质的折射率	(163)
实验 37	平行光管的调节和应用	(168)
实验 38	用牛顿环测定透镜的曲率半径	(173)
实验 39	用双棱镜测定光波波长	(176)
实验 40	迈克耳孙干涉仪	(180)
实验 41	单缝衍射的光强分布及缝宽测定	(185)
实验 42	衍射光栅的特性与光波波长的测量	(187)
实验 43	偏振光的分析	(190)
实验 44	旋光性及旋光性溶液浓度的测量	(194)
实验 45	激光全息照相	(198)
实验 46	光电效应实验	(203)
附录一	测微目镜	(208)
附录二	读数显微镜	(209)
附录三	平行光管	(210)
第五章	综合与设计性试验	(211)
实验 47	误差分配和实验仪器的选择	(211)
实验 48	气垫导轨实验中系统误差的分析与补正	(212)
实验 49	重力加速度研究	(214)
实验 50	易溶于水的颗粒状物质的密度测定	(215)

实验 51 热功当量的测定 (216)

实验 52 伏安法测低值电阻仪器设计 (218)

实验 53 简易万用表的设计及校准 (219)

实验 54 直流稳压电源的设计与制作 (222)

实验 55 简单的测谎器设计 (224)

实验 56 RC 串并联电路充放电过程研究 (225)

实验 57 电阻温度系数的测定 (227)

实验 58 光波波长测量综述 (229)

实验 59 媒质折射率与波长关系的研究 (230)

实验 60 光学材料折射率的测定 (232)

实验 61 光栅特性的研究 (234)

实验 62 应用光的衍射方法测量微细线径 (235)

实验 63 全息光栅制作及其参数测定 (237)

实验 64 物理过程的计算机辅助模拟 (239)

附表..... (241)

参考文献..... (249)

第一章 测量误差、不确定度及数据处理的基础知识

物理实验离不开对物理量的测量。由于测量仪器、测量方法、测量条件、测量人员等因素的限制,测量决不可能绝对准确,所以需要对测量结果的可靠性做出评价,对其误差范围做出估计,并正确地表达实验结果。

本章从实验教学的角度出发,主要介绍误差和不确定度的基本概念,测量结果不确定度的计算,实验数据处理和实验结果表达等方面的基本知识。

1.1 测量误差的基本知识

1.1.1 测量与误差

测量就是借助仪器用某一计量单位把待测量的大小表示出来。物理实验离不开测量。根据获得测量结果方法的不同,测量可以分为直接测量和间接测量。由仪器或量具可以直接读出测量值的测量称为直接测量,如用米尺测量长度,用天平称质量。另一类需依据待测量和某几个直接测量值的函数关系通过数学运算获得测量结果,这种测量称为间接测量。如钢球的体积 V 可由直接测得的球直径 D 根据公式 $V = \frac{1}{6}\pi D^3$ 计算得到, V 即为间接测量量。

在一定条件下,某一物理量所具有的客观大小称为真值。测量的目的就是力图得到真值。但由于测量仪器、测量方法、实验条件及各种因素的局限,测量结果与真值之间总有一定的差异,即总存在测量误差。设测量值为 X ,相应的真值为 X_0 ,测量值与真值之差

$$\Delta X = X - X_0$$

称为测量误差,又称绝对误差,简称误差。误差的大小,反映了我们认识接近客观实际的程度。

误差存在于一切科学实验和测量过程的始终,既不能避免,也不能完全确定。因此,分析测量中可能产生的各种误差及其性质,设法将测得值的误差减至最小并确定其范围,以便在一定条件下得到接近真值的最佳结果,并做出可信度评价,就是实验测量中不可缺少的工作。

1.1.2 误差的分类

误差的产生有多方面的原因,根据误差的性质及产生的原因可分为三类:系统误差、随机误差和粗大误差。

(1) 系统误差

在同一条件下(指方法、仪器、环境、人员等)多次测量同一物理量时,其误差的绝对值与符号保持不变,或在条件改变时,误差值按一定规律变化,这类误差称为系统误差。系统误差主要有以下几个方面:

仪器误差 是由于仪器制造的缺陷,安装调节不当或未经校准等原因所造成的误差。例

如秒表偏快,天平不等臂等。

理论(方法)误差 是实验所依据的理论和公式的近似性或实验条件达不到理论公式规定的要求或测量方法不当等所引起的误差。如实验中忽略了摩擦、散热、电表的内阻,单摆周期公式 $T=2\pi\sqrt{l/g}$ 的成立条件是摆角趋于零而实际上难以达到等。

环境误差 是外界环境性质(如光照、湿度、温度、电磁场等)的影响而产生的误差。

个人误差 是由于测量者的生理心理特点或固有习惯所带来的误差。如反应速度的快慢,分辨能力的高低,读数的习惯(如有人读数总是偏高,有人读数总是偏低)等。

系统误差按对其掌握的程度可分为已定系统误差和未定系统误差。已定系统误差是指在一定条件下,采用一定的方法能发现并确切掌握其变化规律、大小和符号的系统误差。这类误差一经发现,可以消除或在测量结果中予以修正,如千分尺的零点校准或零点修正。未定系统误差是指不能确切掌握误差取值的变化规律及其大小和符号,而仅知误差范围(或极限误差)的系统误差。如仪表的基本允许误差主要属于未定系统误差。

系统误差按其表现的规律又可分为定值系统误差(如千分尺没有零点修正、天平砝码的标称值不准确等,在测量过程中其误差的大小和符号恒定不变)和变值系统误差(如分光计刻度盘中心与望远镜转轴中心不重合、存在偏心所造成的一种周期性变化的读数误差)。

产生系统误差的原因通常是可以被发现的,原则上可通过修正、改进加以排除或减小。分析、排除和修正系统误差要求测量者具有丰富的实践经验。

(2)随机误差

消除或修正了一切明显的系统误差后,在相同条件下对一物理量进行多次测量时,每一次测量值的随机涨落(这种随机涨落在任何环境下都是会出现的)称为随机误差,也叫偶然误差。

随机误差是由于某些偶然或不确定的因素造成的。如无规则的温度变化,气压起伏,地基、桌面的振动,电磁场的干扰,光线的闪动,电压、电流的波动,以及观测者感官(听、视、触觉)分辨能力的微小变化等,这些因素既不可控制又无法预测和消除。随机误差具有偶然性,即对个体而言是不确定的,但其总体(大量个体的总和)服从一定的统计规律,因此可用统计方法估算其对测量结果的影响。大量实验事实证明,测量次数甚大的等精度测量列(在相同条件下对同一物理量进行多次测量获得的一组测量值)的随机误差遵从或近似遵从正态分布(又称高斯分布)。

(3)粗大误差

粗大误差是指由测量时的客观条件不能解释为合理的那一类误差,又称过失误差。一般说来,它是由方法错误、操作不当或粗心大意造成的测量结果错误或实验条件突变等造成的。粗大误差的存在,将明显歪曲测量结果,因此实验测量中要极力避免过失误差,在数据处理中要把含有粗大误差的异常数据加以剔除。剔除的准则一般为 3σ 准则或肖维勒准则。

1.1.3 随机误差的统计规律

随机误差服从一定的统计规律,也就是服从某种概率分布。概率分布的性质用概率密度函数 $\rho(\Delta x)$ 来描述,其中 Δx 代表测量误差,是一种随机变量。概率密度函数 $\rho(\Delta x)$ 满足归一化条件

$$\int_{-\infty}^{\infty} \rho(\Delta x) d\Delta x = 1 \quad (1-1)$$

随机误差的分布有多种,不同的分布对应不同的分布函数。但无论哪种分布一般都有两个重要的参数:平均值和标准差。

(1) 正态分布规律

理论和实践都证明,大多数随机误差(其中包括同一条件下多次测量的算术平均值的随机误差和间接测量结果的随机误差)服从或近似服从正态分布(高斯分布)。

正态分布的概率密度函数为

$$\rho(\Delta x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\Delta x^2/2\sigma^2} \quad (1-2)$$

式中,

$$\sigma = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_0)^2}{n}} \quad (1-3)$$

σ 称为正态分布的标准误差,简称标准差,是表征 x 的离散程度(or 测量分散性)的一个重要参量,其图形如图 1-1 所示。

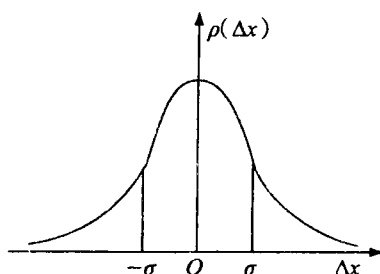


图 1-1

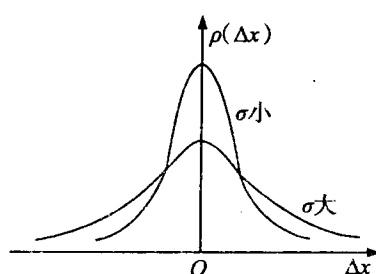


图 1-2

服从正态分布的随机误差具有如下一些特征:

- ①单峰性 绝对值小的误差比绝对值大的误差出现的概率大。
- ②对称性 绝对值相等的正误差和负误差出现的概率相等。
- ③有界性 绝对值很大的误差出现的概率近于零。
- ④抵偿性 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

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x_0) = 0$$

抵偿性是这类误差最重要的特性,当 $n \rightarrow \infty$ 时,测量值的算术平均值就等于真值,而测量结果的偶然误差为零。由此看到,用多次测量的算术平均值作为测量的最佳值是科学的;增加测量次数可以减小偶然误差。

下面讨论标准差 σ 的物理意义。

σ 不是一个具体的测量误差值,它反映在相同条件下进行一组测量后的随机误差出现概率的分布情况,只具有统计性质的意义,是一个统计性的特征量。

从概率密度的函数表达式可见, σ 大, $\rho(\Delta x)$ 的曲线将矮而宽, Δx 的离散性显著,测量的精密度低; σ 小, $\rho(\Delta x)$ 的曲线高而窄, Δx 的离散性小,测量的精密度高,如图 1-2 所示。

测量误差落入任意区间 $[-c\sigma, c\sigma]$ 的概率,可以由正态分布函数在该区间的积分求得,即

$$P(c\sigma) = \int_{-c\sigma}^{c\sigma} \rho(\Delta x) d\Delta x$$

其中 c 是任意正的实数,当 $c=1$ 时,可以求得

$$p(\sigma) = \int_{-\sigma}^{\sigma} \rho(\Delta x) d\Delta x = 68.3\%$$

它表示:任作一次测量。测量误差落在区间 $[-\sigma, \sigma]$ 的概率为 68.3%。

区间 $[-\sigma, \sigma]$ 称为置信区间,其相应的概率 $p(\sigma)=68.3\%$ 称为置信概率。显然,置信区间扩大,则置信概率提高。置信区间取 $[-2\sigma, 2\sigma]$, $[-3\sigma, 3\sigma]$,相应的量信概率 $p(2\sigma)=95.4\%$, $p(3\sigma)=99.7\%$ 。可见, Δx 落入区间 $[-3\sigma, 3\sigma]$ 以外的可能性很小,通常称 3σ 为极限误差。也因此可以认为有限次测量中误差的绝对值大于 3σ 的为粗大误差,对应的测量值应予以剔除(3σ 判据)。在分析判定测量列中的异常数据时,这是很有用的 3σ 判据,也称拉依达方法。

对于 σ 所表示的概率含义,也可等价表述为:任一次测量值 x 落入区间 $[x_0 - \sigma, x_0 + \sigma]$ 的概率为 68.3%, or 真值落入区间 $[\bar{x} - \sigma, \bar{x} + \sigma]$ 的概率亦为 68.3%。这里, $\bar{x}$ 为 $n \rightarrow \infty$ 时的总体平均值, x_0 为真值。按随机误差的抵偿性。当 $n \rightarrow \infty$ 时, $\frac{1}{n} \sum (x_i - x_0) \rightarrow 0$, 因此, $\bar{x} \rightarrow x_0$ 。

需要明确,除近似服从正态分布的随机误差外,在其他的分布中,还有一种和我们关系密切的分布是均匀分布。如有些仪器的误差在其允许范围内可以认为服从均匀分布,另外如数据在截尾时引入的舍入误差,都可以认为服从均匀分布。

(2) 测量列的标准差和平均值的标准差

测量列的标准误差(简称为标准差)如式(1-3)所定义,而在 $n \rightarrow \infty$ 时,不考虑系统误差的情况下 $\bar{x} \rightarrow x_0$, 故有

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

由于实验测量总是有限次的,在大学物理实验教学中,通常取 $5 \leq n \leq 10$ 。因此,上述 σ 只是个理论值。置信概率 $p(\sigma)$ 为 68.3% 也是一个理论值。

根据随机误差的高斯理论可以证明,在有限次测量情况下,单次测得值的标准差为:

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (1-5)$$

通常称 $v_i = x_i - \bar{x}$ 为偏差,或曰残差。 S_x 表示测量列的标准差。它是 $n \rightarrow \infty$ 时 σ 的一个估计值,表征对同一被测量在同一条件下作 n 次有限测量时,其结果的分散程度。其相应的置信概率 $P(S_x)$ 接近于 68.3%, 它表示 n 次测量中任一次测量值的误差(或偏差)落在 $(\pm S_x)$ 区间的可能性约为 68.3%, 也就是真值落在 $(x - S_x, x + S_x)$ 范围的概率约为 68.3%。

在相同条件下,对同一量作多组重复的系列测量,每个测量列的平均值一般不会完全相同。它们围绕被测量的真值有一定的离散性,即 $\bar{x}$ 也存在误差。平均值 $\bar{x}$ 的标准差为

$$S_{\bar{x}} = \frac{S_x}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (1-6)$$

它表示在 $[\bar{x} - S_{\bar{x}}, \bar{x} + S_{\bar{x}}]$ 范围内包含真值 x_0 的可能性约为 68.3%。由式可见:(1)平均值的标准差要比测量列的标准差小得多。这是由于平均值更接近于真值,它们的随机误差分布的离散性就会小得多。(2) $S_{\bar{x}}$ 随 n 的增大而迅速减小,这就是通常所说增加测量次数可以减小随机误差。但是,由于 n 大于 10 以后, $S_{\bar{x}}$ 变化缓慢,所以实际测量次数一般不要很多。当 $n \leq 10$ 时,要获得可靠的置信概率 $p=68.3\%$, $S_{\bar{x}}$ 前应乘以一因子(详见 1.2.2)。

1.1.4 系统误差的处理

在一般的测量和计量活动中,系统误差往往是影响测量结果的主要因素,但在许多情况

下,系统误差常常不明显表现出来。因此,发现系统误差,估计它对测量结果的影响,设法修正、减小或消除其影响就成为误差分析的一个很重要的内容。由于系统误差的处理涉及较深的知识,同时要求测量者具有丰富的实践经验,这里仅作简要介绍。

(1)发现系统误差的几种主要方法

①理论分析法 分析实验依据的理论公式或仪器使用所要求的条件在实验测量过程中是否得到满足。如单摆周期公式 $T=2\pi\sqrt{l/g}$ 所要求摆动幅角 $\theta\leq 5^\circ$ 而实验未能保证,滑块在气垫导轨上的运动因受周围空气及气垫层的粘滞性摩擦阻力的作用引起速度的减小等。又如根据欧姆定律 $R=V/I$ 用伏安法测电阻,从测量电路图可知,无论采取“内”、“外”接法,都不能同时消除仪表的分压或分流给测量带来的影响,只有根据 V 、 I 表的内阻按公式给予修正。

②对比法 对比法包括实验方法和测量方法(测量条件)的对比、仪器的对比等。仪器的对比如用两个电表接入同一电路,对比两个表的读数,若其中一个为标准表,就可得到另一个表的修正值。改变测量条件的对比如电流正向与电流反向时的读数是否一致;增加砝码的过程和减少砝码的过程中读数、观察结果是否一致。

③数据分析法 当随机误差较小时,将待测量的绝对偏差按测量次序排列,观察其变化。若这种变化不是随机的,而呈现某种规律性,如线性增大或减小、周期性变化等,则测量中一定存在系统误差。

(2)系统误差的消除与修正

根据系统误差产生的根源及表现的特征形式,可以采取一些相应的措施,去修正或消除系统误差的影响。如通过完善理论模型、实验仪器和实验条件,尽量减小或消除系统误差的影响;用标准仪器对测量仪器进行校准,从而对测量结果进行修正,或对由理论公式的近似造成的误差,找出修正值进行修正;以及采用一些特殊的方法,消除变值系统误差等。

对于初学者,不可能一下子把系统误差问题弄清楚,须循序渐进。本课程只要求建立系统误差的概念,采用一些较简单常见的清除系统误差的方法,初步掌握系统误差处理的基本知识。

(3)仪器误差

测量是用仪器或量具(简称仪器)进行,任何仪器都存在误差。

仪器误差是指在正确使用仪器的条件下,仪器的示值与被测量的真实值之间可能产生的最大误差或误差限,用 Δ_I 表示。

教学中的仪器误差限 Δ_I 一般简单地取计量器具的示值误差限或基本误差限,它们可参照计量器具的有关标准,由准确度等级或允许误差范围得出,或由生产厂家的产品说明书给出,或由实验室结合具体情况给出 Δ_I 的近似约定值。

当给出测量仪器的级别,则

$$\Delta_I = \text{仪器级别} \times \text{量程} / 100$$

例如,电表的误差可分为基本误差和附加误差。电表的附加误差在物理实验中考虑起来比较困难,在实验教学中一般只取基本误差限。因此按下式简化计算 Δ_I :

$$\Delta_I = \frac{k}{100} \times \text{量程}$$

式中, k 为国家标准规定的仪器准确度等级。电工仪表常用“基本误差限”来表示仪器误差。

如果不知道测量仪器的级别,通常以示值误差作为测量仪器的误差,对于指针式仪表或标有刻度的量具等,通常取最小刻度的 $1/2$ 作为仪器的示值误差;非连续读数的仪器如游标卡尺、分光计、机械秒表等,则取仪器的最小分度值作为仪器的示值误差;而数字式仪表通常取末

位±1 或±2 作为仪表的示值误差。

下面列举几种常用器具的仪器误差：

①游标卡尺

游标卡尺不分精度等级，一般测量范围在 200mm 以下的卡尺，其分度值就是仪器的示值误差。

表 1-1 (单位: mm)

测量范围	游标分度值		
	0.02	0.05	0.10
0~150	±0.02	±0.05	±0.10
150~200	±0.03	±0.05	±0.10
200~300	±0.04	±0.08	±0.10

②螺旋测微器

螺旋测微器分零级和一级两类，通常实验室使用的为一级，其示值误差也根据测量范围不同而不同。

表 1-2 (单位: mm)

测量范围	0~25, 25~50	50~75, 75~100	100~125, 125~150	150~175, 175~200
示值误差	±0.004	±0.005	±0.006	±0.007

③物理天平

实验室使用的 TG-628A 型属于Ⅱ级天平。天平的仪器误差来源于不等臂偏差，示值变动性误差、标尺分度误差、游标及砝码质量误差。根据国家计量检定规程《JJG98-90》规定，Ⅱ级天平的仪器误差与载荷质量 m 有关。设 e 为标尺分度值，则其仪器误差可按下表考虑。

表 1-3

载荷 m	$0 \leq m \leq 5 \times 10^3 e$	$5 \times 10^3 e \leq m \leq 2 \times 10^4 e$	$2 \times 10^4 e \leq m \leq 1 \times 10^5 e$
最大允差	e	$2e$	$3e$

④电表(电流表、电压表)

符合国标 GB776-76 规定的电流(压)表，在规定条件下使用时，其基本误差允许极限为 $\Delta_I = \pm \text{量程} \times \text{准确度等级} \%$

规定电表准确度等级分为：0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 1.5, 2.5, 5.0 七个等级。

⑤直流电桥

(一)符合部标 JB1391-74 规定的直流电桥，其基本误差允许极限的计算可分为以下两种：

I. 步进盘电桥和 $a \leq 0.1$ 级具有滑线盘电桥的计算公式为：
$$\Delta R = \pm k(a\%R + b\Delta R)$$

- 式中， k ——比例系数(电桥比例臂比值)；
 R ——比较臂示值；
 a ——准确度等级；
 ΔR ——比较臂最小步进值或滑线盘分度值(Ω)
 b ——系数(见表 1-4)。