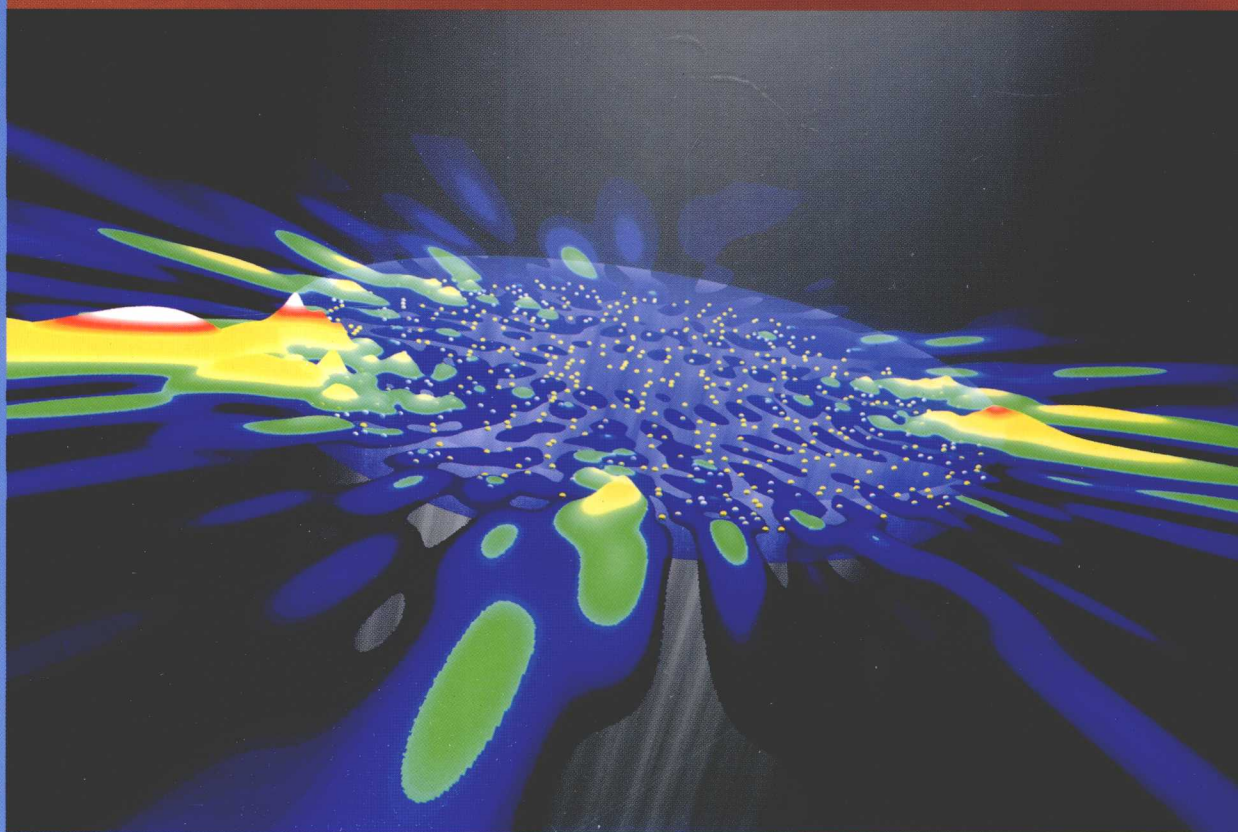




普通高等教育“十一五”规划教材

大学物理实验教程

江美福 方建兴 编著



科学出版社
www.sciencep.com

普通高等教育“十一五”规划教材

大学物理实验教程

江美福 方建兴 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是苏州大学物理科学与技术学院物理实验中心集体智慧的结晶,是综合多年来使用原有教材的老师和建议和要求,结合建设国家级物理实验教学示范中心过程中的教学实践编写而成的。本书系统介绍了物理实验的基本知识,编排了70余个实验项目,内容涉及物理实验操作基础、基本物理实验和提高性实验、综合设计性实验和拓展创新性实验。

本书可作为普通高等院校各专业不同层次的“大学物理实验”课程的教材或教学参考书,也可作为有关实验技术人员和专业人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验教程/江美福,方建兴编著. —北京:科学出版社,2009
普通高等教育“十一五”规划教材
ISBN 978-7-03-024320-1

I. 大… II. ①江…②方… 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(2009)第 043882 号

责任编辑:胡云志 唐保军 / 责任校对:张 琪
责任印制:张克忠 / 封面设计:耕者设计工作室

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>

新蕾印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2009年8月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2009年8月第一次印刷 印张:21

印数:1—4 000

字数:550 000

定价:34.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

本书是在苏州大学出版社出版的《大学物理实验》(1998年,江美福、谈利琴编著)、《物理实验》(2002年第一版,方建兴、江美福、魏品良编著;2007年第二版,方建兴、江美福、朱天淳编著)的基础上,考虑到近年来实验仪器和项目已作更新,教学内容和要求也已发生了较大的变化,综合多年来使用上述教材的老师和学生的建议和要求,结合建设国家级物理实验教学示范中心过程中的教学实践改编而成的,名称改为《大学物理实验教程》,仍定位于高等学校物理实验课程教材,也可作为相关专业的教师和学生的参考用书。

本书在内容编排上体现了物理实验教学示范中心近年来形成的物理实验课程新体系的特色,在体系上按物理实验操作基础、基本物理实验和提高性实验、综合设计性实验、拓展创新性实验四大模块编写。依托全息光学、光电子技术、材料物理和等离子体物理组成的拓展实验平台,更新、增添了26个相关实验,综合设计性实验和拓展创新性实验的比重显著加强,突出对学生综合实验研究能力的培养。

参加本书编写的人员包括:江美福、方建兴、叶超、张毓麟、罗晓琴、朱天淳、戴永丰、钱依、阮中中、吴亮、杨亦赏、储炳寿、吴茂成等,最后由江美福、方建兴统稿修改后定稿。

本书出版的整个过程中,得到了苏州大学物理科学与技术学院、科学出版社和复旦大学物理系马世红教授的大力支持。在此一并表示感谢!

虽然编者为一本书的出版进行了较长时间的酝酿和多次研讨,为保证本书的质量做了许多努力,但由于水平有限,书中难免存在不足之处,敬请广大读者批评指正。

编 者

2009年1月于苏州

目 录

前言

绪论	1
第 1 章 物理实验的基本知识	3
1.1 测量与误差	3
1.2 不确定度的评定	13
1.3 有效数字及其运算	17
1.4 测量结果的完整表示	20
1.5 实验数据的分析和处理	24
1.6 数据处理的基本方法	25
1.7 物理实验的基本测量方法	30
练习题	34
第 2 章 物理实验操作基础	37
实验 2.1 长度的测量和密度的测定	37
实验 2.2 重力加速度的测定	40
实验 2.3 气垫实验	44
实验 2.4 电路连接和多用电表的使用	50
实验 2.5 模拟法测绘静电场	57
实验 2.6 电势差计及其使用	60
实验 2.7 圆线圈磁场的测绘	62
实验 2.8 薄透镜焦距的测定	65
实验 2.9 显微镜与望远镜	68
实验 2.10 灵敏电流计的研究	71
附 2.1 常用物理量的测量	75
附 2.2 实验基本操作规程	101
第 3 章 基本物理实验和提高性实验	104
实验 3.1 杨氏模量的测定(拉伸法)	104
实验 3.2 液体表面张力系数的测定	106
实验 3.3 金属线胀系数的测定(光杠杆法)	108
实验 3.4 用落球法测液体的黏度系数	111
实验 3.5 空气密度的测定	115
实验 3.6 耦合摆的研究	118
实验 3.7 扭摆法测定物体的转动惯量	121
实验 3.8 弦振动的研究	125
实验 3.9 弹簧振子振动周期的研究	127

实验 3.10	用玻尔共振仪研究受迫振动	128
实验 3.11	电热法测定热功当量	131
实验 3.12	不良导体导热系数的测定	133
实验 3.13	空气比热容比的测定	135
实验 3.14	电子元件伏安特性的测量和修正	138
实验 3.15	电介质介电常数的测量	140
实验 3.16	用直流电桥测量电阻	143
实验 3.17	交流电桥	150
实验 3.18	霍尔效应测磁感强度	153
实验 3.19	油滴实验——电子电荷的测定	156
实验 3.20	RLC 电路谐振特性的研究	161
实验 3.21	RLC 串联电路的稳态特性	165
实验 3.22	RLC 串联电路的暂态过程	170
实验 3.23	半导体 pn 结物理特性及弱电流的测量研究	175
实验 3.24	示波器	178
实验 3.25	温度传感器及其应用	185
实验 3.26	单色仪的定标与滤光片光谱透射率的测定	191
实验 3.27	用双棱镜测光波波长	195
实验 3.28	分光计的调节及棱镜折射率的测定	197
实验 3.29	用透射光栅测定光波波长	202
实验 3.30	迈克耳孙干涉仪的调节和使用	205
实验 3.31	牛顿环与劈尖干涉	210
实验 3.32	偏振现象的观察与分析	214
实验 3.33	用旋光仪测旋光性溶液的旋光率和浓度	218
实验 3.34	单缝衍射相对光强分布的测量	222
实验 3.35	普朗克常量的测定	225
实验 3.36	液晶的电光效应与显示原理	228
实验 3.37	全息照相	233
实验 3.38	空气中声速的测定	240
第 4 章	综合设计性实验	244
实验 4.1	振动法测材料的杨氏(弹性)模量	244
实验 4.2	用传感器测空气相对压力系数	248
实验 4.3	摄影和暗室技术	250
实验 4.4	考察光源的时间相干性	256
实验 4.5	旋转液体特性研究	259
实验 4.6	热空气发动机	261
实验 4.7	用光电传感器(鼠标)进行位移测量实验	266
实验 4.8	数码相机的应用	268
附 4.1	测量仪器和测量条件的选择	270

附 4.2 测量最有利条件的确定	271
附 4.3 测量次数的确定	272
第 5 章 拓展创新性实验	273
实验 5.1 全息干涉计量测微小位移	273
实验 5.2 阿贝成像原理和空间滤波	275
实验 5.3 非线性电路混沌实验	282
实验 5.4 法布里-珀罗标准具	285
实验 5.5 集成运算放大器及简单应用	288
实验 5.6 硅光电池的线性响应	290
实验 5.7 介质薄膜折射率的测定	293
实验 5.8 真空的获得与测量	294
实验 5.9 等离子体的产生	299
实验 5.10 等离子体参数的静电探针测量	301
实验 5.11 等离子体参数的发射光谱诊断	303
实验 5.12 纳米薄膜的红外光谱测定和分析	305
实验 5.13 纳米薄膜的紫外光谱测定和分析	308
实验 5.14 固体材料润湿性能的水接触角测量	310
实验 5.15 椭圆偏振仪测量薄膜的厚度和折射率	312
参考文献	315
附录 A 中华人民共和国法定计量单位	316
附录 B 基本物理常数	318
附录 C 物理常量表	320

绪 论

1. 物理实验课的地位、作用和任务

物理学是实验科学. 物理学的概念、规律和理论的建立、发现与形成, 都以物理实验为基础并受到实验的检验. 物理学在自然科学的其他领域的广泛应用也离不开实验. 历史上每次重大的技术革命都来源于物理学上的重大突破. 热学、热力学的研究(18 世纪下半叶)导致蒸汽机的发明和广泛应用, 引发了第一次工业革命, 使人类进入了热机、蒸汽机时代. 电磁感应的研究、电磁学理论的建立(19 世纪中叶)导致发电机、电动机的发明及无线电通信的发展, 从而引发了第二次工业革命, 人类从此跨入了电气化时代. 相对论、量子力学的建立(1900~1930 年)使物理学进入了高速、微观领域; 核物理的研究和发展导致核能的释放和应用成为现实; 原子、分子物理的研究和发展导致了激光的发明和应用; 半导体、固体物理、材料科学的研究和发展导致了晶体管、大规模集成电路、新材料、电子计算机的发明和广泛应用. 人们把新能源、新材料、激光技术、信息技术的发展称为第三次工业革命. 物理实验的思想、方法和技术已广泛应用于其他学科和生产实践之中, 成为推动科学技术发展的强有力的工具.

作为 21 世纪的理工科大学生, 不仅要掌握比较深厚的基础理论和专业理论知识, 还应在物理实验的基本知识、基本方法、基本技能等方面受到较系统的训练, 加深对物理学基本概念和基本规律的理解和掌握, 提高科学素质和实践能力.

物理实验课是学生必修的独立开设的一门基础实验课, 是学生进入大学后接受系统实验方法和实验技能训练的开端, 是理工科类专业对学生进行科学实验训练的重要基础课程.

物理实验课的具体任务是:

(1) 通过对实验现象的观察、分析, 研究物理现象, 验证物理规律, 对物理量进行测量, 掌握常用基本物理实验仪器的原理和性能, 学会正确使用、调节和读数, 了解一些物理量的测量方法.

(2) 培养与提高学生的科学实验能力, 其中包括: ①自行阅读实验教材或资料, 做好实验前的准备; ②借助教材或仪器说明书正确使用常用仪器; ③运用物理学理论对实验现象进行初步分析和判断; ④学会对实验进行误差分析和不确定度评定的基本方法, 正确记录和处理实验数据, 绘制曲线, 说明实验结果, 撰写合格的实验报告; ⑤完成简单的设计性实验, 为以后独立设计实验方案和解决新的实验课题创造条件; ⑥提高进行科学实验工作的综合能力, 包括实际动手能力、分析判断能力、独立思考能力、革新创造能力、归纳总结能力、口头表达能力等.

(3) 培养与提高学生的科学实验素养, 使学生具有理论联系实际和实事求是的科学作风, 严肃认真的工作态度, 主动研究的探索精神和遵守纪律、爱护公共财物的优良品德.

2. 物理实验课的基本程序

(1) 预习. 实验前必须认真阅读教材及有关参考资料, 着重于理解实验原理, 明确实验目的、测量方法和主要实验步骤, 并在上课前写好预习报告. 预习报告的内容主要包括: 写出实验名称; 回答预习思考题; 列出有关测量的计算式或将要被验证的定律; 画出电路图、光路图或设

备示意图;设计出初步的数据记录表格。

(2) 实验操作. 首先应根据教材或仪器说明书熟悉仪器, 在老师指导下了解仪器的正确使用方法, 对照仪器, 明确要测哪些物理量, 弄清先测什么、再测什么、最后测什么、如何测等, 做到心中有数, 绝对不可盲目动手。

实验中, 应集中精力仔细观察, 认真思考观察到的物理现象; 正确读数, 及时将采集的实验数据和观察到的现象如实地记录下来, 尤其是对所谓反常现象更要仔细观察分析, 不要单纯追求“顺利”, 要养成对观察到的现象和所测得的数据随时进行分析、判断的习惯; 对实验过程中出现的故障要学会即时排除。

实验结束后, 要将测得的数据交给老师检查, 检查合格并整理好仪器后, 方可离开实验室。

(3) 撰写实验报告. 写实验报告是为了培养、训练学生以书面形式总结工作或报告科研成果的能力。一份完整的实验报告一般包括以下内容: ①实验名称和日期; ②实验目的; ③实验原理(应用自己的语言简要叙述, 切忌照抄教材, 应画出实验的原理图、电路图、光路图等, 并列测量和计算所依据的公式); ④实验仪器及装置(仪器应标明规格、型号); ⑤主要实验步骤(对实验中关键性的调整方法和测量技巧应着重写出); ⑥数据表格、实验曲线; ⑦数据处理及结果分析(要求写出数据处理的主要过程, 进行误差分析和不确定度评定, 并给出最后结果); ⑧问题讨论(包括对实验现象的分析、实验中存在的问题、改进实验的建议、回答讨论题等)。

实验报告要求努力做到书写清晰, 字迹端正, 数据记录整洁, 图表合格, 文理通顺, 内容简明扼要。实验报告一律用物理实验报告纸书写。

第 1 章 物理实验的基本知识

所谓实验,就是在理论指导下,实验者选用一些仪器设备,在一定的条件下,人为地控制或模拟自然现象,并通过对某些物理量的观察与测量去探索客观规律的过程.由于实验方法的不完善,仪器都有一定的精确度,测量条件并非总能满足理论上假定的或测量仪器所规定的的使用条件,因此任何测量都不可能是绝对准确的.进行一项实验,除了要懂得如何正确获取应有的数据外,如何正确处理实验中得到的数据,如何正确表达测量结果,并给出对测量结果的可靠性评价(合理估计出误差范围或不确定度),也是实验工作者必须掌握的基本知识.

本章就是针对上述问题,通过实例,系统地介绍物理实验的基本知识.主要包括:测量与误差、误差与不确定度、不确定度的评定、测量结果的质量评价、有效数字及其运算、数据处理的基本方法、物理实验的基本测量方法等.

1.1 测量与误差

所谓测量,就是将待测量与选作法定标准的同类计量单位进行比较,从而确定待测量是标准单位的若干倍,这一过程称为测量.显然,测量值(结果)应包含数值和单位两部分,两者缺一不可.我国采用的单位是以 SI 制为基础的法定计量单位.

测量得到的数值称为测量值,用“ x ”表示.

1.1.1 测量的分类

1. 直接测量和间接测量

用测量仪器能直接获得测量结果的测量称为直接测量,相应的物理量称为直接测量量.直接测量是实验中最基本最常见的一种测量方式,如用米尺量物体的长度、用天平称物体的质量等.

实际上很多物理量是不能用仪器直接测量的,往往是通过若干可直接测量的物理量经过一定的函数关系运算后获得的,这种测量称为间接测量,相应的物理量称为间接测量量.

例如,测圆柱体的密度时,可以用游标卡尺或螺旋测微计量出它的高度 h 及直径 d ,用天平称出它的质量 m ,则圆柱体的密度为

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{4m}{\pi d^2 h}$$

需要指出的是,由于选用的测量方法不同,同一物理量可以是直接测量量,也可以是间接测量量.例如,采用上述方法测出的圆柱体体积为间接测量量,若改用量筒排水法测量,它又成为直接测量量了.

2. 等精度测量与不等精度测量

如对某一物理量进行多次重复测量,而且每次的条件都相同(同一观察者、同一组仪器、同一种实验方法、同一实验环境等),测得一组数据($x_1, x_2, \dots, x_n$),尽管各次测得的结果有所

不同,没有充足的理由可以判断某次测量比另一次更精确,这样只能认为每次测量的精确程度是相同的.于是将这种同样精确程度的测量称为等精度测量;这样的一组数据称为测量列.在诸测量条件中,只要有一个发生了变化,这时所进行的测量就成为不等精度测量.

严格说来,在物理实验中,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测量结果影响不大,甚至可以忽略时,仍可视这种测量为等精度测量.在本章中,除了特别指明外,所讨论的测量均为等精度测量.

1.1.2 误差

1. 真值

在一定的客观条件下,被测量的物理量具有一个客观的真实数值,称为该物理量的“真值”,用“ X ”表示.测量的目的就是力图得到这些真值.由于在具体测量时,各种条件的限制(如仪器、测量者、客观条件、实验方法等),测量不可能绝对准确,实际上,真值永远得不到.测量只可能尽量得到真值的近似值或称近真值,有时也称最佳值.

2. 误差

测量值与真值之差,称为误差,可表示为

$$\Delta x_i = x_i - X \quad (1.1.1)$$

式中, Δx_i 为某次误差, x_i 为某次测量值,显然 Δx_i 可正也可负.

既然真值永远得不到,按照误差定义,误差也就无法精确求出.为了解决这个问题,实际测量时,有时可以用下列各类值与测量值之差来估算误差.

(1) 理论值.例如,三角形内角之和为 180° 等.

(2) 公认值.世界各国公认的一些常数,如在标准大气压下, 0°C 时水的密度为 999.84kg/m^3 等.

(3) 计量学约定真值.例如,国际及国家计量部门规定的长度、时间、质量等标准.

(4) 相对真值.用准确度高一个等级的仪器校正的测定值.

3. 误差的分类

为了得到尽可能接近真值的测量结果,测量者必须分析和研究误差的来源和性质,有针对性地采取适当措施,尽可能地减小误差.

误差按其特征和表现形式可以分为系统误差、偶然误差两大类.

1) 系统误差

系统误差的特点是,在同一条件下(实验方法、仪器、环境和观察者等不变),每次测量同一物理量时,误差的大小和符号始终保持恒定或按一定的规律变化.

系统误差的来源有以下几个方面:

(1) 仪器的固有缺陷.如刻度不准、零点没调准、仪器水平或铅直未调整好、砝码本身未经校准等.

(2) 实验方法的不完善.实验所依据的原理不尽完善,公式的近似性或实验条件达不到理论公式所要求的条件而引起的误差,如称重时未考虑空气浮力,忽略摩擦、接触电阻等.

(3) 环境条件的变化.外界环境(如温度、湿度、电磁场等)发生变化或不满足测量仪器规定的条件所造成的误差,如标准电池是以 20°C 时的电动势作为标准值的,若在 5°C 时使

用而不加修正就引入了系统误差。

(4) 测量者自身的某些因素。由测量者感觉器官的不完善或某种不良习惯所引起的误差。例如,有的人习惯侧坐斜视读数而造成读数偏大或偏小,几个人同时用秒表计时会因每个人的反应快慢不同而结果不一致等。

系统误差的数值和符号(正、负)一般来说是定值或按某种规律变化,因此系统误差是可以被发现、减小、消除或修正的,但不能通过多次测量来减小或消除。对操作者来说,系统误差的规律及其产生原因可以知道,也可能不知道。已被确切掌握了其大小和符号的系统误差,称为可定系统误差;对大小和符号不能确切掌握的系统误差称为未定系统误差。前者一般可以在测量过程中采取措施予以消除或在测量结果中进行修正;而后者一般难以作出修正,只能估计出它的极限范围。

2) 随机误差(偶然误差)

在一定条件下,每次测量同一物理量时,测量值仍会出现一些似乎毫无规律的起伏,这种大小和符号随机变化的误差,称为随机误差又称偶然误差。

随机误差可能的来源是:人们的感官(如听觉、视觉、触觉等)的分辨能力不尽相同,表现为每个人的估读能力不一致;外界的干扰(如温度不均匀、振动、气流、噪声等)既不能消除又无法精确估量;所有影响测量的次要因素不尽全知等。这种误差是无法控制的。但在同一条件对同一物理量进行多次测量时,随机误差的分布显示出一定的统计规律,大多数情况下遵守正态分布,如图 1.1.1 所示。横坐标表示误差 $\Delta = x - X$,纵坐标表示与误差出现的概率有关的概率密度函数 $f(\Delta)$ 。应用概率论的数学方法可导出

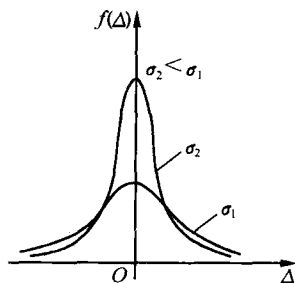


图 1.1.1

$$f(\Delta) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\Delta^2}{2\sigma^2}} \quad (1.1.2)$$

式(1.1.2)中的特征量 σ 为

$$\sigma = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{\sum \Delta_i^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum (x_i - X)^2}{n}} \quad (1.1.3)$$

σ 称为标准误差。

服从正态分布的随机误差具有下面一些特性:

- (1) 单峰性。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。
- (2) 对称性。绝对值相等的正负误差出现的概率相同。
- (3) 有界性。在一定的测量条件下,误差的绝对值不超过一定限度。
- (4) 抵偿性。随机误差的算术平均值随着测量次数的增加而越来越趋向于零,即

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_i = 0 \quad (1.1.4)$$

综上所述,系统误差的特点是确定性,随机误差的特点是随机性。它们是两种不同性质的误差,在一定的实验条件下,它们有自己的内涵和界限,但当条件改变时,彼此又可能相互转化。例如,系统误差与随机误差的区别有时与空间和时间的因素有关。测量时环境温度在短时间内可保持恒定或缓慢变化,但在长时间内却是在某个平均值附近作无规律的变化,因此由于温度变化造成的误差在短时间内可以看成是系统误差,而在长时间内则宜作随机误差处

理.随着技术的发展和设备的改进,某些产生随机误差的因素能够得到控制,这些随机误差就可以确定为系统误差并得到改善或修正;而有些规律复杂的未定系统误差也可以通过改变测量状态使其随机化,这种系统误差又可以当作随机误差来处理.

还有一种过失误差,是由于测量系统偶然偏离所规定的测量条件和方法或记录、计算数据时出现失误而产生的,实际上是一种测量错误.错误不同于误差,它是不允许存在的,是完全可以事先发现和避免的.

需要指出的是,不应当把有某种异常的观察值都作为过失误差来处理,因为它可能是数据中固有的随机性的极端情况.判断一个观察值是否为异常值,通常应根据技术上或物理上的理由做出决定.1.5节将给出一个简单的判定方法.

如上所述,误差自始至终存在于一切科学测量的全过程之中,因此作为一个科学实验的结果,不仅应当提供被测对象的量值大小和单位,还应当对测量数值本身的可靠程度作出判断(即给出误差范围或不确定度).一个不知道可靠程度的测量值是没有多大意义的.因此,一个正确的实验结果应该包括数值、单位和误差(或不确定度),三者缺一不可.下面简单介绍系统误差的发现和消除,以及如何估算随机误差.

1.1.3 系统误差的发现和消除

分析和消除系统误差是一个比较复杂的问题,任何一个实验者都应在实验前、实验中和实验后对可能产生的或已经产生的系统误差加以分析和研究.但由于系统误差的分析很难脱离具体的实验内容,在此仅作一简单介绍,在以后的仪器误差及不确定度的评定中也将涉及.

1. 系统误差的发现

如前所述,系统误差的数值和符号(正、负)一般来说是定值或按某种规律变化,因此系统误差不能通过简单地重复测量来发现或消除.下面介绍几种常用的揭示系统误差的方法.

(1) 理论分析.测量过程中因理论公式的近似性等原因所造成的系统误差常常可以从理论上作出判断并估计其量值,如伏安法测电阻时,电流表内接时将产生正误差,外接时将产生负误差.

(2) 将实验结果与公认值或相对真值比较.对已经调好的仪器或系统,可通过测量已有公认值或相对真值的物理量来发现该仪器或系统是否存在重大的系统误差,如在光学实验中,常常通过测量波长已知的钠双线(589.0nm 和 589.6nm)或氦氖激光器发出的红光(632.8nm)等来检查测量系统的准确度.

(3) 进行不同测量方法的比较测量.比较用不同的测量方法或设备去测量同一物理量所得出的结果也可以判断是否存在系统误差,如用两种不同型号的天平来测量某物体的质量、用两只不同的电流表先后测量某电路的电流值等.

(4) 进行不同实验条件的比较测量.改变产生某项系统误差的具体条件进行比较测量,常常可以发现有关的系统误差,如用电势差计来测量某电池的电动势时,可以通过改变辅助电源的电压来突出电阻丝不均匀所带来的影响.

2. 系统误差的消除或修正

发现系统误差之后需要对测量的各个环节进行全面的分析,进一步验证并找出其产生的具体原因,才有可能作出针对性的处理.

(1) 通过理论公式引入修正值. 例如, 伏安法测电阻时, 电流表内接或外接必须分别考虑电流表和电压表的内阻等.

(2) 消除造成某项系统误差的因素. 例如, 在弹性模量和简谐运动的研究等实验中, 钢丝和弹簧的自然状态几乎均非完全伸直, 常常采用加起始载荷的方法来消除这类“起始”误差.

(3) 改进测量方法. 例如, 质量称衡时, 用复称法或交换法来消除天平的不等臂误差; 用分光计测量三棱镜的顶角等实验中, 采用对径读数法来消除度盘的偏心差; 光栅实验中, 采用对 ± 1 级衍射角取平均的办法来改善光束偏离垂直入射造成的测角误差; 在电表校准实验中, 用高级别的电表来对低级别的电表示值做出修正, 以改善其可定系统误差.

(4) 实验曲线的内插、外推和补偿. 例如, 采用多管法测定液体的黏度系数实验时, 测出同一钢球在不同内径的管子中经过相同距离时所用的时间, 再作出 $\frac{d}{D}-t$ 曲线, 然后外推到管子内径 $D \rightarrow \infty$ 时的极限时间值等.

(5) 系统误差的随机化处理. 改变测量条件时, 系统误差也将时大时小, 时正时负, 平均的结果可实现系统误差的部分抵偿. 因此对有些系统误差, 可在均匀改变测量状态下作多次测量, 并取测量的平均值来削弱. 例如, 使用测微目镜测间距, 由于测微丝杠的螺距不可能做得绝对均匀, 测量中有意利用丝杠的不同部位进行测量, 螺距不均匀所造成的系统误差在一定程度上被随机化了, 用平均值来表达测量结果就较为准确; 在圆柱或钢丝的不同截面、不同方位进行直径测量, 可以部分抵偿因材质和加工等原因造成试样直径不均匀或形状不规则所带来的微小误差.

1.1.4 随机误差的统计处理

对某一物理量 x 进行多次直接测量后, 得到的是一组含有误差的数据, 如何从这组数据中获得待测量及其误差的最佳估计值呢?

从前面的讨论中可知, 随机误差具有抵偿性, 即随机误差的算术平均值随着测量次数的增加而逐渐趋向零(式(1.1.4)). 为此可以用增加测量次数的办法来减小随机误差, 当测量次数 $n \rightarrow \infty$ 或足够多时, 测量列的随机误差趋于零, 此时各次测量结果的算术平均值就趋近于真值.

1. 近真值

如果在相同条件下对某物理量 x 进行了 n 次(等精度)重复测量, 测量值分别为 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$, 其算术平均值为

$$\bar{x} = \frac{1}{n}(x_1 + x_2 + \dots + x_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1.1.5)$$

根据误差理论, 在一组 n 次测量的数据中算术平均值最接近于真值, 因此定义 $\bar{x}$ 为测量结果的最佳值或近真值. 测量值与最佳值的差称为偏差. 由于真值永远得不到, 只能得到近真值, 进行误差估算, 严格说来应是偏差估算(两者在测量次数 $n \rightarrow \infty$ 或足够多时一致). 在以后的讨论中, 本书不再严格区分误差和偏差, 而笼统地称为误差.

2. 误差估算

物理实验中, 多次测量的误差可用算术平均绝对误差或标准误差(方均根误差)来表示, 另外误差估算时还会用到极限误差.

1) 算术平均绝对误差

n 次测量(等精度)中, 每次测量值 x_i 与 $\bar{x}$ 的偏差为 $\delta_i = x_i - \bar{x}$, 定义算术平均绝对误差为

$$\delta = \frac{1}{n}(|\delta_1| + |\delta_2| + \cdots + |\delta_n|) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\delta_i| \quad (1.1.6)$$

根据误差理论可算出,误差出现在 $(-\delta, +\delta)$ 区间内的概率分布函数值为 57.5%,可见算术平均绝对误差的物理意义是:任作一次测量,测量值的误差在 $-\delta \sim +\delta$ 的可能性为 57.5%.

2) 标准误差(方均根误差)

前面已约定,每次测量的随机误差的分布遵守正态分布,其概率密度函数 $f(\Delta)$ 的特征量 σ 即为标准误差(式(1.1.3)),式中 X 为真值.用误差的概率密度函数可以得出,误差出现在 $(-\sigma, +\sigma)$ 区间内的概率为

$$P(-\sigma < \Delta < +\sigma) = \int_{-\sigma}^{\sigma} f(\Delta) d\Delta = \int_{-\sigma}^{\sigma} \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\Delta^2}{2\sigma^2}} d\Delta$$

查拉普拉斯积分表可得

$$P(-\sigma < \Delta < +\sigma) = 68.3\%$$

可见,标准误差 σ 所表示的意义是:任作一次测量,测量误差落在 $-\sigma \sim +\sigma$ 的可能性为 68.3%.真值实际上得不到,但当测量次数 $n \rightarrow \infty$ 或足够多时, $\bar{x} \rightarrow X$, 此时标准误差 σ_x 的计算式应为

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum \Delta_i^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (n \rightarrow \infty \text{ 或足够多}) \quad (1.1.7)$$

当测量次数 n 有限时, $\bar{x} \neq X$, 我们只能得到偏差,此时只能根据偏差来估算标准误差,由误差理论可以证明,此时可以将

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum \delta_i^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (n \text{ 有限时}) \quad (1.1.8)^\text{①}$$

作为 σ_x 的最佳估计. S_x 称为测量列的标准误差,式(1.1.8)即为贝塞尔公式.不难发现,当 $n > 10$ 时,式(1.1.7)与式(1.1.8)计算出的结果已很接近.实验教学中,测量次数 n 都是有限

① 关于式(1.1.8)的导出.

如果在相同条件下对某物理量 x 进行了 n 次(等精度)重复测量,测量值分别为 $x_1, x_2, x_3, \cdots, x_n$, 其算术平均值为 $\bar{x} = \frac{1}{n}(x_1 + x_2 + \cdots + x_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$, 而真值为 X , 则按定义各次测量的误差和偏差分别为: $\Delta_i = x_i - X$, $\delta_i = x_i - \bar{x}$, 对 Δ_i 求和(注意到 $\sum x_i = n\bar{x}$)得

$$\sum \Delta_i = \sum x_i - nX = n\bar{x} - nX, \quad \bar{x} = X + \frac{\sum \Delta_i}{n}$$

相应的偏差可表示为

$$\delta_i = x_i - X - \frac{\sum \Delta_i}{n} = \Delta_i - \frac{\sum \Delta_i}{n},$$

对上式两边平方再求和得

$$\sum \delta_i^2 = \sum \Delta_i^2 - 2 \frac{(\sum \Delta_i)^2}{n} + n \left(\frac{\sum \Delta_i}{n} \right)^2$$

即

$$\sum \delta_i^2 = \sum \Delta_i^2 - \frac{(\sum \Delta_i)^2}{n}$$

对上式右边第二项展开可得

$$\sum \delta_i^2 = \sum \Delta_i^2 - \frac{\sum \Delta_i^2}{n} - 2 \frac{\sum_{i < j} \Delta_i \Delta_j}{n}$$

由于误差有正有负,当 $n \rightarrow \infty$ 时,上式右侧第三项趋于零,于是有

的,一般 $5 \leq n \leq 10$,故常用式(1.1.8)来估算测量值的随机误差,并近似认为测量次数不是很少(10次左右)时,测量列中任一测量值的误差落在区间 $(-S_x, +S_x)$ 内的概率仍在 68% 左右。

另外,查拉普拉斯积分表可得 $P(-2\sigma < \Delta < +2\sigma) = 95.4\%$, $P(-3\sigma < \Delta < +3\sigma) = 99.7\%$,它表明任作一次测量时,测量值的误差落在 $-3\sigma \sim +3\sigma$ 的概率为 99.7%,即在 1000 次测量中只有 3 次测量其误差绝对值会超出 3σ ,而一般测量中次数很少超过几十次,因此可以认为测量值误差超出 $\pm 3\sigma$ 范围的概率是极小的,故称 3σ 为极限误差。

3) 算术平均值的标准误差

如上所述,对物理量 x 进行了 n 次等精度测量后,通常取其平均值 $\bar{x}$ 作为最佳值,显然 $\bar{x}$ 比任何一次测量值 x_i 更可靠,但 $\bar{x}$ 毕竟不是真值,其可靠性如何呢?

根据误差理论,算术平均值 $\bar{x}$ 的标准误差 $S_{\bar{x}}$ 可写成

$$S_{\bar{x}} = \frac{S_x}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (1.1.9)^{\text{①}}$$

上式表明,算术平均值的标准误差是测量列的标准误差的 $1/\sqrt{n}$ 倍。可以证明,算术平均值 $\bar{x}$ 的误差落在区间 $(-S_{\bar{x}}, +S_{\bar{x}})$ 内的概率为 68.3%。

标准误差 σ_x 是一个描述测量结果的离散程度的统计参量, S_x 是作为 σ_x 的估计值出现的,它提供的是单次测量的标准误差信息,尽管计算 S_x 时用到了平均值和多次测量的结果。

如果直接测量中系统误差已减至最小,被测量是稳定的,并且对它作了多次测量,那么就应该用算术平均值 $\bar{x}$ 作为测量值的最佳估计,用算术平均值的标准误差 $S_{\bar{x}}$ 作为标准误差的最佳估计。

必须指出的是, S_x 和 $S_{\bar{x}}$ 是作为 σ_x 和 $\sigma_{\bar{x}}$ 的估计值出现的,它们都不是原来意义上的误差,而属于不确定度的范畴。另外,算术平均误差 δ 、测量列的标准误差 S_x 和算术平均值的标准

$$\sum \delta_i^2 = \sum \Delta_i^2 - \frac{\sum \Delta_i^2}{n} = \frac{n-1}{n} \sum \Delta_i^2$$

即

$$\frac{\sum \delta_i^2}{n-1} = \frac{\sum \Delta_i^2}{n} = \sigma^2$$

用偏差计算测量列的标准误差的公式为

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

上式即为贝塞尔公式。必须指出的是,以上讨论中假定了 $n \rightarrow \infty$,而实际测量次数 n 是有限的,故 S_x 只是对 σ_x 的一种估计。当测量次数较少时(如 $n < 5$),随机误差不再遵守正态分布,而符合 t 分布。有关进一步的探讨,请参阅有关误差理论的书籍。

① 关于式(1.1.9)的证明。

如果在相同条件下对某物理量 x 进行了 n 次(等精度)重复测量,测量值分别为 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$,其算术平均值为

$$\bar{x} = \frac{1}{n} (x_1 + x_2 + \dots + x_n)$$

由标准误差的传递公式(1.4.2节)有

$$S_{\bar{x}} = \sqrt{\sum \left(\frac{1}{n}\right)^2 S_i^2}$$

对于多次等精度测量, $S_1 = S_2 = \dots = S_x$,则有

$$S_{\bar{x}} = \sqrt{\sum \left(\frac{1}{n}\right)^2 S_x^2} = \frac{S_x}{\sqrt{n}}$$

准误差 S_r 都与测量值有相同的单位,都没有考虑待测量的大小,是以误差的绝对值来表示测定值的误差,故都属于绝对误差.但由于算术平均误差 δ 反映的是每次测量误差绝对值的平均值,显然夸大了误差,且不能反映随机误差的统计特性,一般仅在极粗略的误差估算时才用到,本书约定绝对误差一律采用标准误差来表征.

以上的讨论是针对随机误差而言的,对未定系统误差,如果通过改变测量条件使之呈现某种随机变化的特征,式(1.1.8)和式(1.1.9)仍然有效.

1.1.5 仪器误差

任何测量都需要借助一定的仪器或装置进行,任何仪器在制造或装配过程中都难免有一些缺陷,如轴承摩擦、游丝不匀、分度不匀、检测标准本身的误差等,即使在正确使用情况下,这种缺陷也会带来误差.仪器误差或允许误差限就是在正确使用仪器的条件下,测量所得结果和被测量的真值之间可能产生的最大误差,它包含了在规定条件下可定系统误差、未定系统误差和随机误差的总效果.例如,数字仪表是通过对被测信号进行适当放大(或衰减)后作量化计数,给出数字显示的,其中由于放大(或衰减)系数和量化单位不准造成的误差属于可定系统误差,来自测量过程中电子系统的漂移而产生的误差属于未定系统误差,而量化过程的尾数截断造成的误差又具有随机误差的性质.

对照通用的国际标准,按允许出现的误差的大小,国家计量局将仪器分级称为准确度级别.使用时根据仪器的量程和准确度级别,有些只根据级别就可计算出该仪器的仪器误差.结合物理实验的特点,下面作一简单的介绍.

1. 长度测量类

物理实验中最基本的长度测量工具是米尺、游标卡尺和螺旋测微计(又称千分尺).在物理实验中长度测量工具的仪器误差按下列办法确定:仪器说明书中已规定的取其给定的数值;无仪器说明书或说明书中未明确规定的,查有关标准和规定,如游标卡尺、螺旋测微计的仪器误差即为示值误差,本书摘录了其中的一部分,见表1.1.1~表1.1.3;既没有仪器说明书,又不能查表得出的,通常约定可估读仪器的仪器误差取其最小分度值的一半.

表 1.1.1 钢直尺和钢卷尺的允许误差

钢直尺		钢卷尺	
尺寸范围/mm	允许误差/mm	准确度等级	示值允许误差/mm
>1~300	± 0.10	I 级	$\pm (0.1 + 0.2L)$
>300~500	± 0.15	II 级	$\pm (0.3 + 0.2L)$
>500~1000	± 0.20		
>1000~1500	± 0.27		
>1500~2000	± 0.35		

注:式中 L 是以米为单位的长度,当长度不是米的整数倍时,取最接近的较大的整“米”数.

表 1.1.2 游标卡尺的示值误差

测量长度/mm	示值误差/mm		
	分度值 0.02mm	分度值 0.05mm	分度值 0.10mm
0~150	± 0.02	± 0.05	± 0.10
150~200	± 0.03	± 0.05	
200~300	± 0.04	± 0.08	
300~500	± 0.05	± 0.08	
500~1000	± 0.07	± 0.10	± 0.15