

大学物理实验

主 编 陈 聪

副主编 李定国 刘照世 秦国斌



國防工業出版社

National Defense Industry Press

04-33/231

2008

大学物理实验

主编 陈 聪

副主编 李定国 刘照世 秦国斌

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书是根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 2005 年最新颁布的《非物理类理工科大学物理实验课程教学基本要求》和总参军训和兵总部最新制定的《军队院校本科大学物理实验课程教学基本要求》的精神编写的。

本书打破以往按力、热、光、电及近代物理实验分类的编排结构,分为 7 章,系统地介绍了实验误差理论、数据处理、实验方法等相关基础知识,分层次精选了技术基础实验 5 项、基本实验和综合实验共 36 项。注意了体系的独立性和完整性,在保证基本物理实验要求的前提下,强化了数字化测量技术和计算机技术在物理实验教学中的应用,结合工程技术和军事人才培养需要,适当引入了当代科学研究与工程技术中广泛应用的光电、传感、激光和信号检测等现代物理技术。在必做实验内容之外还提供一定量的选做实验内容,旨在拓宽学生的知识面,加深对实验内容的理解、掌握和应用。

本书可以作为非物理类理工科学校各专业“大学物理实验”课程的教材,也可以作为相关专业实验课程的教学参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

大学物理实验 / 陈聪主编. —北京: 国防工业出版社,
2008.4 重印
ISBN 978-7-118-05405-7

I. 大... II. 陈... III. 物理学—实验—高等学校—教材
IV. 04-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 163235 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100044)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 23 字数 534 千字

2008 年 4 月第 2 次印刷 印数 4001—6000 册 定价 38.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店: (010)68428422
发行传真: (010)68411535

发行邮购: (010)68414474
发行业务: (010)68472764

前 言

“大学物理实验”是一门独立设置的必修课程,具有独立、完整的课程体系。本书是根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2005年制定的《非物理类理工科大学物理实验课程教学基本要求》和总参军训和兵总部最新制定的《军队院校本科大学物理实验课程教学基本要求》的精神编写的,旨在通过物理实验课程的基本训练,让理工科学生掌握实验的基本理论、基本方法和基本技能,培养理工科学生在现代测试技术条件下进行科学实验的综合素质和能力。

本书在编写过程中力争贯彻新要求的精神,体现素质教育思想,突出技能训练,注重课程的独立性和完整性。在保留基本物理实验内容的同时,增添了一些应用性、综合性的新实验,以及部分近代物理实验,加深了物理实验研究的内涵。全书共分为7章,第1章介绍了物理实验的重要性以及如何做好物理实验。第2章全面系统地介绍了实验数据处理和测量误差、不确定度的基础知识。第3章主要介绍常用物理量的测量,让学生较为系统地掌握基本物理量测量的手段和方法。第4章重点指导学生了解基本实验仪器的正确使用和维护。第5章~第7章为实验部分,包括41个实验项目,分为技术基础实验、基本实验和综合实验3个层次,打破了以前封闭的实验体系,建立了实验课程独立发展的新体系,也使学生在做实验时由易到难,更容易掌握。

本书特别地把实验内容分为必做和选做两个部分,将实验内容分层次,使学生在达到基本要求以后还能够继续深入、拓展,实现因材施教。每个实验后面精选了一定量的思考题,启发学生分析讨论。另外还采用附录的方式,将相关的知识进行链接,拓宽学生的知识面,加深对实验内容的理解、掌握和应用。有关测量误差分析和数据处理的要求,贯穿于本书的始终。

本书由陈聪担任主编,李定国、刘照世、秦国斌担任副主编,杨绍华、郑彦棠、殷莎、王迅雁、刘华波、王建中、樊洋、蒋治国、许巍参加了编写。其中,陈聪编写了第1章、技术基础实验3、技术基础实验5、实验8、实验12、实验23、实验24、实验25、实验26、实验28、实验32、实验33、实验36,并负责全书的统稿;李定国编写了技术基础实验2、实验4、实验9、实验17、实验18;刘照世编写了第2章、第3章、第4章、技术基础实验4、实验16、实验19;秦国斌编写了技术基础实验1、实验7、实验11、实验30、实验35;杨绍华编写了实验6、实验10、实验20;郑彦棠编写了实验13、实验15、实验34;殷莎编写了实验1、实验2、实验14;王迅雁编写了实验3、实验5;刘华波编写了实验27;王建中编写了实验21;樊洋编写了实验31;蒋治国编写了实验29;许巍编写了实验22。由上述同志及饶伟同志等进行校对。

本书凝聚了海军工程大学物理实验室几代人的集体智慧,融入了物理实验室全体教职员多年来教学改革的实践经验,参阅了许多兄弟院校的相关教材和仪器开发技术人员提供的技术资料,吸收了广大实验教学工作者教学改革的经验 and 做法,在此表示衷心感谢!同时本书在编写过程中得到了海军工程大学训练部教保处、装备处的大力支持,得到了理学院及应用物理系领导和老师的关心和帮助,在此也一并表示感谢!

由于编者水平有限,实践经验不足,书中难免存在疏漏,恳请读者批评指正,提出宝贵意见和建议。

编 者
2007 年 9 月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 “大学物理实验”课的教学目标	2
1.2 “大学物理实验”课的基本环节	3
1.3 实验规则	4
第2章 实验数据的处理	6
2.1 测量与误差	6
2.1.1 测量	6
2.1.2 测量中的误差	6
2.1.3 误差产生的原因	7
2.1.4 误差的分类	8
2.1.5 测量的精确度	9
2.2 测量的不确定度评定	9
2.2.1 不确定度评定的意义	9
2.2.2 不确定度的一些基本概念和分类	10
2.2.3 标准不确定度的评定	10
2.2.4 测量结果的不确定度表示	12
2.3 有效数字及其运算规律	12
2.3.1 有效数字的基本概念	12
2.3.2 有效数字的运算	14
2.4 数据处理的基本方法	17
2.4.1 列表法	17
2.4.2 作图法	18
2.4.3 逐差法	19
2.4.4 最小二乘法线性拟合	20
第3章 物理量的基本测量方法	24
3.1 比较法	24
3.2 放大法	24
3.3 补偿法	25

3.4	模拟法	25
3.5	光学方法	26
3.6	转换测量法	26
3.7	共振法、驻波法和行波法	28
第4章	基本测量仪器的使用和维护	29
4.1	力学基本仪器	29
4.1.1	游标卡尺	29
4.1.2	千分尺(螺旋测微器)	31
4.1.3	质量称衡仪器——物理天平	32
4.2	电磁学基本仪器	34
4.2.1	做电磁学实验应注意的几个问题	34
4.2.2	电磁学实验基本仪器	34
4.3	光学仪器的使用和维护规则	38
第5章	技术基础实验	40
技术基础实验1	固体密度的测量	41
技术基础实验2	气垫导轨上的一维运动	43
技术基础实验3	热电偶的定标和测温	52
技术基础实验4	薄透镜焦距的测量	55
技术基础实验5	电阻的伏安特性测量	60
第6章	基本实验	64
实验1	杨氏弹性模量的测量	65
实验2	转动惯量的测量	75
实验3	液体表面张力系数的测量	84
实验4	落球法测液体黏度	90
实验5	空气 γ 值的测量	95
实验6	模拟示波器的使用	99
实验7	用惠斯通电桥测电阻	113
实验8	补偿法测电动势	122
实验9	非平衡直流电桥的原理与应用	127
实验10	超声声速测量	136
实验11	分光计的调整和三棱镜折射率的测量	148
实验12	光的偏振	157
实验13	光的等厚干涉——牛顿环	165
实验14	单缝衍射	170

第7章 综合实验	175
实验 15 双光栅测微弱振动	176
实验 16 波尔共振	184
实验 17 材料热导率的测量	192
实验 18 温度传感器特性研究	201
实验 19 空气热机实验	209
实验 20 虚拟仪器的使用	217
实验 21 连续和瞬态信号的测量	225
实验 22 计算机数据采集实验	232
实验 23 电子和场	240
实验 24 霍尔元件特性研究	252
实验 25 电表改装与校准	261
实验 26 交流电路的综合特性研究	269
实验 27 虚拟示波法测绘铁磁材料的磁化曲线	285
实验 28 非线性电路的伏安特性及混沌	292
实验 29 密立根油滴实验	298
实验 30 磁阻效应	306
实验 31 弗兰克—赫兹实验	312
实验 32 光电效应和普朗克常数的测定	320
实验 33 亥姆霍兹线圈磁场分布研究	333
实验 34 迈克尔逊干涉仪的调整和使用	338
实验 35 光栅衍射法测光波长	345
实验 36 白光再现全息照相	349
附表 基本物理常量(2002 国际推荐值)	358
参考文献	360

第1章 绪 论

纵观物理学发展历史,可以清楚地看出,物理学的理论来源于实验,最终又必须由实验来验证,因此物理学是一门实验科学。离开了实验,物理理论就会成为“无源之水,无本之木”,不可能得到发展。

4个世纪以前,伟大的实验物理学家伽利略,用他出色的实验工作把古代对自然现象的观察和研究引上了当代物理学的科学道路,使物理学发生了革命性的变化。力学中的许多基本规律,如自由落体定律、惯性定律等,都是由伽利略通过实验发现和总结出来的。电磁学的研究,也是从库仑发明精巧的扭秤并用来测量电荷之间的相互作用力开始的……

经典物理学的基本定律几乎全部是实验结果的总结与推广,而物理规律的正确性又靠实验来证明。

近代物理的发展也起源于实验。从所谓的“两朵乌云”和“三大发现”开始,逐渐建立了量子理论和相对论。“物理学晴朗天空中出现的两朵乌云”是指当时经典物理学无法解释的两个实验结果,即黑体辐射实验和迈克耳逊—莫雷实验;“三大发现”是指在实验中发现X光、放射性和电子。

在19世纪以前,可以说没有纯粹的理论物理学家。所有物理学家,包括对物理理论的发展有重大贡献的牛顿、菲涅耳、麦克斯韦等,都亲自从事实验工作。牛顿曾说:“探求事物属性的准确方法是从实验中把它们推导出来。……考察我的理论的方法就在于考虑我所提出的实验是否确实证明了这个理论;或者提出新的实验去验证这个理论。”事实上,牛顿提出过许多理论,其中,万有引力定律被海王星的发现和哈雷彗星的准确观测等实验所证明,而他关于光的本性的学说却被杨氏双缝干涉实验和许多光的衍射实验所推翻。由于物理学的发展越来越深入、越来越复杂,而人的精力有限,才有了以理论研究为主和以实验研究为主的分工,出现了“理论物理学家”。然而,即使理论物理学家也绝对不能离开物理实验。爱因斯坦无疑是最著名的理论物理学家,而他获得诺贝尔奖是因为他正确解释了光电效应的实验结果;他当初提出的相对论是以“光速不变”的假设为基础的,正是在经过长期大量的实验后,相对论才成为一个被人们普遍接受的理论。

显然,在物理学的发展过程中,实验是决定性的因素。

实验不仅对物理学的发展起到了决定性的作用,同时也是把物理基础理论应用到其他学科的桥梁。当代科技的发展已使我们周围的世界发生了惊人的改变,而这些改变正是物理学知识在各行各业中应用的结果。

物理电子、电子工程、光信息科学与工程等学科显然都是以物理学为基础的;在材料科学中,各种材料的物性测试、许多新材料的发现(如高温超导材料等)和新材料制备方法的研究(如离子束注入、激光蒸发等),都离不开物理学的应用;在化学中,从光谱分析

到量子化学、从放射性测量到激光分离同位素,也无不是物理学的应用;在生物学的发展史中,离不开各类显微镜(光学显微镜、电子显微镜、X 射线显微镜、原子力显微镜)的贡献,近代生命科学更离不开物理学,DNA 的双螺旋结构就是美国遗传学家和英国物理学家共同建立并为 X 射线衍射实验所证实的,而对 DNA 的操纵、切割、重组也都需要实验物理学家的帮助;在医学中,从 X 射线透视、B 超诊断、CT 诊断、核磁共振诊断到各种理疗手段,包括放射性治疗、激光治疗、 γ 刀等都是物理学的应用。物理学正在渗透到各个学科领域,而这种渗透无不与实验密切相关。显然,只有真正掌握了物理实验的基本功,才能顺利地把物理学原理应用到其他学科而产生质的飞跃。

综上所述,要研究与发展物理学,把物理理论应用到各行各业的实践中去,都必须重视物理实验,做好物理实验。

“大学物理实验”课程是对学生进行科学实验基础训练的一门必修课程,是学生入学后受到系统的实验能力训练的先行课,是后续各工程技术课程实验的基础。

1.1 “大学物理实验”课的教学目标

“大学物理实验”课程的总体目标,是使学生通过对实验现象的深入观察、分析和对物理量的测量,巩固物理知识,获得基本实验技能,掌握建立合理的物理模型、定量研究物理量变化规律的方法,从而初步了解科学实验的基本方法与主要过程,培养和提高学生独立开展科学研究的素质和能力,使学生具有理论联系实际和实事求是的科学态度,严肃认真的工作作风,主动研究和勇于探索的创新精神。

通过大学物理实验课程教学,应使学生初步具有以下几方面的能力。

(1) 动手能力。通过阅读教材、仪器使用说明书、参考资料等,能够自行完成实验预习,正确理解实验内容,概括实验原理和实验方法的要点,正确调整和使用常用仪器,掌握基本物理量的测量方法和实验技能,得出正确的实验结果。通过实验技能的训练,能解决一般的实际问题。

(2) 观察分析和归纳总结能力。通过对实验现象的深入观察、分析和对物理量的测量,建立合理的物理模型,正确记录和处理实验数据,定量研究变化规律,并能分析实验结果,撰写严谨且有一定深度的实验报告。

(3) 综合设计能力。能够根据实验要求,运用物理理论和数学工具进行初步分析和判断,在考虑实验方法、合理选择实验仪器、确定实验测量条件和实验步骤等方面,具有一定能力。

(4) 创新能力。能够注意观察,发现新现象、新问题,并能突破传统思维定式,寻求变异,积极探索新的实验方案和进一步研究的方向,激发想象力、创造力,培养学生对未知领域主动探索的精神和开拓创新的意识。

同时,“大学物理实验”课程教学也有利于学生的素质培养。

(1) 实事求是精神。通过“大学物理实验”课程教学,培养学生追求真理的勇气、严谨求实的科学态度。

(2) 开拓创新意识。通过“大学物理实验”课程教学,引导学生树立科学的世界观,激发学生的求知热情、探索精神、创新欲望,以及敢于向旧观念挑战的精神。

(3) 坚忍不拔作风。通过“大学物理实验”课程教学,树立学生刻苦钻研的作风,养成面对困难和问题不逃避、坚忍不拔的精神。

1.2 “大学物理实验”课的基本环节

1. 预习

实验课中既要理解原理、熟悉和调整仪器、测量数据,还要了解各种误差的影响及解决方法,时间十分紧张。要保证实验顺利进行,就必须做好预习。如果到实验课开始后才去了解需要做什么和怎么做,不仅白白浪费了宝贵的实验时间,而且盲目操作还会损坏仪器设备,导致整个实验仓促被动。一味依赖教师的指导,或是机械地照着教材所规定的步骤操作,就难以完成教学要求。

预习应达到如下要求。

1) 预习实验教材及辅助资源

做实验前应认真阅读实验教材,掌握实验方法和原理,熟悉实验内容,明确实验的重点和难点,对需要设计的部分事先设计好实验方案,预习相关的仪器使用说明。

同时,可以借助实验中心网站上提供的多媒体课件、视频、虚拟实验等提高预习效果。

2) 写好预习报告

在弄清楚实验目的、原理、方法、数据测量要求的基础上,要求写出预习报告。预习报告是实验报告的前半部分,主要包括实验目的、实验原理以及仪器用具3部分。还应根据实验要求画好数据记录表格,计划好测量次数等,以便提高实验效率,达到比较好的实验教学效果。

实验课前必须全面预习,正式做实验之前教师必须检查预习情况。未经预习者,教师可以取消其进行该项实验的资格。

2. 实验操作

实验操作是实验的中心环节。必须充分利用课内的有限时间完成教学任务。

1) 简要讲解

实验开始时,教师通常要检查预习,并且会根据实验的具体情况进行简短介绍。主要涉及典型的原理、方法,实验难点、重点,注意事项等,学生应认真听讲,做好记录。

2) 安装和调整仪器

首先根据实验方法和内容,安装和调整仪器,使之满足正常的工作条件(接线、水平、垂直、工作电压、同轴、准直和光照等)。调整和使用仪器是实验技能训练的核心内容之一,要求耐心细致,符合操作规程。未调整好时不要忙于测量,否则得不到可靠的测量结果,反而浪费时间。

注意要严格按照仪器设备操作规程进行。对于有电子仪器的实验,必须经教师检查连线后,方可接通电源进行实验。若发现异常现象或仪器故障,应立即报告教师。

3) 测量数据记录

记录内容一般应包括简要调整步骤、典型的实验现象及测量数据。记录时不要忘记仪器规格(如型号、参数)的记录,并且要正确地按照有效数字记录测量数据,同时加上正确的物理量单位。

原始数据记录是教师批改实验报告的重要依据之一。不可用铅笔记实验数据,如果觉得测量数据错了,可在错误的数据上做标记,不要用墨水涂改。因为错误数据也是有内涵的履历,有时经过比较后可能竟是对的。当实验结果与温度、湿度和气压有关系时,要记下实验进行时的温度、气压、湿度等。

4) 分析误差

根据实验数据,在教师的指导下有重点地复测、检验,分析实验中出现的各种误差是实验完成优秀的标志之一。

5) 数据签字

实验数据必须经教师签字才有效,不符合要求的要重做,所以做实验时应抓紧时间,以便能及时纠正错误。原始数据必须附在实验报告后面一并上交批改。

6) 仪器整理复位

实验完成后应按要求将仪器整理复位(如保护挡、初始位置等),填写仪器使用登记簿,打扫卫生。

3. 实验报告

实验课后,要求根据原始实验数据写出实验报告。实验报告是实验项目完成的重要组成部分,要求字体工整、语言简练、阐述清楚、图表规范、结果正确、分析认真。准确严谨地完成报告是工程技术人员的基本素质。一份完整的实验报告应包括以下几个方面。

(1) 实验名称。

(2) 实验目的。

(3) 实验仪器。包括型号、规格、参数等。

(4) 实验原理。简要说明实验理论依据,必须包括计算公式、示意图或电路图、光路图等。设计性实验应写出自拟的实验方案。

(5) 实验内容。实验内容是实验报告的主体部分,应包括简要操作步骤、典型现象、各项测量内容及数据表格、数据处理(包括曲线)、误差计算等。数据表格要将原始数据进行整理后重新绘制,不能用后附的原始数据代替。

(6) 分析讨论。可以包括回答实验思考题、实验误差分析、实验过程中的异常现象及其可能的解释、实验改进建议以及心得体会等。这对于培养学生的分析能力很有好处,应该努力去做。尤其是实验误差分析,应利用实测数据说明和尽量运用数学工具定量分析。

其中,(1)~(4)应在预习报告中完成。

1.3 实验规则

(1) 学生必须有秩序地进入实验室,注意保持实验室环境的安静和整洁。

(2) 自觉地爱护实验室中的仪器设备,注意节约材料和水、电。

(3) 学生按预约结果使用规定仪器设备,未经同意,不准调换。如发现实验所用仪器设备有损坏或缺少时,应报告教师解决。

(4) 做实验前必须做好预习,经教师检查同意后方可参加实验。

(5) 使用仪器前,应先了解仪器的性能及使用方法,遵守操作规程及实验应注意的事

项。切实注意安全,实验中要敢于实践,胆大心细,要做到有的放矢、有条有理,反对粗枝大叶、盲目操作。

(6) 电学实验连接好电路之后,必须经教师检查,同意后方可接通电源进行实验。作光学实验时,严禁用手触摸元件光学表面。

(7) 实验中仪器发生故障时,应立即控制现场(或切断电源),停止操作,并报告教师检查排除故障。若损坏或遗失仪器时,则应根据实际情况,按规定酌情处理或赔偿。

(8) 实验完毕,应将记录数据交给教师检查,教师签字同意后,将仪器设备整理还原。认真填写仪器使用登记簿,经教师验收后方可离开实验室。

第2章 实验数据的处理

物理实验的目的是验证和探寻物理规律,而许多物理规律是用物理量之间的定量关系来表述的。在实验中获得的大量数据,必须经过正确有效的处理,才能得出合理的结论,从而把感性认识上升到理性认识,形成或验证物理规律。因此,数据处理是物理实验中一项极其重要的工作。本章将介绍一些数据处理的基本方法,包括误差分析、不确定度评定、有效数字和一些常用的数据处理方法。

2.1 测量与误差

2.1.1 测量

物理实验是以测量为基础的。所谓测量就是用一定的量具或仪器,通过一定的方法,直接或间接地把待测量与选定单位(量度单位)做比较,从而确定待测量是量度单位的多少倍。测量可分为两类:直接测量和间接测量。

(1) 直接测量。测量值可直接从测量仪器上读出。例如,用米尺测量长度、用天平称质量、用温度计测量温度等都是直接测量。直接测量是最基本的测量。

(2) 间接测量。指所要测量的物理量不能直接测出,而由若干个直接测量量经过一定的函数关系运算后获得待测量的方法。例如,测量固体密度时,要先测量出其体积和质量,再由公式来计算密度,所以密度的测量是间接测量。显然,间接测量是以直接测量为基础的。

2.1.2 测量中的误差

每一个物理量都是客观存在的,具有不以人的主观意志为转移的确定的数值,这个客观的真实数值称为该物理量的真值。真值是一个理想的概念,一般不可能准确知道。有关真值可以从以下几种情况得出。

(1) 理论值。如三角形3个内角的和为 180° 等。

(2) 公认值。世界公认的一些常数值,如普朗克常数等。

(3) 相对真值。用准确度高一个数量级的仪器校准的测定值。规定:校准仪器的误差至少应比测量仪器的误差小一个数量级。

(4) 测量的算术平均值。对一个不变的量进行 n 次测量后,其算术平均值可视为真值的最佳近似值。

必须指出:这样的计算方法是以等精度测量为前提,即每次重复测量的测量人员、工具、方法及环境必须保持不变。

进行测量的目的就是想要获得待测物理量的真值。测量值与真值之差被称为测量值的误差。

但是测量是依据一定的理论或方法,使用一定的仪器在一定的环境中,由一定的人进行的。由于测量方法、测量仪器、测量条件以及测量者的种种原因,实际测得的数值即测量值,只能是真值的近似值。因为任何测量仪器、测量方法、测量环境、测量者的观察力都不可能做到绝对严密,这就使测量不可避免地伴随有误差产生。因此分析测量中可能产生的各种误差,尽可能消除其影响,并对测量结果作出误差估计,是物理实验和许多科学实验中必不可少的工作。

测量所得的一切数据,无一例外都包含有一定量的误差,没有误差的测量结果是不存在的。测量的任务是:在一定的测量条件下,设法将测量值的误差减至最小,求出被测量的最近真值(最佳值),并估计最近真值的可靠程度(接近真值的程度)。在实际应用和工程技术上,根据不同的需要,将误差控制在一定限度之内,以满足工程技术上的要求,为此,必须研究误差的性质、来源,以便采取适当的措施,使测量获得好的结果。

2.1.3 误差产生的原因

误差产生的原因主要有以下3个方面。

1) 测量仪器及标准量的问题

在许多情况下,测量仪器上的刻度(或数字显示)就代表了标准值,如米尺、温度计等。但是这种标准量也并非真正标准,它与真正的标准也有差别。例如,米尺刻度不均匀或不够准确、在不同温度下米尺本身的长度有变化等。

2) 测量方法的问题

采用不同的测量方法可能会得到不同的测量结果,其影响是很明显的。例如,测量重力加速度,用测量单摆周期的方法和用自由落体的方法,测量结果就可能不一样。

3) 测量者的问题

测量者的问题,首先是“估读”的不同,待测量的值位于标准量的某两个刻度之间时,必须估读其数值,不同测量者的估读很可能会有不同。这与测量者的位置、熟练程度以及所处的环境状况等有关。其次是“判断”的不同,例如要测量光的干涉条纹的间距,如何确定干涉条纹的中心位置(条纹最亮处或者最暗处),就需要经验和判断能力。

以上3方面的问题都会导致产生误差。其中第一个问题和第三个问题产生的误差大小与测量仪器、测量者、测量条件和测量次数有关,可以用一定的方法进行评定,这种评定将在2.2节详述。

而测量方法的问题需要进行具体分析以尽量避免或者进行修正。例如,要测量一块正在加热的平面玻璃板的温度,如果用温度计或者热电偶,放在玻璃板任何一侧,都不可能测准,因为测温元件与待测元件的受热和散热情况都不相同,它们的温度不可能相同。而如果改用激光测温的方法,它利用待测元件本身作为测温元件,从玻璃表面间反射光的干涉条纹变化来确定温度变化,就可以避免因测温元件与待测元件的温度差而产生的误差。又如,用单摆法测量重力加速度的一般公式为 $g = 4\pi^2 L/T^2$, 式中: T 为单摆周期, L 为摆长。这里忽略了单摆摆线质量、单摆的非简谐运动,也忽略了空气阻力的影响等。如果要修正上述这些因素造成的误差,则要进行严格的计算和修正。若摆线质量为 μ , 摆球

质量为 m , 半径为 r , 则上述公式应修正为

$$g = 4\pi^2 \frac{L}{T^2} \left(1 + \frac{2r^2}{5L^2} - \frac{\mu}{6m} \right)$$

若摆角较大或者空气的浮力与阻力的影响较大时, 还应作相应的修正。

2.1.4 误差的分类

根据误差产生的原因和性质不同, 可将误差分为两大类: 系统误差和偶然误差。

1. 系统误差

系统误差指在同一条件下多次测量同一量时, 误差的大小和方向保持恒定, 或在条件改变时, 误差的大小和方向按一定规律变化。

系统误差来源于以下几个方面。

(1) 仪器误差。由于仪器设计、制造、装配等方面引起的误差。如零点不准、气垫导轨没有调到水平、天平不等臂等。

(2) 环境误差。由于各种环境因素与仪器要求的工作状态不一致而引起的。如磁电式仪表旁有强磁场存在, 环境温度不符合标准电池使用的温度范围等。

(3) 理论和方法误差。由于实验理论和实验方法的不完善带来的误差。如测量电压时没有考虑电压表内阻对电路的影响, 测量温度时没有考虑热量的散失等。

由于系统误差的特点是它的确定性, 因此不能用多次重复测量的方法来减小或消除它, 处理系统误差要根据具体情况采取相应的方法加以消除。系统误差的处理较为复杂, 它要求实验者既要有较好的理论基础, 又要有一定的经验。在物理实验中, 主要考虑由于仪器的精确度所限和实验方法、原理不完善而导致的系统误差。对未定系统误差若不能消除可作为偶然误差来处理。

2. 偶然误差

在同一条件下重复多次测量同一个物理量时, 测量结果的值总是在真值的附近, 越靠近真值, 出现的概率越大, 一般服从正态分布^[1]。因此测量的误差服从一定的统计规律, 如图 2.1 所示, $f(x)$ 为误差的概率分布函数, Δx 为偶然误差。但每次测量出现的误差的大小和正负则没有确定的规律, 从图中可以看出偶然误差具有以下特点。

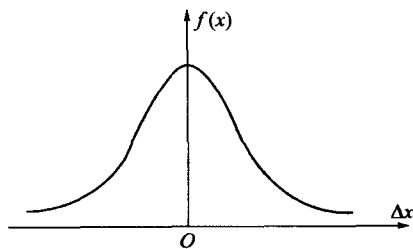


图 2.1 概率分布曲线

(1) 单峰性。测量值与真值相差越小, 出现的可能性越大; 与真值相差很大的, 出现的可能性较小。

(2) 对称性。偶然误差在正负两个方向出现的概率相等。

(3) 有界性。在一定测量条件下, 误差的绝对值不会超过一定的限度。

(4) 抵偿性。偶然误差的算术平均值随着测量次数的增加而越来越小。

根据以上特点, 可通过多次测量求平均值的方法, 使偶然误差相互抵消。

偶然误差来源于多种因素的扰动, 例如, 环境的温度、气压、磁场等不确定的因素, 以

及读数时每次对准标志(刻线、指针等)的不一致,估读数的不一致,被测对象本身的微小起伏变化等。

应该指出,从原则上讲,系统误差可以消除,而偶然误差不能消除。一个具体的测量中出现的误差往往既含有偶然误差,又含有系统误差。在实验中,当实验条件稳定且系统误差可以掌握时,就应尽量保持在相同条件下做实验,以便修正系统误差。当系统误差未能掌握时,常常想一些办法使系统误差随机化,以便在多次测量取平均时抵消一部分。例如,一支米尺刻度不均匀,可以利用米尺不同刻度部位来测量,然后取平均值。

实验误差的分析是一项十分重要的工作,要考虑实际上可能对测量结果产生影响的各种因素,分析其影响的大小。任何实验都不要求也不可能把一切影响因素全部消除,只要达到一定的误差允许范围之内就可以了。而这种分析需要广博的基础知识、丰富的实践经验和高超的判断能力。这就要求在各种实验中认真思考,善于总结,以积累经验,丰富知识,提高分析判断能力。

2.1.5 测量的精确度

精密度、准确度和精确度是评价测量结果好坏的3个术语。

精密度是指重复测量所得结果之间相互接近的程度。精密度高,说明重复性好,误差分布密集,即随机误差小。它反映了测量结果偶然误差的大小。

准确度是指测量值与真值的接近程度。准确度高,系统误差小。它反映测量结果系统误差的大小。

精确度是指综合评定测量结果重复性和接近真值的程度。精确度高,说明精密度和准确度都高。它反映了偶然误差和系统误差的综合效果。

它们之间的关系可以通过打靶形象地表示出来,如图2.2所示。

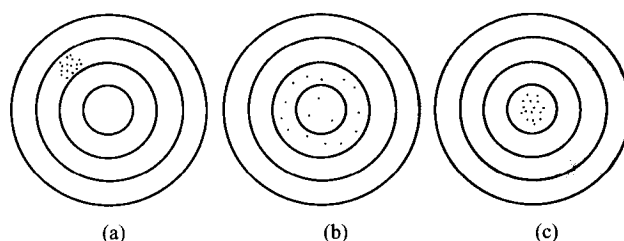


图2.2 测量的精密度、准确度和精确度

(a) 结果的精密度较高,而准确度较低;(b) 结果的精密度较低,而准确度较高;

(c) 结果的精密度和准确度都较高,即精确度较高。

2.2 测量的不确定度评定

2.2.1 不确定度评定的意义

综上所述,由于测量仪器和测量者的问题,即使采用了正确的测量方法,测量结果仍