



普通高等教育“十三五”规划教材
国家级物理实验教学示范中心系列教材

大学物理实验

何光宏 汪涛 韩忠 主编



科学出版社

普通高等教育“十三五”规划教材
国家级物理实验教学示范中心系列教材

大学物理实验

何光宏 汪 涛 韩 忠 主编

科学出版社

内 容 简 介

本书共分为6章,第1章是绪论,介绍物理实验课程的目的和任务,以及主要教学环节;第2章介绍误差、不确定度和主要数据处理方法;第3章介绍常用的物理实验仪器;第4章是基础性实验,适用于各专业,是普及性实验;第5章是综合性和设计性实验,旨在培养实验知识的综合运用能力;第6章是研究性实验,旨在培养基本科学研究能力。

本书将一些主要的实验内容制作成了视频教学资源,通过二维码链接新技术嵌入相应章节,学生通过扫描二维码可以直观地学习相关知识。本书结合相关实验项目,给出了物理实验背景和相关物理学家的研究经历,可以开阔视野,陶冶情操。

本书可作为理工科院校各专业学生的大学物理实验课程教材,也可作为相关教师及学生参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验 / 何光宏, 汪涛, 韩忠主编. —北京: 科学出版社, 2017.6
普通高等教育“十三五”规划教材·国家级物理实验教学示范中心
系列教材

ISBN 978-7-03-052863-6

I. ①大… II. ①何… ②汪… ③韩… III. ①物理学-实验-高等学校 IV. ①O4-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第110681号

责任编辑: 窦京涛 罗 吉 / 责任校对: 彭 涛
责任印制: 白 洋 / 封面设计: 华路天然工作室

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>

三河市书文印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年6月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2017年6月第一次印刷 印张: 15 3/4

字数: 373 000

定价: 39.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

大学物理实验课程是高等理工科院校对学生进行科学实验基本训练的必修基础课程,是本科生接受系统实验方法和实验技能训练的开端.作为学生进入大学后接触较早、覆盖面广泛的实验课程,它在培养学生物理思想,激发学生的创新思维能力和科学探究能力等方面发挥着不可替代的重要作用.

重庆大学国家级物理实验教学示范中心在 2007 年出版了大学物理实验教材,并获评为普通高等教育“十一五”国家级规划教材,为保障并提高物理实验教学质量作出了重要贡献.此后,在《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》(2010 年版)精神指导下,从 2010 年开始,我们在分类分层实验教学体系、探究式教学模式、数字化教学资源等方面进行了教学研究与教学改革,大学物理实验课程的教学内容、教学模式甚至课程体系都已经发生了比较大的变化.本书就是在总结近几年教学改革与实践的基础上,适应大学物理实验课程建设新形势而编写的.

本书将课程体系分为基础性实验、综合性和设计性实验以及研究性实验三个层次.基础性实验主要学习基本物理量的测量、基本实验仪器的使用、基本实验技能和基本测量方法、误差与不确定度及数据处理的理论与方法等,内容涉及力学、热学、电磁学、光学、近代物理等各个领域,此类实验为适应各专业的普及性实验,主要采用以教师讲授为主的传统教学模式.综合性和设计性实验主要是巩固学生在基础性实验阶段的学习成果,开阔学生的眼界和思路,提高学生对实验方法和实验技术的综合运用能力.同一个实验中涉及多个物理学知识领域,或者综合应用多种方法和技术,各专业可以根据自己的专业培养特点选择部分实验项目,采用探究式教学和教师讲授相结合的教学模式.研究性实验围绕基础物理实验的课题,由学生以个体或团队的形式,以科研探究的方式进行,主要目的是使学生了解科学实验的全过程,培养科学思想和科学方法,以及学生独立实验的能力和运用所学知识解决给定问题的能力,学生可以选择一个实验项目,采用探究式教学模式.

“读史使人明智”,为了培养学生的科学素养,陶冶科学情操,本书也结合相关实验项目,给出物理学史和主要物理学家的背景材料.

有效的课前预习是高质量完成实验的前提.受限于各种客观条件,课前预习一直是实验教学的薄弱环节.本书结合移动互联网技术,将实验中常用的实验仪器和操作步骤制作成了视频教学资源,通过二维码链接技术将其嵌入相应章节,学生通过扫描二维码可以非常直观地了解与实验相关的关键知识,希望能够为改善实验教学手段探索出一条有益的路径.

本书是重庆大学国家级物理实验教学示范中心在原来教材的基础上,结合近年来在分类分层实验教学体系、探究式教学模式和数字化教学资源建设等方面教学改革实践的结晶.除了何光宏、汪涛和韩忠三位主编外,吴世春、赵艳、陈莹、吴晓波、刘安平、邱丽、蒲贤洁、郑雪丽、李巧梅、张选梅、杨骏骏、徐玮婧、刘婷、潘量和郭莉杰等老师也参加了

本书的编写和视频资源的制作, 已经退休的陶纯匡主任前期扎实的工作也为本书的顺利出版提供了良好的工作基础. 除此以外, 本书的实验项目也凝聚了曾经先后在物理实验中心工作过的老师和实验技术人员的集体智慧和劳动, 在此一并表示衷心感谢.

由于作者水平有限, 本书中难免会有一些疏漏和不妥之处, 恳请广大读者和同仁批评指正.

何光宏 汪 涛 韩 忠

2016 年 11 月于重庆大学

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 大学物理实验课程的任务、内容和意义	1
1.2 大学物理实验课程的教学基本要求	2
1.3 教材与教学实践	3
附录	4
第 2 章 测量误差、不确定度和数据处理	6
2.1 测量与误差	6
2.2 测量结果的不确定度及完整表达式	13
2.3 有效数字及其运算	17
2.4 数据处理的基本方法	24
练习题	29
附录	30
第 3 章 常用物理实验仪器	34
3.1 游标卡尺和螺旋测微计	34
3.2 测时仪器	37
3.3 数字式万用表	40
3.4 信号发生器	45
3.5 示波器	52
3.6 电势差计	65
3.7 直流电桥	66
3.8 标准电池	70
3.9 电阻箱	71
3.10 滑线变阻器	73
3.11 测微目镜	75
3.12 读数显微镜	76
第 4 章 基础性实验	78
实验 4.1 固体杨氏弹性模量测量	78
实验 4.2 物体转动惯量的测量	81
实验 4.3 单摆测重力加速度	86
实验 4.4 静电场的模拟	90
实验 4.5 非线性元件伏安特性测量	92
实验 4.6 用电势差计测量温差电动势	95
实验 4.7 用电势差计测电表内阻和校准电表	98

实验 4.8	电子示波器的使用	99
实验 4.9	铁磁材料磁化曲线和磁滞回线的测绘	104
实验 4.10	用直流电桥测量电阻温度系数	109
实验 4.11	分光计的调整与玻璃三棱镜折射率测量	112
实验 4.12	等厚干涉——劈尖和牛顿环	118
实验 4.13	单缝衍射	122
实验 4.14	光栅衍射	128
实验 4.15	光栅传感器特性测试	131
实验 4.16	弗兰克-赫兹实验	134
实验 4.17	光电效应法测普朗克常量	140
实验 4.18	迈克耳孙干涉仪	146
第 5 章	综合性和设计性实验	156
实验 5.1	声速的测定	156
实验 5.2	多普勒效应综合实验	163
实验 5.3	复摆特性的研究	172
实验 5.4	使用应变片设计制作电子秤	180
实验 5.5	霍尔效应及螺线管内磁场分布的测量	183
实验 5.6	三用电表的设计、制作与校正	186
实验 5.7	密立根油滴法测定基本电荷	192
实验 5.8	声光衍射与液体中声速的测定	201
实验 5.9	光的偏振现象的研究	205
实验 5.10	全息摄影	210
实验 5.11	显微镜、望远镜的设计与组装	215
第 6 章	研究性实验	220
实验 6.1	弦线上驻波实验	220
实验 6.2	测定金属材料的线胀系数	224
实验 6.3	设计制作数字温度计	225
实验 6.4	非线性电路中的混沌现象研究	226
实验 6.5	测量钠光双线波长差	228
实验 6.6	影栅相位法测量物体形貌	229
实验 6.7	测定物质的色散曲线	231
实验 6.8	测量透明薄片的折射率	232
实验 6.9	利用劈尖干涉法测量钢丝的杨氏弹性模量	232
实验 6.10	利用单缝衍射法测量钢丝的杨氏弹性模量	233
实验 6.11	用牛顿环测液体的折射率	233
实验 6.12	用分光计测液体的折射率	233
实验 6.13	用分光计测溶液的质量浓度	234
实验 6.14	用劈尖干涉测玻璃折射率	234
实验 6.15	用应变片研究弹性碰撞过程	234

附录 A 中华人民共和国法定计量单位 236

附录 B 物理学常量..... 239

附录 C 常用光源 240

附录 D 几种牌号光学玻璃的折射率 241

附录 E 全国各地重力加速度表 242

第1章 绪 论

物理学是研究物质的基本结构、基本运动形式、相互作用及其转化规律的学科。它的基本理论渗透在自然科学的各个领域,应用于生产技术的许多部门,是自然科学和工程技术的基础。在人类追求真理、探索未知世界的过程中,物理学展现了一系列科学的世界观和方法论,深刻影响着人类对物质世界的基本认识、人类的思维方式和社会生活,是人类文明的基石,在人才的科学素质培养中具有重要的地位。物理学本质上是一门实验科学。物理实验是科学实验的先驱,体现了大多数科学实验的共性,在实验思想、实验方法以及实验手段等方面是各学科科学实验的基础。

1.1 大学物理实验课程的任务、内容和意义

物理实验课是高等理工科院校对学生进行科学实验基本训练的必修基础课程,是本科生接受系统实验方法和实验技能训练的开端,物理实验课覆盖面广,具有丰富的实验思想、方法、手段,同时能提供综合性很强的基本实验技能训练,是培养学生科学实验能力、提高学生科学素质的重要基础。它在培养学生严谨的治学态度、活跃的创新意识、理论联系实际和适应科技发展的综合能力等方面具有其他实践类课程不可替代的作用。

大学物理实验课程教学的任务是培养学生的基本科学实验技能,提高学生的科学实验基本素质,使学生初步掌握实验科学的思想和方法,培养学生的科学思维和创新意识,使学生掌握实验研究的基本方法,提高学生的分析能力和创新能力。

大学物理实验课程的教学基本内容包括普通物理实验(力学、热学、电学、光学实验)和近代物理实验,具体的教学基本要求是:掌握测量误差和不确定度的基本知识,具有正确处理实验数据的基本能力;了解常用的物理实验方法,以及在近代科学研究和工程技术中广泛应用的其他方法,并逐步学会使用;掌握实验室常用仪器的性能,以及在当代科学研究与工程技术中广泛应用的现代物理技术,并能够正确使用;掌握常用的实验操作技术,以及在近代科学研究与工程技术中广泛应用的仪器的正确调节方法。

大学物理实验课程对学生能力培养的基本内容包括四个方面。

(1)独立实验的能力:能够通过阅读实验教材、查询有关资料和思考问题,掌握实验原理及方法,作好实验前的准备;正确使用仪器及辅助设备,独立完成实验内容,撰写合格的实验报告;逐步形成自主实验的基本能力。

(2)分析与研究的能力:能够融合实验原理、设计思想、实验方法及相关的理论知识对实验结果进行分析、判断、归纳与综合。掌握通过实验进行物理现象和物理规律研究的基本方法,具有初步的分析与研究的能力。

(3)理论联系实际的能力:能够在实验中发现、分析问题并学习解决问题的科学方法,逐步提高综合运用所学知识和技能解决实际问题的能力。

(4)实践创新的能力:能够完成符合规范要求的设计性、综合性实验内容,进行初步

的具有研究性或创意性内容的实验。

物理学本质上是一门实验的科学。物理概念的建立、物理规律的发现依赖于物理实验。已有的物理定律、物理假说、物理理论必须接受实验的检验，如果正确就予以确定，如果不正确就予以否定，如果不完全正确就予以修正。例如，爱因斯坦通过分析光电效应提出了光量子理论及光电效应方程；普朗克通过分析黑体辐射实验提出了能量子概念；伽利略用新发明的望远镜观察到木星有四个卫星后否定了地心说；杨氏双缝干涉实验证实了光的波动假说的正确性等。

物理实验是研究物理量的测量方法与实验方法的科学，物理实验的技术和测量方法既是其他一切实验的基础，而且还具有适用于一切领域的通用性。很多工程技术问题或研究课题，如果把它们分解开来，实质上就是一些物理问题。在工程技术领域中，研制、生产、加工、运输等过程都普遍涉及物理量的测量及物体运动状态的控制，这正是成熟的物理实验的推广和应用。现代高科技的发展，其设计思想、方法和技术也来源于物理实验，因此，物理实验在探索和研究新科技领域，推动其他自然科学和工程技术的发展中，发挥着重要的作用。

1.2 大学物理实验课程的教学基本要求

大学物理实验课程通常按三个阶段开展教学。

(1) 实验的准备。

实验前必须认真阅读教材，作好必要的预习。预习要以实验目的为中心，搞清楚实验原理、操作要点、数据处理及其分析方法等。预习时要尽量精心构思，写出简明的预习报告，内容包括目的、原理、关键步骤、数据记录表格等。未完成预习和预习报告者，教师有权停止其实验。

(2) 课堂实验的开展。

课堂实验的开展包括仪器的安装与调整，观察实验现象与选择测试条件，测量与记录数据，计算与分析实验结果，以及不确定度估算等。进入实验室，要遵守实验室规则。实验过程中对观察到的现象和测得的数据要及时进行判断，判断它们是否正常与合理。实验过程中可能会出现故障，在教师的指导下，分析故障原因，学会排除故障的本领。实验完毕，做好仪器设备的整理工作。离开实验室前，要整理好所用的仪器，做好清洁工作，数据记录必须经教师审阅签名。

(3) 撰写实验报告。

撰写实验报告是完成一个实验项目的最后程序，也是对实验进行全面总结分析的过程，必须高度重视。通常，实验报告分为三个部分。

第一部分：实验目的和原理。说明本实验的目的。在理解的基础上，用简短的文字扼要地阐述实验原理，切忌整篇照抄，力求做到图文并茂，用原理图、电路图或光路图进行相关表示。写出实验所用的主要公式，说明式中各物理量的意义和单位，以及公式适用条件(或实验必要条件)。

第二部分：实验记录。该部分是在实验课上完成的，基本内容如下：

仪器——记录实验所用主要仪器的名称、量程、最小量、估读误差、仪器误差等。记

录仪器编号是良好的工作习惯,便于以后对实验进行复查。

过程——实验内容和观测现象记录。

数据——数据记录应做到整洁、清晰而有条理,便于计算与复核。数据不得任意涂改。

第三部分:数据处理与计算。该部分在实验后进行,包括如下内容:

计算结果与不确定度计算——计算时先将文字公式化简,再代入数值进行运算。不确定度计算要预先写出不确定度计算公式。

结果——按有效数字处理原则及物理量的正确表达形式写出实验结果。必要时,注明结果的实验条件。

实验讨论——对实验结果进行分析讨论(对实验中出现的说明和讨论),以及写出实验心得或建议等,或完成教师指定的问题。

实验报告是实验工作的总结,是经过对实验操作和观察测量、数据分析以后的永久性的科学记录。撰写实验报告有助于锻炼逻辑思维能力,把自己在实验中的思维活动变成有形的文字记录,发表自己对实验结果的评价和收获。实验报告可供他人借鉴,促进学术交流。撰写实验报告要求做到书写清晰、字迹端正、数据记录整洁、图表合适、文理通顺、内容简明扼要。

1.3 教材与教学实践

本教材按照学生认知规律和教育培养目标,将实验分为基础性实验、综合性和设计性实验、研究性实验三个层次,而且结合现代教育技术,使教材实现了立体化。教材中的基础性实验重在培养学生对基本实验仪器、基本实验技能和基本实验知识的掌握能力,以教师讲授为主,要求完成实验报告;综合性和设计性实验重在培养学生的综合实验能力,在教师的指导下以学生为主完成;研究性实验重在培养学生收集资料、设计实验方案、完成实验并分析实验数据的能力,以学生为中心,围绕课题开展教学活动,教师只是从总体上把握正确的研究方向。同时,教材在实验项目中给出了相关的物理实验背景和相关物理学家的研究经历,学生既可以开阔视野,陶冶情操,也可以从物理学的曲折发展过程中学习到怎样进行科学研究的知识。

另外,我们在教学实践中不同程度地引入探究式教学模式,使学生在教师的引导下,基于现象和问题,通过动手动脑,设计实验方案,研究物理现象,探究物理规律,解决物理问题。通过大学物理探究性实验,可以使学生保持对自然界的好奇心,培养立体思维能力和求实创新观念,培养善于观察和发现、分析和解决问题及善于总结和敢于修正自己错误的能力,养成尊重事实、勇于有根据地大胆怀疑、想象和探索真理的科学态度。发挥探究式教学在素质教育和创新人才培养中的独特作用。

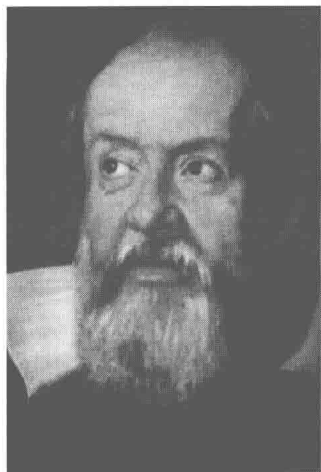
综上所述,对于一个高等院校的学生来讲,不论专业如何,大学物理实验都是一门重要的基础课程。了解和掌握大学物理实验的研究方法和技巧,不仅对物理学理论的学习是重要的,而且对后续课程的学习,尤其是对将来从事的实际工作所需要具备的独立工作能力和创新能力等素质也是十分必要的。大学物理实验课与大学物理理论课一起,构成了高等理工科学生必修的基础物理学的统一的完整知识体系。

附录

【阅读材料】

伽利略与近代实验科学

伽利略(Galileo Galilei, 1564~1642)是意大利物理学家和天文学家,他在物理学和天文学上作出了多方面的巨大贡献.此外,他首次将数学与实验相结合,开创了全新的科学研究方法,是近代实验科学的先驱.



伽利略(Galileo Galilei)

在伽利略之前,物理学以至整个自然科学只是哲学的一个分支,而当时占统治地位的是以神学和亚里士多德学派为代表的思辨式哲学.伽利略吸收并发展了阿基米德学派的科学实践方法,将实验方法放在自然科学研究的首位,倡导了数学与实验相结合的新的研究方法.伽利略重视实验的思想可见于1615年他写给克利斯廷娜公爵夫人的一封信:“我要请求这些聪明细心的神父们认真考虑一下臆测性的原理和由实验证实了的原理二者之间的区别.要知道,做实验工作的教授们的主张并不是只凭主观愿望来决定的.”

伽利略的科学研究方法一般分三个步骤:首先从对现象的一般观察中提出科学假设,并用最简单的数学形式表示出来,以建立量的概念;然后运用数学和逻辑推导出另一易于实验证实的数量关系;最后通过实验来证实这种数量关系,检验科学假设是否正确,形成理论.

运用这种科学研究方法,伽利略先后总结出了自由落体定律、惯性定律和伽利略相对性原理等,推翻了亚里士多德物理学的许多臆断,奠定了经典力学的基础.他还经过长久的实验观察和数学推算,得到了摆的等时性定律,为此后的振动理论和机械计时器件的设计方案建立了基础.他第一个用望远镜观察到了土星光环、太阳黑子、月球山岭、金星和水星的盈亏现象、木星的卫星及金星的周相等天文现象,这些发现为哥白尼学说提供了最确凿的证据,有力地支持了哥白尼的日心学说.

伽利略不但亲自设计和演示过许多实验,而且亲自研制出不少实验仪器,他所创制的许多实验仪器在当时及对后世都很有影响.他利用浮力原理设计了可以快速定量测定金银器皿首饰中金银含量比例的浮力天平.他首创设计的开放式液体温度计使温度从此成为客观的物理量,不再是不确定的主观感觉.他制成的伽利略望远镜,使人类从肉眼观测天体进入了望远镜观测的时代,开辟了天文学的新纪元.

伽利略在总结自己的科学研究方法时说过,“这是第一次为新的方法打开了大门,这种将带来大量奇妙成果的新方法,在未来的年代里,会博得许多人的重视.”后来,惠更斯(C.Huygens, 1629~1695)继续了伽利略的研究工作,他导出了单摆的周期公式和向心加速度的数学表达式.牛顿在系统地总结了伽利略、惠更斯等的工作后,得到了万有引力定律和牛顿运动三定律.伽利略留给后人的精神财富是宝贵的.爱因斯坦曾这样评价:“伽利略的发现,以及他所用的科学推理方法,是人类思想史上最伟大的成就之一,而且标志着

物理学的真正的开端!”

伽利略主要著作有《星际使者》《关于太阳黑子的书信》《关于托勒密和哥白尼两大世界体系的对话》《关于两门新科学的谈话和数学证明》和《试验者》。

【参考文献】

郭奕玲, 沈慧君. 1993. 物理学史. 北京: 清华大学出版社

第2章 测量误差、不确定度和数据处理

2.1 测量与误差

一、测量与测量仪器

测量是获取物理量的主要手段。所谓测量，就是将待测物理量与同类标准物理量进行比较的过程，其比值则被称为测量值。这里的标准物理量，就是规定当作参照基准的物理量的值。例如，在国际计量大会上提出并建议世界各国采用的国际单位制(SI制)，规定了长度米标准、质量克标准、时间秒标准等。我国法定的计量单位中，广泛采用了国际标准制的规定。

测量可以分为两类。

直接测量：能从测量仪器上直接读出测量值的测量。例如，用秒表可直接测量出单摆周期，用天平可以直接测量出物体的质量等。

间接测量：由数个直接测得量经过一定的函数关系计算而获得待测量值的过程，称为间接测量。例如，测量圆柱的体积，先测量其直径 D 和高度 H ，再按函数关系式 $V = \pi D^2 H / 4$ 计算获得圆柱的体积 V 。

一般地，物理实验中的测量大部分是间接测量。随着科技的进步，一些原来不能直接测量的物理量，也有可能用仪器直接测量。例如，平面面积仪能直接测出平面面积，电功率表能直接测量出电器功率等。

不同于数学中的一个数值，一个物理量的测量数据应包含数值和单位两部分。

为了提高测量的可靠性，常对同一物理量进行重复多次的测量。在同等条件下，即测量者、测量方法、测量仪器、测量环境等均相同，对同一物理量进行重复多次测量，称为等精度测量。否则，为非等精度测量。只要条件具备，我们通常使用等精度测量的方法进行测量，这样获得的测量值更可靠。等精度测量和非等精度测量，其数据的处理方法是有所差异的。

直接测量时，均需要借助一定的测量仪器，按照仪器读数的特点，测量仪器可以分为两类。

模拟式仪器：根据一定的比例，用长度或弧长来表示物理量的大小，这类测量仪器被称为模拟式仪器。例如，游标卡尺以长度大小表示长度物理量的大小，指针式的电压表以弧长表示电压的大小。

数字式仪器：直接以数字大小表示出被测物理量大小的仪器，称为数字式仪器。例如，电子天平直接以数字大小显示出质量的大小，数字式电压表直接以数字显示出电压大小。数字式仪器使用方便，显示直观，随着科学技术的发展，不少模拟式仪器都被数字式仪器所

代替.

测量仪器有一些基本的参数, 分别介绍如下.

量程: 在保证测量精度的条件下, 测量仪器所能测得物理量的范围, 称为该仪器的量程. 仪器的量程一般标注在仪器上或其包装盒上.

最小分度值: 测量仪器能准确测出的最小物理量, 称为仪器的最小分度值, 也常称为仪器的最小量. 仪器的最小分度值通常代表了仪器的测量精度, 最小分度值越小, 仪器的精度越高.

零位误差: 测量仪器不能复位到零位置时, 所显示的初始读数会造成所有的测量值偏大或偏小, 故许多仪器设置有专门的调零旋钮, 以消除其造成的测量误差.

二、误差及其分类

在一定的条件下, 任何物理量都有一个客观存在的真实数值, 称为该物理量的真值. 测量的目的就是力求得到物理量的真值. 但在实际测量中, 由于理论的近似性, 测量仪器的精度有限, 测量条件和方法不完善, 测量者的能力有限等因素的影响, 测量结果与真值不可避免地存在一定的差值, 这种差值称为该测量值的测量误差, 简称误差.

设物理量测量值为 N , 真值为 $N_{真}$, 则误差 ε 为

$$\varepsilon = N - N_{真} \tag{2.1.1}$$

误差仅能反映出测量值与标准值的差异, 不能全面反映出测量结果的准确程度. 例如, 测量长度 100mm 和 10mm 的物体时, 若测得的绝对误差都是 0.1mm, 单从绝对误差来看, 二者相同, 但前者误差占测量值的比例为 0.1%, 后者为 1%, 显然前者的测量准确度要高一些. 为了全面反映出测量结果的准确程度, 引入相对误差 E 进行评价, 其定义为

$$E = \frac{\varepsilon}{N_{真}} \tag{2.1.2}$$

相对误差常用百分数表示, 称为百分误差.

在将测量值与公认值进行比较时, 也常用相对误差来评价

$$E = \frac{|N - N_{公}|}{N_{公}} \times 100\% \tag{2.1.3}$$

在实际测量中, 真值是不可能获得的, 常用算术平均值 $\bar{N}$ 代替 $N_{真}$, 即

$$\varepsilon' = N - \bar{N} \tag{2.1.4}$$

ε' 称为偏差.

误差存在于一切测量中, 并贯穿于测量过程的始终. 测量所使用的仪器越复杂、测量经历的时间越长, 引起误差的机会就越多. 因此, 测量时应根据误差要求来制订或选择合理的方案和仪器, 要避免盲目追求测量精度的高指标或盲目使用高精度仪器, 这样做既不经济又无必要, 以最低的代价来取得满足要求的结果才是我们应当追求的.

根据误差的特征和产生的原因, 误差可以分为两类: 系统误差和随机误差.

1. 系统误差

在等精度测量条件下(测量者、测量方法、测量仪器和测量环境均相同), 对同一物理

量进行多次测量,误差的大小和符号保持不变,或者按一定规律变化的误差,称为系统误差.系统误差的特征是它的确定性.它主要来自以下几个方面:

(1)理论(方法)误差.这是由测量所依据的理论公式本身的近似性,或实验条件不能达到理论公式所规定的要求,或由所采用测量方法或数据不完善而引起的误差.例如,用单摆测量重力加速度时,理论上要求摆为一个质点,这在实际上是达不到的,用它来计算必然引起系统误差.

(2)仪器误差.这是由测量仪器本身的固有缺陷或没有按规定使用而引起的.例如,用未经校准零位的千分尺测量零件长度,用不等臂的天平称衡物体的质量,都会引入仪器误差.

(3)环境误差.由环境条件变化所引起的误差.如温度、气压、湿度的变化等.

(4)测量者的误差.通常与观测人员反应速度和观测习惯有关.例如,用肉眼在米尺刻度线上读数时,习惯地偏向一个方向;按动秒表时,习惯地提前或落后.

系统误差的规律及产生的原因可能是实验者已知的,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.对大小和方向未知(或尚未确定)的系统误差叫未定系统误差.前者一般可在测量中采取一定的措施给予减小或消除或者在测量结果中进行修正,而后者一般难以作出修正,只能估计它的取值范围.

总之,系统误差是在一定实验条件下由一些确定的因素引起的,它使测量结果总是偏向一边,即偏大或偏小.因此,试图在相同条件下用增加测量次数来减小或消除它是徒劳的,只有找出导致该系统误差产生的原因,对症下药采取一定的方法才能减小或消除它的影响,或对测量结果进行修正.

1) 系统误差的发现

要发现系统误差,就必须仔细地研究测量理论和方法的每一步推导,检验或校准每一件仪器,分析每一个因素对实验的影响等.实际测量中经常采用的途径和方法如下.

A. 对比的方法

(1)实验方法的对比.用不同方法测同一个量,看结果是否一致.如用一个单摆测量 $g=(9.80\pm0.01)\text{ m/s}^2$,用复摆测得 $g=(9.830\pm0.003)\text{ m/s}^2$,用自由落体法测得 $g=(9.7763\pm0.0005)\text{ m/s}^2$,三者结果不一致,这说明至少其中两种方法存在系统误差.

(2)仪器的对比.如用两个电流表串联于同一个电路中,读数不一致,则说明至少有一个电流表不准.如果其中一个为标准表,就可以找出另一个的修正值了.

(3)改变测量方法.例如,把电流反向进行读数,在增加砝码过程中与减少砝码过程中读数,分光计测角盘转 180° 读数等.

(4)改变实验中某些参量的数值.例如,改变电路中电流的数值,如果测量结果单调或有规律地变化,则说明有某种系统误差存在.

(5)改变实验条件.例如,在电路中将某个元件的位置变动一下.

(6)两个人对比观测,可发现个人误差,等.

B. 理论分析方法

(1)分析测量所依据的理论公式所要求的条件与实际情况有无差异,能否忽略.如“单摆”实验中,公式 $T=2\pi\sqrt{l/g}$,这是作了 $\theta\approx 0$ 的近似,公式把摆球看作质点,忽略摆线质

量、空气浮力与阻力等.

(2)分析仪器是否达到了所要求的使用条件.例如,用测高仪测物体高度时,要求支架铅直、望远镜平移,否则测出的结果不能反映物体实际高度.

C. 分析数据的方法

测量所得数据明显不服从统计分布规律时,则可将测量数据依次排列,如偏差大小有规则地向一个方向变化,则测量中存在线性系统误差;如偏差符号作有规律交替变化,则测量中存在周期性系统误差.

2)系统误差的消除

从原则上来说,消除系统误差的途径,首先是设法使它不产生,如果做不到,那么就修正它,或在测量中设法抵消它的影响.消除系统误差通常有两种主要途径.

(1)消除法:通过校准仪器,改变测量方法或仪器的使用方法,或对测量结果进行理论上的修正.例如,用分光计测量角度时,双游标对称读数法可以消除偏心误差.许多仪器设置有零位调节旋钮,使用仪器前先进行读数调零,其目的就是消除零位误差.

(2)修正法:对于可定系统误差,从仪器直接读出的测量值中直接减去该误差.

未定系统误差的发现和估计比较复杂,没有规律可以遵循,往往依赖于测量者的经验和感觉,需要根据实际情况采用不同措施来估计误差的极限值.

3)仪器误差和估计误差

在大学物理实验教学中,涉及的系统误差主要是仪器误差和估计误差,下面进一步介绍这两种误差.

A. 仪器误差

仪器误差是指在满足仪器规定的使用条件,正确使用仪器时,仪器的示值与被测量真值之间可能产生的最大误差的绝对值.

仪器的使用说明书上通常注明有仪器误差,注明的方式有以下几种.

(1)直接给出仪器误差:如量程 0~150mm、一级精度、50 分度的游标卡尺,说明书上给出仪器误差为 0.02mm.

(2)标出仪器的精度等级:例如,电表的精度等级定义为

$$\text{精度等级} = \frac{|\text{最大误差}|}{\text{量程}} \times 100 \tag{2.1.5}$$

于是,可得到

$$|\text{最大误差}| = \text{量程} \times \text{精度等级} / 100 \tag{2.1.6}$$

式中,最大误差的绝对值就是仪器误差(常用 $\Delta_{\text{仪}}$ 表示).

(3)数字式仪器:数字式仪器的仪器误差也是由仪器生产厂家给出的,给出的形式也有上面所述的两种,大学物理实验教学中,作为粗略的估计,数字仪器也可用其显示的最小读数单位作为仪器误差.

(4)对于未知仪器误差的仪器或者使用年头很久的仪器,我们可以根据测量精度要求,取其最小分度值的一半或就以最小分度值作为仪器误差,以满足教学需要.

为了方便读者,考虑到大学物理实验教学的需要,现将常用物理实验仪器的仪器误差列表 2.1.1 供大家参考.