



普通高等教育“十一五”规划教材



基础物理实验

张山彪 桂维玲 孟祥省 主编



科学出版社
www.sciencep.com

普通高等教育“十一五”规划教材

基础物理实验

张山彪 桂维玲 孟祥省 主编

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是山东省教育厅批准立项建设的高等学校新体系立体化实验教材,根据《山东省高等学校基础课实验教学示范中心建设标准》和“厚基础、宽口径、大综合”的要求,按照系列文本教材、配套教学课件、网络课程等三大部分的编写框架,汇集了近10年山东师范大学、聊城大学、曲阜师范大学等11所高校物理实验教学改革的 new 成果、新经验编写而成的。

本书打破传统的力、热、电、光、原子物理实验的教程分化方法,建立起以基础性实验、提高性实验、综合设计创新性实验为主的分层次、多元化的物理实验课程新结构,适合不同层次的教学需要。

本书可作为高等学校理工科的物理学、应用物理学、电子信息工程专业的物理实验课程指导书,也可作为其他专业的基础物理实验课程参考书,还可供社会爱好者阅读。

图书在版编目(CIP)数据

基础物理实验/张山彪, 程继玲, 孟祥省主编. —北京: 科学出版社, 2009
普通高等教育“十一五”规划教材
ISBN 978-7-03-024690-5

I. 基… II. ①张…②桂…③孟… 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 138677 号

责任编辑: 昌 盛 窦京涛 / 责任校对: 赵桂芬
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 华 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: 19 1/2

印数: 1—4 000 字数: 468 000

定价: 31.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

总 序

为了进一步加强我省高等学校实验教学和实验教学条件建设,更好地为深化高等教育改革和全面实施素质教育,根据教育部《新世纪高等教育教学改革工程》(教高[2001]1号),山东省教育厅于2004年颁布了《山东省高等学校基础课实验教学示范中心建设标准》。这是进一步优化高等学校资源配置、提高办学效益、深化实验室管理体制改革的,培养学生动手操作能力、实践能力和创新能力的重要举措,对于促进高等学校教学资源共享、强化办学特色、加快学校发展,具有重要作用。

实验教材建设是基础课实验教学示范中心建设的关键任务之一。为了切实把这项工作做好,山东省教育厅成立了“山东省高等学校基础课实验教材编写指导委员会”,对新体系立体化实验教材的编写思路、编写方式进行了认真研究。在此基础上,山东省教育厅组织有关高校长期从事实验教学的教师、专家,组成了物理、化学、生物、电工电子、机械、力学等六个门类新体系立体化实验教材编写组。各编写组根据《山东省高等学校基础课实验教学示范中心建设标准》和“厚基础、宽口径、大综合”的要求,按照系列文本教材、配套教学课件、网络课程等三大部分的编写框架,群策群力,集思广益,开展了卓有成效的工作。

新体系立体化实验教材,是我省首次统编实验教材,对于基础课实验教学示范中心建设具有开创性意义。通过在全省高校统一实验教材,力求突破传统的实验教学模式,建立以基础性实验、综合设计性实验、创新性实验为主,形成开放、自主、探究性学习的实验教学新模式和分层次一体化的实验教学新体系。

本套新体系立体化实验教材的编写力求突出时代性、先进性、实用性和通用性,力求做到科学规范。但是由于水平所限,难免有疏漏和不足之处,请各高校在使用过程中提出修改意见,不断提高我省统编实验教材的质量和水平,为促进高等教育改革和素质教育的实施作出更大的贡献。

山东省高等学校基础课实验教材编写指导委员会

前 言

编者根据山东省教育厅关于山东省高等学校立体化新体系实验教材建设的指示,确定编写这套适应 21 世纪高素质创新型人才培养需求的《基础物理实验》新教材。本书由山东师范大学、聊城大学、曲阜师范大学、青岛大学、鲁东大学、临沂师范学院、泰山学院、德州学院、滨州学院、枣庄学院和济宁学院联合编写,编写的原则和特色如下:

1. 按照教育部和山东省教育厅关于基础课物理实验教学示范中心的建设标准要求,全书贯彻以人为本的教育教学理念,构筑高水平、科学化与规范化的物理实验课程新体系,即内容新、方法新、手段新、体系新、适用性强、具有信息时代特色的物理实验课程新体系。

2. 正确把握 21 世纪物理实验教学改革的方向,全书打破传统的力、热、电、光、原子物理实验的教程分化方法,建立起以基础性实验、提高性实验、综合设计创新性实验为主的分层次、多元化的物理实验课程新结构。

3. 为适应信息化时代教学的需求,本书改革单一的纸质文本形式,建立起立体化的多媒体物理实验新教材体系。编者新增了与文本实验教材相适应配套的多媒体实验教学资源、电子教案、实验思考题库、试题库、实验演示片等,从单一的纸质媒体变换为声光电组合的多媒体,给学生以最大限度的全方位的教学服务,拓宽教学的时间和空间,从各个方面培养学生的实验兴趣,调动学生的积极性与创造性,以更快更好地完成物理实验教学任务,实现我们的人才培养目标。

4. 考虑到各地中学物理实验教学的差异,全书为一些实验基础较为薄弱的学生特设了基本技能训练实验单元,为学有余力的学生特设了设计性实验单元,以满足各层次学生个性化教育的需求。

5. 新教材的改革思路是在突出物理实验原理、实验技能的基础上,结合新实验仪器的大量使用,引进了传感技术、微机控制、仿真技术、虚拟仪器、网络信息等新内容、新方法、新手段,力争做到与时俱进、改革创新、与国际接轨,全面提高学生的科学实验素质和掌握先进实验技术的水平。

实验教学与改革是一项繁重的工作,是一项集体的汗水浇灌的事业。本书的编写凝聚了山东省 11 所高校物理实验教学中心全体教师和工作者的心血与智慧。本书的第一次编写会议于 2004 年 4 月在中国海洋大学召开,参加会议的有山东大学、中国海洋大学、中国石油大学、青岛大学、聊城大学、山东师范大学、曲阜师范大学等有关领导和主要编写人员,就分层次、立体化、新体系物理实验教材建设的措施和办法进行了广泛深入的研讨与交流,明确了编写的原则、方案和计划,对主编单位、执行主编和参编人员进行了具体分工。第二次会议于 2008 年 9 月在聊城大学召开,参加会议的主要是省属高师院校的有关领导和老师,会议认真总结了近几年全省高师院校使用新教材的情况和改革创新开放实验教学的新经验,对现行的教材进行了修订,因此本书是与时俱进、改革创新、培养高素质创新型人才的立体化新体系教材,是山东省高校近五年基础物理实验教学改革成果之一。

本书是山东省教育厅批准立项建设的高等学校新体系立体化实验教材,得到了省教育厅领导的支持,同时得到了中国海洋大学、山东师范大学、聊城大学、曲阜师范大学等高校有关领导、老师们的关心支持,特别是郑荣儿教授、朱俊孔教授、胡海泉教授提出了很多重要的和原则性的建议,并多次同作者讨论,指出了应作改进的具体内容,使作者受益匪浅,使本书增色很多,在此对他们表示衷心的感谢!

在编写过程中,作者参考借鉴了北京大学、清华大学、中国科学技术大学、复旦大学、武汉大学、四川大学、山东大学、东北师范大学、华东师范大学等高校的有关教材和教学经验,甚至引用了某些内容,在此深表谢意!特别是四川大学朱世国教授,百忙中仔细审阅了本书稿,提出了很多宝贵的意见,在此向他表示最诚挚的感谢!

由于编者水平有限,经验不足,书中难免有不当之处,敬请物理界前辈、教坛同行专家不吝赐教。

编 者

2009年4月

目 录

总序

前言

§ 1 绪论	1
§ 1.1 物理实验的地位和作用	1
§ 1.2 物理实验的目的和任务	2
§ 1.3 基础物理实验课的教学模式方法和要求	2
§ 1.4 基础物理实验课的进程和要求	3
§ 2 不确定度和实验数据处理	5
§ 2.1 测量与误差的概念	5
§ 2.2 测量结果不确定度的评定	10
§ 2.3 有效数字及其运算	12
§ 2.4 数据处理的基本方法	14
§ 2.5 思考题与习题	17
第一单元 物理基本技能训练实验	19
实验 1-1 长度测量	19
实验 1-2 固、液体密度的测定	24
实验 1-3 冰的熔解热的测定	27
实验 1-4 牛顿第二定律的验证	30
实验 1-5 伏安法测电阻	33
实验 1-6 模拟示波器的使用	36
实验 1-7 薄透镜焦距的测定	42
实验 1-8 显微镜、望远镜的原理与使用	47
第二单元 基础性实验	51
实验 2-1 用单摆测重力加速度	51
实验 2-2 固体比热容的测定	55
实验 2-3 自由落体实验	56
实验 2-4 动量守恒和能量守恒定律的验证	57
实验 2-5 三线摆实验	61
实验 2-6 弦振动和驻波实验	65
实验 2-7 杨氏模量测定实验	68
实验 2-8 固体线胀系数测定实验	70
实验 2-9 刚体转动实验	71
实验 2-10 研究简谐振动的规律	74
实验 2-11 导热系数的测定	76

实验 2-12	声速的测量	78
实验 2-13	用直流单臂(惠斯通)电桥测电阻	85
实验 2-14	静电场的描绘	88
实验 2-15	非线性元件的伏安特性测定	91
实验 2-16	RLC 电路特性测量	93
实验 2-17	数字存储示波器及其应用	105
实验 2-18	霍尔效应实验	107
实验 2-19	铁磁物质动态磁滞回线的测定	113
实验 2-20	电子束的偏转和聚焦特性研究	116
实验 2-21	交流电桥实验	124
实验 2-22	电信号的傅里叶分析	126
实验 2-23	双臂电桥实验	129
实验 2-24	共轴光具组基点的测定	132
实验 2-25	等厚干涉现象的研究	135
实验 2-26	分光计的调节与棱镜玻璃折射率的测定	138
实验 2-27	单缝衍射实验	144
实验 2-28	单色仪的定标和使用	146
实验 2-29	双光干涉实验	151
实验 2-30	偏振现象的观察和研究	155
实验 2-31	用透射光栅测定光波波长	162
实验 2-32	迈克耳孙干涉仪的调整和使用	164
第三单元 提高性实验		170
实验 3-1	空气比热容的测定	170
实验 3-2	测温传感技术实验研究	171
实验 3-3	液体黏滞系数的测定	180
实验 3-4	玻尔共振实验	183
实验 3-5	电介质的介电常量及损耗角正切的频率特性	186
实验 3-6	非平衡电桥实验	188
实验 3-7	用非线性电路研究混沌现象	193
实验 3-8	色度学实验	198
实验 3-9	法布里-珀罗(F-P)干涉仪的调整和使用	202
实验 3-10	阿贝成像与空间滤波实验	205
实验 3-11	光敏电阻特性研究	209
实验 3-12	光纤传感实验研究	213
实验 3-13	利用光电效应测定普朗克常量	221
实验 3-14	衍射光强分布研究	225
实验 3-15	液体表面张力系数测定	229
实验 3-16	动态法测定金属材料的杨氏模量	236
实验 3-17	用集成霍尔传感器测量螺线管磁场	242

实验 3-18 准直管的调整与使用	248
实验 3-19 超声光栅测量声速	253
实验 3-20 多普勒效应综合实验	255
实验 3-21 铁磁材料居里点的测定	260
第四单元 综合设计创新性实验	265
实验 4-1 细丝直径的测量	265
实验 4-2 用不同光学方法测定玻璃片的折射率	266
实验 4-3 数码摄影及图像处理	267
实验 4-4 音叉固有频率的测量	271
实验 4-5 测量水滴下落时的重力加速度	272
实验 4-6 热敏电阻测温仪的制作	273
实验 4-7 电表的改装和校准	274
实验 4-8 移相电路的设计	275
实验 4-9 直流稳压电源设计	275
实验 4-10 装调望远镜和显微镜	276
实验 4-11 利用电势差计改装电表	277
实验 4-12 交流电桥的设计和测量	280
实验 4-13 交流电路功率的测量	283
实验 4-14 制冷系数的测量和研究	286
实验 4-15 硅太阳能电池的研究	290
附表	293
附表 1 国际单位制	293
附表 2 基本物理常数 1986 年国际推荐值	294
附表 3 20℃时常见固体和液体的密度	294
附表 4 标准大气压下不同温度的纯水密度	295
附表 5 在海平面上不同纬度处的重力加速度	295
附表 6 在 20℃时部分金属的杨氏弹性模量	295
附表 7 水的饱和蒸气压与温度的关系(气压单位 Pa/mmHg)	296
附表 8 某些金属、合金的电阻率及其温度系数	296
附表 9 不同温度下与空气接触的水的表面张力	297
附表 10 不同湿度时干燥空气中的声速($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	297
附表 11 某些物质的比热容	297
附表 12 某些物质的导热系数	298
附表 13 某些物质的折射率(对 $\lambda_D = 589.3\text{nm}$)	299
附表 14 常用光源的谱线波长表(波长单位: nm)	299
参考文献	300

§ 1 绪 论

§ 1.1 物理实验的地位和作用

众所周知,物理学是一门实验科学,任何物理现象、物理概念、物理定律都是建立在实验基础之上的。随着实践和科学技术的进步,当今物理实验综合了科学技术的成就,发展形成了自身的科学体系,成为系统性较强的独立学科——实验物理学。其中,基础物理实验在物理学这座雄伟的科学大厦中有着十分重要的地位和作用。

人们要揭示宇宙的奥妙,探索物质的存在形式、运动规律以及相互作用,首先要进行的就是物理实验。牛顿创立万有引力定律绝非是从一次苹果落地而悟出的道理,而是通过无数次观测实验和研究,并在总结大量前人研究成果的基础上所得出的结论。伽利略在著名的比萨斜塔上所做的自由落体实验否定了亚里士多德的“落体的速度与重量成正比”的错误结论,得出了在同一地点、不同的物体具有相同的重力加速度这一科学论断。我们周围的空间不仅有上述引力相互作用的引力场,而且还存在着电磁相互作用的电磁场,光就是波长在一定范围内的电磁场。麦克斯韦(J. C. Maxwell, 1831~1879)在 1862 年通过对库仑定律、安培定律、毕奥-萨伐尔定律、法拉第电磁感应定律等基本实验定律的分析、概括得出的这一结论,形成了麦克斯韦方程组,并预言电磁波的存在。在 1865 年的理论研究中还指出:“电场和磁场的改变不局限在空间的某一部分,而是以数值等于电荷的电磁单位与静电单位的比值的速度传播的,即电磁波以光速传播,这说明光是一种电磁现象。”这一理论在 1888 年被赫兹(H. R. Hertz, 1857~1894)的实验证实。可见物理学理论的提出、创立和发展无不以严格的实验事实为依据,并得到实验的反复检验,才被确认其真理性的。正如诺贝尔物理学奖获得者著名华裔物理学家丁肇中所述:“我是一个做实验的工程师,希望通过我的得奖,能提高中国人对实验的认识。没有实验就没有现代科学技术。”所以,要从事物理学的研究,必须首先掌握物理实验的基本功。例如创办清华大学物理系的叶企孙先生对李政道这样优秀的清华学子仍规定:“理论课可以免上,只参加考试;但实验不能免,每个必做。”总之,实验是科学创新的重要源头,是培养创新型人才的重要课堂,尤其是物理实验,还是其他新兴学科创立和发展的重要桥梁。这种桥梁作用不仅在计算机、电子技术,而且在农、工、医、生等学科中尤为突出,是无法跨越、无法替代的。正是由于物理实验课程的性质和特点,决定了它在培养学生创新能力的独到作用。

在 21 世纪到来之际,世界各国都强调以培养学生的创新能力为核心,培养和造就一大批具有国际竞争能力的高层次创新人才,以适应知识经济时代的发展。这就要求学生不仅具备比较宽厚的理论知识,更要具有较强的科学实验能力。物理实验正是为了对学生进行科学实验基本训练、创新能力的培养而独立设置的必修课,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,通过对学生施以科学、系统、严谨的技能训练,把蕴藏在学生身上的聪明才智和创造才能充分挖掘出来,为将来成为创新型人才打好基础,使我们中华民族能真

正昂首屹立于世界科技文明之林。

§ 1.2 物理实验的目的和任务

基础物理实验课的内涵丰富,覆盖的知识面、包含的信息量以及对学生的基本训练内容丰富,除本学科的力学、热学、电磁学、光学、原子物理学外,还涉及数学、测量学、误差理论和计算机科学等。作为独立开设的一门必修课,基础物理实验主要的目的和任务是:通过对学生施以系统而严谨的物理实验基本知识、基本方法、基本技能方面(三基)的教育与训练,培养学生的科学思维能力、创新能力和浓厚的实验兴趣,为以后学习专业实验课和近代物理实验课奠定坚实的基础。

物理实验基本知识包括:实验目的、原理、思想、概念、公式,实验仪器的测量原理、基本结构、精度等级,实验误差的分析与不确定度的评定,实验结果的正确表示,实验报告的撰写,思考题解答等。

物理实验基本方法主要是:根据实验目的与要求,确定实验的思路与方案,正确选择与使用测量仪器、减少测量误差等。常有直接测量法与间接测量法一说,也有特殊法一说,例如:比较法、放大法、平衡法、补偿法、冲击法、霍尔法、干涉法、衍射法、偏振法、全息法等。基础物理实验中所采用的科学方法还有:内推、外插、替换、修正等。

物理实验基本技能主要是:实验仪器的操作、测试读数、制表、绘图、安全用电、合理布线、眼手脑并用、查阅文献、排除故障、独立思考、和谐交流等。

总之,通过对学生进行实验原理、实验方法、实验条件、实验设计、实验操作、仪器设备、数据处理、实验报告撰写、问题分析解答等诸方面的训练,培养学生的观察思维能力、阅读理解能力、设计布置能力、动手操作能力、分析判断能力、书写表达能力、数据处理等独立解决问题的能力。

兴趣是最好的老师,兴趣是靠科学实验方法培养出来的,培养兴趣就是培养运用科学方法去寻求成功之路、在失败中吸取经验教训、在成功中总结出新的问题;在兴趣的激励下,做到有所发现、有所发明、有所创新、有所前进才算真正的实验成功,完成了实验任务。

§ 1.3 基础物理实验课的教学模式方法和要求

基础物理实验课实行开放式、分层次、多模块、立体化的教学模式和方法。通过开设一定数量的必修、选修两个模块的实验项目,来满足学生个性化教育的需求。同时又将实验内容分成基础性实验、提高性实验、综合设计创新性实验来完成实验教学任务,这三个实验教学层次的比例大体为:60%、30%、10%。

基础性实验,又称为基本性实验。主要学习基本物理量的测量、基本实验仪器的使用、基本实验方法和基本实验技能的掌握、实验误差不确定度及实验数据处理方法等,涉及力、热、电、光、原子物理等各个领域的内容。此类实验重在对学生进行物理实验基本知识、基本方法、基本技能的教育与训练,同时考虑到各地中学物理实验教学的差异,笔者为大一新生实验基础较为薄弱的学生特设了基本技能训练实验单元,旨在进行入门教育,使学生有一个良好的开端。

提高性实验主要是在完成基本性实验的基础上,提高了实验教学的要求,实验教学内容与理论教学既有机结合,又与科研、工程、社会应用实践密切联系,通过改造传统的实验教学内容 and 实验技术方法,既体现出物理学内涵、实验内容的更新,又反映出新技术、新方法、新设备的现代实验技术和手段,实现了基础与前沿、经典与现代的有机结合,重在对学生进行素质和能力的培养。

综合性实验指实验内容涉及本课程的综合知识或与本课程相关知识的实验;设计性实验指给定实验目的要求和实验条件,由学生自行设计实验方案并加以实现的实验,注重对学生探索精神、科学思维、实践能力、创新能力的培养,从而为学有余力的学生大大延伸了课内实验内容。

实行开放式、立体化的教学模式和方法,旨在从时间、空间上给学生更多的选择自由,提供学生自主学习的机会,搭建师生相互交流的平台。学生可通过电话、网络等多媒体进行预约实验、预习实验、回答问题,教师可同时实现全方位为教学服务,形成良性互动,大大有利于学生综合素质的培养和实验教学质量的全面提高。学生必须明确:开放实验课绝不是开门、放松、来去自由、愿做不愿做的教学活动。开放实验室是让学生有更多的空间充分实现自我,形成个体独特的新思维、新方法。要把宽松的课堂气氛与严谨的科学实验融洽起来,切实处理好寻求自我与提高实验教学质量的关系。

§ 1.4 基础物理实验课的进程和要求

基础物理实验课从教学环节上分三个进程:预习实验、正式实验、实验后的总结报告与成绩评定,现就各教学环节提出如下具体要求:

1. 实验前的准备、预习实验课

实验课是有组织、有计划、有目的的教学活动,即便是开放实验室学生也必须遵守实验守则,通过预约到实验室上课,很好地完成学习任务,不得擅自行动,影响教学秩序。

实验前要认真做好预习,力求理解实验的全部内容、原理及要求,明确实验目的、步骤、方法。学生要从观察仪器外观铭牌、面板旋钮标识、仪表读数记录系统等入手,初步了解实验仪器,实验材料的性能和方法,注意事项等,在此基础上写出实验预习报告,同时在实验数据记录本上画好数据记录表格。预习报告的内容包括:姓名、学号、专业、班级、实验日期、实验台号、实验题目、实验目的、实验器材及规格型号、实验原理、实验方法、步骤注意事项等。实验原理一般应用自己融会贯通的语言写出实验所依据的主要原理公式及公式中各量的意义,画出原理图、电路图或光路图。实验方法步骤注意事项应是自己思考设计出来的,也可参照教材或有关指导书、使用手册等资料。

开放实验教学、专题研究性实验和自行设计实验等都是为了给更多的自主活动空间,以便于培养创新型人才,所以更要做好预习实验,保证实验的顺利进行。通过实验达到培养观察、思考、分析判断、直觉、设计等多方面创新的能力。

2. 实验操作、正式实验课

正式实验课主要进行实验操作,要做到眼手脑并用。首先按照预习实验时设计好的方

法、步骤、注意事项等,认真进行对照,检查实验条件是否完备,包括环境、温度、湿度、气压、振动、外电磁场影响等,仪器设备器材规格型号是否准确无误。切忌急于求成,盲目操作。特别是一些关键地方万一疏忽,将导致全盘失败。所以要反复检查连接成的实验电路或光路,确保万无一失,才能通电、通光正式进行操作,必要时须经指导老师检查同意后进行。在实验中要细心观察现象,实事求是做好记录,不得单纯追求好数据而忽视偶然(也可能是必然)实验现象,往往偶然现象蕴涵着新的待发现的物理规律。要坚决反对马虎从事,弄虚作假,要尊重实验事实,讲究严格的科学态度,提高实验技能,要注意安全用电,万一出现意外事故要冷静,迅速采取有效措施,切断电源及时报告,把意外损失降到最小。

完成一个好的实验不仅是创新能力大小的反映,更重要的是一个人的高尚品德、情操、科学态度与精神的体现。

3. 实验后总结报告及成绩评定

实验操作观测结束后要及时断电、断水,整理复原所使用的仪器器材,清扫周围卫生等,然后在实验签名卡上签名,必要时请指导老师验收核查后才能离开实验室。

实验后要及时撰写出实验报告,对实验中观测到的现象、实验数据进行整理和分析并给出误差评价及不确定度的大小;要进行必要的问题讨论及思考题解答;对要求作图的实验还要绘出相应的实验曲线;还可以写明自己的心得体会、意见、建议等。

撰写实验报告是实验课的重要内容,不仅是对实验的分析总结,重要的是培养学生善于总结的能力,还训练学生的归纳整理书写表达能力,为将来撰写科研论文打下基础,要坚决杜绝抄袭实验报告的现象。

学生实验成绩的评定与评价合理与否,是同学们非常关心的事,也涉及对教师教学的评价问题,所以应由师生共同进行,建立多样化的考核方式。一般根据学生平时成绩与期末考试成绩评定,两者原则上各占 50% 的比例。根据学生在三个教学环节中的表现情况,重在学生能力考察,尽量定出符合客观实际的成绩,一般划分为优秀、良好、中等、及格、不及格。例如学生在实验中自己主动排除故障、修好了仪器,或是发现了新的很值得深入探索的物理现象,或是完成了与实验有关的小发明、小制作,都可被评为优秀。若考核内容为设计性实验,学生必须在规定的时间内完成,教师根据设计内容水平给出成绩。

§ 2 不确定度和实验数据处理

误差是实验无法避免的问题,故实验误差分析、测量结果不确定度的评定以及实验数据处理贯穿在实验全过程中,即在预习实验、实验仪器选择布局、正式实验进程中的检测与监控、实验结束后的结果分析与实验报告中都要用到或涉及实验误差。所以,不掌握实验误差的基本知识,就不可能做好物理实验;不会计算测量结果的不确定度,就不能正确评定与表达测量结果;不会处理实验数据,就不可能得到正确的测量值与实验结果。因此,这部分内容在整个实验中是非常重要的。通过学习和实验中的应用,要达到:①掌握好误差与不确定度两个概念,明确两者的关系及其异同点;②与国际接轨,用不确定度正确完整地表示实验测量结果;③掌握有效数字的概念及运算规则,熟悉有效数字与不确定度的关系;④懂得系统误差对测量结果的影响,学习发现系统误差、削弱系统误差的方法;⑤掌握列表法、作图法、逐差法、最小二乘法(即回归法)等常用的数据处理方法。

§ 2.1 测量与误差的概念

1. 测量与测量分类

物理学是一门实验的科学,物理实验就是要将自然界中物质的运动形态,按人们的意愿在预定的条件下,以比较纯粹或典型的形式再现,从而使人们有可能在较有利的条件下,探索各相关量之间的规律性或验证理论。因此,物理实验中基本的操作就是测量。所谓测量就是将待测量与规定为基本单位的物理量进行比较,其倍数即为待测量的大小,其单位就是与之进行比较的基本单位。例如,我们说测得某一物体的长度为 1.248m,则表示基本单位为米,而物体的长度为基本单位的 1.248 倍(数值),显然数值的大小与选用的单位有关。因此,我们在给出某一待测量的结果时,必须同时给出数值和单位,两者缺一不可。实际的测量过程一般要借助于测量仪器,测量仪器是指用以直接或间接测出被测对象量值的所有器具,如游标卡尺、天平、停表等,测量仪器是基本单位的实物体现。

测量通常分为直接测量和间接测量两类。直接测量就是将待测量与测量仪器直接比较,得出被测量量值,例如用米尺测量长度,用天平测量物体质量等。但在物理实验中,还有一些物理量不能直接从仪器上测得,而是通过对某些相关物理量的直接测量,再根据相应的公式计算出被测量的大小,这种测量称为间接测量。例如在单摆实验中,通过对摆长 l 和周期 T 的测量,由公式 $g = \frac{4\pi^2}{T^2} l$ 计算出重力加速度 g 的过程就是间接测量。

2. 误差及其分类

实验中所测量的物理量,均有不依人的意志与客观环境而转移的真实大小,称为被测量的真值。测量的理想结果是真值,但又很难准确地得到它,因为测量仪器只能精确到一定程度,还因为测量原理与方法的不完善、环境条件的影响及测量者感官能力的限制,所得测量值和真值总存在一定的差异,这种测量值 x 与真值 x_0 之差称为测量误差 ϵ ,简称误差,即

$$\text{误差}(\epsilon) = \text{测量值}(x) - \text{真值}(x_0)$$

上式所定义的测量误差反映了测量值偏离真值的大小和方向,因此也称 ϵ 为绝对误差.绝对误差虽然可以表示某一测量结果的优劣,但在比较不同测量结果时则不适用,需要用相对误差表示.相对误差的定义为

$$\text{相对误差} = \frac{\text{绝对误差}}{\text{测量最佳值}} \times 100\%$$

有时被测量有公认值或理论值,还可使用“百分误差”来表征

$$\text{百分误差} = \frac{\text{测量最佳值} - \text{公认值}}{\text{测量最佳值}} \times 100\%$$

由于被测量的真值不可知,测量误差也不可知,只能给出被测量的最佳估计值及其不确定范围的估计,即测量值的不确定度.

根据误差的性质和特点,可将误差分为两类,即系统误差和偶然误差.

1) 系统误差

在同一条件下(实验方法、仪器、实验环境、实验者),对同一物理量进行多次测量,误差的符号和绝对值保持不变或按某种规律变化,该误差称为系统误差,其产生的原因主要有以下几个方面:

(1) 理论(方法)误差.这是由于实验方法或理论不完善导致的误差.

(2) 仪器误差.这是所用量具或装置本身不完善或调整不当而产生的误差,主要表现为示值误差、零值误差、调整误差及回程误差等.

(3) 环境误差.这是由外界环境(温度、湿度、光照、电磁场等)的影响而产生的误差.

(4) 人身误差.这是由于观察者的不良习惯与偏向引入的误差.

从上述系统误差产生的原因可知,测量者不能依靠在相同条件下进行多次测量来消除和发现它,但在实验中应尽可能进行系统误差的修正和处理.按对系统误差掌握的程度,常将其分为已定系统误差和未定系统误差两类.已定系统误差是指采用一定的方法,可以对误差的数据和符号能确定的系统误差.未定系统误差是指不知道误差的大小和符号,仅仅知道误差的可能范围(或称误差限).对于已定系统误差,可对测量值进行修正.设已知测量某量的已定系统误差为 Δx ,则修正值为 $c_x = -\Delta x$,修正后的测量值为

$$\text{实际值}(x') = \text{示值}(x) + \text{修正值}(c_x)$$

对不能消除的未定系统误差,应设法估计其误差的大小,但寻找系统误差并估计其大小,没有普遍规律可循,在很大程度上有赖于实验者的经验与素养.

2) 偶然误差(随机误差)

在相同条件下,对某一物理量进行多次测量,各测量值之间总存在差异,且变化不定,在消除系统误差后仍然如此,这种绝对值和符号随机变化的误差称为偶然误差(或称随机误差).产生偶然误差的原因很多,而且各种偶然因素对实验的影响一般都很小,且是混合出现的.它的主要来源有两个方面:一是实验者本人感觉器官分辨能力的限制;二是测量过程中,实验条件和环境因素的微小的无规则的起伏变化.在大量的观测数据中,偶然误差服从一定的统计分布规律,如图1所示为正态分

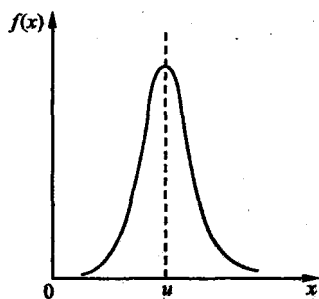


图1 正态分布曲线

布曲线,其横坐标是测量值,纵坐标是每单位 x 出现的概率,或称为概率密度,特点如下:

- (1) 单峰性. 绝对值小的误差比绝对值大的误差出现的机会多.
- (2) 对称性. 绝对值相等的正负误差出现的机会相等.
- (3) 有界性. 超过一定大小范围的误差出现的概率为零.

根据偶然误差的特点,采用多次重复测量求平均来减小偶然误差的影响,事实上,多次测量的算术平均值就是最佳估计值;另外,还可以根据偶然误差服从的统计分布规律,对偶然误差的大小及测量结果的可靠性作出合理的评价.

3) 精度

误差反映了测量结果与真值的差异,差异小,俗称精度高,差异大,俗称精度低. 根据误差的种类,可将精度细分为如下几种:

- (1) 准确度. 表示测量结果中系统误差大小的程度.
- (2) 精密度. 表示测量结果中偶然误差大小的程度.
- (3) 精确度. 是测量结果中系统误差与偶然误差的综合,表示测量结果与真值的一致程度. 准确度、精密度和精确度三者的含意可用图 2 所示的情况来说明.

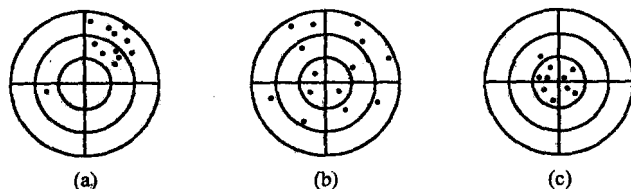


图 2 测量结果精度示意图

图(a)表示精密度很高,但准确度低,即偶然误差较小,但有较大的系统误差. 图(b)表示准确度高,但精密度低,即系统误差较小,但偶然误差较大. 图(c)表示精密度和准确度均较好,即精确度高,说明偶然误差和系统误差均较小. 因此,在评价测量结果时,原则上应指出精确度的大小,即同时反映其系统误差和偶然误差的大小.

3. 直接测量与间接测量中的误差传递

1) 单次直接测量结果的误差估算

有些实验,由于是在动态中测量,不容许对被测量在相同条件下作重复测量. 例如,热学实验中的温度测量就无法多次测量. 另外在间接测量中,该物理量的误差对最后的结果影响较小,或在有些实验中对精度要求不高,在这些情况下,对被测量只测一次,那么它的误差应如何估算呢? 对于单次测量,由于误差的来源很多,各个实验又有各自的特点,所以难于用统一标准. 目前一般按照如下两个约定:① 当测量的偶然误差较小时,通常取仪器的最小分度值为极限误差;② 当测量的偶然误差较大时,选取仪器的最小分度值的几倍为极限误差. 一般是取最小分度值为极限误差 $\delta_{\max}$,所以单次直接测量结果的误差可估计为

$$\sigma = \frac{1}{3} \delta_{\max}$$

2) 间接测量中的误差传递

在物理实验中,除直接测量外,大部分实验都是经过间接测量获得最终结果. 所谓间接测量就是把直接测量值代入某种函数关系求出待测量. 由于各直接测量值有误差,经过函数

运算必然影响到间接测量值,这就是误差传递.各直接测量值的误差与间接测量值的误差之间的关系式,称为误差传递公式.

(1) 误差传递的基本公式.

设 $y=F(x_1, x_2, \dots, x_m)$, 其中 $x_1, x_2, \dots, x_m$ 为 m 个直接测量值, y 为间接测量值, 将各直接测量值的算术平均值代入公式, 即可求出间接测量的最佳估计值, 即

$$\bar{y} = F(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_m)$$

当考虑各直接测量值的误差时, 间接测量值也有误差, 所以有

$$\bar{y} \pm \Delta y = F(\bar{x}_1 \pm \Delta x_1, \bar{x}_2 \pm \Delta x_2, \dots, \bar{x}_m \pm \Delta x_m)$$

按泰勒公式展开上式并略去二次方以上各项得

$$\bar{y} \pm \Delta y = F(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_m) + \frac{\partial F}{\partial x_1} (\pm \Delta x_1) + \frac{\partial F}{\partial x_2} (\pm \Delta x_2) + \dots + \frac{\partial F}{\partial x_m} (\pm \Delta x_m)$$

在计算偶然误差时, 由于误差本身的正或负是不可知的, 因此, 上式中各误差项的系数必须取其绝对值, 即

$$\begin{aligned} \Delta y &= \left| \frac{\partial F}{\partial x_1} \right| \Delta x_1 + \left| \frac{\partial F}{\partial x_2} \right| \Delta x_2 + \dots + \left| \frac{\partial F}{\partial x_m} \right| \Delta x_m \\ \text{相对误差为} \quad \frac{\Delta y}{\bar{y}} &= \left| \frac{\partial F}{\partial x_1} \right| \frac{\Delta x_1}{F} + \left| \frac{\partial F}{\partial x_2} \right| \frac{\Delta x_2}{F} + \dots + \left| \frac{\partial F}{\partial x_m} \right| \frac{\Delta x_m}{F} \end{aligned}$$

如果间接测量 y 是直接测量 $x_1, x_2, \dots, x_m$ 的相乘或相除的函数关系, 则为了运算方便, 通常对 $y=F(x_1, x_2, \dots, x_m)$ 两边取对数, 即 $\ln y = \ln F(x_1, x_2, \dots, x_m)$, 先计算相对误差, 再求绝对误差, 公式为

$$E = \frac{\Delta y}{\bar{y}} = \left| \frac{\partial \ln F}{\partial x_1} \right| \Delta x_1 + \left| \frac{\partial \ln F}{\partial x_2} \right| \Delta x_2 + \dots + \left| \frac{\partial \ln F}{\partial x_m} \right| \Delta x_m$$

$$\Delta y = E \cdot \bar{y}$$

以上讨论没有考虑各误差项的实际符号, 而总是从最不利的情况讨论, 忽略了可以相互抵消一些的情况, 因而估计出的误差将有些偏大. 根据上述公式, 可推导出表 1 所列的一些常用函数关系式的误差传递公式.

表 1 常用函数关系式的误差传递公式

序 号	函数关系式	误差传递公式	
		绝对误差	相对误差
1	$y=x_1+x_2$	$\Delta y= \Delta x_1 + \Delta x_2 $	$E=\frac{ \Delta x_1 + \Delta x_2 }{x_1+x_2}$
2	$y=x_1-x_2$	$\Delta y= \Delta x_1 + \Delta x_2 $	$E=\frac{ \Delta x_1 + \Delta x_2 }{x_1-x_2}$
3	$y=x_1 \times x_2$	$\Delta y= x_2 \Delta x_1 + x_1 \Delta x_2 $	$E=\left \frac{\Delta x_1}{x_1} \right + \left \frac{\Delta x_2}{x_2} \right $
4	$y=\frac{x_1}{x_2}$	$\Delta y=\frac{ x_2 \Delta x_1 + x_1 \Delta x_2 }{y^2}$	$E=\left \frac{\Delta x_1}{x_1} \right + \left \frac{\Delta x_2}{x_2} \right $
5	$y=x^n$	$\Delta y= n x^{n-1} \cdot \Delta x $	$E=n \left \frac{\Delta x}{x} \right $
6	$y=\sqrt[n]{x}$	$\Delta y=\left \frac{1}{n} x^{\frac{1}{n}-1} \cdot \Delta x \right $	$E=n \left \frac{\Delta x}{x} \right $