

高等学校物理实验教学示范中心系列教材

大学物理实验

University Physics Experiments

主 编 李 隆 曾会萍 张琳丽
郝劲波 陈 文 王良甚



高等教育出版社

高等学校物理实验教学示范中心系列教材

大学物理实验

主 编 李 隆 眭会萍 张琳丽
郝劲波 陈 文 王良甚

高等教育出版社·北京

内容提要

本书依据教育部高等学校物理学与天文学教学指导委员会编制的《理工科大学物理实验课程教学基本要求》(2010年版)编写而成。

本书力求在突出物理实验的设计思想,物理实验的基本知识、基本方法、基本测量技术的基础上,融合现代教育理念和科技进步成果。本书内容涉及物理实验数据处理基本知识、物理实验的基本测量方法与测量技术、力学和热学实验、电磁学实验、光学实验、近代物理与综合性实验、设计与创新实验以及虚拟仿真实验几部分。在实验内容的选取和编排上,力求理论完整,实验知识系统化,课题设置层次化。

本书可作为普通高等学校理工科各专业大学物理实验课程的教材,也可供相关人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验 / 李隆等主编. -- 北京: 高等教育出版社, 2018. 3

高等学校物理实验教学示范中心系列教材

ISBN 978-7-04-048931-6

I. ①大… II. ①李… III. ①物理学-实验-高等学校-教材 IV. ①O4-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 280024 号

Daxue Wuli Shiyān

策划编辑 忻蓓 责任编辑 忻蓓 封面设计 张忠 版式设计 马云
插图绘制 杜晓丹 责任校对 窦丽娜 责任印制 毛斯璐

出版发行	高等教育出版社	网 址	http://www.hep.edu.cn
社 址	北京市西城区德外大街 4 号		http://www.hep.com.cn
邮政编码	100120	网上订购	http://www.hepmall.com.cn
印 刷	北京玥实印刷有限公司		http://www.hepmall.com
开 本	787mm×1092mm 1/16		http://www.hepmall.cn
印 张	31	版 次	2018 年 3 月第 1 版
字 数	790 千字	印 次	2018 年 3 月第 1 次印刷
购书热线	010-58581118	定 价	56.00 元
咨询电话	400-810-0598		

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换

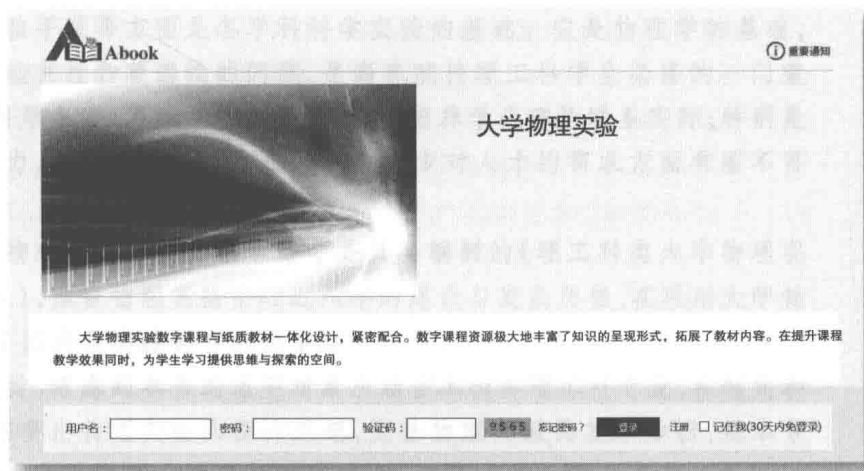
版权所有 侵权必究

物料号 48931-00

大学物理实验

李 隆 曾会萍
张琳丽 郝劲波
陈 文 王良甚

- 1 电脑访问<http://abook.hep.com.cn/1246551>，或手机扫描二维码、下载并安装 Abook 应用。
- 2 注册并登录，进入“我的课程”。
- 3 输入封底数字课程账号（20位密码，刮开涂层可见），或通过 Abook 应用扫描封底数字课程账号二维码，完成课程绑定。
- 4 点击“进入学习”，开始本数字课程的学习。



扫描二维码
下载 Abook 应用

<http://abook.hep.com.cn/1246551>

前 言

物理学是研究物质基本结构、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,对人类科学技术的发展起到了引领和推动作用,其发展导致了一系列科学的世界观和方法论,深刻地影响着人类对物质世界的基本认识、人类思维方式和社会生活,是人类文明的基石,在人才培养中有着重要的地位。

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。它是物理学的基础,反映了理工科及各个学科科学实验共性和普遍性的问题,是高等院校理工科学生必修的一门重要基础实验课程,对培养学生的科学态度、思维方法和创新能力,培养学生理论联系实际,特别是与科学技术发展相适应的综合能力,以及适应科技发展与社会进步对人才的需求方面有着不可替代的作用。

本书是按照教育部高等学校物理学与天文学教学指导委员会编制的《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》(2010年版),结合物理实验中心近几年的建设与发展历程,在现用大学物理实验讲义的基础上,广泛吸取了国内同类教科书的精华编写而成的。

相比于现用大学物理实验教材,考虑到本书的适用对象应涵盖本校各理工科专业,在结构和内容上均做了较大的调整,力求在突出物理实验的设计思想,完善物理实验的基本知识、基本方法、基本测量技术的基础上,融合现代教育理念和科技进步成果,方便大学生学习使用。教材内容涉及物理实验数据处理基本知识、物理实验的基本测量方法与测量技术、力学和热学实验、电磁学实验、光学实验、近代物理与综合性实验、设计与创新实验以及虚拟仿真实验几部分。在实验内容的选取和编排上,继承了近年来的教学成果,考虑到学生创新能力培养的需要,在结构上进行了调整,力求理论完整,实验知识系统化,课题设置层次化,其特点如下:

1. 突出实验原理、细化操作过程,满足“大众化”教育的需要。

考虑到大学物理实验是学生进入大学后较早接触的一门实验课程,由于中学物理实验教学层次不一,学生的实验技能差异较大,按照循序渐进的原则,先通过物理实验的基本原理及方法的学习,初步掌握实验的主要过程与基本实验技能,使学生能够较快地从中学物理实验过渡到大学物理实验。

教材符合实际教学的需要,学生在教材中可看到仪器实物插图,从而增进了对实验内容的了解,在内容的编写上尽可能将实验原理、实验步骤、设计思路讲清楚,帮助学生更好地掌握实验原理、了解实验内容。

2. 改变了物理实验教材中实验课题按“传授知识”思路的传统编写方法,突出基本能力的培养,强调创新思维、创新方法、创新能力的培养,满足普通高校实验课“并行入口”教学模式的需要。

实验内容按照实验系统知识划分,按由浅入深、循序渐进的原则编排,包括基础训练和综合

技术训练内容,增加了设计性内容和创新提高性内容,给出了必要的提示和参考资料。旨在有效提高学生的知识运用能力和科技设计创新能力,为今后从事科研工作打下基础。在撰写风格方面,尽量减少实验原理中的物理理论、公式的推导,把实验原理介绍的重点放在实验方法和数据处理方法等实验知识上。在仪器介绍中,突出仪器使用的基本原理、一般使用方法及可应用领域等内容,给学生留一个思考、综合的空间。

3. 与时俱进,满足现代化教学理念的需要。

随着科技飞速发展,现代测试技术也一起进入物理实验室,数字仪表正逐步取代各种老式的指针式仪表,传感器和计算机在物理实验的教学中正凸显其测量快捷、记录和存储方便、便于数据分析预处理等诸多优势,促使许多高校物理实验教学中采用了计算机记录、模拟、绘图、监控等,提高了物理实验的现代化水平。在本教材中,对于部分大学物理实验内容采用 Labview 仿真模拟,使学生有耳目一新的感觉。

计算机仿真实验的引入,把物理实验课分成了两个阶段,即仿真实验阶段和真实试验阶段。学生可以通过仿真实验,学习实验的基本原理、实验方法、仪器的设计原理、操作原理与方法,拟定实验步骤后,再操作实际实验仪器,完成实验测量。这样对于我校信控、机械、材料等专业的后续课程学习奠定了良好的实验基础。

4. 因地制宜,满足我校大学物理实验教学的需要。

实验内容涵盖力学、热学、电磁学、光学和近代物理实验,既包括训练学生基础物理实验思想、物理实验方法、物理实验技能的经典实验,又包括与现代物理技术结合的实验。突出重点,将掌握的知识要点按照实验项目划分,使学生明确地知道在某次实验中应掌握的重点内容以及实验技能。精选了必做实验内容,压缩了传统性的验证课题,在大部分传统实验中引入了新的测量方法、现代通用测量仪器、具有拓宽思维的具体实验内容。使学生在进行基础训练的同时,了解更多的现代测量新技术、新方法,有利于开拓学生的眼界。

物理实验教学是一项集体的工作,本书的编写是西安建筑科技大学全体物理实验教师和技术人员智慧的结晶,是集体的成果。李隆与咎会萍负责物理实验数据处理基本知识、物理实验的基本测量方法与测量技术的编写,张琳丽与王良甚负责力学和热学实验的编写,李隆与郝劲波负责电磁学实验的编写,郝劲波与陈文负责光学实验的编写,咎会萍与张琳丽负责近代与综合实验的编写,陈文与王良甚负责设计创新型实验实验的编写,王良甚与郝劲波负责虚拟大学物理实验的编写,本书最后由咎会萍统稿及修改定稿。在编写过程中得到了本教研室全体人员的鼓励和支持,在此谨致以深切的谢意!

本书是一本新体系、新内容的物理实验教材,还需在教学实践中不断研究探索,才能日臻完善。由于水平有限,实践经验不足,缺点和错误在所难免,敬请使用本书的广大师生提出意见和建议,以便编者及时修正。

编者

2017年10月

目 录

绪论	1	传递公式	27
第一章 物理实验数据处理基本知识	5	§ 1.6 有效数字及其运算规则	28
§ 1.1 测量的基本概念	5	1.6.1 有效数字	28
1.1.1 测量及其表示	5	1.6.2 有效数字的记录	30
1.1.2 测量的分类	5	1.6.3 有效数字的运算规则	30
1.1.3 测量误差及分类	6	§ 1.7 实验数据处理的基本方法	32
1.1.4 系统误差的理论分析与 处理	10	1.7.1 列表法	32
1.1.5 可定系统误差的处理与 修正	11	1.7.2 图示法和图解法	33
1.1.6 测量结果的定性评价	12	1.7.3 差数平均法	37
§ 1.2 测量的最佳值与随机误差的 分析与统计处理	13	1.7.4 最小二乘法与线性拟合	39
1.2.1 测量的最佳值——算术 平均值	13	§ 1.8 实验报告的撰写	42
1.2.2 随机误差的统计处理	13	附一 等精度多次测量列平均值是 真值的最佳估计值的证明	42
§ 1.3 仪器误差	18	附二 间接测量量 N 的不确定度 u_N 的 推导过程	43
1.3.1 仪器误差限	18	习题	43
1.3.2 仪器的标准误差	19	参考文献	44
1.3.3 仪器的灵敏度误差限	20	第二章 物理实验的基本测量方法与 测量技术	45
§ 1.4 测量不确定度	20	§ 2.1 基本测量方法	45
1.4.1 测量不确定度的分类	21	2.1.1 直读法	46
1.4.2 A 类不确定度	21	2.1.2 放大法	46
1.4.3 B 类不确定度	22	2.1.3 补偿法	47
1.4.4 直接测量的合成标准 不确定度	24	2.1.4 模拟法	48
1.4.5 直接测量结果的表示	24	2.1.5 替代法	49
1.4.6 百分差	26	2.1.6 交换法	50
§ 1.5 间接测量不确定度的计算	26	2.1.7 转换法	50
1.5.1 不确定度的传递与合成	26	2.1.8 平衡法	51
1.5.2 常用简单函数不确定度 传递公式	27	§ 2.2 基本物理量的测量及仪器的 使用	52
		2.2.1 基本测量仪器	52

2.2.2	电学量的测量	63	实验 3.6	三线摆法测量物体的转动惯量	134
2.2.3	光学测量仪器	74	实验 3.7	落球法测量液体的黏度	141
§ 2.3	仪器的调整技术及操作规程	78	实验 3.8	稳态法测量不良导体的导热系数	144
2.3.1	零位调整	78	第四章	电磁学实验	149
2.3.2	水平、竖直调整	79	实验 4.1	滑线式变阻器的使用与电路控制	149
2.3.3	等高共轴调整	79	实验 4.2	伏安法测量元器件的电阻值	153
2.3.4	消除视差	79	实验 4.3	单臂电桥测电阻	157
2.3.5	逐次逼近法	80	实验 4.4	交流电桥测阻抗	161
2.3.6	消除空程误差	80	实验 4.5	电位差计的应用	173
2.3.7	电学实验的基本操作规程	80	实验 4.6	用恒定电流场模拟静电场	177
2.3.8	光学实验的基本操作规程	81	实验 4.7	双踪示波器的使用	182
§ 2.4	非电学量的电学测量技术	82	实验 4.8	霍尔效应测量元件参数	197
2.4.1	热电转换技术	83	实验 4.9	双臂电桥测低值电阻	204
2.4.2	力电转换技术	86	实验 4.10	非平衡电桥测温仪的设计与应用	212
2.4.3	磁电转换技术	86	实验 4.11	空气中声速的测量	218
2.4.4	光电转换技术	90	实验 4.12	灵敏检流计特性的研究	227
§ 2.5	物理光学测量技术	94	实验 4.13	RL 、 RC 以及 RLC 电路特性的研究	234
2.5.1	光干涉测量技术	94	第五章	光学实验	248
2.5.2	光衍射测量技术	98	实验 5.1	太阳能电池基本特性的测量	248
2.5.3	光偏振测量技术	100	实验 5.2	分光计的调节与使用	254
§ 2.6	微机与微型计算机在物理实验中的应用	102	实验 5.3	等厚干涉的应用	266
参考文献		104	实验 5.4	衍射光栅	269
第三章	力学和热学实验	105	实验 5.5	薄透镜焦距的测定	275
实验 3.1	用单摆法测量重力加速度	105	实验 5.6	单缝衍射光强分布的测定	281
实验 3.2	用拉伸法测金属丝的杨氏模量(之一)	108	实验 5.7	阿贝折射仪测量物质的折射率	284
实验 3.3	用拉伸法测金属丝的杨氏模量(之二)	115	实验 5.8	迈克耳孙干涉仪的应用	290
实验 3.4	用气垫导轨研究力学现象——速度和加速度的测量	121	实验 5.9	联合傅里叶变换相关图像	
实验 3.5	扭摆法测量物体的转动惯量	128			

识别	297	实验 7.3 测弹簧的有效质量	404
实验 5.10 数字式光学传递函数的 测量和像质评价	301	实验 7.4 测量细丝的直径	405
第六章 近代与综合实验	307	实验 7.5 液体温度计的设计与 定标	408
实验 6.1 金属电子逸出功的测定	307	实验 7.6 基于补偿原理的伏安法 测低值电阻电路的 设计	410
实验 6.2 光速的测量	314	实验 7.7 空气黏度测定的研究	411
实验 6.3 非线性混沌实验	320	实验 7.8 数字式万用表的设计	414
实验 6.4 偏振光的研究	328	实验 7.9 铁磁材料居里温度的 测定	425
实验 6.5 动态法测量金属的杨氏 模量	333	实验 7.10 混合法测量固体的 比热容	431
实验 6.6 光电效应和普朗克常量的 测量	338	实验 7.11 非线性电阻的观察 与测量	432
实验 6.7 弗兰克-赫兹实验	344	实验 7.12 散斑照相测位移	433
实验 6.8 电阻应变片传感器的桥路 性能	351	第八章 虚拟大学物理实验	436
实验 6.9 全息照相	358	§ 8.1 虚拟仪器及虚拟实验室	436
实验 6.9.1 激光再现的全息 照相	358	§ 8.2 虚拟大学物理实验系统的 开发	437
实验 6.9.2 白光再现的全息 照相	361	§ 8.3 虚拟大学物理实验系统的 演示	438
实验 6.10 用全息干涉法测量悬臂梁 的挠度及材料的杨氏 模量	364	§ 8.4 虚拟大学物理实验系统的 网络化	465
实验 6.11 铁磁材料动态磁滞回线的 测试	369	附录	469
实验 6.12 音频信号光纤传输技术	371	I 常用数据	469
实验 6.13 密立根油滴实验	376	II 国际单位制的量纲	480
实验 6.14 用霍尔法测直流圆线圈 与亥姆霍兹线圈磁场	382	III SI 中 7 个基本量基本单位的 定义	480
第七章 设计创新型实验	389	IV 国际单位制中单位词头的 十进倍数和分数单位	481
实验 7.0 设计创新型实验总论	389	V 国际单位制中具有专门名称的 导出单位	482
实验 7.1 重力加速度的测量	396	VI 物理量的名称、符号和单位 (SI) 一览表	482
方法一:单摆法测量重力加速度	396		
方法二:自由落体法	399		
实验 7.2 用热敏电阻改装温度计	401		

绪 论

一、科学实验的地位和作用

物理学是研究物质运动一般规律及物质基本结构的科学,是自然科学的基础学科,是学习其他自然科学和工程技术的基础.从本质上说,物理学是一门实验科学,物理规律的发展及其理论的建立,必须以严格的物理实验为基础,并受实验的检验.

科学实验是人们探索自然规律的一种实践活动之一.它是人们根据一定的研究目的,通过一定的构思,利用科学仪器、设备等物质手段,人为地控制或模拟一定的条件,使自然过程或生产过程以比较典型的或单纯的形式表现出来,从而达到在一定的条件下,研究和探索自然规律的目的.

科学实验的主要任务是研究人类尚未认识或尚未完全充分认识的自然过程和领域,发现未知的自然规律;为新的理论、学说的建立提供实验的基础;研究、发明新材料、新方法、新工艺,促进生产技术的变革进步,提高人们改造自然的能力.近代自然科学的重大突破,一般并不是来自于生产实践,往往是通过科学实验这个环节研究出来的.

科学实验既是一切理论研究的基础,其实践活动又离不开理论的指导.科学理论来源于科学实验,并受科学实践的检验.然而,在实验过程中,实验课题的选择、实验的构思和设计、实验方法的确定、实验数据的处理,以及由实验得出的结论和由实验结果提出的科学假设等,都始终受到理论的支配.即科学实验是科学理论的源泉,是自然科学的根本,是工程技术的基础,同时科学理论又对科学实验起着指导作用.因此,我们要处理好实验和理论的关系,重视科学实验,重视进行科学实验训练的实验课.

二、物理实验的地位和作用

物理实验是自然科学的基础,反映了理工科实验的共性和普遍问题,在科学、技术的发展中有着独特的作用.历史上每次重大的技术革命和科学理论发展几乎都源于物理学上的重大发展.从热力学、气体动理论的发展,引起了蒸汽机的发明和广泛应用,使人类开始进入工业时代.而法拉第电磁感应的实验研究、电磁学理论建立引起的电机的发明以及无线电通信的发展,使得人类进入到了电气化时代.相对论、量子力学、原子物理学的发展,促进了半导体、原子核、激光、电子计算机技术的迅猛发展.从三、四百年前,伽利略和牛顿等科学家,以科学实验的方法研究自然规律,逐渐建立物理科学至今,几乎所有物理概念的确立、物理规律的发现、物理理论的建立,都是在实验的基础上发展而来并通过实验检验的.

纵观物理学的发展史,如果没有从库仑定律到法拉第电磁感应定律等一系列实验规律的发现,就不可能有麦克斯韦电磁学理论方程组;如果没有德国物理学家康尔鲍姆和鲁本斯对热辐射光谱所做的精确测量的结果,就不可能有普朗克的能量子假设和利用数学方法导出的符合实验

结果的黑体辐射公式,等等。

物理实验不仅在物理学自身的发展中起着重要的作用,在推动其他学科和技术的发展中也起着重要的作用.特别是在近代,各学科相互渗透,产生了许多交叉学科和边缘学科,物理实验的构思、方法和技术在与诸如化学、生物学、天文学、材料科学等学科的相互结合中已取得了巨大的成果,而且其前景是非常广阔的。

因此,作为培养高级工程技术人才的高等学府,不仅要使学生具备比较深厚而广博的科学理论知识,而且要使学生具有较强的从事科学实验的能力.大学物理实验作为高等学校对学生进行系统的科学实验基本技能训练的第一门独立的必修基础课,是学生进行实验基本技能训练的开端,不仅培养学生学习运用实验的方法去观察、发现、分析、研究和解决问题的能力,也为培养学生获取知识的能力,提高学生科学实验素质,以及适应今后的学习和工作打下了一个良好的基础。

三、物理实验课的目的、任务和基本要求

1. 目地

物理实验课是学生进入大学后受到系统实验方法和实验技能训练的开端,是学生进行科学实验训练的基础,系统地学习科学实验的基础知识、思维方式、实验方法和测量技术,对学生科学思维方式、创新意识、科研能力、科学作风和综合素质的培养都具有极其重要的作用.课程的主要目的是在中学物理实验的基础上,按照循序渐进的原则,学习物理实验的知识、方法和技能,使学生了解科学实验的主要过程与基本方法,训练学生动脑、动手能力,为各学科本科生的后续课程学习和工作奠定良好的基础。

2. 任务

物理实验课的主要任务有以下三个方面:

(1) 通过对实验现象的观察、分析和对物理量的测量,使学生进一步掌握物理实验的基本知识、基本方法和基本技能;并能运用物理学原理和物理实验方法研究物理现象和规律,加深对物理学原理的理解。

(2) 培养与提高学生的科学实验能力,其中包括:

- ① 自学能力:能够通过阅读教材或参考资料正确理解实验内容,做好实验前的准备;
- ② 动手实践能力:能够借助教材和仪器说明书正确调整和使用常用仪器;
- ③ 思维判断能力:能够运用物理学理论对实验现象进行初步分析和判断;
- ④ 书写表达能力:能够正确记录和处理实验数据,绘制图线,说明实验结果,撰写合格的实验报告;
- ⑤ 简单的设计能力:能够根据课题要求,确定实验方法和条件,合理地选择仪器,拟定具体的实验程序,完成实验的测量过程。

(3) 培养与提高学生从事科学实验的素质,要求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、爱护公共财产的优良品德。

3. 基本要求

通过物理实验的训练,使学生达到以下几点要求:

- (1) 能够独立完成实验课前的预习、实验操作以及撰写实验报告等实验内容。

(2) 能够完成实验装置的调整,掌握常用的实验操作技术.如零位调整,水平、竖直调整,电路的连接,光路的共轴调整等.

(3) 了解常用的实验方法和测量技术,如比较法、放大法、转换法、模拟法、补偿法、平衡法等方法.

(4) 能够对常用物理量进行测量,如长度、质量、时间、温度、电流、电压、电阻、磁感应强度、折射率等.

(5) 熟悉常用仪器的性能,掌握其使用方法.如长度测量仪器、天平的使用、时间计量、温度测定仪、变阻箱、电表的使用、直流与交流电桥的使用、电位差计、双踪示波器的使用、低频信号发生器的使用、分光计的调节等.

四、物理实验课的基本程序

物理实验课是一门实验基础课,其教学的着重点是严格的基础技能和思维判断能力的训练,而不是对所谓“成果”的追求.物理实验课的基础实验内容基本上都属于验证性实验,即重复前人已有的实验过程.学生在教师的指导下通过实验过程学习实验的理论与技术,提高各方面的能力.

每个实验过程一般都要经历三个阶段:

1. 实验预习

物理实验课虽然是在教师的指导下由学生独立完成的,但为了在规定的时间内完成实验内容,实验者一定要做好实验课前的预习.

理论准备:应从教材的所有有关章节和有关参考书籍中了解实验原理.由于指导教师在实验课中一般不进行这部分内容的讲解,所以一定要在课前弄清有关实验原理,否则,在进行实验时只能机械地按照规定步骤进行实验,尽管能够照猫画虎地取得一些数据,但不会注意到实验方法中的技巧,不能理解实验现象,当然更谈不上深入理解各种现象的本质,并对这些现象进行主动地分析了.

实验仪器的准备:仔细阅读教材中对实验仪器介绍的有关部分,了解实验目的、原理、方法、实验条件及关键步骤,包括实验仪器的构造原理、使用方法、注意事项等,做到心中有数.

经过对教材及有关材料的阅读、理解,实验者在实验前应该通过对下列问题的思考来检查自己的预习效果:“这次实验要达到的目的是什么?我应在实验中掌握哪些实验理论和实验技能?在实验中实现预定目的的基本步骤是什么?”实验者应在实验前写好预习报告.在实验完成后,撰写正式的实验报告.

2. 实验过程

一般实验课开始时,教师均要就所做实验的重点问题进行提示性讲解.在听讲解时要特别注意弄清预习时未弄懂的有关问题和讲义上未涉及的一些实验技术问题.在这段时间内,教师也会讲一些需要特别注意的地方,或宣布一些在本实验中必须遵守的特殊规定.

实验的第一步是要安装或调整仪器.我们不能指望所有的仪器都是高质量、高精度的,也不能认为所有的仪器都应处在恰到好处状态,实验测量过程都能够一帆风顺,因此我们必须将每件仪器都调整到最好的状态,在实验中养成良好的心态.实验者应了解仪器的性能和使用方法,在调整过程中要仔细、要有耐心.为了使仪器达到最佳的工作状态,调整仪器通常要占用实验的

大部分时间,仪器调整好了,测量就会比较顺利.所有的测量都必须记录原始实验数据,即直接从仪器上读到的数据.调整及测量中如遇仪器发生故障,要在教师指导下学习排除故障的方法.如有疑问,应反复测量,争取发现其规律,并可与指导教师商量、讨论.

实验记录应全面、客观地反映整个实验研究过程,包括现象的观察记录、实验数据的记录、测量过程的记录以及实验环境、条件的记录等.对实验数据要严肃对待,用钢笔或签字笔记录原始数据,实验记录时注意有效数字,如遇表格内记录数据错误,不能涂改,而应轻轻划去,在旁边重新记录正确实验数据,使得正确数据与错误数据都能清晰可辨,以供在分析实验数据时提供参考.实验测量结果必须经指导教师审阅.原始数据应记录在报告册的规定栏内.原始数据不能随意涂改,若有记录错误需要修改,应另列记录表格,而不应在原有数据上涂改.

实验结束后,要将测量的原始数据交给指导教师检查、签字后,实验者才能整理仪器,离开实验室.

3. 实验总结

这部分内容是在实验课后完成.实验报告是实验工作的总结,撰写实验报告也是实验能力的一个方面,应认真完成实验报告中的每个项目中的规定内容.具体撰写方法可参阅 1.8 节内容.实验报告应做到书写清晰,数据处理正确,图表合格,内容简明扼要,并对实验结果有一定的分析.

五、物理实验室规则

1. 实验者应在规定时间内进行实验,不得随意迟到或缺席.凡因病需请假者,需将医院证明交给指导教师;凡因事需请假者,应在课前将由院级所开有关证明交指导教师,方可准假.否则,均按旷课处理;
2. 进入实验室后,应将已完成的预习报告放在实验台上,经指导教师检查认可后,方可进行实验;
3. 凡迟到超过十分钟或没有预习或预习不合格者,不得进行实验;
4. 进入实验室后,应注意保持实验室的安静和整洁.实验者应对号入座,不得擅自搬动或使用其他实验台上的仪器;
5. 实验中若发现仪器工作不正常或测量数据不合理,应立即与指导教师联系;
6. 遵守仪器操作规则,注意人身安全和设备安全.光学仪器严禁用手触摸光学表面;电学实验中电路连接好后,应经过指导教师的检查许可后,方可接通电源,否则,自负其责;
7. 实验完成后,原始数据经指导教师审阅检查后,方可整理仪器,离开实验室;
8. 每次实验后应留两名同学打扫实验室卫生.

第一章 物理实验数据处理基本知识

§ 1.1 测量的基本概念

1.1.1 测量及其表示

在科学实验中,一切物理量都要通过测量得到,同时还要寻找以及确定各物理量之间的内在联系.就广义来讲,测量就是用实验手段对自然界中的现象和客观实体取得定量信息的过程.具体而言,就是借助测量工具或仪器,通过一定的测量方法,直接或间接地将待测物理量与选定为计量标准单位的同类量进行定量比较,从而得到比值的过程^[1].显然,这个量值的大小与所选择的标准量的单位有关,单位越大,量值越小,反之亦然.

测量者对待定测量对象进行测量时,要想获得正确的测量结果,就必须选择能够正确定量比较的仪器或设备,同时使用正确的测量方法,并在一定的条件下进行,所以测量者、测量对象、测量仪器、测量方法、测量条件都是测量的要素.

为确定被测对象的测量值,首先要选定一个单位,然后用这个单位与被测量进行比较,得出它对该单位的比值——倍数,这个数即为数值.作为被测量的测量数据,由数值和单位两部分组成.一个数值有了单位,才具有特定的物理意义,这时它能够称为是一个物理量.因此,作为待测物理量应由数值和单位两部分组成,缺一不可.

另外,物理量之间并不是独立存在的,而是由物理定义和物理定律联系起来的,人们只需要规定几个物理量的单位,便可以根据其定义或内在规律推导出其他的物理量.因此,将独立定义的单位称为基本单位,所对应的物理量称为基本量.而由基本单位导出的单位称为导出单位,对应的物理量则称为导出量^[2].

目前,在物理学中各物理量的单位需按照中华人民共和国法定计量单位的规定,以国际单位制(SI)为基础的法定计量单位.国际单位制是1971年第十四届国际计量大会上确定的,它是以米(长度)、千克(质量)、秒(时间)、安培(电流)、开尔文(热力学温度)、摩尔(物质的量)和坎德拉(发光强度)作为基本单位,称为国际单位制的基本单位;其他量(如力、能量、电压、磁感应强度等)单位可由这些基本单位导出.

1.1.2 测量的分类

按照测量方法,将测量分为直接测量和间接测量两大类.

一、直接测量

用测量仪器或仪表能直接测出被测量的测量过程称为直接测量.相应的被测量称为直接测量量.直接测量是物理实验中最基本的一种测量方式.例如:用米尺、游标卡尺、千分尺测量物体的长度;用天平称物体的质量;用秒表测时间;用温度计测量温度;用电流表测量电流;用电压表测量电压等.对于直接测量,按测量的次数,分为单次测量和多次测量.

1. 单次测量:只进行一次的测量称为单次测量.单次测量主要在以下情况时采用:

(1) 由于测量条件所限制使测量所带来的误差远大于仪器的不确定度;

(2) 由于该测量量的不确定度远小于其他测量量的不确定度.

2. 多次测量:测量次数超过一次的测量都称为多次测量.对于多次测量,按测量条件又可分为等精度测量和非等精度测量.

(1) 等精度测量:在相同的测量条件下,对同一被测量进行的多次重复测量.相同的测量条件是指同一实验环境、同一测试者、同一组测量仪器、同一种测量方法等,对于该物理量进行有限次测量,得到一组实验测试数据,每次的测量值并不相同,但每次测量结果的可靠性都一样,没有理由认为哪一次(或几次)的测量值更可靠或更不可靠.等精度测量值构成了一组测量列.

(2) 非等精度测量:在不同测量条件(如使用不同的仪器、不同的测量方法、由不同的操作者测量)下,对同一物理量的多次测量.对于非等精度测量而言,每次测量结果的可靠性不同.在处理不等精度测量结果时,需要通过“加权平均”进行数据处理,但在一般实验中很少采用“加权平均”的处理方法^[3].

实际上,一切物质都在运动中,没有绝对不变的人或事物,并且在测量过程中保持测量条件完全相同,是一件很困难的事情,只要某一条件的变化对实验测量结果的影响不大,甚至可以忽略时,就可以认为测量过程为等精度测量.

二、间接测量

指待测量是由若干可直接测量的物理量按一定函数关系运算后获得的结果.例如,欲测物体运动的平均速度 \bar{v} ,可由直接测量物体运动的时间 Δt 和在时间 Δt 内通过的位移 Δs ,经公式 $\bar{v} = \Delta s / \Delta t$ 计算得出.

直接测量和间接测量是相对的.对于同一物理量,由于使用的测量方法不同,它可以是直接测量量,也可以是间接测量量.一个直接测量量在一定条件下可以通过间接测量方法得到,而一个间接测量量在一定条件下也可通过直接测量方法得到.例如:一根金属细丝的直径用螺旋测微器测量属于直接测量,改用单丝衍射方法去测量,则属于间接测量.

随着现代科学技术特别是传感技术和计算机技术的迅速发展,复杂的间接测量被相对简单的直接测量所取代.如用伏安法测电阻是间接测量,但利用计算机对电流和电压同时取样、计算后,在屏幕上显示的就是直接测量量——电阻^[4].

1.1.3 测量误差及分类

从测量的要求来说,人们总希望测量的结果能很好地符合客观实际.但在实际测量过程中,

由于测量仪器、测量方法、测量条件和测量人员的观察能力等因素的局限,不可能使测量结果与客观存在的真值完全相同,我们所得到的测量结果只能是待测量的近似值。

任何被测物理量的大小在一定客观条件下总存在着一个真实数值,即物理量的真实值,一般称为“真值”(true value),记为 μ 。但是,在具体测量物理量的过程中,无论我们怎样改进实验方法,提高仪器精度和操作人员的水平,由于受各种条件的影响,如测量方法不可能完美无缺、实验仪器灵敏度和分辨能力的有限性、测量环境的不稳定性等因素的影响,所得到的测量值(记为 x)与真值不会完全相等,总是存在着一定的误差,但实验者应该根据要求和误差限度来制定或选择合理的测量方案与仪器。不能不切实际地要求:实验仪器的精度越高越好;环境测量温度总是恒温、恒湿、恒压,越稳定越好;测量次数总是越多越好。一个优秀的实验工作者,应该在一定的要求下,以最低的代价来取得最佳的实验结果。要做到既保证必要的实验精度,又合理地节省人力与物力。误差自始至终贯穿于整个测量过程之中,为此必须分析测量中可能产生各种误差的因素,尽可能消除其影响,并对测量结果中未能消除的误差作出评价。

测量值与真值之差被称为测量误差,简称误差,用符号 ε_x 表示

$$\text{误差} = \text{测量值} - \text{真值}$$

即 $\varepsilon_x = x - \mu$ (单位) (1.1-1)

误差反映测量值偏离真值的程度,误差越小,测量值越接近于真值。误差按其量值表达方式的不同,可分为绝对误差和相对误差。

ε_x 表示测量结果 x 与真值 μ 之间的差值以一定的可能性(概率)出现的范围,即真值以一定的可能性(概率)出现在 $x - \varepsilon_x$ 和 $x + \varepsilon_x$ 区间内,称为绝对误差,不仅具有大小,而且具有与测量值相同的量纲。

相对误差使用符号 E_x 表示。由于仅根据绝对误差的大小还难以评价一个测量结果的可靠程度,还需要看测定值本身的大小,故用相对误差更直观地表达测定值的误差大小。相对误差反映的是测量值偏离真值的相对大小,定义为

$$E_x = \frac{|\varepsilon_x|}{\mu} \times 100\% \quad (1.1-2)$$

相对误差 E_x 没有量纲,是一个百分数表示的比值。

绝对误差一般取1位数字表示,尾数只进不舍。例如,绝对误差0.0218,一般写为0.03。相对误差常加百分号,一般取2位数字表示。

由于测量过程中的各种限制和各种因素的影响无法完全消除,所以误差自始至终存在于一切科学实验过程中,真值是无法得到的,所以也无法得到误差的准确值,只能对其范围进行估算。所以实验的结果不仅要包括测量所得的数据,而且还要包括误差的范围。

测量永远不可能得到真值,因此在估算误差和评定测量结果时,一般用“约定真值”来替代真值。约定真值被定义为:“对于给定的目标而言,被认为充分接近于真值,可用以替代真值的量值”。一般用被测量的公认值、测量列的平均值、高等级的仪器的测量值(相对真值)等作为被测量的约定真值。

为了使测量结果尽可能地接近真值,测量者需要对测量量进行分析与研究,找出影响测量结果误差的来源、种类以及性质,采用必要的方法尽可能地减少误差。误差按其性质和产生的原因可分为系统误差、随机误差、粗大误差和误差转化四类。

一、系统误差

系统误差(systematic error)是指在相同的测量条件下(指测量方法、仪器、环境、操作者等不变)对同一量进行多次测量过程中,测量结果总是向着一个方向偏离,误差的数值和符号保持恒定,或按一定规律变化的测量误差分量。

系统误差产生的主要原因有:

1. 仪器误差:

由于仪器本身结构的不完善或存在着固有缺陷,在仪器所规定的使用条件下使用造成的误差.如仪器刻度不准;砝码本身未经校准;仪器的水平或竖直未调整等。

2. 仪器零位误差:

在使用仪器时,仪器零位未校准所产生的误差.如游标卡尺、千分尺、电表等仪器的零位不准等。

3. 理论(方法)误差:

由于实验方法的不完善或实验所依据的原理不够完善,或测量方法所依据的理论公式在一定条件下带有近似性,或实验条件未达到理论公式要求的条件所产生的误差.如用单摆测量周期所用公式 $T=2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$ 成立的条件是摆角趋于零、摆球的质量集中在摆球的中心等,在实验中这些条件都无法满足。

4. 环境条件误差:

外界环境(如温度、湿度、光照、气压、电磁场等)发生变化或不满足测量仪器规定的使用条件所造成的误差.如标准电池以 20 ℃ 的电动势为标准值,若在较低温度下使用,如果不进行电势的修正会引入系统误差。

5. 人为误差:

由于实验者感觉器官的缺陷或某种不正确习惯所造成的误差.如读电学仪表指针读数时总是用一只眼睛去看,或习惯侧坐斜视读数而造成读数的偏大或偏小.使用秒表计时过程中,每个人的反应快慢不同而结果不同等。

系统误差的数值和符号一般来说是定值或按某种规律发生变化.根据其特点,系统误差又可分为可修正系统误差(也称为已定系统误差)和不可修正系统误差(也称为未定系统误差).凡是数值、符号可以确定的系统误差即为可修正系统误差,如仪器零位误差、理论误差等.我们根据它的大小和符号对测量结果进行修正即可消除它的影响.只能估计其大小但不能确定其符号的系统误差称为不可修正系统误差,如某些仪器的仪器误差等。

可通过校准仪器、改进实验装置和实验方法或对测量结果进行理论上的修正来消除或减小系统误差.系统误差的消除、减少或修正都属于实验技能问题,可在实验前、实验中、实验后进行.如实验前对实验仪器进行校准、对理论和实验方法进行分析使其完善、对实验者进行一定的培训;实验后在对测量结果处理时进行修正等.但在另一方面,要找出产生系统误差的原因,寻求其规律却并非易事.因为:

(1) 由于系统误差的特点,若不改变实验条件,在相同的条件下进行多次测量并不能发现系统误差。