普通高等教育“十二五”理工类基础课程规划教材

大学物理实验

DAXUE WULI SHIYAN

主编　单雯雯　袁保合

河南科学技术出版社

需要全本请访问 www.ertongbook.com

普通高等教育“十二五”理工类基础课程规划教材

大学物理实验

主编　单雯雯　袁保合

河南科学技术出版社

·郑州·

内 容 提 要

本教材是根据教育部高等学校物理学与天文学教学指导委员会最新颁布的《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》编写的。全书共分 8 章：绪论详细介绍了大学物理实验课程的基本要求和学生实验守则及操作规则；第 1 章详细介绍了误差理论及实验数据处理的基本方法；第 2 章至第 5 章选编了 37 个实验，涵盖了力学、热学、电学、光学四部分内容；第 6 章选编了 15 个具有代表性的近代物理实验；第 7 章编写了 20 个演示实验。这些实验都以突出对学生基本能力的训练、实验技能的培养和科学实验能力的提高而精心设计的，其中也有一些设计性实验，是本着开发学生智能，培养与提高学生创新思维、创新方法、创新能力而安排的。为方便学生记录实验数据，规范实验数据的处理，有的实验还编排了实验数据记录表并给出了实验数据处理公式、不确定度计算步骤等。

本教材体系完备、内容翔实、图文并茂、深入浅出，具有较强的可操作性和广泛的适用性。它既可作为理工科本科院校大学物理实验课教材，也可作为高等院校大学物理实验课教师的教学参考书。

图书在版编目（CIP）数据

大学物理实验/单雯雯，袁保合主编．—郑州：河南科学技术出版社，2012.9

（普通高等教育“十二五”理工类基础课程规划教材）

ISBN 978－7－5349－5946－2

Ⅰ.①大… Ⅱ.①单…②袁… 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（2012）第 184531 号

出版发行：河南科学技术出版社

地址：郑州市经五路 66 号　　邮编：450002

电话：（0371）65788001　65788626

网址：www.hnstp.cn

策划编辑：徐素军

责任编辑：徐素军

责任校对：柯　姣

封面设计：张　伟

版式设计：栾亚平

责任印制：张艳芳

印　　刷：洛阳和众印刷有限公司

经　　销：全国新华书店

幅面尺寸：185 mm×260 mm　　印张：19.5　　字数：460 千字

版　　次：2012 年 9 月第 1 版　　2012 年 9 月第 1 次印刷

定　　价：35.00 元

如发现印、装问题，影响阅读，请与出版社联系调换。

《大学物理实验》编写人员名单

主　编　单雯雯　袁保合

副主编　宋　玲　凌　红

编　委　（以姓氏笔画为序）

马珊珊　王红利　龙从国　闫淑卿

李子炯　杨大鹏　邱淑荣　宋　玲

郑　锐　单雯雯　赵　山　秦　臻

袁保合　徐　斌　凌　红

前　言

物理学的形成与发展是以实验为基础的。物理学的研究方法通常是在观察和实验的基础上，对物理现象进行分析、抽象概括和总结，从而建立物理定律，进而形成物理理论，然后物理理论再回到实验中去经受检验。实验是物理科学的基础，也是物理知识的源泉。加强物理实验既是物理教学的时代特征，又是提高物理教学质量的先决条件。

大学物理实验是对高等理工科学校学生进行科学实验基本训练的一门独立的必修基础课程，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，是各专业后继实验课程学习的重要基础，是大学生从事科学实验工作的入门。

按照教育部高等学校物理学与天文学教学指导委员会最新颁布的《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》，汲取国内兄弟院校同类型实验教材的精华，结合华北水利水电学院多年来大学物理实验教学的实践经验，突出水电专业特色，在原有实验教材的基础上，我们编写了这本大学物理实验教材。

本教材的编写理念是，以学生为中心，突出对学生基本能力的训练和创新思维、创新方法、创新能力的培养。在撰写格式上，实验原理中的物理理论和公式的推导尽量精简，注重实验方法、实验操作技能和数据处理方法的介绍，并通过预习思考题引导学生自主学习，查阅资料。在教材的框架结构上，按照力学、热学、电学、光学、近代物理学传统编写顺序，由简到繁地编排实验。为方便学生记录实验数据、规范实验数据的处理，多数实验都编排了实验数据记录表并给出了实验数据处理公式、不确定度计算步骤等。

教材共分 8 章：绪论详细介绍了大学物理实验课程的基本要求和学生实验守则及操作规则；第 1 章详细介绍了误差理论及实验数据处理的基本方法；第 2 章至第 5 章选编了 37 个实验，涵盖了力、热、电、光四部分内容；第 6 章选编了 15 个具有代表性的近代物理实验；第 7 章编写了 20 个演示实验。这些实验都以突出对学生基本能力的训练、实验技能的培养和科学实验能力的提高而精心设计，其中也有一些设计性实验，是本着开发学生智能，培养与提高学生创新思维、创新方法、创新能力而安排的。

教材中的实验内容编排有较强通用性，全书体系完备、内容翔实、图文并茂、深入浅出，既可作为高等理工科本科院校大学物理实验课教材，也可作为高等院校大学物理实验课教师的教学参考书。

本书由单雯雯、袁保合担任主编，具体编写分工为：第0章和第1章由郑锐编写；第2章中的2.1、2.2、2.6由秦臻编写，2.3、2.4、2.5、2.7由杨大鹏编写；第3章的3.1、3.7、3.9、3.10由袁保合编写，3.2、3.5、3.6、3.11、3.12、3.13和第7章的7.5、7.10由单雯雯编写，3.3、3.4、3.8，第5章中的5.4、5.5、5.6和第7章的7.11、7.16由宋玲编写；第4章的4.1、4.9、4.10、4.11、4.12、4.13以及第7章的7.13由邱淑荣编写，4.2、4.3、4.4、4.14和7.17由赵山编写，4.5、4.6、4.7、4.8和7.18、7.19由王红利编写；第5章的5.1、5.2、5.3和第7章的7.6、7.7、7.8、7.9由阎淑卿编写；第6章的6.1、6.2、6.3、6.4、6.5由徐斌编写，6.6、6.7、6.8、6.9由龙从国编写，6.10、6.11、6.12、6.13、6.14、6.15由马珊珊编写；第7章的7.1、7.2、7.3、7.4由李子炯编写，7.12、7.13、7.14、7.15、7.20由凌虹编写。全书由单雯雯、袁保合、宋玲、凌虹统稿定稿。

由于编者的水平有限，书中可能存在不妥之处，恳请读者不吝指正。

编　　者

2012年5月

目　录

0　绪　论 …… (1)
0.1　大学物理实验的地位与作用 …… (1)
0.2　实验物理学的形成及内容 …… (2)
0.3　大学物理实验的作用、任务和基本要求 …… (3)
0.4　大学物理实验课的基本教学程序 …… (3)
1　误差分析和数据处理 …… (6)
1.1　测量与误差 …… (6)
1.2　测量的不确定度和测量结果的表示 …… (13)
1.3　有效数字及其运算规则 …… (20)
1.4　数据处理的基本方法 …… (21)
习题 …… (28)
2　力学实验 …… (31)
2.1　实验一：速度和加速度的测量 …… (31)
2.2　实验二：物体振动的研究 …… (35)
2.3　实验三：刚体转动惯量的测量 …… (39)
2.4　实验四：拉伸法测量杨氏模量 …… (44)
2.5　实验五：纵向共振法测金属棒的杨氏模量 …… (51)
2.6　实验六：用光杠杆法测量薄纸厚度 …… (55)
2.7　实验七：用单摆测量重力加速度 …… (56)
3　电磁学实验 …… (59)
3.1　电磁学实验操作规则 …… (59)
3.2　实验八：数字式万用表的原理与使用 …… (59)
3.3　实验九：电表的改装 …… (69)
3.4　实验十：示波器的原理与使用 …… (71)
3.5　实验十一：超声波在空气中传播速度的测量 …… (85)
3.6　实验十二：超声波在固体和液体中传播速度的测量 …… (90)
3.7　实验十三：用惠斯通电桥测电阻 …… (91)
3.8　实验十四：用直流双臂电桥（开尔文电桥）测电阻 …… (97)
3.9　实验十五：热敏电阻温度特性的测量及改装温度表 …… (101)

3.10 实验十六：电位差计的原理与使用 …… (106)
3.11 实验十七：用箱式电位差计校准微安表 …… (110)
3.12 实验十八：用光电效应法测普朗克常数 …… (112)
3.13 实验十九：用光电效应实验仪测薄膜的光吸收系数 …… (117)
4 光学实验 …… (120)
4.1 光学实验基础知识…… (120)
4.2 实验二十：牛顿环与劈尖干涉…… (122)
4.3 实验二十一：单缝衍射…… (129)
4.4 实验二十二：偏振光的观测与研究…… (134)
4.5 实验二十三：分光计的原理及三棱镜顶角的测量…… (137)
4.6 实验二十四：用分光计测量三棱镜的折射率…… (145)
4.7 实验二十五：光栅衍射…… (148)
4.8 实验二十六：双棱镜干涉测量单色光波长…… (152)
4.9 实验二十七：用迈克耳孙干涉仪测单色光的波长…… (156)
4.10 实验二十八：测量钠双黄线的波长差与光源的相干长度 …… (161)
4.11 实验二十九：用迈克耳孙干涉仪测量薄膜厚度 …… (163)
4.12 实验三十：用迈克耳孙干涉仪测量空气的折射率 …… (164)
4.13 实验三十一：莫尔条纹的观测与应用 …… (166)
4.14 实验三十二：波晶片与光的偏振状态的观察研究 …… (169)
5 传感器实验 …… (172)
5.1 传感器基础知识…… (172)
5.2 实验三十三：霍耳位移传感器…… (173)
5.3 实验三十四：霍耳转速传感器…… (178)
5.4 实验三十五：电阻应变式传感器…… (180)
5.5 实验三十六：电涡流式位移传感器…… (185)
5.6 实验三十七：电容式位移传感器…… (188)
6 近代物理实验 …… (191)
6.1 实验三十八：验证多普勒效应并测声速…… (191)
6.2 实验三十九：利用多普勒效应研究匀变速直线运动…… (194)
6.3 实验四十：利用多普勒效应研究自由落体运动…… (197)
6.4 实验四十一：利用多普勒效应研究简谐振动…… (199)
6.5 实验四十二：利用多普勒效应研究阻尼振动…… (201)
6.6 实验四十三：全息照相…… (204)
6.7 实验四十四：密立根油滴实验…… (208)
6.8 实验四十五：核磁共振…… (215)
6.9 实验四十六：弗兰克—赫兹实验…… (218)
6.10 实验四十七：塞曼效应的观测 …… (221)
6.11 实验四十八：单光子稳态光荧光谱的测量 …… (224)
6.12 实验四十九：光速的测量 …… (226)

6.13 实验五十：高温超导材料特性的测试 …… (229)
6.14 实验五十一：阿贝成像原理与空间滤波 …… (233)
6.15 实验五十二：全息光栅 …… (237)
7 演示实验 …… (240)
7.1 锥体上滚 …… (240)
7.2 角动量守恒实验 …… (241)
7.3 滚柱式转动惯量实验 …… (243)
7.4 飞机升力 …… (244)
7.5 伽尔顿板演示 …… (245)
7.6 水波实验 …… (246)
7.7 共振实验 …… (247)
7.8 机械波实验 …… (248)
7.9 能量转换机 …… (254)
7.10 静电学实验 …… (255)
7.11 高压带电实验 …… (257)
7.12 雅格布天梯实验 …… (259)
7.13 亥姆霍兹线圈 …… (259)
7.14 电磁炮 …… (261)
7.15 三相旋转磁场 …… (262)
7.16 趣味光学展示 …… (263)
7.17 光的干涉与衍射 …… (266)
7.18 偏振光的干涉 …… (269)
7.19 旋光色散 …… (270)
7.20 超导磁悬浮实验 …… (271)
参考文献 …… (273)
附 录 …… (274)
附表 1 基本物理常量表 …… (274)
附表 2 标准大气压下不同温度时水的密度 …… (275)
附表 3 在 20℃时常用固体和液体的密度 …… (275)
附表 4 海平面上不同纬度处的重力加速度 …… (276)
附表 5 在 20℃时某些金属的杨氏模量 …… (276)
附表 6 固体的线胀系数 …… (276)
附表 7 固体的比热容 …… (277)
附表 8 液体的比热容 …… (277)
附表 9 一些金属或合金的电阻率及其温度系数 …… (278)
附表 10 不同温度时干燥空气的声速 …… (278)

0 绪 论

0.1 大学物理实验的地位与作用

无论是经典物理学还是近代物理学的发展都与物理实验息息相关。例如，经典力学起源于伽利略的实验——比萨斜塔实验和理想斜槽实验；热学的发展源于温度计的发明和热机的使用；电磁学进入科学研究时代源于库仑扭秤和电流的磁效应等实验；物体的投影、小孔成像，平面镜、凸面镜和凹面镜成像铸就了几何光学的辉煌；虽然波动光学的成就源于菲涅耳原理，但是杨氏双缝干涉、泊松亮斑和光的偏振实验为波动光学的理论提供了有力支持。近代物理学的发展虽然理论成果占有较大的比重，但是相对论力学和量子力学的起源分别是迈克耳孙—莫雷实验测量的零结果和黑体辐射理论出现的紫外灾难。物理实验另一个重要的方面体现在诺贝尔物理学奖。诺贝尔物理学奖从 1901 年第一次授奖至今已超过百年的历史，80％以上的诺贝尔物理学奖授予了实验物理学家，剩下 20％的奖很多是实验和理论物理学家分享的。因此，物理学的发展绝不能脱离物理实验而独立发展。因发现 J/φ 粒子而获得诺贝尔物理学奖的丁肇中教授在斯德哥尔摩的颁奖仪式上曾语重心长地讲过这样一段震撼人心的话：我是在旧中国长大的，因此想借这个机会向发展中国家的青年强调实验工作的重要性。中国有一句古话：“劳心者治人，劳力者治于人”，这种落后的思想对发展中国家的青年们有很大的害处。由于这种思想，很多发展中国家的学生都倾向于理论研究，而不重视实验工作。事实上，自然科学理论不能离开实验基础，特别是从实践中产生的物理学。我希望由于我这次获奖，能够唤起发展中国家的学生们对实验科学的兴趣，从而注意到实验工作的重要性。丁肇中教授的讲话值得大家认真体会。

物理学的形成与发展是以实验为基础的。物理学的研究方法通常是在观察和实验的基础上，对物理现象进行分析、抽象概括和总结，从而建立物理定律，进而形成物理理论，再回到实验中去经受检验。实验是物理科学的基础，也是物理知识的源泉，加强物理实验是物理教学的时代特征，又是提高物理教学质量的先决条件。在研究物理现象时，实验的任务不仅是观察物理现象，更重要的是找出各物理量之间的数量关系，找出它们变化的规律。任何一个物理定律的确定，都必须依据大量的实验材料。即使已经确定的物理定律，如果出现了新的实验事实和这个定律相违背，则需要修正原有的物理定律或物理理论。因此，物理实验是物理理论的基础，它是物理理论正确与否的试金石。物理实验既为开拓新理论、新领域奠定基础，又是丰富和发展物理学应用的广阔天地。最近数十年来，物理学和其他学科一样发展很快，尤其是核物理、激光、电子技术和计算机等现代化科学技术的发展，更反映了物理实验技术发展的新水平。科学技术的发展越来越多地体现出物理实验技术的重要性，基于这方面的原因，人们逐渐感到理工科及师范院校加强对学生进行物理实验训练的重要性，在实验

过程中，通过理论的运用与实验现象的观测分析，理论与实验相互补充，从而使学生加深对物理理论知识的理解。

总之，物理学的发展离不开物理实验的支持，而物理实验是有目的地去尝试，是对自然的积极探索。科学家提出某些假设和预见，为对其进行证明，需要选择适当的方法反复进行实验，并根据产生的现象来判断现有假设和预测的真伪。因此科学实验的重要性是不言而喻的。另外，实验不同于对自然现象的直接观察，也不同于生产过程中的直接经验。其特点是：首先，可以利用实验方法控制实验条件，排除外界因素的干扰，从而能有效地突出被研究诸事物之间某种重要的关系；其次，可以把复杂的自然现象或生产过程分解为若干独立的现象和过程，进行个别和综合的研究；再次，可以对现象和过程进行满足预期准确度要求定量测量，以揭示现象和过程中的数量关系；最后，可以进行重复实验，或改变条件进行实验，便于对事物的各方面作广泛的比较和分析等。因此，对于目前高等理工院校，尤其是以工科为主的院校，物理实验课程是学生进入大学后受到系统实践训练和技能训练的开端，是学生进行专业实践训练乃至进行实验科学研究的重要基础。同时，教育部高等学校物理学与天文学教学指导委员会把大学物理实验课列为高等理工院校培养大学生进行科学实验基本训练的一门独立的、重要的必修基础课程。所以，学好物理实验对理工院校的学生来说是十分重要的，也是必要的。

0.2　实验物理学的形成及内容

20 世纪 50 年代以前，世界各国对物理实验课的认识仅停留在“物理实验课程是物理课程教学的一个环节”上，主要是因为物理实验的科学成果转变为现实生产力的发展还比较缓慢。直到 20 世纪 60 年代，人们逐渐认识到了科学实验在尖端技术发展中的地位，实验科学技术的成果也很快地应用于生产实践，极大地推动了社会生产力的发展，同时也逐渐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。因此，人们这时明确地提出了“加强基础理论教学与加强基础实验教学并重”的观点，自此物理实验教学开始脱离物理理论教学而单独开设。它在内容上包括了许多物理课本所包括不了的理论知识、方法和技能，主要表现在以下几方面。

（1）实验手段的发展。表现在从简单的测量仪器，发展为以机、电、光为基础的门类齐全、并日益扩展的仪器系列。精确度不断提高，适用范围不断开拓，自动化程度不断提高等。遥感、遥控、遥测技术的应用，使仪器已经从简单的物理原理脱胎出来，成为独立体系。

（2）对现象的观测、实验方案的设计、过程控制以及资料分析、结果归纳等一系列实验方法，在前人积累和现代科学技术发展的基础上，发展成为较完整的系统。

（3）综合了数学、物理等学科的成就，形成了实验的数据处理、误差分析的严格理论体系，并已有成效地指导着实验的各个环节，使之顺利进行。

（4）为解决各种精确测量和精密实验中的实际问题，综合利用了多学科和多专业技术的交叉，形成了实验物理学的独立科学技术体系。

0.3 大学物理实验的作用、任务和基本要求

1. 作用

大学物理实验是对高等理工科学校学生进行科学实验基本训练的一门独立的必修基础课程，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，是各专业后继实验课程的重要基础。也就是说，它是大学生从事科学实验工作的入门。物理实验能够培养和提高学生的科学实验能力和科学实验素养；同时，在培养学生良好的科学素质和科学世界观方面，物理实验也起到了潜移默化的作用。

2. 任务

大学物理实验课程的教学任务是：使学生在中学物理实验的基础之上，按照循序渐进的原则，学习物理实验知识和方法，在实验技能上得到训练，从而初步了解科学实验的主要过程和基本方法，为今后的学习和工作奠定良好的实验基础。其具体任务如下：

（1）学习物理实验的基础理论，包括一些典型的实验方法及其物理思想。例如，电磁学实验中的模拟法、伏安法、电桥法、补偿法以及冲击法等，有助于思维与创造能力的培养。

（2）使学生获得必要的实验知识和操作技能，培养学生初步具有正确使用仪器进行测量、处理数据、分析结果以及撰写报告等方面的能力。

（3）培养学生严格、细致、实事求是、刻苦钻研、一丝不苟的科学态度，以及爱护国家财产的良好品质；培养学生善于动脑、乐于动手、讲究科学方法、遵守操作规程、注意安全等良好习惯。

3. 基本要求

通过物理实验的基本训练，要求做到：

（1）能够自行完成预习、进行实验和撰写实验报告等主要实验程序。

（2）能够调整实验装置，并掌握常用仪器的操作技术。例如，零位调整，水平、铅直调整，光路的共轴调整，消视差调节，逐次逼近调节，根据给定的电路图正确接线等。

（3）了解物理实验中常用的实验方法和测量方法，如比较、放大、模拟、补偿、平衡和干涉方法。

（4）了解常用仪器的性能，并学会使用方法；能够进行常用物理量的一般测量。

0.4 大学物理实验课的基本教学程序

1. 实验前的预习

实验前必须认真阅读教材，阅读时要以实验目的为中心，搞清楚实验原理（包括测量公式）、操作要点、数据处理及其分析方法等。要反复思考实验原理、仪器装置和操作方法、数据处理方法等方面，反复思考如何做才能达到实验目的。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、原理摘要、关键步骤、数据记录表格等。

每次实验前，教师要检查预习情况，未预习者不准做实验。

2. 实验中的观测和记录

（1）认真听讲。做实验前，教师要做简要的讲解，这对做好实验是很有益的。学生要认真注意听讲，这样可收到事半功倍的效果。

（2）实验操作。在操作前，先熟悉主要仪器，了解其使用方法；然后进行仪器的安装与调整并检查仪器是否完好，如有问题要及时向教师提出，切不可盲目操作；待检查符合要求后，方可进行实验操作、测试数据。

（3）记录数据及实验现象。应科学地、实事求是地记录实验中的全部有关的原始数据和出现的各种现象。有关数据中除了直接的测量数据外，还应当包括实验条件（如与实验结果有关的温度、湿度、气压等）和主要仪器的名称、型号、规格、准确度等。在记录数据时要特别注意它的有效数字和单位。测试结束后，把原始数据记录给教师审阅签名认可后，方可整理仪器，结束实验。

3. 实验后的报告

实验报告应包括以下内容：

（1）实验的年、月、日、系别、班级、小组、姓名。

（2）实验名称。

（3）实验目的。

（4）实验原理。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，用图表示原理图、电路图或者光路图。写出实验所用的主要公式（不写推导过程），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）。

（5）实验仪器。包括实验用的所有仪器、量具和材料的名称、型号和规格等。

（6）实验内容及步骤。

（7）实验数据。把测得的原始数据及必要的中间计算结果认真地填写在设计好的记录表格中，数据不得涂改，切忌用教师签字的那张原始数据代替实验报告的相应内容。应按所讲述的数据处理方法处理数据，写出数据处理过程，并按结果表达式写出实验结果。

（8）实验现象、误差分析、讨论以及对实验的建议、体会等。

实验报告一律用统一规格的实验报告纸书写，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。

4. 遵守实验守则

为了保证实验正常进行以及培养严肃认真的工作作风和良好的实验工作习惯，应遵守实验守则。

（1）学生应在课程表规定的时间内进行实验，不得无故缺席或迟到。实验时间若要更动，须经实验室教师同意。

（2）学生在每次实验前应对安排要做的实验进行预习，并在预习的基础上，写出预习报告。

（3）进入实验室后，应将预习报告放在桌上由教师检查，并回答教师的提问，经过教师检查合格后，才可以进行实验。

（4）实验时应携带必要的物品，如文具、计算器和草稿纸等。对于需要作图的实验，应事先准备毫米方格纸和铅笔。

（5）进入实验室后，根据实验卡片框或仪器清单核对自己使用的仪器是否缺少或损坏。

若发现有问题，应向教师或实验室管理员提出。未列入清单的仪器，另向管理员借用，实验完毕后归还。

（6）实验前应细心观察仪器的构造，操作应谨慎细心，严格遵守各种仪器仪表的操作规则及注意事项。尤其是电学实验，线路接好后先经教师或实验室管理员检查，经许可后才可接通电路，以免发生意外。

（7）实验结束前应将实验数据交给教师检查，实验合格者教师予以签字通过。余下时间在实验室内进行实验计算与完成实验报告，待下课后方可离开。实验不合格或请假缺课的学生，由指导教师登记，通知在规定时间内补做。

（8）实验时应注意保持实验室整洁、安静。实验结束应将仪器、桌椅恢复原状，放置整齐。

（9）如有仪器损坏应及时报告教师或实验室管理员，并填写损坏单，注明损坏原因。赔偿办法根据学校规定处理。

1　误差分析和数据处理

物理实验的任务不仅是定性地观察各种自然现象，更重要的是定量地测量相关物理量。而对事物定量描述又离不开数学方法和对实验数据相应的处理，因此，误差分析和数据处理是物理实验课的基础。本章将从测量及误差的定义开始，逐步介绍有关误差理论和实验数据处理方法的基本知识。

1.1　测量与误差

1.1.1　测量的概念

在科学实验中，一切物理量都是通过测量得到的。所谓测量，就是用合适的工具或仪器，通过科学的方法，将反映被测对象某些特征的物理量（被测物理量）与选作标准单位的同类物理量进行比较的过程，其比较值即为被测物理量的测量值。物理测量的内容很多，大至日、月、星辰，小到原子、分子。现在人们能观察和测量到的范围，在尺度方面已小到$10^{-17}\sim10^{-16}$ m，大到百亿光年，尺度相差10^{40}倍以上；在时间方面已短到$10^{-24}\sim10^{-23}$ s的瞬间，长达百亿年，时间相差也在10^{40}倍以上。在定量地验证理论方面，也需要进行大量的测量工作。因此可以说，测量是进行科学实验必不可少且极其重要的一环。

1.1.2　测量的方法

按测量值获得的途径测量分直接测量和间接测量。直接测量是指把待测物理量直接与认定为标准的物理量相比较，可以从测量仪器上直接读出测量值的测量。例如，用直尺测量长度和用天平测物体的质量。间接测量是指利用待测物理量与某些可直接测量量之间的已知函数关系，求得该待测物理量的测量值。如测物体密度时，先测出该物体的体积和质量，再用公式算出物体的密度。在物理实验中进行的测量，大多属于间接测量。

按测量条件的不同可分为等精度测量和非等精度测量。等精度测量是指在相同的测量条件下（同一测量者、同样的方法、同样的仪器、同样的环境条件等）对同一物理量进行的重复测量。相反，在测量过程中全部或部分因素和条件发生改变，称为不等精度测量。不同的实验室在相同的条件下对相同的试样进行的多次重复测量，或同一个人在相同的实验条件下，在较长的时间内对同一试样进行的多次重复测量，有可能是等精度测量，亦可能是非等精度测量。是否为等精度测量，需对测量的方差进行等方差性检验，即用统计的方法检验各方差在给定的显著性水平下是否齐性（一致性）。

1.1.3 误差的定义

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水平等种种因素的局限，不可能使测量结果与客观存在的真值完全相同，我们所测得的只能是某物理量的近似值。也就是说，任何一种测量结果的量值与真值之间总会或多或少地存在一定的差值，因此任何测量都有误差，即误差贯穿于测量的全过程。我们将这个差值就称为该测量值的测量误差，简称“误差”，误差的大小反映了测量的准确程度。测量误差的大小可以用绝对误差表示，也可用相对误差表示。

1. 绝对误差

测量值 x 与被测量的真值 x_0 之间的差值称为绝对误差，用 Δx 表示。绝对误差 Δx 可表示为

$$\Delta x = x - x_0$$

Δx 可正可负，反映了测量值偏离真值的程度，绝对误差越小两者越接近。所以，绝对误差的大小标志着测量结果的可靠程度或可信程度的大小。但是仅以绝对误差来评价测量结果是不全面的。例如，用米尺测量两个物体的长度，得出一个是 5.00 cm，一个是 25.00 cm，测量的绝对误差为 0.05 cm，二者的绝对误差相同，但前者绝对误差占测量值的 $\frac{0.05}{5}\times 100\% = 1\%$，后者占 $\frac{0.05}{25}\times 100\% = 0.2\%$，显然测量误差的严重程度不同。为了全面评价测量的优劣，引入测量误差的第二种形式，即相对误差。

2. 相对误差

绝对误差 Δx 与被测量真值 x_0 的比值称为相对误差，用 E 表示。相对误差 E 可表示为

$$E = \frac{\Delta x}{x_0}\times 100\%$$

所谓真值，是指在研究某量时，在其所处的条件十分完善时测定的量值（或称物理量客观存在的量值）。物理量的真值是一个理想概念，一般是不可能准确知道的。有关真值可以从以下几种情况得出：

（1）理论值。如三角形三个内角和为 180°等。

（2）公认值。公认的一些常数值，如普朗克常数 h 等。

（3）相对真值。用准确度高一个数量级的仪器校准的测量值。规定：校准仪器的误差应比测量仪器误差小一个数量级，即二者误差的比值应为 1∶20～1∶3。

（4）n 次测量的算术平均值。对一个不变的量进行 n 次测量后，其算术平均值 $\bar{x}$ 可视为真值的最佳近似值（这样的计算方法是以等精度测量为前提）。

测量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订或选择合理的测量方案和仪器，不能不切合实际地要求实验仪器的精度越高越好；测量次数总是越多越好。一个优秀的实验工作者，应该是在一定的要求下，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。

1.1.4 误差的分类

根据误差的性质和产生的原因，可以将误差分为以下三类：

1. 系统误差

系统误差是指在测量和实验中未发觉或未确认的因素所引起的误差，而这些因素影响结果永远朝一个方向偏移，其大小及符号在同一组实验测定中完全相同，当实验条件一经确定，系统误差就获得一个客观上的恒定值。当改变实验条件时，就能发现系统误差的变化规律。系统误差产生的原因一般来自于测量仪器本身以及环境变化和测量人员的操作因素。如仪器刻度不准，仪表零点未校正或标准表本身存在偏差等；周围环境的改变，如温度、压力、湿度等偏离校准值；实验人员的习惯和偏向，如读数偏高或偏低等引起的误差。系统误差主要来源于以下几个方面：

（1）仪器误差。仪器误差是由仪器本身的固有缺陷、校正不完善或使用不当引起的。如天平的不等臂、刻度不均匀、砝码实际质量与标称值不等、电表刻度盘与指针转轴安装偏心等引起的误差属固有缺陷。而仪器和量具不在规定的使用状态，如温度计零点刻度不在冰点，仪器的垂直和水平未调整，电表要求水平放置但却垂直放置测量等引起的误差均属校正不完善或使用不当。前者是由仪器、量具自身带来的系统误差，使用时应尽量消除或修正，而后者则应当避免。

（2）方法误差。方法误差是由于测试方法本身不完善或使用近似的经验公式或实验条件不完全满足应用理论公式所要求的条件所引起的误差。在进行不同的测试方法比对时，不同方法之间的差异也将产生误差。方法误差包括 3 个方面：测量原理误差、测量元件误差和测量条件误差。例如用单摆测重力加速度时，公式 $g=4\pi^2 L/T^2$ 仅适用于 $\theta\approx\sin\theta$ 的近似条件，当摆角较大时单摆就不满足简谐运动的条件了；另外，在用伏安法测电阻时忽略了电表内阻的影响，导致电阻测量准确程度低等。

（3）环境误差。由于实际环境条件（温度、湿度、压力等）不完全符合测定所要求的条件而引起的误差称为环境误差。环境误差是指在测量过程中实际环境条件与规定条件不一致所引起的误差。这种误差通常体现在仪表上，通常指的是由于仪表工作时所处周围环境条件变化所引起的误差。由于仪器所处的外界环境如温度、湿度、光照、气压、电磁场等与仪器要求的环境条件不一致引起的误差。这种误差需要对仪器进行修正，否则就会引入系统误差。

（4）人员误差。这是由于观测者心理、生理条件以及其他个人因素造成的误差，它跟个人的反应速度、分辨能力、固有习惯以及实验技能有关。人员误差一般包括：人员不正确的方法引起的误差、不正确的数据处理导致的误差、思想情绪变化导致的误差、两人或多人相互配合不默契所引起的误差以及生理缺陷引起的误差。

系统误差的特征具有确定性和方向性，或者都偏大，或者都偏小。系统误差一般应通过校准测量仪器、改进实验装置和实验方案、对测量结果进行修正等方法加以消除或尽可能减小。

系统误差是测量误差的重要组成部分，在任何一项实验工作和具体测量中，最大限度地消除或减小一切可能存在的系统误差是实验测量工作的主要任务之一，但发现和减小系统误差通常比较困难，需要对整个实验所依据的原理、方法、仪器和步骤等可能引起误差的各种因素进行分析。实验结果是否正确，往往在于系统误差能否被发现和尽可能消除，因此对系统误差不能轻易放过。从理论上讲，系统误差可以通过分析研究其产生的原因，采取一定的方法减小或消除，或按其规律对测量结果进行修正；但事实上，发现和消除系统误差是一个