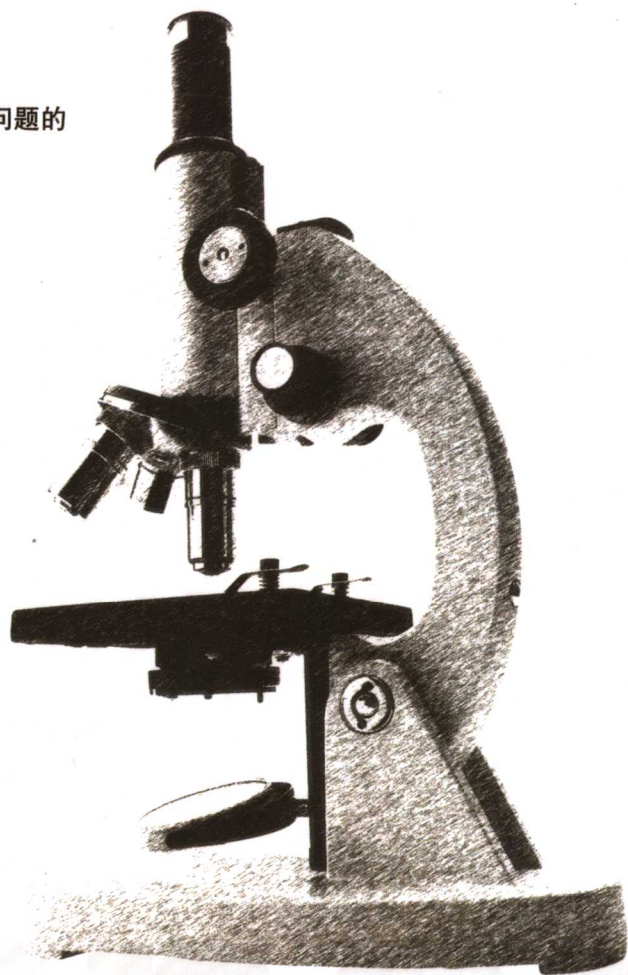


大学物理实验

基础物理部分

潘学军 等编著

- ★ 训练学生实验技能，掌握科学实验的基本知识、方法和技巧
- ★ 培养学生的观察力和科学思维能力
- ★ 培养学生的创新能力和开拓精神
- ★ 培养学生理论联系实际、分析问题和解决问题的能力



电子工业出版社
Publishing House of Electronics Industry
<http://www.phei.com.cn>

大学物理实验

基础物理部分

潘学军 等编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书是参考《高等理工院校大学物理实验课程教学基本要求》，并结合多所大学物理实验课程多年来的建设、改革成果和实践经验编写而成的。

全书包括绪论、物理实验基本知识、物理实验的基本仪器、物理实验中的测量方法、预备性实验、基础实验（一）、基础实验（二）、设计性与制作性实验等七章。前三章主要介绍测量误差、测量不确定度及测量结果的表述和常用的处理数据方法；物理实验中常用的力、热、电、光等各类实验仪器、仪表及其基本使用和调节方法。比较系统地介绍了比较法、放大法、模拟法、干涉法、示踪法、量纲分析法和转换测量法等物理实验中常用的实验方法和测量方法。在后面四章，按照循序渐进和由易到难的要求，分层次总共编排了预备性实验、基础实验及设计制作实验共 58 个。本书各章及各个实验既相互独立，又循序渐进、相互配合，构成了一个较完整的体系。本书在内容上编写比较详细，并配有很多仪器设备的清晰照片，便于学生预习或自学；同时还介绍了通过计算机用 Excel 软件处理物理实验数据的方法，使学生做完实验后可以更快、更好地处理实验数据。

本书可作为高等院校各专业的基础物理实验教材或参考书，也可作为涉及物理实验的教师和实验技术人员的参考书。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有，侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验——基础物理部分 / 潘学军等编著. —北京：电子工业出版社，2006.1

ISBN 7-121-02181-1

I.大... II.潘... III.物理学—实验—师范大学—教材 IV.O4-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2005）第 157700 号

责任编辑：梁卫红

排版制作：华信卓越公司制作部

印 刷：北京东光印刷厂

出版发行：电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编：100036

经 销：各地新华书店

开 本：787×1092 1/16 印张：21.25 字数：658 千字

印 次：2006 年 1 月第 1 次印刷

定 价：29.00 元

凡购买电子工业出版社的图书，如有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系。联系电话：（010）68279077。质量投诉请发邮件到 zlts@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

编写说明

《大学物理实验——基础物理部分》这本教材是根据四川省教委 1998 年下达的《面向 21 世纪实验室建设与管理改革》研究课题中关于《面向 21 世纪高师物理实验课程设置模式改革》子课题的要求编写的。本课题将《大学物理实验》课程设置为预备性实验（过渡性、衔接性实验）、基础性实验（常规实验）、设计性实验和综合近代实验几个部分，主要目的是想根据现代社会对人才知识、技能和创新能力的要求，通过《大学物理实验》这门课程的教学让学生受到较严格、系统的实验技能训练，掌握科学实验的基本知识、方法和技巧。更重要的是培养学生敏锐的观察力、严谨的科学思维能力；培养学生进行科学实验所必需的创新意识和开拓精神；培养学生理论联系实际、分析问题和解决问题的能力 and 与现代中学教育相适应的教学科研能力。

本书的编写是在前几年编写《实验物理教程》讲义的基础上，结合我校教学设备条件、生源情况、教学要求和自制仪器设备的研制情况，在经过几年的教学实践后又加以改进、补充和完善，并参考其他兄弟院校近年来的研究成果，由学校组织教学经验丰富的教师编写而成。《大学物理实验——基础物理部分》一书是长期从事物理实验教学的广大教师和实验技术人员辛勤劳动的成果，凝聚着集体的智慧和结晶。

本书共分七章，其中第一章主要介绍物理实验数据处理的基本知识，其内容可穿插在实验教学中进行，内容讲解大约需要 6~8 学时；第二章主要介绍物理实验常用的基本仪器，第三章主要介绍物理实验中的基本测量方法，这两章的内容是学生自学、阅读的内容，不安排时间讲解；第四、第五、第六这三章的实验按由易到难的原则进行安排，其中第四章是预备性实验，学生可以根据自己原来中学的学习情况将部分或全部作为选学内容。第五章是基础性实验（一），第六章是基础性实验（二），全书按由浅入深的原则共编写我校近几年所开的预备性、基础性实验共 47 个，各专业可根据不同的专业特点分别在 2 至 3 个学期的时间内选定其中 15~40 个题目加以完成；第七章是设计性与制作性实验，共有 11 个题目，可专门安排一个学期或作为选修课开设，学生可以根据自己的学习情况和爱好选择其中部分内容进行实验。有关综合近代物理实验部分我们准备在《大学物理实验——综合物理部分》一书中再行介绍。

本书主要由四川师范大学物理系的潘学军老师编写并统稿，另外，实验 25、实验 26、实验 36、实验 37、实验 38 由李治学老师编写，实验 17、实验 28、实验 29、实验 42 由肖建华老师编写，实验 4、实验 18、实验 24 由蹇继勋老师编写，实验 41、实验 42 由蒲政才老师编写，第一章中的 1.6 节“用 Excel 软件处理物理实验数据”及书中部分插图由吴倩老师编写、处理，其余部分由潘学军老师编写。

本书在编写过程中，曾得到四川师范大学物理系领导和实验室的老师、管理技术人员，特别是余万伦教授、周晓林教授的大力支持，同时也借鉴参考了兄弟院校的大量文献资料，在此表示衷心感谢！由于我们经验不多、水平有限，书中的缺点和错误在所难免，恳请批评指正。

编者

2005 年 12 月

绪 论

一、科学实验的地位和作用

认识来源于实践，科学实验是人们研究自然规律和改造客观世界的基本手段。科学实验的任务是人们根据一定的研究目的，通过积极的构思，利用科学仪器、设备等物质手段，人为地控制或模拟生产过程、自然现象，使自然现象和实际生产中的问题以理想化的、典型的形式表现出来，从而利用科学仪器进行试验观测，通过定性或定量地测量有关物理量并通过数据处理和理论分析，总结出这些量之间的相互关系，以求得对自然现象及规律本质的认识。英国科学教育家阿姆斯特朗曾说：“实践总是以发现，以探索作为追求目标，实验在学校里是教授学生去发现的方法。”而日本人则说，他们的理科教学所以重视实验，是因为实验不仅为学生提供具体、形象、生动的感性材料，还能培养学生的实验技能，通过实验活动，学生可以学到探索自然的方法，培养严谨的态度，进一步加深学生对自然现象的理解，认识人与自然的关系，树立科学的自然观。

人们对自然的认识是一个逐步深入的过程。人们根据科学实验的结果，在一定的范围内提出科学理论，根据理论再进一步回到实践中去检验，通过实践又提出新的理论，进行新的认识，如此反复，促进了科学的发展。因此科学实验是科学理论的源泉，也是自然科学的根本；同时科学理论对实验起着指导性的作用。因此，我们既要重视科学理论，又要重视科学实验的作用。

二、物理实验的地位和作用

物理实验是物理学和科学实验的重要部分。物理实验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，大都起源于物理学的发展。热力学、分子物理学的发展，使人类进入了蒸汽机时代；电子学的发展，使人类跨入了电气化时代；原子物理学、量子力学的发展促进了半导体、原子核、激光、电子计算技术的迅猛发展。因此，物理学本质上是一门实验科学。三四百年前，伽利略和牛顿等学者，以科学实验的方法研究自然规律，逐渐形成了一门物理科学。从此一切物理概念的确立、物理规律的发现、物理理论的建立都依赖于实验，并接受实验的检验。

物理学史上，如果没有法拉第等实验科学家进行电磁学的实验研究，发现了电磁感应定律等一系列实验规律，麦克斯韦就不可能建立麦克斯韦方程组。在确定了经典电磁学理论后，麦克斯韦预言了电磁波的存在，经过赫兹的实验研究，证实了电磁波的存在，从而使经典电磁学理论更为人们所信服。被称为“牛顿以来最伟大的发现之一”的能量量子化概念，就是在人们面对着黑体辐射实验，遇到了运用经典理论无法克服的困难时，普朗克紧紧抓住了1900年夏天德国物理学家康尔鲍姆和鲁本斯对热辐射光谱所做的新的精确测量结果，大胆地提出了能量子的假设，运用合理的数学方法，从理论上导出了符合实验结果的黑体辐射公式，为量子力学的发展开辟了道路。

应该说，物理实验在物理学的创立和发展中占有十分重要的地位，同时在推动其他科学、工程技术的发展中也起到重要的作用。特别是近代各学科相互渗透，发展了许多交叉学科，物理实验的构思、物理实验的方法和技术与化学、生物学、天文学等学科相互结合已经取得了丰硕的成果，而许多物理科学的新思想，许多边缘科学的新理论正等待着未来的物理学工作者去揭示，去创立。因此，我们不仅应该学习到丰富的理论知识，而且必须具备足够的现代科学实验能力。

因此，作为一名大学的理工科学生，不仅要有比较深入广博的理论知识，而且需要具备较强的从事科学实验的能力。物理实验课是与理论课并行的独立课程，具有自身独特的教学内容、教学方法、教学目的。动手实践能力和观察分析能力等都具有独立性，是不能用理论思维能力代替的。物理实验是对学生系统地进行科学实验能力训练的开端和基础，在培养学生运用实验手段去发现、观

察、分析、研究和解决问题的能力方面，在提高学生科学实验素养方面，都具有十分重要的作用。同时，它也将为学生今后的学习、工作奠定一个良好的实验基础。

三、物理实验课的目的与任务

物理实验作为一门独立的基础课程，也是素质教育的重要环节。它的主要任务如下：

(1) 通过实验，使学生得到必要的实验知识和实验技能的训练，培养学生初步具有以下几方面的科学实验工作能力：即正确使用仪器、进行测量、处理数据、分析结果以及撰写实验报告等，使学生初步掌握实验科学思想和方法。

(2) 学习运用理论指导实验以及分析和解决问题的科学方法，在此基础上着重培养学生的探索精神、创新精神、自主学习能力和科学研究方法，使学生掌握物理实验研究的基本方法，提高学生的分析能力和创新能力。

(3) 提高学生的科学素养，培养学生严格、细致、实事求是、认真严谨、一丝不苟的科学态度，培养学生积极主动的探索精神以及团结合作、爱护国家财产的道德品质。

(4) 培养学生善于动脑、乐于动手、讲究科学方法、遵守操作规程、注意安全等科学习惯。

总之，教学的重点放在培养学生科学实验能力与提高学生科学实验素养方面，使学生在获取知识的自学能力、运用知识的综合分析能力、动手实践能力、设计创新能力以及严肃认真的工作作风、实事求是的科学态度方面得到训练和提高。

四、物理实验课的基本程序

大学物理实验课所涉及的内容，多数是测量某一物理量或研究某一物理量随另一物理量变化的规律性。但是，不管实验内容及要求如何，也无论实验采用哪一种方法，实验课的程序大致相同。一般可以分为以下三个基本程序。

1. 实验前的预习

每个实验都是一项具体工作，理解原理，掌握方法，熟悉仪器设备及测量数据的任务一般都比较繁重，而实验课的课内时间有限，不允许在实验课内才从头开始。为了提高教学质量，做到胸有成竹，有的放矢，学生必须做好实验前的预习，预习要求如下：

1) 预习实验教材

实验前应认真阅读实验教材，掌握实验的原理和方法，对每一个实验的内容和要求应全面了解，明确该实验的重点和难点，对需要设计的部分应事先设计好实验方案，在可能的条件下预习有关的仪器使用说明等。预习时应根据实验要求画好数据记录表格，计划好测量次数等，以便实验时能及时全面地获得需要测量的数据。

2) 写好预习报告

在弄清楚实验目的、基本原理及实验方案、测试数据要求等基础上，写出预习报告。每次实验前教师将检查预习报告，没有达到要求者，将不允许做实验。

2. 实验中的观测

实验是整个教学环节中最重要的一环。动手能力、分析问题和解决问题的能力培养主要在具体实验时完成，因此必须充分利用课内的有限时间，提高教学质量。

(1) 认真听讲 每次实验前，教师将根据本实验的原理、内容、要求、仪器使用方法和注意事项以及难点、重点等做提示或简要讲解，学生应认真听讲并做好记录，以便把预习中没有解决的问题进一步弄清楚。

(2) 进行实验 根据实验方法及内容,合理布局、连接仪器设备。在熟悉仪器使用方法、注意事项后,严格按照仪器设备操作规程进行实验。对于有电子仪器的实验,必须经教师检查电路的连接,待正确无误后,方可接通电源进行实验。实验时要有条有理,善于理论联系实际进行分析,每一步多问几个为什么,反对盲目蛮干。若发现异常现象或仪器故障,应立即报告老师。

(3) 记录数据 应把实验中测量的原始数据及实验现象及时记录下来,一般应包括以下几个方面:

- a. 实验条件,如温度、湿度、气压等。
- b. 仪器的规格,如型号、参数等。
- c. 正确地按照有效数字记录实验数据并注意物理量的单位。

(4) 及时记录实验中自己认为有意义的现象并注意反复观察、分析。测试结束后,数据要经老师检查、审阅,认为合格后方可整理仪器结束实验,以避免数据不合格而需重新连接仪器。

3. 实验后的报告

实验报告是对实验工作的全面总结,也是培养科学表达能力的主要环节。实验结束后,应根据每个实验的要求及时写出实验报告。报告一律采用实验报告纸书写,要求文字工整,语句简练,阐述清楚,图表规范,结果正确,分析认真。一份完整的报告包括:

- (1) 实验名称。
- (2) 实验目的(或学习重点)。
- (3) 简要的实验原理,包括测量公式及必要的图表,注意书写时不要照抄书本,要用自己的语言概括叙述。
- (4) 仪器设备,包括型号、规格、参数等。
- (5) 实验步骤:简要写出实验进行的主要过程。
- (6) 实验数据表格,作图及计算。
- (7) 误差分析:包括两方面的内容,一是计算测量结果的不确定度,它是对测量结果的评价,与获得正确的测量结果有同等的重要性;二是要找出影响测量结果的主要因素,必要时给出每一因素对测量结果影响的量化估计值,从而采取必要的措施用以改进实验。
- (8) 实验结果:要给出完整的量化表达式,特别是在注意观察现象或验证定律时,要写出实验的结论。
- (9) 问题讨论:包括对实验中的现象解释,对实验方法的改进与建议,做练习题,写出实验后的体会等。

五、如何学好物理实验课

大学物理实验课是一门与理论并行的独立课程,它不但要使学生掌握物理实验的基本知识,更重要的是要培养学生的科学实验能力。而该课程的学时及内容有限,要打下坚实的实验基础和具有较强的科学实验能力,学生必须主动地、积极地、创造性地去学习。必须认识到通过实验绝不是仅仅为了得到几个实验数据,而是要通过实验去学习探索研究问题的方法,培养与锻炼科学实验的能力。那么,怎样才能学好这门课程呢?实验不同于理论,有其自身的规律和特点,学习方法也应有所不同。我们认为,应该注意以下几点。

1. 要重视实验教学的每一个环节

在物理实验中,每一个实验的目的、要求和侧重点均不相同。有的侧重于基本测量仪器的使用,基本方法的掌握;有的侧重于基本技能、技巧的训练;有的在于通过实验去总结物理规律。后面的实验往往要用到前面实验所使用过的方法、仪器,但为了让学生能见多识广,每个实验所使用的仪器和方法又不完全相同。所以,在实验过程中,要注意观察、分析、比较,实验结束后要及时撰写

实验报告。

2. 注意掌握所采用的实验方法

基本的测量方法在实际中既会经常用到，又是复杂测量方法的基础。学习时不但要弄清楚它的原理、运用条件、优点和缺点，而且要通过实验研究，逐步熟悉和记牢，并且能运用这些方法设计一些简单的实验。一些重要的测量方法，只有自己动手实验并反复研究，才能融会贯通，留下深刻的印象。

3. 要注意养成善于分析的习惯

实验时最好是带着问题去做。实验中要善于捕捉和分析实验现象，理论结合实际，指导实验操作；做完实验后一般要有所回味，这样才能得到提高。实验最后总要获得实验结果，结果是否正确靠什么来判断？实验数据的好坏说明什么问题？这些问题要靠分析实验来解决。实际上，任何理论都是在一定基础上的抽象或简化，都有其适用范围。而客观实际和实验所处环境要复杂得多，实验结果必然会带来和理论公式的差异，问题在于差异的大小是否合理，并找出不合理的原因。即必须分析实验方法是否正确？实验条件是否得到满足？它们带来多大误差？仪器带来多大误差？实验环境有多大影响？等等。千万不可认为实验的目的只是为了做出标准的数据结果。往往有些学生，当实验数据和理论值一致时，就会觉得心满意足，简单地认为已经学好了这次实验，而一旦实验数据和理论值差别较大时，又会感到失望，抱怨仪器装置，甚至拼凑或抄袭别人的数据。这两种表现都是不对的。

4. 要注意锻炼自己的动手操作能力

要学会正确使用各种仪器，并力求自己排除实验中出现的故障。应该说，能否发现实验故障并排除是实验能力强弱的一个重要表现，要想提高实验能力，必须自己多动手。对于如何记录实验数据，如何安排仪器布局，如何正确操作仪器等，只有在每次实验中有意识地加强锻炼，才能养成良好的习惯。

5. 要注意培养自己认真、踏实、细致、坚韧不拔的实验素质和勇于创新的精神

不轻易放过每一个实验现象，不怕挫折和失败，艰苦努力，力求以最小代价取得最好的实验结果。

总之，实验课有它本身的特点和规律，要学好实验课不是一件容易的事，但也绝非太难的事。只要在学习过程中不断总结经验，逐步掌握规律，培养对实验课的兴趣，就能练好基本功，提高自己的科学实验能力。

目 录

第一章 物理实验基本知识	1
1.1 测量及其误差	1
1.2 误差处理	4
1.3 测量的不确定度和测量结果的表述	12
1.4 有效数字及其表示	17
1.5 数据处理常用方法	20
1.6 用 Excel 软件处理物理实验数据	29
1.7 测量过程的设计	37
第二章 物理实验的基本仪器	46
2.1 力学、热学仪器	46
2.2 电磁学仪器	55
2.3 光学仪器	64
第三章 物理实验中的测量方法	70
3.1 比较法	70
3.2 放大法	73
3.3 模拟法	74
3.4 干涉法	75
3.5 示踪法	76
3.6 量纲分析法	76
3.7 转换测量法	77
第四章 预备性实验	80
实验 1 固体密度的测量	80
实验 2 金属杨氏弹性模量的测量	83
实验 3 液体表面张力系数的测定	88
实验 4 金属线胀系数的测量	94
实验 5 刚体转动实验	97
实验 6 电火花描述法作刚体转动实验	100
实验 7 用补偿法测定水的汽化热	105
实验 8 液体粘度的测定	107
实验 9 牛顿第二定律的验证	110
实验 10 守恒定律的验证	118
实验 11 电阻元件的伏安特性	122
实验 12 电表的改装与校准	125
实验 13 用单臂电桥测量中值电阻	129
实验 14 薄透镜焦距的测定	134
实验 15 测量显微镜和望远镜的放大率	140
实验 16 用双棱镜测定光波波长	147
实验 17 等厚干涉——牛顿环、劈尖	150
第五章 基础实验 (一)	154
实验 18 测量空气密度	154
实验 19 驻波的研究	162
实验 20 热电式传感器的温度特性	165

实验 21 空气温度计	173
实验 22 液体比热容的测定	178
实验 23 测定空气的比热容比	182
实验 24 用稳态法测量物体的导热系数	185
实验 25 模拟法测绘静电场	188
实验 26 用电位差计校正电表	192
实验 27 用双臂电桥测量低电阻	197
实验 28 电子束线的聚焦	201
实验 29 电子束线的偏转	206
实验 30 分光计的调整与使用	210
实验 31 用折射极限法测固体和液体的折射率	219
实验 32 平行光管的调节和使用	224
第六章 基础实验 (二)	230
实验 33 灵敏电流计的研究	230
实验 34 示波器的基本原理及使用	235
实验 35 用示波器测超声波在空气中的声速	244
实验 36 磁化曲线和磁滞回线的测定	247
实验 37 霍尔效应	250
实验 38 用霍尔元件测螺线管磁场	254
实验 39 应变式测力传感器与非平衡电桥	259
实验 40 交流电桥	264
实验 41 RL, RC 电路稳态特性的研究	268
实验 42 光栅的衍射	272
实验 43 单缝衍射的光强分布和细丝直径测量	275
实验 44 偏振现象的研究	279
实验 45 迈克尔逊干涉仪	283
实验 46 小型棱镜摄谱仪	289
实验 47 单色仪	294
第七章 设计性与制作性实验	298
7.1 科研的一般程序	298
7.2 测量方法的选择, 测量仪器的选配和测量条件的选择	300
实验 48 简谐振动的研究	304
实验 49 变阻器的使用与电路控制	306
实验 50 多用表的设计与组装	310
实验 51 非线性电阻特性研究	311
实验 52 用非平衡电桥测定铂电阻的电阻温度系数	312
实验 53 自组望远镜和显微镜	314
实验 54 自组迈克尔逊干涉仪测量空气的折射率	314
实验 55 直流稳压电源的制作	317
实验 56 可控硅调光灯的制作	318
实验 57 微电流 (电压) 放大器的制作	319
实验 58 制作数字式温度测量控制器	323

第一章 物理实验基本知识

物理实验的任务，一是在实验室条件下科学地再现自然现象；二是测量现象中有关物理量以及它们之间的数量变化关系；三是通过测量数据的误差分析和数学处理，科学地评价测得的物理量或物理关系接近于客观真实的程度。因此测量误差理论、实验数据处理、实验结果表述及实验设计等方面的初步知识，都是作为进入实验前的基础准备，这些知识不仅在以后每次实验中要经常用到，而且是今后从事科学实验工作所必须了解和掌握的。本章对这方面的知识做一入门介绍，如果需要进一步的了解，请参阅有关专著。

1.1 测量及其误差

1.1.1 量、测量和单位

任何现象和实体都能以量的大小来表征，而且量具有对现象和实体做定性区别或定量区别的属性。

测量是人类对自然界中的现象和实体取得数量概念的一种认识过程。为确定被测对象的量值，首先要选定一个单位，用它与被测对象进行比较，求出被测对象与它的比值——倍数，这个倍数即为数值。显然，数值的大小与所选用的单位有关，对同一对象测量时，选用单位越大，数值越小，反之亦然。因此，在表述被测对象的测量值时，就必须包含数值和单位两个部分。

目前，物理学上各物理量的单位都采用中华人民共和国法定计量单位，根据《中华人民共和国计量法》，国家计量局于1987年2月1日发布了国家法定计量单位名称、符号和非国家法定计量单位的废除办法，规定以国际单位制（SI制）为国家法定计量单位，即以米（m）、千克（kg）、秒（s）、安培（A）、开尔文（K）、摩尔（mol）、坎德拉（cd）作为基本单位，其他单位都由以上7个基本单位导出，称为国际单位制的导出单位。并规定自1991年起，实行国家法定计量单位。关于中华人民共和国法定计量单位的详细内容参见本章附表。

1.1.2 测量及误差

物理实验离不开对物理量进行测量，不论是研究物理现象、验证物理原理，还是研究物质特性等，都要进行测量。所谓测量，就是用一定的量具或仪器，通过一定的方法，直接地或间接地与被测对象进行比较。测量可分为直接测量和间接测量：直接从仪器或量具上读出待测量的大小为直接测量；如果待测量是由若干个直接测量经过一定的函数关系运算后获得的，则为间接测量。例如，用米尺测量物体的长度，用秒表计时等为直接测量；测量物体的密度，需先测出物体的体积和质量，再用公式计算出密度为间接测量。在一定的条件下，任何物理量的大小都有一个客观存在的真值。进行测量，就是要想办法知道每个物理量的真值。然而，每个具体测量都是依据一定的理论或方法，在一定的环境中使用一定的仪器，由一定的人进行的，而由于理论的局限性或近似性、环境的不稳定性、实验仪器灵敏度和精度的局限性、人的实验技能和判断能力的影响等，使测量值与客观存在的真值之间总是或多或少地存在偏差，这种偏差就称为测量值的误差。

假设被测量的真值为 A ，测量值为 x ，误差为 ϵ ，则

$$\epsilon = x - A \quad (1-1-1)$$

上式定义的误差反映了测量值偏离真值的大小和方向，称为绝对误差。

真值只是一个理想的概念，一般说来是不知道的。在实际测量中，一般根据测量数据，只能确定出测量的最佳值。为了全面评价测量的优劣，往往还需要考虑被测量本身的大小，例如测量两个

物体的质量得出一个是 1.00 g, 另一个是 100.00 g, 如果绝对误差都是 0.01 g, 那么, 从绝对误差看, 对二者的评价是相同的。但前者的误差占测量值的 1%, 而后者仅占 0.01%, 显然测量误差的严重程度比前者要小得多。为了区分或评价测量的优劣, 常用相对误差表示。相对误差定义为绝对误差与测量最佳值之比, 常用百分数表示, 即

$$\text{相对误差} E = \frac{\text{绝对误差} \varepsilon}{\text{测量最佳值} \bar{x}} \times 100\% \quad (1-1-2)$$

有时被测量有公认值或理论值, 则用百分误差来表示。百分误差定义为

$$\text{百分误差} E_0 = \frac{|\text{测量最佳值} - \text{公认值}|}{\text{公认值}} \times 100\% \quad (1-1-3)$$

误差存在于一切测量之中, 而且贯穿于测量过程的始终。不论是在实验设计、测量操作中, 还是在实验数据处理中, 都可能存在着误差问题。在误差存在的情况下, 测量的任务就是要在一定的条件下设法将测量值的误差尽量减小, 得到一个最近真值, 并估计出最近真值偏离真值的程度。反过来, 根据误差的估算, 又可以指导实验方案的设计、仪器的选择、参数的确定等, 以使用最小的代价取得最佳的结果。

产生误差的原因是多方面的, 从误差的性质上可以分为系统误差、随机误差和过失误差三大类。它们对测量结果的影响不同, 处理方法也不同。

1. 系统误差

系统误差的特征是: 在同一条件下(指方法、仪器、环境、人员), 对同一物理量进行多次测量时, 误差的绝对值和符号(正、负)保持不变, 当测量条件改变时, 误差的绝对值和方向按一定的规律变化。

它的来源有以下几个方面:

(1) 由于测量仪器的不完善、仪器不够精密或安装调整不妥所引起的误差。例如仪器的刻度不准、零点没有校准、砝码未被校准、天平臂长不相等、仪器水平或铅直未调整等。

(2) 由于实验方法的不完善或这种方法所依据的理论公式本身具有近似性, 或实验条件不能达到理论公式所规定的要求等而引起的误差。如在空气中称质量时没有考虑空气浮力的影响; 量热时没有考虑热量的散失; 单摆周期公式 $T = 2\pi\sqrt{l/g}$ 的条件是摆角趋于零, 而测量中又必须具有一定的摆角; 电路中没有考虑电表内阻和接线附加电阻的影响等。

(3) 环境的影响或没有按规定的条件使用仪器。例如, 测长度时没有考虑温度使尺长改变; 应该水平(或垂直)放置的仪器没有放水平(或垂直); 标准电池是以 20℃ 时的电动势数值作为标准值的, 若在 30℃ 条件下使用时不加以修正, 就引入了系统误差。

(4) 由于实验者心理或生理特点、缺乏经验等而引入的误差。例如有些人习惯于侧坐斜视读数、眼睛分辨能力较差等, 使测量读数偏大或偏小。

系统误差的消除或减小是实验条件和技能问题, 应尽可能采取各种措施将它降低到最小程度。例如将仪器进行校正, 改变实验方法或者在计算公式中列入一些修正项以消除某些因素对实验结果的影响, 纠正不良实验习惯等。能否识别和消除系统误差与实验者的经验和实际知识有着密切的关系, 学生在学习过程中要注意积累这方面的感性知识, 结合实验的具体情况对系统误差进行分析和讨论。

2. 随机误差

随机误差的特点是随机性。在相同条件下, 对同一物理量进行多次重复测量, 即使系统误差减小到最小程度之后, 测量值仍然会出现一些难以预料和无法控制的起伏, 而且测量值误差的绝对值和符号在随机地变化着。即各次测量值都会有些差异, 它们分散在一定范围内, 其误差时正时负,

绝对值时大时小,无规则地变化,这类误差称为随机误差,又称为偶然误差。

随机误差是由于测量过程中一些随机的或不确定的因素引起的。如人的视觉、听觉和触觉等感觉能力的限制以及实验环境中的温度、湿度、电源电压的起伏、气流波动及振动等因素的影响。从个别测量值来看,它的数值带有随机性,好像杂乱无章。但是,如果测量次数足够的话,就会发现随机误差遵循一定的统计规律,可以用概率理论来估算它。

3. 误差的相互转化

系统误差和随机误差在一定的条件下是可以相互转化的。例如一把米尺刻度不均匀,如果固定米尺的端面测量某一物体长度时,测量结果会产生系统误差,若采用尺的不同刻度部分来多次测量又可把分度不均匀的误差随机化。又如,同一级别的仪器中每台仪器的具体系统误差都不相同,或大或小,或正或负,是随机的,但当你使用某台仪器做实验时,它所引起的误差又是固定的。一个具体测量中出现的误差往往既含有随机误差,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;当系统误差未被掌握时,常常想出一些办法使系统误差随机化,以便在多次测量取平均中抵消其一部分。

4. 过失误差(错误)

在测量中还可能出现错误,如读数错误、记录错误、操作错误、估算错误,等等。错误已不属于正常的测量工作范畴,应当尽量避免。克服错误的方法,除端正工作态度,严格工作程序外,可用和另一次测量结果相比较的办法发现纠正,或者运用异常数据剔除标准来判别因过失而引入的异常数据,并加以剔除。

1.1.3 测量的精密度、准确度和精确度

精密度、准确度和精确度都是用来评价测量结果好坏的,但这三者的涵义不同,使用时应加以区别。

精密度是指重复测量所得测量值相互接近的程度,它是描述测量的重复程度的尺度。测量的精密度高,说明测量数据比较集中,测量结果的随机误差小,但系统误差的大小不明确。

准确度是指测量结果与真值符合的程度,它是描述测量结果接近真值程度的尺度。测量的准确度高,说明测量数据的平均值偏离真值较少,测量结果的系统误差较小,但数据分散的情况即随机误差的大小不明确。

精确度描述各测量值重复性好坏及测量结果与真值接近的程度。测量的精确度高,是指测量数据比较集中在真值附近,即测量的系统误差和随机误差都比较小。精确度是对测量的系统误差和随机误差的综合评定。

图 1-1-1 是以打靶时弹着点的情况为例,说明这三个词的涵义。(a) 图表示射击的精密度高但准确度较低;(b) 图表示射击的准确度较高但精密度低;(c) 图表示精密度和准确度均较高,即射击的精确度高。

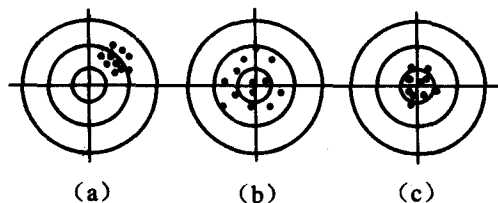


图 1-1-1

1.1.4 仪器的误差限和灵敏阈

测量仪器(量具、仪表、标准器等)都有国家标准规定的准确度等级。根据所用仪器的等级和量程可以计算出仪器的基本误差限或示值误差限。例如,测量范围在 0~25 mm 的一级千分尺,它的

示值误差限为 0.004 mm; 100 mA 的 0.5 级电表示值误差限为 0.5 mA; 100 g 的三等砝码允差为 2 mg 等。这些资料可以从产品说明书或鉴定合格证书中得到。基本误差限和示值误差限是指合格的仪器在规定的标准条件（如温度、湿度、重力方向等）下，按制造厂说明书正确使用时，标称值或指示值可能产生误差的范围。如果使用条件不符合标准条件，还会产生各种附加误差。

仪器误差是由仪器自身结构和制造上的不完善而引起的，是仪器本身所固有的不确定性。例如，电学指针式仪表的误差因素包括轴尖和轴承之间的间隙和摩擦、游丝和张丝的弹性不均匀及阻尼、活动部件不平衡、装配不准确、标度分格不均匀、内部磁场不均匀、铁磁材料的磁滞等，使表观指示值不能准确复现计量单位倍数的真值，其中既含有固定偏移误差（系统误差分量）又含有重复性误差（随机误差分量）。显然，测量仪器本身的不确定性是测量结果误差的重要组成部分。

在实验测量中也常会遇到下列情况：例如，当使用精密的 1/100 秒表多次测量一个弹簧振子的周期时，发现数据分散，并可算出标准偏差。若改用精密度较差的 1/10 秒表去测同一个弹簧振子的周期，结果多次测量数据几乎完全相同，标准偏差近似为零。是不是用不精密的仪器测量，测量结果反而高呢？不是的。原因在于小于 0.1 s 的时间变化量用 1/10 秒表反映不出来。我们称足以引起仪器示值可察觉变化的被测量最小变化值为仪器的灵敏阈。被测量改变量小于这个阈值，仪器没有反应。例如数字式仪表最末一位数所代表的量，就是数字式仪表的灵敏阈。对于指针式仪表，由于人眼能察觉到的指针改变量一般为 0.2 分度值，于是可以把 0.2 分度值所代表的量作为指针式仪表的灵敏阈。灵敏阈越小说明仪器的灵敏度越高。

一般来说，测量仪器的灵敏阈应该小于示值误差限，而示值误差限应该小于最小分度值。但是也有些仪器，特别是普通物理实验中由学生频繁使用的仪器，可能准确度降低了或灵敏阈变大了。因而使用仪器前应该检查其灵敏阈。

1.2 误差处理

1.2.1 系统误差的修正和消减

在实验工作中，发现和消减系统误差相对来说是一件较难的工作。它既需要理论指导又需要丰富的实验工作经验，往往是针对实际工作情况采取灵活多样的办法去解决。以下介绍的是常用的一些方法。

1. 发现系统误差的方法

因为系统误差的数值往往比较大，要有效地提高测量精确度，必须减小和消除系统误差的影响。但是，首先遇到的问题是怎样来发现系统误差呢？在测量过程中，形成系统误差的因素是复杂的，在一般情况下，系统误差是不能通过多次重复测量来发现的。有时候，直接测量的每个量都排除了系统误差，但是间接测量的计算结果仍可能有系统误差存在。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，分析每一个实验条件，检验或校准每一台仪器，考虑每一步调整和测量，注意每一个因素对实验的影响等。下面简要介绍几种发现系统误差的常用方法。

1) 实验对比法

实验对比法是通过改变产生系统误差的条件进行测量，从而发现系统误差。

(1) 仪器的对比 用不同仪器去测量同一量，如果结果不一致，则说明至少有一个存在系统误差。如果其中一个是一级精度的仪器或标准器件，就可以找出系统误差的修正值。

(2) 改变测量方法 如把电流反向进行读数；增加砝码过程中和减小砝码过程中分别读数；转盘转 180° 进行读数等，看结果是否一致。

(3) 改变某些参量的数值 改变某参量的取值，看结果是否有某种变化。有时为了判断某个因素是否会带来系统误差，常采用这种方法。如改变摆角测周期，可看出摆角大小对周期的影响。

(4) 改变实验条件 如用惠斯登电桥测电阻时，可以改变桥臂电阻的位置，如把 R_x 和 R_0 互换，

判断有无系统误差存在。

(5) 两个人对比观测 可发现人员误差。

(6) 实验方法的对比 必要时可改变实验方法去测量,看结果是否一致。如分别用单摆、自由落体仪、弹簧振子测得本地的重力加速度,若在偶然误差范围内三者不重合,则说明至少其中两个存在系统误差。

2) 理论分析法

(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,是否超过了测量精确度所要求的范围。有时理论上采用了一些理想化的模型,要分析这种模型与实际有多大差距。如单摆实验中,公式 $T = 2\pi\sqrt{l/g}$ 是做了 $\theta \approx 0$ 的近似,而实验中 $\theta \neq 0$;式中把摆球看做质点,忽略摆线质量,实验中摆球体积 $V \neq 0$,摆线也具有质量,实际上是一个复摆;公式中忽略了空气浮力与阻力,而实际上是存在的,等等。

(2) 分析仪器是否达到了所要求的使用条件。如标准电池给出的电动势值是在工作温度为 20°C 条件下的值,看看室温是否与要求一致;又如使用光杠杆镜尺系统时要求平面镜反射面垂直,标尺垂直,望远镜光轴水平等,分析实验中是否达到了要求;光杠杆测微小长度变化量公式 $\Delta L = kl/2D$ 中,要求 $\Delta L \ll k$, $l \ll D$,实际中是否达到要求,由此引入多大误差等。

总之,要分析公式推导中每一步所要求的条件与实际是否一致,每一个实际测得的量与公式中写的量是否真正一样,仪器使用的条件是否合乎规定等。

3) 分析数据法

这种方法的理论依据是随机误差服从一定的统计分布规律,如果实验结果不遵从这种规律,则说明存在系统误差。在相同条件下得到大量数据时,可用这种方法。

如按测量次序记录的测量数据的偏差是单向或周期性变化,说明存在固定的或变化的系统误差,因为按照随机误差的统计分布理论,测量值的散布在时间和空间上应该是随机的。

以上只是从普遍的意义介绍了几种发现系统误差的途径,实际工作中还会有许多具体办法。

2. 系统误差的修正和消减

消减系统误差对测量结果的影响是测量工作中一件最重要的事情。由于人们不可能全部掌握所有系统误差的规律和大小,因而也就不能全部消减它们对测量结果的影响。实际上任何“标准”的仪器,总是有缺陷的,任何理论模型也只是实际情况的近似。因此,对系统误差只能尽量设法去减小它,不可能绝对地消除。所谓“消减”系统误差的影响是指把它的影响减小到随机误差之下,如果系统误差不影响有效数字的最后一位,就可认为是已经消减了它的影响。因此,对于不同的测量精度要求,所要考虑的系统误差项也不同。

从原则上来说,消减系统误差影响的途径首先是设法使它不产生。如果做不到,那么就设法修正它,或者设法在测量中抵消或减小它的影响。下面简要介绍几种消减系统误差影响的途径。

1) 消减系统误差产生的根源

这是消减系统误差的最根本的方法,它要求实验者首先要仔细分析所采用的实验方法、仪器、设备、环境条件和实验者的素质等方面,对可能产生系统误差的因素尽可能预先处理,以从根源上加以消除。如采用更符合实际的理论公式,正确地调整仪器,合理地布局仪器,在外界条件稳定在规定的之后再行测量,以保证满足仪器装置及测量所要求的条件等。

2) 用修正值修正测量结果

这种方法是预先用标准仪器对测量器具进行校准,得出误差表或校准曲线,然后取与误差数值大小相同而符号相反的值作为修正值,将实际测得值加上相应的修正值,即可得到不包含系统误差的测量结果。或对理论公式进行修正,找出修正值。

由于修正值本身也包含有一定误差,因此用修正值修正的方法,不可能全部消减系统误差,总要残留少量系统误差。对于残留的系统误差按随机误差进行处理。

3) 定值系统误差消减法

(1) 替代法 这种方法是在一定的测量条件下,对某一被测量进行测量,使在仪器上得到某一状态(如指针指示零位、天平平衡等),再以同样性质的标准量替代被测量,调整标准量值的大小,使在仪器上呈现出与前者相同的状态,则此时的标准量值即等于被测量值。由于两次测量都在仪器上呈现同一状态,故一切定值系统误差的影响相同,这样就消减了除标准量值本身的定值误差以外的一切定值系统误差。而标准量的定值误差还可进一步检定修正。

如用惠斯登电桥测电阻,可先接入待测电阻使电桥达到平衡,然后保持其他条件不变,用标准电阻替换待测电阻,调节标准电阻的大小,使电桥再次达到平衡,则标准电阻值就等于待测电阻值。

(2) 交换法 这种方法是根据误差产生的原因,在一次测量后,将某些测量条件交换一下,以消减系统误差。

例如在等臂天平上称量重物 X ,如图 1-2-1 所示,第一次测量标准砝码 P 放于右边,调平衡后有

$$X = \frac{l_2}{l_1} P$$

将 X, P 交换位置后,由于 $l_1 \neq l_2$,砝码将略有增减,再次平衡后 $P' = P + \Delta P$,于是有

$$P' = \frac{l_2}{l_1} X$$

取

$$X = \sqrt{PP'}$$

即可消除天平两臂不等而带来的误差。

(3) 抵消法(异号法) 当已知有某种产生定值系统误差的因素存在,而又无法从根源上消除,也难确定其大小并从测量结果中修正时,可考虑能否去抵消它。先在有定值系统误差存在的条件下进行一次测量,再在该定值系统误差影响相反的另一状态下测量一次,取两次测量的平均值作为测量结果。这样,由于两次测量中定值系统误差的大小相等、方向相反,取平均值后便相互抵消了。

4) 线性系统误差的对称观测法

若有随时间线性变化的系统误差,可将观测程序对某时刻对称地再做一次。例如,一只灵敏电流计零点随时间有线性漂移,在测量读数前记一下零点值,测量读数后再记一次零点值,取两次零点值的平均来修正测量值。又如,做空气温度计实验室内大气压强 P_0 时,要在实验前测量一次,实验后再测一次,取两次的平均值作为该次实验的大气压强值等。

由于很多随时间变化的误差在短时间内均可近似认为是线性变化,因此对称观测法是一种能够消减随时间变化的系统误差的常用方法。利用此规律可消减线性系统误差。

5) 半周期性偶数观测法

对周期性系统误差的消减基本方法是半周期偶数观测法。周期性系统误差一般出现在有圆盘或转动的情况下(如度盘等),多呈正弦形式,周期为 2π 。若相隔半个周期进行一次测量,两次读数取平均值,即可有效地消除周期性系统误差。周期性系统误差可表示为

$$\Delta_s = e \sin \phi$$

当 $\phi = \phi_1$ 时

$$\Delta_{s1} = e \sin \phi_1$$

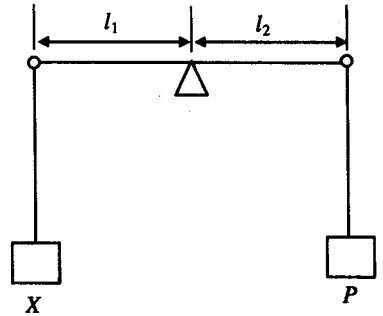


图 1-2-1

当 $\phi = \phi_1 + \pi$ 时

$$\Delta_{s2} = e \sin(\phi_1 + \pi) = -e \sin \phi_1$$

故有

$$\Delta_{s1} + \Delta_{s2} = 0$$

即测量一个数据后，相隔半个周期再测量一个数据，只要测量次数为偶数，取其平均值，即可消除周期性系统的影响。例如，仪器度盘安装偏心引起的误差都可用此法予以消除。在用分光计等测角仪器测量时，为消除偏心差，都采用间隔 180° 的两个游标同时读数，再取其平均值的方法。

以上仅仅是列举了几种减小或消除某些简单的系统误差的方法，实际上许多系统误差的出现，常常是由于实验所用的理论不完善，或理论背后还隐藏着未被发现的某些规律。系统误差的出现，将促使人们更深入地进行研究并获得新的发现。

1.2.2 测量结果的最佳值与随机误差的估算

1. 随机误差的统计规律与测量结果最佳值

实践和理论都证明，大部分测量的随机误差服从统计规律，其中最典型的一种是高斯正态分布律。标准化正态分布曲线图如图 1-2-2 所示。

图中 ε 表示测量值 x 的误差， $f(\varepsilon)$ 为概率密度函数，误差出现在 $\varepsilon - \varepsilon + d\varepsilon$ 范围内的概率为 $f(\varepsilon)d\varepsilon$ 。由概率论的数学方法可以导出

$$f(\varepsilon) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\varepsilon^2/2\sigma^2} \quad (1-2-1)$$

式中， σ 是一个与实验条件有关的常数，称为标准偏差。设 ε_i 为第 i 次的测量误差， n 为测量次数，则

$$\sigma = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{\sum \varepsilon_i^2}{n}} \quad (1-2-2)$$

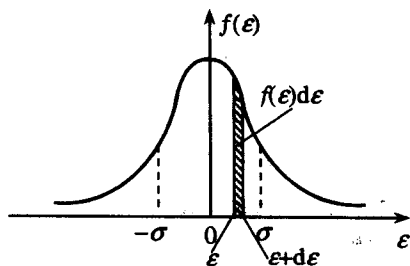


图 1-2-2

从图 1-2-2 可以看出，服从正态分布的误差具有下面一些特性：

- (1) 单峰性：绝对值小的误差比绝对值大的误差出现的概率大。
- (2) 对称性：绝对值相等的正负误差出现的概率相同。
- (3) 有界性：绝对值很大的误差出现的概率近于零，即误差的绝对值不超过一定限度。
- (4) 抵偿性：随机误差的算术平均值随着测量次数的增加越来越趋于零。即

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varepsilon_i = 0 \quad (1-2-3)$$

由定义

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - A) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varepsilon_i$$

即

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i - A = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varepsilon_i \quad (1-2-4)$$

上式表示测量值的算术平均值的误差，等于各次测量误差的算术平均值。由随机误差的对称性和抵