

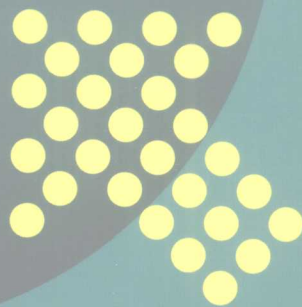
21世纪高等学校规划教材



DAXUE WULI SHIYAN

大学物理实验

杨党强 吴 纲 金亚平 编



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>

04-33
174

04-33
174

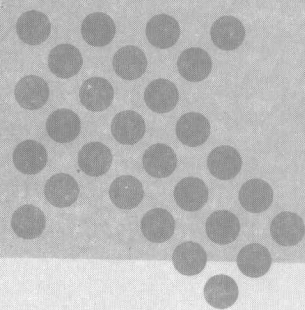
21世纪高等学校规划教材



DAXUE WULI SHIYAN

大学物理实验

杨党强 吴 纲 金亚平 编
孙振武 主 审



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书介绍了不确定度的基础知识和数据处理的基本方法,并涉及力学、热学、声学、电磁学、光学、近代物理、虚拟仪器等多方面的实验内容,其中包括综合、设计性实验;在实验内容的选择和编排上,注重突出物理实验的基本知识、基本方法、基本测量技术,反映了若干物理学的最新进展和科技发展的最新成就与技术。工科各专业的本科生可根据自身专业的特点和需求,选择适合的实验内容,学有余力的同学可以增选设计和专题实验。

本书可作为理工科非物理类专业大学物理实验课程的教材,也可供其他专业的学生和社会读者阅读、参考。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验/杨党强,吴纲,金亚平编. —北京:中国电力出版社,2009

21世纪高等学校规划教材

ISBN 978-7-5083-8165-7

I. 大… II. ①杨…②吴…③金… III. 物理学—实验—高等学校—教材 IV. 04-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第190205号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2009年2月第一版 2009年2月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 14.5印张 351千字

定价 23.20元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

前言

本书为 21 世纪高等学校规划教材。

大学物理实验课程是高等理工科院校对学生进行系列科学实验基本训练的必修公共课程,也是学生接受系统实验方法与实验技能训练的开端。大学物理实验课程覆盖面广,具有丰富的实验思想、方法和手段,是培养学生科学实验能力,提高科学素质的摇篮。它在激发学生创新意识以及适应科技发展的综合能力等方面具有其他课程所不可替代的作用。抓好大学物理实验课程的建设对于培养国家所需的科技人才具有重要作用。

进入 21 世纪以来,大学物理实验课程发生了很大变化,概括来说,本课程必须担负起培养学生创新精神、创新意识和创新能力的任务。这就要求大学物理实验课程与时俱进,对教学体系、教学内容、教学方法和教学手段进行深入的改革。

在重新审视以往教学模式的基础上,上海电机学院大学物理实验室非常重视大学物理实验课程教学体系改革,同时以学校的实验室建设投资作为硬件环境支撑,对原有实验项目内容进行整合,并对相应实验仪器进行了更新。本教材正是在总结近几年的工作基础上写成的。

和几年前的教材相比较,本教材纳入了一些具有时代气息的实验项目,比如计算机虚拟实验、数字示波器的使用等;本教材打破了近代物理实验与大学物理实验的界限,把一批近代物理实验融入大学物理实验中,如密立根油滴实验、光电效应、弗兰克—赫兹实验等;本教材还增加了一些与生产实践和科研有密切联系的实验,如温度传感器特性研究、CCD 器件的特性及应用、霍尔传感器特性及应用等。

本教材共分 7 章,第 1 章是绪论,主要介绍物理实验课程的目的和任务,以及告诉学生本课程应注意的教学环节及介绍测量不确定度以及主要的数据处理方法,该内容为课程的重点和难点,要求学生必须掌握;第 2 章为基础性实验,第 3~5 章分别为力热学、电磁学、光学实验,根据专业的不同选择不同的实验项目,学生应完成该部分实验项目的 60%~70%;第 6 章为近代物理以及综合设计性实验,目的是巩固学生在基本实验阶段的学习成果,开阔眼界及思路,提高学生对实验方法和技术的综合运用能力;第 7 章为计算机虚拟实验。在本教材中,每个实验均对学生提出了相应的要求,并且留有思考题,以提高学生对该实验的认识。全书由杨党强、吴纲、金亚平编写,具体分工如下:

杨党强编写了绪论,第 1 章,第 2 章中的实验 1、实验 4,第 3 章中的实验 5、实验 8、实验 10,第 4 章中的实验 12 至实验 16,第 6 章中的实验 24、实验 28、实验 29、实验 32,第 7 章中的实验 33~实验 35,第 3 章和第 4 章的仪器介绍及附录;吴纲编写了第 2 章中的实验 2、实验 3,第 3 章中的实验 7、实验 9,第 4 章中的实验 11,第 5 章中的光学实验概述、实验仪介绍及实验 17 至实验 21,第 6 章中的实验 25、实验 27、实验 30;金亚平编写了第 3 章中的实验 6;第 5 章中的实验 22、实验 23;第 6 章中的实验 26、实验 31。

本教材是上海电机学院大学物理实验室教职工近几年教学改革成果的结晶。在编写过程中,得到了不少校内外同仁的帮助,特别是孙振武教授在百忙中抽出时间对全书进行了仔细审阅,提出许多宝贵意见,特此深表谢意。由于水平所限,对本教材中存在的疏漏和不妥之处,望读者和各位同仁不吝赐教。

对支持和关心本教材编写的全体同仁表示衷心感谢!

编 者

2008年10月

目 录

前言

绪论	1
第1章 测量误差与实验数据处理	5
1.1 测量的定义与基础知识	5
1.2 有效数字及其运算	6
1.3 测量误差	9
1.4 误差处理	12
1.5 测量不确定度与测量结果表示	16
1.6 实验数据处理的基本方法	21
第2章 基础实验	28
实验1 物体密度及长度的测量	28
实验2 伏-安法测电阻	34
实验3 薄透镜焦距的测量	36
实验4 示波器的使用	40
第3章 力学、热学和声学实验	53
3.1 长度测量器具	53
3.2 计时器	54
3.3 质量测量仪器	55
3.4 温度测量仪器	57
3.5 气压计与湿度计	59
实验5 用拉伸法测量金属弹性模量	61
实验6 液体表面张力系数的测定	67
实验7 落球法测定液体的黏滞系数	70
实验8 转动惯量的测量	73
实验9 冰的溶解热测定	77
实验10 声速的测定	80
第4章 电磁学	88
4.1 电磁学实验基本知识	88
4.2 标准电池	93
4.3 标准电阻	94
4.4 指针式检流计	95
实验11 电学元件伏安特性的测量	95
实验12 直流电桥与电阻测量	102
实验13 直流电位差计的使用	107
实验14 电表改装与校准	110

实验 15	集成霍尔传感器的特性研究及应用	115
实验 16	用电流场模拟静电场	121
第 5 章	光学实验	128
5.1	概述	128
5.2	光学实验的特点和注意事项	129
5.3	常用光源、光学元件和仪器	129
实验 17	分光计及其应用	133
实验 18	测量显微镜及其应用	138
实验 19	迈克尔逊干涉仪的调整及其应用	143
实验 20	用 CCD 成像系统观测牛顿环	147
实验 21	光敏电阻基本特性的测量	150
实验 22	激光偏振实验	152
实验 23	单缝衍射的光强分布	158
第 6 章	近代物理与综合设计性实验	162
实验 24	用密立根油滴仪测量电子电量	162
实验 25	普朗克常数测定	169
实验 26	夫兰克—赫兹实验	172
实验 27	全息照相	177
实验 28	稳态法测量不良导体的导热系数	183
实验 29	磁性材料基本特性的研究	187
实验 30	太阳能电池伏—安特性的测量	193
实验 31	温度传感器特性的研究	196
实验 32	简易万用表的设计与校准	203
第 7 章	计算机仿真实验	206
实验 33	气垫上的直线运动	207
实验 34	碰撞和动量守恒	211
实验 35	真空实验	215
附录		219
参考文献		223

绪 论

人类在与自然界长期共存的过程中,积累了丰富的实践经验,其实践活动不外乎两种,一种是科学实验,另一种是生产实践。所谓科学实验,是指人们按照一定的研究目的借助特定的仪器设备,人为地模拟或控制自然现象,突出主要因素,对自然事物和现象进行反复地观察和精密测试,以探索其内部规律性的活动。

显然,科学实验的探索活动是人们认识客观世界,改造客观世界的第一步,是工程技术的基础。许多现代化的企业都建有自己的研究实验室,以利于直接将新的实验规律应用于生产中,改进和开发新产品。同时,科学实验又是科学理论的依据,一个新规律的发现将导致新理论的产生,而一个新的理论要靠实验来验证并反过来指导新实验,理论和实验的这种相互依存、相互促进的关系正是推动科学事业发展的根本动力。

可见,作为一个科技工作者,无论是从事理论研究还是工程技术研究,都必须具备相当水平的科学实验能力,也即具备能够通过观察现象或透过储量间的数值关系,提示事物内部规律的能力,只有这样,才能够突破感观的限制,将视野扩展到微观和宏观,才能够有所建树,有所创新。正因为如此,大学教育的任务,不仅仅要求学生通过理论课掌握已有知识,还要安排一系列的实践性课程,以培养学生主动研究和创新的探索能力,这是一条由已知通向未知的必经之路。

一、物理实验的地位及作用

著名物理学家丁肇中教授曾说过:“实验科学是科学技术中很活跃的部分。自然科学是实验科学,任何理论与自然科学现象不符合就不能存在。它是发展自然科学的重要基础和动力。”而物理学从本质上说是一门实验科学,是一门研究和探索客观物质世界奥秘和规律的学科,其研究领域从基本粒子到浩瀚的宇宙,探究整个宇宙中物质的各种形态、现象、运动规律和相互作用,揭示宇宙中各种事物间的内在联系和本质。

物理学是新兴技术学科的源头和基础,是自然科学的核心基础学科。实验物理和理论物理是构成物理学的两大支柱。“没有实验,理论是空洞的;没有理论,实验是盲目的”,理论和实验是相辅相成的,它好比人之双足,鸟之双翼,缺一不可。物理学的基本定律都是来源于物理实验或受到物理实验的检验才得以成立的。以实验物理学方面的伟大发明或发现而获得诺贝尔物理学奖的物理学家,占总获奖(诺贝尔物理学奖)人数的 $\frac{2}{3}$ 以上,这足以说明物理实验研究在物理学中所处的重要地位。

物理实验中的发现和发明已经对物理学的发展和新型学科的诞生起到巨大的推动作用,例如:电磁感应定律和无线电的发现、晶体管的发明为当今半导体、电子工程、计算机、信息科学等学科的诞生和发展奠定了坚实的基础;X光和放射性的发现为物质结构的研究、现代医学成像、CT断层扫描、工业无损检测等领域的发展奠定了基础;激光器的发明,不仅开辟了激光光谱学这一新的学科,而且为材料制备、光电通信和现代医疗技术等学科和高新技术奠定了基础……物理学与其他学科的“组合”、“嫁接”、“交汇”都可能产生巨大的能量,成为促进现代高科技发展和新兴学科诞生的催化剂。一个典型的例子是DNA双螺旋结

构的发现：沃森（生物学家）克里克（物理学家）的合作与其在学术上的互补导致了《核酸的分子结构——DNA 的结构》这篇著名论文的诞生，开启了生命遗传之谜的大门，成为 20 世纪生物学上最伟大的成就之一。

物理实验是自然科学的基础，它反映了理工科实验的共性和普遍性问题。实验物理学不仅是现代新兴学科和高科技的基础，而且对人的科学素质培养也起着极为重要的作用。物理实验课程曾经为培养 20 世纪的优秀人才作出了卓越的贡献，必将为培养 21 世纪的高科技优秀人才奠定坚实的基础。

大学学习期间有一系列的实践性课程，物理实验课就是这一系列实践性课程的开端。由于在长期的物理实验研究中，人们积累了丰富的实验方法，创造出各种精密巧妙的仪器，从而使得物理实验课有了充实的教学内容，通过物理实验课，可以学到许多基本实验方法和实验技能，观察到各种生动的自然现象，为今后的学习和工作奠定基础。

二、物理实验课的教学任务

本课程以基本物理量的测量方法、基本物理现象的观察和分析、常用测量仪器的结构原理和使用方法为主要教学内容，对学生的基本实验能力、分析能力、表达能力和综合设计能力及创新能力等进行较全面的培养，按照教育部的《高等工业学校物理实验课教学基本要求》的规定，大学物理实验课的具体任务如下。

(1) 通过对实验现象的观察、分析和对物理量的测量，学习物理实验知识，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) 能够通过自行阅读实验教材或资料、概括出实验原理和实验方法的要点，做好实验前的准备（培养阅读和运用资料的能力）。

2) 能够借助于教材或仪器说明书，正确使用常用仪器（培养实际操作能力）。

3) 能够运用物理学原理对实验现象进行初步分析、判断（培养分析问题、解决问题的能力）。

4) 能够正确记录和处理实验数据，绘制曲线，说明实验结果，撰写合格的实验报告（培养正确论述的表达能力）。

5) 能够完成简单的，具有设计性内容的实验（培养设计能力）。

(3) 培养与提高学生的科学实验素质。要求学生具有理论联系实际和实事求是的科学作风，严肃认真的科学态度，主动研究的探索精神，以及遵守纪律、团结协作和爱护公共财产的优良品德。

三、物理实验课的基本程序及学习方法

物理实验课的基本程序可分为课前预习，实验操作，撰写实验报告三个阶段，各阶段要完成的任务及方法如下。

1. 课前预习

每次实验前要以实验报告册及教材上的思考题为索引，通过阅读实验教材和相关资料。弄清本次实验的目的、原理、测量方法、仪器的使用及测量内容，了解实验中特别要注意的问题（如测试条件、仪器正确使用规程及安全防护事项等），并在此基础上写出预习报告。预习报告应包括：实验名称、目的、仪器、原理简述、计算公式、电路或光路图，以及操作大致步骤，操作注意事项、数据记录表格等。

注意：此步工作是实验能否顺利进行的关键，且预习的好坏将作为课内评定成绩的一项内容，对于没有预习或预习不合格的学生，教师有权停止其本次实验，该次课内成绩为不及格。

2. 实验操作

正式测量前，应先将仪器合理摆放并安装（或连电路），熟悉仪器的操作使用，要将仪器设备调试至最佳工作状态下进行测量，操作中要明确每一步操作的意义及应出现的现象（或规律），若出现异常情况，则不能盲目操作，要分析可能的原因，找出解决办法。

注意：

1) 不能把实验仅仅理解成读取几组数据的过程，实验具体测试内容只是学习某种测量方法、某种仪器使用的载体，不能本末倒置。当实验遇到问题时，要看做是一次很好的学习机会，应开动脑筋，好好把握。

2) 除需记录表格中测试内容外，还应记录所用仪器的规格、型号、准确度等级，必要时，还应记录实验环境条件，如室温、气压等。

3) 所测原始数据一定要真实，实验完成后，原始数据要经教师审阅签字，签字后方可将仪器拆除复原，离开实验室。否则实验数据视为无效。

3. 撰写实验报告

实验报告的内容由以下几部分组成：

- (1) 实验名称；
- (2) 实验目的；
- (3) 实验仪器；
- (4) 实验原理；
- (5) 实验内容、步骤与原始记录；
- (6) 数据处理；
- (7) 正确的实验结果和结论表述；
- (8) 思考题、小结或讨论。

报告力求文字简洁、通顺，图表制作力求规范、正确。值得强调的是，撰写实验报告一定要用自己的语言来表述所有内容，特别是对测量结果的评价与分析一项，一定要认真完成，这是一个融会贯通知识，培养自己分析问题、解决问题能力的窗口。若所得数据规律与预期相符，则可着力分析误差来源及提高测量精度的途径，若数据规律与预期不符，也未必是坏事，应分析主要原因，找出症结所在（迈克尔逊—莫雷实验“失败”，导致了新的时空观产生）。

总之，做物理实验是一项脑手并用的智力活动，要想通过有限次实验获取尽可能多的知识，就需充分做好上述三个阶段中每一环节的工作，且对待每一个实验都要像一个科学工作者那样要求自己，要细心观察实验现象，认真思考实验中出现的問題。实验的好坏和成败，实验的收获和能力增长，不能单纯从实验结果与理论相符的程度来评定。实验中要多动脑筋，举一反三，灵活地学好物理实验课，提高学习效率，收到事半功倍的效果。

当今时代是科学技术迅猛发展的时代，具备良好的科学实验素质，是这个时代科学技术人才必备的基本条件，在培养既懂理论又会动手的高科技人材的过程中，物理实验课具有独特的重要作用，应该引起高度重视。

四、实验室安全

实验室是进行科学实验研究和实践的地方，有大量的仪器设备、实验材料和特殊的实验环境。各类实验室装备不同，实验环境要求也不同，分别涉及各种电源、电磁场、水源、激光、高温、高压、低温、真空、放射源以及精密仪器等。学生进入实验室学习一定要养成良好的实验习惯，严格执行实验室给出的各项具体的操作规程和安全防护规则，确保人身安全和仪器安全。例如：做电学实验注意遇到 220V 以上的交流电和高压电时，应备加小心，切勿带电操作；切勿用手触摸带电接触点、裸露的接线片或接线柱；做高温或低温实验时，切勿用手直接触摸以免烫伤；做光学实验时，避免用眼睛直接对着强光源或激光观察，以免灼伤眼睛；调光路过程中，应在白纸或白屏上观察光斑，不能用眼睛直接对着光线观察；严禁用手触摸光学元件表面，避免污染和损坏光学元件；需要擦拭光学元件表面时，必须使用专用丝绸、镜头纸等，严禁用其他纸张或布类擦拭。用到放射源的实验要特别小心，完成实验后应将放射源封装到铅盒之中，严格遵守安全防护规则。学生完成实验后，一定要关闭电源，仪器归位，最后离开实验室的同学一定要关实验室的总电源，关闭水源和门窗，避免水灾、火灾和盗窃事故的发生，这也是培养科学工作者的基本素质之一。

第1章 测量误差与实验数据处理

所有描述物质运动状态和运动形式的物理量都可以从几个基本物理量中导出,而这些基本物理量只有通过测量才能定量描述。这种将待测物理量直接和间接地与作为基准的相关物理量进行比较的过程,叫做测量。在测量过程中,如何正确地记录并处理一组原始实验数据,以及如何正确地评价物理量的测量值及其接近于客观真实的程度,是每一个实验工作者必须具备的能力。本章将就这方面的知识做一简单的介绍。

1.1 测量的定义与基础知识

1.1.1 测量

测量是将待测物理量与选做计量标准的同类物理量进行比较,得出其倍数值的过程。倍数值称为待测物理量的数值,选做的计量标准称为单位。一个物理量的测量值应由数值和单位两部分组成,缺一不可。

1.1.2 物理量单位

按照中华人民共和国法定计量单位的规定,物理量单位均是以国际单位制(SI)为基础的,其中长度(m)、质量(kg)、时间(s)、电流强度(A)、热力学温度(K)、物质的量(mol)和发光强度(cd)是基本单位,其他物理量的单位可由这些基本单位导出,故称为导出单位。

1.1.3 测量的分类

根据测量方式,测量可分为直接测量和间接测量。从测量条件上,测量可分为等精度测量和不等精度测量。

1. 直接测量和间接测量

可以用测量仪器或仪表直接读出测量值的测量称为直接测量。例如用米尺测长度、用温度计测温度、用电压表测电压等都是直接测量,所得的物理量如长度、温度、电压等称为直接测量量。

有些物理量无法进行直接测量,而需依据待测物理量与若干个直接测量量的函数关系求出,这样的测量就称为间接测量。大多数的物理量都是间接测量量。例如,用单摆法测重力加速度 g 时,周期 T 、摆长 L 是直接测量值,而 g 就是间接测量值。

2. 等精度测量和不等精度测量

在对某一物理量进行多次重复测量的过程中,每次测量条件都相同的一系列测量称为等精度测量。例如,由同一个人在同一仪器上采用同样的测量方法对同一待测物理量进行多次测量,每次测量的可靠程度都相同,这些测量就是等精度测量。

在对某一物理量进行多次测量时,测量条件完全不同或部分不同,各测量结果的可靠程度自然也不同的一系列测量称为不等精度测量。例如,在对某一物理量进行多次测量时,选用的仪器不同,或测量方法不同,或测量人员不同等都属于不等精度测量。

一般来讲,在实验中,保持测量条件完全相同的多次测量是极其困难的。但当某一条件的变化对结果影响不大时,仍可视这种测量为等精度测量。等精度测量的数据处理比较容易,绝大多数实验都采用等精度测量。除非不得已,一般情况不采用不等精度测量。在物理实验中,以学习等精度测量的数据处理为主。

1.1.4 基本测量方法

1. 直读法

使用具有相同单位分度的量具或仪表直接读取被测量值的大小的方法叫做直读法。如用安培表测量电流,用伏特计测量电压等。直读法的特点是测量方便,但受仪器示数误差和读数误差限制,测量准确度一般不很高。

2. 比较法

将被测对象直接与体现计量单位的标准器进行比较的方法叫做比较法。如用砝码和天平称质量,用单臂电桥测电阻,用电位差计测电动势,用标准信号源和示波器测频率等。当比较器选择适当时,这种方法的准确度仅取决于标准器,因而测量准确度高。但因操作较烦琐,故只在实验室中采用。

3. 放大法

所谓放大法,是在测量中,若被测量很小,无法被观察者察觉,可通过某种方法将其放大后再进行测量。如用光杠杆可将微米级伸长量放大,使之在毫米尺上得到充分的反映;用千分尺测长度,采用的是螺旋放大微小间距的原理。示波器、望远镜等都是由某种放大原理制成的仪器。

4. 转换法

所谓转换法,是当待测物理量不便或无法直接测量时,可转化为对该量所产生的某种效应进行测量。如玻璃温度计就是根据温度对液体的热胀冷缩效应,将温度量转化为长度量进行测量的。而将非电量转化成电量进行测量(如热电偶测温度、超声干涉测声速等)和将非光学量转换成光学量进行测量(如干涉仪测长度、折射法测浓度等)等,已是现代精密计量的重要组成部分。

5. 模拟法

所谓模拟法,是对有些不易测量的量,可根据相同的物理或数学模型有相似结果的特点,用模拟的测量代替对原型的测量。如静电场与稳恒电流场有相同的数学模型,可用对稳恒电流场等位线的测量,来模拟静电场等位线的测量。

6. 干涉测量法

所谓干涉测量法,是利用光波干涉条纹的分布与变化,来测量微小长度、微小角度、光洁度等量。干涉测量技术是现代精密测量的重要组成部分。

1.2 有效数字及其运算

1.2.1 有效数字的基本概念

不管哪种测量的结果,都是用数字和单位表达的。用量具或仪器测得的数由两部分构成,一部分按仪器的刻度读出,可以读到它的最小分度,这部分以刻度为依据,应视为准确的数字,称为可靠数字,而另一部分则是在最小刻度以下估读的,不同的观测者可得出不同

的结论,故此位上的数字不够准确,称为可疑数字。

如图1-1所示,用米尺测量细棒的长度,可读出棒长为4.14cm、4.15cm或4.16cm,前二位4.1cm是从米尺上整分数读取的,是可靠数字,而第三位是测量者估读出来的,其值因人而异,为可疑数字。有效数字是指包括一位可疑数字在内的所有从仪器上直接读下来的数字。

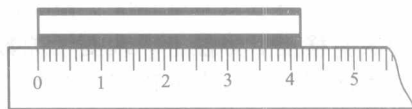


图1-1 估读

根据有效数字的定义,实验记录中的原始数据最后一位应该是估读的,所有实验工作者都应遵从这一规则来记录测量数据。用有效数字表示测量结果时,即使没有给出误差范围,也可粗略地表达测量的准确度。

一般而言,仪器的分度值是根据仪器误差所在位来划分的。由于仪器多种多样,读数规则也略有区别。正确读取有效数字的方法大致归纳如下:

(1) 一般读数应读到最小分度以下,估读一位。不一定估读1/10,可根据情况(据分度的间距、刻线、指针的粗细及分度的数值等)估读最小分度值的1/5、1/4或1/2。但无论怎样估计,最小分度位总是准确位,最小分度的下一位是估计的欠准位。

(2) 有时,读数的估计位就取在最小分度位。如仪器的最小分度值为0.5,则0.1、0.2、0.3、0.4及0.6、0.7、0.8、0.9都是估计的;如仪器最小分度值为0.2,则0.3、0.5、0.7、0.9都是估计的,这类情况都不必再估到下一位。

(3) 若仪表的示值不是连续变化的,而是以最小步长跳跃变化的,如数字式显示仪表,则谈不上估读,只要记录全部数据即可。

(4) 需要指出的是,有些仪表虽然也有指针和刻度盘,但指针跳动是以最小分格为单位的,例如,最常用的钟表有以秒为最小分度的时钟,也有以1/10s或1/100s为最小分度的秒表,因此,对此类仪表不需要估读。

(5) 对于各类带有游标(或角游标)的仪器装置,是依靠判断两个刻度中哪条线对齐来进行读数的,这时一般记下对齐线的数值,不必进行更细的估读。

(6) 特殊情况下,直读数据的有效数字由仪器的灵敏阈决定。例如,在测量灵敏电流计临界电阻时,调节电阻箱的“ $\times 10$ ” Ω 挡,仪表上才刚刚有反应,所以尽管电阻箱的最小步进值为0.1 Ω ,测量值也只能记录到“ $\times 10$ ” Ω ,如记为 $R=8.53 \times 10^3 \Omega$ 。

(7) 在读取数据时,如果测量值恰好为整数,则必须补“0”,一直补到可疑位。例如,用最小刻度为1mm的钢板尺测量某物体的长度恰为12mm时,应记为12.0mm;如果改用游标卡尺测量同一物体,读数也为整数,应记为12.00mm;如再改用千分尺来测量,读数仍为整数,则应记为12.000mm;切不可一律记为12mm。

(8) 有效数字中“0”的性质。数字前的“0”只起定位作用,不是有效数字,数字中间和数字后面的“0”都是有效数字,10的方幂只表示数量级,不表示有效数字。如0.002 030和 2.030×10^{-3} 均为4位有效数字。

(9) 科学记数法。对一个物理量测量结果的有效数字位数,一方面与测量仪器的准确度有关,另一方面若同样用米尺去测量两个物体,一个是几米,一个是十几米,则所测数据的有效数字位数也不同。故一个正确的测量数据将反映来自被测物理量和测量工具准确度这两方面的信息,即有效数字的位数由被测量及仪表的准确度决定,一般与单位无关。所以,将

有效数字变换单位时,不能改变原数据的有效位数(对非十进制单位变换有例外),如 53.0V 可写成 0.053 0kV,但不能写成 53 000mV,因为后一种表示,将原始数据十分位上的误差移至千分位上,改变了原数据的准确度。为解决这个矛盾,应该使用科学记数法,即把数据写成小数点前面只有一位,再乘以 10 的幂次来表示。如上述电压数据应写成 $5.30 \times 10\text{V}$ 、 $5.30 \times 10^{-2}\text{kV}$ 或 $5.30 \times 10^4\text{mV}$ 。这种记法既能表达出有效数字位数,又能表达出数字的大小,而且计算起来容易定位,所以在实验数据的书写中,应该尽量采用科学记数法。

1.2.2 有效数字的运算规则

有效数据运算的总原则:可靠数字与可靠数字(含常数)之间的运算,得可靠数字,否则运算得可疑数字。运算的最后结果保留有效数字,即数据包含所有可靠数字和一位可疑数字,其后的数字按舍入规则处理。具体方法及规律如下。

1. 加减运算

方法:先将各数的单位统一,然后列出纵式进行运算。

规律:和或差的可疑数字位置,与参与运算各量中可疑数字数量级最大的一位对齐。

【例 1-1】 加减运算(数字下面画横线的为可疑数字)。

(1)

$$\begin{array}{r} 521.\underline{3} \\ +) 10.\underline{04} \\ \hline 531.\underline{34} \\ 521.\underline{3} + 10.\underline{04} = 531.\underline{3} \end{array}$$

(2)

$$\begin{array}{r} 5\underline{3} \\ -) 21.\underline{2} \\ \hline 3\underline{1.8} \\ 5\underline{3} - 21.\underline{2} = 3\underline{2} \end{array}$$

2. 乘除运算

规律:所得积或商的有效数字位数一般与参与运算各量中有效数字位数最少的相同。但对于乘法运算,当两首位数相乘大于 10 时(有进位),其运算结果可多保留 1 位。

【例 1-2】 乘除运算。

(1)

$$\begin{array}{r} 33.\underline{11} \\ \times) 2.\underline{11} \\ \hline 33\underline{11} \\ 66\underline{22} \\ \hline 698\underline{621} \\ 33.\underline{11} \times 2.\underline{11} = 69.\underline{9} \end{array}$$

(2)

$$\begin{array}{r} 321.\underline{2} \\ \times) 8.\underline{01} \\ \hline 321\underline{2} \\ 2569\underline{6} \\ \hline 2572\underline{812} \\ 321.\underline{2} \times 8.\underline{01} = 257\underline{3} \end{array}$$

(3)

$$\begin{array}{r} 20\underline{2} \\ 21 \overline{) 425} \\ \underline{42} \\ 50 \\ \underline{42} \\ 8 \\ 425 \div 21 = 20 \end{array}$$

3. 乘方、开方运算

规律:运算结果的有效数字位数与其底的有效数字位数相同。也可按照乘除运算,用可疑数字画线的方法确定。如

$$\begin{aligned} 256^2 &= 6.55 \times 10^4 \\ \sqrt[3]{256} &= 6.35 \end{aligned}$$

4. 函数运算

对数运算规律:对数尾数(即小数点后面的数)的有效数字位数与其真数的有效数字位

数相同。如

$$\ln 21.30 = 3.0587$$

$$\log 1.999 = 0.3008$$

$$\log 1999 = 3.3008$$

$$(\log 1999 = \log 1.999 + \log 10^3 = 3 + 0.3008 = 3.3008)$$

指数函数 e^x 、 10^x 的运算规律：把运算结果用科学记数法表示，小数点后面保留的位数与 x 在小数点后的位数相同（包括紧接小数点后的“0”）。如

$$e^{8.6} = 5.4 \times 10^3$$

$$e^{86} = 2 \times 10^{37}$$

$$10^{2.80} = 6.31 \times 10^2$$

$$10^{0.00280} = 1.00647$$

三角函数运算规律：运算结果由角度的有效位数，即以仪器的准确度来确定，若仪器能读到 $1'$ ，一般取 4 位有效数字。如

$$\cos 30^\circ 24' = 0.8625$$

$$\operatorname{ctg} 5^\circ 21' = 1.068 \times 10^1$$

上面提到的几种函数只是一些特殊函数，一般地说，函数运算结果的有效数字位数应根据误差分析来决定。

此外，在混合运算中遇见诸如 $\frac{1}{3}$ 、 $\sqrt{5}$ 、 π 、 e 等纯数学数和常数时，有效数字位数可以认为是无限的，需要几位就取几位，一般取与各参与运算数据位数最多的相同或多取一位。

1.2.3 数字截尾的舍入规则

有了有效数字的概念，我们就知道在处理实验数据时，并不是运算结果的数字越多越准确。为了使运算结果中只含有一位可疑数字，往往要对可疑数字进行舍入，但在此我们所遵循的舍入规则与过去所说的“四舍五入”规则不尽相同。因为过去是“见五就入”，这样从 1 到 9 的 9 个数字中，入的概率大于舍的概率，从而引起舍入误差，显然不合理。故现在通用的规则：对保留数字末位以后的部分，“四舍、六入、五凑偶”，即末位是奇数则将其变为偶数（五入），末位是偶数则不变（五舍）。例如

$$435\ 550 \rightarrow 4\ 356 \text{ (5 前面是奇数则进位)}$$

$$435\ 650 \rightarrow 4\ 356 \text{ (5 前面是偶数则不变)}$$

$$435\ 054 \rightarrow 4\ 350 \text{ (5 前面是零则不变)}$$

$$435\ 549 \rightarrow 4\ 355 \text{ (进位的 5 不能再进位)}$$

1.3 测量误差

1.3.1 测量误差的来源

在弄清测量误差来源之前，首先应明确以下几个概念。其一，真值。真值是指一个物理量在一定条件下是标准量（单位）的多少倍，它是客观存在的，实际具备的量值，不随测量而变化，用 μ 来表示。其二，测量值。这是通过实验测得的值，由于各种原因，每次测得的

值都有一定的近似性,因而真值无法测得,测量值只是对真值的近似描述,用 x 表示。其三,误差。真值与测量值之间总有或多或少的差异,这种差异在数值上的表示叫做误差,显然误差始终存在于一切科学实验和测量过程中,误差的大小反映了所得到的被测量的数值与真值之间的偏离程度。误差可分下面两种方式来表达。

绝对误差

$$\Delta x = |x - \mu| \quad (1-1)$$

相对误差

$$E = \frac{|x - \mu|}{\mu} \times 100\% \quad (1-2)$$

伴随于测量过程中的误差因素主要源于以下几个方面。

(1) 原理方法误差。我们为测试对象所设计的测量方法及相应推出的计算公式,往往是在将被测量模型化、理想化的条件下得到的。如理想气体、刚体、无限广延的均匀介质、光滑表面、长直螺线管、简谐振动、平行光线、点光源等。这些模型实际上只能是近似成立,故测量结果必然带有一定误差。这种误差,需要通过改善实验条件,使其尽量满足理论要求,或修正理论公式,使之与实际情况更相符的方法来减小。

(2) 仪器误差。任何量具、标准器、指示仪表等,都有一定的准确度等级限制,也即它们的标称值、分度值或指示值在体现计量单位时都有一定的误差范围。一些指零仪器,如天平、检流计、水平仪等的表观指“0”,告诉我们的信息只是某种变化量已小到它们的灵敏度以下。另外,一些仪器的设计本身也存在着固有的各种缺陷。这些因素都会给测量结果带来误差。

(3) 环境条件误差。测量系统以外的各种环境因素,如温度、湿度、气压、振动、灰尘、光照、电场、磁场、电磁波等,都可以引起测量装置及被测量本身发生变化,从而造成实验误差。

(4) 主观误差。主观误差是由操作者各方面素质的差异而引起的误差。如实验者的反应速度、分辨能力、心理素质、工作经验以及固有习惯等。

(5) 其他误差。除上面提到的四个方面的情况会造成测量误差外,还有很多因素可以造成测量值与真值的偏离。如被测量本身的不稳定(电学测量中电流、电压的不稳定,光学测量中光源发光的不稳定等),测量仪器对被测量的扰动,以及人为误操作等。这些因素在设计实验方案和实施测量的过程中都应充分注意到。

1.3.2 误差的分类

根据误差的性质及其产生的原因,将误差分为系统误差、随机误差和粗大误差三大类。

1. 系统误差

在同一条件下多次测量同一量时,误差的大小和方向保持恒定,或在条件改变时,误差的大小和方向按一定规律变化,这种误差称为系统误差,其特点是它的确定规律性。系统误差来源于以下几方面:①由于实验原理和实验方法不完善带来的误差,例如计算公式的近似性所引起的误差;②由于仪器本身的缺陷或没有按规定条件使用仪器而造成的误差;③由于环境条件变化所引起的误差;④由于观测者生理或心理特点造成的误差等。

系统误差的确定性反映在:测量条件一经确定误差也随之确定,重复测量时误差的绝对值和符号均保持不变。因此,在相同实验条件下,多次重复测量不可能发现系统误差。对观