

21世纪高等院校物理实验教学改革示范教材

总主编 周 进 沙振舜

大学

物理实验 (工科)

主 编 刘 平 陈秉岩



南京大学出版社

21世纪高等院校物理实验教学改革示范教材

大学物理实验

(工科)

总主编	周进	沙振舜	
编著	刘平	陈秉岩	
副主编	刘翠红	蒋洪良	
编委	杨卓慧	文文	郭小建
	王建永	熊传华	黄勇
	陈治国	姜悦	李宁



南京大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验(工科)/刘平,陈秉岩主编. —南京:
南京大学出版社, 2011. 12
ISBN 978 - 7 - 305 - 08995 - 4

I. ①大… II. ①刘… ②陈… III. ①物理学—实验
—高等学校—教材 IV. ①04 - 33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 221653 号

出版发行 南京大学出版社
社 址 南京市汉口路 22 号 邮 编 210093
网 址 <http://www.NjupCo.com>
出 版 人 左 健
丛 书 名 21 世纪高等院校物理实验教学改革示范教材
书 名 大学物理实验(工科)
主 编 刘 平 陈秉岩
责任编辑 陈济平 编辑热线 025 - 83686531
照 排 南京紫藤制版印务中心
印 刷 南京人民印刷厂
开 本 787×1092 1/16 印张 15 字数 360 千
版 次 2012 年 1 月第 1 版 2012 年 1 月第 1 次印刷
ISBN 978 - 7 - 305 - 08995 - 4
定 价 22.80 元

发行热线 025 - 83594756 83686452
电子邮箱 Press@NjupCo.com
Sales@NjupCo.com(市场部)

* 版权所有,侵权必究
* 凡购买南大版图书,如有印装质量问题,请与所购
图书销售部门联系调换

序

实验教学是学生培养中的一个非常重要的环节,对理工科学生来说更是不可缺少的,它不仅仅培养学生的基本科学实验技能和素养,更重要的是可以培养学生的科学思维和创新意识,提高学生的综合能力和创新能力。

物理学是一门以实验为基础的科学。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其他学科实验的基础。物理实验内容覆盖面广,具有丰富的思想、方法和手段,同时能提供综合性很强的基本实验技能训练,是培养学生科学实验能力、提高科学素质的重要基础。它在培养学生严谨的治学态度、活跃的创新意识、理论联系实际和适应科技发展的综合应用能力等方面具有其他实践类课程不可替代的作用。

为了加强实验教学,2005年教育部开展了实验教学示范中心建设的质量工程,相应地,各省也开始了一批省级实验示范中心建设。对高校的物理实验,教育部2010年提出了理工科大学物理实验课程教学的基本要求。为了加强物理实验室建设和提高物理实验教学水平,2010年在江苏省高等院校物理实验教学联席会议上,提出编写出版一套大学物理实验系列教材,以满足各不同类型的高校物理实验教学的需要。在南京大学出版社的大力支持下,经过充分酝酿和讨论,成立了江苏省21世纪高等院校物理实验教学改革系列教材编委会,丛书总主编由南京大学国家级物理实验教学示范中心主任周进教授和沙振舜教授担任。该丛书拟定的物理实验分册主要有:《大学物理实验(理科)》《大学物理实验(工科)》《普通物理实验》《物理演示实验》《近代物理实验》等。

该套系列教材的特点是:

1. 在参编学校多年教学实践的基础上完成,教材适用性强,同时也充分展示了近年来物理实验教学改革成果。
2. 采用新的实验模式,教学体系新,满足不同层次不同专业的教学需要。
3. 削减或改编了许多验证性实验,增加了综合性、设计研究性及开放性实验。
4. 重视科学研究的新成果,体现先进性。

该丛书的编写和出版是江苏省物理实验示范中心建设的一项成果,也是我们工作的一次尝试,在教材中可能存在一些错误与不妥之处,敬请广大读者和同行专家提出意见和批评。

编委会

2011年11月

前 言

本书是根据教育部高等学校物理学与天文学教学指导委员会、物理基础课程教学指导分委员会于2010年编制的“理工科类大学物理实验课程教学基本要求”，由南京大学出版社组织，南京大学、南京理工大学、常州大学、河海大学(常州校区)、金陵科技学院、盐城师范学院、三江学院、南航金城学院等10多所江苏高校，以发展的眼光，共同探讨了当前高校物理实验学科普遍存在的诸多问题，并最终形成统一意见编写而成。

当今的物理学仍然是一门充满生机和活力的科学，它的原理已应用到诸多高新技术中，它的研究方法和思想已渗透到各个学科中。它的创造性进展日新月异，是当代高新技术的源泉，物理原理和技术的创新应用对当代以及未来高新技术的进步和相关产业的发展起着巨大的推动作用。然而，当前国内大多高校的大学物理实验学科的教材和课程内容普遍存在重理论轻实践、理论与实践脱节、教学内容与社会需求脱节、教学内容相对陈旧、与其他学科的交叉融合欠缺等问题。时代在发展，高校教育必须重新审视“基础”的概念，将现代物理技术及其实际应用引入到物理实验课程，并不断加强物理实验学科与其他学科的交叉融合。

本书由长期工作在大学物理教学和管理一线，具有丰富教学经验的教师共同编写完成。参与编写工作的绝大部分教师均具有高级职称或博士学位，很多人在长期承担科学研究、教学管理和教书育人工作的同时，还承担各类与物理及其交叉学科相关的工程技术开发和工程技术顾问等工作，具有丰富的工程实践经验。

本书中的大多数物理实验项目，均尽量将其原理和技术与实际工程应用背景相结合。有助于学生将自身专业和兴趣与物理实验课程内容相联系，比较适合于工科院校大学生使用。本书附录部分特别增加了现代物理技术及其应用、物理实验大事简表、历年诺贝尔物理实验应用获奖简介等内容。希望通过这些内容的介绍，使广大工科学子能更加深入地认识到物理原理和技术，特别是近代物理原理及其技术对近现代社会文明的进步和发展所产生的深刻影响。

本书由绪论、实验理论知识、预备实验、基础实验、综合实验、设计性实验及附录构成。先是系统介绍了测量误差、不确定度和实验数据处理方法等实验理论知识；再精选了包括力、声、热、光、电磁、近代物理在内的共41个实验项目进行阐述；最后编写了与工程应用相关的附录部分。鉴于不同高校工科大学物理实验项目开设的差异，本书在编写时按照循序渐进的原则对所有实验项目进行了分类，内容由浅入深，层次分明。其中，预备类、基础类和综合类实验项目编写较为详细，意在使学生通过严格的实验技能训练，掌握扎实的实验方法，提高其分析与研究、理论联系实际的综合能力；而对设计性实验编写则相对比较简略，留给学生更多的自主思考空间，形成自己的实验设计方案。这有助于培养学生独立思考问题、解决问题和自主创新等综合科学素质与能力。

金陵科技学院的刘平,河海大学的陈秉岩两位老师共同承担本书的主编,并负责统稿和最终校对工作。

金陵科技学院的刘平和李宁老师编写了绪论、实验理论知识、力学基本仪器的使用、金属比热容的测定、固体导热系数实验、利用钢尺测定激光的波长、分光计的调节和使用、参考文献,共8个项目;蒋洪良老师编写了等厚干涉及其应用、等倾干涉及其应用、光的偏振,共3个项目;杨卓慧老师编写了固体液体密度的测量、波尔共振研究、气垫导轨实验、利用分光计测定三棱镜折射率,共4个项目;郭小建、黄勇、陈治国、姜悦编写了扭摆法测定物体的转动惯量、静态拉伸法测定金属杨氏弹性模量、惠斯通电桥法测电阻、光电效应及普朗克常数的测定、线性电阻与晶体二极管的伏安特性研究、示波器的使用、铁磁材料的磁化曲线和磁滞回线、静电场的描绘、电表的改装和校准,共计9个项目。

河海大学常州校区的陈秉岩和文文两位老师共同编写了光纤音频信号传输实验、数字万用电表的使用、PN结正向压降温度特性实验、补偿法与直流电位差计、电子束偏转实验、数字万用表设计、基本物理常数数据表、中华人民共和国法定计量单位与国际单位制单位、物理实验大事简表、历年诺贝尔物理学奖实验应用类获奖简介、现代物理技术及其工程应用,共11个项目;刘翠红和王建永两位老师共同编写了透镜成像和焦距的测定、变温粘滞系数的测定、单缝衍射实验、霍尔效应实验、弗兰克-赫兹实验、塞曼效应、法拉第效应、全息照相、霍尔效应测定螺线管轴向磁场分布、动力学法测定金属杨氏弹性模量,共10个项目;熊传华老师编写了气体比热容的测定、密立根油滴实验、金属电子逸出功的测定及扩展、三线扭摆法测量物体的转动惯量,共3个项目。

本书在编写过程中得到了全国高校实验室工作研究会理事,实验教学与实验技术专业委员会常务副主任,江苏省高校实验教学与技术专业委员会主任,南京大学教授孙尔康的关心和支持;还得到了金陵科技学院、河海大学(常州校区)以及国内相关兄弟院校的大力支持和帮助;南京大学周进教授与沙振舜教授对本书的初稿作了全面的审阅,并提出了很多宝贵的修改意见和建议。我们在此谨向他们致以衷心的感谢。

由于实验条件、编者水平和成稿时间有限,书中难免存在错误和见解偏颇之处,敬请广大读者与同行不吝赐教指正。

编者
2011年12月

目 录

绪 论	1
0.1 工科物理实验课程的作用、目的和任务	1
0.2 实验课程的主要教学环节	1
0.3 物理实验课须知	2
第 1 章 实验理论知识	4
1.1 测量与误差	4
1.1.1 测量及其分类	4
1.1.2 测量误差	4
1.1.3 测量误差的分类	4
1.2 不确定度与测量结果的表示	5
1.2.1 不确定度	5
1.2.2 不确定度的分类及评定	5
1.2.3 直接测量结果的表示	6
1.2.4 间接测量结果的表示——不确定度传递公式	7
1.3 有效数字及其运算	7
1.3.1 有效数字	7
1.3.2 正确书写有效数字的方法	7
1.3.3 有效数字的运算	8
1.4 实验数据处理的常用方法	9
1.4.1 列表法	10
1.4.2 作图法	10
1.4.3 逐差法	11
1.4.4 实验数据的线性拟合与最小二乘法	12
第 2 章 预备实验	14
实验 1 长度的测量	14

实验 2 固体、液体密度的测量	18
实验 3 薄透镜焦距的测定	22
实验 4 数字万用表的使用	28
实验 5 示波器及信号源的使用	32
第 3 章 基础实验	42
实验 6 扭摆法测定物体的转动惯量	42
实验 7 静态拉伸法测定金属杨氏弹性模量	47
实验 8 声速的测量	51
实验 9 物体比热容的测定	56
实验 10 固体导热系数的测定	63
实验 11 变温黏滞系数的测定	67
实验 12 PN 结正向压降温度特性实验	71
实验 13 分光计的调节和使用	78
实验 14 等厚干涉及其应用——牛顿环、劈尖	84
实验 15 等倾干涉及其应用——迈克尔逊干涉仪	89
实验 16 光的偏振	93
实验 17 单缝衍射实验	98
实验 18 静电场的描绘	102
实验 19 惠斯通电桥法测电阻	106
实验 20 补偿法与直流电位差计	110
实验 21 铁磁材料的磁化曲线和磁滞回线	115
实验 22 霍尔效应及其应用	121
实验 23 电子射线的电偏转和磁偏转	126
第 4 章 综合实验	130
实验 24 电视显微油滴仪测电子电荷	130
实验 25 光电效应及普朗克常量的测定	135
实验 26 金属电子逸出功的测定	140
实验 27 夫兰克-赫兹实验	146
实验 28 塞曼效应	149
实验 29 法拉第效应	159
实验 30 霍尔效应法测定螺线管轴向磁感应强度分布	163

实验 31 光纤音频信号传输实验	167
实验 32 全息照相	172
实验 33 共振的研究	176
第 5 章 设计性实验	181
实验 34 气垫导轨实验	181
实验 35 悬丝耦合弯曲共振法测定金属材料杨氏模量	185
实验 36 三线扭摆法测物体的转动惯量	188
实验 37 利用分光计测定三棱镜折射率	191
实验 38 激光波长的测量	193
实验 39 电表的改装和校准	194
实验 40 线性电阻与晶体二极管的伏安特性研究	197
实验 41 数字万用表的设计	201
附 录	209
附录 1 现代物理技术及其应用	209
附录 2 中华人民共和国法定计量单位与国际单位制单位	219
附录 3 常用基本物理常数表	222
附录 4 物理实验大事简表	224
附录 5 历年诺贝尔物理学(实验应用)奖获奖简介	226
参考文献	228

绪 论

0.1 工科物理实验课程的作用、目的和任务

自从伽利略、牛顿等人将物理学变成真正意义上的自然科学后,物理学理论发展不断推进着人类在深度和广度上对自然规律的认识.作为将基础研究和生产应用与开发实践相结合的科学实验不断地影响人类社会工程技术的发展.特别地,建立在科学实验基础上的以半导体、激光、超导、自动化、信息技术为代表的各类新兴工程技术的出现更使得现代社会进入了高新技术时代,直接推动全球技术、经济和社会文明飞跃发展.

对于广大工科专业的大学生而言,系统而熟练地掌握科学实验的理论、方法和技能是他们成为一名合格的工程师的先决条件.工科大学物理实验课程目标,就是使学生通过对实验现象的观察、分析和对物理量的测量,系统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、物理实验方法独立地进行科学研究,设计实验方案,选择、使用仪器设备来研究物理现象和规律,为后继实验课程打下良好的基础.

本课程的具体任务是:

(1) 理解和巩固大学物理理论知识.通过对实验现象的观察、分析和对物理量的测量,理解、掌握和应用物理学原理及理论.

(2) 培养提高学生的科学实验能力.包括能够通过借助实验教材、仪器说明书或者查阅参考资料等正确使用仪器,进行实验操作;能够正确记录、处理实验数据,并利用物理学理论知识对实验结果的合理性进行分析判断,撰写合格的实验报告;能够根据实验目的,利用正确原理,采用合适仪器独立完成适当的综合设计性实验任务.

(3) 培养和提高学生的科学实验素养.包括在实验中培养提高学生理论联系实际、实事求是的科学作风;严谨认真的工作态度;钻研创新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.

0.2 实验课程的主要教学环节

科学实验的过程主要包括:确立课题,调研、搜集资料,制订方案,设计实验程序,选择准备仪器,实验操作(包括实验、观察、记录、分析、修正、再实验),撰写报告,评估实验结果.物理实验中的预备和基础性实验教学主要通过验证性实验操作训练学生掌握实验操作技能和撰写实验报告、评估实验结果的能力.而在综合设计类实验教学中,应进行包括整个科学实验全过程的基本训练.

物理实验课程的主要教学环节包括:

(1) 实验前预习

实验前应认真阅读教材中的相关内容及资料,明白实验目的、原理和方法,初步了解仪器的性能、使用方法和注意事项,并完成实验预习报告。

(2) 实验中操作

实验中操作应遵守实验室规章制度,服从实验教师和实验室工作人员的指导。实验时应了解仪器设备的功能、操作方法和注意事项的基础上安全科学操作仪器设备,并认真观察实验现象、如实正确记录实验数据。记录数据时须注意有效数字和单位。如发现数据有疑问,可以重新做实验,并对原来数据用特殊符号标注后将正确数据写在一旁以备查考。未重新测量绝不允许修改实验数据。

(3) 实验后报告

实验报告是实验工作的全面总结。学生需用统一的形式将实验结果完整而真实地书写出来,并对实验结果进行必要的分析评估,对实验经验进行认真总结。

实验报告主要包括:

- 实验名称——实验项目或实验选题。
- 实验目的——简单叙述实验预期目标。
- 实验仪器设备——简单叙述实验所需仪器设备。
- 实验原理——利用实验装置图和光路、电路图等简单阐述实验相关物理内容,给出实验测量中所用主要物理公式,阐述公式中物理量的意义、单位及应用公式所需的相关条件。
- 实验过程及步骤——对整个实验过程进行简单描述,总结主要实验步骤并写明实验注意事项。
- 实验数据及处理——如实、完整记录实验数据(注明所用仪器编号),完成物理量的计算、误差分析及实验曲线的绘制等相关内容,并写明最后实验结果。
- 实验分析与讨论——对实验结果进行合理的分析与讨论,对实验中的重点、难点进行总结,给出实验研究体会、收获及建议等。

0.3 物理实验课须知

(1) 每次实验前应充分做好预习工作,完成预习报告。教师上课时检查学生的预习情况,凡未预习或预习不充分的学生,教师可责令其充分预习后再进行实验。

(2) 实验前应核对实验所需的仪器设备,如发现有短缺和损坏情况发生,要及时向教师汇报。实验中或实验后出现的任何仪器设备短缺或损坏,均由实验者负责,教师将按有关规章制度酌情处理。

(3) 实验时须遵守课堂纪律和实验室各项规章制度,保持安静的实验环境。爱护实验仪器设备,不得擅自搬弄仪器。实验中要根据仪器说明书操作,仔细观察实验现象,如实记录实验数据,独立完成,不得依赖教师或他人。实验数据用钢笔或圆珠笔填写清楚,经教师检查签字后方可结束实验。学生离开实验室前须整理好仪器、桌椅,并做好实验场所的清洁卫生工作后方可离开实验室。

- (4) 实验课不得无故缺席、迟到、早退. 因特殊原因需请假者, 应另找时间补做实验.
- (5) 实验课后一周内完成实验报告.
- (6) 物理实验课程的总成绩由平时成绩和理论统考或操作考核或课程论文等综合成绩评定. 平时成绩由实验预习、实验操作、实验报告综合给定.

第 1 章 实验理论知识

1.1 测量与误差

1.1.1 测量及其分类

测量分为直接测量和间接测量. 直接测量是把待测物理量与标准量(仪器或量具)进行比较,通过读数,直接得到测量结果. 间接测量就是利用直接测量量与被测量之间的函数关系,通过数学处理得到被测物理量的值. 无论是哪种测量方式,被测物理量都必须由数值与单位两部分组成.

1.1.2 测量误差

在确定的条件下,待测物理量总有客观真实值. 实际测量过程中,由于各种原因使得测量值和真实值之间存在一定的差异,这一差异叫误差. 误差通常分为绝对误差和相对误差.

绝对误差:若用 x_0 表示真值,用 x 表示测量值,则测量值 x 与真值 x_0 之差称为绝对误差. 表示为:

$$\Delta x = x - x_0,$$

它反映了测量值偏离真值的大小和方向. 其单位与测量值的单位相同,一般取一位有效数字.

相对误差:就是绝对误差与真值之比,用下式表示:

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

它反映了测量值偏离真值的相对大小. 相对误差没有单位,一般取两位有效数字.

1.1.3 测量误差的分类

按照测量误差的来源和性质,一般将误差分为:系统误差、过失误差和随机误差三类.

(1) 系统误差

系统误差是指在测量过程中和在取得结果的过程中存在恒定的或按一定规律变化的误差. 系统误差来源包括:仪器误差、方法误差、环境误差和人为误差等.

仪器误差:由于仪器制造的缺陷,使用不当或者仪器未经很好校准所造成的误差.

方法误差:实验所依据的理论和公式的近似性,实验条件或测量方法不能满足理论公式所要求的条件等引起的误差.

环境误差:测量仪器规定的使用条件未满足所造成的误差. 如室温高于仪器所规定的实验温度范围,而引起的误差称之为环境误差.

人为误差:由于测量者的生理特点或固有习惯所带来的误差.例如反应速度的快慢、分辨能力的高低、读数的习惯造成的误差.

(2) 过失误差

过失误差指由于仪器的使用方法不正确,实验方法不合理,粗心大意,过度疲劳,读错、记错数据等引起的误差.

(3) 随机误差

在消除系统误差和过失误差的条件下,在相同的测量条件下,对同一物理量作多次等精度测量,每次得到的测量值都不相同.当测量次数足够多时,这种偏离引起的误差服从统计规律,其特点为:

- ① 有界性. 误差的绝对值不会超过某一最大值 $\Delta x_{\max}$.
- ② 单峰性. 绝对值小的出现的概率大,而绝对值大的误差出现的概率小.
- ③ 对称性. 绝对值相同的正、负误差出现的概率相等.
- ④ 抵偿性. 误差的算术平均值随着测量次数的无限增加而趋于零.

虽然随机误差具有不可预知性也无法避免,但可以通过多次测量,利用其统计规律性达到互相抵偿,从而找到真值的最佳近似值(又称约定真值或最近真值).

1.2 不确定度与测量结果的表示

1.2.1 不确定度

在科学实验中,测量结果应包括测量值和测量误差两部分.按照我国国家计量技术规范(JJG1027—91),测量结果应表达为:

$$x = \bar{X} \pm U. \quad (1)$$

其中, U 为总不确定度, $\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ 为测量期待值或约定真值(单次测量为测量值,多次测量时为测量算术平均值).

不确定度是用于描述被测量量的不能肯定程度,它为被测量的真值在某个量值范围提供了在概率含义下的误差可能取值范围的一种估计.式(1)表示被测量的真值位于区间 $[\bar{X} - U, \bar{X} + U]$ 内的概率是 95%.

1.2.2 不确定度的分类及评定

按照数值评定方法,不确定度可归纳为两大类:

(1) A 类不确定度——用统计方法计算出的测量值的标准偏差,用 u_A 表示

设在相同条件下,对某一物理量独立测量 n 次,得到的测量值为 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$, 测量值的 A 类不确定度等于标准偏差 S 乘以 $\left(\frac{t}{\sqrt{n}}\right)$, 即:

$$u_A = \frac{t}{\sqrt{n}} \cdot S = \frac{t}{\sqrt{n}} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{(n-1)}}.$$

其中, $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ 为测量结果的算术平均值; t 为分布因子, 当测量次数 n 确定时, 在概率为 95% 时, $\frac{t}{\sqrt{n}}$ 的值由表 1 给出:

表 1

测量次数 n	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20	30
t 因子的值	12.71	4.30	3.18	2.78	2.57	2.45	2.36	2.31	2.26	2.14	2.09	2.05
$t/\sqrt{n}$ 的值	8.99	2.48	1.59	1.24	1.05	0.93	0.84	0.77	0.72	0.55	0.47	0.37
$t/\sqrt{n}$ 的近似值	9.0	2.5	1.6	1.2	≈ 1					$\approx 2/\sqrt{n}$		

(2) B 类不确定度——指用非统计方法评定的不确定度, 用 u_B 表示

当测量结果中所含的各来源标准不确定度是相互独立时, B 类标准不确定度的计算方法为 $u_B = \sqrt{u_{B1}^2 + u_{B2}^2 + u_{B3}^2 + \cdots}$. 在大学物理实验中, 近似将仪器误差限制 Δ_{ins} 作为 B 类不确定度, 即: $u_B = \Delta_{\text{ins}}$. 仪器误差限或最大允许误差是指在正确使用仪器的条件下, 测量结果和被测量的真值之间可能产生的最大误差. 对照国际标准及我国制定的相应的计量器具的检定标准和规定, 考虑实验教学要求, 本课程中常见的仪器设备误差极限 Δ_{ins} 作以下简略约定.

长度测量仪器: 除非仪器有专门说明, 本课程约定长度测量仪器误差限取其最小分度值的一半估算.

质量测量仪器: 简单实验中, 取天平的最小分度值作为仪器误差限.

时间测量仪器: 对于较短时间内进行的测量, 约定取仪器最小分度值作为仪器误差限.

温度测量仪器: 约定仪器误差限按其最小分度值的一半估算.

电磁学仪器: 电学仪器按国家标准多数是根据准确度大小划分其等级, 其基本误差限可通过准确度等级的有关公式给出. 对电磁仪表, 如指针式电流、电压表, 则

$$\Delta_{\text{ins}} = \alpha \% \cdot A_m$$

式中 A_m 是电表的量程, α 是以百分数表示的准确度等级, 电表精度分为 5.0, 2.5, 1.5, 1.0, 0.5, 0.2, 0.1 七个级别.

(3) 由上述两类不确定度可以得到测量结果的总不确定度: $U = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}$.

1.2.3 直接测量结果的表示

(1) 单次直接测量

在许多情况下, 多次测量是不可能的(如稍纵即逝的现象), 有时多次测量也是不必要的, 这时可以用一次测量值作为测量结果的最佳值. 因为测量次数为 $n=1$, 测量结果表示为: $x \pm u_B$.

(2) 多次直接测量

处理时首先计算被测量的算术平均值 $\bar{x}$; 根据实际情况, 计算各类不确定度 u_A, u_B ; 计算总不确定度 U ; 最后给出测量结果表示: $x = \bar{x} \pm U$ (单位).

1.2.4 间接测量结果的表示——不确定度传递公式

设间接测量量 N 是 n 个相互独立直接测量量 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ 的函数, 即 $N = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$, 各直接测量量的总不确定度为 $U_{x_1}, U_{x_2}, U_{x_3}, \dots, U_{x_n}$, 则:

(1) 计算间接测量量的平均值: $\bar{N} = f(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3, \dots, \bar{x}_n)$;

(2) 计算间接测量量的总不确定度——不确定度传递公式:

$$U_N = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right)^2 U_{x_1}^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2}\right)^2 U_{x_2}^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_n}\right)^2 U_{x_n}^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 U_{x_i}^2}$$

或者先求相对不确定度, 再求不确定度. 首先对函数取自然对数, 再求微分, 间接测量 N 相对不确定度:

$$U_{rN} = \frac{U_N}{\bar{N}} = \sqrt{\left(\frac{\partial \ln f}{\partial x_1}\right)^2 U_{x_1}^2 + \left(\frac{\partial \ln f}{\partial x_2}\right)^2 U_{x_2}^2 + \dots + \left(\frac{\partial \ln f}{\partial x_n}\right)^2 U_{x_n}^2}$$

(3) 测量结果表示: $N = \bar{N} \pm U$ (单位).

1.3 有效数字及其运算

1.3.1 有效数字

有效数字的概念是由被测量和量具所决定的, 任何测量结果都存在有效数字的问题. 测量结果中的若干可靠数字加上一位估读数字组成了有效数字. 有效数字的最后一位为估读位, 具有不确定性.

1.3.2 正确书写有效数字的方法

以电流表读数为例, 介绍正确记录数据的方法.

(1) 介于两个刻线之间的读数方法

在测量时, 测得的值往往不是恰好等于所用仪器最小刻度值的整数倍, 而是介于两个刻度线之间. 为了使测量结果尽可能的准确, 必须对指针在两个刻线之间作出合理的估计. 如图 1 所示, 电流表的读数可以读为 18.6 A, 18.5 A, 18.7 A 三种值(取决于观察者). 其中“6”“5”“7”是估读位, 前两位为可靠位, 其结果有三位有效数字.

(2) 指示整刻度线的读数方法

如图 2 所示, 虽然指针恰好指在 20 mA 的刻度线上, 但测量结果也应体现出估读位, 即: 结果应当记录到小数点后面的第一位上. 正确的读数是 20.0 mA.

(3) 单位换算有效数字的位数不变

若将 21.4 A 换算成以 mA 为单位的量, 为体现数据的精度, 不能随意扩大有效数字位数, 而将其错误的写成 21 400 mA. 正确的写法应当是 $21.4 \times 10^3 \text{ mA}$ 或 $2.14 \times 10^4 \text{ mA}$ 等. 乘号前的数表示测量值的有效位数, 后面 10 的方次表示测量值的数量级.

类似地, 若将 18.6 A 换算成以 kA 为单位的量. 虽然可以将其写成 0.018 6 kA(仍为 3 位有效数字)而不引起误解, 但更好的表示应当为 $18.6 \times 10^{-3} \text{ kA}$ 或 $1.86 \times 10^{-2} \text{ kA}$ 等.

注意:有效数字前面的“0”不属于有效数字,仅用来标记小数点的位置.

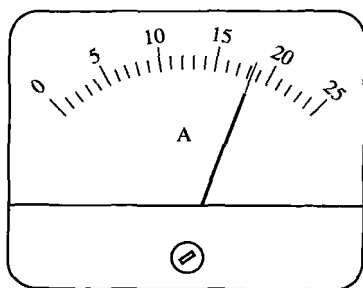


图 1

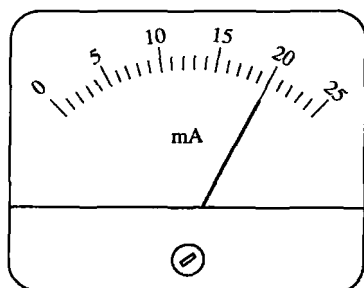


图 2

(4) “0”在有效数字中的地位

第一个非“0”数字之前的“0”不是有效数字,在有效数字之间或后面的“0”都是有效数字.例如:125.0 是四位有效数字,0.0013 是两位有效数字.特别注意非“0”数字后面的“0”不能随便去掉,也不能随便加上.如 1.0 与 1.00 的意义是不同的.1.0 表示两位有效数字,1.00 表示三位有效数字,两者的准确度不同.

注意:读数时的最后一位必须读到估读位.

(5) 不确定度、测量结果与有效数字之间的关系

测量结果中,测量值的最末一位与不确定度的末位对齐.一般不确定度数字最多保留 2 位.在大学物理实验中,不确定度的有效数字只保留 1 位.

1.3.3 有效数字的运算

影响有效数字位数的主要因素是仪器的精度和有效数字的运算.下面简单介绍几种有效数字的运算规则.

(1) 和差运算规则

在和差运算中,运算结果的最后一位与参加运算的各测量值中尾数位(估读位)最高的取齐.如: $322.84 + 41.1 + 5.646 = 369.5$, $377 - 93.61 = 283$.

式中估读数(不可靠数)下面用一横线标明.

(2) 积商运算规则

在积、商运算中,运算结果的有效数字与参与运算的各测量量中有效数字位数最少的取齐.如: $6.428 \times 21.7 = 139$, $34.5 \div 12 = 2.9$.

(3) 乘方与开方

测量值经过乘方与开方运算后,所得结果的有效数字与底数的有效数字位数相同.

(4) 其他函数运算

① 对数函数:测量值经过对数函数运算后,所得结果有效数字的位数与真数的有效数字位数相同.如: $\lg 1.983 = 0.2973$.

② 指数函数:测量值经过指数函数运算后,运算结果的有效数字位数与指数的小数点后的位数相同(包括紧接小数点后的零).如: $10^{6.25} = 1.8 \times 10^6$.

③ 三角函数:三角函数的取值随角度的有效数字而定.一般用分光计读角度时,应读到