

普通高等教育“十一五”规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI



DAXUE WULI SHIYAN

大学物理实验

苏锡国 李双美 主 编
刘 健 郑君刚 陈 彪 副主编



中国电力出版社

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

普通高等教育“十一五”规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI



DAXUE WULI SHIYAN
大学物理实验

主 编 苏锡国 李双美
副主编 刘 健 郑君刚 陈 彪
编 写 于 华 赵德华 吕 晶 韩立伟
赵鹏华 刘 悦 王丽娜
主 审 杜 安



中国电力出版社

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

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十一五”规划教材,是根据教育部高等学校物理学与天文学指导委员会物理基础课程教学指导分委员会 2008 年颁布的《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》,结合近年来大学物理实验课程建设和教学改革以及大学物理实验室多年的教学实践经验,并适合大学物理实验课程实行全面开放式教学模式而编写。全书共分为六章,以力学及热学、电磁学、光学、近代物理与物理技术应用等实验选题为主线,包括实验基础知识及 36 个实验选题共 45 个实验题目,附录中包含了物理常数表等。本书中各实验选题和实验题目既相互独立又相互联系,力求体现时代性和先进性;注重拓宽学生的知识面,使学生掌握物理实验基本方法和技能;着力培养学生利用所学知识解决实际问题的能力,注重培养学生的创新意识和科研能力。

本书可作为高等院校工科专业和理科非物理专业的物理实验课程的教学用书,也可作为科研及工程技术、实验人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验/苏锡国,李双美主编. —北京:中国电力出版社, 2009

普通高等教育“十一五”规划教材

ISBN 978-7-5083-9259-2

I. 大… II. ①苏…②李… 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(2009)第 133827 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 8 月第一版 2009 年 8 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 14.75 印张 358 千字

定价 24.00 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

为贯彻落实教育部《关于进一步加强高等学校本科教学工作的若干意见》和《教育部关于以就业为导向深化高等职业教育改革的若干意见》的精神,加强教材建设,确保教材质量,中国电力教育协会组织制订了普通高等教育“十一五”教材规划。该规划强调适应不同层次、不同类型院校,满足学科发展和人才培养的需求,坚持专业基础课教材与教学急需的专业教材并重、新编与修订相结合。本书为新编教材。

本书是根据教育部高等学校物理学与天文学指导委员会物理基础课程教学指导分委会2008年颁布的《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》,结合近年来大学物理实验课程建设和教学改革以及大学物理实验室多年的教学实践经验,为适合大学物理实验课程实行全面开放式教学模式而编写。

大学物理实验课是高等理工科院校对学生进行科学实验基本训练的一门独立的、必修的基础课程。本课程不仅可以加深对理论的理解,更为重要的是使学生获得基本的实验知识的同时,在实验方法和实验技能等方面得到较为系统、严格的训练。在培养学生的创新精神、创新思维和实际的创新能力方面,具有其他课程不可代替的特殊作用。

为了贯彻、落实《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》,在大学物理实验课程教学过程中实现因材施教,充分发挥教师的学习主导作用和学生学习的主体地位,增强学生的学习热情和学习主动性,提高大学物理实验课程的教学质量,大学物理实验课程实行了全面开放式的教学模式。学生可以根据自己专业的培养方案和个人兴趣,按照学校规定,在实验室开出的实验项目范围内,利用学校网络资源,在校园网的实验选课系统中自由选择实验内容和上课时间,修满规定的学时,即可得到相应的学分。

本书力求使学生掌握基本的物理思想和物理实验方法,以具体的实例引导学生将所学知识应用于解决所学专业具体实际问题,开拓学生的视野,培养学生分析问题、解决问题的能力,为学生学习后续课程打下良好的基础。

本书以力学及热学、电磁学、光学、近代物理与物理技术应用为主线,紧密围绕学生的专业培养方案设置实验题目,编入了实验基础知识和三十六个实验选题共四十五个实验题目。全书分六章。第一章为绪论,介绍了本课程的地位、作用和任务,物理实验课全面开放式教学模式和教学主要环节。第二章为实验数据的处理与测量结果的表达,包括了测量基本知识、误差、用不确定度评价测量结果及常用的实验数据处理方法等内容,根据《测量不确定度评定与表示》(JJF 1059—1999)引入了不确定度概念及其评定方法,在教学中考虑到学生所学基础课程而做了适当的简化。第三章为力学及热学实验选题,包括了力学和热学实验基础知识和10个具体实验题目。第四章为电磁学实验选题,包括了电磁学实验基础知识和十一个实验题目。第五章为光学实验选题,包括了光学实验基础知识和九个实验题目。第六章为近代物理与物理技术实验选题,包括了十六个实验题目。本书在一些实验题目中适当地引入了激光技术、计算机技术、传感器技术等现代物理技术。根据具体的仪器设备情况和课程学时安排,可以按照学生的专业培养方案,在实验要求上,可分为必做实验题目和选做

实验题目，也可以分为某专业必选，其他专业任选的形式。整个课程的教学任务在二个学期内完成。

实验教材的编写是实验室建设和实验课程建设的重要组成部分之一，本书的编写凝聚了大学物理实验室全体同志的集体智慧和辛勤劳动，同时也包括了所有曾经在实验室工作过的同志们的心血。

本书由沈阳建筑大学苏锡国和沈阳工程学院李双美主编，沈阳建筑大学刘健、郑君刚、陈彪副主编，沈阳建筑大学于华、赵德华、吕晶、韩立伟、赵鹏华、刘悦、王丽娜参编。全书由苏锡国组织编写并统稿、修订。具体分工：苏锡国编写了第一章、第二章、第三章实验一、第四章实验三、实验八、第五章实验一、实验二、第六章实验二、实验四、实验七、实验九、实验十一、实验十二；李双美编写了第三章实验二（题目二）、实验五、第四章实验十、第五章实验五、第六章实验五、实验六、实验十三、实验十四；刘健编写了第三章第一节、第四章实验二、第五章实验三（题目一）；郑君刚编写了第四章第一节、实验一、实验五；陈彪编写了第四章实验四、第五章第一节、第六章实验十；于华编写了第三章实验六、第六章实验八；赵德华编写了第四章实验六、实验七；吕晶编写了第三章实验三（题目一）、第六章实验一；韩立伟编写了第五章实验四、实验六；赵鹏华编写了第四章实验九、第六章实验三；刘悦编写了第三章实验三（题目二）实验四；王丽娜编写了第三章实验二（题目一）、实验三（题目三）；沈阳工业大学吕洁老师完成了附录和所有图片及表格。东北大学杜安教授任主审，认真、仔细地审阅了全文，并提出了许多宝贵意见和建议，使本书的质量有了很大的提高。

在本书的编写过程中，得到了学校有关部门领导的大力支持和帮助，沈阳建筑大学张魁纯老师对本书的编写提出了许多建设性意见，同时参考了许多兄弟院校的教材和有关文献，在此，一并表示感谢！

由于编者水平有限，时间比较仓促，书中错误难免，敬请读者批评指正。

编 者

2009年7月于沈阳



目 录

前言

第一章 绪论	1
第一节 物理实验课程的地位、作用和任务.....	1
第二节 物理实验课全面开放式教学模式和教学主要环节.....	2
第二章 实验数据的处理与测量结果的表达	4
第一节 测量.....	4
第二节 测量误差.....	4
第三节 测量结果的有效数字.....	6
第四节 测量结果的表达及不确定度的估计.....	9
第五节 常用的数据处理方法	17
第六节 计算机处理数据方法简介	22
习题	22
第三章 力学及热学实验选题	25
第一节 力学及热学实验基础知识	25
第二节 力学及热学实验选题	30
实验一 固体密度的测量	30
实验二 刚体转动惯量的测量	33
题目一 用智能转动惯量实验仪测量刚体的转动惯量	33
题目二 用三线摆测量刚体的转动惯量	37
实验三 气垫导轨上的实验	40
题目一 动量守恒和机械能守恒	40
题目二 简谐振动的研究	45
题目三 重力加速度的研究	46
实验四 拉伸法测金属丝的杨氏弹性模量	48
实验五 空气比热容比的测量	52
实验六 物体导热系数的测量	55
第四章 电磁学实验选题	59
第一节 电磁学实验基础知识	59
第二节 电磁学实验选题	63
实验一 电学元件伏安特性的研究	63
实验二 用模拟法测绘静电场	66
实验三 电位差计的使用	69
实验四 灵敏电流计的研究	72
实验五 电桥及其应用	77
题目一 直流单臂电桥的使用	77

题目二 多功能电桥的应用	79
实验六 示波器的使用	83
实验七 用示波法测量铁磁材料的磁滞回线和磁化曲线	87
实验八 超声声速的测量	92
实验九 霍尔效应及其应用	95
实验十 圆线圈和亥姆霍兹线圈的磁场	99
第五章 光学实验选题	104
第一节 光学实验基础知识	104
第二节 光学实验选题	109
实验一 薄透镜焦距的测量	109
实验二 自组装光学系统	114
题目一 自组装望远镜	114
题目二 自组透射式幻灯机	115
实验三 分光计的应用	117
题目一 三棱镜折射率的测量	117
题目二 光栅衍射	122
实验四 光的等厚干涉	125
题目一 牛顿环干涉	125
题目二 劈尖干涉	127
实验五 单缝衍射	129
实验六 麦克尔逊干涉仪的应用	131
第六章 近代物理与物理技术应用实验选题	136
实验一 密立根油滴实验	136
实验二 光电效应	141
实验三 夫兰克—赫兹实验	148
实验四 小型棱镜摄谱仪的应用	154
实验五 光栅光谱仪实验	158
实验六 全息照相	165
实验七 核磁共振	170
实验八 制冷系数的研究	181
实验九 高温超导转变温度测量	186
实验十 太阳能电池基本特性的研究	189
实验十一 非线性电路混沌实验	192
实验十二 传感器技术的应用	198
题目一 金属箔式应变片——单臂电桥性能实验	198
题目二 光敏电阻实验	200
题目三 汽车倒车防撞装置的设计	201
实验十三 光纤传感实验	202
实验十四 光纤通信	209
附录 物理常数表	215
参考文献	228



第一章 绪 论

第一节 物理实验课程的地位、作用和任务

一、物理实验课程的地位、作用

在人类追求真理、探索未知世界的过程中,物理学展现了一系列科学的世界观和方法论,深刻影响着人类对物质世界的基本认识、人类的思维方式和社会生活。它是人类文明的基石,在人才的科学素质培养中具有重要的地位。

物理学是研究物质的基本结构、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,是自然科学和工程技术的基础。物理学从本质上说是一门实验科学。物理规律的发现和理论的建立,都以实验为基础,并受到实验的检验。

物理实验不仅对真正理解和掌握物理学理论是不可缺少的教学环节,而且对如何运用理论知识、实验方法和实验技术,解决实际科技问题也是必要的基本训练。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。物理实验技术和工程技术是相辅相通的,工程技术人员所需要掌握的测量方法和技巧以及有关实验方案的设计、实验方法的确定、仪器的选择、数据处理等大多是物理实验中测量方法和技巧的移置和推广。

物理实验课是高等理工院校对学生进行科学实验基本训练的独立设置的一门必修基础课程。物理实验课覆盖面广,具有丰富的实验思想、方法、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能力等方面具有其他实践类课程不可替代的作用。

物理实验课是本科生接受系统实验方法和实验技能训练的开端。同时,它在培养科技工作者的良好素质及科学世界观方面也起着潜移默化的作用。科学技术发展的根基是科学实验,工程技术人员必须具备较深广的理论和足够的实验能力,以适应当今科学技术飞速发展的需要。现代科技发展要求每一个未来的工程师或科学家必须注重培养自己的观察现象,提出问题,以及找出原因的独创性,因此,每一个科技人员除了具有深厚的专业基础知识外,还必须具有基本实验能力,综合实验的设计能力,心灵手巧的创新精神,细心与耐心、实事求是的工作作风,协作理念和团结精神,更高层次人员还应具有把握全局及协调能力。

二、物理实验课程的具体任务

(1) 培养与提高学生的科学实验能力,其中包括自行阅读实验教材(或资料),弄清实验原理,掌握仪器的基本构造及其使用方法,正确进行记录,完成实验内容,并能对一些数据进行处理,绘制曲线,说明实验结果,写出合格的实验报告。能够在实验中发现、分析问题并学习解决问题的科学方法,逐步提高学生综合运用所学知识和技能解决实际问题的能力。培养学生独立实验的能力,逐步形成自主实验的基本能力。

(2) 通过实验现象的观察、分析和对物理量的测量,学习实验知识,加深对物理学原理的理解。能够融合实验原理、设计思想、实验方法及相关的理论知识对实验结果进行分析、判断、归纳与综合。掌握通过实验进行物理现象和物理规律研究的基本方法,具有初步的分析与研究的能力。

(3) 培养与提高学生的科学实验素养。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。

(4) 培养学生的创新能力。要求学生能够完成符合规范要求的设计性、综合性内容的实验,进行初步的具有研究性或创意性内容的实验,激发学生的学习主动性,逐步培养学生的创新能力。

第二节 物理实验课全面开放式教学模式和教学主要环节

一、开放物理实验课程的教学模式

(1) 为了贯彻、落实学分制,充分发挥学生学习的主体地位,调动学生的学习积极性,在教学过程中因材施教,适应学生的个性发展,提高教学质量,根据教育部高等学校物理学与天文学指导委员会物理基础课程教学指导分委员会 2008 年颁布的《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》,大学物理实验室实行全面开放,在教学时间、空间和内容上给学生较大的选择自由。由大学物理实验室根据教学大纲提出具体的实验项目,学生按照自己专业的培养方案和学习计划,利用学校校园网上实验选课系统,自主选择上课时间,在实验室给出的实验项目范围内,由学生自主选择实验课程的内容。学生修满课程规定的学时数,成绩合格即可获得课程规定的相应的学分。

(2) 学生必须按照专业培养方案和计划外开放实验项目的安排,在学校规定的时间内按要求完成实验选课,原则上要求学生根据实验室所提供的实验项目和课程规定的学分进行选课。参加选课的学生要注意密码的保管,代选和替选所造成的一切后果,由学生本人负责。

(3) 在选课结束之后,一般不允许再进行改选或补选,因特殊原因需要改选或补选的学生,由本人申请,经所在学院及物理实验室同意,报教务处批准,方可进行。一旦学生做完所选的实验项目之后,不能以任何理由退选或申请重做。

二、全面开放式物理实验教学主要环节

全面开放式实验教学的特点是学生上课是自觉主动的。学生不按班级上课,而是由学生自己选择上课时间和实验项目内容,这样做的结果是对学生提出了更高的要求。因此,必须强调学生课前预习,抓住教学的每一环节,才能收到较好的教学效果。

1. 实验前的预习环节

课前预习是实验课的一个基本环节,是实验工作能否取得主动的关键。上课前,应该认真阅读实验教材或相关资料,对实验任务有一个基本了解,以便顺利完成规定的实验任务。预习应该写成预习报告,其中包括实验原理、实验方法、实验条件、实验关键、待测量与实测量之间的关系,以及测量数据表格、仪器调整的主要步骤等,有些实验还要求学生课前自拟实验方案、自己设计线路或光路、自拟数据表格等。

2. 实验操作环节

实验操作是实验课的中心环节,主要是对仪器进行调整和对待测量的测量。学生来到实

验室后,必须遵守实验室的各项规章制度,严格要求自己,合理布置仪器,安全并正确地操作,认真、细心地观察实验现象,实事求是地观察和测量,认真探索和研究实验工作中的问题,从一开始就不断培养自己的良好的科学作风,努力培养自己的科研能力和创新意识。决不能认为实验课只是测几个数据,测完就算完成工作任务了。如果是和他人一组,应该分工协作,共同完成规定的实验工作任务。实验结束后,应该将实验数据交教师审阅、签字,整理还原仪器后,方可离开实验室。

一般地,实验过程总是从不清楚到清楚,从各种正确和错误的推想和判断中逐步分析和研究,最终取得正确的结果。这个过程正是学习实验的重要过程。

3. 实验报告书写环节

实验工作结束后,应该对自己的工作进行总结,书写实验报告。实验报告应该包括以下内容:

(1) 实验名称。

(2) 实验目的。

(3) 实验原理。应该包括有关的理论依据和仪器原理,列出主要公式,及其成立时所应满足的实验条件等,并且画出相应的电路图或光路图。

(4) 实验步骤。必须写明重要而且顺序不能颠倒的关键步骤和应该注意的事项。

(5) 实验数据及其处理。实验数据必须用表格形式表示,包括单位、有效数字和重要的实验条件,同时必须注明仪器编号、型号、规格、精度(分度值);数据处理应该包括计算过程、曲线图、测量结果。

(6) 实验结论。测量结果的表达及必要的文字表述,包括待测量及其不确定度。

(7) 误差分析。误差分析应该是对测量结果影响较大的误差进行分析,要根据具体的实验任务和内容,分析或找出主要的因素进行具体的、接近量化的分析讨论,并且提出相应的消除方法。切忌泛泛罗列各种误差来源和几乎所有实验都存在的或可以用的误差来源及分析。

(8) 实验总结。应该注重物理思想、实验方法的学习和掌握,也可以是实验现象的分析,对实验关键问题的研究体会,对改进实验的建议或实验后的收获。总之,其内容应按具体实验任务要求完成。

对实验报告的书写,应该参照国家关于科技论文写作的有关标准和规范,做到内容完整,语言简练,有自己的观点和见解,文理通顺,字迹工整,图表规范,结论明确,数据处理方法科学合理。

第二章 实验数据的处理与测量结果的表达

第一节 测量

一、测量的概念及分类

1. 测量的概念

测量是将被测量物理量与同类计量标准单位相比较的, 得到被测量物理量的测量值的过程, 由于测量结果数值大小与所选用的标准单位有关, 因此, 表示一个被测量对象的测量值必须包括数值和单位。所谓的测量结果仅仅是被测量的最佳估计值, 并非真值, 完整表述测量结果时, 必须附带其测量不确定度。必要时应说明测量条件或影响量的取值范围等。

2. 测量的分类

测量可分为直接测量和间接测量。直接测量就是将被测量与标准量(量具)进行比较, 直接得到被测量的数值。如: 用米尺测量长度, 用安培计测量电流, 用天平和砝码测量物体的质量等。间接测量是利用直接测量的量与被测量之间的已知函数关系, 从而间接得到被测量的数值。如: 物体密度($\rho=m/V$)的测量, 矩形面积($S=ab$)的测量等。

测量也可分为单次测量和多次测量。测量条件迅速改变或准确度要求不高的测量可只进行单次测量。为了提高测量的准确性, 一般都在不改变测量条件的前提下进行多次测量。

二、真值与测量结果

1. 真值

一个物理量的真值是一个客观存在的理想的概念。由于测量仪器、测量方法、测量环境、测量者的观察力等因素的影响, 导致不可能得到真值。一般以被测量物理量的最佳估计值(即约定真值)作为真值, 有时也采用公认物理量的值、理论计算值、实验室给出的值等作为约定真值。

2. 测量结果

测量结果是由测量所得到的赋予被测量的值。由于在实际测量中, 一般只能得到被测量物理量的最佳估计值。因此, 通常采用多次重复测量的算术平均值作为测量结果。

第二节 测量误差

一、误差及其表述

由于测量仪器、测量方法、测量环境、测量者的观察力等因素的影响, 一切科学实验和测量过程中都存在着误差。

1. 绝对误差

如果用 x 表示测量值, 用 x_0 表示真值, 测量结果与真值的差值 Δx 称为测量误差, 也称为绝对误差。测量误差是一个确定的值, 与真值一样, 它也不可能得到, 测量误差的大小反映了测量结果的准确程度。绝对误差为

$$\Delta x = x - x_0 \quad (2-1)$$

2. 相对误差

绝对误差 Δx 与真值 x_0 的比, 称为相对误差 E_r , 一般用百分数来表示。相对误差为

$$E_r = \frac{\Delta x}{x_0} \times 100\% \quad (2-2)$$

二、误差的分类

测量中的误差按其来源的性质可分为三类: 系统误差、随机误差、过失误差。

1. 系统误差

由于仪器不完善、测量方法不恰当、环境等因素引起的具有确定的规律性的误差, 及多次测量中保持恒定、或随测量条件的变化而有规律变化的误差称为系统误差。系统误差的来源大概有以下几个方面:

(1) 仪器误差。仪器本身制造及校准的不完善以及仪器没有调整到理想使用状态所引起的误差。

(2) 环境误差。由于各种环境因素与要求的标准状态不一致引起的误差。

(3) 方法误差。由于测量过程中实际起作用的一些因素, 在测量结果的表达式中没有得到反映所造成的误差。

(4) 人员误差。由于观察者本人感觉器官不完善或心理特点造成的误差;

(5) 理论误差。由于理论不完善, 或采用的理论公式具有一定的近似性, 由取近似所带来的偏差虽能估计其量级, 但并不是确定的, 由此造成的误差。理论误差同样也用随机的概率分布形式表述, 但是它和其他误差不同。设法改进实验设备、提高实验测量精度和增加测量次数可使其他误差有所改善, 然而这些措施对于理论误差没有任何影响。理论误差一般发生在对物理量进行间接测量中。直接测量中不存在此项误差。

对于实验中存在的系统误差应根据整个实验依据的原理、方法、测量步骤、所用仪器等可能引起误差的因素逐个进行分析, 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加以消除或尽可能地减小。完成实验后所作的“误差分析”主要是讨论系统误差及其修正办法。

在实验中研究系统误差有十分重要的意义, 可使测量结果更接近真值, 同时还可从中发现某些新问题。

如瑞利 (Rayleigh) 从不同来源和不同方法制取 N_2 , 他发现两种方法得到的 N_2 的密度的平均值的差值已大到其标准误差的 20 多倍。当时的技术已使随机误差很小了, 瑞利并未设法使两者之差减小, 而是认为这两种方法之间存在系统误差, 导致拉姆齐 (Ramsay) 在以后的研究工作中发现了空气中存在的惰性气体。

2. 随机误差

对同一被测量的多次测量过程中, 绝对值与其符号以不可预知的方式变化着的测量误差的分量称为随机误差。它包括测量的偶然误差以及对物理过程或物理量的统计所反映在测量上的涨落性, 是由实验中各种因素的微小变动性引起的。随机误差的出现, 就某一测量值来说是没有规律的, 其大小和方向都是不能预知的, 但对一个量进行足够多次的测量, 则会发现其随机误差是按一定的统计规律分布的。因此, 对于实验中存在的随机误差, 可以按照数理统计理论对其做出估计。

在科学实验中常用标准偏差来估计测量的随机误差。假设对某一物理量在测量条件相同

的情况下, 进行 n 次独立测量, 如果系统误差已经修正或者是可以忽略, 测得 n 个测量值为 $x_1, x_2, \dots, x_n$, 则它们的算术平均值是

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad \text{其中 } i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (2-3)$$

此时, 测量值的算术平均值 $\bar{x}$ 最接近被测量的真值, 测量次数 $n \rightarrow \infty$ 时, $\bar{x} \rightarrow$ 真值。因此我们可以用算术平均值 $\bar{x}$ 作为测量结果。

每一次测量值与平均值之差称为残差, 即 $\Delta x_i = x_i - \bar{x}$, 其中 $i = 1, 2, 3, \dots, n$, 用“方和根”法对残差进行统计, 得到的结果就是单次测量的实验标准差 S_x , 它表示这一列测量值的分散性。即

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (2-4)$$

由此可以得出平均值的实验标准差 $S_{\bar{x}}$ 为

$$S_{\bar{x}} = \frac{S_x}{\sqrt{n}} \quad (2-5)$$

3. 过失误差

由于测量者在测量过程中粗心大意所发生的错误或失误而造成的误差称为过失误差。如: 漏记、错记、算错等引起的误差。它所对应的测量值称为坏值, 一旦发现, 应按一定规则将其从测量列中剔除。在实验中只要认真、细心操作, 完全可以避免这种误差。

第三节 测量结果的有效数字

物理实验是以测量为基础的。物理现象的研究、物质特性的了解和物理原理的验证都需要进行测量。实验数据是通过测量获得的。实验中, 当被测量和测量仪器确定后, 实际上实验数据具有的位数就已经确定了。

一、有效数字的概念

对某一物理量测量时, 由仪器中读取的准确数字称为可靠数字, 估读的欠准确数字称为存疑数字, 可靠数字和存疑数字统称为测量结果的有效数字。有效数字一般都是由几位可靠数字和 1~2 位存疑数字构成的。有效数字的位数取决于测量所用仪器和被测量本身的大小, 仪器精度决定存疑数字的位置 (一般为仪器最小刻度的下一位), 被测量量的大小决定可靠数字的个数。

因此, 在实验中如果使用不同精度的测量仪器得到的测量数据, 其有效数字的有效位数则不同。对同一个物理量采用不同精度的仪器测量时, 得到的测量数据的有效数字的位数不同, 测量结果的有效位数越多, 说明测量结果越精确。

二、有效数字的正确读取和表示

根据有效数字的概念, 在读取和计算数据时, 对有效数字的位数不能随意取舍。

(1) 在仪器上读取测量数据时, 除准确读取仪器的最小刻度值外, 还应该尽可能估计到仪器的最小刻度值的下一位, 即估读 1 位存疑数字。

在读取有效数字时需要注意的是：

1) 存疑数字一般按仪器最小刻度值的 10 等分估读，如果刻度比较细密，也可以按 5 等分或者 2 等分估读。

2) 若仪器指示与某刻度线对齐时，应该注意在读数的末位补“0”，以保证结果具有估读的存疑数字。

3) 如果仪器的最小刻度值不是 1 个单位时，应该在读出整数部分后，将小数部分所占格数读出，用格数乘仪器的分度值，再将其和算出来，作为测量数据。

(2) 对数字式仪器仪表或者游标卡尺，无法估计到其最小刻度值的下一位，则可以把直接读到的数据记录下来，只是仍然认为其末位为存疑数字。

(3) 最高位非“0”数字前的“0”不占有效位，只起定位作用，而其他位置的“0”和所有的非“0”数字都占有效位数。特别是末位的“0”，不可以随意增加，也不可以随意舍掉。

(4) 在对测量结果的单位进行换算时，因为测量精度没有改变，所以，测量结果的有效位数不能变化。

(5) 如果某物理量的测量数据很大或者很小，而且其有效位不多时，或者数字的大小与其有效位数发生矛盾时，有效数字应该用科学记数法来表示。

科学记数法规定，小数点前只可以留一位非零数字，而数字的数量级用 10 的方幂来表示。

三、有效数字的运算原则

有效数字的运算应该本着如下的原则：

(1) 可靠数字与可靠数字运算，其结果仍为可靠数字。

(2) 存疑数字参与运算时，运算结果为存疑数字，但是其进位为可靠数字。

(3) 如果已知参与运算的各个有效数字的不确定度，则先算出计算结果的不确定度，规定取 2 位存疑数字，然后再按照计算结果的不确定度来确定计算结果的有效位数。

(4) 为了与不确定度的有效数字取舍一致，本书约定：运算的最终结果要求保留 2 位存疑数字，即多取 1 位存疑数字。

四、有效数字的修约规则

在有效数字的运算过程中，存疑数字的取舍，应该按照国家计量技术规范规定执行：“4 舍 6 入，对应该修约的数字为 5 时，则把 5 前面的末位数字凑成偶数。”但是，不可以连续进行修约。

例如：重力加速度 $g=9.806\ 65\text{m/s}^2$ ，如果修约成 5 位有效数字，则为 $g=9.8066\text{m/s}^2$ 而不是 $g=9.8067\text{m/s}^2$ 。这一点与我们平时所用的“四舍五入”规则不一样。由于“四舍五入”规则是逢 5 即入 1，使从 1 到 9 的九个数字中“进”的机会大于“舍”的机会，因此是不合理的。

五、有效数字的一般运算规则

1. 有效数字的加减运算规则

定末位：以参与运算的各个有效数字中的最高末位为准，运算结果的存疑位比该末位多取 1 位，即取 2 位存疑数字，其余按有效数字的修约规则处理。

[例 2-1] $a=32.1$, $b=3.267$, $c=5.62$ 。求： $a-b+c$ 。

解: $a-b+c=32.1-3.267+5.62=34.453$

按照规则, a 的存疑位最高, 所以运算结果的应该比它的末位多取一位, 最后结果为 $a-b+c=34.45$ 。

[例 2-2] $a=26.65$, $b=3.921$, $c=97.4$ 。求: $a-b+c$ 。

解: $a-b+c=26.65-3.921+97.4=120.129$

按照规则, c 的存疑位最高, 所以最后结果为 $a-b+c=120.13$ 。

2. 有效数字的乘除运算规则

定位数: 以参与运算的各个有效数字中有效位数最少的数为准, 运算结果的有效位数比该数的有效位数多取 1 位, 即取 2 位存疑数字, 其余按有效数字的修约规则处理。

[例 2-3] $a=35.2$, $b=28$ 。求: $a \times b$ 。

解: $a \times b=35.2 \times 28=985.6$

按照规则, b 的有效位最少, 所以运算结果为 $a \times b=986$ 。

[例 2-4] $a=0.25$, $b=32.483$ 。求: $a \div b$ 。

解: $a \div b=0.25 \div 32.483=0.007696$

按照规则, a 的有效位数最少, 所以运算结果为 $a \div b=0.00770=7.70 \times 10^{-3}$ 。

3. 有效数字的乘方、开方运算规则

运算: 实际上乘方、开方是乘除运算的特殊形式, 所以也是“定位数”。

[例 2-5] $a=13.5$ 。求: a^2 。

解: $a^2=182.25$

按照规则, 最后的运算结果为 $a^2=182.2$ 。

[例 2-6] $a=625$ 。求: $a^{\frac{1}{4}}$ 。

解: $a^{\frac{1}{4}}=625^{\frac{1}{4}}=(5^4)^{\frac{1}{4}}=5$

按照规则, 最后的计算结果为 $a^{\frac{1}{4}}=5.000$ 。

4. 有效数字的混合运算规则

(1) 不能因为重复运算而在计算结果中多取有效位数。

(2) 如果有常数系数参与运算, 则它不影响运算结果的有效位数。如果常数系数是无理数, 则无理数的取位至少应该比参与运算的所有有效数字中位数最少的有效数字多取一位。

(3) 运算的中间过程可以多保留有效位数, 但是, 不可以轻易取舍。否则会引入计算误差, 最后的计算结果中保留 2 位存疑数字。

[例 2-7] 计算 $\frac{10.00 \times 28.4}{(16.5-2.3) \times (4.6+5.4)}^\circ$ 。

解: $\frac{10.00 \times 28.4}{(16.5-2.3) \times (4.6+5.4)} = \frac{284.0}{14.20 \times 10.00} = 2.000$

式中, 括号内的运算, 是按加、减运算的规则运算的, 分子是按乘除运算的规则进行的, 在经过第一步运算后, 分子、分母的三个数据都是四位有效数字, 并且都包含有 2 位存疑数字, 下一步运算是三个数进行乘除运算, 如果仍然按乘除运算规则, 结果应该是 5 位有效数字, 并且其中包含 3 位存疑数字, 而我们规定只取 2 位存疑数字, 所以应该将末位的存疑数字去掉, 即运算结果仍然为 4 位有效数字。

[例 2-8] 计算 $\frac{(24.7-4.583) \times \pi}{(1213+0.1) \times 0.05} + 85.00$ 。

$$\text{解: } \frac{(24.7-4.583) \times \pi}{(1213+0.1) \times 0.05} + 85.00 = \frac{20.12 \times \pi}{1213.1 \times 0.05} + 85.00 = 1.0 + 85.00 = 86.0$$

本例中, 同样避免了计算结果存疑位数的多取。

第四节 测量结果的表达及不确定度的估计

当报告测量结果时, 除了应该给出被测量的量值外, 还必须对测量结果的质量给出定量的说明, 以确定测量结果的可信程度。测量不确定度就是对测量结果质量的定量表征, 测量结果的可用性很大程度上取决于其不确定度的大小, 所以, 测量结果必须附有不确定度说明才是完整并有意义的。

我国推行的 ISO/IEC 导则 25 (已修订为 ISO 17025)《校准和检测实验室能力的通用要求》和 ISO 9001《质量体系设计、开发、生产、安装和服务的质量保证模式》中, 对测量结果的不确定度均有明确的要求。国内许多通过 ISO 9000 系列质量认证的单位, 通过 ISO/IEC 导则 25 认可的实验室, 以及独资、合资的企业, 也要求对检测/校准的结果提供详细的不确定度说明或报告。

我国的国家计量技术规范 JJF 1059—1999《测量不确定度评定与表示》规定的是测量中评定与表示不确定度的一种通用规则, 适用于各种准确度等级的测量, 其主要应用领域如下:

- (1) 建立国家计量基准、计量标准及其国际对比。
- (2) 标准物质、标准参考数据。
- (3) 测量方法、检定规程、检定系统、校准规范等。
- (4) 科学研究及工程领域的测量。
- (5) 计量认证、计量确认、质量认证以及实验室认可。
- (6) 测量仪器的校准和检定。
- (7) 生产过程的质量保证以及产品的检验和测试。
- (8) 贸易结算、医疗卫生、安全防护、环境监测及资源测量。

一、不确定度

1. 测量不确定度

测量不确定度是与测量结果相联系的参数, 表征了测量结果的置信程度。不确定度可以是标准差或其倍数, 或是说明了置信水准的区间的半宽。

2. 标准不确定度 u

以标准差表示的不确定度称为标准不确定度, 以 u 表示, 它表示测量结果的分散性。

3. 展伸不确定度 U

以标准差的 k 倍表示的不确定度, 称为扩展不确定度, 或者称为展伸不确定度, 以 U 表示, k 称为包含因子。它表明了具有较大的置信概率区间的半宽度。

扩展不确定度与置信区间或统计区间有关的概率值 $p=1-\alpha$, α 为显著性水平或置信度。当测量值服从某分布时, 落于某区间的概率 p 即为置信概率。它是介于 0~1 之间的数, 常用百分数表示。

二、测量不确定度的来源

测量过程中有许多引起不确定度的来源, 它们可能来自于以下几个方面:

- (1) 对被测量的定义不完整或不完善。
- (2) 实现被测量定义的方法不理想。
- (3) 取样的代表性不够, 即被测量的样本不能代表所定义的被测量。
- (4) 对测量过程受环境影响的认识不周全, 或对环境条件的测量与控制不完善。
- (5) 对模拟式仪器的读数存在人为偏差(偏移)。
- (6) 测量仪器计量性能(如灵敏度、鉴别力阈、分辨力、死区及稳定性等)上的局限性。

- (7) 赋予计量标准的值和标准物质的值不准确。
- (8) 引用的数据或其他参量的不确定度。
- (9) 与参量方法和参量程序有关的近似性和假定性。
- (10) 在表面看来完全相同的条件下, 被测量重复观测值的变化。

上述不确定度的来源可能相关。对于尚未认识到的系统效应, 显然是不可能在不确定度评定中予以考虑的, 但它可能导致测量结果的误差。测量不确定度一般来源于随机性或模糊性。前者归因于条件不充分, 后者归因于事物本身概念不明确。因而测量不确定度一般由许多分量组成, 其中一些分量具有统计性, 另一些分量具有非统计性。所有这些不确定度来源, 如果影响到测量结果, 都会对测量结果的分散性做出贡献。即这些不确定度来源的综合效应, 使测量结果的可能值服从某种概率分布。

三、测量不确定度的分类

可以用概率分布的标准差来表示的测量不确定度, 称为标准不确定度, 它表示测量结果的分散性。也可以用具有一定置信概率的区间来表示测量不确定度。

不确定度依据其评定方法可以分为 A 类标准不确定度和 B 类标准不确定度。分类的目的并不意味两类评定之间存在本质上的区别, 它们都基于概率分布, 并都用方差或标准差表征, 两种方式都用已知的概率解释。

1. A 类标准不确定度 u_A

A 类标准不确定度由以观测列频率分布导出的概率密度函数得到。通常以被测量列的平均值的实验标准差 S_x 作为测量结果的 A 类标准不确定度。即

$$u_A = S_x \quad (2-6)$$

2. B 类标准不确定度 u_B

B 类标准不确定度 u_B 可由一个认定的或假定的概率密度函数(基于事件发生的信任度——常称主观概率或先验概率)得到。

四、数学模型的建立及测量不确定度的评定

在测量不确定度的评定中, 所有的测量值都应是测量结果的最佳估计值(即对所有测量结果中系统效应均应进行修正)。对各影响量产生的不确定度分量不应有遗漏, 也不能有重复。在所有的测量结果中, 均不应存在由于读取、记录、数据分析失误或仪器不正确使用等因素引入的明显的异常数据, 即不应该存在过失误差。

1. 数学模型的建立

在实际测量的很多情况下, 被测量 y (输出量) 不能直接测得, 而是由 n 个输入量 $x_1, x_2, \dots, x_n$, 通过函数关系 f 来确定, 即

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$