
● 高等教育“十一·五”规划教材

公共课教材系列

基础物理实验

主编 王德法 王世亮

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书重点突出科学实验素质培养、实验技能培养和创新意识培养,将基础物理实验、设计性实验、仿真实验融为一体。

全书共分7章,系统地介绍了测量误差、不确定度和数据处理的基本知识;同时还介绍了力学、热学、电磁学、光学、仿真共24个实验以及9个具有代表性的设计性实验。

本书可作为综合性大学、普通高等师范院校及工科大学物理类专业实验教学用书或实验教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

基础物理实验/王德法,王世亮主编.——北京:科学出版社,2006

(高等教育“十一·五”规划教材·公共课教材系列)

ISBN 7-03-017561-1

I. 基… II. ①王…②王… III. 物理学-实验-高等学校;技术学校-教材
IV. 04-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第071973号

责任编辑:沈力匀 韩尔立 / 责任校对:都 岚
责任印制:吕春珉 / 封面设计:东方人华平面设计部

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

德海彩色印装有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2006年8月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2006年8月第一次印刷 印张:9 3/4

印数:1·5 000 字数:223 000

定价:16.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

前 言

物理学在人的科学素质的培养中具有重要地位，物理实验是物理教学的基础。基础物理实验课是大学中理、工、医、农等各科最基本的实验课之一，是为培养创新能力和实践能力、提高学生科学素质打下基础的极其重要的教学内容和环节。当我们进入了21世纪，特别是随着物理学近年来在其他学科中的迅速渗透和广泛应用，“基础”的内容日益广泛，要求日益提高。为了适应这种变化，基础物理实验也要相应地“与时俱进”。鲁东大学物理实验中心近年来积极改革实验内容，大力挖掘设备潜力，大量购置新设备，引进新技术，开设新实验，使基础物理实验紧跟时代发展而不断更新，取得了一定的效果。鲁东大学物理实验中心，在总结自己的教学体会的基础上，吸取和学习了一些其他高校的宝贵经验和先进思路编写了这本符合时代要求，并且适合于广大普通高校理工科物理实验教学的“基础物理实验”教材。

与传统的理工科（非物理）专业物理实验教材相比，本书增添了许多新的实验内容。力求反映当前主流的实验理论、技术和方法。例如：选用了电子示波器、计算机仿真等实验内容。在内容的编写上，注意了对实验背景、实验设计思路的介绍，同时尽可能地介绍一些与所选实验相关的实验技术、应用情况及其展望。在数据处理方面，学习复旦大学物理实验教学的先进理念，摒弃了传统误差理论中一些不科学与不确切的内容，以由国际权威组织制定的《测量不确定度表示指南》为标准来阐述不确定度的评定，使之与国际接轨，同时也进行了一些必要的简化。让学生既掌握评定不确定度的基本方法又不会陷于过于严格的烦琐计算，以适合普物实验的要求。在实验技术和方法上面，吸取多所高校物理实验教学的经验，开设新的实验项目，增加新的实验内容，开发新的实验思路和方法。

本书是鲁东大学物理实验中心近年来教学改革效果的体现，是全体教师的辛勤努力的结晶。本书由王德法、王世亮主编，参加编写的人员还有：张卫东、陈建农、吕万辉、王洪润、于永江在本书的编写过程中，鲁东大学教务处、鲁东大学物理与电子工程学院的领导和广大教师给予了极大的鼓励和支持。特别是赵继德教授始终关心这本书的编写情况，并提出很多指导性的意见和建议。在此，向所有关心支持本书编写工作的领导和教师们表示诚挚的敬意和衷心的感谢！

由于我们的水平有限，时间紧迫，教材中不妥之处在所难免，恳请读者和同行们批评指正。

目 录

第一章 绪论	1
第一节 物理实验的地位和作用	1
第二节 普通物理实验课的目的及意义	2
第三节 怎样做好普通物理实验	4
第二章 测量的不确定度和数据的处理	7
第一节 实验误差的分析	7
第二节 测量不确定度及其评定	8
第三节 制表、做图与拟合	13
附录一 正态分布与标准偏差	17
附录二 t 因子	19
附录三 物理量的单位	19
附录四 常用仪器的主要技术要求和最大允差	21
第三章 力学、热学实验项目	22
实验一 长度测量	22
实验二 密度的测定	25
实验三 直线运动中物体速度和加速度的测量	30
实验四 用拉伸法测量杨氏弹性模量	32
实验五 单摆法重力加速度的测定	37
实验六 转动惯量的测定	40
实验七 固体比热容的测量(混合法)	45
实验八 液体表面张力系数的测定	47
实验九 空气比热容比的测定	52
第四章 电磁学实验项目	57
实验十 伏安法测二极管的伏-安特性	57
实验十一 惠斯通电桥测电阻	58
实验十二 双臂电桥测低电阻	61
实验十三 制流电路与分压电路	65
实验十四 电子射线的电偏转与磁偏转	68
实验十五 电子射线的电聚焦与磁聚焦	71
实验十六 用箱式电势差计测电动势	75

实验十七 电子示波器的原理与使用	78
第五章 光学实验项目	85
实验十八 眼镜度数的测定	85
实验十九 用牛顿环干涉测透镜曲率半径	88
实验二十 分光计的调节和使用	91
附录 分光计刻度盘中心与游标盘中心不同轴的系统误差及消除	98
实验二十一 光偏振现象的研究	100
第六章 仿真物理实验项目	104
实验二十二 单摆的设计	104
实验二十三 气垫上的直线运动	106
实验二十四 碰撞和动量守恒	108
第七章 设计性、研究性实验项目	111
实验二十五 摆的研究	111
实验二十六 声速的测量	119
附录一 理想气体中的声速	125
附录二 压电换能器(传感器)——超声波的发射与接收	126
实验二十七 液体黏滞因数的测定	127
附录一 蓖麻油在不同温度下的黏滞因数	138
附录二 泊肃叶公式的推导	138
附录三 泊肃叶公式的修正	139
实验二十八 电位差计测电阻	140
实验二十九 电位差计较正电表	142
实验三十 RC 串联电路的暂态过程	144
实验三十一 烛灭水升现象的深入研究	145
实验三十二 红药水的妙用——散射光研究	146
实验三十三 望远镜的组装	147
参考文献	150

第一章

绪 论

第一节 物理实验的地位和作用

物理学是实验科学，实验是物理学的基础。特别是普通物理，更是与实验密不可分的。在物理学的发展过程中，实验起着决定性的作用。凡物理学的概念、规律及公式等都是以前实验为基础的。新的物理现象的发现；物理规律的寻找；物理定律的验证等，都只能依靠实验来完成。离开了实验，物理理论就会苍白无力，就会成为“无源之水，无本之木”，不可能得到发展。

伽利略是16世纪伟大的实验物理学家，正是他用出色的实验工作把古代对物理现象的一些观察和研究引上了当代物理学的科学道路，才使得物理学发生了革命性的变化。力学中的许多基本定律，如自由落体定律、惯性定律等，都是由伽利略通过实验发现和总结出来的。库仑发明扭秤并用来测量电荷之间的作用力，为电磁学的研究和发展开启了先河。贝克勒尔和居里夫妇发现了天然放射性元素，由此成为了核物理学的奠基人。

关于理论和实验的关系，牛顿做过非常明确的阐述。他在1672年给奥尔登堡的信中说：“探求事物属性的准确方法是从实验中把他们推导出来。……考察我的理论的方法就在于考虑我所提出的实验是否确实证明了这个理论；或者提出新的实验去验证这个理论。”在牛顿提出的诸多理论中，万有引力定律历经磨难最终被海王星的发现和哈雷彗星的准确观测等实践所证明；而他关于光的本性的学说却被杨氏干涉实验和许多衍射实验所推翻。

经典物理学的基本定律几乎全部是实验结果的总结与推广。在19世纪以前，没有纯粹的理论物理学家。所有物理学家，包括对物理理论的发展有重大贡献的牛顿、菲涅尔、麦克斯韦等，都亲自从事实验工作。近代物理的发展则是从所谓“两朵乌云”和“三大发现”开始的。前者是指当时经典物理学无法解释的两个实验结果，即黑体辐射实验和迈克耳孙-莫雷实验；后者是指在实验室中发现了X光、放射性元素和电子。由于物理学的发展越来越深入、越来越复杂，而人的精力有限，才有了以理论研究为主和以实验研究为主的分工，出现了“理论物理学家”。然而，即使理论物理学家也绝对离不开物理实验。爱因斯坦无疑是最著名的理论物理学家，而他获得诺贝尔奖是因为他正确解释了光电效应的实验规律；他当初提出的以“光速不变”的假设为基础的相对论，是经过长期大量的实验后，才成为一个被人们普遍接受的理论。

总之，物理学的理论来源于物理实验又必须最终由物理实验来验证。因此，要学好物理学，必须学好物理实验。要从事物理学的研究，必须掌握物理实验的基本功。正因

为如此，我国物理学界的前辈们对物理实验都十分重视。创办复旦大学物理系的王福山先生亲自从一个弹簧开始筹措实验仪器设备，为建立物理教学实验室倾注了大量的心血；创办清华大学物理系的叶企孙先生对李政道这样优秀的学生，仍规定：“理论课可免上，只参加考试；但实验不能免，每个必做。”

物理实验不仅对于物理学的研究工作和推动物理学的发展有着极其重要的地位和作用，对于物理学在其他学科领域中的应用也有着十分重要作用。当代物理学的发展已使我们的世界发生了惊人的改变，而这些改变正是物理学在各行各业中应用的结果。

电子物理、电子工程、光源工程、光科学信息工程等学科都是以物理学为基础的，当然有大量物理学的应用；在材料科学中，各种材料的物性测试、许多新材料的发现（如 C_{60} 、高温超导材料等）和新材料制备方法的研究（如离子束注入、激光蒸发等），都离不开物理的应用；在化学中，从光谱分析到量子化学、从放射性测量到激光分离同位素，也无不是物理的应用；在生物学的发展史中，离不开各类显微镜（光学显微镜、电子显微镜、X 光显微镜、原子力显微镜）的贡献；近代生命科学更离不开物理学，DNA 的双螺旋结构就是美国遗传学家和英国物理学家共同建立并为 X 光衍射实验所证实的，而对 DNA 的操纵、切割、重组也都需要实验物理学家的帮助；在医学中，从 X 光透视、B 超诊断、CT 诊断、核磁共振诊断到各种理疗手段，包括放射性治疗、激光治疗、 γ 刀等都是物理学的应用。物理学正在渗透到各个学科领域，而这种渗透无不与实验密切相关。显然，实验正是从物理基础理论到其他应用学科的桥梁。只有真正掌握了物理实验的基本功，才能顺利地把物理原理应用到其他学科而产生质的飞跃。

综上所述，要研究与发展物理学，要把物理理论应用到各行各业的实际中去，都必须重视物理实验，学好物理实验。

然而，对物理实验的重要性却往往被忽视。中国社会长期以来重理论轻实践的错误观念至今仍有影响。杨振宁先生 1982 年在《光明日报》上发表“谈人才培养”的文章中语重心长地指出：“像我这样有了一点名气的人也有不好的影响。在国内有许多青年人都希望搞我这一行（指搞理论），但是，像我这样的人，中国目前不是急需的。要增加中国的社会生产力需要的是很多会动手的人。”另一位获诺贝尔物理学奖的华裔实验物理学家丁肇中先生则说：“我是一个做实验的工程师。希望通过我的得奖，能提高中国人对实验的认识。没有实验就没有现代科学技术。”据统计，1901 年以来，实验物理学家得诺贝尔奖的人数是理论物理学家人数的 2 倍；而近 30 年来，前者的人数超过后者的 6 倍以上。

由此可见，物理实验的重要地位和重要作用正在越来越明显的被认识到。我们必须摒弃旧观念，摆正理论与实践的关系，才能真正造就高素质的有创新精神的一代新人，才能培养出建设祖国的栋梁之材和世界科技领域的领军人物，使我们中华民族龙腾东方光耀世界。

第二节 普通物理实验课的目的及意义

通过第一节的学习我们已经认识到了物理实验的重要性。普通物理实验课教学对学

生掌握物理实验的基本功，培养综合素质有着极其重要的意义。在普通物理实验课的教学中，我们应本着如下三个基本目的。

(1) 学习物理实验的基本知识、基本方法、基本技能。普通物理实验教学中首先应使学生在物理实验的基本知识、基本方法和基本技能（三基）方面得到严格而系统的训练，这是做好物理实验的基础。

基本知识包括：实验原理、仪器构造与工作机理、实验的误差分析与不确定度评定、实验结果的表述方法、如何对实验结果进行分析与判断等。

基本方法包括：如何根据实验目的和要求确定实验的思路与方案，如何选择和正确使用仪器，如何减小各类误差，如何采用一些特殊方法来获得通常难以获得的结果等。

基本技能包括：各种调节与测试技术（粗调、微调、准直、调零、读数、定标等），真空技术（真空获得、维持、测量、应用等），电工技术（识别元件、焊接、排除故障、安全用电等），电子技术（微电流检测、弱信号放大等），传感器技术（力传感器、位移传感器、温度传感器、磁传感器、光传感器等）以及查阅文献的能力、自学能力、协作共事的能力、总结归纳能力、口头表达能力等。

这种基本训练往往会比较枯燥，令人不感兴趣，学生常常会敷衍了事。但这种基本训练却是完全必要的，它体现了最基本的实际动手能力和最起码的扎实认真的态度，因而必须首先保证这一要求的实现。没有这种严格的基本训练，就很难具备基本的素质，更不可能成为高素质的人才。

(2) 学习用实验方法研究问题、解决问题，并在实践中提高发现问题、分析问题和解决问题的能力。研究物理现象和验证物理规律是进行物理实验的根本目的。在学习“三基”的过程中要有意识地学习学习用实验方法研究物理现象、验证物理规律，加深对物理理论的理解和掌握，并在实践中提高发现问题、分析问题和解决问题的能力。一般的“验证性实验”，虽然教师都已将实验题目确定好并设计好了实验步骤，但学生仍应仔细体会其中的奥妙所在，理解实验的设计思想，不应只按所列出的步骤操作、记数据、得结果就算完成，更不能偷工减料少做步骤。要多问几个为什么，想一想为什么要设计这样的步骤来完成这个实验，不按所规定的步骤去做会有什么问题，或者能否想出别的方法来达到同样的目的？在条件允许的情况下，经老师同意，也可以做自己设计的实验。作为实验指导老师，更应该启发、引导、鼓励学生大胆想象、勇于思考，自己来设计实验。

进行物理实验也是真正理解和掌握物理理论的重要手段，完成实验的过程，正是学生透彻理解并运用物理理论的过程。只从书本上学到的知识往往是不完整的、不具体的，并且只是停留在感性认识上的。只有通过实验，才能使抽象的概念和深奥的理论变成具体的知识和实际的经验，变为在解决实际问题中的指导理论和有力工具。因此，要真正理解和掌握物理理论，并能正确使用物理理论，只靠在课堂上的学习是万万不行的，必须还要到实验室学习，亲自动手，亲身体会，才能真正的理解，才能真正的掌握，才能学到真正有血有肉的活生生的物理。

在进行实验的过程中常常会遇到一些意想不到的问题，也常常会发现一些意想不到的现象。这些问题和现象虽然往往不是实验研究的主要对象，但也不应视而不见，轻易

放过。这正是锻炼积极思考，提高分析问题、解决问题能力的绝好时机。要注意仔细观察、及时记录、认真分析，有必要时可以在老师的指导下进行深入研究。实际上，科学史上有不少重要发现都是在意想不到的情况下“偶然”出现的。

(3) 培养严谨求实的科学态度和开拓创新的科学精神。“实践是检验真理的唯一标准”，物理学的发展不可争辩的证明了这一理论的真理性和尊重事实，实事求是，严禁扎实是每一个物理学工作者必须坚持的原则。也是我们在物理实验教学中学习中必须贯穿整个过程的原则。物理学研究的是“物”之“理”，就是从“实事”中去求“是”。物理学中的“实践”主要就是物理实验，在物理实验课中最能培养实事求是、严谨踏实的科学态度。任何弄虚作假，篡改甚至伪造数据的行为都是违背“实事求是”这一原则的，是绝对不能允许的。在物理实验课中，严格规定了记录数据不准用铅笔，不能用涂改液，误记或错记数据的更改要写明理由并经指导教师认可等，都是为了帮助学生养成实事求是的良好习惯。实际上，实验结果是什么就是什么，没有“好”、“坏”之分。与原来预想不一致的实验结果不仅不应随便舍弃，还应特别重视，我们应认真分析原因，它可能就是某个新发现的开端。历史上许多新的物理理论都是由于旧理论无法解释某些实验现象而建立起来的。因此，实事求是的严谨态度与积极创新的科学作风是相联系的。在严谨的实验中才能发现真正的问题，而解决这些问题往往就需要坚韧不拔的毅力和积极创新的思维。实际上，只要认真去做实验，一定会发现许多问题，其中有些问题是教师也未必能解决的。所以，实验室应当而且可以成为培养学生求实态度、严谨作风和创新精神的最好场所。

第三节 怎样做好普通物理实验

一、认真预习

预习是做好物理实验的基础和前提。没有预习，或许可以听好一堂理论课，但决不可能完成好一堂实验课。物理实验预习的基本要求是：仔细阅读教材，了解实验的目的和要求及所用到的原理、方法和仪器设备。一些实验有供预习的CAI软件，学生可以从电脑上更清晰地看到实验概况及原理、仪器设备等。一些实验还没有预习的CAI软件，学生最好在规定时间内去实验室看一下实验的仪器设备状况，查阅一下仪器的使用说明书。有些实验还需要复习一下相关的物理理论，翻阅一些参考书。通过预习，应对将做的实验有一个初步的大致了解，写好预习报告（包括实验目的、原理、步骤、电路或光路图及数据表格等）。预习报告中，数据表格是很重要的。往往是只有真正理解了如何来做实验才能画好这个表格。表中要留有余地，以便有估计不到的情况发生时能够记录。直接测量的量和间接测量的量（由直接测量的量计算所得的量）在表中要清楚地分开，不应混在一起。

二、认真操作 仔细观察 做好记录

进入实验室最该注意的就是安全和爱护仪器设备。安全永远是第一位的，爱护仪器

设备永远是不可忽视的。实验室中，可能有大功率电源、煤气、压缩空气以及放射性物质、激光、易燃易爆等危险品或其他有毒、有害物品。所以，进入实验室必须听从老师的要求，严格执行仪器设备的操作规程；必须详细了解并严格遵守实验室的各项规章制度。这些规章制度是为保护人身安全和仪器设备安全而规定的，违反了就有可能损毁仪器设备，甚至是酿成事故，伤及人身。

进行实验的过程当中，要胆大心细、严肃认真、一丝不苟。既要做到注意安全，同时又要做到爱护设备仪器。对于精密贵重的仪器或元件，特别要稳拿妥放，防止损坏。在电磁学实验中，必须经教师检查无误后才可接通电源。在使用任何仪器前，必须先看说明书，详细了解注意事项；在调节时，应先粗调后微调；在读数时，应先取大量程后取小量程；实验完成后，应整理好仪器设备，关好水、电、煤气等，方可离开实验室等，这些都是一个实验工作者应该具备的基本素质和实验习惯。

实验记录是做好实验的重要组成部分，它应全面真实反映实验的全过程，包括实验的主要步骤（必要时写明为什么要采取这样的步骤）、观察与测量的条件和情况以及观察到的现象和测量到的数据（为了清楚起见，数据常用表格来记录，制表方法详见第二章第三节）。不仅要记录与预想一致的数据和现象，更要记录与预想不一致的数据和现象。记录应尽量清晰、详细。科学研究中的实验记录本是极其宝贵的资料，要长期保存，因此必须认真对待。关于实验操作与记录，以下两点是要特别注意的。

(1) 实验中，不仅要动手而且还要动脑。做实验是为了学习从事科学研究工作的能力，学会某些仪器设备的使用方法不仅是目的而更重要的是手段。只有在实验中认真动手积极动脑，才能触类旁通，掌握实验的真谛，学到从实践中发现问题、分析问题、解决问题的真功夫。其中，发现问题是解决问题的第一步，有所发现才能有所创造。因此，在实验过程中要十分注意各种实验现象。不仅对主要的现象、预先估计到的现象，要认真观察、仔细测量、工整记录；对于一些次要的现象、预先没有估计到的现象，也要注意观察和如实记录，以便进行分析和讨论。

(2) 数据记录必须真实，决不可任意伪造或篡改。这是一个科学工作者的基本道德素养。教学实验与科学实验不同，在教学实验中，实验结果往往是预知的，或有公认值的。实验结果与公认值不一致的情况是经常会发生的。这种不一致的原因，不一定是因为学生操作的失误、概念理解不当或计算错误，它也可能是由于仪器设备不正常或环境等其他原因造成的。决不可认为实验结果与公认值越接近，就表明实验做得越好，得分也会越高；更不可为追求实验结果与公认值的一致而编造或篡改实验记录。从学生学习的角度讲，过程比结果更重要。教师对学生的培养与评价，侧重于实验的态度与作风，以及发现、分析、解决问题的能力。

三、认真撰写实验报告

一个实验的最终结果，总是以实验报告的形式展现在人们的面前的。实验报告要完全真实地反映实验的所有情况。实验报告可以在预习报告的基础上完成，也可以另写。对于实验报告，过去有些同学往往只重视数据处理和得出实验结果，对于实验的原理、仪器的型号、实验步骤、记录的数据和现象等的撰写很不重视，这是非常错误的。

认真撰写实验报告是培养实验工作者基本素质的重要一环。科研工作者在进行实验研究时,无不及时认真地记录下实验过程中所有的现象和数据,哪怕是一个很不起眼的现象、变化很小的数据也从不放过。并且这些记录被长期的保存在实验室中,以作为科学研究的宝贵资料。这些资料都是用智慧和辛勤的汗水换来的,是极为珍贵的,是非常值得珍惜的。为了培养学生良好的记录习惯,学习并掌握从事实验研究工作的基本功,在实验报告中,要求学生详细记录实验环境、实验条件、实验仪器、实验现象和测量数据。尤其是实验现象更要做强调性的要求,过去有好多学生往往是只记数据而不记现象,这是一个根本性的错误。

要公布研究工作所取得的成果,一般都是以论文的形式发表。为了训练学生这种对实验成果的文字表达能力,在实验报告中,要求学生用自己的语言简要地写明实验目的、原理和步骤并进行适当的讨论。

实验报告的内容主要应含有以下三方面:

1) 简述实验目的、原理和步骤

在实验报告中,要在透彻理解相关理论知识的前提下,尽可能的用自己的语言简要地阐明实验的目的、原理和步骤。写这些内容时,一定不要机械的从教材、书本、仪器设备说明书或其他地方抄写。照抄既会使报告赘长又会失去做实验的目的和意义。注意,这里在“明”的前提下,强调尽量的“简”。

2) 真实而全面地填写实验记录

在实验报告中必须真实而全面的记录下实验条件和实验过程中得到的全部信息。实验条件包括实验的环境(室温、气压等与实验有关的外部条件)、所用的仪器设备(名称、型号、主要规格和编号等)、实验对象(样品名称、来源及其编号等)以及其他有关器材等。实验过程中要随时记下观察到的现象、发现的问题和自己产生的想法;特别当实际情况和预期不同时,要记下有何不同,分析为何不同;或者是看到的现象和理论好像矛盾的时候,更要认真记录,分析原因。实验记录要认真、仔细、清晰、整洁,但一定不要为了清晰整洁先把数据记在草稿上再誊上去,更不要算好了再填上去。要培养清晰而整洁地记录原始数据的能力和习惯。

3) 认真地分析和解释实验结果,得出实验结论

实验结果不是简单的测量结果,它应包括不确定度的评定、对测量结果与期望值的关系的讨论,分析误差的主要原因和改进方法,还应包括对实验现象的分析与解释,对实验中有关问题的思考和对实验结果的评论等。

最后,实验报告中还可以谈谈做本实验的体会和建议。

第二章

测量的不确定度和数据的处理

物理实验的目的是探寻和验证物理规律，而许多物理规律是用物理量之间的定量关系来表述的。在物理实验中可以获得大量的测量数据，这些数据必须经过认真地、正确地、有效地处理，才能得出合理的结论，从而把感性认识上升为理性认识，形成或验证物理规律。所以，数据处理是物理实验中一项极其重要的工作。本章将介绍一些最基本的数据处理方法，包括误差分析、不确定度评定、有效数字及做图拟合法等。

第一节 实验误差的分析

一个待测物理量的大小，在客观上应该有一个真实的数值，叫做“真值”。由于测量方法、测量仪器、测量条件及测量者等种种问题，实际测得的数值即测量值，只能是一个真值的近似值。测量值与真值之差称为误差。测量方法的考虑、测量仪器的选择、测量条件的确定、测量数据的处理等都应在可能的范围内力求减小误差。

所谓测量，就是由测量者采取某种测量方法、用某种测量仪器将待测量与标准量进行比较。例如，为测量一个钢珠的质量，可以用天平（测量仪器）把钢珠（待测物）放在天平的一侧，把适量的砝码（其质量为标准量）放在另一侧，适当调节而使两侧平衡（测量方法），即可得到待测物的质量，即待测量。由此可知，测量值并非就是真值，测量值存在误差的原因可能有以下三方面：测量仪器（及标准量）的问题、测量方法的问题、测量者的问题。下面详细讨论这几方面。

1. 测量仪器及标准量的问题

在许多情况下，测量仪器上的刻度（或数字显示）就代表了标准值，如米尺、温度计等。但是这种“标准量”也并非真正标准，它与真正的标准必有差距。例如，米尺端边会磨损、刻度有不均匀性或不够准确、在不同温度下米尺本身的长度有变化等。

2. 测量方法的问题

采用不同的测量方法可能会得到不同的测量结果，其影响是很明显的。例如，为了测量一块玻璃板的温度，用一般的温度计测量和用激光测量，其结果就往往不一样；为了测量重力加速度，用测单摆周期的方法或用自由落体的方法结果也可能会不同。

3. 测量者的问题

这方面的问题很多。首先是“估读”的不同，待测量位于标准量的某两刻度之间时，必须估读其数值，不同测量者的估读会有不同，这与测量者的位置、熟练程度等有关。其次是“判断”的不同，例如，要测量干涉条纹间的距离，为确定何处是干涉条纹的中心位置（即光最亮处或最暗处），需要经验和判断能力。最后还有“误读”的可能，

即测量者长期工作中难免犯错误，把数据读错也是很可能发生的。

以上三方面的问题都会造成误差。其中第一个问题和第二个问题产生的误差大小与测量仪器、测量者、测量条件和测量次数有关，可以用一定的方法进行评定，这种评定的方法将在第二节详述。测量方法的问题则要进行定性分析以尽量避免或进行定量分析予以修正。

例如，要测量一块正在加热的平面玻璃的温度，无论用温度计或热电偶，放在玻璃板的任何一侧，都不可能测准，因为测温元件（温度计或热电偶）与待测元件（玻璃板）的受热与散热情况都不相同，它们的温度不可能相同。因此，可以改用激光测温的方法，它利用待测元件本身作为测温元件，从玻璃表面间反射光的干涉条纹变化来确定其温度变化，就可以避免因测温元件与待测元件的温度差而形成的误差。

又如，用单摆测量重力加速度的一般公式为

$$g = 4\pi^2 \frac{L}{T^2} \quad (2-1)$$

式中 T 为单摆周期， L 为摆长。这里忽略了单摆摆线的质量，忽略了单摆运动是非简谐运动，也忽略了空气阻力的影响等。如要修正上述这些因素造成的误差，则要进行严格的计算和修正。如摆线质量为 μ ，摆球半径为 r ，质量为 m ，则上述公式应修正为

$$g = 4\pi^2 \frac{L}{T^2} \left(1 + \frac{2}{5} \frac{r^2}{L^2} - \frac{1}{6} \frac{\mu}{m} \right) \quad (2-2)$$

摆动的幅角较大或空气的浮力与阻力的影响较大时还应做其他各种修正。实验误差的分析是一项十分重要的工作，要考虑实际上可能对测量结果产生影响的各种因素，分析其影响的大小。任何实验都不要求把一切影响因素全部消除，这在经济上、时间上、精力上都将造成浪费，而实际上也是不可能做到的；只要达到一定的误差允许范围之内就行。而这种分析需要广博的基础知识、丰富的实践经验和高超的判断能力。这就要求我们在各种实验中认真思索，仔细考虑，以积累经验，丰富知识，提高分析判断能力。

第二节 测量不确定度及其评定

一、不确定度评定的意义

如上所述，即使采用了正确的测量方法，由于测量仪器和测量者的问题，测量结果仍不可能是绝对准确的，它必然有不确定成分。实际上，这种不确定的程度是可以用一种科学的、合理的、公认的方法来表征的，这就是“不确定度”的评定。在测量方法正确的情况下，不确定度愈小，表示测量结果愈可靠。反之，不确定度愈大，测量的质量愈低，它的可靠性愈差，使用价值就愈低。

不确定度必须正确评价。评价得过大，在实验中会怀疑结果的正确性而不能果断地做出判断，在生产中会因测量结果不能满足要求而需再投资，造成浪费；评价得过小，在实验中可能得出错误的结论；在生产中则产品质量不能保证，造成危害。

二、关于不确定度的一些基本概念和分类

不确定度的评定十分重要，但以往各国对不确定度的表示和评定却有不同的看法和规

定,这无疑影响了国际间的交流与合作。1992年,国际标准化组织(ISO)发布了具有指导性的文件《测量不确定度表示指南》(以下简称《指南》),为世界各国不确定度的统一奠定了基础。1993年ISO和国际理论与应用物理联合会(IUPAP)等七个国际权威组织又联合发布了《指南》的修订版。从此,物理实验的不确定度评定有了国际公认的准则。

《指南》对实验的测量不确定度有十分严格而详尽的论述。作为普通物理实验教学,只要求对不确定度的下述基本概念有初步的了解。

不确定度是表征测量结果具有分散性的一个参数,它是被测量的真值在某量值范围内的一个评定。

所谓“标准不确定度”是指以“标准偏差”表示的测量不确定度估计值,简称不确定度,常记为 u (关于“标准偏差”的意义请阅本章附录1)。

标准不确定度一般可分为以下三类:

(1) A类评定不确定度:在同一条件下多次测量,即由一系列观测结果的统计分析来评定的不确定度,简称A类不确定度,常记为 u_A 。

(2) B类评定不确定度:由非统计分析来评定的不确定度,简称B类不确定度,常记为 u_B 。

(3) 合成标准不确定度:某测量值的A类与B类不确定度按一定规则算出的测量结果的标准不确定度,简称合成不确定度。

以下分别讨论如何进行不确定度的评定、合成、传递和表示。

三、标准不确定度的评定

1. A类不确定度 u_A

在相同的条件下,对某物理量 x 做 n 次独立测量,得到的 x 值为 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$,于是平均值 \bar{x} 为

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

平均值为测量结果的最佳值,它的不确定度为

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

式中的 t 就称为“ t 因子”,它与测量次数和“置信概率”有关。(所谓“置信概率”是指真值落在 $\bar{x} \pm u_A(x)$ 范围内的概率)。 t 因子的数值可以根据测量次数和置信概率查表得到,当测量次数较少或置信概率较高时, $t > 1$;当测量次数 $n \geq 10$ 且置信概率为68.3%时, $t \approx 1$;在大多数普通物理教学实验中,为了简便,一般就取 $t = 1$ 。(关于 t 因子的大小,请阅本章附录2)

2. B类不确定度 u_B

若对某物理量 x 进行单次测量,那么B类不确定度由测量不确定度 $u_{B1}(x)$ 和仪器不确定度 $u_{B2}(x)$ 两部分组成。

测量不确定度 $u_{B1}(x)$ 是由估读引起的,通常取仪器分度值 d 的 $\frac{1}{10}$ 或 $\frac{1}{5}$,有时也取

$\frac{1}{2}$ ，视具体情况而定；特殊情况下，可取 $u_{B1} = d$ ，甚至更大。例如用分度值为 1mm 的米尺测量物体长度时，在较好地消除视差的情况下，测量不确定度可取仪器分度值的 $\frac{1}{10}$ ，即 $u_{B1} = \frac{1}{10} \times 1\text{mm} = 0.1\text{mm}$ ；但在示波器上读电压值的时候，如果荧光线条较宽、且可能有微小抖动，则测量不确定度可取仪器分度值的 $\frac{1}{2}$ ，若分度值为 0.2V，那么测量不确定度 $u_{B1}(x) = \frac{1}{2} \times 0.2\text{V} = 0.1\text{V}$ 。又如，用肉眼观察远处物体成像的方法粗测透镜的焦距，虽然所用钢尺的分度值只有 1mm，但此时测量不确定度 $u_{B1}(x)$ 可取数毫米，甚至更大。

仪器不确定度 $u_{B2}(x)$ 是由仪器本身的特性所决定的，它定为

$$u_{B2}(x) = \frac{a}{c} \quad (2-5)$$

其中， a 是仪器说明书上所标明的“最大误差”或“不确定度限值”， c 是一个与仪器不确定度 $u_{B2}(x)$ 的概率分布特性有关的常数，称为“置信因子”。仪器不确定度 $u_{B2}(x)$ 的概率分布通常有正态分布、均匀分布、三角形分布以及反正弦分布、两点分布等。对于正态分布、均匀分布和三角形分布，置信因子 c 分别取 3、 $\sqrt{3}$ 和 $\sqrt{6}$ 。如果仪器说明书上只给出不确定度限值（即最大误差），却没有关于不确定概率分布的信息，则一般可用均匀分布处理，即 $u_{B2}(x) = \frac{a}{\sqrt{3}}$ 。

有些仪器说明书没有直接给出其不确定度限值，但给出了仪器的准确度等级，则其不确定度限值 a 需经计算才能得到。如指针式电表的不确定度限值等于其满量程值乘以等级，例如满量程为 10V 的指针式电压表，其等级为 1 级，则其不确定度限值 $a = 10\text{V} \times 1\% = 0.1\text{V}$ 。又如电阻箱的不确定度限值等于示值乘以等级再加上零值电阻，由于电阻箱各档的等级是不同的，因此在计算时应分别计算，例如常用的 ZX21 型电阻箱，其示值为 360.5Ω ，零值电阻为 0.02Ω ，则其不确定度限值 $a = (300 \times 0.1\% + 60 \times 0.2\% + 0 \times 0.5\% + 0.5 \times 5\% + 0.02)\Omega = 0.47\Omega$ 。

四、标准不确定度的合成与传递

由正态分布、均匀分布和三角形分布所求得的标准不确定度可以按以下规则进行合成与传递。

1. 合成

(1) 在相同条件下，对 x 进行多次测量时，待测量 x 的标准不确定度 $u(x)$ 由 A 类不确定度 $u_A(x)$ 和仪器不确定度 $u_{B2}(x)$ 合成而得。即

$$u(x) = \sqrt{u_A^2(x) + u_{B2}^2(x)} \quad (2-6)$$

其中， $u_{B2}(x)$ 的值由式 (2-5) 根据相应的概率分布进行估算。

(2) 对待测量 x 进行单次测量时，待测量 x 的标准不确定度 $u(x)$ 由测量不确定度 $u_{B1}(x)$ 和仪器不确定度 $u_{B2}(x)$ 合成而得。即

$$u(x) = \sqrt{u_{B1}^2(x) + u_{B2}^2(x)} \quad (2-7)$$

对于单次测量, 有时会因待测量的不同, 其不确定度的计算也有所不同。例如用温度计测量温度时, 温度的不确定度合成公式为上述的式 (2-7); 而在长度测量中, 长度值是两个位置读数 x_1 和 x_2 之差, 其不确定度合成公式为 $u(x) = \sqrt{u_{B1}^2(x_1) + u_{B1}^2(x_2) + u_{B2}^2(x)}$ 。这是因为 x_1 和 x_2 在读数时都有测量不确定度, 因此在计算合成不确定度时都要算入。

2. 传递

在间接测量时, 待测量 (即复合量) 是由直接测量的量通过计算而得的。若 $y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_N)$, 且各 x_i 相互独立, 则测量结果 y 的标准不确定度 $u(y)$ 的传递公式为

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) \quad (2-8)$$

由式 (2-8) 可以得到一些常用的不确定度传递公式为

对加减法: $y = x_1 \pm x_2$, 则

$$u^2(y) = u^2(x_1) + u^2(x_2) \quad (2-9)$$

对乘除法: $y = x_1 \cdot x_2$, 或 $y = \frac{x_1}{x_2}$, 则

$$\left[\frac{u(y)}{y} \right]^2 = \left[\frac{u(x_1)}{x_1} \right]^2 + \left[\frac{u(x_2)}{x_2} \right]^2 \quad (2-10)$$

对乘方 (或开方): $y = x^n$ 则

$$\left[\frac{u(y)}{y} \right]^2 = \left[n \cdot \frac{u(x)}{x} \right]^2 \quad (2-11)$$

五、不确定度的表示

由于不确定度 $u(x)$ 表示的是待测量 x 的真值在一定的置信概率下可能存在的范围, 因而, 测量结果常表示为 $x \pm u(x)$, 如: 所测长度为 $(1.05 \pm 0.02)\text{m}$ 。这是不确定度的一般表示法。

有时, 以不确定度对于待测量的百分比来表示更能看出不确定度的相对大小, 即把测量结果的不确定度表示为 $\frac{u(x)}{x} \times 100\%$, 如: 所测长度为 1.05m , 相对不确定度为 2% 。这是不确定度的百分比表示法。

除了以上两种常用的不确定度表示法外, 还有一种更为简略的表示法, 叫做不确定度的有效数字表示法。所谓有效数字, 是指一个数值中, 从第一个非 0 数字算起的所有数字。例如, $x = 0.0035$ 中的 3 是第一个非 0 数字, 因此 x 有两位有效数字: 3 和 5, 小数点前后的三个 0 都是表示数量级的, 不是有效数字。又如, $x = 3.500$ 有四位有效数字 3, 5, 0, 0 都是有效数字, 其中的两个 0 虽然对该数的大小并无意义, 但它却表示这个数的准确程度可达小数点后的第三位, 即 x 的值约在 3.495 和 3.504 之间, 它与 $x = 3.5$ 是显然不同的, 后者表示小数点后的第一位数 (即 5) 就是可疑的, 不确定的。测量最后结果的不确定度, 一般只取一位有效数字, 而测量结果的末位有效数字应与不