



高等教育“十二五”规划教材

大学物理实验

曲 彬 编著

DAXUE

WULI SHIYAN



北京交通大学出版社

<http://www.bjup.com.cn>

高等教育“十二五”规划教材

大学物理实验

曲 彬 编著

北京交通大学出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书是高等教育“十二五”规划教材,根据2008年教育部颁发的“理工科类大学物理实验课程教学基本要求”,结合多年的教学实践而编写的。全书分4章,内容包括:测量误差、不确定度及数据处理的知识简介,力学实验,电磁学实验,光学实验与近代物理实验。

本书可作为高等院校工科各专业的教科书。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验 / 曲彬编著. — 北京: 北京交通大学出版社, 2015. 6
(高等教育“十二五”规划教材)

ISBN 978-7-5121-2281-9

I. ① 大… II. ① 曲… III. ① 物理学-实验-高等学校-教材 IV. ① 04-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 121136 号

责任编辑: 田秀青 特邀编辑: 李晓敏

出版发行: 北京交通大学出版社

电话: 010-51686414

北京市海淀区高粱桥斜街 44 号

邮编: 100044

印刷者: 北京交大印刷厂

经 销: 全国新华书店

开 本: 185×260 印张: 11.25 字数: 281 千字

版 次: 2015 年 6 月第 1 版 2015 年 6 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-5121-2281-9/O · 144

印 数: 1 ~ 1 000 册 定价: 29.00 元

本书如有质量问题, 请向北京交通大学出版社质监组反映。对您的意见和批评, 我们表示欢迎和感谢。
投诉电话: 010-51686043, 51686008; 传真: 010-62225406; E-mail: press@bjtu.edu.cn。

前 言

随着高等院校实验教学改革的不断深入及实验室建设的不断加强，大学物理实验的实验内容、实验技术和实验仪器都在不断更新和变化，大学物理实验教材也将顺应发展不断推陈出新，以满足教学要求。作者根据国家教育部颁发的“理工科类大学物理实验课程教学基本要求”，结合普通高等院校物理实验课程设置的特点，总结多年的物理实验教学经验，编著了这本大学物理实验教材。本教材把培养学生的创新能力、科学素养和拓宽学生的视野作为目标，充分考虑了学生特点和专业特点，在确保基础性和实践应用等教学功能的同时，还注重培养学生独立操作、分析总结和理论联系实际的能力。

本书内容包括力学实验、电磁学实验、光学实验与近代物理实验，还将测量误差、不确定度及数据处理的知识简介编入其中，以提高学生对实验数据的分析能力和处理实验数据的能力。

本书由曲彬编著，在编著过程中也参考了其他相关教材和兄弟院校的有关资料和经验，在此表示由衷的感谢。

由于编著水平有限，书中难免存在不妥之处，敬请读者提出宝贵意见。

曲彬

2015 年 3 月

目 录

绪论	1
第1章 测量误差、不确定度及数据处理的知识简介	6
1.1 测量误差	6
1.1.1 测量	6
1.1.2 基本单位和导出单位及国际单位制	7
1.1.3 测量误差	8
1.1.4 误差的分类	10
1.1.5 系统误差和随机误差	10
1.2 有效数字及其运算	13
1.2.1 有效数字和仪器的读数规则	13
1.2.2 有效数字的运算规则和修约法则	15
1.3 不确定度及测量结果表示	17
1.3.1 标准偏差与贝塞尔公式	17
1.3.2 标准不确定度（不确定度）	17
1.3.3 测量结果的表示	19
1.3.4 不确定度的评定（应用）	20
1.3.5 不确定度的运算法则	23
1.4 数据处理方法	24
1.4.1 列表法	24
1.4.2 作图法	25
1.4.3 逐差法	29
1.4.4 最小二乘法	32
习题	39
第2章 力学实验	41
2.1 实验一：长度测量	41
2.2 实验二：物体密度的测量	44
2.3 实验三：用拉伸法测定金属丝的杨氏弹性模量（光杠杆放大法）	50
2.4 实验四：用拉伸法测定金属丝的杨氏弹性模量（显微镜法）	55
第3章 电磁学实验	60
3.1 电磁学实验基本知识	60
3.2 实验五：万用表的原理及使用	69

3.3	实验六：电表的设计、改装与校正	77
3.4	实验七：霍尔效应	83
3.5	实验八：霍尔参数测量	89
3.6	实验九：电子束的电聚焦与电偏转	93
3.7	实验十：电子束的磁聚焦和磁偏转	102
3.8	实验十一：电子荷质比的测定	108
3.9	实验十二：示波器原理和使用	111
第4章	光学实验与近代物理实验	118
4.1	光学元件和仪器的维护	118
4.2	调节和正确使用常用光学仪器的要点	119
4.3	实验室常见的光源	124
4.4	实验十三：分光计的调整和使用	125
4.5	实验十四：用分光计测折射率	133
4.6	实验十五：用分光计测光栅常数和波长	135
4.7	实验十六：用牛顿环测球面的曲率半径	140
4.8	实验十七：迈克尔逊干涉仪测波长	143
附录A	游标卡尺	147
附录B	螺旋测微器	150
附录C	物理天平	152
附录D	数字万用表	154
附录E	THQEB-1型电子束实验仪	155
附录F	EB-2S型电子束实验仪	156
附录G	ZD2120示波器	157
附录H	SG1640B调频调幅函数信号发生器	159
附录I	分光计	161
附录J	圆刻度盘的偏心差	163
附录K	各半调节法(渐进法)的理论依据	164
附录L	证明当 $i=i'$ 时偏向角为最小偏向角	166
附录M	国际单位制的定义	167
附录N	常用物理参数	170
参考文献		173

绪 论

物理学从本质上说是一门实验科学，物理概念的建立和物理规律的发展都以严格的实验事实为基础，并且不断受到实验的检验。物理学在自然科学其他领域、高新技术领域的广泛应用也离不开实验。

实验是人们研究自然规律、改造客观世界的一种特殊的实践形式和手段。人们通过实验发现自然规律，检验自然科学理论，同时，工程设计和生产实际中的问题也要靠实验来解决。实验不同于对自然现象的直接观察，也不同于生产过程中的直接经验。其特有的优点是：首先，可以利用实验方法控制实验条件，排除外界因素的干扰，从而能有效地突出被研究事物之间的某种重要关系；其次，可以把复杂的自然现象或生产过程分解成若干独立的现象和过程，进行个别的和综合的研究；再次，可以对现象和过程进行满足预期准确度要求的定量测量，以解释现象和过程中的数量关系；最后，可以进行复杂实验，或改变条件进行实验，便于对事物的各方面做广泛的比较和分析等。

物理实验是为了对高等学校学生进行科学实验基本训练而开设的一门独立必修的基础实验课程，是学生进入大学后接受系统的实验技能训练的开端。通过实验可使学生获得基本的实验知识，特别是在实验方面和实验技能等方面得到较为系统、严格的训练，为后续其他实验打下良好的基础。同时在培养学生良好的素质即科学世界观方面，物理实验也起着潜移默化的作用，也是在如何运用理论知识、实验方法和实验技能解决实际问题方面进行的必要的基础训练。当今社会需要的工程技术人员不仅应具有一定的理论知识，更应该具备足够的实验能力，才能适应科学技术飞速发展的需要。因此学好物理实验对于高等院校理工科学生是十分重要的。

1. 物理实验课的地位

纵观物理学的发展史，不难看出，无论是物理概念的确定、物理规律的发现，还是物理理论的建立，都是以严格的科学实验为基础的。当然，理论物理学也起到了重要的作用，这一点是不能置疑的，如麦克斯韦（Maxwell）的电磁理论、爱因斯坦（Einstein）的相对论、卢瑟福（Rutherford）和玻尔（Bohr）的原子模型、薛定谔（Schrodinger）和海森堡（Heisenberg）等人的量子学等，这些理论的确使 20 世纪的物理学大放异彩。但是，我们必须看到，这些理论都是以实验中的新发现为依据，而又被进一步的实验所证实。因此，从根本上讲物理学是一门实验科学。从经典物理到现代物理，实验在四百多年的物理学发展进程中起到了重要的推动作用，主要体现在以下几个方面。

1) 发现新事物，探索新规律

伽利略（Galilei）的单摆实验和斜面实验为研究力学规律提供了依据；库伦（Coulomb）通过滑板实验提出摩擦定律，虎克（Hook）的弹性实验、玻意尔（Boyle）的空气压缩实验、伯努利（Bernoulli）的表面张力实验等，都为物理学提供了新事实和新规律。

在电学方面可以举出更多的例子。库仑 (Coulomb) 定律的验证、欧姆 (Ohm) 定律的建立、奥斯特 (Oersted) 发现电流的磁效应、伽伐尼 (Galvani) 和伏特 (Volta) 发现的动物电和化学电, 法拉第 (Faraday) 发现的电解定律和电磁感应现象, 无一不是从实验中得出的。

光的干涉、衍射、偏振及双折射等现象也都是首先在实验中发现的, 这些实验说明了光的波动性, 从色散的研究到光谱学的发展, 实验更是基本的认识途径。正是这一系列的研究, 把人们带进了原子领域。

19 世纪末, 经典物理学发展到了相当完善的程度, 人们纷纷认为物理学已经达到顶峰了, 以后只是把常数测得更准些, 向小数点后面推进而已。然而, 正是实验的新发现, 打破了当时沉闷的空气, 揭示了经典物理学的严重缺陷。19 世纪末的三大发现 (1895 年的 X 射线; 1896 年放射性的发现, 导致了放射性学的研究, 为原子核物理学做好必要的准备; 1897 年电子的发现, 打破了原子不可分的传统观念, 开辟了原子物理学的崭新领域) 开拓了新的研究领域, 把物理学推进了一个崭新阶段。

2) 检验理论, 判定理论的适用范围

我们强调实验的意义, 并不是否定理论的重要性。理论是物理学的主体, 这一点是不可置疑的。然而, 理论是否正确又必须经过实践的检验。例如, 1864 年麦克斯韦 (Maxwell) 的电磁场理论以一组简洁的数学方程揭示了电场和磁场内在的完美对称, 但在当时却难以令人信服。直到 1887 年, 他所预言的电磁波被赫兹 (Hertz) 的实验所证实, 他的学说才成为举世公认的电磁场理论的基础。

1905 年, 爱因斯坦用光量子假说总结了光的微粒说和波动说之间长期的争议, 并能很好地解释 1900 年勒纳德 (Lenard) 的光电效应实验, 但是直到 1916 年密立根 (Millikane) 以极其严格的实验全面证实了爱因斯坦的光电方程后, 光的粒子性才为人们所接受。还有, 1924 年德布罗意 (De Broglie) 的物质波假说, 也是在实验发现电子衍射后得到肯定的。

任何一个理论都有一个适用范围, 这个范围往往要靠实验来确定。例如, 玻意尔 (Boyle) 定律只适用于理想气体, 因为 1842 年, 勒诺尔 (Regnault) 的高气压实验证明, 当气体压强增大到一定程度以后, pV 值会偏离常数; 1922 年, 斯特恩 (Stern) 与盖拉赫 (Gerlach) 实验证实了空间量子化的假说, 但也揭示了经典理论应用到原子内部会遇到无法克服的矛盾; 热辐射的能量密度可以用经典理论计算, 但卢梅尔 (Lummer) 实验证明在高温长波方面理论与实验之间有系统偏差, 只有引进量子假说, 才能圆满地做出解释。

3) 测定常数

在物理学的发展中, 大量实验是围绕常数进行的。因为基本物理常数的测定和研究, 在物理学发展史中占有极其重要的地位。例如, 万有引力常数的确定, 自牛顿发现万有引力定律以来, 一直是人们力求测出或测准的对象, 这个常数究竟是不是常数、会不会随时间变化, 到现在还是物理学界关心的问题。焦耳测热功当量, 历时三四十年, 用了多种方法, 得到大量数据, 为热力学第一定律的建立提供了确凿的依据, 尽管这个常数已不列为基本常数, 但它的历史意义是不可抹杀的。光速是测得最准的基本常数之一, 人们不会忘记迈克尔逊 (Michelson) 的功劳, 真空中的光速可以测得这样准, 以至于被人们定成精确值, 并曾经定义为长度单位, 从而把时间单位和长度单位统一在光速这样一个基本物理常数上。

4) 推广应用, 开拓新领域

如果说蒸汽机的发展超前于热力学理论, 电机和电气工业的发展则完全是在电磁理论建

立之后,人们自觉运用理论做出的各种发现与发明。然后,不论是蒸汽机技术还是电工技术都离不开实验,其中包括许多的热学实验、物性学实验和电磁学实验及各种发明创造,如杜瓦瓶、制冷机、电灯、电报等,无不是经过大量实验研究才逐渐完善的。

进入 20 世纪,无线电电子学的异军突起,从电子管到晶体管,从无线电报到雷达,所有这些发明创造都是实验的产物。

这一切说明,只有实验才是物理学的基础,科学理论通过实验这一中间环节,不断地起着改造世界的作用,包括补充和改造科学理论自身。

在物理学的工作中,从事实验研究的占 90%以上,他们研究物理学的各个方面,从光谱学到激光技术,从电子显微镜到扫描隧道显微镜,从低温技术到超导研究,无疑凝聚了实验物理学家的心血。丁肇中教授在荣获诺贝尔物理学奖时,特意用中文发表了一封信,他写道:“自然科学理论不能离开实验的基础,特别是物理学是从实验中产生的……我希望由于我的这次获奖能够唤起发展中国家的学生们的兴趣,而注意实验工作的重要性。”

2. 物理实验课的目的

(1) 通过对物理实验现象的观察、分析和对物理量的测量,加深对物理概念和基本物理定律的认识和理解。

(2) 培养和提高学生的科学实验能力。这些能力是指:通过阅读教材和资料,能概括出实验原理和方法的要点;正确使用基本实验仪器,掌握基本物理量的测量方法和各种测量技术;正确记录和处理数据,判断和分析实验结果,撰写合格的实验报告,以及完成综合和简单的具有设计性内容的实验。

(3) 培养学生理论联系实际和实事求是的科学态度,严谨踏实的工作作风,勇于探索、坚忍不拔的钻研精神及遵守纪律、团结协作、爱护公物的优良品格。

3. 物理实验课的基本程序

做任何一个实验,都必须把握住课前预习、课堂实验和课后总结这三个重要环节。

1) 课前预习

预习至关重要,它决定实验能否做成功和取得收获的大小。预习包括阅读实验资料或操作手册等有关资料、熟悉仪器的功能和按要求写出预习报告。

认真阅读实验资料或操作手册等有关资料,主要解决以下三个问题。

(1) 做什么:这个实验最终要得到什么结论。

(2) 根据什么做:实验课题的理论依据(原理)和实验方法。

(3) 怎么做:实验步骤及实验关键。

预习报告用统一的预习实验报告纸按规定的格式要求书写,并且要求书写整齐、清晰。

2) 课堂实验

课堂实验是实验课的重要环节,学生进入实验室后应按下列要求进行实验。

(1) 认真听取实验教师对本实验的要求、重点、难点和注意事项的讲解;对照仪器仔细阅读有关仪器的使用说明和操作注意事项;进一步明确本实验的具体要求。

(2) 仪器或实验装置的调整。在力学、热学实验中,一些仪器使用前往往需要调至水平或垂直状态,如天平等。要注意测量仪器的零点,若仪器不能调零,则要记录仪器的零点值。电磁学实验中,在连接电路前,应考虑到仪器设备的合理摆放,电路连接好后,还要注意把仪器调节到“安全待测状态”,然后请教师检查,确定电路连接正确无误后方可接通电源进行

实验。光学实验的仪器调节尤其重要，它决定了实验能否顺利进行和测量结果是否精确、可靠，一定要细心调节仪器直至到实验所要求的状态。

(3) 观测。实验中必须仔细观察、积极思考、认真操作、防止急躁。要在实验所具备的客观条件（温度、湿度、压强、仪器精度等）下，进行认真的、实事求是的观察和测量。要初步学会分析实验，遇到问题时应冷静地分析和处理；仪器发生故障时，也要在实验教师的指导下学习排除故障的方法；在实验中有意识地培养自己主动动手能力和独立工作的能力。

(4) 记录。实验数据是计算实验结果和分析问题的依据，在实际工作中则是宝贵的资料。要把实验数据仔细地记录在预习报告中的数据表格中。记录时要用钢笔或圆珠笔，不要用铅笔。如确实记录错了，也不要涂改，应轻轻画上一道，在旁边写上正确值，使正确和错误数据都能清晰可辨，以供在分析此测量结果和误差时作为参考。切勿先将数据记录在草稿纸上，然后再誊写在表格内，这是一种不良的也是不科学的习惯。此外还可记录环境温度、湿度、压强等实验条件，以及仪器设备的型号规格与编号，记录实验现象等。

实验结束后，先将实验数据交与老师审阅，经教师同意后，然后再整理还原仪器，方可离开实验室。

3) 课后总结

实验后要对实验数据及时进行处理。如果原始数据删改较多，应加以整理，对重要的数据要重新列表。数据处理过程包括计算、作图、误差分析等。计算要有计算式（或计算举例），代入的数据都要有依据，便于别人看懂，也便于自己检查。作图要按作图的规则，图形要规矩、美观。数据处理后应给出实验结果。总之，在充分分析实验现象、理解实验原理的基础上，最后写出一份字体工整、文理通顺、图表规矩、结论明确的实验报告。逐步培养学生以书面的形式科学地分析总结实验结果的能力，这也是对大学生必须具备的报告工作成果能力的培养。

实验报告内容如下。

(1) 实验名称、学生姓名、实验日期。

(2) 实验目的。

(3) 实验仪器，包括规格型号。

(4) 实验原理。用自己的语言对实验所依据的理论作简要的概述，不要照抄书本，并附有必要的公式和原理图（包括电路图和光路图或实验装置示意图）。

(5) 实验内容（实验步骤）。根据实际的实验操作过程，写明关键步骤（包括观察了哪些物理现象、测量了哪些物理量、采用了哪些方法等）。

(6) 注意事项。

(7) 数据记录、数据处理。列表报告数据，完成计算、曲线图、不确定度计算或误差分析，最后表示出实验结果。

(8) 小结和讨论。内容不限，可以是对实验先行进行的分析或者是对实验关键问题的研究体会及实验的收获、解答实验思考题等，也可以是对实验本身的设想、实验仪器的改进等提出的建设性意见。

4. 物理实验课的制度

为了培养学生良好的实验素质和严谨的科学态度，保证实验的顺利进行和进一步提高教学质量特制定以下物理实验课的制度。

(1) 凡进行物理实验的学生, 实验前必须认真预习, 写出预习报告, 经教师检查同意后方可进行实验。

(2) 上课时不准迟到, 不准无故缺课。无正当理由迟到者实验成绩要扣分; 超过半小时者教师有权取消本次实验资格; 无故缺席者本次实验成绩记零分。

(3) 必须严格按照实验要求和仪器的操作规程, 积极认真地进行实验, 并做好相关实验记录。

(4) 爱护仪器设备。不得随意乱碰仪器, 不准擅自拆卸仪器; 仪器发生故障应立即报告实验教师, 不得自行处理; 如有人故意损坏仪器, 按规章赔偿。

(5) 实验进行时, 必须注意人身安全和实验设备的安全, 物理实验室内严禁吸烟、吐痰和大声喧哗。

(6) 做完实验, 学生将仪器整理还原, 将桌面和凳子收拾整齐, 经教师审查测量数据并签字后, 方可离开实验室。

(7) 实验报告应在实验后一周内独立完成并交给实验室的老师, 不得抄袭别人的结果。

5. 物理实验课成绩评定记分标准 (参考使用)

1) 上课准时 10 分

以上课铃声为准, 准时上课者记 10 分, 迟到者扣 10 分。

2) 预习报告 10 分

预习报告用统一的预习实验报告纸按规定的格式要求书写, 且书写整齐、完整、清晰、排版合理者, 记 10 分; 缺项者每缺一项扣 1~2 分。

3) 实验操作 40 分

(1) 按实验步骤和实验程序, 自觉完成实验且实验数据达到要求者, 记 40 分。

(2) 抄袭数据者扣 40 分。

(3) 实验过程中, 根据实验步骤和实验程序的规范程度及实验数据合乎要求的情况酌情记分。

(4) 粗心大意损坏仪器, 除按规定赔款外, 另扣 10 分。

4) 卫生纪律、仪器整理各 5 分

5) 实验报告 30 分

实验报告用统一的实验报告纸按格式要求书写, 实验数据按要求处理并有实验结果表示, 报告书写整洁、清晰、布局合理, 且附有预习报告和原始记录者, 可记 30 分。实验报告格式要求:

(1) 实验名称;

(2) 实验目的;

(3) 实验仪器, 包括规格型号;

(4) 实验原理, 简明扼要;

(5) 实验步骤;

(6) 注意事项;

(7) 数据记录及数据处理, 要给出明确的实验结果;

(8) 体会 (讨论或思考题)。

注: 没有数据处理、计算过程及最后结果表示的扣 10 分; 实验数据与原始数据不符扣 30 分。

— 第 1 章 —

测量误差、不确定度及数据处理的知识简介

1.1 测量误差

1.1.1 测量

1. 测量的定义

待测件与对应的预先选定的标准（仪器仪表）之间的比对过程称为测量。或者说是以确定某种量值为目的的一组操作称为测量。所得的比对值称为测量值，测量值必须包括数值和单位。

测量的过程就是把被测物理量与预先选定的计量标准单位的同类物理量进行比较的过程。预先选定的计量标准必须是国际公认的，唯一的、稳定不变的。

2. 直接测量和间接测量

测量又分为直接测量和间接测量。

1) 直接测量

能从预先选定的标准上直接读出的测量称为直接测量。例如，用游标卡尺测量长度、用天平称量质量、用电流表测量电流、用温度计测量温度等，都是直接测量。所得的测量量叫直接测量量。

2) 间接测量

有些测量，为了提高其测量精度或不能从预先选定的标准上直接测量，而只能是依照一定的函数关系，从与其相关的其他直接测量量通过数学运算而获得，这种测量称为间接测量。所得的测量量称为间接测量量。间接测量量可用如下关系式表示：

$$y = f(X_1, X_2, \dots, X_m) \quad (1-1)$$

式中： $X_1, X_2, \dots, X_m$ 为直接测量量； y 为间接测量量。例如，本教材实验一中测量圆柱体的体积 $V = SH = \frac{1}{4}\pi d^2 H$ ，这里直径 d 、高 H 是直接测量量， V 就是间接测量量。再如运动员奔跑的速度、子弹出膛时的动能等通常也是间接测量量。

直接测量是一切物理量的基础，间接测量依赖于直接测量。

根据测量次数又可分为单次测量和多次测量。对于在一定条件下迅速变化的物理量，这时就不能进行多次重复测量或有时不必太精确地测量，可进行单次测量。如果为了提高测量的准确度，在不改变物理条件的情况下要进行多次重复的测量，称为多次测量。

3. 等精度测量和不等精度测量

如对某一物理量进行多次重复测量,而且每次测量的条件都相同(同一测量者,同一组仪器,同一种实验方法,温度、湿度等环境也相同),没有任何依据可以判断某一次测量一定比其他次测量更准确,所以每次测量的精度只能认为是具有同等级别的,这样进行的重复测量称为等精度测量。在测量条件中,只要有一个条件发生了变化,这时所进行的测量就称为不等精度测量。

一般情况下,在进行多次重复测量时,要尽量保持等精度测量。

1.1.2 基本单位和导出单位及国际单位制

1. 基本单位和导出单位

不同的物理量各自有不同的物理单位,但是有些物理量不是互相独立的,它们是由许多基本的物理定义和物理规律联系起来的,因而在规定物理单位时,只需要规定少数几个物理量的单位,其他物理量的单位就可依据定义和物理规则推导出来。

独立定义的物理量的单位称为基本单位,相对应的物理量称为基本量;由基本单位推导出来的单位称为导出单位,对应的物理量称为导出量。国际单位制中确定了七个基本单位和两个辅助单位,其他单位可用这七个基本单位和两个辅助单位导出。

但是并非采用基本单位的物理量在一切情况下都是直接测量量,而导出单位一定是间接测量量。在实验中,它取决于所使用的测量设备及测量方法。如用速率表测汽车行驶的速度,这时所测得的速度就是直接测量量;而厚度 D 由 $D = A - B$ 获得就是间接测量量。

2. 国际单位制

在物理学的发展历程中,各个国家曾建立过各种不同的单位制,各个单位制规定的基本单位和基本量也各不相同,这样,在使用中常常会造成混乱,带来很多不便。1948年召开的第九届国际计量大会做出了决定,要求国际计量委员会创立一种简单而科学的、供所有米制公约组织成员国均能使用的实用单位制。1954年第十届国际计量大会决定采用米(m)、千克(kg)、秒(s)、安培(A)、开尔文(K)和坎德拉(cd)作为基本单位。1960年第十一届国际计量大会决定将以这六个单位为基本单位的实用计量单位制命名为“国际单位制”(International System of Units),并规定其符号为“SI”。1974年的第十四届国际计量大会又决定增加物质的量的单位摩尔(mol)作为基本单位。目前国际单位制共有七个基本单位,两个辅助单位,即弧度和球面度。

为了保证单位量值的统一,国际计量局设有复现单位标准的专门实验室,每个国家又都有自己的计量组织。任何企业生产的量具、仪器仪表都要经过计量单位的检验鉴定后方可出售使用,以保证量具能在规定的准确度标准下体现出量度单位。现在,我国已建立了与国际计量单位一致的米、秒、千克、开尔文、安培、坎德拉6个基本单位的基准,其中有的基准完成了实验基准向自然基准过渡的工作,如实现米的新定义的碘稳频 He-Ne 激光器,实现1990年国际温标中用的中、高温固定点即铂电阻温度计,还有绝对重力仪等,主要技术指标都达到国际先进水平,有的还处于国际领先地位。在开展国际量值比对中,我国的国际地位不断提高,计量科学技术水平在国际上的声誉和威望越来越高。在50多个物理量中,我国现已建立起142项国家基准和标准,并相应建立了各级计量技术监督部门、量值传递系统、管理制度和专门的计量队伍,我国的计量科学水平已步入世界先进行列。

1.1.3 测量误差

1. 绝对误差

某一物理量客观存在的大小称为真值。或者说,在某一时刻和某一位置或状态下,某量的效应体现出的客观值。这是国际通用的真值的定义。在一定条件下,任何一个物理量的大小都是客观存在的,是一个实实在在的、不以人的意志为转移的量值。

在测量过程中,我们总是希望准确地测得待测量的真值。但是,任何测量总是依据一定的理论和方法,使用一定的仪器设备,在一定的环境条件下,由一定的人员进行的。由于实验理论的近似性,实验仪器设备的灵敏度和分辨能力的局限性,实验环境的不稳定性和人的实验技能和判断能力的影响等,使测量值与待测量的真值之间总存在差异,我们把这种差异称为测量误差。其数学表达式为:

$$\varepsilon = L - A \quad (1-2)$$

式中: A 为真值; L 为测量值。上式所定义的测量误差反映了测量值偏离真值的大小和方向,因此又称 ε 为绝对误差。

被测的量通常是指被测量的真值,一般来说,真值仅是一个理想的概念,只有通过完善的测量才能获得。但是,严格意义上的完善测量是很难做到的,所以真值往往是不能确定的。在实际测量中,一般只能根据测量值来确定测量的最佳估计值,也就是取多次重复测量的平均值作为最佳估计值。但真值可知的情况有以下三种。

(1) 理论真值。

例如,平面三角形内角之和 180° ; 同一量值自身之差为零而自身之比为 1; 理想电容或电感上其电压与电流的相位差为 $\pi/2$; 此外,还有理想设计值和理想公式表达式等。

(2) 计量学约定的真值。

- ① 长度单位米 (m): 光在真空中 $(1/299\,792\,458)$ s 的时间间隔内所行进路径的长度。
- ② 质量单位千克 (kg): 等于国际千克原器的质量。
- ③ 时间单位秒 (s): 铯-133 原子基态的两个超精细能级之间跃迁所对应辐射的 $9\,192\,631\,770$ 个周期的持续时间。

④ 电流强度单位安培 (A): 在真空中,截面积可忽略的两根相距 1 m 的无限长平行圆直导线内通以等量恒定电流时,若导线间相互作用力在每米长度上为 2×10^{-7} N,则每根导线中的电流为 1 A。

⑤ 热力学温度开尔文 (K): 以绝对零度为最低温度,规定水的三相点的温度为 273.16 K, 1 K 定义为水三相点热力学温度的 $1/273.16$ 。

⑥ 物质的量单位摩尔 (mol): 是一系统的物质的量,该系统中所含的基本单元数与 0.012 kg 碳-12 的原子数目相等。在使用摩尔时,基本单元应指明,可以是原子、分子、离子、电子及其他粒子,或这些粒子的特定组合。

⑦ 光强度单位坎德拉 (cd): 频率为 540×10^{12} Hz (即波长 555 nm) 的单色光源每单位立体角 (1 个球面度) 辐射能为 $(1/683)$ W 时的发光强度。

凡是满足以上条件的量值都是真值。

(3) 标准器相对真值。

高一级标准器的误差与低一级标准器或普通计量仪器的误差相比为其1/5 (1/10~1/3) 时, 则可以认为前者是后者的相对真值。例如, 一个高稳定度的晶体管振荡器输出的频率相对于普通频率计的频率而言是真值、铂电阻温度计指示的温度相对于普通温度计指示的温度而言也是真值。

在测量中, 因为预先选定的标准(各类测量设备)并非十分完美, 不像想象中的那么理想; 测量方法的不同; 操作人员每次判断及操作人员之间判断上的差异; 再加上环境的变化, 不仅使标准产生变化, 待测件也会产生不断的变化, 因而使各测量值都有所起伏。这些都反映在误差之中, 所以说误差是不可避免的。误差不但不可避免, 而且由于一些实际条件无法完全掌握或控制, 因此误差也不能准确确定。实际上, 一般测量结果的误差是未知的, 这样真值也就无法完全准确确定了。

2. 相对误差

绝对误差可以表示某一测量结果的好坏, 但在比较不同的测量结果时则不适用, 需要用相对误差来表示。例如, 测量两个不同的物体长度, 用分度值为1 mm 的米尺测量一个物体的长度为: $L_1 = 51.4 \text{ mm}$, 绝对误差 $\varepsilon = 0.2 \text{ mm}$; 用分度值为0.01 mm 的米尺测量另一个物体的长度为: $L_2 = 0.235 \text{ mm}$, 绝对误差 $\varepsilon = 0.005 \text{ mm}$ 。初看起来, 绝对误差0.2 mm 远大于0.005 mm, 但我们不能说后者的测量精度高于前者, 而恰恰相反, 这时因为 L_1 的测量误差对51.4 mm 而言仅为0.4%, 而 L_2 的测量误差对0.235 mm 而言为2%。因此, 为了弥补绝对误差的不足, 引进相对误差 E_r , 根据所取的相对参考值的不同, 可分为:

(1) 实际相对误差 = [误差/真值] 的百分数, 即:

$$E_r = \frac{\varepsilon}{A} \times 100\% \quad (1-3)$$

(2) 标称相对误差 = [误差/测量值] 的百分数, 即:

$$E_r = \frac{\varepsilon}{X} \times 100\% \quad (1-4)$$

(3) 额定相对误差 = [误差/满刻度值] 的百分数, 即:

$$E_r = \frac{\varepsilon}{X_{\max}} \times 100\% \quad (1-5)$$

由于一般有 $\varepsilon \leq X$, $X \approx A$, 故前两种误差基本上没有区别, 但与额定相对误差可能相差较大。因为 $X \leq X_{\max}$, 则有:

$$\frac{\varepsilon}{A} \approx \frac{\varepsilon}{X} \approx \frac{\varepsilon}{X_{\max}}$$

一般电工仪表常以额定误差的大小来分级。如量程为150 mV 的0.5级电压表, 表示测量150 mV 电压以内的任何一个电压时最大的误差为0.75 mV。用这个电压表测量100 mV 电压时, 其相对误差 $E_r = \frac{0.75}{100} = \frac{0.5\% \times 150}{100} = 0.75\%$, 这是在使用电工仪表时必须要注意的。电子仪器和元器件一般用标称相对误差来表示, 如 $100\Omega \pm 5\%$ 等。对于电子仪器, 因受外部条件影响较大, 要求在使用时必须详细阅读使用说明书。

对于被测量有公认值或理论值的, 还可用“百分误差”来表示:

$$\text{百分误差} = \frac{\text{测量最佳值} - \text{公认值}}{\text{公认值}} \times 100\% \quad (1-6)$$

1.1.4 误差的分类

误差存在于一切科学实验和测量过程的始终。在实验的设计、仪器本身的精度、环境条件及实验数据处理中都可能存在误差,因此分析测量中可能产生的各种误差,尽可能消除其影响,并对最后结果中未能消除的误差做出估计,这是物理实验和许多科学实验中不可缺少的工作。为此,必须进一步研究误差的性质和来源。

误差按其性质和产生的原因可分为系统误差、随机误差和粗大误差三类。

1. 系统误差

在一定条件下,对同一物理量进行多次重复测量时,误差的大小和符号均保持不变,而当测量条件改变时,误差按某种确定的规律(如递增、递减、周期性等)变化,这类误差称为系统误差。

系统效应可分为定值系统效应、线性变值系统效应、正弦规律系统效应、复杂规律的系统效应。

在测量中,一些影响是不可预期或由随机的时空变化引起的效应,这种效应称为偶然效应。偶然效应导致的误差称为偶然误差,可通过增加测量次数来降低,测量次数也不能无限地增多,一般情况下,测量次数不超过 10 次,这时因为测量次数过多很难保证测量条件恒定,而且还可能带来其他的不确定因素对测量值的影响。

2. 随机误差

在测量过程中,即使系统误差消除以后,在相同条件下重复测量同一物理量时,仍然不会得到完全相同的结果,其测量值分散在一定范围内,所得误差时正时负,绝对值时大时小,既不能预测也无法控制,呈现无规则的起伏。这类误差称为随机误差。

随机误差的产生,一方面是由测量过程中一些随机未能控制的可变因素或不确定的因素引起的。例如,人的感官灵敏度及仪器精度的限制,使平衡点确定不准或估读数有起伏;由于周围环境影响而导致读数的微小变化,以及随测量而来的其他不可预测的随机因素的影响等。另一方面是由被测对象本身的不稳定性引起的,如加工零件或被测样品本身存在微小差异,这时被测量量就没有明确的定义,这就是引起随机误差的原因。

随机误差就个体而言,是不稳定的,但就总体服从一定的统计规律,因此可以用统计的方法估算其对测量结果的影响。

3. 粗大误差

明显地歪曲了测量结果的误差称为粗大误差。它是由于实验者使用的仪器的方法不正确,粗心大意引起的读错、记错、算错,测量数据或实验条件突变等原因造成的。在实验测量中,含有粗大误差的测量值称为坏值或异常值,这样的实验值应在数据处理中剔除掉,同时要极力避免过失错误。

1.1.5 系统误差和随机误差

1. 系统误差

在许多情况下,系统误差常常表现不明显,然而它却是影响测量结果精度的主要因素,有些系统误差会给实验结果带来严重的影响。因此发现系统误差,设法修正、减小或消除它的影响,是误差分析的一个很重要的内容。由于系统误差的处理是较深的知识,这里只做简单介绍。

1) 系统误差的来源

(1) 仪器的结构和标准不完善或使用不当引起的误差。如天平不等臂、分光计读数装置的偏心差、电表的示值与实际值不符等属于仪器缺陷会引起误差,在使用时可采取适当测量方法加以消除。仪器设备安装调试不当,不能满足规定的使用状态,如不水平、不垂直、零点不准等使用不当的情况会引起误差,应尽量避免。

(2) 理论或方法误差。它是由测量所依据的理论公式或实验条件达不到理论公式所规定的要求等引起的。如单摆测重力加速度所用的公式的近似性;伏安法测电阻时,不考虑电表内阻的影响等。

(3) 环境误差。它是由于外部环境如温度、湿度、压强等与仪器设备的要求不符而引起的误差。

(4) 实验人员的工作经验及生理或心理特点所造成的误差。如人的视力、分辨率不同,读数时的位置不标准等。

2) 系统误差的消除与修正

任何实验仪器、理论模型、实验条件都不可能十分理想,达不到不产生误差的程度。对于系统误差,一是进行修正,二是消除影响。

(1) 如果能找出产生系统误差的根源,无论是理想模型、实验仪器还是实验条件,都可以使其更完善,从而减小系统误差的影响。

(2) 用标准仪器对测量仪器进行校准,找出修正曲线,对测量结果进行修正。对由于理论公式的近似造成的误差,找出修正值进行修正。

3) 选择适当的测量方法,减小和消除系统误差

(1) 交换法。在测量过程中,对某些条件进行交换,使产生系统误差的原因对测量结果起相反的作用。

(2) 替换法。保持测量条件不变,选择一个大小适当的已知量替代被测量而不引起测量仪器示值的改变,则被测未知量就等于这个已知量。由于在替代的两次测量中,测量仪器的状态和示值都相同,从而消除了测量过程带来的系统误差。

(3) 抵消法。改变测量中的某些条件进行两次测量,使两次测量中误差的大小相等、符号相反,取其平均值作为测量结果以消除系统误差。

此外,“等时距对称观测法”可消除按线性规律变化的变值系统误差;“半周期偶数测量法”可消除按周期性变化的变值系统误差。

对于初学者,不可能一下就把系统误差问题搞清楚。本课程只要求对系统误差有一个初步的了解,并在一些实验中使用一些消除系统误差的方法。

2. 随机误差

1) 随机误差的分布

大多数随机误差服从正态分布(高斯分布)规律。下面简要介绍正态分布的特点及特性参数。

标准化的正态分布曲线如图1-1所示。图中,横坐标表示某一物理量的测量值;纵坐标表示测量值的概率密度 $f(x)$ 。

总体平均值为:

$$m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$