



大学物理实验

浦天舒
郭 英 等 编著
李 博
钟宏杰 主审

清华大学出版社

大学物理实验

浦天舒 郭英 李博 等 编著
钟宏杰 主审

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书是东华大学理学院物理系为理工科各专业开设的大学基础物理实验课程的教材。主要内容为测量误差与不确定度评定的基本知识,30个涵盖力学、热学、电磁学、光学和近代物理的基本实验和18个以近代物理和技术物理为主的选做实验。其中许多实验还含有“实验拓展”或“提高要求”部分。附录中有基本物理常数表和国际单位制的介绍。

本书可作为物理或非物理类专业的大学基础物理实验课程的教材和参考书,也可作为各专业学生开展课外科技活动的参考书。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验/浦天舒等编著. —北京:清华大学出版社,2011.1

ISBN 978-7-302-24072-3

I. ①大… II. ①浦… III. ①物理学—实验—高等学校—教材 IV. ①O4-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第221949号

责任编辑:邹开颜 赵从棉

责任校对:赵丽敏

责任印制:何 芊

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦A座

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

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 刷 者:北京季蜂印刷有限公司

装 订 者:三河市李旗庄少明装订厂

经 销:全国新华书店

开 本:185×260

印 张:21.5

字 数:516千字

版 次:2011年1月第1版

印 次:2011年1月第1次印刷

印 数:1~4000

定 价:36.00元

产品编号:037037-01

前言

Foreword

随着物理学在其他各学科中的迅速渗透和广泛应用,以及各高校在大学基础实验室仪器设备等方面投入的增长,大学基础物理实验的内容日益广泛,要求日益提高,因此实验的教学内容、教学模式包括教材的编写,也都不得不适应这种变化。

例如,近年来由于仪器设备的增加和实验项目的增多,我校(东华大学)增开了不少以近代物理实验和技术性物理实验为主的选做物理实验来开阔学生的眼界,并且在物理学科的专业实验室和大学物理课程的演示实验室建设等方面取得了一定成果。本书是以原有教材《大学物理实验》(浦天舒、张铮扬、沈亚平等编)和由施芸城等编的《大学物理选做实验》讲义为基础经重新整合而编写的。根据我校的课时安排,为了教学上的灵活性和可操作性,本书把实验分成了基本实验和选做实验。基本实验包括力学、热学、电磁学、光学和近代物理实验,已基本上可以满足一般的教学要求;选做实验则以近代物理实验和技术性物理实验为主,在教学上我们是让学生按自己的兴趣选做。同时,我们也对所有实验内容进行了优化组合。首先,在数据处理方面,现编教材以由国际权威组织制定的《测量不确定度指南》为标准来阐述不确定度的评定,使之与国际接轨(但省略了一些数学公式的证明);其次,也是本书最主要的特点,是许多实验都含有“实验拓展”或“提高要求”部分,它们都是前面实验内容的延伸和拓展,但一般不需或只需增添少量仪器,这样既可使教学内容更完整,又可避免做实验时就事论事、只知其一不知其二的弊端。例如,对一些特殊的数据处理方法,如不等精度测量、非线性最小二乘法、不确定度的B类评定等,便作为一些实验的“提高要求”;又如“不平衡电桥”、“电流表内阻测量”分别作为“电桥及其应用”、“电表改装”实验的拓展等。“实验拓展”部分一般都具有一定的相对独立性,既能针对不同专业取舍,也可给学生的课外活动提供选择参考。我们是通过这样的安排能让学生认识到,物理学绝不是一门纯理论的科学,而是各门科学技术和工程实际的重要基础。对于学有余力的学生或对某个实验感兴趣的学生,可让他们选做实验的提高要求部分或参加课外科技活动选做一些近代物理实验和技术性物理实验的内容,尽可能满足其求知需求,以适应当今对学生的个性化教育的需要和学生的个性发展。

本书由浦天舒主编并统稿,钟宏杰教授主审,参加编写的有郭英、李博、杨沁玉、杨旭方等老师,另外,还要感谢提供有益建议的李林、丁可、许毓敏等老师以及所有原教材或讲义的编写者。由于条件限制,也限于水平,加之时间紧,编写工作量大,作为基础实验教材不可能包罗万象,许多教学成果(如大学生创新实验项目等)也未能反映,难免挂一漏万,其中的错误之处敬请使用者和读者指正。

编者
2010.7

目 录

Contents

绪论	1
一、物理实验课的地位和作用	1
二、物理实验课的基本程序	1
三、适用于所有实验的注意事项	3
第 1 章 测量误差与不确定度评定及实验数据处理	4
1.1 测量及误差	4
1.1.1 测量的基本概念	4
1.1.2 测量误差的基本概念	5
1.1.3 随机变量统计规律的表述	10
1.1.4 正态分布随机误差的统计规律及其表述	14
1.2 实验不确定度的评定	16
1.2.1 不确定度的由来	16
1.2.2 不确定度的概念及表征参数	17
1.2.3 不确定度的估计	18
1.2.4 标准不确定度的合成与传递	22
1.3 有效数字及测量结果的表示	28
1.3.1 有效数字的概念	28
1.3.2 数值的修约规则	29
1.3.3 实验数据的有效位数确定	29
1.4 列表、作图之要点及组合测量与最佳直线参数	31
1.4.1 列表法	32
1.4.2 作图法和图解法	32
1.4.3 最小二乘法和线性拟合	33
思考题	36
误差与有效数字练习题	36
附录 1 t 因子	37
附录 2 常用函数的标准偏差或不确定度传递公式	37
附录 3 仪器准确度、仪器误差、分度值和鉴别力阈	39
参考文献	47

第 2 章 基本实验	48
实验 1 长度测量	48
实验 2 物体密度的测量	53
附录 1 标准大气压下不同温度的水的密度($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	57
附录 2 计算公式及误差分析	58
实验 3 用三线摆测转动惯量	59
附录 电子秒表的使用	64
实验 4 用拉伸法测量金属丝的杨氏弹性模量	65
附录 1 几种材料的杨氏弹性模量	70
附录 2 逐差法	70
实验拓展: 用 CCD 成像系统测定杨氏模量	71
实验 5 电路连接练习及万用表的使用	73
实验拓展: 伏安法测电阻的研究	81
实验 6 电桥及其应用	84
附录 误差分析	89
实验拓展: 电阻温度计与不平衡电桥	90
实验 7 示波器的使用	92
实验拓展: 组装整流器	104
实验 8 分光计的调节和使用	105
附录 三棱镜折射率及顶角与最小偏向角的关系	111
实验 9 汞光谱波长的测量	112
附录 FGY-01 分光仪角度读数方法	117
实验 10 氢原子光谱的测量及里德伯恒量的实验证明	117
附录 1 氢光谱线系能级图	122
附录 2 常用光源的谱线波长表	122
实验 11 灵敏电流计特性的研究	123
实验 12 用电位差计校正电压表	128
实验 13 碰撞打靶实验	133
实验 14 灯丝电阻与其端电压关系的研究	135
实验拓展: 研究光电二极管的光电特性	136
实验 15 薄透镜焦距的测量	138
实验 16 利用驻波测定弦线中的波速	145
实验拓展: 验证波长与弦线张力、波源振动频率的关系	149
实验 17 铁磁材料动态磁滞回线和基本磁化曲线的测量	151
实验 18 光的干涉和应用	159
实验 19 显微镜与望远镜放大率的测量	164
附录 消视差	171
实验 20 半导体的霍尔系数与电导率	171
实验 21 金属电子逸出功的测定	177

附录 WF 型系列金属电子逸出功测定仪介绍	182
实验拓展: 验证二分之三次方定律及求电子的荷质比	183
实验 22 电表改装	184
实验拓展: 测量电流表的内阻	188
附录 设计方案参考	189
实验 23 液体表面张力系数的测定	190
实验 24 纺织品介电常数的测定	198
附录 有关本实验的一些说明	204
实验 25 转动惯量的动力学测量法	205
附录 HMS-2 型通用电脑式毫秒计使用说明	210
实验 26 动力学法测定弹性模量	211
附录 1 式 $E=1.6067 \frac{l^3 m}{d^4} f^2$ 的推导	213
附录 2 讨论	215
附录 3 YM—2 型信号发生器和 CY—2 型功率函数信号发生器	216
实验 27 声速的测定	217
实验 28 密立根油滴实验——电子电荷的测定	222
实验 29 迈克尔逊干涉仪	228
实验拓展: 测定钠 D 线两波长的波长差	232
实验 30 激光全息照相	233
第 3 章 选做实验	238
实验 31 扭摆法测量材料的切变模量	238
实验拓展: 根据所测琴钢丝的切变模量测定物体的转动惯量	243
实验 32 玻尔共振实验	243
附录 1 ZKY-BG 型玻尔共振仪调整方法	252
附录 2 简单故障排除	252
实验 33 液体粘滞系数的测量	253
实验 34 气体比热容比测量	256
附录 仪器操作	258
实验 35 空气热机实验	258
附录 1 仪器介绍	262
附录 2 空气热机实验仪的维护	265
实验 36 冷却法测量金属的比热容	265
附录 铜-康铜热电偶分度表	268
实验 37 稳态法测量不良导体的导热系数	269
实验 38 金属线膨胀系数的测量	272
实验 39 半导体热电特性实验	274
实验 40 利用虚拟仪器技术测量发光二极管的伏安特性	276
附录 电流表的内接和外接	278

实验 41	数字电表原理及应用技术实验	278
实验 42	音频信号光纤传输技术实验	285
实验 43	CCD 器件的特性研究及应用	292
实验 44	偏振光的研究和检测	299
实验 45	声光衍射与液体中声速的测定	303
实验 46	光学信号的空间频谱与空间滤波	307
实验 47	夫兰克-赫兹实验	312
实验 48	核磁共振	315
总附录 A 理工科类大学物理实验课程教学基本要求		327
总附录 B 附表		330
附表 B.1	常用基本物理常数表(CODATA2006 年推荐值)	330
附表 B.2	国际单位制的基本单位	331
附表 B.3	国际单位制的两个辅助单位	332
附表 B.4	国际单位制中 21 个具有专门名称的导出单位	332
附表 B.5	中华人民共和国法定计量单位	332

绪 论

一、物理实验课的地位和作用

物理学从本质上说是一门实验科学。300 多年前,伽利略和牛顿等学者,以科学实验方法研究自然规律,逐渐形成了一门物理科学。物理学的发展及物理学史上许多关键问题的解决,最后都诉诸实验。例如,杨氏的光干涉实验证实了光的波动说;迈克耳逊-莫雷实验证实了以太不存在;赫兹实验证实了麦克斯韦的电磁场理论。而近代物理学的重大突破,更离不开科学实验这个环节的研究结果。

随着科学技术的发展,物理学实验越做越精确,越做范围越广,它可以验证更深一层的理论,推动理论研究的发展;它可以启示新科学思想,提供新的科学方法;它用精确的定量数据辨明各类事物的细微差异;它证明了一定的假设并使假设转化为理论;它指出理论可靠性和适用的范围。近代科学的历史表明,物理学领域内的所有研究成果都是理论和实验密切结合的结晶。

作为一门独立课程的物理实验课,是学生进入大学后受到系统的实验技能训练的开端,是后继课程的基础。本课程教学的主要目的如下。

(1) 通过课程的学习,使学生受到基本物理概念、基本物理实验方法、基本物理实验技能方面的基本训练;使学生逐步具备运用物理概念、物理方法进行科学实验的能力。

(2) 培养和提高从事科学实验的素质。包括:理论联系实际和实事求是的科学作风;严格的操作规程,严肃认真的工作态度;不怕困难,主动进取的探索精神;遵守纪律,爱护公共财物的优良品德。

科学的发展、新产品的开发、新工艺的使用都离不开基础训练。作为德、智、体全面发展的工程科学技术人才,不仅要有深广的理论知识,而且必须有现代科学的实验能力,才能适应现代社会的需求。

二、物理实验课的基本程序

在指导教师的指导下,学生在物理实验课中要充分发挥独立性和主动性。整个实验过程一般分为三个阶段。

(一) 实验的预习

实验预习是实验课的重要环节。

预习要求理解实验的目的和原理,弄清重要的物理概念和公式,了解实验的具体过程,抓住实验操作的关键,在此基础上写出预习报告。

预习报告的内容主要有：一、实验名称；二、实验目的；三、所用的仪器设备（一般应写出型号）；四、简要原理和计算公式，电学实验必须画出电路图，光学实验必须画出光路图，其他实验应画出仪器装置简图；五、实验步骤；六、实验数据表格。

未作预习和预习报告的学生在补作之前均不能进入实验的第二阶段。

（二）实验的操作和记录

实验进行前要先要熟悉仪器，了解仪器工作的原理和操作方法，考虑仪器的合理布局，然后将仪器安置调节好。

使用电学仪器还应注意用电安全，须经教师检查后才能接通电源。实验过程中要养成良好的记录实验数据（现象）习惯：根据仪器最小刻度单位或精度等级准确读数，原始数据不能随意修改。原始数据须记录在实验笔记本或预习报告上，还应根据不同实验的需要记下实验时间、地点、合作者、室温、气压、使用的仪器编号及实验过程中发现的问题。

实验记录是做实验的重要组成部分，必须在实验记录本中记录所做的一切。每个实验的记录都应从新的一页开始。它应包括 5 个主要部分：

- （1）实验标题和日期；
- （2）观测数据；
- （3）计算；
- （4）实验方法的有关说明，必要时可画出图表，做电学实验要画出电路图；
- （5）实验结果，包括标准不确定度。

下面我们依次说明这 5 个部分。

（1）标题应就实验目的作简明的叙述，间或指明所用方法。必须写上实验日期。

（2）得到观测数据后，立即用钢笔记在记录本上。这一点很重要。绝不能用零散纸张和铅笔，理由如下。

- ① 那样做很浪费时间，因为所有观测数据最终要记到固定的记录本中。
- ② 那样做显得潦草，可能导致混乱。

③ 那样做可能导致不科学的工作方法。因为它使你有机会为了要“得到正确的答案”——不管其含义如何，而去选用你认为较优的某些数据，舍弃你认为较差的某些数据——而不阐述取舍的理由。要记住，不存在什么“正确答案”，通常在教材和资料中引用的重要物理量的公认值，是由许多有经验的实验工作者反复测定的。把你的实验结果与公认值作比较，无疑是有意义的。但是，如果你的结果和它“完全一致”，那多半是碰巧而不是你的高明，应该考虑你的实验结果的标准不确定度，从而弄清公认值是否在你得到的结果的标准不确定度之内。

发现数据记错，不要涂掉原数据，而是用斜线划掉原数据，再在旁边写上正确数据。养成如实记录数据的好习惯。

记录中不要遗漏每个观测数据的误差范围，也不要忘记标明所用的单位。

教材中有不少作为实例的表格可供参考，可以根据实际情况适当地修改表格。

（3）简洁明了地表述计算过程，以便必要时无须解释就能验算。不要混淆观测值和计算值。如果在同一表格中同时要列入观测值和计算值的话，务必将它们分清。

（4）只有在完成实验之后方能写出在实验中遇到的困难和其他现象，以及克服这些困难的方法；观测数据要及时记录下来，而计算值紧随其后；实验中观察到不寻常的现象时，最

好及时记录下来,若一时无法解决,可供以后分析讨论。

画出图表,往往可以使叙述比较简短而清晰。但图表不等于图画,好的图表都是简单的,即图中只画出为说明问题所必要的直线或曲线,并用必要的标号加以阐明。

(5) 结论中应包括下列内容:

① 解释得到的曲线;

② 叙述实验结果,给出其数据、标准不确定度和所用单位,特别注意给出的应当是有效数字;

③ 在测定任何普适常数的实验中,要给出它的公认值,并注明这些公认值引自什么资料;

④ 评论②与③之间的差异,并提出改进实验技术的建议。

如未能完成实验,应写出中止实验的理由。

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。

(三) 写实验报告

书写实验报告是对该次实验的全面总结,也是为在今后实际工作中书写科研论文和工作报告打好基础。

实验报告要求字迹端正、文字通顺,数据表格和实验结果完整清晰、结论正确。还要有对该实验的分析。

完整的实验报告通常包括以下几个部分:

一、实验名称;二、实验目的;三、仪器;四、简要原理和计算公式(电学实验必须画出电路图,光学实验必须画出光路图,其他实验应画出仪器装置简图);五、实验步骤;六、实验数据表格;七、主要计算过程(包括误差计算)和作图(如波形图、各种关系图、曲线图等);八、实验结果;九、小结或讨论(内容不限,可以是实验中现象的分析,对实验关键问题的研究体会,实验的收获和建议,也可以解答思考题)。(以上一至六点为预习报告的内容)

实验报告一般应在实验进行后立即完成,在下次实验前交指导教师批阅。没有按要求完成的,教师可以要求学生退回补做。

三、适用于所有实验的注意事项

仔细阅读实验标题,准确理解它的意思。教材中有的地方提示一些理论要点,但不作系统完整的讨论。如果你不熟悉实验涉及的理论知识,我们设想你在做实验之前会设法去掌握它。

阅读实验指导全文,对需要做的事情、需要注意的事项及需要作的记录,都能做到“心中有数”。

检查要用的仪器,如果有疑问应请教老师。

按给定的实验步骤进行实验操作。但要记住,实验教材并不是为不了解整个实验、只会盲目机械地从一个操作到下一个操作的人写的。

把观察到的一切数据记在实验记录本上。

做完实验后,把仪器物品放回原处。

第1章

测量误差与不确定度评定及 实验数据处理

实验是在理论思想指导下,利用科学仪器设备,人为地控制或模拟自然现象,使它以比较纯粹和典型的形式表现出来,然后再通过观察与测量去探索自然界客观规律的过程。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达的。由于自然条件错综复杂,变化多端,即使在实验室中作了充分控制也难免不受影响。所以,观察与测量也不会永远是在理想化的条件下进行,所谓“完善的测量”是做不到的。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的、正确的、有效的处理,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;否则,测量数据就会毫无价值。所以数据处理是物理实验中的一项极其重要的工作。不确定度评定是数据处理工作的核心。

1.1 测量及误差

1.1.1 测量的基本概念

1. 量、测量和单位

任何现象或实体都以量来表征,量具有对现象和实体作定性区别或定量确定的特征。定量就需要进行测量。测量是通过实验方法(包括所用的测量方法、测量仪器)为确定客观事物(被测对象)的测量值而取得定量数据的过程。为确定被测对象的测量值,首先要选定一个单位即标准量,然后将被测对象与这个标准量进行比较,比较的结果给出被测量是测量单位的若干倍或几分之几,这一比值即为反映被测量值的数字。显然,数字的大小与选用的单位有关,在表示一个被测对象的测量值时必须包含数值和单位两个部分。

测量过程中,测量单位必须以物质形式体现出来,这就需要标准器具和仪器。

为保证量值准确统一,对基本量建立了相应的基准,由基准给出量值单位的真值(或约定真值)。为满足不同精度的测量要求,需要建立量值的传递系统。实现量值的逐级传递需要一定的测量器具和测量方法,并有相应的精度要求。

目前,在物理学上各物理量的单位,都采用中华人民共和国法定计量单位,它是以国际单位制(SI)为基础的单位。国际单位制是在1971年第14届国际计量大会上确定的,它是以米(长度)、千克(质量)、秒(时间)、安培(电流强度)、开尔文(热力学温度)、摩尔(物质的量)和坎德拉(发光强度)作为基本单位,称为国际单位制的基本单位;其他量(如力、能量、电

压、磁感应强度等)的单位均可由这些基本单位导出,称为国际单位制的导出单位。

2. 测量方法及其分类

对不同的被测量和不同的测量要求,需要采用不同的测量方法。这里,测量方法是泛指测量中所涉及的测量原理、测量方式、测量系统及测量环境条件等诸项测量环节的总和。测量中这些环节的一系列误差因素都会使测量结果偏离真实值而产生一定的误差。因此,对测量过程诸环节的分析研究是测量数据处理及其精度估计的基础。

按不同的原则,可对测量方法进行不同形式的分类。按照对实验数据处理方式的不同,在基础物理实验中可把测量方法归并为直接测量和间接测量两大类。

(1) 直接测量

直接测量是将被测量与作为标准的量直接进行比较,或者用经标准量标定了的或事先刻度好的仪器对被测量进行测量,从而直接获得被测量值。例如,用尺子测量长度、用温度计测量温度、用电流表测量电流就可分别直接得到长度、温度、电流值。

(2) 间接测量

间接测量是指直接测量与被测量有确定函数关系的其他量,然后按这一函数关系间接地获得被测量值的方法。例如,为测量圆的面积 S ,可直接测量其直径 d ,然后根据函数关系 $S=\pi d^2/4$ 求得面积。又如,用伏安法测电阻,就是利用电压表和电流表分别测量出电阻两端的电压和通过该电阻的电流,然后根据欧姆定律计算出被测电阻的大小。

1.1.2 测量误差的基本概念

1. 测量的绝对误差

人们在进行各种实验时,所获得的实验结果往往以相应数据的形式反映出来。例如,天文观测、大地测量、标准量值的传递、机械零件加工、仪器的装调、实弹射击、导弹发射等,这些实验结果给出相应的实验数据。

实验给出的某个量值的实验数据总不会与该量值的理论期望值完全相同,因此称实验或实验数据存在误差,即实验误差。在测量工作中,对某个量进行测量时,该量的客观真值(客观上的实际值)是测量的期望值,测量所得数据与其差值即为测量误差。更具体地说,测量误差 δ 定义为被测量的测得值 X_k (此处下标 k 表示第 k 次测量)与其相应的真值 a 之差。即

$$\delta = X_k - a \quad (1)$$

上述定义是误差的基本表达形式。为区别于相对误差(见下一小节),上述定义的误差也称绝对误差。以下如不特别指明,测量误差均指绝对误差。

这里“测得值”是由测量所得的赋予被测量的值。若此值是示值(由测量仪器提供的被测量的值),则测得值是示值;若此值是被测量的若干个观测值(observation)的(算术)平均值,则测得值是平均值。它既可以是直接测量的结果,也可以是间接测量的结果。完整地阐述测量结果应包括测量的不确定度。不确定度是测量准确度的表征。它表示由于存在测量误差而使被测量值不能肯定的程度。根据误差理论提供的依据,可对测量的不确定度作出估计。

这里的“真值”是指被测量的客观真实值,它是在研究某量时所处的条件下通过完善的测量所得到或确定的量值,或者说是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。由于要做到“完善的测量”是极其困难的,所以在大多数场合被测量的(真)值是未知的,(量的)真值是理想概念。事实上,量子效应排除唯一真值的存在。只有下述几种情况,被测量的(真)值是可行的。

(1) 理论真值

例如,平面三角形内角之和恒为 180° ,同一量值自身之差为 0 而自身之比为 1。

(2) 计量学的约定真值

例如,长度单位 1 m 是光在真空中在 $1/299\,792\,458\text{ s}$ 时间间隔内所行进的路程。光速的数值及不确定度在历史上有过几次变动,但随着科学技术的进步,总的趋势是逐步逼近真值的。在 1975 年第 15 届国际计量大会上,光速的推荐值是 $299\,792\,458\text{ m/s}$,其(标准)不确定度为 $\pm 4 \times 10^{-9}\text{ m/s}$ 。长度单位 1 m 是计量学的一种约定真值。常数委员会 1986 年推荐的阿伏伽德罗常数 $6.022\,136\,7 \times 10^{23}\text{ mol}^{-1}$,其标准不确定度为 $\pm 0.000\,003\,6 \times 10^{23}\text{ mol}^{-1}$,也是计量学的约定真值。约定真值都具有一定的不确定度,但就所要达到的目的而言,其本身的不确定度可以忽略不计。

(3) 标准器具的约定真值

此约定真值指在给定地点,由参考标准(即具有所能得到的最高计量特性的计量标准)复现的量值。例如,作为参考标准的标准砝码、标准物质、标准测量仪器等在其证书中所给出的值,市场上公平秤给出的值也作为市场上的约定真值。

有时,可通过某种手段获得真值的近似值,当这一近似值与真值的差值在实际问题中可以忽略不计时,就可以用这一近似值代替真值,从而计算出测量误差。此时称这一近似值为相对真值。

在相当长的时间里,测量的准确度用误差表示,应该说误差具有清晰的概念,它已被大众广泛接受。但是由于被测量的(真)值在大多数情况下是未知的,这就使得用误差来表示测量结果的准确度遇到了困难。过去也把如前述的光速和阿伏伽德罗常数的不确定度 $\pm 4 \times 10^{-9}\text{ m/s}$ 和 $\pm 0.000\,003\,6 \times 10^{23}\text{ mol}^{-1}$ 叫做误差,实际上它们并不是误差的具体值,而是给出的一个数值区间,即给出了以“ $\pm$ ”号前面的数值为中心,以“ $\pm$ ”号后面的数值为区间的范围,而实际值(或被测量的真值)则(以一定的概率)落在此区间内。为了避免造成概念上的混乱,人们提出了不确定度的概念,凡是用区间(“ $\pm$ ”号)并以一定的概率(称为置信概率,用 P 表示)给出的误差指标称为不确定度。这个概念已为国际上所采用。

2. 测量的相对误差

误差按其表示方式,可分为(绝对)误差和相对误差,两者都是代数量,可正可负。相对误差是(绝对)误差与被测量的(真)值之比,即

$$\delta_R = \delta/a \quad (2)$$

相对误差通常以百分数(%)表示,习惯上把被测量有准确真值或有准确公认值和理论值时的相对误差称为百分误差。由于 a 在大多数场合是未知的,而测得值的绝对误差通常很小,因此,在相对误差的表示中,往往以测得值代替被测量的(真)值,即

$$\delta_R = \delta/X_k \quad (3)$$

用相对误差能确切地反映测量效果,被测量的量值大小不同,允许的测量误差也应有所不同。被测量的量值越小,允许的测量绝对误差值也应越小。引入相对误差的概念就能很好地反映这一差别。例如,有两个测量结果: $X_{\text{甲}} = (1.00 \pm 0.01)\text{ cm}$, $X_{\text{乙}} = (10.00 \pm 0.01)\text{ cm}$,虽然

绝对误差(不确定度)均为 0.01 cm,但由于被测量量值的大小不同,显然后者的测量效果优于前者。

仪器的引用误差属于相对误差的一种,引用误差定义为

$$\text{引用误差} = \frac{\text{示值误差}}{\text{引用值}} \times 100\% \quad (4)$$

式中引用值通常指全量程值(或量程上限),必要时参阅仪器说明书;示值误差常用误差绝对值表示。我国的电工仪表等大多数采用引用误差,分为 0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5 和 5.0 等级别。若仪表为 1.5 级,说明合格仪表最大允许引用误差为 1.5%。如果仪表的量程为 $0 \sim X_F$,仪表示值为 X_k ,则该仪表在 X_k 邻近的示值误差绝对值(亦称极限误差或误差限或不确定度限) $\leq X_F \times 1.5\%$,或者说示值误差绝对值的相对误差 $\leq \frac{X_F}{X_k} \times 1.5\%$ 。一般情况下, $X_k \leq X_F$,故当 X_k 越接近 X_F ,相对误差越小,反之则相对误差较大。我们使用这类仪表测量时,测量值应尽可能在所选仪表的上限值邻近或 $2/3$ 量程值以上。

例 1 经检定发现,量程为 250 V 的 2.5 级电压表在 123 V 处的示值误差最大,为 5 V(指与标准表比较)。问该电压表是否合格?

解 按电压表精度等级的规定,2.5 级表的最大允许引用误差应为 2.5%。而该电压表的最大引用误差为

$$q = \frac{5}{250} \times 100\% = 2\%$$

因最大引用误差小于最大允许引用误差,故该电压表合格。

3. 误差按其性质的分类

从不同的角度出发,可对测量误差作出种种区分。如按照测量误差的表示方式可将其分为绝对误差和相对误差;按照测量误差的来源可将其区分为装置误差、环境误差、方法误差、人员误差等;按照对测量误差的掌握程度,可将其区分为已知的误差和未知的误差;按照测量误差的特征规律,可将其区分为随机误差和系统误差两大类。

还有一类误差,由于外界干扰、操作读数失误等原因而明显超出规定条件下的预期值,以前称为粗大误差。包含粗大误差的测得值或粗大误差称为异常值(outlier)。测量要避免出现高度显著的异常值,已被谨慎确定为异常值的个别数据要剔除。

(1) 随机误差

在重复条件下,对同一被测量实行多次测量时,每个观测值或测量结果 X_k 通常会有所不同。可以推测这是由于对测量结果有影响的量发生不可预测的或随机的时空变化造成的(有时这也源于被测量定义的不完整),例如,测量时周围温度的微小变化,外界环境造成的微弱振动,局部的空气湍流,电网电压、频率的小量起伏等。这使得测量结果在测量前不可预知,事实上有无穷多个随机取值,可表示为随机变量 X 。对于随机变量,可以定义它的数学期望(均值):

$$E(X) = \mu \quad (5)$$

有关随机变量及数学期望的概念见 1.1.3 节。

随机误差 δ_r 定义为测量结果 X_k 减去在重复条件下对同一被测量实行无限多次测量结果的平均值 μ (数学期望),即

$$\delta_r = X_k - \mu \quad (6)$$

这里提到的重复条件是指相同的测量方法、相同的测量人员、相同的条件下使用相同的测量装置并在相同的地点短时间内重复测量。强调短时间内是为了保持相同的测量环境。

由于测量结果可被看作随机变量,故随机误差也是随机变量,具有随机变量的一切特征。在单个的测量数据中,这类误差表现出无规则性,不具有确定的规律,但在大量的测量数据中却表现出统计规律性,其取值具有一定的分布特征,因而可利用概率论提供的理论和方法来研究。

由于随机误差取值是不可预知的,因而不能通过“修正”的方法消除掉,但可以通过改善测量条件和增加测量次数来减小。随机误差对测量结果的影响不能以误差的具体值去表达,只能用统计的方法作出估计。

(2) 系统误差

系统误差 δ_s 是在重复条件下对同一被测量实行无限多次测量结果的平均值 μ 减去测量(真)值 a ,即

$$\delta_s = \mu - a \quad (7)$$

它表现为其值固定不变或按确定的规律变化。例如,加工误差会使量块具有一恒定的系统误差;温度变化会使刻尺伸缩而产生误差;电压波动会使仪表示值产生相应的误差等。这里所谓确定的规律是指在顺次考察各测量结果时,测量误差具有确定的值(当随机误差可忽略不计时),在相同的考察条件下,这一规律可重复地表现出来,因而原则上可用函数的解析式、曲线或数表表达出来。如果已认识到某个系统误差是对测量结果有影响的某一量引起的,且可以定量给出,则应设法予以修正。对测量仪器而言,其系统误差称为仪器的偏差误差(bias error)。

应当指出,系统误差虽有确定的规律性,但这一规律并不一定确知。按照对其掌握的程度可将系统误差分为已知的系统误差(确定性的系统误差)和未知的系统误差(不确定的系统误差)。显然,数值已知的系统误差可通过“修正”的方法从测量结果中消除。

系统误差来源于仪器的固有缺陷、实验方法的不完善或这种方法所依据的理论的近似性、环境的影响、实验者缺乏经验和生理或心理的特点。

需要特别指出的是,系统误差的消除、减小或修正属于技能问题,可以在实验前、实验中、实验后进行。例如,实验前对测量仪器进行校准,使方法尽可能完善,对人员进行专门训练等;在实验中采取一定方法对系统误差加以补偿;实验后在结果处理中进行修正等。

虽然系统误差的发现、消除、减少或修正是一个技能问题,但是,要找出其原因,寻求其规律绝非轻而易举之事。这是因为:

① 实验条件一经确定,系统误差就获得了一个客观上的恒定值,在此条件下进行多次测量并不能发现该系统误差;

② 在一个具体的测量过程中,系统误差往往会和随机误差同时存在,这给分析是否存在系统误差带来了很大的困难。

能否识别和消除系统误差,与实验者的经验和实际知识有着密切关系。因此,对于初学实验者来说,应该从一开始就逐步地积累这方面的感性知识,在实验时要分析:采用这种实验方法(理论)、使用这套仪器、运用这种操作技术会不会对测量结果引入系统误差?

科学史上曾有过这样一个事例:

1909—1914年间美国著名物理学家密立根以他巧妙设计的油滴实验,证实了电荷的不连续性,并精确地测得基本电荷的大小为

$$e = (1.591 \pm 0.002) \times 10^{-19} \text{ C}$$

后来,由X射线衍射实验测得的 e 值却与油滴实验值差了千分之几。通过查找原因,发现密立根实验中所用的空气粘滞系数数值偏小,以致引入了系统误差。在重新测量了空气的粘滞系数之后,由油滴实验测得的 e 值为

$$e = (1.601 \pm 0.002) \times 10^{-19} \text{ C}$$

它与X射线衍射法测得的结果 $(1.6020 \pm 0.0002) \times 10^{-19} \text{ C}$ 十分吻合。

此例说明了实验条件一经确定,多次测量(密立根曾观测了几千个带电油滴)也发现不了系统误差,必须要用其他的方法(本例中改变了产生系统误差根源的条件),才可能发现它;同时也说明了实验中应从各方面去考虑是否会引入系统误差,当忽略某一方面时,系统误差就可能从这一方面渗透到测量结果中来。

最后应当指出的是,虽然按定义来区分测量误差是随机误差还是系统误差是非常明确的,但在实验测量工作中,有时这两类误差却不易区别,因为在一定条件下这两种误差的性质可以互相转化。例如,原来被看成是随机误差的测量误差,随着科学技术水平的提高,可以发现引起这种误差的原因,从而能够掌握这种误差的变化规律,这样就有可能把这种误差当作系统误差来对待。也会有相反的情况:原来被看成是系统误差的测量误差,造成这种误差的原因及变化规律也能被掌握,由于造成误差的已知因素变化比较频繁或很复杂,同时对测得值的影响又很微弱,若掌握其变化规律所付的代价较大,在能够满足实际需要的情况下,可以把这种误差当作随机误差,用统计方法来研究。

以上关于随机误差和系统误差的定义的好处是在数学上有明确的表示式(6)和式(7),但这样实际上是把不具有抵偿性(抵偿性是指当测量次数足够多时正、负误差之和的绝对值近似相等)的随机误差也归入了系统误差。显然,对于这类误差,也应该用统计的方法来研究其对测量结果的影响。大多数随机误差有抵偿性,相当多的还有单峰性,即绝对值小的误差出现概率大,随机误差分布绝大多数是“有界性”的。

测量结果的误差包括随机误差和系统误差,即 $\delta = \delta_r + \delta_s$,通常认为 δ 是由很多个随机影响和系统影响引起的。但由于如前所述的情况,对其影响的评定(以“不确定度”表征),对于二者都既可以用统计的方法来评定,也可以用非统计的方法来评定。

4. 测量的准确度

测量结果中随机误差和系统误差的影响程度通常用精密度(反映随机误差的影响程度)、正确度(反映系统误差的影响程度)和准确度(又称精确度,反映随机误差和系统误差的综合影响程度)的高低来表示。可以形象地用图1来说明。子弹落在靶心周围有三种情况:图1(a)表示随机误差小但系统误差大,即精密度高但正确度低;图1(b)表示系统误差小而随机误差大,即正确度高而精密度低;图1(c)表示随机误差和系统误差都小,即准确度高。

测量结果的精确程度在数值上以“不确定度”表征。它反映的是测量结果中随机误差与系统误差的综合影响,是评价测量方法优劣的基本指标之一。