

高等学校物理实验教学示范中心系列教材

大学物理实验

主编 李向昭 孙军文 副主编 段中华 宋协助



高等学校物理实验教学示范中心系列教材

大学物理实验

DAXUE WULI SHIYAN

主 编 李向昭 孙军文

副主编 段中华 宋协助



高等教育出版社·北京
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

内容提要

本书根据教育部高等学校物理学与天文学教学指导委员会编制的《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》(2010年版)和“卓越工程师教育培养计划”,并结合应用型人才培养的特点编写而成。编者充分考虑了“加强基础、拓宽专业、锐意创新”的教学理念,突出了实验与应用的有机结合。在教材内容的总体设计上,力求贯彻以学生为本的理念,注重基础性、实践性、探索性和开放性的有机统一。在充实基本技能训练实验的同时,加大了综合性、设计性、研究性实验的安排,并兼顾理工科各专业的教学应用。

本书可作为普通高等学校理工科各专业大学物理实验课程的教材,也可供其他专业选用和社会读者参考。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验/李向昭,孙军文主编.——北京:
高等教育出版社,2013.8

ISBN 978-7-04-037947-1

I. ①大… II. ①李…②孙… 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(2013)第 157365 号

策划编辑 郭亚嫒

责任编辑 郭亚嫒

封面设计 王 睢

版式设计 王 莹

插图绘制 尹 莉

责任校对 杨雪莲

责任印制 尤 静

出版发行 高等教育出版社

咨询电话 400-810-0598

社 址 北京市西城区德外大街 4 号

网 址 <http://www.hep.edu.cn>

邮政编码 100120

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

印 刷 北京四季青印刷厂

网上订购 <http://www.landaco.com>

开 本 787mm×1092mm 1/16

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

印 张 15.75

版 次 2013 年 8 月第 1 版

字 数 380 千字

印 次 2013 年 8 月第 1 次印刷

购书热线 010-58581118

定 价 25.00 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物 料 号 37947-00

前 言

“大学物理实验”作为我校的一门独立设置的必修课,已有近三十年的历史了。教学改革的实践使我们认识到,实验教学的根本目的是培养学生的动手能力、创新能力和科研能力,培养学生的科学实验素质,让学生学习探索客观世界的方法,体会科学探索的过程,以达到寓素质培养于实验过程之目的。

全书紧密结合我校物理实验中心现有的仪器设备及可开设的实验题目进行编写,分为三章:绪论、基础物理实验(包含力学、热学、电磁学、光学)、设计性实验。

第一章着重阐述了与基础物理实验有关的误差理论、数据处理知识和实验基础知识。第二章比较系统地叙述了物理实验的基本方法,常用基本仪器和基本调节技术,在每个实验的内容叙述上注意了起点低,终点高,采取循序渐进的原则进行编写。实验原理着重实验思路的引导,突出了从提出问题到解决问题的逻辑思维过程;实验要求注重能力的培养;实验步骤由详到略,给学生一定的思考余地。第三章介绍了实验设计中的一些基本问题,相信这样做,会开阔学生的视野,拓宽学生的知识面,有利于提高学生的主动性和培养学生的创新能力。

本书由李向昭、孙军文、段中华、宋协助、孟兆坤、傅克明等老师编写完成。李向昭、段中华、傅克明、孟兆坤等老师主要编写了基础物理实验部分,孙军文老师主要编写了设计性实验部分,宋协助老师主要编写了绪论部分,段中华老师负责对全书实验内容进行统一修改、审稿,李向昭老师对全书进行修改定稿。本书是由“山东省高等学校教学改革项目(重点,编号:2012025)”和“烟台大学教学改革与研究项目(重点,编号:A009)”资助出版。

实验教学的改革和探索是无止境的,书中新方法、新观点难免有欠妥之处,加之编写时间仓促,水平有限,错误之处在所难免,恳请同行及广大读者提出宝贵意见。在此对支持物理实验中心工作的各位领导、老师、仪器厂家表示衷心的感谢。

编者

2013年4月

郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其为人将承担相应的民事责任和行政责任；构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人进行严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

反盗版举报电话 (010)58581897 58582371 58581879

反盗版举报传真 (010)82086060

反盗版举报邮箱 dd@hep.com.cn

通信地址 北京市西城区德外大街4号 高等教育出版社法务部

邮政编码 100120

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 测量及有效数字	3
第三节 测量误差与不确定度	5
第四节 实验数据处理方法	11
第五节 力学、热学实验基础知识	15
第六节 电磁学实验基础知识	21
第七节 光学实验基础知识	31
第二章 基础物理实验	39
实验 1 PN 结正向压降与温度关系的研究和应用	39
实验 2 固体密度的测量	44
实验 3 液体黏度的测定	49
实验 4 拉伸法测量金属丝的杨氏模量	53
实验 5 液体表面张力系数的测量	57
实验 6 伏安特性的测试	59
实验 7 电流表的改装和校正及万用表的使用	63
实验 8 用惠斯通电桥测电阻	69
实验 9 用学生式电位差计测量电动势	73
实验 10 用霍尔元件测量磁场	77
实验 11 交流电桥	83
实验 12 示波器的使用	88
实验 13 光电效应	93
实验 14 薄透镜焦距的测量	99
实验 15 双棱镜干涉	105
实验 16 等厚干涉——牛顿环、劈尖	110
实验 17 光的偏振	114
实验 18 分光计的调整和使用	120
实验 19 用波尔共振仪研究受迫振动	126
实验 20 动量守恒定律的研究	132
实验 21 落体法测量重力加速度	135
实验 22 刚体转动惯量的测定	137

实验 23	用气垫转动惯量测定仪验证刚体转动定律	141
实验 24	用气垫转动惯量测定仪验证角动量守恒定律	146
实验 25	用气垫转动惯量测定仪验证平行轴定理	149
实验 26	非平衡电桥的原理和应用	152
实验 27	RC 电路暂态过程分析	159
实验 28	RLC 串联谐振电路的频率特性	161
实验 29	单色仪的定标和使用	165
实验 30	迈克耳孙干涉仪	168
实验 31	光栅衍射	172
实验 32	小型摄谱仪的调整	175
实验 33	密立根油滴实验——电子电荷的测量	178
实验 34	核磁共振	185
实验 35	塞曼效应	191
实验 36	弗兰克-赫兹实验	197
第三章	设计性实验	211
第一节	设计性实验概要	211
第二节	实验题目和要求	213
实验 1	用流体静力称衡法测石蜡块的密度	213
实验 2	用杨氏模量仪称衡物体的重量	213
实验 3	测量发泡塑料板的导热系数	213
实验 4	测定检流计的内阻	214
实验 5	将微安表改装成电压表	214
实验 6	将微安表改装成欧姆表	214
实验 7	将微安表改装成电流表	215
实验 8	用电流表测量电池的电动势	215
实验 9	用伏安法测定未知电阻	215
实验 10	测量铜或铝的电阻率	216
实验 11	用电位差计校准电压表	216
实验 12	用读数显微镜测玻璃的折射率	216
实验 13	检验玻璃表面的质量	217
实验 14	测定软磁材料的磁滞损耗	217
实验 15	用衍射法和劈尖干涉测量细丝直径	217
实验 16	低电阻测量	218
实验 17	气体折射率的测量	218
实验 18	测定冰的熔化热	218
实验 19	万用表的组装与校准	219
实验 20	液体折射率与色散率的测定	219
实验 21	弹簧振子的特性研究	219

实验 22	固体介电常量的测量	219
实验 23	太阳能电池基本特性研究	220
实验 24	弦振动研究	220
实验 25	热敏电阻的温度特性研究	221
实验 26	相变临界现象的研究	221
实验 27	红外特性及传输	221
实验 28	交流电桥实验	222
实验 29	变温黏度测量	222
实验 30	空气热机实验	222
实验 31	阻尼振动和受迫振动	222
实验 32	薄膜厚度测量	223
实验 33	水的汽化热的测量	223
实验 34	物体密度的测定	223
实验 35	旋转液体实验	224
实验 36	变温固体杨氏模量测量	224
实验 37	复摆与耦合摆	224
实验 38	液晶光电效应	225
实验 39	用凸透镜测狭缝宽度	225
实验 40	非线性电阻特性的研究	225
实验 41	微安表内阻的测定	226
实验 42	变阻器的使用和电路控制	226
实验 43	用非平衡电桥法测热敏电阻	226
实验 44	温差电动势的测量	227
实验 45	用霍尔器件测量地磁水平分量	227
实验 46	测电源的电动势和内阻	227
实验 47	光电传感器的设计与应用	227
实验 48	热敏电阻测温的研究	228
实验 49	感应法测螺线管磁场	228
实验 50	用迈克耳孙干涉仪测玻璃片的厚度	228
实验 51	等厚干涉法测液体的折射率	228
实验 52	自组望远镜与显微镜	229
实验 53	测透明固体的折射率	229
实验 54	重力加速度的研究	229
实验 55	液体密度的实时测量	230
实验 56	电容及介电常量的测量	230
实验 57	热释电红外报警器的设计	230
实验 58	示波器作为交流电桥平衡指示器的研究	231
实验 59	测定角速度和角加速度	231

实验 60	热敏电阻温度开关的制作	231
实验 61	智能检测	231
实验 62	冷却规律的研究	232
实验 63	测定光电二极管特性	232
实验 64	数字式温度计的研制	232
实验 65	数字式频率计的研制	233
实验 66	用电流场模拟静电场	233
实验 67	磁场分布的测量	233
实验 68	温度 - 电压变换及变换特性线性化	234
实验 69	用双臂电桥测低值电阻	234
实验 70	电子束的偏转和聚焦的研究	234
实验 71	超声测距	234
实验 72	数字电表及其在非电学量测量中的应用设计	235
实验 73	利用单缝衍射的光强分布规律测量金属细丝的直径	235
实验 74	比较法测互感系数	236
实验 75	用示波器测量谐振频率和电感的方法	236
实验 76	自感现象演示电路的设计	236
实验 77	测量电容的一种新方法	236
实验 78	用焦利氏秤测弹簧的劲度系数	237
实验 79	暂态过程的实时测量及曲线图的描绘	237
实验 80	测绘磁场分布	237
实验 81	温度传感器非线性误差的理论分析及实验研究	237
实验 82	金属线膨胀系数的测定	238
实验 83	用磁控法和伏安特性法测定电子比荷的研究	238
附录		239
附录 A	基本物理常量表	239
附录 B	常用函数误差计算公式	240

第一章 绪 论

实验是科学研究的基本方法之一。人们根据科学研究的目的,尽可能地排除外界的影响,突出主要因素,并利用一些专门的仪器设备,人为地改变、控制或模拟研究对象,使某一些事物(或过程)发生或再现,从而去认识自然现象、自然性质、自然规律。实验是为了解决文化、政治、经济、社会及自然问题,而在其对应的科学研究中用来检验某种新的假说、假设、原理、理论或者验证某种已经存在的假说、假设、原理、理论而进行的明确、具体、可操作、有数据、有算法、有责任的技术操作行为。

第一节 物理实验的地位和作用

物理学是一门以实验为基础的自然科学,离开了实验,就不可能有这门科学的建立和发展。物理学是一门飞速发展的科学,它的成就对人类活动的一切领域具有重大影响。物理学的发展是在实验探索和理论研究两方面的相互推动和密切结合下进行的。

实验物理学的建立是从伽利略用实验的方法研究物体的运动而开始的,随着科学与技术的进步,现在,它已发展成为一门系统性较强的独立学科。其中,物理实验是实验物理学乃至整个实验科学大厦的重要基础。物理实验的地位和作用是不言而喻的。

一、实验的地位和作用

1. 许多重要的理论、定律都是从实验中总结概括出来的

物质世界变化莫测,纷繁复杂,自然规律往往隐蔽在重重迷雾之中,在纯自然条件下,由于影响因素太多而难以被发现。只有通过实验或在实验室用人工的方法进行强化、延缓、截取和模拟这些自然现象,使瞬息而逝的现象永久化,周期太长的过程短期化,复杂多变的事物分解化,人们才有可能观察和研究这些现象及规律。牛顿的经典力学体系和万有引力定律就是在伽利略、开普勒、胡克、惠更斯等人工作的基础上总结归纳出来的;电磁学中的一系列定律,如库仑定律、欧姆定律、安培定律、毕奥-萨伐尔定律、法拉第电磁感应定律等,都是对实验的总结;19世纪60年代,麦克斯韦在大量实验的基础上,特别是把法拉第关于电磁现象实验所做的定性解释,发展成为定量的数学形式,提出了“涡旋电场”和“位移电流”的假说,建立了著名的麦克斯韦方程组,并从理论上阐明了电磁波以光速在空间传播,且与光波具有共同的特性。可见,任何一种科学思想只有通过实验的方法表现出来,并得到实验的反复检验,才能被人们所接受,成为科学的真理。

2. 创新、发明离不开实验

实验不仅可以帮助我们认识物质世界,还可以创造出自然界中并不存在的各种新物质,如各

种各样的化合物和新材料,它们都是在实验条件下培育和产生出来的。这就是说,任何创新和发明都离不开实验,只有将严谨的实验与大胆的想法相结合,精密的测量与合理的推测相结合,才是创新发明最有效的途径。

3. 自然科学中的许多争论都是靠实验来作出判断

在人类文明的发展史上,人们对自然界中许多规律的认识曾发生过许多争论。例如对光的本质的认识就发生了持久的争议,光的粒子性与波动性各有其自然的依据,但最终还是通过各种实验解释了光具有波粒二象性的全部事实。

4. 修正错误的理论也靠实验

古希腊的亚里士多德曾断言:体积相等的两个物体,重的要比轻的下落得快。他认为,物体下落的快慢与它们的重量成正比。该理论一直统治了近两千年,直到16世纪晚期由斯泰文,以及稍后的伽利略等人用无数的实验事实,才否定了这一观点。

二、物理实验的目的和任务

16世纪意大利物理学家伽利略曾说过:“科学的真理不应该在古代圣人蒙着灰尘的书上去找,而应该在实验中和以实验为基础的理论中去找。”科学理论的发展离不开实验,学习自然科学知识同样也离不开实验。对于理工科院校的大学生来说,不仅要学好科学理论知识,还应掌握解决工程实际问题的技能。物理实验正是能让学生既学理论知识,又培养科学实践技能的课程。

《高等工业学校物理实验课程教学基本要求》中明确指出:“物理实验是对高等工业学校的学生进行科学实验基本训练的一门独立的必修基础课程,是学生进入大学后受到系统实验知识、实验方法和实验技能训练的开端,是工科类专业学生进行科学实验训练的重要基础。”它的具体任务是:“通过对实验现象的观察、分析和对物理量的测量,学习物理实验知识,加深对物理学原理的理解和认识,掌握基本物理量的测量方法和常用仪器的使用。从而培养学生的科学实验能力及素养。”

三、物理实验的程序和要求

普通物理实验课从教学环节上分三步进行,即:①实验前的预习、准备;②实验操作;③实验后的总结。实验的组织形式为:分组实验,一人一组。

1. 实验前的预习、准备

实验前要认真做好预习和准备,力求理解实验的全部内容。明确实验的目的、内容、方法和步骤,以及相关的注意事项,在此基础上写出实验的预习报告。预习报告的内容包括实验原理、实验方法、实验步骤、注意事项等,同时要在数据记录本上画好数据记录表格。其中,实验原理要精练简明,如有扼要的文字表述、主要的原理公式、必要的原理图、电路图或光路图等。

2. 实验操作

首先要对照实验指导书上所设计的实验方案检查实验台上的仪器、器材,并熟悉其使用操作规程,然后根据原理图连接线路、组装实验。实验装置组装完毕后必须认真检查一遍,必要时还须经指导教师检查同意后方可开始实验,切勿盲目操作、急于求成。实验中要细心观察,积极思考,不放过任何一个实验现象,同时要实事求是地做好记录,坚决反对操作马虎、弄虚作假的不良

行为。测量完毕,实验数据须经指导教师签字后才能有效。实验中遇到问题时,首先要主动分析原因,认真排除故障,树立起战胜困难的信心和勇气。如遇意外事故,一定要细心、冷静,迅速采取有效措施,切断电源及时报告,把事故降到最小。实验结束后,应及时断水、断电、断气,整理复原所用的仪器器材,清理实验室的卫生,必要时请指导老师验收、核查后方可离开实验室。

实验课是有组织、有计划、有目的的教学活动,即便是开放型实验,学生也必须遵守实验室的各项规章制度,不得擅自行动,影响实验教学秩序。

3. 实验后的总结——实验报告

实验结束后要及时认真地撰写实验报告,对实验中观测到的现象和数据进行整理、分析和总结。实验报告的内容大体包括八个方面:即实验题目、实验目的、实验原理及线路图、仪器装置及材料、实验内容及步骤、数据处理与误差分析、实验总结与问题讨论、回答有关思考题。

撰写实验报告是实验课的重要内容,它不仅是对实验的总结,重要的是培养学生分析问题、善于总结的能力,以及归纳整理和书写表达的能力,为将来撰写科研论文打下基础。

四、实验成绩的评定

实验成绩的评定是实验教学工作的重要环节,正确评价每个学生的实验成绩,可有效地调动他们实验的积极性,提高实验教学质量。平时实验成绩由三部分叠加而成:

1. 实验预习:按要求写出预习报告,画出相关数据记录表格。
2. 实验操作:能按照实验的要求正确连接线路和使用仪器,对实验现象的观察认真仔细,数据记录详细完整,仪器器材无损坏。
3. 实验报告:内容完整规范,书写整洁,数据处理得当。

第二节 测量及有效数字

在自然科学和工程技术领域,每一项科学理论的发展都是建立在精密测量和理论预言的基础之上的;每一项工程自始至终也离不开测量,要随时检验是否达到设计要求。所谓测量,是指通过一定的实验手段获得被测量大小的一个操作过程。换言之,就是将被测量与选定的某一标准量(或标准单位)相比较,得出被测量的量值而进行的一种操作。测量不等同于实验,测量的目的是获得物理量的精确值,而物理实验的目的是探索物理规律。因此测量不能代替物理实验,但物理实验中必有测量。

一、测量分类

根据被测对象(物理量)的类别和要求不同,测量可分为:

1. 工程测量与精密测量

工程测量是指不需要精确考虑测量误差的测量。

精密测量是指需要精细考虑测量误差,往往需要进行多次重复测量,每次测量都应反映出测量误差的变化和存在,对测量数据需要按照误差理论进行处理,以求出其最佳测量结果。

2. 直接测量与间接测量

直接测量是指被测量直接与标准量相比较,而获得其大小的测量。

间接测量是指被测量不能直接测得,需先测量与之有关的其他直接量,然后再根据它们之间的数学关系而求得其量值的测量。

3. 等精度测量与不等精度测量

等精度测量是指在相同测量条件下,对同一物理量进行多次重复测量,每次测得的数据其信赖程度是相同的。

不等精度测量是指测量条件不同或变化、测量仪器或测量人员变更的情况下进行的测量,每次测得的数据其信赖程度是不同的。

4. 静态测量与动态测量

静态测量是指被测量在测量过程中不发生变化,不需要考虑时间因素的影响而进行的测量。被测量与测量误差可作为随机变量来研究。

动态测量是指在测量过程中被测量随时间而变化,且不可忽略。被测量与测量误差要作为随机过程来研究。

根据不同的被测对象,需要用不同的测量方法,这些方法有:①比较法;②放大法;③转换法;④模拟法;⑤补偿法;⑥平衡法;⑦干涉法等。

二、测量结果的有效数字

由于测量误差的存在,对任何物理量的测量结果都是近似值,此近似值是用有效数字来表示的。实验中,当被测物理量和仪器确定后,有效数字的位数即被确定。

1. 有效数字的概念

在直接测量中,由仪器直接读取的数据称为读数,它由两部分组成:一部分是从仪器刻度上直接反映出来的(一至几位)可靠数字,另一部分是从仪器最小分度间估读出来的(一位)可疑数字,此两部分统称为有效数字。

如图 1-2-1(a)所示,用最小刻度为毫米的米尺测物体的长度时,读数的末位不能只读到毫米,应估读到毫米的下一位,即使是“0”也要估读出来,故其读数为 11.0 mm,为三位有效数字。图 1-2-1(b)的读数为两位有效数字。

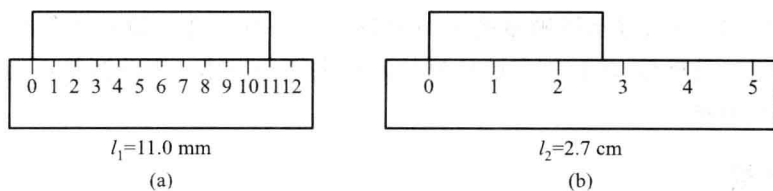


图 1-2-1 测量的有效数字

由于人眼的最高分辨率只能估读到仪器最小分度的十分之一,因此,估读数字通常只有一位。

2. 间接测量的有效数字

无论是直接测量还是间接测量的结果,通常只有一位可疑数字,因此,间接测量结果的有效

数字应按照有效数字的运算规则进行取舍。

(1) 有效数字的加减运算规则

运算结果的末位应与参加运算的各分量中准确度最低(末位在位数上最高)的一个数的末位取齐。例如:

$$12.3 + 12.3 + 0.123 - 12.3 = 11.2 \text{ (个位以下的数字不是有效数字)}$$

(2) 有效数字的乘除运算规则

运算结果的有效数字位数应与参加运算各分量中有效数字位数最少的分量相同。如:

$$\frac{123 \times 12.30 \times 1.0203}{0.012} = 1.3 \times 10^5 \text{ (有效数字最少的是两位)}$$

(3) 有效数字的函数运算规则

初等函数运算后的有效数字位数应与它的自变量的有效数字位数相同。例如:

$$\sin 36^\circ = 0.59 \text{ (即两位有效数字)}$$

$$\tan 27^\circ 40' = 0.5243 \text{ (即四位有效数字)}$$

$$10^{6.25} \approx 1.78 \times 10^6 \text{ (即三位有效数字)}$$

$$\lg 1.983 \approx 0.2973 \text{ (即四位有效数字)}$$

3. 有效数字的几点说明

(1) 有效数字的位数与十进制单位的变换无关,即与小数点的位置无关。如:

$$L = 0.05060 \text{ m} = 5.060 \text{ cm} = 50.60 \text{ mm}$$

(2) 有效数字的位数与仪器精度及被测量本身的大小有关。同一物理量用不同精度的仪器测量时,其有效数字的位数不同,即有效数字的多少不仅代表了一个数的大小,还表示了测量的准确度,因此在读数或运算过程中不能随意增减。

(3) 有效数字的数量级表示法:当数据很大或很小,且有效数字的位数有限时,要用科学记数法: $Q = K \times 10^n$, 其中 $1 \leq K \leq 10$, n 为任意实数。

(4) 在运算过程中,常数(如: 1 、 e 、 π 等)的有效数字可认为有无穷多位。

(5) 无论是直接测量还是间接测量,最终的有效数字位数应由测量的不确定度来决定。

第三节 测量误差与不确定度

在测量中,人们总是力图获得被测量的真实值,然而几乎在任何情况下,不可能使测量做到准确无误。这是因为:由于测量技术的限制,使得被测量的真值与其测量值之间总会存在一定的差异,即所谓测量误差。

一、误差的基本概念

1. 误差的定义

物理量 x 的测量值 x_i 与其“真值” x_0 之间的差值 Δx 称为测量误差。即

$$\Delta x = x_i - x_0 \quad (1-3-1)$$

然而,“真值”虽然客观存在,但一般是不可知的,它只是一个理想的概念而已。在实际测量中,通常把经过多次重复测量的算术平均值,或经过专家反复测量并认定(或以被人们所公认)

的值来代替“真值”,并称为“最佳估值”或“约定真值”。

由于真值是未知的,且只能用“近似真值”来代替,因此,测量误差也只能靠分析和估计,这种经过分析和估计的测量误差,被称为测量的不确定度。

2. 误差的分类

测量误差按其性质可分为系统误差、随机误差和过失误差;按其表达方式还可分为绝对误差和相对误差。其中“过失误差”多属人为因素引起,可以避免,故不再赘述。

(1) 系统误差:由测量系统本身的缺陷而引起,使在测量过程中,其大小始终保持不变或按某种规律而变化的误差。

① 特点:具有确定性和规律性,可通过实验对比和理论分析的方法来发现,并进行消除或更正。

② 来源:仪器误差、理论与方法误差、环境条件的变化、人员因素等。

(2) 随机误差:由测量系统和环境中一些不可控制的随机因素所引起的误差。

① 特点:多次重复测量同一物理量时,每次测量的误差其大小和符号随机变化,即时大时小,时正时负,而且不可预测。但当测量次数无限多时,其分布服从统计规律——正态分布。

② 来源:测量系统以及所处环境中的各种随机因素、人员读数偏差等。

(3) 绝对误差与相对误差

绝对误差:由公式(1-3-1)可知,当测量值 x_i 大于其物理量的真值 x_0 (或其算术平均值 $\bar{x}$) 时, $\Delta x > 0$; 而测量值 x_i 小于其真值 x_0 (或其算术平均值 $\bar{x}$) 时, $\Delta x < 0$ 。但通常情况下 Δx 的正负是不可知的,因此,在实际操作中并不考虑 Δx 的正负,而只考虑其大小,即绝对误差。绝对误差是以被测量的量纲所表示的误差,它反映了测量值偏离真值的程度。

相对误差:由于绝对误差的大小不能客观全面地评价测量结果的优劣好坏,所以在评价和比较测量结果时,需要引入相对误差的概念。相对误差是被测量的绝对误差与其真值的比值,常用百分数来表示,即:

$$E_x = \frac{\Delta x_0}{x_0} \approx \frac{\Delta x}{\bar{x}} \times 100\% \quad (1-3-2)$$

另外,实验中还常常用到示值误差与引用误差的概念。对于多挡式仪表或用示值来表示被测量大小的仪表,常用示值误差表示该仪表的绝对误差。示值误差是指仪表的示值减去被测量的最佳估值,记为 $\Delta x_{\text{示}} = x_i - \bar{x}$ 。

由于仪表各挡位、各刻度上的示值误差都不一样,因此不宜用示值误差来评价读数误差,在实际使用中,都用引用误差,且便于评定仪表的精度等级,其定义如下:

$$\text{引用误差 } \delta = \frac{\text{示值误差 } \Delta x_{\text{示}}}{\text{仪表量程 } x_n} \times 100\% = s\%$$

式中, s 为仪表的精度等级。我国电工仪表的精度等级共分七级,即 0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5 和 5.0。如某仪表的精度为 0.5 级,则说明该仪表的最大引用误差的绝对值不超过 0.5%。

设某仪表的量程为 x_n , 测量点的读数为 x , 则该仪表在 x 点邻近处的示值误差 $\Delta x_{\text{示}}$ 为

$$\begin{aligned} |\Delta x_{\text{示}}| &\leq x_n \cdot s\% \\ \left| \frac{\Delta x_{\text{示}}}{x} \right| &\leq \frac{x_n}{x} \cdot s\% \end{aligned}$$

可见,当 x 越接近 x_n 时,其精度就越高,反之则越低。因此,在使用这类仪表时,应尽可能使测量值 x 接近仪表的上限值或 $2/3$ 量程以上。

3. 测量精度

误差反映了测量结果与真值的差异。误差小,则称精度高;误差大,则称精度低。按误差的种类,可将精度细分为如下三种:

(1) 精密度:表示测量结果中随机误差大小的程度;

(2) 正确度:表示测量结果中系统误差大小的程度;

(3) 准确度:表示测量结果与真值符合(一致)的程度,它反映测量结果中系统误差与随机误差的综合情况。

精度是以上三度的综合反映,其含义更接近准确度,它是一个笼统的概念。对实验结果来说,它表示相对误差的大小(或数量级);对仪器而言,它表示仪器的最小分度值。

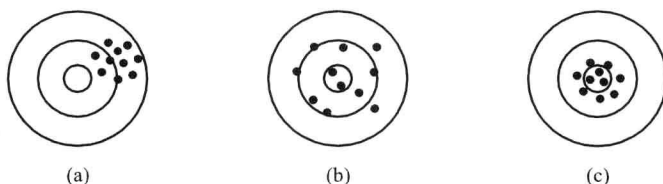


图 1-3-1 对精度概念的理解

图 1-3-1(a)表示精密度很高,但系统误差大,不正确;图 1-3-1(b)表示正确度好,但精密度差,说明系统误差小,随机误差大;图 1-3-1(c)表示正确度与精密度都好,即准确度高。

4. 研究误差的目的

随着科学技术的发展和人类认识水平的提高,测量误差可控制得越来越小,但不可能完全消除。由于误差存在的必然性和普遍性,人们必须深入研究测量过程中产生的误差,以便提高测量技术水平。尤其是对于精密计量而言,没有误差表示的测量结果几乎是毫无价值的。归结起来,研究误差的目的有:

(1) 掌握误差的来源,分析误差的性质,以减小或消除误差;

(2) 正确处理测量数据,合理评价测量结果;

(3) 优化实验设计,恰当选择实验方法和配备仪器,以提高测量的技术水平。

二、测量的不确定度及其评定

“不确定度”一词源于海森伯的测不准关系。1963年美国国家标准局(NBS)的 Eisenhart 提出了定量表示测量不确定度的建议,经过近 20 年的局部试行与推广,到 20 世纪 80 年代,不确定度的概念已得到国际测量界的普遍重视。1989 年 10 月,由国际标准化组织(ISO)、国际计量委员会(CIPM)、国际法制计量组织(CIML)和国际电工委员会(IEC)等共同组织的国际不确定度表示工作组在西柏林召开了会议,并给出了指导性文件——《物理测量中的不确定度表示指南》。为与国际接轨,20 世纪 90 年代初期以来,我国的测量界、科技界及各大专院校已开始计量、测试报告、学术论文、技术鉴定、产品检验、合同与协议等文件中陆续使用不确定度的表述。

1. 不确定度的基本概念

由于测量误差(不确定误差)的存在,任何测量结果总存在着某种不确定的程度,即不确定度。它是测量系统中,不确定系统误差与随机误差的综合,用来表示测量结果偏离真值的一个不确定程度。

为了便于对不确定度的分析和处理,又将其分为 A 类不确定度分量和 B 类不确定度分量。

A 类不确定度分量:以统计方法评定的分量,其标准不确定度记为 S_i ;

B 类不确定度分量:以非统计分析法评定的分量,其不确定度记为 u_j 。

2. 单次直接测量的不确定度评定

实验中,经常因受到测量条件的限制而只能进行一次测量,即所谓单次测量。在这种条件下,其不确定度为

$$u_x = \begin{cases} \frac{\Delta x_{\text{仪}}}{\sqrt{3}} & (\text{仪器精度等级较高时}) \\ \frac{\Delta x_{\text{仪}}}{2\sqrt{3}} & (\text{仪器精度等级较低时}) \end{cases}$$

式中, $\Delta x_{\text{仪}}$ 为仪器误差,是指在正确使用仪器的条件下,被测物理量的读数可能产生的最大误差。其值可取下列三项之一:

$$\Delta x_{\text{仪}} = \begin{cases} \text{仪器出厂时检定书上给定的误差} \\ \text{根据仪器的级别计算,即 } \Delta x_{\text{仪}} = \text{量程 } x_n \times s\% \\ \text{仪器的最小刻度值} \end{cases}$$

3. 多次直接测量的不确定度评定

在等精度条件下,对被测量 X 重复测量 n 次 ($n \rightarrow \infty$), 则其最佳估值、A 类不确定度分量、B 类不确定度分量及合成不确定度分别为:

(1) 最佳估值

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

(2) A 类标准不确定度分量

① 测量值 x_i 的 A 类标准不确定度为

$$S_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (1-3-4)$$

② 平均值 $\bar{x}$ 的 A 类标准不确定度为

$$S_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (1-3-5)$$

需要指出的是,公式(1-3-4)和(1-3-5)适用的条件是 $n \rightarrow \infty$, 实际测量中的测量次数总是有限的,特别是一般的教学实验中,测量次数大多不超过 10 次,这时,测量结果将偏离正态分布,而服从 t 分布。A 类标准不确定度分量需要作如下修正,即

$$\Delta x_A = t_p \cdot S_x \quad \text{或} \quad \Delta \bar{x}_A = t_p \cdot S_{\bar{x}}$$

式中的 t_p 是与一定的置信概率 p 相联系的置信因子,可由表 1-3-1 查得。