

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 李根全 宋金璠

副主编 张 萍 仲志国 张国芳



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

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 李根全 宋金璠
副主编 张 萍 仲志国 张国芳
编 者 郑长波 鲁道邦 李 婧
杨小蕊 王生钊 张颖颖



内容提要

本书以教育部颁发的《高等学校基础课实验教学示范中心建设标准》推荐的实验项目为依据,参照《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》(2010年版),针对理工科院校的专业特点,考虑到大学一年级学生所掌握的物理概念与实验基础知识,并结合多年的教学实践编写而成。实验内容涉及力学、热学、电磁学、光学等知识,全书主要分为实验基础理论和实验项目两大部分,其中基础理论部分介绍了测量与误差、数据处理的基础知识,实验项目部分按照基础性实验、提高性实验、综合性实验、设计性实验四大类共54个实验项目分别进行介绍。部分实验给出了数据记录表格以及误差分析方法,供读者参考。本书还编写了思考与练习题,以促进实验者积极思考,加深理解。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验 / 李根全, 宋金璠主编. — 北京 :
高等教育出版社, 2013. 1
ISBN 978-7-04-033786-0

I. ①大… II. ①李… ②宋… 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(2012)第308502号

策划编辑	缪可	责任编辑	缪可	封面设计	赵阳	版式设计	王艳红
插图绘制	尹莉	责任校对	刘丽娟	责任印制	韩刚		

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街4号
邮政编码 100120
印 刷 北京鑫丰华彩印有限公司
开 本 787mm×960mm 1/16
印 张 23
字 数 420千字
购书热线 010-58581118

咨询电话 400-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
版 次 2013年1月第1版
印 次 2013年1月第1次印刷
定 价 35.80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 33786-00

前 言

物理实验在物理学的建立和发展中起着十分重要的作用,它具有自身的特点和包括实验知识、实验方法、实验仪器的使用等方面的独特内容,所以在高等学校开设大学物理理论课的同时,往往要同时开设大学物理实验课。通过“大学物理实验”这门课的学习,学生能学会一些基本的实验方法,掌握基本仪器的使用方法和基本的数据处理方法,得到规范化的实验方法训练,养成良好的实验习惯,在独立完成实验的能力和实验素养等方面得到良好的培养,为后续的物理理论课乃至今后的科学技术工作打下坚实的基础。

本书是一本创新体系的实验教材,编者都是在教学、科研第一线艰辛敬业工作多年,具有丰富教学经验和科研背景的教师。本教材在正式出版之前作为讲义历经了多年的教学实践。期间,广大教师一方面认真总结南阳师范学院和南阳理工学院的教学经验并吸取有关师生的反馈信息,另一方面密切跟踪兄弟院校的近期教学成果,在此基础上进行了不断地完善。

本教材在第一、第二章阐述了实验误差知识和实验数据处理方法以及物理实验的基本方法,并介绍了常用仪器,然后按照由浅入深、由单一到综合的认识过程,打破按力学、热学、电磁学和光学实验编排的模式,按照基础性实验、提高性实验、综合性以及设计性实验的教学要求编写,实验内容由易到难,逐步展开,从而构成一个完整的教材体系。

考虑到物理实验课程的独立性和面向低年级学生的特点,本教材在编写上力求做到实验目的明确,实验原理叙述清楚,实验仪器介绍详细,并在多数实验后附有思考题,引导学生课后进一步分析、讨论、巩固和提高。

本教材分为6章,由宋金璠和李根全担任主编,参与编写的有张颖颖(第1章、第2章),郑长波(实验1、2、3、39、40),张萍(实验6、31、34、35、36、37、54),杨小蕊(实验7、8、9、17、24、28),李婧(实验10、11、12、15、16),宋金璠(实验13、14、43、47),鲁道邦(实验21、22、23、29、30、32、53),仲志国(实验25、26、27、44、45、46),李根全(实验33、38、48、49、50),张国芳(实验19、51),王生钊(实验4、5、18、20、41、42、52)。教材体系框架及统稿由宋金璠、张萍、仲志国共同完成。

恳切希望使用本教材的教师、同学提出宝贵意见,以帮助编者改进。

编 者

2012年9月

目 录

第 1 章 绪论	1
第 1 节 开设大学物理实验课程的重要性	1
第 2 节 大学物理实验课程的基本教学环节	2
第 3 节 如何学好大学物理实验课程	4
第 2 章 基本概念和数据处理	5
第 1 节 测量与误差	5
第 2 节 实验不确定度的评定	11
第 3 节 有效数字	17
第 4 节 数据处理方法	20
第 5 节 物理实验的基本测量方法与技术	28
练习题	34
第 3 章 基础性实验	36
实验 1 长度的测量	36
实验 2 重力加速度的测定	44
实验 3 牛顿第二定律的验证	52
实验 4 动量守恒定律的验证	62
实验 5 简谐振动的研究	65
实验 6 弹性模量的测定	69
实验 7 液体黏度的测定	74
实验 8 金属比热容的测定	80
实验 9 冰的熔化热的测定	83
实验 10 电学实验基本知识	87
实验 11 制流电路与分压电路	97
实验 12 示波器的使用	103
实验 13 薄透镜参数的测量	112
实验 14 等厚干涉现象的研究	119
第 4 章 提高性实验	127
实验 15 声速的测量	127
实验 16 硅光电池特性研究	133
实验 17 弦振动的研究	141
实验 18 扭摆法测刚体的转动惯量	146
实验 19 金属线胀系数的测定	151

II 目录

实验 20	液体表面张力系数的测定	156
实验 21	伏安法测电阻和二极管的伏安特性	158
实验 22	用惠斯通电桥测电阻	163
实验 23	低电阻的测量	168
实验 24	静电场的描绘	172
实验 25	用电位差计测量电池的电动势及内阻	176
实验 26	灵敏电流计特性的研究	179
实验 27	用箱式电位差计校正电表	185
实验 28	霍耳效应	193
实验 29	交流电桥	201
实验 30	RLC 电路谐振特性的研究	206
实验 31	迈克耳孙干涉仪的调整和使用	212
实验 32	平行光管的调整和使用	219
实验 33	发光强度的测量	226
实验 34	旋光现象的观察与测量	231
实验 35	液体折射率的测定	236
实验 36	用菲涅耳双棱镜测光源的波长	242
实验 37	光偏振现象的研究	245
实验 38	光谱测量	250
第 5 章	综合性实验	259
实验 39	良导体导热系数的测定	259
实验 40	不良导体导热系数的测定	263
实验 41	磁场的描绘	267
实验 42	铁磁质动态磁滞回线的测试	272
实验 43	分光计的调节和使用	281
实验 44	用透射光栅测光波波长及角色散率	292
实验 45	狭缝衍射的研究	296
实验 46	全息照相	301
实验 47	声光效应	305
实验 48	密立根油滴实验	313
实验 49	弗兰克-赫兹实验	319
实验 50	光电效应及普朗克常量的测定	326
第 6 章	设计性实验	334
实验 51	固体和液体密度的测定	334
实验 52	用非平衡电桥研究热敏电阻的温度特性	337
实验 53	电表的改装与校准	342
实验 54	全息光栅的制作	347
附录	349

附表 1	国际单位制的基本单位	349
附表 2	国际单位制中具有专门名称的导出单位	349
附表 3	常用基本物理常量	350
附表 4	在海平面上不同纬度处的重力加速度	351
附表 5	标准大气压下不同温度的水的密度	351
附表 6	20 °C 时常见固体和液体的密度 ρ	352
附表 7	某些固体的比热容	352
附表 8	20 °C 时某些材料的弹性模量	352
附表 9	某些液体的黏度	353
附表 10	固体导热系数 λ	353
附表 11	某些金属和合金的电阻率及其温度系数	354
附表 12	在常温下某些物质相对于空气的光的折射率	354
附表 13	几种常用光源的谱线波长表	355
参考文献	356

第 1 章

绪 论

第 1 节 开设大学物理实验课程的重要性

物理学是研究自然界的物质结构、物体间的相互作用和物体运动最基本、最普遍规律的自然科学。物理学的研究对象具有极大的普遍性,基本理论渗透到自然科学和技术科学的许多领域,应用于生产技术的各个部门,为现代科学技术文明奠定了决定性的基石。

物理学同时也是一门实验学科,物理学的建立和发展离不开物理实验。从经典物理到近代、现代物理,物理实验在测量物理量、检验理论、发现新事物、建立新规律等诸多方面发挥着巨大作用,物理实验的思想、方法、技术与装置已广泛地渗透到了自然学科和工程技术的各个领域。比如在材料科学中,各种材料物性测量(如 X 射线衍射、核磁共振等)、新材料的发现(如 C_{60} 、高温超导材料等)和新材料的制备方法的研究(如粒子束注入、激光蒸发等),都离不开物理实验的应用;在化学领域中,从光谱分析到量子化学、从放射性测量到激光分离同位素,无不体现物理实验的应用;生物学的发展依赖于各类显微镜(如光学显微镜、电子显微镜、原子力显微镜等)的贡献,近代生命科学更离不开物理实验,DNA 的双螺旋结构就是美国遗传学家和英国物理学家共同发现并被 X 射线衍射实验所证实的。由此可见,物理学所渗透的各个学科领域与物理实验密切相关,物理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,才能顺利地把物理学原理应用到其他学科,促进其他学科质的飞跃发展。

大学物理实验是一门重要的基础课程,是理工科学生进入大学后系统地接

受科学实验方法和实验技能的训练开端,使学生学会用实验方法发现、分析和解决问题,激发学生的创新意识和创造力,培养独立开展科学研究的能力.因此教育部把物理实验课单独列为一门培养理工科大学大学生进行科学实验基本训练的基础必修课.大学物理实验课的主要具体任务体现以下几个方面.

(1) 通过对实验现象的观察分析和对物理量的测量,使学生掌握物理实验的基本知识、基本方法和基本技能.运用物理学原理和物理实验方法研究物理规律,加深对物理学原理的理解.

(2) 培养与提高学生进行科学实验的能力,主要包括:

① 自学能力.能够自行阅读实验教材与参考资料,正确理解实验内容,做好实验前的准备工作.

② 动手能力.能借助教材与仪器说明书,正确调整和使用仪器,制作样品,发现和排除故障.

③ 思维判断能力.运用物理学理论,对实验现象与结果进行分析和判断.

④ 书面表达能力.能够正确记录和处理实验数据,绘制图表,分析实验结果,撰写规范、合格的实验报告.

⑤ 综合运用能力.能够将多种实验方法、实验仪器结合在一起,运用经典与现代测量技术和手段,完成某项实验任务.

⑥ 初步的实验设计能力.根据课题要求,能够确定实验方法和条件,合理选择、搭配仪器,拟定具体的实施方案.

(3) 培养学生良好的科学实验素质,主要包括理论联系实际、实事求是的科学作风,严肃认真的工作态度,不怕困难、勇于探索的创新精神,遵章守纪、爱护公物的优良品德,团结协作、共同进取的合作氛围.

第2节 大学物理实验课程的基本教学环节

大学物理实验有自己的特点和规律,有自己的实验理论、实验方法和实验技能.大学物理实验课程大致可以分为提出任务、确定方案、选择仪器、安装调试、观察测量、记录数据、总结分析、撰写实验报告 8 个步骤.每个实验步骤都有一定的基本要求,实验基本技能的训练贯穿于实验的全过程中,各种实验方法分散在不同类型的实验中,因此要达到学会进行科学实验,掌握实验基本技能的目的,需要认真进行每个实验环节的训练,在不同的实验内容中掌握不同的实验方法.大学物理实验的基本教学环节可以分为以下 4 个部分.

1. 实验前的预习

预习是训练和提高自学能力的重要途径,是能否顺利进行实验的关键,因此必须做好预习工作.预习时,通过阅读实验教材及参考资料,重点考虑 3 个问

题:做什么(实验目的);根据什么去做(实验原理);怎样做(实验方案、条件、步骤和关键要领).在此基础上写好预习报告,预习报告包括以下内容:

- (1) 实验名称 要做什么实验.
- (2) 实验目的 扼要说明实验要解决的中心问题.
- (3) 实验仪器 说明所用的主要仪器及其型号规格.
- (4) 实验原理 简要阐述实验所依据的物理规律或公式及其推导,列出有关测量的条件,电学实验要绘出电路原理图,光学实验要绘出光路图.

(5) 实验步骤 拟出实验操作程序及注意事项.

(6) 数据记录 设计好测量数据的记录表格.

每次实验前,教师检查学生预习情况.

2. 实验中的操作

实验操作是训练动手能力、思维判断能力和综合运用能力的过程,也是培养学生科学实验素质的主要环节.在教师指导性讲解的基础上,主要达到以下几方面要求:

- (1) 弄清实验内容的具体要求和注意事项.
- (2) 熟悉仪器,并进行调整测试,待实验条件符合要求后按照实验步骤进行操作、测量.
- (3) 科学地、实事求是地记录下实验中观察到的各种现象和测量数据,同时记录与实验结果有关的实验条件,如环境(温度、湿度、压力等)、主要仪器(名称、型号、规格、准确度等),记录数据时要注意有效数字和单位的准确性.
- (4) 实验完毕,将实验结果记录情况交任课老师审阅签字,确认实验数据合格有效后,方可整理仪器结束实验,打扫卫生后离开实验室.

3. 实验后的报告

实验报告是实验工作的全面总结和深入理解的一个环节.一份完整的实验报告,应是在完善预习报告的基础上,增加以下几方面内容:

- (1) 教师签字的原始数据.
- (2) 实验现象与数据,获得数据的条件(如仪器、环境等).
- (3) 数据处理方法,结果表达.
- (4) 实验现象及误差的分析和讨论、最终结论,对实验的收获体会与建议等.

书写实验报告时,要简明扼要、文字通顺、字迹端正、图表规范,须独立完成实验报告并及时上交.

4. 实验成绩评定

每个实验项目的成绩主要采用“三段式能力考核”方式进行评定,即通过考核预习情况检验学生的自学能力,通过操作检验学生的动手能力与理论联系实

际能力,通过实验报告考核学生综合分析、处理数据能力和书面表达能力.教师在每一堂实验课的教学过程中,将根据实验项目评分标准对实验的每个环节严格评定学生的学习情况.实验成绩为预习成绩、操作成绩、报告成绩三者之和.

最后大学物理实验课程的总成绩主要为各实验项目平均成绩与所做实验个数的加权平均值,必要时在学期末进行实验基本理论知识和实验基本技能考试.

第3节 如何学好大学物理实验课程

大学物理实验课具有其他课程无法替代的重要性,学生必须重视大学物理实验,学好大学物理实验.要学好大学物理实验,要求学生严格做到下面3点:

1. 认真预习

预习至关重要,决定着实验能否顺利进行以及收获的大小.学生在实验前必须认真预习,做好实验前的准备工作,做到有的放矢.通过阅读教材、上网或到图书馆查阅有关的实验内容,了解实验的全貌,明确该实验的目的要求、实验原理、具体操作步骤及其需要测量的数据,并对所用仪器的构造原理、操作方法和注意事项做到心中有数,在此基础上根据实验要求画好数据记录的表格.

2. 认真完成实验

学生进入实验室要严格遵守实验室的操作规程和安全规则.做实验时,要胆大心细、一丝不苟,按照要求正确操作仪器,细心观察实验现象,认真记录数据.若在实验的过程中遇到问题,不要产生畏难情绪,马上求助于教师或抄几个数据草草了事,而应该把它看成是学习的良好机会,要积极思考,力争独立地排除实验故障.做实验并不是为了测量几个数据,关键是锻炼自己分析、研究和解决问题的能力.

记录实验数据时要真实,这是一个科学工作者的基本道德素养.在大学物理实验中,实验结果往往是已知的或是公认值,如果出现实验结果和公认值不一致的情况,千万不要伪造和篡改实验数据,要分析找到不一致的原因,实验过程比结果更重要.

实验结束时,要把原始实验数据记录交给教师审阅,经教师认可签名,并整理好仪器后才能离开实验室.

3. 认真书写实验报告

实验完成后,要认真书写实验报告.书写实验报告是对实验过程和实验结果的全面总结,从而训练了学生总结思考能力和书面表达能力.

第2章

基本概念和数据处理

科学研究离不开对某个物理量的测量. 物理实验除了定性地观察物理现象外, 还需要对物理量进行定量测量, 并确定各物理量之间的关系.

由于测量设备、环境、人员、方法等方面诸多因素的影响, 使得测量值与客观的真实值总有一定差异, 这种差异在数值上表现为误差. 实践证明: 测量结果的误差始终存在于一切科学实验和测量过程中. 因此, 对实验中测量获得的数据, 要根据测量误差的基本知识选择合适的方法进行处理和表示, 依据不确定度来正确评价其可靠性, 采用科学的数据处理方法寻找实验数据中隐藏的规律.

误差与数据处理理论已发展为一门学科, 涉及的内容丰富而且比较复杂. 本章从实验教学角度介绍大学物理实验中常用的一些基本知识, 对误差与数据处理有一个初步完整的了解, 然后结合后面每一个具体实验再仔细阅读有关内容, 通过具体运用逐步掌握实验数据的处理方法.

第1节 测量与误差

1. 测量

(1) 定义

所谓测量, 就是借助于专门设备, 通过一定的实验方法, 以确定物理量值为目的所进行的操作. 它是一个实验比较的过程, 即把一个量(待测量)与另外一个量(标准量)相比较.

测量由测量过程与测量结果组成.

测量过程是执行测量所需的一系列操作, 包括选择单位、设计工具、设计测量方法、研究分析测量结果、寻找减小误差的途径等方面.

测量结果表示为测量所获得的待测量的值,一般由数值、单位和精度评定三部分组成。

(2) 分类

从不同的角度考虑,测量有不同的分类方法。

① 按照测量结果获得方法的不同,测量分为直接测量和间接测量。

直接测量:用预先校对好的测量仪器或量具对被测量进行测量,直接读取被测量数值的大小,称为直接测量。例如,用米尺测物体的长度,用秒表测时间,用天平与砝码测物体的质量,用电压表(或电流表)测电压(或电流)等都属于直接测量,相应的被测物理量称为直接测量量。

间接测量:如果待测量的量值是由若干个直接测量量经过一定的函数运算获得的,这种测量称为间接测量。例如,体积、密度等物理量的测量往往采用间接测量,相应的被测物理量称为间接测量量。

实际测量中多数为间接测量,但直接测量简单、直观,是一切间接测量的基础。

② 按照测量条件的不同,测量可分为等精度测量和非等精度测量。

等精度测量:在相同的测量条件下(同一测量水平的观测者、同一精度的仪器、同样的实验方法和环境等)对某一待测量所做的重复性测量,称为等精度测量。等精度测量获得的所有数据的可信赖程度是相同的,在数据处理过程中地位相同,应一视同仁。

尽管实际测量中,很难保证所有条件不变,但由于等精度测量数据处理方法相对简单,因此只要测量条件变化不大,一般都可近似视为等精度测量。大学物理实验学习阶段,主要考虑等精度测量。

非等精度测量:在不同的测量条件下对某一待测量所做的重复性测量,称为非等精度测量。非等精度测量获得的所有数据的可信赖程度是不同的,在数据处理过程中应按精度高低,区别对待。

③ 按照被观测对象在测量过程中所处的状态,可分为静态测量和动态测量。

静态测量:如果待测量在测量过程中是固定不变的,这时所进行的测量为静态测量。静态测量不需要考虑时间因素对测量结果的影响,应把被测量或误差作为随机变量进行处理。

动态测量:如果待测量在测量过程中随时间不断变化,这时所进行的测量为动态测量。动态测量需考虑时间因素对测量结果的影响,应把被测量或误差作为随机过程来进行处理。

2. 误差

(1) 定义

误差 δ 是指测量值 x 与被测量的真值 x_0 之差,可正可负,反映了测量值偏

离真值的程度,表示为

$$\delta = x - x_0 \quad (1)$$

测量值是通过测量得到的被测量的值;真值是某一物理量在一定条件下所具有的客观的、不随测量方法改变的真实数值。一般情况下,真值是未知的,故误差的概念只具有理论意义。但是在某些特殊情况下,真值可认为是已知的,主要包括以下几方面。

① 理论真值:通过理论方法获得的真值。例如,三角形内角之和为 180° ;理想电容或电感构成的电路,电压与电流的相位差为 90° 等。

② 量学的约定真值:国际计量机构内部约定的确定真值。例如,7个SI基本单位量的确定,即长度单位米(m)、时间单位秒(s)、电流单位安培(A)、质量单位千克(kg)、热力学温度单位开尔文(K)、物质的量的单位摩尔(mol)、发光强度单位坎德拉(cd)。

③ 标准器的相对真值:当高一级的标准器的误差比低一级的标准器或普通计量仪器的误差小到一定程度后,高级标准器的指示值可以作为级别低的仪器的相对真值。

(2) 误差的分类

根据误差的性质,可将误差分为系统误差、随机误差和粗大误差三类。

① 系统误差。

在同一测量条件下,多次测量同一物理量时,大小和符号保持恒定或随条件的改变而按某一确定规律变化的误差,称为系统误差。一个完整的测量系统,通常由实验源、实验体、观测系统、实验环境4部分组成,因此系统误差来源可以归纳为以下几个方面。

a. 仪器设备、装置误差。

- 标准器误差 标准器是作为与被测量相比较时提供标准值的器具。例如,标准电池、标准量块、标准电阻等。由于使用条件或制作不够完善等原因,标准器本身会产生附加误差。

- 仪器误差 测量仪器是指能将测量转化为可直接观测的指示值或等效信息的计量器具。例如,天平、电桥等比较仪器;温度计、秒表、检流计等指示仪器。仪器设计制造不完善、调节使用不当、老化等原因都会造成测量误差。

- 附件误差 为使测量方便进行而使用的各种辅助配件,均属测量附件。例如,开关、导线、电源等各种辅助配件也会引起误差。

b. 环境误差。

由于各种环境因素,如温度、湿度、压力、振动、电磁场等,与要求的标准状态不一致而引起的测量装置和被测量本身的变化所造成的误差。

c. 方法误差。

由于测量方法或计算方法不完善、不合理等原因引起的误差。例如,瞬时测量时取样间隔不为零;用单摆测量重力加速度时,公式 $g = 4\pi^2 L/T^2$ 的近似性;用伏安法测电阻时,忽略电表内阻的影响等。

d. 人员误差.

由于测量人员分辨力有限,感官的生理变化、反应速度及固有习惯等原因引起的误差。例如,测量滞后与超前、读数时视线倾斜等。

从不同角度来说,系统误差又可分为不同种类。

按对误差的掌握程度来说,系统误差可分为已定系统误差和未定系统误差。已定系统误差的大小和符号是可以确定的,如千分尺、电表的零位误差,伏安法测电阻电表内阻引起的误差等,这类误差可以修正。未定系统误差是大小和符号不能确定,只能估计出大小变化范围的系统误差,如仪器误差。

按误差的变化规律来说,系统误差又可分为不变系统误差和变化系统误差。不变系统误差的大小和符号保持恒定不变。变化系统误差的大小和符号按某一确定规律变化,如线性、周期性等规律。

② 随机误差.

在同一测量条件下,多次测量同一物理量时,误差的绝对值时大时小,符号时正时负,以不可预知的方式变化,这种误差称为随机误差。随机误差是由测量过程中一些随机的或不确定的因素引起的。例如,人的感官灵敏度及仪器精度有限,实验环境(如温度、湿度、气流等)变化,电源电压起伏,微小振动等都会导致随机误差。由于引起随机误差的各种因素交错复杂,无法分辨修正,因此无法从实验中完全消除随机误差,一般通过多次测量来减小随机误差的影响。

就一次测量来看,随机误差是随机的,其大小和方向无法预知。但当测量次数足够多时,发现随机误差服从一定的统计规律,可按统计规律对随机误差进行估计。正态分布是最常见的分布之一。

服从正态分布的随机误差的概率密度函数为

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma^2}} \quad (2)$$

式(2)中, x 为测量值; x_0 为真值; f 表示在 δ (或 x) 附近区间内,被测量误差(或测量值)出现的概率。分布曲线如图 1 所示。

由图 1 可以看出,正态分布的随机误差具有以下特点。

a. 单峰性:绝对值小的误差比绝对值大的误差出现的机会多。

b. 对称性(抵偿性):大小相同,符号相反的

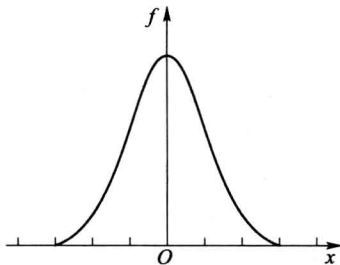


图 1 正态分布曲线

误差出现的机会相同。

c. 有界性:实际测量中,超过一定限度(如 $\pm 3\sigma$)的误差一般不会出现。

数学期望和方差是定量描述统计规律分布的两个重要参数。

根据式(2),满足正态分布的随机变量 x ,其数学期望为

$$E(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} xf(x)dx = x_0 \quad (3)$$

式(3)说明,对于无限次测量,测量值的数学期望等于真值,即随机误差具有抵偿性。

根据式(2),满足正态分布的随机变量 x ,方差 D 及标准差 σ 为

$$D(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - x_0)^2 f(x)dx = \sigma^2 \quad (4)$$

标准差为

$$\sigma = \sqrt{D(x)} \quad (5)$$

方差与标准差反映测量值与真值的偏离程度,或各测量值之间的离散程度。标准差或方差越小,离散程度越小,测量的精密度越高;反之,离散程度越大。

标准差 σ 的物理意义也可以从下面这一角度理解。

根据概率密度函数的含义,误差出现在 $[\delta, \delta + d\delta]$ 范围内的概率为 $f(\delta)d\delta$,则误差出现在区间 $[-\sigma, \sigma]$ 内的概率为

$$P = \int_{-\sigma}^{\sigma} f(\delta)d\delta = 68.3\% \quad (6)$$

式(6)表示,在一组测量数据中,有68.3%的数据测量误差落在区间 $[-\sigma, \sigma]$ 内。也可以认为,任一测量数据的误差落在该区间内的概率为68.3%。把 P 称为置信概率,而 $[-\sigma, \sigma]$ 称为68.3%的置信概率所对应的置信区间。

更广泛地,置信区间可由 $[-k\sigma, k\sigma]$ 表示, k 称为包含因子(或置信因子),可根据需要选取不同大小的值。例如,除了上述 $k=1$ 的情况,还经常取 $k=2$ 或3,这时的置信区间分别为 $[-2\sigma, 2\sigma]$ 和 $[-3\sigma, 3\sigma]$,对应的置信概率为95.5%和99.7%。

可以看出,如果置信区间为 $[-3\sigma, 3\sigma]$,则测量误差超出该区间的概率很小,只有0.3%,即进行1000次测量,只有3次测量误差可能超出 $[-3\sigma, 3\sigma]$ 。对于有限次测量(次数少于20次),超出该区间的误差可以认为不会出现,因此常将 $\pm 3\sigma$ 称为极限误差。

③ 粗大误差。

粗大误差又称疏失误差,它是由于工作人员疏失、仪器失灵等原因造成的超出规定条件下预期的误差。含有粗大误差的测量值明显偏离被测量的真值,在数据处理时,应首先检验数据,并将含有粗大误差的数据剔除。

应当指出,系统误差是测量过程中某一突出因素变化所引起的,随机误差是

测量过程中多种因素微小变化综合引起的,两者不存在绝对的界限,变化的系统误差数值较小时与随机误差的界限不明显。随机误差和系统误差有时可以相互转化。

(3) 误差的表示形式

① 绝对误差.

用绝对大小给出的误差定义为绝对误差,表示为

$$\text{误差 } \delta = \text{测量值 } x - \text{真值 } x_0 \quad (7)$$

绝对误差是带有单位的量,可正可负。绝对误差反映测量值偏离真值的大小与方向。

② 相对误差.

绝对误差与被测量真值的比值称为相对误差 E , 表示为

$$\text{相对误差 } E = \text{绝对误差} / \text{真值} \quad (8)$$

由于一般情况下真值未知,通常用测量值代替真值。相对误差是无量纲数,通常用“%”表示。相对误差可以反映测量的精度高低。

例 1 测量两个长度量,测量值分别为 $L_1 = 100.0 \text{ mm}$, $L_2 = 80.0 \text{ mm}$, 其测量误差分别为 $\delta_1 = 0.8 \text{ mm}$, $\delta_2 = 0.7 \text{ mm}$ 。试比较两个测量结果精度的高低。

$$\text{解: } E_1 = \frac{\delta_1}{L_1} \times 100\% = \frac{0.8}{100.0} \times 100\% = 0.8\%$$

$$E_2 = \frac{\delta_2}{L_2} \times 100\% = \frac{0.7}{80.0} \times 100\% = 0.9\%$$

从绝对误差的角度看,第一个量测量值的误差大于第二个量的误差;但从相对误差的角度来看,第一个量的测量精度却高于第二个量。

③ 引用误差.

引用误差定义为绝对误差与测量范围上限(或量程)的比值,即

$$\text{引用误差} = \text{绝对误差} / \text{测量范围上限} \quad (9)$$

引用误差通常用“%”表示,主要用于仪器误差的表示,实际是一种简化的和使用方便的仪器仪表的相对误差。仪表量程或测量范围内各点的引用误差一般不相同,其中最大的引用误差称为引用误差限,去掉引用误差的正负号及“%”后,称为仪器的准确度等级。电工仪表的准确度等级分别规定为 0.05、0.1、0.2、0.3、0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0 和 5.0 等 11 级。

例 2 检定 2.5 级,上限为 100 V 的电压表,发现 50 V 分度点的示值误差为 2 V,并且比其他各点的误差大,试问该电表的_{最大引用误差}为多少? 该表是否合格?

解: 由引用误差定义可知,该表的_{最大引用误差}为 $\frac{2 \text{ V}}{100 \text{ V}} = 2\%$ 。根据准确度