

大学物理实验

主 编 李书光
副主编 张亚萍 朱海丰



科学出版社

大学物理实验

主 编 李书光
副主编 张亚萍 朱海丰



科学出版社
北 京

内 容 简 介

本书是根据教育部《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》，总结多年来实验教学改革成果及经验基础上编写的。全书共5章，第1、2章着重介绍物理实验的基本理论知识、基本测量方法与操作技术，第3、4、5章分别按基础性实验、综合性实验、设计与研究性实验三个层次编写了45个实验以满足不同层次的学习要求。

本书可作为普通高等院校理工类学生大学物理实验的教材，也可作为从事物理实验教学的教师和实验工作者的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验/李书光主编. —北京:科学出版社,2012

ISBN 978-7-03-033733-7

I. ①大… II. ①李… 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037245号

责任编辑:窦京涛 王胡权 / 责任校对:李 影

责任印制:张克忠 / 封面设计:迷底书装

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>

北京市安泰印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

2012年3月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2012年3月第一次印刷 印张:25 1/2

字数:620 000

定价:46.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

随着科学技术的迅猛发展和物理实验教学改革的不断深入,大学物理实验教学从教学理念、教学内容到实验技术都在不断更新变化,新的理念、新的方法、新的实验技术和科研领域中的新成果已逐步在物理实验课中得到反映.本书是根据教育部制定的《非物理类理工学科大学物理实验课程教学基本要求》,结合工科院校大学物理实验教学的特点,汇集了物理实验教师和实验技术人员多年来的教学经验和教学改革成果,经过反复实践、不断改进、充实完善编写而成的.

本书的编写遵循了由简及难、循序渐进的教学和学习原则,各实验内容丰富,既有必做内容,也有选做内容,因材施教,满足不同层次学生的学习要求.每个实验都编写了相关知识介绍,使学生可以了解历史发展和相关应用,拓宽知识面.

全书共 5 章.

第 1 章“误差与数据处理基础知识”,讲述了测量误差、不确定度、有效数字等基本概念和数据处理的几种常用方法,这些内容是学习本课程必备的基础理论知识.

第 2 章“物理实验的基本测量方法与操作技术”,介绍了实验过程中经常出现的一些基本测量方法、仪器的调整技术和操作技术.

第 3 章“基础性实验”,共选入 20 个实验,以供选择学习.主要目的是学习基本物理量的测量、基本实验仪器的使用、基本实验技能和基本测量方法等,强化基本实验知识的学习和基本实验技能的训练.

第 4 章“综合性实验”,共选入 18 个实验.其中部分实验是多学科知识的综合应用,或者是多种实验方法的运用;部分实验引入了现代测量技术,如非电量电测技术、计算机数据采集与通信技术等;另外,增加了一部分与现代科技紧密结合的实验,如液晶、光纤、等离子体等.目的是提高学生对实验方法和实验技术的综合运用能力.

第 5 章“设计与研究性实验”,共选入 7 个实验.实验只给出研究对象、要求,并给予适当的原理提示,提供了部分参考文献,以培养学生查阅文献的能力、独立思考的能力、应用物理知识的能力和创新能力.

全书由李书光主持编写并统稿.内容编写具体分工如下:李书光编写第 1 章、第 2 章、第 3 章的实验 3.3、第 4 章的实验 4.1、4.4、4.5、4.7、4.13、4.14 和第 5 章的实验 5.7;张亚萍编写第 3 章的实验 3.2、3.4、3.5、3.7~3.10、3.12、3.15~3.18、3.20、第 4 章的实验 4.17、4.18 和第 5 章的实验 5.1~5.6;朱海丰编写第 3 章的实验 3.1、3.6、3.11、3.13、3.14、3.19 和第 4 章的实验 4.2、4.3、4.6、4.8~4.12、4.15、4.16.

实验教学是集体事业,本书的内容吸收了中国石油大学物理实验中心多年来的教改成果,许多同志对本书的编写和出版提供了帮助和宝贵的建议;同时在编写过程中,还参阅了兄弟院校的相关教材,吸收了许多先进经验,在此一并致以诚挚的谢意.

由于编者的水平有限,编写时间仓促,书中难免存在不当之处,望读者批评指正.

编 者

2011 年 10 月

目 录

前言

绪论	1
----	---

第 1 章 误差与数据处理基础知识	4
-------------------	---

1.1 测量与误差	4
-----------	---

1.1.1 测量	4
----------	---

1.1.2 误差与偏差	5
-------------	---

1.1.3 精密度、正确度、准确度	8
-------------------	---

1.2 误差的处理	9
-----------	---

1.2.1 随机误差的处理	9
---------------	---

1.2.2 系统误差的处理	11
---------------	----

1.2.3 粗大误差的处理	13
---------------	----

1.2.4 仪器误差	13
------------	----

1.3 有效数字	14
----------	----

1.3.1 有效数字的概念	14
---------------	----

1.3.2 学习有效数字应注意的几个问题	15
----------------------	----

1.3.3 间接测量有效数字的运算	15
-------------------	----

1.3.4 有效数字的舍入(修约)规则	16
---------------------	----

1.4 测量结果的不确定度评定	17
-----------------	----

1.4.1 测量不确定度	17
--------------	----

1.4.2 测量结果的表示	18
---------------	----

1.4.3 直接测量的结果及评定	18
------------------	----

1.4.4 间接测量的结果及评定	20
------------------	----

1.5 数据处理的几种常用方法	23
-----------------	----

1.5.1 列表法	23
-----------	----

1.5.2 作图法	24
-----------	----

1.5.3 逐差法	26
-----------	----

1.5.4 最小二乘法	28
-------------	----

1.6 Excel 软件处理实验数据简介	31
----------------------	----

1.6.1 启动 Excel	31
----------------	----

1.6.2 工作表、工作簿、单元格、区域等概念	31
-------------------------	----

1.6.3 工作表中内容的输入	32
-----------------	----

1.6.4 图表功能	33
------------	----

1.6.5 线性回归分析	34
--------------	----

思考与讨论	35
-------	----

习题	35
----	----

参考文献	36
第 2 章 物理实验的基本测量方法与操作技术	37
2.1 物理实验的基本测量方法	37
2.1.1 比较测量法	37
2.1.2 放大测量法	38
2.1.3 平衡测量法	39
2.1.4 补偿测量法	39
2.1.5 模拟测量法	39
2.1.6 转换测量法	40
2.2 物理实验的基本调整技术	41
2.3 物理实验的基本操作技术	42
2.3.1 先定性、后定量原则	42
2.3.2 电学实验的基本操作技术	42
2.3.3 光学实验的基本操作技术	44
思考与讨论	44
参考文献	45
第 3 章 基础性实验	46
实验 3.1 落球法测量油品的黏滞系数	46
实验 3.2 电热法测量油品的比热容	50
实验 3.3 空气比热容比的测量	56
实验 3.4 刚体转动惯量的测量	61
实验 3.5 液体表面张力系数的测量	68
实验 3.6 电学元件的伏安特性研究	75
实验 3.7 稳态法测量不良导体的导热系数	82
实验 3.8 金属材料线膨胀系数的测量	88
实验 3.9 动态法测量固体材料的杨氏模量	95
实验 3.10 液体的旋光特性研究	103
实验 3.11 模拟法测绘静电场	109
实验 3.12 霍尔效应及磁场分布的测量	116
实验 3.13 光栅衍射测量光的波长——分光计的调整与应用(一)	130
实验 3.14 光的色散特性的研究——分光计的调整与应用(二)	142
实验 3.15 光的等厚干涉的研究及应用	147
实验 3.16 迈克耳孙干涉仪及其应用	154
实验 3.17 牛顿第二定律的验证——气垫导轨实验(一)	163
实验 3.18 动量守恒定律的验证——气垫导轨实验(二)	174
实验 3.19 数字存储示波器的原理与使用	180
实验 3.20 直流电桥及其使用	197
参考文献	208
第 4 章 综合性实验	210
实验 4.1 铁磁材料磁滞回线和基本磁化曲线的测量	210

实验 4.2	半导体 PN 结的物理特性研究	218
实验 4.3	RC 串联电路的暂态过程研究	224
实验 4.4	等离子体特性研究	232
实验 4.5	弗兰克-赫兹实验	241
实验 4.6	光电效应与普朗克常量的测量	245
实验 4.7	密立根油滴实验与电子电荷的测定	251
实验 4.8	金属电子逸出功与电子荷质比的测量	257
实验 4.9	液晶电光效应	266
实验 4.10	光纤的光学特性研究	274
实验 4.11	激光全息照相	281
实验 4.12	阿贝成像原理与空间滤波	287
实验 4.13	热效率实验	293
实验 4.14	小型制冷装置的制冷性能研究	301
实验 4.15	太阳能电池的基本特性研究	306
实验 4.16	声速的测量	313
实验 4.17	光强分布的测量	321
实验 4.18	光的偏振特性研究	330
参考文献		339
第 5 章 设计与研究性实验		341
实验 5.1	重力加速度的测量	344
实验 5.2	热敏电阻温度特性研究及数字温度计的设计	348
实验 5.3	电表的改装与校准	354
实验 5.4	显微镜、望远镜和幻灯机的组装	362
实验 5.5	全息光栅的制作	366
实验 5.6	弹簧振子振动规律的研究	371
实验 5.7	交流电桥的使用与研究	377
参考文献		385
附录		387
附录 A	中华人民共和国法定计量单位	387
附录 B	常用物理数据	389
附录 C	常用电气测量指示仪表和附件的符号	395

绪 论

物理学是一门实验科学,在物理学的建立和发展中,物理实验起到了直接的推动作用.从经典物理到近代、现代物理,物理实验在发现新事物、建立新规律、检验理论、测量物理量等诸多方面发挥着巨大作用.随着现代科学技术的高度发展,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,解决了一大批生产和科研问题.

大学物理实验是一门重要的基础课程,是学生进入大学后系统地接受科学实验方法和实验技能训练的开端.通过学习,可以提高学生用实验手段发现、分析和解决问题的能力,激发学生的创新意识和创造力,培养和增强独立开展科学研究的素质.

一、大学物理实验课的主要任务

1. 掌握物理实验的基本知识,加深对物理学原理的理解

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. 培养与提高学生从事科学实验的能力

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、合格的实验报告或总结报告.

(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、研究能力.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,拟定具体的实施步骤.

3. 培养和提高学生从事科学实验的素质

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、共同进取的作风等.

二、大学物理实验课的基本程序

1. 实验预约

大学物理实验课程采用开放式教学方式,即学生可在实验室提供的上课时间和开设的实验项目内,根据自己的专业特点、兴趣爱好及时间安排,自己选择实验项目和实验时间.因此,做好上课前的预约工作是至关重要的.实验预约主要通过计算机网络实现,学生在预约时应仔细阅读开放实验的有关管理规定和预约指南,合理地安排好自己的实验课表,保证实验课的顺利进行.

2. 实验前的预习

预习是训练和提高自学能力的极好途径,为了在规定时间内高质量地完成实验内容,必须做好预习工作.

预习时,通过阅读实验教材及参考资料,重点做好以下方面工作:

- (1) 明确实验目的和主要任务,即明确实验要做什么的问题.
- (2) 理解实验原理和方法,这是完成实验任务的理论基础和根据.
- (3) 弄清实验方案、实验条件、实验步骤和关键技术,这是实验具体实施的关键.
- (4) 写好预习报告.预习报告主要内容是:实验名称,实验目的,简单实验原理,实验内容,数据记录表格等.预习报告是提炼文字内容和要点的一种基本训练,切忌盲目地去抄袭实验教材.

对于设计性实验,除了做好一般实验项目的预习工作以外,还应重点做好以下三方面工作:

- (1) 根据实验要求,查阅有关资料,写出实验原理,设计出实验方案.
- (2) 根据实验方案的要求,选择测量仪器、测量方法和测量条件.
- (3) 确定实验过程,拟定出详细的实验步骤.

3. 实验中的操作

实验操作是对动手能力、思维判断能力和综合运用能力训练的一个过程,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,主要做到以下几方面要求:

- (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,符合要求后,进行试做和正式操作、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),记录数据要注意有效数字和单位的准确性.
- (4) 实验完毕,将实验结果交任课老师审阅签字,确认无误后,方可整理仪器结束实验.

4. 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,也是将来撰写科技文章的基本训练.书写实验报告时,要简明扼要,文字通顺,字迹端正,图表规范.报告要独立完成并及时上交.

一份完整的实验报告,应包括以下内容:

- (1) 实验名称.
- (2) 实验者姓名、学号、实验日期.
- (3) 实验目的.
- (4) 实验原理:应简明扼要、文理通顺,并包括必要的计算公式和原理图等.
- (5) 实验仪器:给出实验主要仪器及其附件.
- (6) 实验数据:根据原始数据重新整理记录,必要时注明获得数据的环境条件.数据尽可能以表格形式给出.将原始数据附在报告最后.
- (7) 数据处理:包括处理方法及结果.
- (8) 结论及分析:包括实验结论、实验现象解释、误差分析、对实验的体会与建议、问题讨论、应用前景等.

第 1 章 误差与数据处理基础知识

在科学研究和实验过程中,往往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.但由于测量设备、环境、人员、方法等方面诸多因素的影响,使得测量值与真实值并不完全一致,这种差异在数值上表现为误差.随着科学水平的提高和人们的经验、技巧、专门知识的丰富,误差虽然可以被控制得越来越小,却始终不能被消除.因此,对实验中测量获得的数据,要选择合适的方法进行处理,并对其可靠性做出评价,否则,测量结果是没有价值的.

误差与数据处理理论已发展为一门学科,它涉及的内容丰富且较为复杂.在此,将简单介绍大学物理实验中常用的一些基本知识.

1.1 测量与误差

1.1.1 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.

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,包括建立单位、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.

测量结果表示由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,测量有不同的分类法.

1) 直接测量与间接测量

这是一种按照测量结果获得方法的分类法.

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(direct measurement);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(indirect measurement).

直接测量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,相应的被测物理量称为直接测量量;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.

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;体积、密度等物理量的测量往往采用间接测量.

2) 等精度测量与非等精度测量

这是一种按照测量条件的分类法。

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;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。

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;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。

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,一般都可近似为等精度测量。在大学物理实验学习阶段,主要考虑等精度测量。

3) 静态测量与动态测量

这是一种按照被观测对象在测量过程中所处状态的分类法。

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;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。

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;而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进行处理。

1.1.2 误差与偏差

1. 真值与误差

真值(true value)是指一个物理量在一定条件下所具有的客观存在、不随测量方法改变的量值。

误差是指测量值与被测量的真值之差。用式子表示为

$$\text{误差}(\delta) = \text{测量值}(\bar{x}) - \text{真值}(x_0) \quad (1-1-1)$$

误差可正可负,反映了测量值偏离真值的程度。真值一般情况下是未知的,所以误差的概念只具有理论意义。只是在某些特殊情况下,真值可认为是已知的,主要包括以下三种。

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) 计量学的约定真值

国际计量机构内部约定而确定的真值。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)、电流强度单位安培(A)、质量单位千克(kg)、热力学单位开尔文(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小于低一级的标准器或普通计量仪器的误差一定程度后,高一级标准器的指示值可以作为级别低的仪器的相对真值.

2. 最佳值与偏差

对真值为 x_0 的某一量 X 做等精度测量,得到一测量列 $x_1, x_2, \dots, x_n$,则该测量列的算术平均值为

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

由于算术平均值比任一次测量值的可靠性都要高,在只存在随机误差的情况下,算术平均值可作为最佳值,称为近似真值. 测量值与算术平均值之差称为偏差(或残差). 用式子表示为

$$\text{偏差}(v_i) = \text{测量值}(x_i) - \text{平均值}(\bar{x}) \quad (1-1-3)$$

3. 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(systematic error)

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.

按对误差掌握程度,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,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.

系统误差主要来源有以下几个方面:

(1) 仪器与装置误差

由于使用条件或设计制作不够完善等原因,各种标准器(如标准电池、标准量块、标准电阻等)、各种测量仪器(如天平、电桥等比较仪器,温度计、秒表、检流计等指示仪器)造成的测量误差,以及各种辅助配件(如开关、导线、电源等)引入的误差.

(2) 环境误差

由于各种环境因素,如温度、湿度、压力、震动、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.

(3) 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.

(4) 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、读数倾斜等。

2) 随机误差(random error)

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微小变化因素引起的。例如,人的感官灵敏度及仪器精度有限,实验环境(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因素复杂,又往往交叉在一起,不能分开,因此,随机误差是无法控制的,无法从实验中完全消除,一般通过多次测量来达到减小的目的。

从一次测量来看,随机误差是随机的。但当测量次数足够多时,随机误差服从一定的统计规律,可按统计规律对误差进行估计。

3) 粗大误差(gross error)

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,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,随机误差和系统误差有时可以相互转化。

4. 误差的表示形式

1) 绝对误差(absolute error)

用绝对大小给出的误差定义为绝对误差。用式子表示为

$$\text{绝对误差}(\delta) = \text{测量值}(x) - \text{真值}(x_0) \quad (1-1-4)$$

绝对误差是带有单位的数,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(relative error)

绝对误差与被测量真值的比值称为相对误差。用式子表示为

$$\text{相对误差}(E_r) = \text{绝对误差} / \text{真值} \quad (1-1-5)$$

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 1-1-1 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。

$$\text{解} \quad E_{r1} = \frac{\delta_1}{L_1} \times 100\% = \frac{0.8}{100.0} \times 100\% = 0.8\%, E_{r2} = \frac{\delta_2}{L_2} \times 100\% = \frac{0.7}{80.0} \times 100\% = 0.9\%$$

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(fiducial error)

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

$$\text{引用误差} = \text{绝对误差} / \text{测量范围上限} \quad (1-1-6)$$

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(accuracy class). 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,共 11 级.

例 1-1-2 检定 2.5 级,上限为 100V 的电压表,发现 50V 分度点的示值误差为 2V,并且比其他各点的误差大,试问该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 $\frac{2\text{V}}{100\text{V}} = 2\%$. 根据准确度等级的含义, $2\% < 2.5\%$,显然该电表合格.

1.1.3 精密度、正确度、准确度

评价测量结果,有时会用到精密度、正确度和准确度这三个概念,使用时应注意区别.

(1) 精密度(precision)

精密度用来描述等精度测量结果中各测量值之间的接近程度,它反映随机误差的大小.

(2) 正确度(validity)

正确度用来描述测量结果与真值的偏离程度,它反映系统误差的大小.

(3) 准确度(accuracy)

准确度又称精确度,它用来反映系统误差与随机误差综合大小程度. 准确度高说明测量结果既精密又正确.

通过图 1-1-1 打靶弹着点的分布图,可以形象地说明上述三个概念. 图中(a)表示精密度高,正确度低;图(b)表示正确度高,精密度低;图(c)表示正确度与精密度都高,即准确度高,或精确度高.

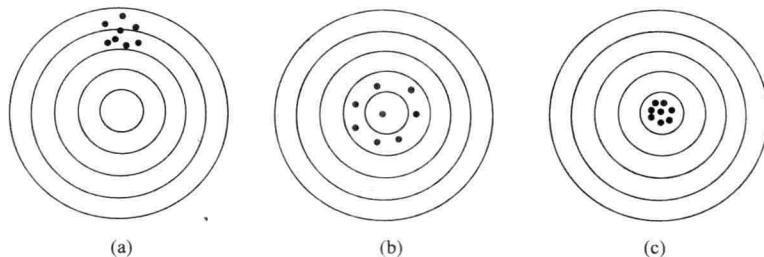


图 1-1-1 精度示意图

1.2 误差的处理

1.2.1 随机误差的处理

1. 随机误差的分布及其特点

尽管单次测量时随机误差的大小与正负是不确定的,但对多次测量来说却服从一定的统计规律.随机误差的统计分布规律有很多,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(probability density)函数为

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

或

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

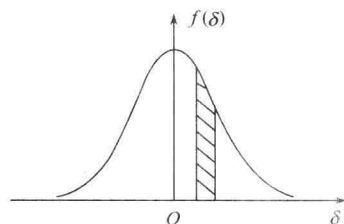


图 1-2-1 正态分布曲线

式中, x 为测量值; x_0 为真值; δ 为误差; f 表示在 δ (或 x) 附近单位区间内,被测量误差(或测量值)出现的概率密度.分布曲线如图 1-2-1 所示.

根据概率密度函数的含义,数学上可以证明有

$$E(\delta) = \int_{-\infty}^{+\infty} \delta f(\delta) d\delta = 0 \quad (1-2-2)$$

或

$$E(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} x f(x) dx = x_0 \quad (1-2-2')$$

式(1-2-2)说明,随机误差具有抵偿性(或对称性).

$$D(\delta) = \int_{-\infty}^{+\infty} \delta^2 f(\delta) d\delta = \sigma^2 \quad (1-2-3)$$

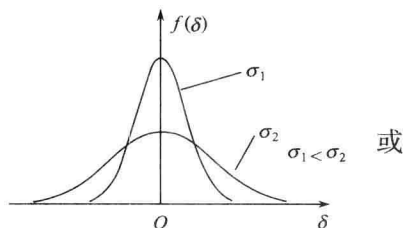


图 1-2-2 σ 对曲线的影响

$$D(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - x_0)^2 f(x) dx = \sigma^2 \quad (1-2-3')$$

式(1-2-3)说明, σ 是反映测量值与真值偏离程度的一个量,

称为标准差. σ 越小,离散程度越小,测量的精密度高;反之,离散程度越大.如图 1-2-2 所示.

误差出现在区间 $[-\sigma, \sigma]$ 内的概率为

$$P = \int_{-\sigma}^{\sigma} f(\delta) d\delta = 68.3\% \quad (1-2-4)$$

式(1-2-4)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区间 $[-\sigma, \sigma]$ 内的概率为 68.3%.把 P 称作置信概率(confidence probability),而 $[-\sigma, \sigma]$ 称为 68.3% 的置信概率所对应的置信区间(confidence interval).

如果置信区间为 $[-3\sigma, 3\sigma]$,对应的置信概率为 99.7%,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(一般测量次数少于 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(limit error).

由此可以得到,正态分布的随机误差具有以下特点:

- ① 单峰性——绝对值小的误差比绝对值大的误差出现的机会多;
- ② 对称性(抵偿性)——大小相同、符号相反的误差出现的机会相同;
- ③ 有界性——实际测量中,超过一定限度(如 3σ)的绝对值更大的误差一般不会出现.

2. 算术平均值与标准偏差

对真值为 x_0 的某一量 X 做等精度测量,得到一测量列 $x_1, x_2, \dots, x_n$,则该测量列的算术平均值为

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

若测量数据中只存在随机误差,由正态分布随机误差的对称性特点可知,在测量次数 $n \rightarrow \infty$ 时,有算术平均值

$$\bar{x} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = x_0 \quad (1-2-6)$$

和测量列标准差

$$\sigma = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_0)^2}{n}} \quad (1-2-7)$$

在实际测量中,真值往往是不可知的.因此,对于等精度测量列,可以用算术平均值作为真值的最佳估计值.而测量列标准差也需通过估计获得.估计标准差的方法很多,最常用的是贝塞尔法,即子样标准差.公式为

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2}{n-1}} \quad (1-2-8)$$

式中 $v_i = x_i - \bar{x}$,称为残差(residual error).

进行有限次测量时,算术平均值也是一个随机变量,进行多组等精度重复测量时得到的算术平均值具有离散性.描述该离散性的参数是算术平均值的标准差,由误差理论可以证明,算术平均值标准差与测量列(或单次测量)标准差之间的关系为

$$S_{\bar{x}} = \frac{S_x}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (1-2-9)$$

由式(1-2-9)可看出,平均值的标准差比单次测量的标准差小.随着测量次数的增加,平均值的标准差越来越小,测量精密度越来越高.但当测量次数 $n > 10$ 以后,增加次数对平均