

汪建章 马涛 周融 潘洪明 编著

陈守川 主审



工科物理 实验教程

浙江大学出版社

工科物理实验教程

汪建章 马 涛 周 融 潘洪明 编著

陈守川 审

浙江大學出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

工科物理实验教程 / 汪建章等编著. —杭州: 浙江大学出版社, 2001. 2

ISBN 7-308-02645-0

I. 工... II. ①汪... III. 物理学-实验-高等学校-教材 IV. 04-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 03422 号

责任编辑 陈晓嘉
出版发行 浙江大学出版社
(杭州浙大路 38 号 邮政编码 310027)
(E-mail: zupress@mail.hz.zj.cn)
(网址: <http://www.zjupress.com>)
排 版 浙江大学出版社电脑排版中心
印 刷 浙江上虞印刷厂
开 本 787mm×1092mm 1/16
印 张 11
字 数 282 千字
版 印 次 2001 年 2 月第 1 版 2001 年 2 月第 1 次印刷
印 数 0001—3080
书 号 ISBN 7-308-02645-0/O · 258
定 价 16.00 元

前 言

物理实验是对高等院校工科专业学生进行科学实验基本训练的一门独立的必修基础课。本书根据原国家教委颁发的《高等工业学校物理实验课程教学基本要求》，以原有的《物理实验讲义》为基础，吸取了目前高校物理实验的一些新实验、新思想，结合普通高校物理实验教学改革和实际情况而编写。

作为科学实验基本训练的物理实验课，其实验的方法、思想、仪器和技术已经被普遍地应用在自然科学和技术部门的各个领域。因此，本书作为大学基础实验课的教材，其特点是：既能让学生通过实验学习到科学实验的基础知识，观察到实验中的各种现象，提高学生独立进行工作的能力；又能使学生在实验方法的考虑、测量仪器的选择、测量条件的确定等方面受到训练，从而充分了解到理论是怎样与实际相结合的。

本书前三章以较多的篇幅讲述了进行科学实验的基础知识，目的是为了让学生一开始就接受系统、正规的实验训练，为今后的科学实验打下坚实的基础。后五章安排了力学、热力学、电磁学、光学、近代物理学共 30 个实验（包括设计性实验和选做实验）。针对每个实验，要求学生注意到系统误差、随机误差在实验中产生的原因，消除系统误差和估算随机误差的方法，知道实验方法、测量方法在物理实验中是如何体现的。在实验内容的安排上，有些细节问题，留给学生去分析、思考，以便发挥他们的主动性。每个实验前都有简单扼要的前言，作为实验知识面的扩充。实验后留有思考题，供学生对实验内容作进一步的分析和讨论。

本书由汪建章主编，马涛、周融、潘洪明参与编写了部分实验内容。

浙江大学陈守川教授在百忙中仔细审阅了全部书稿，并提出了许多宝贵的意见，在此表示深切的谢意！

顾伟珠副教授对本书的编写提出了不少建议，对此谨表感谢！

由于编者水平有限，书中不足之处，恳请读者批评指正。

编 者
2000 年 10 月

目 录

工科物理实验课程教学基本要求	1
第一章 实验误差理论基础	
第一节 基本概念	3
第二节 系统误差	6
第三节 随机误差	9
第四节 直接测量误差的估算	13
第五节 间接测量误差的估算	14
第六节 测量值的不确定度	17
第七节 单位	20
第八节 有效数字的计算	21
第九节 实验结果的表达	23
第二章 实验数据处理方法	
第一节 列表法	26
第二节 作图法	27
第三节 逐差法	28
第四节 回归法	29
第三章 实验基础知识	
第一节 实验的种类	35
第二节 基本实验方法	37
第三节 基本测量方法	38
第四节 实验仪器的配置	41
第五节 设计性实验	43
第六节 实验报告的撰写	43
第四章 力学与热力学实验	
实验一 密度测量	50
实验二 金属丝杨氏弹性模量的测量	54
实验三 刚体转动惯量的测定	59
实验四 驻波法测音叉的频率	62
实验五 电热法测热功当量	65
实验六 用混合法测量冰的熔解热	68

第五章 电磁学实验

实验七 伏安法研究	73
实验八 模拟静电场	78
实验九 直流电桥	82
实验十 直流电位差计	86
实验十一 霍尔效应法测磁场	90
实验十二 热敏电阻温度系数的测定	94
实验十三 示波器的使用	97
实验十四 声速的测定	104

第六章 光学实验

实验十五 摄影技术	108
实验十六 透镜曲率半径的测定	113
实验十七 分光计的原理与调整	116
实验十八 三棱镜折射率的测定	120
实验十九 光栅衍射测光波波长	123

第七章 近代物理实验

实验二十 迈克尔逊干涉仪	127
实验二十一 全息摄影	130
实验二十二 夫兰克-赫兹实验	134
实验二十三 光电效应法测定普朗克常数	138
实验二十四 光谱定性分析	143

第八章 选做实验

实验二十五 用混合法测固体比热容	148
实验二十六 金属电阻温度系数的测定	151
实验二十七 二极管伏安特性曲线的测绘	152
实验二十八 设计和组装欧姆表	154
实验二十九 硅光电池的特性曲线	158
实验三十 密立根油滴法测定电子电荷	160

附表

附表1 国际单位制的基本单位和辅助单位	164
附表2 国际单位制中具有专门名称的导出单位	164
附表3 基本物理常数	165
附表4 用于构成十进倍数和分数单位的词头	165
附表5 常温下几种物质相对于空气的折射率	165
附表6 20℃时常见物质的密度	166
附表7 20℃时部分金属的杨氏模量	166

附表 8	常见光源的谱线波长	166
附表 9	不同温度下干燥空气中的声速	167
附表 10	某些金属和合金的电阻率及温度系数	167
附表 11	常见物质的比热容	167

参考书目

工科物理实验课程教学基本要求

科学实验是科学理论的源泉,是工程技术的基础,作为培养德智体美全面发展的高级工程技术人才的高等学校,不仅要使学生具有比较深广的理论知识,而且要使学生具有较强的从事科学实验的能力,以适应科学技术不断进步和社会主义建设迅速发展的需要。

一、物理实验课程的地位、作用和任务

物理实验是对高等学校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方法和实验技能训练的开端,是工科类专业对学生进行科学实验训练的重要基础。

物理学是一门实验科学,因此物理实验教学和物理理论教学具有同等重要的地位。它们既有深刻的内在联系并相互配合,又有各自的任务和作用。

本课程应使学生在中学物理实验的基础上,按照循序渐进的原则,学习物理实验的知识和方法,得到实验技能的训练,从而初步了解科学实验的主要过程与基本方法,为今后的学习和工作奠定良好的实验基础。

本课程的具体任务是:

1. 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。

2. 培养、提高学生的科学实验能力,其中包括:

- (1)能够通过阅读实验教材或资料,做好实验前的准备。
- (2)能够借助教材或仪器说明书正确使用常用仪器。
- (3)能够运用物理学理论对实验现象进行初步的分析判断。
- (4)能够正确记录和处理实验数据,绘制曲线,说明实验结果,撰写合格的实验报告。
- (5)能够完成简单的具有设计性内容的实验。

3. 培养、提高学生的科学实验素质。其中包括:理论联系实际、实事求是的科学作风,严肃认真的工作态度,主动研究的探索精神,遵守纪律、团结协作和爱护公共财产的优良品德。

二、教学基本要求

1. 在教学中适当地介绍一些物理实验史料和物理实验在工程技术中的应用知识,对学生进行辩证唯物主义世界观和方法论的教育,使学生了解科学实验的重要性,明确物理实验课程的地位、作用和任务。

2. 在整个实验教学过程中,教育学生养成良好的实验习惯,爱护公共财产,遵守安全制度,

* 摘编自原国家教委高等教育司《工科本科基础课程教学基本要求》1995年修订版。

树立优良的学风。

3. 要求学生了解测量误差的基本知识,具有正确处理实验数据的初步能力。其中包括下列内容:测量误差的基本概念;直接测量的误差估算,如用标准偏差(或平均偏差)、仪器误差、估计误差等进行估算;间接测量的误差估算;处理实验数据的一些重要方法,如列表法、作图法、逐差法和回归法等。

在教学中注意系统误差的分析,让学生了解系统误差消、减的方法。

4. 通过物理实验的基本训练,要求学生做到:

(1)能够自行完成预习、进行实验和撰写报告等主要实验程序。

(2)能够调整常用仪器装置,并基本掌握常用的操作技术。例如:零位调整;水平、铅直调整;光路的调整,消视差调节;逐次逼近调节;根据给定的电路图正确接线等。

(3)了解物理实验中常用的实验方法和测量方法。例如:比较、放大、转换、模拟、补偿、平衡和干涉等方法。

(4)能够进行常用物理量的一般测量。例如:长度、质量、时间、热量、温度、电流强度、电压、电动势、电阻、磁感应强度、折射率等。

(5)了解常用仪器的性能,并学会使用方法。例如:测长仪器、计时仪器、测温仪器、变阻器、电表、直流电桥、直流电位差计、通用示波器、低频信号发生器、分光计、常用电源和常用光源等。

在进行以上各项基本训练的过程中,重视对物理现象的观察和分析,引导学生运用理论去指导实践、解决实验中的问题。

5. 开设一定数量的近代物理、应用性或综合性物理实验,以使学生理解近代物理的概念,了解物理实验技术的应用,提高进行综合实验的能力。

6. 开设少量的设计性实验或具有设计性内容的实验,使学生在实验方法的考虑、测量仪器的选择和配合、测量条件的确定等方面接受初步训练。

7. 随着计算机的逐渐普及,应在实验教学中适当使用计算机。

第一章 实验误差理论基础

任何测量和实验都受到误差的影响,估算并分析误差是科学实验过程中极为重要的组成部分。有关误差的理论及其应用已发展为一门专门的学科。作为进行科学实验基本训练的物理实验课,首先必须掌握正确的和最基本的误差理论知识,它包含误差的成因及其分类、减少测量误差的基本方法,以及误差的估算与测量结果的正确表达。

第一节 基本概念

一、真值与算术平均值

(一)真值

反映被测量所具有的客观的真实数值称为真值,测量的目的就是要力求得到测量量的真值。真值是个理想的概念,一般不可能准确知道。下列几种情况可视为真值:

(1)理论值:如三角形的内角和为 180° 。

(2)公认值:世界公认的一些常量值,如普朗克常数、阿伏加德罗常数。

(3)计量学约定真值:如国际及国家计量部门规定的长度、时间、质量等标准值。

(4)相对真值:用准确度高一个数量级的仪器校准的测定值,可视为真值。校准仪器的误差应比测量仪器的误差至少小一个数量级,通常规定:校准仪器误差与测量用的仪器误差之比,应等于 $1:3 \sim 1:20$ 。

(二)算术平均值

实际上,绝大多数的测量都不知其真值,但根据统计学的原理,在一定条件下,对某一不变的测量量 N 进行无限次(n 次)重复测量时,其算术平均值将无限接近于真值,故可将多次测量的算术平均值视为测量量真值的最佳代表值,即

$$\bar{N} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_i \quad (1-1-1)$$

式中 N_i 为第 i 次的测量值。必须指出,这样的计算方法是以等精度测量为前提的。

二、误差与偏差

任何实验结果都不可避免地存在着误差,一个没有标明误差的实验结果几乎没有用,因为人们将对它的可靠性提出疑问。所以,误差是评价测量结果必不可少的数据。

实验测量值与客观实际值(真值)的不一致,就是所谓的误差。

定义 测量值与其真值之差称为该测量量的误差。

误差可表示为:

$$\Delta N = N - N_0$$

式中: N 为测量值; N_0 为被测量的真值; ΔN 为误差(可正可负)。

由于在一般情况下真值不可能准确知道, 误差 ΔN 也就不可求, 因此在实际测量中, 用算术平均值替代真值, 把所求出的差称为偏差。

定义 测量值与其算术平均值之差称为该测量量的偏差。

以 V 表示偏差:

$$V_i = N_i - \bar{N} \quad (1-1-2)$$

式中: V_i 为第 i 次测量值 N_i 的偏差(同样 V_i 可正可负)。

显然, 偏差是可以由测量值来直接计算的, 在误差估算中经常要使用。当测量次数 $n \rightarrow \infty$ 时, 可以证明偏差具有如下性质:

$$\sum_{i=1}^n V_i = 0$$

三、测 量

测量就是用一定的量具或仪器, 通过一定的实验方法直接或间接地找出待测物理量的数值和单位, 即把待测量与一个选作标准的同类量进行比较, 定出它是标准量的多少倍。

(一)直接测量与间接测量

测量分直接测量和间接测量。用量具或仪表直接测出某物理量的测量, 称为直接测量; 对于大多数物理量来讲, 没有直接读数的仪表, 只能用间接的办法进行测量, 即需要根据某些原理、公式, 由直接测量通过数学运算才能得到测量结果, 这一类的测量称为间接测量。

对物理实验来讲, 多数都是间接测量, 但它们又都建立在直接测量的基础上。随着科学技术的发展, 原来很多只能间接测量的物理量, 现在都可以直接测量了。如电功率可用功率表来直接测量, 速度可用速度表来直接测量等。

(二)等精度测量

指在测量条件(测量人员、测量工具、测量方法、测量环境等)相同的情况下进行的一系列重复测量。

(三)不等精度测量

对被测量进行的重复测量, 可能由于测量人员的变动、测量环境的改变或仪器的不同, 而使各测量数据的可信赖程度不同, 这种测量称为不等精度测量。一般是指在科学研究及重要的精密测量中, 为获得更可靠的测量结果而进行的测量。

物理实验中进行的重复测量都认为是等精度测量。

四、单 位

一个测量数据不同于一个数值, 前者是由测量值和单位两部分组成的, 测量数据只有赋予了单位, 才能有具体的物理意义。测量所得值应包括数值(大小)和单位, 两者缺一不可。

以一些基本量的单位为基础, 通过各种物理量之间的联系便可组成单位制。国际单位制“SI”是当前常用的一种计量单位制, 它的优点是构成原则科学, 大部分单位都是实用单位, 并

且可涉及几乎所有专业领域。

五、误差的分类

根据经典误差理论,误差按其性质主要可分为系统误差和随机误差两大类。我们讨论、分析误差是按其性质分别进行的,在没有随机误差的情况下研究系统误差,在系统误差可以不考虑的情况下研究随机误差。实际上,对任何一次实验都既存在着系统误差又存在着随机误差,只有一种误差的实验是不存在的。只不过有的实验以系统误差为主,有的实验以随机误差为主。

(一)系统误差

大小与方向皆固定不变或变化规律确定的误差称为系统误差。产生系统误差的原因有:

(1)仪器装置:由仪器设计、制造、装配等方面引起的误差,如零点不准、天平不等臂长等引起的误差。

(2)测量环境:如由温度、湿度、气压、电磁场等定向或规律变化而引起的误差。

(3)测量人员的感官功能或习惯引起的误差:如有人计时超前,而有人却滞后。

(二)随机误差

在同一条件下,多次测量同一量值时,误差的绝对值和符号以不可预定的方式变化,且其数学期望值为零的误差称为随机误差(也称偶然误差)。

物理实验中,对随机误差进行正确地分析和估算是十分重要的。

六、精密度、正确度、准确度

评价测量结果时,常用到精密度、正确度和准确度三个概念。

(1)精密度是反映随机误差大小的程度,是指测量结果的重复性。精密度高,测量的重复性好,各次测量误差的分布密集,其随机误差就小;反之,精密度低的测量结果,其重复性差,随机误差就大。

(2)正确度是反映系统误差大小的程度,是指测量结果的正确性。它描述测量平均值接近真值的程度。当测量者在测量仪器和测量方法选定后,测量的正确度就确定了。精密度和正确度两个概念不能混淆,精密度高不一定正确度高。

(3)准确度是反映系统误差和随机误差综合大小的程度。如果测量结果既精密又正确,即随机误差与系统误差均小,则说明测量结果准确度高。

将射击打靶的结果与某次测量的结果进行比较,如图 1-1-1 所示。图(a)表示精密度与正确度均好,即准确度高;图(b)表示精密度好但正确度不高;图(c)表示精密度和正确度都不高。

七、不确定度

不确定度是表征被测量的真值在某个数值范围内的估计值,它表示真值有多大的概率会出现在某个范围内。目前,关于不确定度的计算与合成,在某些问题上尚有不同的观点,有待于进一步深入讨论。在本书中,我们采用经典的误差理论来表示测量值的不确定度。

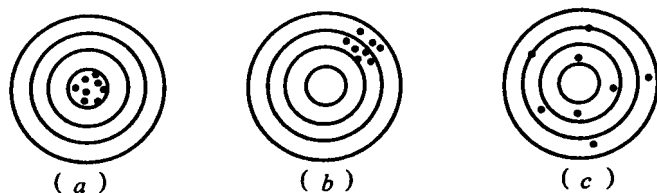


图 1-1-1 测量结果准确程度与射击打靶类比

第二节 系统误差

系统误差是因仪器、方法或理论、环境及观测人员的习惯产生的,它的大小直接影响到实验的结果,因此在实验中应首先消除它的影响,或设法予以修正。只有当系统误差减小到可以忽略或它的影响小于或等于随机误差的情况下,才能保证实验有可靠的结果。系统误差的特征是它的确定性。发现、修正和消除系统误差是物理实验中的一个重要内容。

一、发现系统误差的方法

一般情况下,系统误差是不能由多次测量来发现的。针对系统误差的来源,必须仔细地研究测量理论和方法的每一步推导(是否有问题或取近似),检验或校准每一件仪器(是否有仪器误差),分析每一个实验条件(是否震动,是否与温度、气压、湿度有关,周围是否有磁场、电场对测量产生影响等等),这些因素都对实验结果有影响。

查找系统误差的常用方法有三种。

(一)对比法

(1)实验方法的对比:用不同方法测同一量,看结果是否一致。如果不一致,就存在系统误差。

(2)仪器的对比:如用两只同类电表接入同一电路测同一量,若读数不一致,说明至少有一只电表不准。如果其中一只电表是标准表,就可以找出修正量。

(3)改变测量方法:如测与电流相关的物理量时,电流增加时测一组,电流减小时再测一组,将两组数据进行比较,看结果是否一致。

(4)改变实验条件:如改变电路中某元件的位置,磁测中使磁性物体靠近等,看结果是否一致。

(5)改变实验者:如换实验者进行实验,看结果是否一致。

(二)理论分析法

(1)分析测量依据的理论公式中所要求的条件与实际情况是否有差异。如在金属丝杨氏弹性模量测量的实验中,实验理论公式要求的条件是:标尺的刻度、望远镜的光轴、反射镜中标尺刻度的象三者应在同一平面上,但在实验中要做到这一要求是较困难的。

(2)分析仪器所要求的技术条件是否达到。如在分光计实验中,要求望远镜与刻度盘的旋

转角度完全相同,但分光计结构不能达到这个要求,这使望远镜与刻度盘的旋转角度不完全相同。为消除由此带来的系统误差,在仪器的结构上设置了两个游标读数盘。

(三)分析数据法

理论上,随机误差是遵循统计分布规律的,如果测量结果不遵循统计分布规律,则存在系统误差。

(1)将一组测量值按先后次序排列,如果发现偏差的大小有规律地向一个方向变化,前后的偏差是递增(或递减)的(图 1-2-1),则说明该测量存在线性系统误差。

(2)将测量列中各测量值按测量次序排列,如果发现其偏差的符号作有规律的交替变化(图 1-2-2),则该测量列含有周期性的系统误差。

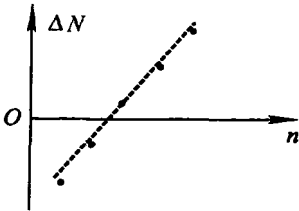


图 1-2-1 线性系统误差

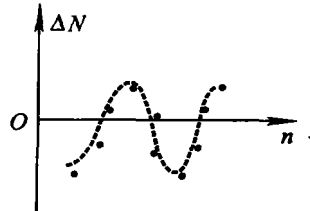


图 1-2-2 周期性系统误差

(3)在某些测量条件下,测量列的各测量值的偏差均为某一固定的符号(如正号),若条件变化后,测得各测量值的偏差符号发生变化(全为负号),则该测量列有固定的随测量条件变化而消失或出现的系统误差。

二、系统误差的分类及其消除办法

系统误差按其出现的规律,可分为定值系统误差和变值系统误差。消除系统误差的途径,首先是设法使它不产生,如果做不到,那么就修正它,或在测量中设法抵消它的影响。系统误差的修正和消除,一般没有固定不变的方法。对于一个实验来讲,要考虑从实验理论、实验方法、实验仪器到环境条件中的每一个因素的影响,针对具体情况,分析其原因,找出不同的解决方法,然后采取措施一一予以修正和消除。

(一)定值系统误差及其校正

定值系统误差是指大小(数值)和方向(符号)已经确定的系统误差。按人们对它的掌握程度,又可分为已知定值(已定)系统误差与未知定值(未定)系统误差。

1. 已定系统误差

当以高精度仪器校准测量仪器时,尽管测量仪器各分度的示值误差大小与方向皆不相同,但它们皆为定值。这类系统误差被称为定值系统误差中的已定系统误差。

由于已定系统误差是确定了大小与方向的误差,校正时只要从测得值中减去即可。即某分度 i 处的测得值减去该分度处的已定系统误差,就得到经校正后的测得值 N_i :

$$N_i = N_{i\text{测}} - \Delta_{i\text{已定}}$$

如:某量具的零位误差为 Δ_0 ,它是已定系统误差,则该量具的任何读数皆应作此修正:

$$N_i = N_{i\text{测}} - \Delta_0$$

2. 未定系统误差

指数值没有确定或无法确定的定值系统误差。如未经严格校准的仪器,我们并不知道它每个分度上的具体系统误差的大小,但它却是个定值。对未定系统误差可用下列方法予以消除。

• 抵消法

采用改变测量中的某些条件(如测量方向),使在两种条件下测量产生的系统误差大小相等符号相反,此时取平均值即可消除此未定系统误差。

如在外界强磁场作用下,仪表的读数会产生附加误差,若把仪表转动 180° 再测一次,外磁场将对读数产生相反的影响而产生负的附加误差。两次测量结果取平均,即可消除系统误差。再如用电桥测量时,也可以采用这个方法消除热电势引起的系统误差,此时,可以把电桥电源先正接测量一次,再反接测量一次。

• 交换法

将测量中的某些条件相互交换(如交换被测物的位置),使交换前后产生的系统误差大小相等方向相反,从而消除系统误差。

如在天平上称物体质量,由于天平臂长 L 不相等,存在未知定值系统误差。测量时,若待测量 N 与标准砝码 P 平衡,则 $N = P(L_1/L_2)$ 。将被测量 N 与标准砝码交换位置,此时 N 与标准砝码 P' 平衡,于是 $N = P'(L_2/L_1)$,若取 $N = \sqrt{PP'}$,则可消除此系统误差。

• 替代法

保持测量条件不变,用某一已知标准量替换被测量,再作测量,则可消除系统误差。

如用伏安法测电阻,由于电表内阻的影响,实验电路存在定值系统误差。测量时,若电源电压稳定,电压表、电流表的测量值分别为 U_R 和 I_R ,用一标准电阻箱替代被测电阻,调节标准电阻箱的大小,使电压表、电流表的示值仍为 U_R 和 I_R ,此时标准电阻箱的读数值即为待测电阻的阻值。这样可消除电表内阻对测量结果的影响,测量误差取决于所用标准电阻箱是否准确。

(二) 变值系统误差及其校正

该系统误差数值是变化的,按其变化规律大致可分为以下三种。

1. 线性系统误差

误差的数值随着测量量的增大而变化,而且其变化呈线性关系(如图 1-2-1 所示)。对于此类线性系统误差,常用对称测量法予以消除。如在金属丝杨氏弹性模量测量实验中,由金属丝弹性滞后效应引起的系统误差呈线性关系,若采用加砝码和减砝码的对称测量法,即可消除因金属丝的弹性滞后效应而引起的系统误差。

2. 周期性系统误差

指误差的大小与符号呈周期性变化(如图 1-2-2 所示)的一类误差。校正方法是:按系统误差变化的半个周期间隔取值,每周期内取两个测量点,然后取其平均。这种方法可用来消除如测角仪器中由于转轴偏心而引起的周期性系统误差。

3. 按照复杂规律变化的系统误差

这是一种数值变化规律比较复杂的系统误差,如由晶体管放大电路零点漂移造成的误差呈对数规律,标准电阻因温度变化造成的误差呈幂指数规律等。对于该类系统误差,其消除的方法比较复杂,我们不做要求。

三、系统误差的传递与合成

直接测量的系统误差会影响间接测量的测量结果。已定系统误差会使直接测量的结果偏大或偏小,从而也使得间接测量的结果偏大或偏小。几项系统误差的影响可能加大测量结果的误差,也可能抵消一部分测量结果的误差。所以,已定系统误差是代数合成。若间接测量量与直接测量量之间的函数关系为 $y=f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, 则:

$$\Delta y = \sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i$$

式中直接测量的系统误差 Δx_i 与传递系数 $\frac{\partial f}{\partial x_i}$ 均可正可负。

对未定系统误差来讲,因其直接测量的系统误差是未知的,为可靠起见,我们把各项系统误差取绝对值相加,作为最大的系统误差,即:

$$\Delta y = \sum_{i=1}^n \left| \frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i \right|$$

四、仪器误差

测量是用仪器进行的,有的仪器较粗糙,有的较精确,但任何仪器都存在误差。不同的是,粗糙的仪器其仪器误差大,精确的仪器其仪器误差小。因此,仪器误差对实验结果的影响是不可忽略的。

仪器误差是指在正确使用仪器的条件下,测量值与被测物理量的真值之间可能产生的最大误差。

仪器误差通常由制造厂家或计量部门确定,一般都标在仪器的标牌或说明书上。有级别等级的仪器,应按其级别误差公式计算。

第三节 随机误差

随机误差是由许多不稳定的随机因素引起的,如因每个人的估读能力不一致、电源电压的突然波动等偶然因素造成的误差等。随机误差的特征是它的随机性。

一、随机误差的分布规律——正态分布

设对某一物理量 N 在相同条件下进行 n 次测量,得一测量列 N_1, N_2, \dots, N_n , 其各次测量值的误差为:

$$\Delta N_i = N_i - N_0, \quad (i=1, 2, \dots, n)$$

其中 N_i 为各测量值, N_0 为该物理量的真值。显然,各测量值的误差 ΔN_i 的出现是随机的。当测量次数 $n \rightarrow \infty$ 时,若测量列中的误差 ΔN_i 的出现服从图 1-3-1 所示的规律,我们称该测量列中的随机误差 ΔN_i 服从正态分布规律。图 1-3-1 中,横坐标 ΔN 为测量

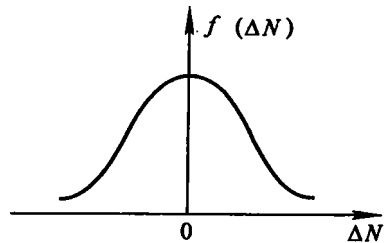


图 1-3-1 正态分布曲线

值的误差,纵坐标 $f(\Delta N)$ 为一个与测量列中误差出现的概率有关的概率密度分布函数。

从正态分布曲线中,我们可以看出,服从正态分布规律的随机误差具有以下性质:

(1)有界性:绝对值很大的误差出现的概率趋于零。因此,误差的绝对值实际上不会超出某个限值。

(2)单峰性:绝对值小的误差比绝对值大的误差出现的概率大,峰值就是概率密度的极大值。

(3)抵偿性:正负误差的代数和为零。

(4)对称性:绝对值相等的正负误差出现的概率均等。

由于大小相等、方向相反的随机误差出现的概率相等,随着测量次数的增多,随机误差的平均值将趋于零。所以,当测量次数足够多时,测量值的算术平均值可作为真值的最佳代表值。

1795年,高斯导出服从正态分布规律的随机误差分布函数的数学表达式:

$$f(\Delta N) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(\Delta N)^2}{2\sigma^2}} \quad (1-3-1)$$

式中 $f(\Delta N)$ 为随机误差的概率密度分布函数; $\Delta N = N - N_0$ 为随机误差; $e = 2.7183$ (自然对数的底); σ 是分布函数中的唯一一个参量,它与具体的测量条件有关,称为标准误差。当测量次数 $n \rightarrow \infty$ 时,其值为:

$$\sigma = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (N_i - N_0)^2} = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Delta N_i)^2} \quad (1-3-2)$$

在一定测量条件下, σ 是一个常数,因而分布函数就唯一地定下来。测量条件的不同会造成测量值的随机误差分布不同,反映在分布函数上就是 σ 的大小不同。

可以证明,标准误差 σ 是正态分布曲线拐点的横坐标,它的大小确定了曲线的形状(图 1-3-2)。 σ 越小,曲线越陡, ΔN 相对于纵坐标越集中。相反, σ 越大,曲线越平坦, ΔN 相对于纵坐标越离散,所以标准误差 σ 反映了测量列中的随机误差 ΔN 的分布情况,它是反映测量精密度的定量指标。具体地说:当测量对象稳定时, σ 反映了测量数据的离散度,即它表征了测量仪器的优劣;当测量仪器稳定时,它反映的是测量对象的不稳定性。

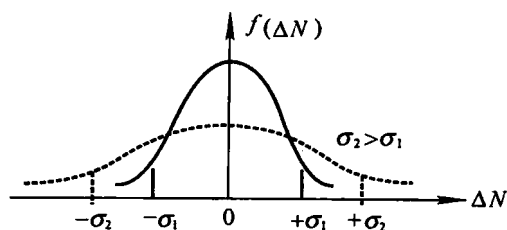


图 1-3-2 σ 值不同的两个正态分布曲线

显然,在正态分布曲线中,误差 ΔN 出现在 $-\infty \sim +\infty$ 范围内是必然的,所以图中曲线与横轴间所包含的面积应恒等于 1,即:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(\Delta N) d(\Delta N) = 1$$

对于某一确定的 σ 值,由概率的运算公式,取 σ 的不同倍数区间对随机误差分布函数定积分,可得:

$$P = \int_{-\sigma}^{+\sigma} f(\Delta N) d(\Delta N) = 0.683 \quad (-\sigma < \Delta N < +\sigma)$$

$$P = \int_{-2\sigma}^{+2\sigma} f(\Delta N) d(\Delta N) = 0.954 \quad (-2\sigma < \Delta N < +2\sigma)$$