

大学物理实验

DAXUE WULI SHIYAN

任明放 陈金全 主编

重庆大学出版社
新疆大学出版社

大学物理实验

任明放 陈金全 主编

重 庆 大 学 出 版 社
新 疆 大 学 出 版 社

内 容 简 介

本书是面向 21 世纪大学物理实验课程教材,根据高等工业学校物理实验课程教学指导委员会颁布的《高等工业学校物理实验课教学基本要求》编写。

全书共有 10 章。内容包括绪论以及力学实验、电磁学实验、光学实验、近代物理实验和综合性实验、设计性实验等共 33 个。涵盖了大学物理实验的基本内容。综合性实验和设计性实验可供不同学校、不同专业的教学使用。本书还引入了不确定度概念,介绍了数据处理方法等知识,提供了物理常数以便查用。

本书文字简洁,表达准确,深度适宜,结构科学,可作为高等工科类本科各专业大学物理实验课的教材或教学参考。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验/任明放,陈金全主编. —乌鲁木齐:新疆大学出版社,2001.4

ISBN 7-5631-1349-5

I. 大... II. ①任... ②陈... III. 物理学—实验—高等学校—教材 IV. O4-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 18123 号

大学物理实验

任明放 陈金全 主 编

责任编辑 谭 敏 王军凤

*

重庆大学出版社
新疆大学出版社 出版发行
新华书店 经 销
重庆升光电力印务有限公司印刷

*

开本:787×1092 1/16 印张:15 字数:374 千

2002 年 2 月第 1 版 2002 年 2 月第 1 次印刷

印数:1—6000

ISBN 7-5631-1349-5/G·779 定价:20.00 元

前言

物理学是理论与实践紧密联系、有机结合的一门科学,是工科类高等学校各专业的必修基础课。大学物理实验是高等工业学校各专业独立设置的一门课程,是工科类高等学校开设的系统地培育大学生的工程科学素质,实验动手能力,开拓创新精神的,以实验为主要内容的首门课程,其地位和重要性是不言而喻的。

本书是面向 21 世纪大学物理实验课程教材。按照教育部《面向 21 世纪高等工程教育内容课程改革计划》的总体要求,根据高等工科院校物理实验课程教学指导委员会颁发的《高等工业学校物理实验课教学基本要求》,并在桂林电子工业学院自编的《大学物理实验讲义》的基础上编写的。在编写过程中,我们根据工科类本科专业设置的特点,在认真吸取国内多种版本同类教材优点的基础上,融入了参编者多年来积累的大学物理实验教学改革的经验、体会,努力追求本课程体系的整体优化。

书中的实验内容无论在整体编排上,还是在某个实验的编写中,都注意了由浅入深,循序渐进的原则。为了拓展学生的思维空间,有些实验拓展了内容,采用了不同的仪器和实验方法;同时,每个实验都附有思考题,使得教师和学生在学习过程中能有较大的选择和思考余地。每个实验的内容一般按 3 个学时安排,以保证实验的教学质量。

为了适应不同学校、不同专业学生的不同水平的要求,本书还安排了一定数量的设计性实验和综合性实验,供各高等学校在教学中使用。我们企图通过这类实验,使学生在学习和掌握基本知识、基本仪器和基本方法的基础上,深入了解这类实验在物理理论、设计思想、综合运用,乃至创新发展方面的情况,逐步培养自己的科学实验素质。

本书由任明放,陈金全主编。绪论、光学预备知识、实验 12、13、14、15、16、17、22、23、24、25、26、27、28、29、30、31、32、33 由任明放编写;实验 1、2、3 由杨华斌编写;实验 4、5、11 由

陈金全编写;电学预备知识,实验6、8、9由左卫群编写;实验7、10、18、19、20、21、由丘伟编写;实验3—Ⅱ由杨涛编写。本书的图、表由丘伟制作。全书由任明放,陈金全统编、定稿。

由于编者的水平有限,书中错漏与缺陷在所难免,恳请读者批评指正。

编 者
2001 年

目 录

绪 论	1
第1章 测量和误差的基本知识	3
1.1 测 量	3
1.2 测量误差	5
1.3 测量结果的不确定度	12
1.4 测量结果的误差估算及表示	13
第2章 数据处理的基本知识	17
2.1 有效数字	17
2.2 列表和作图	20
2.3 逐差法	23
2.4 最小二乘法	24
习 题	26
第3章 物理实验基本方法	29
3.1 物理实验中的基本实验方法	29
3.2 物理实验中基本测量方法	33
第4章 力 学	36
实验1 长度测量和固体密度的测定	36
实验2 用刚体转动实验仪测定刚体的转动惯量	44
实验3 测定杨氏弹性模量	48
第5章 电磁学1	57
电磁学实验基本仪器	57
实验4 变阻器电路的调节特性及欧姆定律的应用	61
实验5 电学元件伏安特性的测量	68
实验6 电表的设计与组装	76
第6章 电磁学2	84
实验7 直流电桥测电阻	84

实验 8 灵敏电流计的研究	92
实验 9 电位差计的原理 5 和使用	100
实验 10 用恒定电流场模拟静电场	106
实验 11 磁场测量	113
第 7 章 光学 1	126
光学预备知识	126
实验 12 薄透镜焦距测量	128
实验 13 分光计调整	136
实验 14 测定棱镜玻璃的折射率	145
第 8 章 光学 2	151
实验 15 用折射极限法测固体、液体的折射率	151
实验 16 光的等厚干涉及其应用	155
实验 17 光的衍射	166
第 9 章 近代物理与综合性实验	171
实验 18 迈克尔逊干涉仪的调整和使用	171
实验 19 弗兰克-赫兹实验	178
实验 20 磁控条件下电子荷质比的测定	186
实验 21 光电效应法测普朗克常数	192
第 10 章 设计性与综合性实验	197
实验 22 全息光栅的制作与测量	197
实验 23 动力学法测定金属材料杨氏模量	201
实验 24 原子光谱	205
实验 25 钨的逸出功的测定	208
设计性实验题选	213
实验 26 望远镜和显微镜的组装	213
实验 27 重力加速度的研究	216
实验 28 固体的线膨胀	218
实验 29 简谐振动的研究	219
实验 30 线路设计	221
实验 31 电池特性的研究	223
实验 32 多用表的设计与调试	226
实验 33 测量微细线径	227
附 表	228
参考书目	233

绪 论

物理实验是学生进入大学后较早遇到的一门系统全面的实验课程,也是理工科学生必修的一门重要基础实验课程,它独立设课,单独记分,可使学生获得基本的实验知识,在实验方法和实验技能等方面得到较系统、严格的训练。物理实验的方法、思想、仪器和技术不仅仅普遍应用于各自然科学和工程技术领域中,还是探索和开拓新的科技领域的一个有力工具。

一、物理实验课的基本任务

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,并能运用物理学原理、物理实验方法研究物理规律,加深对物理原理的理解。

2. 培养提高学生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,严肃认真的工作态度,不怕困难、主动进取的探索精神,遵守操作规程、爱护公物的优良品德。

3. 培养与提高学生科学实验的能力

(1) 自学能力。能够自行阅读实验教材与参考资料,正确理解实验原理与方法、实验条件,做好实验前的各项准备工作。

(2) 动手能力。能够借助教材与仪器说明书正确操作仪器,联接电路、装配与调整光路,检查排除简单故障。

(3) 思维判断与解决问题能力。运用物理学理论,对实验现象与实验结果做出分析与判断,并能解决一些实际问题。

(4) 书写表达与运算能力。能够正确记录和运用数据处理方法处理实验数据,绘制图表,说明实验结果,撰写实验报告。

(5) 初步的实验设计能力。能够根据课题要求(对较简单的实验)确定实验方法和条件,合理选择和搭配仪器,拟订实验步骤。

二、物理实验的教学环节及程序

1. 实验前预习。为避免什么都没搞懂就进入测量状态,实验操作时间过长及盲目操作等被动的情况发生,高质量完成实验任务,实验前期工作即预习非常重要,内容为:要明白实验任务是什么,应采取何种实验方法,应用哪些理论知识,选用什么型号仪器(了解其使用方法,即调试和操作程序),其次,还要提出存在的问题是什么。预习方式:仔细阅读实验教材或有关

的资料,到实验室(有条件)进行实物预习,或利用计算机软件及录像带进行预习。预习作业,书写预习实验报告。

预习实验报告的内容及格式:(1)实验名称、目的(任务);(2)实验原理(原理公式、各量的物理含义及单位,实验条件);(3)仪器与用具介绍;(4)预习问题(附上测量数据记录纸1~2张)。

2. 实验(上课阶段)。进入实验室,交预习报告,由教师检查签字认可(否则会失去做实验的资格),实验操作开始,认识和熟悉仪器,了解使用方法,注意查看仪器装置是否齐全,编号是否一致,有无破损,有问题请及时与指导老师联系。

实验操作过程一般包括安装实验装置、调整仪器进入正常使用状态;电学则要布局、连线、选择参数,经教师检查许可方可接通电源,进行实验调试,观察和分析实验现象,测试并正确记录测量数据。测量的数据经过教师检查签字确认无误后,方可整理仪器,上交元件,拆开电路,归顺。值日生则要打扫卫生后离开实验室。

整个实验过程,必须遵守实验室规则,严格、细致、稳妥、准确、实事求是。

3. 实验后总结。离开实验室后,要对实验工作进行总结,对实验数据进行处理,撰写实验报告,要求用实验报告纸书写,同时要把预习报告和实验中原始数据(签字有效)装订在一起,在下次实验时交给教师批阅。

实验报告格式:

(一)实验名称、目的(任务);

(二)实验原理(原理公式、各量的物理含义及单位,实验条件);

(三)仪器与用具介绍;

(四)预习问题(附上测量数据记录纸1~2张);

(五)实验内容(实验中的工作);

(六)实验步骤(根据实际工作书写,且注明安全注意要点);

(七)数据处理。完成实验数据列表、计算、作图、误差分析,作图要按作图规则,计算要有计算过程;

(八)小结或讨论。对实验中现象的分析,思考题的解答;对实验问题的研究体会及收获与建议。

实验报告可分两阶段写,(一),(二),(三),(四)项预习报告(实验前)已写,实验后不必重复,只需写(五),(六),(七),(八)即可。

第 1 章

测量和误差的基本知识

1.1 测 量

一、直接测量与间接测量(测量结果分类)

测量:用一定的工具或仪器,通过一定的方法,直接或间接地与被测对象进行比较,求出比值的过程。测量所得的值(数据)应包括数值(大小)和单位,两者缺一不可!

直接测量 把待测的物理量直接地与标准单位的同类物理量进行比较。例如:用米尺测长度,用天平称衡质量,用秒表测时间,用电表测电压、电流,用温度计测温度等。 (L, m, t, V, I, T) 相应的物理量称为直接测得量。

间接测量 是计算由一个或几个直接测量量组成的函数的数值。例如:当用单摆测定重力加速度 g 时,用米尺测量单摆的摆长 l ,用停表测定单摆的摆动周期 T ,然后通过函数式: $g = 4\pi^2 l / T^2$ 的计算得到。这里 g 是间接测量量, l, T 是直接测量量。大量的物理量是通过间接测量得到的。

二、等精度测量与不等精度测量(测量条件分类)

对某一物理量进行多次测量,而且每次测量的条件相同(如同一观察者,同一组仪器,同一测量方法和同样的环境条件下测试等等),测得的数据为 $X_1, X_2, \dots, X_n$,称为等精度测量。在所有的测量条件中,只要有一个发生变化,这对所进行的测量就是不等精度测量。

严格地说,在实验过程中保持测量条件完全相同的多次测量是极其困难的,但当某一条件的变化对结果的影响不大,甚至可以忽略时,仍可将此种测量视为等精度测量。一般情况下除了特别指明外,都作为等精度测量来讨论。物理实验中大多采用等精度测量。

三、测量过程的问题

测量仪器的量程、精密度和准确度:

测量是通过一定的仪器或量具来完成的,每一种类的仪器都有一定的使用条件、范围和方

法。因此,熟悉仪器的性能,掌握仪器的使用方法和准确的读数是完成实验的必要条件。为此,在测量前必须对仪器有足够的了解。

(1) 量程:仪器的测量范围称为仪器的量程,如:天平的最大称量为 1000g,则其量程为 1000g;UJ31 电位差计的测量范围是 0→170mV,则其量程为 170mV 等等。不容许在超量程下使用仪器,否则会损坏仪器。

(2) 精密性:仪器的精密性是指仪器所能分辨物理量的最小值。如测量长度米尺(分度值为 1mm),游标卡尺(分度值为 1/50mm),而螺旋千分尺(分度值 0.01mm)。仪器的精密性与仪器的最小分度值一致,此值愈小,仪器的精密性愈高。如螺旋千分尺的最小分度值为 0.01mm,可以认为其分辨率为 0.01mm/刻度或精度为 100 刻度/mm。

(3) 准确度:用仪器的准确度级别来标志。例如:某电压表的表面上标有 0.5 字样的就是该电压表的准确度级别。一般仪器(测量用具)分度值取为准确度数值的 1/2 ~ 2 倍,有的仪器则完全相等,如游标卡尺。

四、测量值的(估算)确定

1. 直接测量值的确定——算术平均值

如果对一物理量进行多次测量。例如对物理量 X 等精度测量,得到一系列 $X_1, X_2, \dots, X_n$ 数值,在测量没有错误及符合统计规律的情况下,可以用算术平均值 $\bar{X}$ 表示测量的最佳值,即

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1.1)$$

可以证明,当测量次数无限多时,算术平均值将无限接近真值。在数学上,称下式为数学期望:

$$\langle X \rangle = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1.2)$$

对于有限次测量,平均值会随着测量次数的不同而有所改变,也会因不同范围的测量数据而稍有差别。

2. 间接测量值的确定

对于间接测量值 $w = f(x, y, \dots)$,它由直接测量值 $(x, y, \dots)$ 所确定。当多次测量时,有两种可能的情况。

(1) 对各直接测量值 $(x_i, y_i, \dots)$ 相互独立地进行测量,且测量条件变化幅度很小。首先分别求出各自的算术平均值 $(\bar{x}, \bar{y}, \dots)$,然后将其代入函数关系式 $w = f(x, y, \dots)$ 中求得 w 的测量值:

$$\bar{w} = f(\bar{x}, \bar{y}, \dots) \quad (1.3)$$

(2) 同一条件下,对各量测量一遍,得一组 $(x_i, y_i, \dots)$,相应地有 $w_i = f(x_i, y_i, \dots)$ 而每次间接测量之间又都是相互独立的,用测量算术平均值 $\bar{w}$ 作为测量值。

$$\bar{w} = \sum_{i=1}^k w_i / k = \sum_{i=1}^k f(x_i, y_i, \dots) / k \quad (1.4)$$

通常,当测量条件没有大幅度变化时,两种计算方法所得到的结果是极其相近的。所以,除了测量幅度过大时必须采用式(1.4)外,一般都可以采用较简单的式(1.3)来计算。

1.2 测量误差

物理实验一般都离不开物理测量,由于测量仪器,环境条件,实验方法(测量手段与计算方法等)的限制和测量者的观察能力的局限,实验测量得到的物理量的数值与它的真实值并不一致,这种情况在数值上的表现即为误差。随着科学技术水平的提高和人们的经验、技巧、专门知识的丰富,误差可以控制得愈来愈小,但不能使误差降低为零。因此,实验结果都具有误差,误差始终存在于一切科学实验过程之中。

一、误差定义

1. 绝对误差

实际测量值 X 与该物理量的客观真值 A 之间的差值为 δ_A , 即 $\delta_A = X - A$, 称 δ_A 为测量值的绝对误差。

如果 X 是指针式仪器的示值, 则 δ_A 称为示值误差, 如 X 为某一元器件的标称值, 则 δ_A 称为标称误差等。

真值有 3 种类型:

(1) 理论值或定义值: 如三角形的内角和等于 180° 。

(2) 计量学约定真值: 国际计量大会决议的 7 种标准。

(3) 标准器相对真值: 高一级标准器的误差与低一级标准器或普通计量仪器的误差相比, 为其 $1/5$ (或者说 $1/3 \sim 1/20$) 时, 则可以认为前者是后者的相对真值。如 0.5 级电压表测得某电阻的电压值为 1.03V, 而用 1.0 级电压表测得的电压值为 1.05V, 则 1.0 级电压表测得的电压值的误差为 +0.02V。

2. 相对误差

绝对误差表示往往不能反映测量的精确程度。例如, 测量两个不同物体的长度, 用最小分度值为 1mm 的米尺测量一个物体长度为 $L_1 = 51.4\text{mm}$, 绝对误差 $\delta = 0.2\text{mm}$, 用最小分度为 0.01mm 的螺旋测微计测量另一物体的长度为 $L_2 = 0.235\text{mm}$, 绝对误差 $\delta = 0.005\text{mm}$, 初看起来, 绝对误差 0.2mm 远大于 0.005mm, 但我们不能说后者的测量精度比前者高, 而恰恰相反。这是因为 L_1 的测量误差对 51.4mm 而言仅为 0.4%, 而 L_2 相应的测量误差对 0.235mm 却为 2%, 因此, 为了弥补绝对误差的不足, 我们引进相对误差 E_r , 根据所取的相对参考值的不同, 可分为:

(1) 实际相对误差 = [误差/真值] 的百分数, 即: $E_r = \frac{\delta}{A} \times 100\%$

(2) 标称相对误差 = [误差/测量值] 的百分数, 即: $E_r = \frac{\delta}{X} \times 100\%$

(3) 额定相对误差 (或称可用误差) = [误差/满刻度值] 的百分数, 即: $E_r = \frac{\delta}{X_{\max}} \times 100\%$

由于一般有 $\delta \leq X$, $X \approx A$, 故前两种误差基本上没有区别, 但与额定相对误差则可能相差较大。因为 $X \leq X_{\max}$, 则有:

$$\delta/A \approx \delta/X \geq \delta/X_{\max}$$

一般电工仪表常以额定误差的大小来分级。如量程为 150mV 的 0.5 级电压表,表示测量 150mV 电压以内的任何一个电压时最大的误差为 0.75mV。用这个电压表测量 100mV 电压时,其相对误差 $E_r = 0.75\text{mV}/100\text{mV} = (0.5\% \times 150\text{mV})/100\text{mV} = 0.75\%$,这在使用电工仪表时必须要注意。电子仪器和元器件一般用标称相对误差来表示,如 $100\Omega \pm 5\%$ 等等。对于电子仪器,因受外部条件影响较大,要求在使用时必须注意详细阅读说明书。

二、误差的分类及处理方法

误差按性质和来源分为系统误差、偶然误差(随机误差)。

(一) 系统误差

在同一实验条件下多次测量同一物理量,误差的绝对值和符号保持恒定;或在条件改变时,按某一确定的规律变化的误差。

1. 系统误差的来源

(1) 理论误差

由于测量原理所依据的理论具有一定的近似性,从而在测量结果中引入误差。单摆实验是一个很好的例子,由于引入了 $\sin\theta \approx \theta$,得到了单摆周期的简化公式为:

$$T_0 = 2\pi\sqrt{l/g} \quad (1.5)$$

它的精确级数解为

$$T = T_0 \left(1 + \frac{1}{4}\sin^2 \frac{\theta}{2} + \frac{9}{64}\sin^4 \frac{\theta}{2} + \dots \right) \quad (1.6)$$

计算可得到,当摆幅角为 5° 时,由式(1.5)引入的误差约为 0.05%,摆幅角愈小,由理论引入的误差愈小。对于这种理论误差,我们可以根据测量结果总精确度的要求来进行修正。

(2) 人为误差

由于观察者的生理和心理因素引起测量结果的误差。如有的人在启动停表时总是提前,而有的人则总是滞后,一般在正常情况下,人们看到一个信号而开启停表的误差为 0.05~0.1s,又如用米尺测量长度,对于 1mm 以下的估读数的误差与操作者的视力习惯有关等。

(3) 环境误差

由于环境(如温度、大气、电磁场等)的影响而产生的误差。如在流体静力称衡法实验当中,在称量时,水的温度由 17.5°C 变到 18.5°C ,水的温度的改变导致被测物体密度的误差。

(4) 仪器误差

仪器的误差也称工具误差。这是由于测量所用的工具(仪器、量具等)本身不完善而产生的误差。它包括:

- a) 仪器的示值误差;
- b) 仪器的零值误差;
- c) 仪器机构误差和测量附件误差等。

(5) 装置误差

由于测量设备,仪器和电路的安装、布置、调整不当而产生的误差。例如:在磁聚焦法测量电子荷质比的实验中,当仪器的螺线管与地磁场方向不平行时,即使在偏转电压为零时,也会

使得聚焦的电子束仍偏离荧光屏的中心,造成测量误差。在电磁学一类实验中,经常需要考虑磁电的屏蔽和良好的接地问题,以减小测量的系统误差。

2. 如何发现系统误差

(1) 理论分析法

1) 分析实验理论公式所要求的条件在测量过程中是否得到满足。如在单摆实验中,只有摆角 θ 趋于零时才能套用公式 $T_0 = 2\pi\sqrt{l/g}$ 。实验是达不到这个要求的,必然产生系统误差。

2) 分析仪器要求的使用条件是否得到满足。

(2) 对比测量法

1) 实验方法与测量方法的对比

用不同的实验方法测量同一个被测量,如果测量的结果在偶然误差允许的范围内不重合,则说明其中至少有一种方法存在系统误差。如用单摆与自由落体两种方法测某地的重力加速度,实验结果分别是 $g = (9.800 \pm 0.001) \text{ms}^{-2}$ 和 $g = (9.77 \pm 0.01) \text{ms}^{-2}$ 。显然,其中至少有一种方法存在系统误差,因为两种方法测出的重力加速度在十分位都无偶然误差而数值又不同,必然是系统误差所致。

同一种实验方法,有时改变测量方法也发现系统误差。比如在拉伸法测杨氏模量实验中,用增加砝码与减少砝码过程中读数的方法来发现摩擦等因素带来的系统误差。

2) 仪器的对比

一个量用不同的仪器同时或分别地进行测量可发现仪器的系统误差。如果用两只电流表接入同一串联电路,若读数不一致,说明至少有一只存在系统误差。如果有一只是标准表,就可消除另一只表的系统误差。

3) 改变实验参数进行对比

如改变电路中的电流数值,而测量结果有单调变化或规律性的变化,说明存在某种系统误差。

4) 换人测量,发现人员误差。

(3) 数据分析法

当偶然误差很小时,将测量的偏差:

$$\delta N_i = N_i - \bar{N} \quad (1.7)$$

按测量的先后次序排列,观测 δN_i 的变化,如果 δN_i 呈现规律性变化,如线性增大或减小,稳定的周期性变化,则必有系统误差存在。

3. 恒定系统误差的消除

系统误差的特点是它的确定性,因此不能用重复多次测量的方法去消除或减小,没有像偶然误差那样统一的处理方法。下面介绍几种消除系统误差的常用方法:

1) 消除产生系统误差的根源,如采用符合实际的理论公式,保证仪器使用所必需的条件等。

2) 有些系统误差当测量条件变化时,其大小和符号始终保持不变,称恒定系统误差(又称定值系统误差,即对一测量值的影响均为一定的常量),如千分尺,电表等的调零误差。采取找出修正值对测量值进行修正,如找出“零差”对测量值进行修正,用标准仪器对测量中使用的仪器进行校正,找出修正值后进行修正。即

$$\text{真值} = \text{测量值} \pm \text{修正值}$$

只要找到修正值进行修正就可消除这类系统误差。

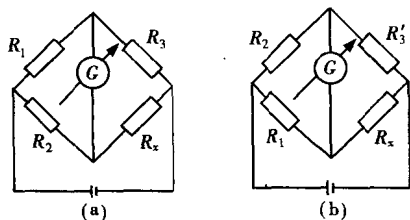


图 1.1 交换法消除误差原理图

3) 对其他形式的恒定系统误差采取适当的测量方法去抵消,常用的方法有:

异号法 改变测量中某些条件进行测量,例如改变测量方向等使两种条件下的测量结果的误差符号相反,取平均值作为测量值来消除不均匀性带来的系统误差。例如,在拉伸法测量杨氏模量实验中,加砝码和减砝码各记一次数,取平均值可消除光杠杆上升或下降时因摩擦等因素产生的系统误差。

交换法 本质上也是异号法,但在形式上是将测量中的某些条件,例如被测量物体的位置相互交换,使产生系统误差的原因对测量的结果起相反的作用,从而抵消系统误差。用电桥法测量未知的电阻值时,将待测物放在不同的桥臂上,如图 1.1(a)所示。

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} R_3, \text{ 置换后, 如图 1.1(b) 所示, } R_x = \frac{R_2}{R_1} R_3'$$

$$\text{则} \quad R_x^2 = R_3 R_3', R_x = \sqrt{R_3 R_3'}$$

替代法 保持测量条件不变,用一个已知量替换被测量,再作测量以达到消除系统误差的目的。用天平测量一物体的质量,可以不直接从左盘的砝码读出物体的质量,而是把右盘的物体取下用砝码代替物体再保持天平平衡,然后,读出右盘砝码的质量来消除等臂引起的系统误差。

零示法 为了消除指示仪表不准而造成的系统误差,测量中当被测量的量与标准量相互平衡使指示仪表示零。这时被测量的值就等于标准量,这就是零示法。例如:电桥电路、电位差计等都是用这种方法来消除指示仪表不准引起的系统误差的。

4. 可变系统误差(变值系统误差或对称变化系统误差)的消除

在测量条件或某几个因素变化时,误差的大小和符号按确定的函数规律而变化,变值系统误差的种类很多,有的还比较复杂,我们只略谈一下常用的。

(1) 线性变化的系统误差

在整个测量过程中,随时间线性变化(递增或递减)的系统误差,如图 1.2,可将观测程序对某时刻对称地再做一次。例如,一只灵敏电流计零点随时间有线性漂移,在测量读数前记下一次零点值,测量读数后再记一次零点值,取两次零点值的平均值来修正测量。这种消除系统误差的方法称为对称观测法。

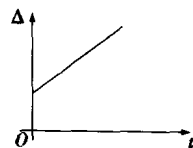


图 1.2

由于很多随时间变化的误差在短时间内均可认为是线性变化,因此对称观测法是一种能够消除随时间变化的系统误差的好方法。

(2) 周期性变化的系统误差

随着测量值或时间的变化而呈正弦曲线变化的系统误差,即为周期性系统误差,如分光计的偏心差可表示成: $\varepsilon = e \sin \varphi$, 当 $\varphi = 0^\circ, 180^\circ, 360^\circ$ 时, $\varepsilon = 0$; 而当 $\varphi = 90^\circ, 270^\circ$ 时, $\varepsilon = e$ 。

周期性系统误差一般可以表示为:

$$\varepsilon = e \sin(2\pi t/T)$$

式中 T 为误差变化周期, t 为决定周期误差的自变量(如时间, 角度等), 则:

$$\text{当 } t = t_0 \text{ 时, } \varepsilon_0 = e \sin(2\pi t_0/T)$$

$$\text{当 } t_1 = t_0 + T/2 \text{ 时, } \varepsilon_1 = e \sin[2\pi(t_0 + T/2)/T] = -e \sin(2\pi t_0/T)$$

于是, 取算术平均值则有:

$$\varepsilon = (\varepsilon_0 + \varepsilon_1)/2 = 0$$

可见, 对于周期性系统误差, 只要选读一个数 ε_0 , 然后每隔半个周期进行一次测量, 只要测量次数是偶数, 取平均值即可消除。

(3) 复杂规律变化的系统误差

在整个测量过程中, 这一类误差是按一定的但是比较复杂的规律变化的系统误差。这些复杂规律, 可能是某些初等函数形式, 如对数, 幂指数, 指数函数等形式, 也可能是经验曲线的形式。对于按复杂规律变化的误差, 一般可以将它展开成代数多项式或三角多项式来分析它与某因素的关系。

此外, 系统误差按对其掌握和可处理的程度又可分为已定系统误差和未定系统误差。在原则上一般都是可以发现、分离和消除的。而未定系统误差是指实验过程中不能确切地掌握其大小和方向, 或没有必要去掌握它的规律, 而只需要估计它的极限范围的系统误差。我们在实验中遇到的大部分测量仪器误差属于这一类。它们虽然有系统误差特征, 但在大多数情况下, 其本身的规律比较复杂, 修正比较麻烦; 另一方面, 测量一般也只要求掌握系统误差的大小范围和方向, 也不必花大力气去处理它。如量程为 V_0 的 0.5 级电压表, 表明在被测量的范围内, 测量值 V 的最大误差为 $\pm V_0 \times 0.5\%$ 。

(二) 偶然误差(又称随机误差)

在实际相同的条件下, 多次测量同一物理量时, 误差的绝对值和符号的变化, 时大时小, 时正时负, 以随机的方式变化的误差。

1. 偶然误差来源

是由大量微小的涨落性的个别扰动累积而成的。

(1) 判断的起伏

如用仪器时对最小分度以下做估读, 仪器调整和操作上的不一致, 而观测者由于感官分辨能力的局限性时时改变。

(2) 测量工作状态的偶然变化, 如空气流动, 温度起伏, 湿度、压强的变化, 电源电压的波动等。

(3) 实验和测量过程中各种外界因素的干扰, 如振动、电磁场、热、光、声等。

(4) 被测物体本身的不确定性, 如钢丝的直径, 由于加工方面的技术困难, 一般不可能很均匀, 而在不同位置、不同方向去测量其值是不完全相同的, 因而钢丝的直径是不确定的, 只能去测它的平均直径。

2. 偶然误差的规律

对一般物理实验和大多数测量来说, 认为产生偶然误差的原因是相互独立的, 微小的多种因素影响的综合效果, 而不是某一因素起主要作用。由概率统计论证证明, 此时偶然误差将服从正态分布(高斯分布), 实际的观测结果也证实了这一点。

正态分布的特征:

(1) 有界性

偶然误差的绝对值不会超过一定界线。

(2) 单峰性

绝对值小的误差出现的几率比绝对值大的误差出现的几率大。

(3) 对称性

绝对值相等的正负误差出现的概率相等。

(4) 抵偿性

正负误差的代数和为零。

这一统计规律在数学上可用概率密度函数(高斯误差分布函数)来描述:

$$f(\delta) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\delta^2/2\sigma^2} \quad (1.8)$$

式中 $f(\delta)$ 为概率密度函数, 即误差值 δ 在其附近单位区间内出现的概率, $\delta = x - x_0$ 为测量值的误差, σ 是高斯分布函数的惟一参量, 表示在一定条件下随机误差的离散程度。

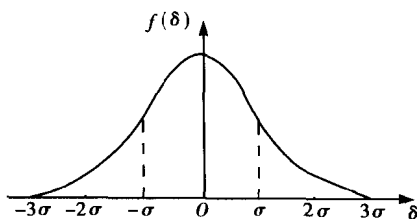


图 1.3 正态分布

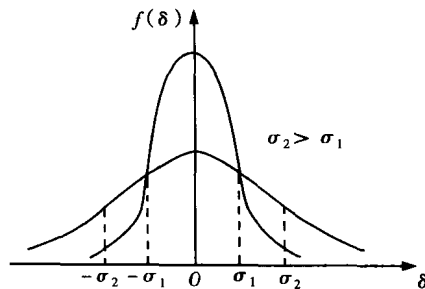


图 1.4

高斯分布曲线如图 1.3 所示。横坐标表示误差值, 纵坐标表示概率密度的大小。坐标原点相当于 $\delta=0$, 对应着真值 x_0 的位置。曲线下的总面积表示各种可能误差值出现的总概率为

$$P = \int_{-\infty}^{+\infty} f(\delta) d\delta = 1 \quad (1.9)$$

σ 是高斯分布曲线成拐点的横坐标, 它的大小确定曲线的形状, 如图 1.4 所示。 σ 大, 表明随机误差离散程度大, 测量的精密度低, 曲线形状低而宽; 反之, 曲线形状高而窄。因而参量 σ 用来量度测量的精密度。 σ 的数学表达式是

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\delta)^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_0)^2}{n}} \quad (1.10)$$

式中 测量次数趋于无限大。 σ 称为标准误差(均方根误差)。

由概率密度分布函数的定义(1.8)式, 计算一下某次测量偶然误差出现在 $[-\sigma, +\sigma]$ 区间的概率

$$P = \int_{-\sigma}^{+\sigma} f(\delta) d\delta = 0.683 \quad (1.11)$$

同样可以计算, 某次测量偶然误差出现在 $[-2\sigma, +2\sigma]$ 和 $[-3\sigma, +3\sigma]$ 区间的概率分别为