

◎21世纪高等院校创新教材

# 大学物理

DAXUE WULI 基础实验教程  
JICHU SHIYAN JIAOCHENG

吴 芸 童菊芳 主编



科学出版社

www.sciencep.com

· 21 世纪高等院校创新教材 ·

# 大学物理基础实验教程

吴 芸 童菊芳 主编

科学出版社

北 京

## 版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229;010-64034315;13501151303

### 内 容 简 介

本教材是根据教育部非物理类专业物理基础课程教学指导委员会的《大学物理实验课程教学基本要求》编写而成的。全书分为绪论、实验理论、力学和热学实验、电磁学实验、光学和近代物理实验、设计性实验及计算机辅助实验介绍等六个部分。内容突出实用性,注重学生创新能力的培养。

本书可作为高等院校非物理学专业本专科学生的大学物理实验教材及其参考书,也可供中学中专类学校教师和实验工作者参考。

#### 图书在版编目(CIP)数据

大学物理基础实验教程/吴芸,童菊芳主编. —北京:科学出版社,2009

21世纪高等院校创新教材

ISBN 978-7-03-025364-4

I. 大… II. ①吴…②童… 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(2009)第149556号

责任编辑:杨瑰玉/责任校对:王望容

责任印制:彭超/封面设计:苏波

**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>

武汉市首壹印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2009年8月第一版 开本:787×1092 1/16

2009年8月第一次印刷 印张:17 1/4

印数:1—3000 字数:390 000

**定价:29.80元**

(如有印装质量问题,我社负责调换)

· 21 世纪高等院校创新教材 ·

## 《大学物理基础实验教程》编委会

主 编 吴 芸 童菊芳

副主编 吴新燕 陈知红 卢金军

编 委 (以姓氏笔画为序)

丁占齐 王军延 卢金军 孙春峰

李丽霞 吴 芸 吴波英 吴新燕

张 秀 陈知红 童菊芳 熊 伟

主 审 彭菊村

## 前 言

大学物理实验课程是理工科学生进入大学后接触较早的一门重要基础实验课程,旨在培养学生认识和发现物理规律、分析和解决物理问题的能力。为适应当前实验教学改革的要求,我们根据教育部非物理类专业物理基础课程教学指导委员会的《大学物理实验课程教学基本要求》,在主要参考了由彭菊村、孙春峰两位教授主编的《普通物理实验》的基础上编写了这本实验教材。

实验教材应跟上实验室建设的发展。目前高校理工类大学物理实验根据不同专业开出数一般为10~25个,考虑到不同学校实验室建设差异,我们增加了部分实验内容以备发展的需要。根据循序渐进的原则,我们在基础实验上较好地融合了部分综合性实验,精选了几个设计性实验方案,供教师指导学生开设,并且介绍了计算机辅助实验,以激发学生的学习兴趣。编写本书过程中,同时参考了诸多兄弟院校的物理实验教材,借鉴了他们的长处,改进了不足,力求结构合理,表达简明,内容实用,针对性强。

全书包括绪论、实验理论、力学和热学实验、电磁学实验、光学和近代物理实验、设计性实验及计算机辅助实验介绍等六个部分。附录收集了常用仪器的仪器误差,常用参考数据,基于ISA总线的8位A/D、D/A接口简介以及“历史上最美的”物理学实验等知识,供学生参考。

参加编写工作的主要人员:吴芸、熊伟(绪论、第一章和第五章全部内容及相关附录);童菊芳、丁占齐、吴波英(第二章全部内容);吴新燕、孙春峰、李丽霞(第三章全部内容);陈知红、张秀(第四章光学部分全部内容);卢金军、王军延(第四章近代物理部分全部内容)。全书修改、定稿由吴芸、童菊芳老师完成,彭菊村教授认真审阅了全部书稿,并多次提出了建设性意见。

本书出版得到了孝感学院相关领导的关心和支持,科学出版社编辑给予了热情的帮助,在此一并表示衷心的感谢。

实验教学的探索是无止境的。由于编写时间仓促,编者水平有限,难免有不完整和错漏之处,恳请读者提出宝贵意见。

编 者

2009年6月12日

# 目 录

绪 论	1
第一章 实验误差、不确定度及数据处理的基础知识	3
第一节 测量与误差的概念	3
第二节 测量结果的表示	7
第三节 不确定度的简化评定方法	9
第四节 有效数字及其运算规则	14
第五节 实验数据处理的一般方法	16
第二章 力学和热学实验	24
实验 1 用米尺、游标尺、螺旋测径器、读数显微镜测量长度	24
实验 2 随机(偶然)误差的统计分布	30
实验 3 重力加速度的测定	32
实验 4 固体密度的测量	39
实验 5 速度和加速度的测量	43
实验 6 声速的测定	46
实验 7 弦的振动试验	51
实验 8 碰撞试验	53
实验 9 杨氏弹性模量的测定(拉伸法)	56
实验 10 测量液体的黏度(落球法)	59
实验 11 刚体转动惯量的测定	60
实验 12 金属线胀系数的测定	64
实验 13 冰的熔化热的测定	66
实验 14 液体表面张力系数的测定	68
实验 15 用稳态平板法测定不良导体的导热系数	71
实验 16 热功当量的测定	74
第三章 电磁学实验	77
电磁学实验操作指导	77
实验 17 学习使用万用电表	78
实验 18 伏安法测电阻	84
实验 19 伏安法测晶体二极管的特性	88
实验 20 电表的扩程和校准	90
实验 21 用惠斯通电桥测电阻	94
实验 22 示波器的原理及应用	98
实验 23 静电场的模拟与描绘	107

实验 24	低电阻的测量 .....	111
实验 25	用板式电位差计测量电池的电动势与内阻 .....	114
实验 26	磁场的描绘 .....	118
实验 27	霍尔效应实验 .....	123
实验 28	电子束线的偏转 .....	128
实验 29	电子束线的聚焦 .....	132
实验 30	交流电桥 .....	137
实验 31	RLC 电路的暂态过程研究 .....	141
实验 32	RLC 电路的谐振特性研究 .....	145
实验 33	学习使用灵敏电流计 .....	149
实验 34	变压器性能的初步研究 .....	153
<b>第四章</b>	<b>光学和近代物理实验 .....</b>	<b>157</b>
	光学实验操作指导 .....	157
实验 35	薄透镜焦距的测定 .....	160
实验 36	分光计的调节和使用 .....	164
实验 37	用阿贝折射仪测定物质的折射率 .....	170
实验 38	用牛顿环测定透镜的曲率半径 .....	176
实验 39	用双棱镜测定光波波长 .....	178
实验 40	迈克耳孙干涉仪 .....	182
实验 41	单缝衍射的光强分布及缝宽测定 .....	187
实验 42	衍射光栅的特性与光波波长的测量 .....	189
实验 43	偏振光的分析 .....	193
实验 44	激光全息照相 .....	197
实验 45	光电效应实验 .....	202
实验 46	密立根油滴实验 .....	208
实验 47	弗兰克-赫兹实验 .....	213
实验 48	霍尔效应 .....	219
实验 49	光拍频法测量光速 .....	222
实验 50	氢原子光谱与里德伯常量的测定 .....	227
<b>第五章</b>	<b>设计性实验及计算机辅助实验介绍 .....</b>	<b>234</b>
	设计性实验指导 .....	234
实验 51	液体在毛细管中上升的速率与液体表面张力系数、黏度的测量 .....	234
实验 52	变阻器的使用与电路控制 .....	235
实验 53	用电谐振法测膜层厚度 .....	235
实验 54	用示波器测量谐振频率和电感 .....	236
实验 55	组合透镜实验 .....	236
实验 56	光学材料折射率的测量 .....	237

---

计算机辅助实验指导·····	237
实验 57 狭缝衍射的研究·····	239
实验 58 微机与物理过程模拟·····	245
附录一 常用仪器的仪器误差·····	251
附录二 常用参考数据·····	255
附录三 基于 ISA 总线的 8 位 A/D、D/A 接口简介·····	257
附录四 “历史上最美的”物理学实验·····	264
参考文献·····	266



# 绪 论

## (一) 开设大学物理实验课的目的和任务

物理学是一门建立在实验基础上的重要学科。无论是物理概念的建立还是物理规律的发现,都必须以严格的科学实验为基础,并通过以后的科学实验来证实;也就是说,物理实验在物理学的发展过程中起着重要的和直接的推动作用。

物理实验是学生进入大学后的第一门基础实验课,它对培养学生用实验的方法认识和发现物理规律,提高独立工作与创新能力,逐渐养成严谨的工作作风和科学的思维方式,形成科学的自然观、世界观都起着重要的不可替代的作用。概括起来,这门课程的教学目的和任务是:

(1) 使学生在物理实验的基本知识、基本方法和实验技能等方面受到科学训练。其中,主要学习如何根据物理实验思想确定合理的实验方案,正确选择和使用基本仪器,掌握一定的物理测量技术和实验方法;正确处理实验数据,正确判断和分析实验结果。

(2) 学习用实验方法探求物理规律,观察和分析物理现象,通过实验加深对一些重要的物理规律的认识和理解,并分析实验中存在的问题。

(3) 通过实验培养严肃认真、实事求是的科学态度和工作作风。

## (二) 怎样写实验报告

通常实验报告分为三部分:预习报告、实验记录和数据处理与计算。

### 第一部分:预习报告

它作为正式报告的前面部分,要求在正式做实验之前写好。内容包括:

(1) 目的:说明本实验的目的。

(2) 原理摘要:在理解的基础上,用简短的文字扼要地阐述实验原理,切忌整篇照抄。力求图文并茂,图指原理图、电路图或光路图。写出实验所用的主要公式,说明式中各物理量的意义和单位,以及公式的适用条件(或实验必要条件)。在原始数据记录纸上设计好数据记录表格。对于设计性实验,则详细写明实验方案以及具体实验步骤。

### 第二部分:实验记录

此部分在实验课上完成。内容包括:

(1) 仪器:记录实验所用主要仪器编号及规格。记录仪器编号是一个好的工作习惯,便于以后必要时对实验进行复查。记录仪器规格可以使同学逐步地熟悉它,以培养选用仪器的能力。

(2) 实验内容和观测现象记录。

(3) 数据:数据记录应做到整洁、清晰而有条理,尽量采用列表法。在根据数据特点设计表格时,力求简单明了,分类清楚而有条理,便于计算与复核,达到省时省工的目的。测量量要注明单位,数据不得任意涂改。

### 第三部分:数据处理与计算

此部分在实验后进行。内容包括:

- (1) 作图、计算结果与误差估算:按图解法要求绘制图线。计算时先将公式化简,再代入数值进行运算。误差估算要预先写出公式。
- (2) 结果:按标准形式写出实验的结果。在必要时,注明结果的实验条件。
- (3) 思考题:完成教师指定的思考题。
- (4) 附注:对实验中出现的说明和讨论及提出好的建议等。

实验报告要求书写清晰,字迹端正,数据记录整洁,图表规范,文理通顺,内容简明扼要。

### (三) 物理实验课学生守则

为了保证实验正常进行,培养严肃认真的工作作风和良好的实验工作习惯,特制定下列规则:

- (1) 实验课不准迟到早退。
- (2) 课前必须认真预习,明确该次实验的任务和方法,写出预习报告,给指导老师检查方可进行实验操作。
- (3) 来实验室做实验时应携带必要的物品,如文具、计算器和草稿纸等。对于需作图的实验应预先准备毫米方格纸和铅笔。
- (4) 实验前对照提示牌仔细清点仪器,如发现缺损,及时向教师报告。实验后必须整理好仪器和坐椅后方可离开。
- (5) 爱护实验室一切仪器设施,不随意拆卸挪动。正确安装、调整、使用仪器。电学实验接线须经教师检查后,方能通电。
- (6) 实验中如发生事故,立即报告教师,保护现场(电学实验应断开电流)。因违章操作造成仪器损坏者,要负一定的责任。
- (7) 以认真态度和求实的作风做好每个实验,按时完成实验任务。实验测量数据必须当堂交教师审阅签字。
- (8) 禁止在实验室内喧哗、打闹、随意吐痰、乱扔纸屑杂物、抽烟等,课后按教师要求清扫实验室。
- (9) 按时认真完成实验报告,交报告时应附有教师签字的原始记录。
- (10) 实验总成绩按平时成绩和考试成绩按一定比例合成。

# 第一章 实验误差、不确定度及数据处理的基础知识

一切科学实验,不论实验方案多么完善,操作者多么细心,测量误差是永远不可能消除的。误差的理论以概率论与数理统计为其数学基础,研究误差的起因、性质、规律、分析计算方法以及如何减小误差等问题。本章从实验教学的角度出发,主要介绍误差和不确定度的基本概念,测量结果不确定度的评定,实验数据处理和实验结果表达等方面的基本知识。没有测量误差的基本知识就不可能获得正确的测量值;不会计算测量结果的不确定度就不能正确表达和评价测量结果;不会处理数据或处理数据方法不当,就得不到正确的实验结果。由此可见,测量误差、不确定度与数据处理的基本知识在整个实验中占有非常重要的地位。学生应在认真阅读教材的基础上,结合每一个具体实验,通过运用加以掌握。应当说明的是,这方面问题的深入讨论是普通计量学和数理统计学的任务,本书只引用它的某些结论和计算公式,不进行严密的论证,并做了一些简化处理。

## 第一节 测量与误差的概念

### (一) 测量与误差

物理实验离不开测量,研究物理现象,了解物质特性,验证物理原理都要进行测量。

1. 测量分类。以确定被测对象量值为目的的一组操作称为测量。粗略地说,测量就是把被测量与选作计量单位的同类量进行比较,确定其倍数的过程。按是否直接获得测量值,测量可分为两类:直接测量与间接测量。

直接测量:能在仪器(或量具)上直接读出测量结果的这一类测量叫做直接测量。如用米尺测长度,用天平称质量,用电流表测线路中的电流,用电压表测线路中的电压等都是直接测量。直接测量中的被测量称为直接测量量。

间接测量:凡是需先由直接测量获得数据,利用已知的函数关系经过运算才能得到待测量数值的测量方法就是间接测量。例如对球体体积的测量,必须先测出球体直径,再用公式计算出球体体积。在物理实验中进行的测量,有许多是间接测量。

2. 测量误差。实践证明,测量结果都具有误差,误差自始至终存在于一切科学实验和测量的过程中。人们总希望在测量过程中准确地测得待测量的真实值(简称真值),但是,任何测量总是依据一定的理论和方法,使用一定的仪器,在一定的环境中,由一定的人员进行的。由于实验理论的近似性,实验仪器的灵敏度和分辨能力的局限性,实验环境不稳定性以及人的实验技能和判断能力的影响等,测量值和待测量的真值之间总存在着差异,这种差异称为测量误差。

测量误差 = 测量结果 - 待测量的真值(或约定值)

测量误差的大小反映了测量结果的准确度,测量误差可以用绝对误差表示,也可用相对误差表示。

绝对误差 = 测量结果 - 被测量的真值(或约定值)

相对误差 =  $\frac{\text{测量的绝对误差}}{\text{被测量的真值}}$  (用百分数表示)

评价测量结果的好坏,主要看相对误差的大小。被测量的真值是一理想概念,一般来说,真值是不知道的。在实际测量中常用被测量的实际值或已修正过的算术平均值来代替真值,称为约定值。

## (二) 误差的分类及其处理方法

误差按其特征和表现形式可分为两类,即系统误差和随机误差。它们的性质不同,需要分别处理。

1. 系统误差:在同一被测量的多次测量过程中,其绝对值和符号保持恒定或以可预知方式变化的测量误差的分量为系统误差。

系统误差的特点是它的确规律性。这种规律性可以表现为定值的,如天平的标准砝码不准造成的误差,停表走时较快,测得的时间总会偏大等;也可以表现为积累的,如用受热膨胀的钢尺进行测量,其指示值将小于真实长度,误差随待测长度成比例增加;也可表现为周期性的,如测角仪器中主刻度盘中心不重合造成的偏心差;还可以表现为其他复杂的规律。系统误差的确定性反映在测量条件一经确定,误差也随之确定;重复测量时,误差的绝对值和符号均保持不变,因此在相同实验条件下,多次重复测量不可能发现系统误差。

对操作者来说,系统误差的规律及其产生原因可能知道,也可能不知道。已被确切掌握了其大小和符号的系统误差,称为可定系统误差。如实验装置或方法没有(或不可能)完全满足理论上的要求,有的仪器没有达到应有的准确程度等。大小和符号不能确切掌握的系统误差称为未定系统误差。

如何发现系统误差,通常归纳为以下几种方法:

理论分析法:分析实验所依据的理论和实验方法是否有不完善的地方,检查理论公式所要求的条件是否满足,所用仪器是否存在缺陷,以及实验人员的素质和技术水平是否存在造成误差的因素,从而得到有关系统误差是否存在的信息。

实践对比法:采用不同的方法测量同一物理量,让不同的人员测量同样物理量或使用不同的仪器测量同一物理量。对比测量结果的数值,以发现系统误差的存在。

数据分析法:分析测量结果,若结果不服从统计分布,则说明测量存在系统误差。

实验中的系统误差应如何处理呢?对可定系统误差一般可以通过校准仪器、改进实验装置和实验方法在测量过程中采取措施予以消除,或在测量结果中进行理论上的修正加以消除或尽可能减小;而未定系统误差一般难以做出修正,只能估计它的范围。

2. 随机误差:在对同一被测量的多次测量过程中,绝对值和符号以不可预知的方式变化着的测量误差的分量。

随机误差是实验中各种因素的微小变动性引起的。例如,实验装置和测量机构在各次调整操作上的变动性,测量仪器指示数值的变动性,以及测量者本人在判断和估计读数

上的变动性等,这些因素的共同影响就使测量值围绕着测量的平均值发生有涨落的变化,而变化量就是各次测量的随机误差。

随机误差的特点是它的随机性。在相同条件下,每个测量结果的误差其绝对值和符号都是不能预知的,没有规律的,但对一个量进行足够多次的测量,则会发现它们的随机误差是按一定的统计规律分布的,理论和实践都证明在大量均匀微小随机因素影响下,物理量的测量值服从随机现象中最重要、最常见、最典型的一种分布规律——正态分布律。服从正态分布律的随机误差具有的主要特征是:正误差和负误差出现的次数大体相等,数值较小的误差出现的次数较多,很大的误差在没有错误的情况下通常不出现;这种规律在测量次数越多时,表现得越明显。

随机误差的分布服从统计规律。假设对实际值为  $a$  的某物理量进行测量,在进行了  $n$  次测量后,将每次测量结果  $x_i$  与实际值  $a$  的差表示在图 1-1-1 中。图中的  $\Delta x = x_i - a$ , 纵轴为某次测量的结果与真值之差在该区域内出现的概率  $p$ 。可看到测量结果在接近  $a$  的地方出现的概率高,而远离  $a$  的地方出现的概率低。如果  $\Delta x$  取值的最小间隔趋于零,且测量次数足够多的话,图 1-1-1 中的离散线将过渡到一条光滑的连续曲线,如图 1-1-2 所示,该曲线称为正态(高斯)分布曲线。

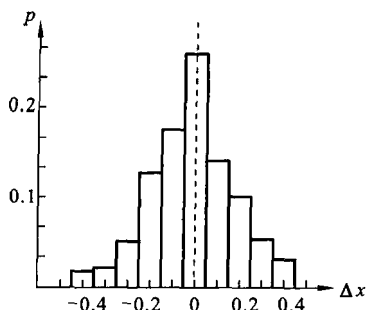


图 1-1-1 离散量的测量结果偏离实际值的情况

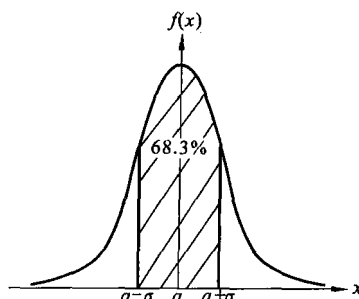


图 1-1-2 正态分布曲线

由误差理论得知,正态分布的概率密度函数为:

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

其中  $a$  表示  $x$  出现概率最大的值,在消除了系统误差后, $a$  为真值, $\sigma$  为标准差,它反映了测量值的离散程度。服从正态分布的随机误差具有下列特点:

单峰性——绝对值小的误差比绝对值大的误差出现的概率大。

对称性——大小相等而符号相反的误差出现的概率相同。

有界性——在一定的测量条件下,误差的绝对值不超过一定的限度。

抵偿性——误差的算术平均值随测量次数  $n$  的增加而趋于零。

可见,虽然随机误差的出现因其无法预见性而不能避免,但是可通过多次测量而相互抵偿。

如果定义  $P = \int_{x_1}^{x_2} f(x) dx$  表示  $x$  在区间  $(x_1, x_2)$  出现的概率,称为置信概率,则  $x$  出现在  $(a - \sigma, a + \sigma)$  之间的概率若为

$$P = \int_{a-\sigma}^{a+\sigma} f(x) dx = 0.683$$

表明测量结果有 68.3% 可能性落在区间  $[a-\sigma, a+\sigma]$  内。我们把置信概率对应的区间称为置信区间。如果扩大置信区间, 置信概率也将提高。

对测量中的随机误差如何处理呢? 根据随机误差的分布特性可采取下面两种方法处理:

(1) 多次测量的算术平均值。在多次测量时, 正负误差可以大致相消, 因而用多次测量的算术平均值表示测量结果可以减小随机误差的影响。

设对某一物理量  $X$  在测量条件相同的情况下进行  $n$  次无明显系统误差的独立测量, 测得  $n$  个测量值  $X_1, X_2, \dots, X_n$ , 那么, 它们的算术平均值是

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

可以证明: 当系统误差已被消除时, 测量值的平均值最接近被测量的真值, 测量次数越多, 接近的程度越好 (当  $n \rightarrow \infty$  时, 平均值趋近真值)。因此, 我们可以用平均值表示测量真值的最佳值。

(2) 标准偏差  $S_x$ 。测量值的分散程度直接体现随机误差的大小, 测量值越分散, 测量的随机误差就越大, 因此必须对测量的随机误差做出估计才能表示出测量的精密度。

对随机误差做出估计的方法有多种。科学实验中常用标准偏差来估计测量的随机误差。每一次测量值  $X_i$  与平均值  $\bar{X}$  之差称为残差, 即

$$\Delta X_i = X_i - \bar{X} \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

显然残差有正有负, 有大有小。常用“方均根”法对它们进行统计, 得到的结果就是单次测量的标准偏差, 以  $S_x$  表示为:

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta X_i)^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}}$$

在上式中将第  $i$  次测量的残差  $\Delta X_i$  取平方以防止正、负残差相消, 求和以反映全部测量值的贡献, 开方使标准的量纲与被测量一致。用这一标准偏差表示测量的随机误差, 它可以表示这一列测量值的精密度。标准偏差小就表示测量值很密集, 即测量的精密度高; 标准偏差大就表示测量值很分散, 即测量的精密度低。现在许多计算器上都有这种统计计算功能, 实验者可直接用计算器求得平均值和标准偏差  $S_x$  等数值。

(3) 关于定性评价的几个名词。习惯上人们经常用“精度”一类词来形容测量结果的误差大小, “精度”一般是指“精密度”的简称, 但是作为一种科学的术语应该采用规范的计量名词。

1) 精密度: 表示测量数据集中的程度, 它反映了随机误差的大小, 与系统误差无关, 测量的精密度高, 则数据集中, 随机误差小。

2) 正确度: 表示测量值与真值的符合程度, 它反映了系统误差的大小, 与随机误差无关, 测量的正确度高, 则平均值与真值的偏离小, 系统误差小。

3) 准确度: 是对测量数据的精密度与正确度的综合评定, 测量的准确度高, 说明测量

的数据比较集中而且接近真值,即系统误差与随机误差都比较小。

用打靶时弹着点的分布可以形象地说明上面三个名词,如图 1-1-3 所示。

精密度、正确度、准确度均为定性名词,只能说明高或低,不能与数字相连,与数字相连应使用不确定度。

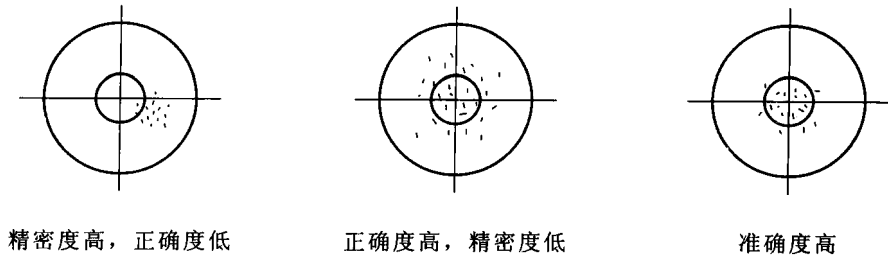


图 1-1-3 精密度、正确度与准确度的形象说明

4) 等精(密)度测量:在测量条件相同的情况下进行的一系列测量就是等精度测量。如由同一人,在同样环境条件(指温度、湿度等)下,在同一个仪器上,采用同样方法,对同一被测量进行多次测量,这些测量就是等精度测量。

(4) 系统误差与随机误差的关系:系统误差和随机误差是两种不同性质的误差,但它们又有着内在的联系。在一定条件下,它们有自己的内涵和界限;但当条件改变时,彼此之间可能相互转化。因此,补充两点说明:

1) 在任何一次测量中,误差既不会是单纯的系统误差,也不会是单纯的随机误差,而是两者兼而有之,各自占有的比例与具体的测量有关,不能一概而论。然而在以后的讨论中,若需要单独地谈一种误差,此时应该意识到,另一种误差并非没有,而是假设不存在。

2) 两种误差没有严格的分界线。在实际测量中有许多误差是无法准确判断其从属类型的。不仅如此,随着测量技术水平的提高,人们对环境条件中随机变动规律的认识及其控制能力也将提高,于是随机误差的一部分将转变为系统误差。由此可知,尽管人们把误差分为系统误差和随机误差,但是这种分类方法还在完善。

## 第二节 测量结果的表示

由于误差的存在,作为一个测量结果,不仅应当提供被测量的大小和单位,还应对量值本身的可靠程度做出判断。定量评定这种可靠程度的指标,就是不确定度。引入不确定度可以对测量结果的准确程度做出科学合理的评价。不确定度越小,表示测量结果与真值越靠近,测量结果越可靠;反之,不确定度越大,测量结果与真值的差别越大,测量的质量越低,可靠性越低。

### (一) 测量结果的表示

通常把测量结果表示成如下的简洁形式:

$$X = X_0 \pm U_x \quad (\text{单位})$$

式中  $X$  代表被测量,  $X_0$  为被测量值(大小),  $U_x$  是测量结果的总不确定度(简称不确定度)

或称合成不确定度)。可见,表示测量结果有三个要素——量值、单位和不确定度,三者缺一则不能完整地表示测量结果。

## (二) 被测量的量值 $X_0$ 的计算

直接测量时,被测量的量值  $X_0$  一般取多次测量的平均值  $\bar{X}$  (即真值的最佳值)。实验中多次测量时,

$$X_0 = \bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (\text{单位})$$

一次测量时,

$$X_0 = X \quad (\text{单位})$$

最后表示直接测量结果中被测量的量值  $X_0$  时,通常还必须将已定系统误差(即绝对值和符号都确定的已可估算出的误差分量)从平均值  $\bar{X}$  或一次测量值  $X$  中减去,以求得  $X_0$ ,即对已定系统误差分量进行修正。

设  $d_0$  为已定系统误差(如螺旋测微尺的零点值),则多次测量时,

$$X_0 = \bar{X} - d_0 \quad (\text{单位})$$

一次测量时,

$$X_0 = X - d_0 \quad (\text{单位})$$

要注意  $d_0$  的符号,  $d_0$  不是绝对值,是可正可负的代数值。在以后的叙述中,均假设已定系统误差为零,则测量结果可表示为

$$X_0 = \bar{X} \pm U_X \quad (\text{单位})$$

## (三) 测量结果的物理意义

测量结果表示为  $X = X_0 \pm U_X$  (单位) 的形式物理意义:当定义  $P$  为广泛约定的概率(也叫置信率时),若  $P=0.95$ ,表示被测量的真值落在区间  $(X_0 - U_X, X_0 + U_X)$  内的可能性约 95%。

对测量结果必须用概率的观点去理解,不确定度反映最佳估值  $X_0$  附近的一个范围,真值以一定概率落在其中,也就是说最佳估值与真值之差(即误差)以一定概率落在  $(-U_X, +U_X)$  之间,分布不同时,对应的置信概率不完全相同,不要误认为真值一定在  $(X_0 - U_X, X_0 + U_X)$  之间也不要误认为误差一定在  $(-U_X, +U_X)$  之间。

## (四) 总(合成)不确定度和相对不确定度

总不确定度简称不确定度,用符号  $U$  表示(符号下面的脚标表示是对某物理量测量的不确定度)。其物理意义就是指由于误差的存在而对被测量不能确定的程度,是表征被测量真值在某个范围内的评定。总不确定度是评定测量结果可靠程度的定量指标。

相对不确定度:用符号  $E_r$  表示,定义为不确定度除以测量结果的量值

$$E_r = \frac{U_X}{X_0} \times 100\%$$

相对不确定度是评定测量结果好坏的定量指标,评价测量结果的准确度的高低,主要看相对不确定度的大小,相对不确定度的值越小,测量结果的准确度越高。

已知测量结果的量值  $X_0$  和相对不确定度  $E_r$  时,可由下式计算出总不确定度。

$$U_X = X_0 \cdot E_r = X_0 \cdot \frac{U_X}{X_0} \quad (\text{单位})$$



### 第三节 不确定度的简化评定方法

1981年国际计量局(BIPM)公布了“实验不确定度的表示”,以统一评定测量结果可信赖程度的方法。这是计量学的一个重大发展。本节简单介绍在实验教学中引用这一方法,要求学生了解不确定度的概念,掌握最简单情况下的估算方法。

#### (一) 总(合成)不确定度的两类分量

误差按产生的物理机制和特性的不同,分为系统误差和随机误差,但从测量的目的考虑,反映测量结果可靠性的定量指标是总不确定度。总不确定度  $U$  从估算上可分为两类:

A类不确定度分量:(用符号  $U_A$  表示)是多次重复测量用统计方法计算出的分量。

B类不确定度分量:(用符号  $U_B$  表示)是用非统计的其他方法估算出的分量。

总(合成)不确定度:(用符号  $U$  表示)是将  $U_A$  和  $U_B$  用“方和根”法合成,得到高置信概率  $P=0.95$  的总不确定度,即

$$U = \sqrt{U_A^2 + U_B^2} \quad (\text{单位})$$

下文中的不确定度及其分量一般都是指总不确定度及其分量。

#### (二) 直接测量量的不确定度的评定

直接测量量的不确定度应该是这样来估计:在修正了可以修正的系统误差之后,把余下的全部误差划分为可以用统计方法计算的A类不确定度  $U_A$  和用其他方法估计的B类不确定度分量  $U_B$  分别进行估算,然后再将它们用“方和根”合成总不确定度  $U$ 。

1. A类不确定度分量  $U_A$  的简化评定。在大学物理实验中对同一量做多次直接测量时,一般测量次数不大于10,从概率论与数理统计的知识可知

$$U_A = (t/\sqrt{n}) \cdot S_x$$

A类不确定度分量  $U_A$  等于标准偏差  $S_x$  乘以因子  $(t/\sqrt{n})$ 。当测量次数  $n$  满足  $5 < n \leq 10$  时,因子  $(t/\sqrt{n}) \approx 1$ 。所以,A类不确定度分量的估算就可以近似简化为

$$U_A \approx S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} \quad (5 < n \leq 10)$$

这是一种最方便的简化处理方法,因为当  $U_B$  可忽略不计时,有

$$U = U_A = S_x$$

这时被测量的真值落在  $X_0 \pm S_x$  范围内的可能性(概率)已大于或接近95%,下文中出现的  $S_x$  除非特别注明,均表示  $U_A$  的取值的大小,即

$$U_A \approx S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} \quad (5 < n \leq 10)$$

2. B类不确定度分量的简化评定。求B类不确定度分量  $U_B$  的数值时,先估计仪器的误差限,用  $\Delta_{\text{仪}}$  表示仪器的误差限,并确定该项误差服从的分布,然后用下式计算  $U_B$ :