



普通高等教育“十一五”规划教材

# 新编大学物理实验

主 编 周自刚 杨振萍

副主编 李 祥 罗晓琴



科学出版社

[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

普通高等教育“十一五”规划教材

# 新编大学物理实验

主 编 周自刚 杨振萍  
副主编 李 祥 罗晓琴

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

本书是贯彻教育部高等学校物理基础课程教学指导分委员会在 2008 年提出的“理工科类大学物理实验课程教学基本要求”而编写的教材,突出对学生基本能力的训练和创新思维、创新方法、创新能力的培养,内容涵盖基础性实验、综合性实验、设计性实验、研究性实验和开放性实验,共 5 个部分,44 个实验.同时,书中还集中体现了功能模块化物理实验教学方法.

本书可作为普通高等工科院校、综合大学和师范类院校非物理专业的物理实验教材,也可供相关人员参考.

### 图书在版编目(CIP)数据

新编大学物理实验/周自刚,杨振萍主编. —北京:科学出版社,2010  
普通高等教育“十一五”规划教材  
ISBN 978-7-03-028386-3

I. ①新… II. ①周…②杨… 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(2010)第 142492 号

责任编辑: 董文涛 / 责任校对: 鲁 素  
责任印制: 张克敏 / 封面设计: 耕者设计工作室

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>

北京市农林印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2010 年 7 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2010 年 7 月第一次印刷 印张: 19 1/2

印数: 1—4 000 字数: 460 000

定价: 34.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 编委会名单

主 编 周自刚 杨振萍

主 审 霍剑青

副主编 李 祥 罗晓琴

参 编 (排序不分先后)

万 伟 林洪文 康丽华 赵福海

邓先金 罗 浩 谢英英 毛祥庆

## 序

物理学是研究物质的基本结构、基本运动形式、相互作用及其转化规律的学科。它的基本理论渗透在自然科学的各个领域,应用于生产技术的许多部门,是自然科学和工程技术的基础。

物理学本质上是一门实验科学。物理实验是科学实验的先驱,体现了大多数科学实验的共性,在实验思想、实验方法以及实验手段等方面是各学科科学实验的基础。物理实验课是高等理工院校对学生进行科学实验基本训练的必修基础课程,它在培养学生严谨的治学态度、活跃的创新意识、理论联系实际和适应科技发展的综合应用能力等方面具有其他实践类课程不可替代的作用。

由周自刚、杨振萍主编的《新编大学物理实验》教材以培养高素质人才为目标,凝练了作者及西南科技大学实验教学团队多年来在教学研究和教学实践中形成的先进教学思想、教学方法和教学经验,融合了近几年科技前沿的新技术、新方法和先进的信息化教育教学技术、教学手段。教材理念先进、体系新颖、结构合理、内容丰富、适用性强。该教材根据各专业、各层次学生的特点,建立了学科交叉、逐步升级的物理实验课程体系,将大学物理实验分为基础性、综合性、设计性、研究性、开放性实验等层次。实验涵盖了力学、热学、电磁学、光学和近代物理领域的教学内容。教材中所选择的实验题目既包含了在物理学发展史上起过重要里程碑作用、多年来在人才培养中发挥了重要作用的传统实验,又包含了反映科技前沿领域新思想、新方法、新技术和新应用的实验。

设计性、研究性、开放性实验是激发学生学习热情、挖掘学生学习潜能的有效途径。该教材强调实验的设计性,将实验的设计性思想贯穿于每一层次的物理实验中,提出了“功能模块化物理实验教学方法”,强化学生对实验设计思想、实验方法的训练。结合仿真实验的开设为学生创造了自主学习的环境,解决了面向学生开设设计性、研究性实验在时间、空间和师资力量等方面的困扰,为实现大面积学生的设计性、研究性实验教学创造了条件。该教材将仿真实验以开放性实验教学模式开设,结合各类型实验的开设,将在提高实验教学的水平和教学质量中发挥很好的作用。

教材是教学的依据,它反映了教学思想、教学目标、教学内容和教学方法,是理念和教学成果的结晶。周自刚、杨振萍主编的《新编大学物理实验》教材充分反映了西南科技大学实验教学团队多年来在物理实验教学一线的奉献的精神和所取得的优秀教学成果。祝愿该教材的出版在实施“理工科类大学物理实验课程教学基本要求”,提高高校物理实验教学水平和教学质量中发挥重要作用。



2010年7月6日

## 前 言

本书是根据教育部高等学校物理基础课程教学指导分委员会在 2008 年提出的“理工科大学物理实验课程教学基本要求”，并按照四川“省级基础物理实验教学示范中心”建设要求，同时结合具体情况与专业特点、实验室仪器设备情况和教学实践，在不断探索高等教育改革与不断总结经验基础上，对 2005 年由我们编写的《大学物理实验》(四川大学出版社第一次出版)进行修订改编而成。

编写本书的理念是以学生为中心，突出对学生基本能力的训练和创新思维、创新方法、创新能力的培养。在内容的安排上，分为基础性实验、综合性实验、设计性实验、研究性实验和开放性实验 5 个部分。在整个实验，尤其是基础性实验中贯穿功能模块化物理实验教学方法。功能模块化就是指按同一物理现象(原理)观测(验证)的多种方法和同一物理方法多种应用的一组实验组成功能模块。该方法的施行，既能使学生的基本实验技能得到全面训练，又能使学生在校期间的科研素养得到一定的提升。

本书依照精选内容的原则，按由浅至深的规律，主要包括以下 5 个部分。第一部分是基础性实验，主要包括力学、热学、声学、电学、磁学、光学和近代物理的 19 个实验。第二部分是综合性实验，主要包括 PASCO 等 9 个实验。第三部分是设计性实验，主要包括自组望远镜与显微镜等 8 个实验。第四部分是研究性实验，主要包括迈克耳孙干涉仪应用研究等 6 个实验。第五部分是开放性实验，主要包括演示实验和仿真实验若干个。同时在每部分有理论知识介绍、实验背景、实验过程、注意事项、思考题和综合模拟题等。根据需要，本书可适用于不同学时数授课，包括 64、48、32 和 16 学时。

本书由周自刚和杨振萍担任主编，李祥和罗晓琴担任副主编，参编人员有林洪文、万伟、毛祥庆、康丽华、赵福海、邓先金、谢英英、罗浩等。其中第一部分由万伟、林洪文、康丽华、赵福海负责编写，第二部分由杨振萍、邓先金负责编写，第三部分由罗晓琴、谢英英负责编写，第四部分由周自刚负责编写，第五部分由李祥、毛祥庆、罗浩负责编写。最后由李祥和罗晓琴整理，周自刚和杨振萍负责统稿和审核。本书由中国科学技术大学霍剑青教授主审。

编 者

省级大学物理实验教学示范中心

2010 年 5 月

# 目 录

序

前言

绪论	1
<b>第一部分 基础性实验</b>	<b>27</b>
实验 1.0 预备知识	27
实验 1.1 杨氏模量的测定	43
实验 1.2 液体表面张力系数的测定	50
实验 1.3 落球法测定液体的黏度	54
实验 1.4 非线性电阻的伏安特性测量	60
实验 1.5 示波器的使用	64
实验 1.6 静电场描绘	69
实验 1.7 电表的扩程和校准	73
实验 1.8 电势差计的使用	78
实验 1.9 用电桥测电阻	83
实验 1.10 磁场的测定	91
实验 1.11 声速的测量	99
实验 1.12 分光计调整	105
实验 1.13 光栅衍射测波长	113
实验 1.14 光的偏振	116
实验 1.15 等厚干涉	122
实验 1.16 迈克耳孙干涉仪测 He-Ne 激光的波长	127
实验 1.17 弗兰克-赫兹实验	135
实验 1.18 光电效应测定普朗克常量	139
实验 1.19 用旋光仪测旋光性溶液的旋光率和浓度	150
<b>第二部分 综合性实验</b>	<b>156</b>
实验 2.1 密立根油滴实验	158
实验 2.2 交流电桥	164
实验 2.3 热的传导及导热系数测量的研究	167
实验 2.4 PASCO 实验	170
实验 2.5 材料热物性实验	190
实验 2.6 霍尔效应的应用	194
实验 2.7 双臂电桥原理及应用	198
实验 2.8 温度传感器的测量	203

实验 2.9 塞曼效应测定电子荷质比 .....	208
<b>第三部分 设计性实验</b> .....	216
绪论 .....	216
实验 3.1 微小长度的测量 .....	218
实验 3.2 振动的研究 .....	219
实验 3.3 变阻器在电路中的使用和研究 .....	219
实验 3.4 电位差计校准电表和测定电阻 .....	220
实验 3.5 望远镜和显微镜的组成 .....	220
实验 3.6 光栅常数的测定及光栅特性研究 .....	221
实验 3.7 光学介质折射率的测定及应用 .....	221
实验 3.8 光的偏振性及应用的研究 .....	222
<b>第四部分 研究性实验</b> .....	223
绪论 .....	223
实验 4.1 迈克耳孙干涉仪应用研究 .....	223
实验 4.2 单缝衍射光强分布的研究 .....	228
实验 4.3 透明材料的透射率测定的研究 .....	231
实验 4.4 光速测量的研究 .....	234
实验 4.5 变折射率介质传输光信息的研究 .....	239
实验 4.6 太阳能电池转换的研究 .....	243
<b>第五部分 开放性实验</b> .....	247
实验 5.1 仿真实验 .....	247
实验 5.2 物理演示实验 .....	259
物理实验练习题(1) .....	278
物理实验练习题(2) .....	280
物理实验练习题(3) .....	283
物理实验练习题(4) .....	286
物理实验练习题(5) .....	290
物理实验练习题(6) .....	292
附录 I 随机误差的补充知识 .....	294
附录 II 标准合成与技术规范合成标准不确定度 .....	295
附录 III 数字修约的国家标准 GB1:1 .....	298
附录 IV 教学中常用仪器误差限 $\Delta_{\text{仪}}$ .....	299
参考文献 .....	301



## 绪 论

人类认识自然离不开观察和测量. 在物理实验中对自然界的物理现象或人工再现的物质运动形态的研究, 不仅需要定性的观察, 更需要定量的测量, 以探索各物理量之间的定量关系, 从而验证理论或发现规律.

### (一) 测量

测量是为确定被测对象的量值而进行的被测量与同类标准量(量具或仪器)相比较的过程. 因此, 为进行测量必须具备测量对象、测量单位、测量方法和测量准确度等四大要素. 测量的读数是被测量与计量单位的比值, 测量数据(被测量量值)则必须包含测量值的大小和测量单位, 二者缺一不可.

### (二) 测量的分类

#### 1. 直接测量与间接测量

根据测量方法, 测量可分为直接测量与间接测量.

**直接测量**是把待测量与标准量直接比较得出结果. 如用米尺测量物体的长度, 用天平称衡物体的质量, 用电表测电流等.

**间接测量**是借助于函数关系由直接测量的结果来计算出所要求的物理量. 如立方体的长( $L$ )、宽( $D$ )、高( $H$ )由直接测量得出, 而其体积则由公式  $V=L \cdot D \cdot H$  计算得出, 这就是间接测量.

在物理实验中有直接测量和间接测量, 但大量的是间接测量. 因为在某些情况下, 直接测量比较复杂或者测量精度不高, 而另一些情况下直接测量无法实现.

#### 2. 等精度测量与非等精度测量

根据测量条件, 测量可分为等精度测量与非等精度测量. **等精度测量**是指在同一(相同)条件下对同一待测量进行的多次测量. 例如, 同一个人, 用同一个仪器, 每次测量的环境条件均相同. 等精度测量, 每次测量的可靠程度相同. 若每次测量的条件不同, 或测量仪器、测量方法改变, 这样进行的一系列测量叫**非等精度测量**. 显然非等精度测量, 每次测量的可靠程度也不相同. 物理实验中大多数采用等精度测量.

### (三) 测量仪器

**测量仪器**是指用以直接或间接测出被测对象量值所用的器具, 如游标尺、天平、停表、电桥、分光计等.

测量结果给出被测量的量值, 它包括两部分, 数值和单位(不标出单位的数值不能是量值).

一个国家的最准确的计量器具是一些主基准,在全国各地则有由主基准校准过的工作基准,实验室使用的仪器已直接或间接用工作基准进行校准过。

仪器的准确度等级在测量时是以仪器为标准进行比较,当然要求仪器准确。不过由于测量的目的不同对仪器准确程度的要求也不同,比如称量金戒指的天平必须准确到 $0.001\text{g}$ ,而粮店卖粮的台秤差几克都是无关紧要的。为了适应各种测量对仪器的准确程度的不同要求,国家规定工厂生产的仪器分为若干准确度等级。各类各等级的仪器,又有对准确程度的具体规定。例如,1级螺旋测微计,测量范围小于 $50\text{mm}$ ,最大误差不超过 $\pm 0.004\text{mm}$ ;又如,1.0级电流表,测量范围为 $0\sim 500\text{mA}$ ,最大误差不超过 $\pm 5\text{mA}$ 。

实验时要恰当地选取仪器。仪器使用不当对仪器和实验均不利。表示仪器的性能有许多指标,其中最基本的是测量范围和准确度等级。当被测量超过仪器原测量范围时,首先对仪器会造成损伤,其次可能测不出量值(如电流表),或勉强测出(如天平),但误差将增大。对仪器原准确度等级的选择也要适当,一般是在满足测量要求的条件下,尽量选用准确程度低的仪器。减少准确度高的仪器的使用次数,可以减少在反复使用时的损耗,延长其使用寿命。

## 一、测量与误差

### (一) 测量的目的

测量的目的是确定被测量的量值大小,被测量在一定的时间、一定空间环境条件下,存在着不依人的意志为转移的真实大小,称此值为被测量的真值 $x_0$ 。测量的理想结果是真值,但是由于诸多因素影响,真值是不能确知的,因为:

(1) 被测量的数值形式与标准量的比常常是不可通约的(不能以有限位数表示)。

(2) 人类认识能力的不足和科学技术水平的限制。如测量仪器只能准确到一定程度;测量的理论和方法不完备,具有近似性;观测者操作和读数不准确;环境条件的影响等。

因而测得值和真值总是不一致的,即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过程之中,此称为误差公理。

为了衡量和表示误差的大小,规定测得值 $x$ 减去真值 $x_0$ 为测得值的误差 $\delta$ ,即

$$\delta = x - x_0 \quad (0.1.1)$$

误差 $\delta$ 也称为绝对误差,是一个具有与测得值和真值相同单位的数据,且为一代数。当 $x \geq x_0$ 时, $\delta \geq 0$ ;  $x < x_0$ 时, $\delta < 0$ 。

一般说来,真值是理想的概念,是不能确知的,因而测得值的误差也不能确知。但是在某些情况下真值是可行的,而另一些情况下从相对意义上说也是可行的。

真值可知和相对可行的情况如下。

(1) 理论真值:如平面三角形三内角之和恒为 $180^\circ$ ;理想电容和电感上,其电压和电流的相位差为 $90^\circ$ ;此外,还有理论设计值和理论公式表达值等。

(2) 计量学约定真值:由国际计量大会决议规定的基本物理量的计量标准,如长度单位——米(m)是光在真空中在 $1/299792458\text{s}$ 的时间间隔行程的长度。

(3) 标准器相对真值:高一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  $1/3 \sim 1/20$ )时,则可认为前者是后者的相对真值.例如,一个高稳定度晶体振荡器输出的频率,相对于普通频率计的频率而言是真值.

(4) 近似真值(近真值)——最佳估计值:直接测量时若不需要对被测量进行系统误差的修正,一般就取多次测量的算术平均值  $\bar{x}$  作为近真值:  $\bar{x} = \frac{1}{n}(x_1 + x_2 + x_3 + \cdots + x_n)$ , 实验中有时只需测一次或只能测一次,该次测量值就为被测量的近真值.若要求对被测量进行已定系统误差的修正,通常是将已定系统误差(即绝对值和符号都确定的可估计出的误差分量)从算术平均值  $\bar{x}$  或一次测量值中减去,从而求得被修正后的直接测量结果的近真值.例如,螺旋测微计测长时,从被测量结果中减去螺旋测微计的零差.在间接测量中,近真值  $\bar{N}$  即为被测量的计算值:  $\bar{N} = F(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, \cdots)$ .

同一被测量,在相同环境条件下,采用当今最精确的方法和最高精度的仪器经多次测量所得结果,且为科技界公认的值,也作为一般测量的真值,如在标准大气压下  $4^\circ\text{C}$  的水的密度  $\rho_{\text{公认}} = 0.999973\text{g/cm}^3 \approx 1\text{g/cm}^3$ , He-Ne 激光器橙色光波的波长  $\lambda_{\text{公认}} = 632.8\mu\text{m}$ .

以上所述约定真值、近真值、公认值等,有的文献统称为约定真值.

## (二) 测量的任务

基于以上理由,测量的任务是:

- (1) 给出被测量真值的最佳估计值;
- (2) 给出真值最佳估计值的可靠程度的估计.

最佳估计值是误差比较小的测量结果,为了减少误差就必须分析误差的来源以便采取相应对策.实际上任何测量的误差都是多种因素引入的综合效应,现以单摆测重力加速度实验为例分析.

理想的单摆模型是悬线质量为零,无弹性,摆锤为无大小的质点.摆角接近于零,则摆  $l$  和周期  $T$  之间满足关系  $T = 2\pi \sqrt{l/g}$ , 其中  $g$  为当地的重力加速度.

用实际的单摆测重力加速度时,误差来源大致为以下几方面:

- (1) 测量仪器,如米尺和停表不准确;
- (2) 对仪器的操作和读数不准确;
- (3) 单摆本身不是理想模型,摆线质量不为零,或摆线具有弹性,摆锤体积不为零,摆角大小不接近零;
- (4) 空气的阻力和浮力的影响;
- (5) 支点状态不理想,支架不稳定,存在震动和气流影响.

由此可见,对误差的来源可概括为:

- (1) 理论和方法;
- (2) 元器件、仪器装置等;
- (3) 实际环境条件;
- (4) 观测者和监视器.

## (三) 误差的表达形式

除上述绝对误差外,为了比较两个或两个以上不同测量结果的可靠程度,以及比较不

同仪器的测量精确度,还引入了相对误差和引用误差,它是一个比值,没有单位,通常用百分数来表示,一般用“四舍六入五看右左”取二位有效数字.

$$\text{相对误差 } E_r = \frac{|\text{测量值 } x - \text{真值 } x_0|}{\text{真值 } x_0} \times 100\% \quad (0.1.2)$$

在真值不确定,而误差  $\delta$  较小时采用

$$\text{相对误差 } E_r = \frac{|\text{测量值 } x - \text{近真值 } \bar{x}|}{\text{近真值 } \bar{x}} \times 100\% = \frac{\Delta x}{\bar{x}} \times 100\% \quad (0.1.3)$$

引用误差是一种简化的和实用方便的相对误差.一般用它来表示仪器、仪表的精确度等级.在多档和连续分度的仪器中,其可测范围不是一个点而是一个量程,各分度点的示值和对应的真值都不一样.若用测得值(仪表示值)或真值来计算相对误差,每一点的分母就不一样.为了计算和划分准确度等级方便,一律取该仪器的量程或测量上限值为分母

$$\text{引用误差 } S\% = \frac{\text{绝对误差 } \Delta x}{\text{量程(或测量上限)} x_m} \times 100\% \quad (0.1.4)$$

仪表的准确度级别分为:0.1,0.2,0.5,1.0,1.5,2.5和5.0七级,即仪表所对应的最大引用误差为0.1%,0.2%,...,5.0%.

在实验中,一般用仪表的准确度(即最大引用误差)求仪表读数的最大误差,若某仪表的精度等级为  $S$ ,取最大引用误差为  $S\%$ ,满刻度值为  $x_m$ ,则该仪表测量值  $x$  的最大误差为

$$\text{绝对误差} \leq x_m \times S\%$$

$$\text{相对误差} \leq \frac{x_m}{x} \times S\%$$

一般  $x < x_m$ ,由此可见,当  $x$  越接近  $x_m$  时,测量精确度越高;反之越低.因此利用这类仪表测量时,应尽可能在仪表满刻度值  $2/3$  或  $1/2$  以上的量值内使用.

## 二、误差的分类

一般测量误差随着不同的测量次数、测量时刻或测量条件而改变,为研究和处理误差方便,可根据误差产生的原因和表现形式,将误差划分为系统误差、随机误差和粗大误差.

### (一) 系统误差

#### 1. 系统误差的定义

在规定的测量条件下多次测量同一量时,误差的绝对值和符号保持恒定;或在该测量条件改变时,按某一确定规律变化的误差称为系统误差.

#### 2. 系统误差的特性

确定性规律性,即误差是恒定的或为某些因素确定函数的函数,此函数一般可用解析公式、曲线或数表来表达,如某些电量测量值是频率的函数,长度是温度的函数等.

### 3. 系统误差的检查

可以从系统误差产生的原因来检查系统误差是否存在:

(1) 理论方法方面:实验所用的理论公式、方法具有近似性和不完备性,以至于忽略了某些项或某些项取近似而引入系统误差.如单摆测重力加速度时,忽略了空气阻力或摆角过大等.

(2) 仪器及环境方面:分析仪器和环境是否符合实验要求,如天平是否等臂,秒表是否准确,刻度是否偏心,环境温度、湿度是否在规定范围内,否则会产生系统误差.

(3) 检查测量数据:对某一物理量进行多次测量时,将各测量值之误差按测量先后次序排列,观察其变化,如果呈现规律性变化(线性增大或减小,或周期性变化),则必有系统误差存在.若用不同的方法或不同精度的仪器测量同一物理量时,在随机误差允许范围内测量结果仍有明显的不同时,说明其中某种方法或某种仪器的测量结果存在系统误差.

### 4. 系统误差的消除

#### 1) 消除产生系统误差的原因

在明确了系统误差产生的原因后,应采取相应的方法在实验前进行消除,使它在实验过程中不再出现,这是消除系统误差的有效方法.例如,系统误差的出现是由于仪器使用不当,就应该把仪器调整好,并按规定的使用条件去使用;如误差来源于环境因素的影响,应排除这种环境因素等.

#### 2) 由实验方法消除系统误差

若有些系统误差在实验前不能消除时,在实验过程中,可采用适当的实验方法使系统误差互相抵消.

(1) 恒定系统误差的消除:①交换法.将测量中某些条件(如被测物的位置)互相交换,使产生系统误差的原因对测量结果起相反的影响,从而抵消系统误差.如为了消除天平不等臂带来的系统误差,可将被测物与砝码互换位置后再测量一次,若第一次测量结果为  $x = \frac{l_2}{l_1} P$ , 被测物与砝码互换位置后测量结果为  $x = \frac{l_1}{l_2} P'$ , 将两次测量结果相乘后再开方得  $x = \sqrt{PP'}$  ( $P, P'$  为两次测量的砝码质量), 这就消除了不等臂系统误差.②代替法.代替法是在测量条件不变的情况下,用一个标准量去代替被测量,并调整标准量使仪器示值不变,这样被测量就等于标准量的数值.由于在代替过程中,仪器的状态和示值都不变,故仪器原误差和其造成系统误差的因素对测量结果不产生什么影响.如用电桥测电阻时,将电桥调平衡后,用一标准电阻代替被测电阻接入桥路,此时仅调整标准电阻仍使电桥平衡,读出标准电阻之值,即为测量结果.③异号法.在实验过程中,可改变测量方法(如测量方向等)使两次测量中的符号相反,取平均值以消除系统误差.例如,在用霍尔元件测磁场的实验中,为了消除由于不等位等因素带来的附加电压,在测量时,要两次分别改变加在霍尔元件上的电流方向和外加磁场方向,就是这个道理.

(2) 周期性系统误差的消除:用半周期偶数观测法可有效地消除周期性系统误差.即测得一个数据后,相隔半个周期再测量一个数据,只要观测次数为偶数,取其平均值,就可

以消除周期性系统误差对测量结果的影响. 例如, 在光学实验中, 用分光计测角度时, 为了消除轴偏心所带来的系统误差, 而采用相隔 180° 的一对游标读数.

### 3) 对系统误差进行修正

对于在实验前和在实验过程中没有得到消除的系统误差, 应在测量结果中得到修正.

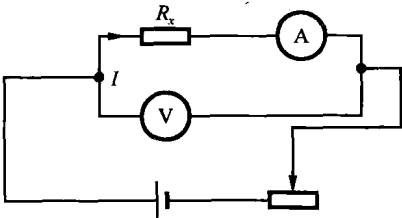


图 0.2.1 伏安法测电阻

例如, 用伏安法测电阻时, 如图 0.2.1 所示, 测量值为  $R'_x = \frac{V}{I}$ , 若考虑电流表内阻  $R_a$  的影响, 被测电阻的客观实际值应为

$$R_x = R'_x - R_a = \frac{V}{I} - R_a$$

式中,  $R_a$  就是用图 0.2.1 电路测量电阻时的修正值.

## (二) 随机误差

### 1. 随机误差的定义

随机误差即在实际测量条件下, 多次测量同一量时, 绝对值和符号变化, 即时大时小, 时正时负, 以不可预知的方式变化的误差.

如对准标志(刻线汞柱、光标)的不一致, 读数偏大与偏小有相等的可能性引起的误差. 天平变动性, 实验条件的波动等都会产生随机误差.

如用手控数字毫秒计测量一单摆的周期共 100 次, 测量值的大小变化不定, 现将测得值分布的区域等分为横坐标 9 个区间, 统计各个区间内测量值的个数  $N_i$ , 以测量值为横坐标,  $N_i/N$  为纵坐标 ( $N$  为总数), 作统计直方图(图 0.2.2).

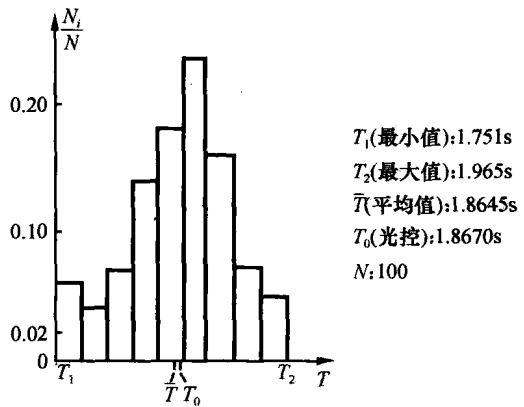


图 0.2.2 统计直方图

从图上可见, 比较多的测量值集中在分布区域的中部, 而区域的左右两半的测量值个数都接近一半. 由此可以设想被测真值就在数据比较集中的部分.

由此可见随机(偶然)误差虽然是不确定的, 即具有随机性、偶然性, 但这种偶然现象服从统计规律, 即服从正态(高斯)分布.

### 2. 随机误差的特性

由图 0.2.2 的随机误差正态分布图可以看出随机误差具有以下特性.

- (1) 有界(限)性: 在一定测量条件下, 随机误差的绝对值不会超过一定的限度.
- (2) 单峰性: 绝对值小的误差出现的概率大, 而绝对值大的误差出现的概率小.
- (3) 对称性: 绝对值相等的正误差和负误差出现的概率相等.
- (4) 抵偿性(互补性): 一系列等精度测量中, 随机误差的代数和有

$$\sum_{i=1}^n \delta_i \rightarrow 0, \quad \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n \delta_i = 0$$

随机误差的以上 4 个特性,又称为随机误差的 4 个公理.对于一系列测量,不论其条件优劣,只要这些测量是在相同条件下独立进行的,则所产生的一组随机误差必然具有上述 4 个特性,而当测量值个数  $n$  越大时,这种特性就表现得越明显.

误差存在于测量之中,测量与误差形影不离,分析测量过程中产生的误差,将影响降低到最低程度.

由于实验条件所限,以及由于人的认识的局限性,测量不可能获得待测量的真值,只能是近似值.设某物理量真值为  $x_0$ ,进行  $n$  次等精度测量,测量值分别为  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , (测量过程无明显的系统误差),它们的误差为

$$\delta_1 = x_1 - x_0, \quad \delta_2 = x_2 - x_0, \quad \dots, \quad \delta_n = x_n - x_0$$

求和

$$\sum_{i=1}^n \delta_i = \sum_{i=1}^n x_i - nx_0$$

当测量次数  $n \rightarrow \infty$ ,可以证明  $\frac{\sum_{i=1}^n \delta_i}{n} \rightarrow 0$ ,则  $\frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = x_0$ ,  $\bar{x}$  是对同一待测量多次测量形成的测量列  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$  的算术平均值.由此可见在不存在系统误差的条件下,  $\bar{x}$  可以作为测量值的最佳估计值,也称近真值.令  $\bar{x} = \sum_{i=1}^n x_i/n$ .

为了估计误差,定义测量值与近真值的差值为偏差(残差),即  $\Delta x = x - \bar{x}$ .

当测量值的误差中包含已知的系统误差时,求和时不能抵消,此时应用算术平均值加上修正值为被测量真值的最佳估计值(修正值与系统误差绝对值相等,符号相反).

有时也将以上最佳估计值和相对真值等合称为约定真值.

**标准偏差:**具有偶然误差的测量值将是分散的,对分散情况的定量表示用标准偏差  $S$ ,它的定义式为

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta x_i^2}{n-1}} \quad (0.2.1)$$

式中,  $n$  为测量值个数.

### 3. 粗大(过失)误差

粗大误差,也称过失误差,简称粗差,它是正常测量结果中不应出现的绝对值特别偏大的误差,是实验中出现的错误造成的,可能是公式错了,装置安装错了,电路错了,对象观察错了,仪器操作、读数或计算错误等.

防止错误的关键是弄清实验原理、条件,明确要观察的现象,懂得正确使用仪器.

尽早发现实验中的错误是实验者的良好修养,初学者往往只顾观测及记录和处理数

据,而忽视对测量结果进行分析,发现错误.

### 三、测量结果和评定标准不确定度

测量的目的不但要得到待测量的近真值,而且要对近真值的可靠性作出评定(指出误差范围).

#### (一) 标准不确定度的含义

标准不确定度是“误差可能数值的测度”,表征所得测量结果代表被测量的程度,也就是因测量误差存在而对测量不能肯定程度,因而是测量质量的表征.

具体来说,标准不确定度是指测量值(近真值)附近的一个范围,测量值与真值之差(误差)可能落于其中.标准不确定度小,测量结果可信赖程度高;标准不确定度大,测量结果可信赖程度低.在实验和测量工作中不确定度一词近似于不确定、不明确、不可靠、有质疑,是作为估计而言的;误差是未知的.因此,不可能用指出误差的方法去说明可信赖程度,而只能用误差的某种可能值去说明可信赖程度,所以标准不确定度更能表示测量结果的性质和测量的质量.此外,用标准不确定度评定实验结果的误差,其中包含了各种来源不同的误差对结果的影响,而它们的计算又反映了这些误差所服从的分布规律.

**标准不确定度:**对测量不确定度的评定,常以估计标准偏差去表示大小,这时称其为标准不确定度.

#### (二) 测量结果的表示和合成标准不确定度

科学实验中要求表示出的测量结果,既要包含待测量的近真值  $\bar{x}$ ,又要包含测量结果的标准不确定度  $\sigma$ ,并写成物理含义深刻的标准表达形式,即

$$x = \bar{x} \pm \sigma (\text{单位}) \quad (0.3.1)$$

式中, $x$  是待测量; $\bar{x}$  是测量的近真值; $\sigma$  是合成标准不确定度,一般用“四舍六入五看左右”的舍入规则, $\sigma$  保留一位有效数.

测量结果的标准表达式,给出了一个范围  $(\bar{x}-\sigma) \sim (\bar{x}+\sigma)$ ,表示待测量的真值在  $(\bar{x}-\sigma) \sim (\bar{x}+\sigma)$  的概率为 68.3%,不要误认为真值一定在  $(\bar{x}-\sigma) \sim (\bar{x}+\sigma)$ ,认为误差在  $-\sigma \sim +\sigma$  是错误的.

标准式中,近真值、标准不确定度、单位三要素缺一不可,否则就不能全面表达测量结果.同时在表达最后测量结果时,应由误差确定其有效数字,这是处理有效数字问题的依据,故近真值  $x$  的末位数应与标准不确定度  $\sigma$  或绝对误差  $\Delta x$  的所在位对齐,近真值  $\bar{x}$  与标准不确定度  $\sigma$  的数量级、单位要相同.

#### (三) 合成标准不确定度的两类分量

标准不确定度是“误差可能数值的测度”,是对误差大小的估计,由于误差来源不同,它对测量的影响也不同,从测量值来看其影响表现可分为两类:一类是偶然效应引起的,使测量值分散开,如手控停表测摆的周期,由于手的控制存在着偶然性,每次测量值不会



相同;另一类则使测量值恒定地向某一方向偏移,重复测量时,此偏移的方向和大小不变,如用电压表测一电阻两端的电压,由于这时偶然效应很弱,反复测量其值基本不变,当用更精密的电位差计去测时,可以得知电压表的示值有恒定的偏差,这是电压表的基本误差所致,这两类影响都给被测量引入不确定度,都要评定其标准不确定度,但评定的方法不同,因而按其评定方法不同将标准不确定度分为 A 类标准不确定度和 B 类标准不确定度.

### 1) A 类标准不确定度

统计不确定度是指可以采用统计方法(即具有随机误差性质)计算的不确定度,如测量读数具有分散性,测量时温度波动影响等.这类不确定度被认为服从正态分布规律,因此可以像计算标准偏差那样,用贝塞尔公式计算被测量的 A 类标准不确定度. A 类标准不确定度  $S$  为

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta x_i)^2}{n(n-1)}} \quad (0.3.2)$$

式中,  $i=1, 2, 3, \dots, n$  表示测量次数.

计算 A 类标准不确定度,也可以用最大偏差数、极差法、最小二乘法等,本书只采用贝塞尔公式法,并且着重讨论读数分散对应的不确定度.用贝塞尔公式计算 A 类标准不确定度,可以用函数计算器直接读取,十分方便.

### 2) B 类标准不确定度

非统计不确定度,是指用非统计方法求出或评定的不确定度,如测量仪器不准确,标准不准确,量具量质老化等.评定 B 类不确定度常用估计方法,要估计适当,需要确定分布规律,同时要参照标准,更需要估计者的实践经验、学识水平等.因此,往往是意见纷纭、争论颇多.本书对 B 类标准不确定度的估计同样只简化处理,只讨论因仪器不准对应的不确定度.仪器不准确的程度主要用仪器误差来表示,所以因仪器不准对应的 B 类标准不确定度  $u$  为

$$u = \Delta_{\text{仪}} / \sqrt{3} \quad (0.3.3)$$

式中,  $\Delta_{\text{仪}}$  为仪器误差或仪器的基本误差,或允许误差,或示值误差.一般的仪器说明书中都以某种方式注明仪器误差,是制造厂或计量检定部门给定.在物理实验教学中,仪器误差由实验室提供,见附录 III.

合成标准不确定度  $\sigma$ : 对于标准不确定度的 A 类分量和 B 类分量的合成按“方和根”计算,为简化起见,本书讨论简单情况,即 A、B 两类分量各自独立变化、互不相关,且两者均可折合成标准偏差表示,则合成标准不确定度

$$\sigma = \sqrt{\sum S_i^2 + \sum u_i^2} \quad (0.3.4)$$

### (四) 直接测量的标准不确定度

如前所述,对 A 类标准不确定度主要讨论多次等精度测量条件下,读数分散对应的