

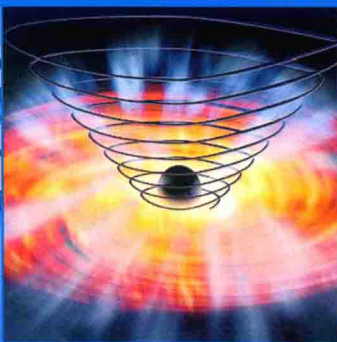
21 世纪高等院校创新规划教材

# 大学物理实验

*University Physics Experiment*

主 编 潘小青 黄瑞强

副主编 罗 飞 刘维清



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS

浙江大学出版社

# 大学物理实验

主 编 潘小青 黄瑞强  
副主编 罗 飞 刘维清



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS  
浙江大学出版社

## 内 容 简 介

本书是省精品课程建设项目立项教材,是在编者往年教材的基础上补充改编完成的。改编后的教材内容更加丰富,语言更加精练,并增加了一些全新的内容。

全书共分5章,第1章阐述了测量误差与数据处理基础知识。第2章归纳了物理实验常用的实验方法、实验技术、实验仪器及其操作规范。第3章、第4章、第5章分别精选了44个实验,按照从基础到综合再到设计性实验的层次分类编排。在第5章开篇对设计研究性实验全过程中各关键点进行了简化分析,是目前大多数实验教材所没有涉及的内容,在设计实验项目上更加广泛。

本书可作为高校理工类各专业的物理实验教学用书,也可作为相关课程教师或实验技术人员的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验/潘小青,黄瑞强主编. —杭州:浙江大学出版社,2013.8(2014.1重印)

ISBN 978-7-308-11909-2

I. ①大… II. ①潘… ②黄… III. ①物理学—实验—高等学校—教材 IV. ①04-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第170828号

## 大学物理实验

主编 潘小青 黄瑞强

---

责任编辑 邹小宁

文字编辑 叶梦箫

封面设计 王聪聪

出 版 浙江大学出版社

(杭州市天目山路148号 邮政编码 310007)

(网址: <http://www.zjupress.com>)

排 版 杭州教联文化发展有限公司

印 刷 浙江国广彩印有限公司

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 22.5

字 数 548千

版 次 2013年8月第1版 2014年1月第2次印刷

书 号 ISBN 978-7-308-11909-2

定 价 38.00元

---

版权所有 翻印必究 印装差错 负责调换

# 前 言

本书是结合当前高校物理实验教学改革的实际情况,根据现在通用物理实验仪器设备状况,在编者以往教材的基础上,吸取了近几年出版的许多优秀物理实验教材的优点,总结多年的物理实验教学经验进行精品课程建设的基础上进行全面修改完成的。适用于大学理工科本、专科各专业的基础物理实验课程教学。

本书在内容选择和编写过程中,主要基于以下考虑:

1. 第1章测量误差与数据处理中增加了不确定度内容,对不确定度的简化处理方法进行了较好的介绍。

2. 第2章归纳总结了基本的物理实验方法和实验技术、介绍了常用物理实验仪器及实验操作技术和操作规范。

3. 在实验项目分类上,根据当前实验教学的实际,按实验训练的性质和层次分为基础性实验、近代和综合性实验及设计研究性实验三个层次。在每一类型实验中按照由基础到综合、由浅入深、逐步提高的原则进行编排。

4. 在实验内容编写中,从实验全过程出发,按照实验进行的顺序介绍实验内容,便于学生规范地实验。即按预习要求撰写预习报告,阅读实验原理、实验内容,了解仪器结构和原理,实验后进行数据处理和思考题回答及实验讨论。

5. 在设计研究性实验一章,对设计性实验全过程进行了介绍,这是目前大部分物理实验教材未加以论述的内容。在设计项目上取材较广泛,内容更多样化。

6. 在一些实验项目的编写中,考虑到相同的实验内容可通过不同的实验方法加以实现,对部分实验项目列举了不同的实验方法进行描述,使本书可有不同的适用对象。

实验教学是一项集体合作的教学工作,本书的内容是我校物理实验中心许多教师共同合作完成的。参加本书编写的人员有:绪论、第1章由潘小青、黄瑞强编写;第2章由潘小青、罗飞编写;第5章由潘小青、刘维清编写;实验3、5、11、17、32、33由潘小青编写;实验1、2、4、9、14、18、19由罗飞编写;实验6、12、15、25、39由邹文强编写;实验7、13、36由刘志勇编写;实验8、24、26、27、28由刘云编写;实验10、20、21、22、23、34、35由黄瑞强编写;实验16、40、41、42、43、44由刘维清编写,实验31、37、38由刘燕勇编写;实验29、30附表由刘超飞编写。全书由潘小青统稿。

大学物理实验课程独立设课已历经二十余年,随着新技术新方法不断引入实验教学,以及实验教学改革的逐步深入,书中内容一定存在不完善和不妥当之处,真诚地希望各位同行和使用本书的教师和学生提出宝贵意见和建议。

编者于江西理工大学  
2013年5月

# 目 录

|                      |     |
|----------------------|-----|
| 绪 论                  | 1   |
| 第1章 测量误差与数据处理        | 3   |
| 1.1 测量与误差            | 3   |
| 1.2 系统误差及其处理         | 6   |
| 1.3 随机误差及其估算         | 8   |
| 1.4 仪器误差             | 11  |
| 1.5 直接测量量及间接测量量的误差传递 | 14  |
| 1.6 不确定度             | 21  |
| 1.7 有效数字及其运算规则       | 24  |
| 1.8 数据处理方法           | 30  |
| 第2章 物理实验基础           | 42  |
| 2.1 基本实验方法和实验技术      | 42  |
| 2.2 基本物理实验仪器         | 52  |
| 2.3 基本操作技术           | 73  |
| 2.4 物理实验操作规范         | 76  |
| 第3章 基础物理实验           | 78  |
| 实验1 拉伸法测量杨氏模量        | 78  |
| 实验2 冷却法测量金属的比热容      | 82  |
| 实验3 用扭摆法测定物体的转动惯量    | 84  |
| 实验4 固体热膨胀系数的测定       | 89  |
| 实验5 气轨上守恒定律的研究       | 91  |
| 实验6 电子束实验            | 95  |
| 实验7 电桥法测电阻           | 102 |
| 实验8 静电场的模拟           | 107 |
| 实验9 热电偶温差电动势测量       | 111 |

|                            |            |
|----------------------------|------------|
| 实验 10 示波器 .....            | 116        |
| 实验 11 整流滤波电路的设计 .....      | 126        |
| 实验 12 冲击电流计测量磁场 .....      | 129        |
| 实验 13 分光计的调节与使用 .....      | 134        |
| 实验 14 等厚干涉 .....           | 142        |
| 实验 15 光栅衍射 .....           | 148        |
| 实验 16 偏振光的研究 .....         | 150        |
| <b>第 4 章 综合性物理实验 .....</b> | <b>156</b> |
| 实验 17 迈克尔逊干涉仪 .....        | 156        |
| 实验 18 光电效应—普朗克常数的测定 .....  | 162        |
| 实验 19 夫兰克—赫兹实验 .....       | 167        |
| 实验 20 密立根油滴实验测电子电荷 .....   | 173        |
| 实验 21 波尔共振实验 .....         | 182        |
| 实验 22 气体中声速的测定 .....       | 191        |
| 实验 23 超声光栅测声速实验 .....      | 198        |
| 实验 24 应变式传感器 .....         | 202        |
| 实验 25 电容式传感器实验 .....       | 207        |
| 实验 26 霍尔传感器位移特性实验 .....    | 209        |
| 实验 27 光电传感器实验 .....        | 213        |
| 实验 28 光纤传感器 .....          | 215        |
| 实验 29 太阳能电池基本特性的研究 .....   | 219        |
| 实验 30 PN 结正向特性的研究和应用 ..... | 223        |
| 实验 31 铁磁材料的磁滞回线 .....      | 231        |
| 实验 32 计算机仿真实验 .....        | 243        |
| <b>第 5 章 设计研究性实验 .....</b> | <b>250</b> |
| 5.1 设计研究性实验概述 .....        | 250        |
| 5.2 设计研究性实验的任务和测量对象 .....  | 250        |
| 5.3 设计性实验的方法选择 .....       | 251        |
| 5.4 选择测量仪器及测量条件 .....      | 255        |
| 实验 33 重力加速度的测量研究 .....     | 257        |
| 实验 34 简谐振动的研究 .....        | 259        |
| 实验 35 温度传感器的温度特性研究 .....   | 263        |
| 实验 36 非平衡电桥的原理和设计应用 .....  | 276        |
| 实验 37 电表改装和万用表设计 .....     | 284        |
| 实验 38 数字万用表的设计和校准 .....    | 289        |
| 实验 39 二阶电路的响应研究 .....      | 312        |

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| 实验 40 非线性混沌电路实验 .....      | 315 |
| 实验 41 混沌加密通信实验 .....       | 319 |
| 实验 42 卫星电视信号的地面接收 .....    | 325 |
| 实验 43 电视信号的采集与处理 .....     | 331 |
| 实验 44 信号的传送(流媒体网络传输) ..... | 335 |
| 总附录 .....                  | 342 |
| 参考书目 .....                 | 350 |

# 绪 论

## 一、物理实验的地位和作用

物理学从本质上来说是一门实验科学,物理实验在推动自然科学、工程技术的发展中起着至关重要的作用。历史上每次重大的技术革命都源于物理学的发展。热力学、分子物理学的发展,促使了热机、蒸汽机的发明,带来了第一次工业革命;电磁学理论和实验的发展,使人类进入了电气化时代,实现了第二次工业革命;原子物理学、量子力学的发展,促进了半导体、激光、核技术、电子计算机的迅猛发展,引发了第三次科技进步浪潮。物理实验是物理学的两大支柱之一,一切物理概念的建立、物理规律的发现和物理理论的形成都有赖于物理实验,并接受实验的检验。

物理实验反映了各个自然学科科学实验的共性和普遍性问题。其实验原理、方法及技术已被广泛地运用于现代的科学研究、生产技术各领域中。它在培养学生严谨的科学思维能力和创新能力,培养学生理论联系实际、特别是与科学技术发展相适应的综合能力,适应新世纪人才培养目标方面有着不可替代的重要作用。

## 二、大学物理实验课的目的与任务

大学物理实验课是高等院校对理工科学生进行科学实验基本训练的必修通识教育课程,是大学生进入大学后接受系统实验方法和实验技能训练的开端。大学物理实验课覆盖广泛的学科领域,具有多样化的实验方法和手段,以及综合性很强的基本实验技能训练,它是培养学生创新意识和创新能力,引导学生确立正确科学思想和科学方法,提高学生科学素质的重要基础。

1. 学生通过对物理实验现象的观察、分析和对物理量的测量,学习物理实验的思想、原理和方法,加深对物理学原理和物理实验创意的理解。

2. 培养与提高学生的科学实验基本素质。其中包括以下几个方面。

(1)能够通过阅读实验教材或资料,基本掌握实验原理及方法,为进行实验作准备。

(2)能够借助教材或仪器说明书,在老师指导下,正确使用常用仪器及辅助设备,加深对实验设计思想的理解。

(3)能够运用物理学理论对实验现象进行初步的分析判断,逐步学会提出问题,分析问题和解决问题的方法。

(4)能够正确记录和处理实验数据,绘制实验曲线,分析实验结果,撰写合格的实验报告。



(5)能够完成符合规范要求的具有设计性内容的实验。

(6)在老师指导下,能够查阅有关方面科技文献,用实验原理、方法能够进行简单的具有研究性或创意性内容的实验。

3. 培养与提高学生的科学实验素养。要求学生具有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,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。

### 三、大学物理实验课的主要教学环节

#### 1. 实验预习

在进行实验前必须预习。通过预习可以清楚本次实验需要达到哪些目的,用到什么物理原理,采用什么样的实验方法,用到什么样的仪器装置,测量哪些物理量才能实现实验的要求。在预习的基础上撰写预习报告,预习报告是实验工作的前期准备,是写给自己参考用的。因此预习报告要求简单明了,主要是明确实验目的,理解实验原理和内容,了解测量仪器和测量方法,了解实验过程和注意事项。预习报告的内容包括:实验名称、实验目的、实验原理简述(含必要的理论公式和电路图或光路图)、实验过程概要、列出记录数据的表格(写出已知量、指定量、待测量和各量的单位)。

#### 2. 实验操作

进入实验室后,按照编组号使用相应的实验仪器。实验过程中要求遵守实验室规则,了解实验仪器的使用及注意事项,正式测量之前可作试验性探索操作。实验进程中仔细观察和认真分析实验现象,如实记录实验数据和现象(用钢笔或圆珠笔记录数据,原始数据不得改动)。有效数字位数表示要正确,数据之间适当留有间隙,以便补充。如出现记录错误,应用单划线划掉,再在旁边写上正确值,不允许涂改数据,更不允许抄袭他人数据。不要忘记记录有关实验环境条件、仪器的规格和准确度等级以及被测量量的单位。实验完毕需经指导教师核准数据并签字认可后,方可整理仪器,离开实验室。

#### 3. 实验报告

实验报告是写给同行看的,所以必须充分反映自己的工作收获和结果,反映自己的能力水平,具有自己的特色。实验报告要有条理性,并注意运用科学术语。必须要有实验的结论和对实验结果的讨论、分析或评估。实验原理要简明扼要,要有必要的电路图或光路图和主要的数据处理过程,一定要正确表示实验结果,尤其是利用作图求得的一些物理量。

实验报告内容包括:实验名称、实验目的、主要实验仪器设备、原理简述(原理图、电路图或光路图,以及主要计算公式等)、实验的主要过程(内容和步骤)、实验数据表格、数据处理计算的主要过程、必要的作图以及实验结果表示、实验现象分析、实验误差评估或不确定度计算、实验小结和问题讨论等。

# 第1章 测量误差与数据处理

## 1.1 测量与误差

### 1.1.1 测量

在科学实验中,一切物理量都是通过测量得到的。所谓测量就是将被测的物理量与规定作为标准单位的同类物理量(或称为标准量)通过一定方法进行比较,其倍数即为被测物理量的测量值。

根据获得测量结果的方法不同,测量分为直接测量和间接测量。

由仪器或量具可以直接进行读数的,称为直接测量。例如,用米尺测量物体的长度,用天平测量物体质量,用电流表测量电路中的电流等都是直接测量。

在大多数情况下,需要借助一些函数关系式用直接测量的结果计算出所要求的物理量,这样的测量称为间接测量。例如,测量钢球的密度时,首先要用游标卡尺或千分尺测量出它的直径  $D$ ,用天平称出它的质量  $M$ ,然后再通过函数关系式  $\rho = 6M/(\pi D^3)$  计算出钢球的密度来。

一个测量数据不同于一个数值,它是由数值和单位两部分组成的,一个数值有了单位,便具有了一定的物理意义,这时它才可以作为一物理量。因此,在实验中测量所得的值(数据)应包括数值和单位。

### 1.1.2 误差

任何物质都有自身的各种各样的特性,反映这些特性的物理量所具有的客观的真实数值称为这些物理量的真值。测量的目的就是要力求得到真值,但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,由一定的人进行的。在实验测量过程中,由于受到测量仪器、测量方法、测量条件和测量人员的水平以及种种因素的限制,使测量结果与客观存在的真值不可能完全相同,所测得的只能是某些物理量的近似值,即,任何一种测量结果的测量值与客观存在的真值之间总会或多或少地存在一定的差值。这种差值称为测量值的测量误差,或称测量值的绝对误差,简称误差,即

$$\text{误差} = \text{测量值} - \text{真值}$$

测量误差也可用相对误差来表示,即

$$\text{相对误差} = \frac{\text{误差}}{\text{真值}} \times 100\%$$

如果用  $x_0$  表示真值,  $x$  表示测量值,则绝对误差  $\Delta x$  (或  $\Delta$ ) 可表示为

$$\Delta x = x - x_0 \quad (1.1)$$

绝对误差可以比较不同仪器测量同一物理量的准确度的高低。

相对误差  $E$  可表示为

$$E = \frac{\Delta x}{x_0} \times 100\% \quad (1.2)$$

相对误差可以比较不同被测物理量的测量的准确度的高低。

绝对误差与相对误差之间的关系是

$$\Delta x = x_0 \cdot E$$

被测量的真值是一个理想概念,一般说来真值是不知道的,在实际测量中常用被测量的实际值或算术平均值代替真值,称为约定真值。测量的结果记为

$$x = \bar{x} \pm \Delta x \quad (1.3)$$

它表示真值  $x_0$  是在  $\bar{x} - \Delta x$  至  $\bar{x} + \Delta x$  区间内,  $\Delta x$  越小,测量值与真值越接近,测量的准确度也就越高。没有单位的物理量是没有意义的,测量结果包括测量值、误差和单位,三者缺一不可。

### 1.1.3 偏差

由于真值未知,所以测量的绝对误差在大多数情况下也是未知的,研究分析误差都是从偏差着手。

设  $x_1, x_2, \dots, x_n$  为某量  $x$  的  $n$  次重复测量值,  $\bar{x}$  为该测量列的算术平均值,则称各个测量值与  $\bar{x}$  之间的差值为偏差。即

偏差 = 测量值 - 算术平均值

记为

$$v_i = x_i - \bar{x} \quad (1.4)$$

其中

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (1.5)$$

由后面的进一步讨论可知,该测量列算术平均值的标准差(简称标准差)为

$$\sigma_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\sum v_i^2}{n(n-1)}} \quad (1.6)$$

测量结果一般可表示为

$$x = \bar{x} \pm \sigma_{\bar{x}} \quad (1.7)$$

它表示真值  $x_0$  出现  $\bar{x} - \sigma_{\bar{x}}$  至  $\bar{x} + \sigma_{\bar{x}}$  区间内的概率为 68.3%。

在大学物理实验中,一般要求用标准差来估算实验误差。

### 1.1.4 误差的分类

误差按其来源和性质可分为两大类:系统误差和随机误差。

## 1. 系统误差

系统误差的特点是它的确定规律性。在一定的实验条件下(方法、仪器、环境和观测人都不变)多次测量同一量时,误差的大小和正负号保持不变,或按一定规律变化,或是有规律重复的误差,称为系统误差,系统误差主要来自以下几个方面。

(1)理论(方法)误差:这是由于测量依据的理论公式本身的近似性;实验条件或测量方法不能达到理论公式所规定的要求等而引起的误差。例如,用伏安法测电阻,采用不同的联接方法,电表内阻的影响等所带来的误差。

(2)仪器误差:这是由于测量仪器本身固有缺陷或没有按规定使用而引起的。例如,用未经校准零位的千分尺测量零件的长度,用不十分准确的天平称物体的质量等引起的误差。

(3)环境误差:由于环境条件变化所引起的误差。例如,温度、气压、湿度的变化等。

(4)个人误差:这是由于测量者本身的生理和心理特点,或因个人习惯所带来的误差。例如,测量者反应速度的快慢、分辨能力的高低、读数习惯和精神状态等原因造成的误差。

总之,系统误差是在一定实验条件下由一些确定的因素引起的,它使测量结果总是表现出确定的规律性。因此,试图在相同的条件下用增加测量次数来减少或消除它是行不通的,只有找到某个系统误差产生的原因,才能采取一定的方法减少或消除它的影响,或对测量结果进行修正。

## 2. 随机误差

随机误差的特点是它出现的随机性。有相同条件下,多次测量同一量值,每一次测量的误差时大时小,误差的符号时正时负,没有确定的变化规律,呈现无规则的涨落,且无法控制和预测,这样的误差称为随机误差,也称为偶然误差。

随机误差是由于偶然的或不确定的因素引起的,它主要来自以下几个方面。

(1)主观方面:由于人们的感官灵敏度和仪器的精密度有限,操作不熟练,估计读数不准等。

(2)客观方面:外界环境干扰,如温度的微小起伏、气流的扰动、杂散的磁场的不规则脉动等。在相同条件下,对同一物理量作多次测量,随机误差较小的数据比误差较大的数据出现的概率要大得多;在多次测量中绝对值相同的正误差或负误差出现的机会是相等的,全部的误差总和趋于零。因此增加测量次数,可以减少随机误差。

系统误差与随机误差性质不同,来源不同,处理方法也不同。但系统误差和随机误差往往是并存的,影响测量结果的准确度,有时主要因素是系统误差,有时主要是随机误差,因此对每个实验要作具体分析,实验的结果是系统误差和随机误差的总和。但在具体实验中,我们一般只考虑随机误差。

需要强调指出的是:在整个测量过程中,除了上述两种误差外,还可能发生读数记录上的错误、仪器损坏、操作不当等造成测量上的错误。错误不同于误差,它是不允许存在的,实验者必须严肃认真、细心观察和记录,及时分析所得数据,错误是可以发现和避免的。

## 1.2 系统误差及其处理

### 1.2.1 系统误差的发现

要发现系统误差就必须仔细研究测量理论和方法的每一步推导,检验或校准每一件仪器,分析每一个实验条件,考虑每一步调整和测量,注意每一个因素对实验的影响等,下面简述几种常用的发现系统误差的方法。

#### 1. 实验对比法

实验对比法包括实验方法的对比,即用不同方法测同一个量,看结果是否一致;仪器的对比,如用两个电流表接入同一电路对比;改变测量步骤对比,如测量某物理量与温度的关系可升温测量与降温测量,看读数是否一致;改变测量中某些参量的数值,如改变实验条件以及换人测量等方法进行对比。在对比中如果发现实验结果的差异,即说明实验中存在系统误差。

#### 2. 理论分析法

包括分析实验所依据的理论公式要求的条件与实际情况有无差异,分析仪器所要求的使用条件是否满足了等等。

#### 3. 数据分析法

这种方法的理论依据是随机误差服从一定统计分布规律,如果结果不遵从这种规律,则说明存在系统误差。在相同条件下得到大量数据时,可用这种方法。

例如,按顺序记录的测量数据的偏差是单向或周期性变化,说明存在固定的或变化的系统误差。因为按照随机误差的统计分布理论,测量值的散布在时间和空间上均是随机的。

以上只是从普遍的意义介绍了几种发现系统误差的途径,实验工作中,会有许多具体办法。

### 1.2.2 系统误差的修正和消除

通过发现系统误差就能引入修正值加以修正。例如,对千分尺的零点修正;利用较高等级的电表对低等级的电表测出修正曲线等。但实际中,有时不易找出确切的系统误差值,也常在测量中设法抵消它的影响。下面介绍几种典型的从测量方法上消除系统误差的方法。

#### 1. 替换法

在测量装置上对待测量进行测量后,立即用一个标准量替换待测量,再次进行测量,并调到同样的情况,从而得出待测量等于标准量。例如,在天平上称物体质量,如

果采用通常测法,即左盘放待测物,右盘放砝码,则会把由于两臂不等长的系统误差带入测量值。如用替换法,就可避开这一系统误差。具体方法是:设待测物质量为  $X$ ,先利用中介物  $T$  (例如干净的细砂)与之平衡,若天平两臂长分别为  $L_1$  和  $L_2$ ,则平衡时有  $X=(L_2/L_1)T$ 。移去待测物,换之以标准砝码  $P$  再与中介物  $T$  达平衡,则有  $P=(L_2/L_1) \cdot T$ ,于是,得  $X=P$ 。

## 2. 异号法

使测量过程中的误差出现一次为正值,另一次为负值,取两者的平均值以消除系统误差的方法称异号法。例如,使用电位差计测微弱电动势  $\epsilon$  的电路中,若有温差电动势  $\epsilon_0$  的干扰,测出的数值  $\epsilon_1$  实为两电动势之差,即  $\epsilon_1=\epsilon-\epsilon_0$ ,若将  $\epsilon$  反向后,再测量之,则测量值  $\epsilon_2=\epsilon+\epsilon_0$ ,将两次测量结果平均,温差电动势引入的误差就被消除了。

## 3. 交换法

例如,用滑线式惠斯通电桥测电阻时,把待测电阻与标准电阻交换位置再次测量,取两次测量值的平均值,就可消除滑线电阻丝不均匀引进的误差。

## 4. 对称观测法

若有随时间线性变化的系统误差,可将观测程序在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值。又如,测电阻温度系数的实验,测电阻前记录一次温度,测电阻后再记录一次温度,取两次平均值作为该点温度值等。

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。

## 5. 半周期偶数观测法

对周期性误差,可以每经过半个周期进行偶数次观测。例如,分光计刻度盘偏心带来的角度测量误差是以  $360^\circ$  为周期,就采取相距  $180^\circ$  的一对游标,每次测量读两个数,则两个角位置之间的夹角是两个游标上分别算出来的夹角的平均值。

以上仅仅是列举了几种减小或消除某些简单的系统误差的方法,实际上,许多系统误差的出现,常常是由于实验所用理论不完善,或理论背后隐藏着未被发现的更精细的规律性。

## 1.3 随机误差及其估算

### 1.3.1 随机误差的统计规律

假设系统误差已经消除,而被测量本身是稳定的,在相同的条件下,对同一物理量进行多次重复测量,其结果彼此有差异,这就是随机误差引起的。实验和理论都证明,大部分测量的随机误差服从统计规律。误差分布如图 1-3-1 所示,横坐标表示误差  $\Delta = x - x_0$ ,纵坐标为一个与误差出现的概率有关的概率密度函数  $f(\Delta)$ ,应用概率论的数学方法可导出

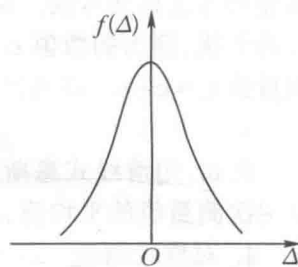


图 1-3-1 随机误差

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

这种分布称为正态分布,式(1.8)中的特征量  $\sigma$  为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum \Delta_i^2}{n}} (n \rightarrow \infty) \quad (1.9)$$

称为均方根误差或标准误差。

服从正态分布的随机误差具有下面一些特征:

- (1)有界性 绝对值很大的误差出现的概率为零,即误差的绝对值不会超过一定的界限。
- (2)单峰性 绝对值小的误差出现的概率比绝对值大的误差出现的概率大。
- (3)对称性 绝对值相等的正误差和负误差出现的概率相同。
- (4)抵偿性 随机误差的算术平均值随着测量次数的增加而越来越趋于零,即

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_i = 0 \quad (1.10)$$

测量不可避免地存在随机误差的情况下,每次测量值各有差异,那么怎样的测量是更接近于真值的最佳值呢?

### 1.3.2 测量结果的最佳值——算术平均值

利用随机误差的上述统计特性可获得实验结果的最佳值——近真值。

设对某一物理量在等准确度测量的条件(即实验原理、方法、仪器、环境、人员均相同)下进行多次重复测量,其测量列为  $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n$ ,则测量列的算术平均值为

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1.11)$$



容易理解,对于有限次测量,平均值会随着测量次数的不同而有所变动。因而多次测量的算术平均值,只能称为近真值或最佳值。由随机误差的统计特征可以证明,当测量次数无限增多时,算术平均值就将无限接近于真值。

根据误差定义有

$$(x_1 - x_0) + (x_2 - x_0) + \cdots + (x_n - x_0) = \Delta_1 + \Delta_2 + \cdots + \Delta_n$$

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x_0) = \bar{x} - x_0$$

根据随机误差的抵偿性,当  $n \rightarrow \infty$  时,  $\sum_{i=1}^n \Delta_i / n \rightarrow 0$ , 因此有:  $\bar{x} \rightarrow x_0$ 。

可见测量次数越多,测量列的算术平均值越接近于真值。所以,测量结果可用测量列的算术平均值作为真值的最佳值。但是测量结果的随机误差究竟有多大? 如何表示呢?

### 1.3.3 随机误差的表示法

随机误差的大小常用标准误差、平均误差和极限误差表示。

#### 1. 测量列的标准误差 $\sigma$

随机误差  $\Delta$  为正态分布时,概率密度函数  $f(\Delta)$  由式(1.8)表示,其特征量  $\sigma$  物理意义是什么呢?

图 1-3-2 是不同  $\sigma$  值时的  $f(\Delta)$  曲线。 $\sigma$  越小,表示绝对值小的误差越占优势,正态分布曲线越尖,反映了测量列中各测量值的分散性小,重复性好。反之, $\sigma$  值越大,正态分布曲线较平坦,测量列中各测量值的分散性大,重复性差,所以我们说测量列的标准误差  $\sigma$  是表征同一待测量的  $n$  次测量所得结果的离散性的参数。

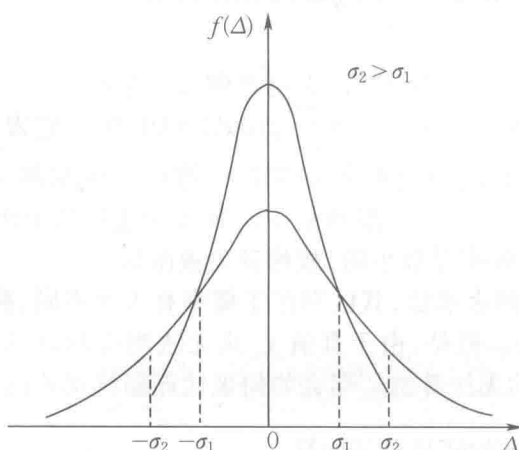


图 1-3-2

但要注意,标准误差  $\sigma$  和各测量值的误差  $\Delta_i$  有着完全不同的含义。 $\Delta_i$  是实在的误差值,亦称真误差;而  $\sigma$  并不是一个具体的测量误差值,它反映的是测量列的随机误差概率分布特性,只具有统计性质的意义,是一个统计性的特征值。

图 1-3-3(a) 所示曲线下的总面积表示各种大小(包括正、负)误差出现的总概率,当然应该是 100%。由  $\Delta = -\sigma$  到  $\Delta = \sigma$  之间的曲线下的面积(图中画斜线部分),可以计算为总面积的 68.3%,它表示随机误差落到区间  $[-\sigma, \sigma]$  内的概率。这就是说,在等准确



度重复测量时,如测量次数  $n$  很大,则所获得的数据中,将有 68.3% 个数据的误差绝对值  $|\Delta_i|$  将比  $\sigma$  小。

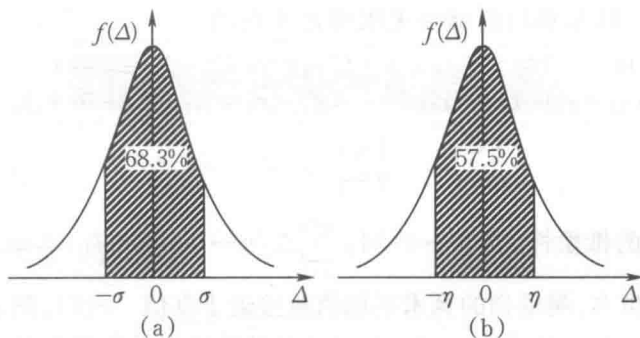


图 1-3-3

由此可见,标准误差  $\sigma$  所表示的意义是:测量列中任一测量值的误差落在区间  $[-\sigma, \sigma]$  内的可能性为 68.3%。

## 2. 平均误差 $\eta$

$$\eta=\frac{\sum|\Delta_i|}{n}$$

它的概率含义是:  $P(-\eta<\Delta<+\eta)=\int_{-\eta}^{+\eta}f(\Delta)d\Delta=57.5\%$ ,如图 1-3-3(b)所示。即任作一次测量,测量值误差落在  $[-\eta, +\eta]$  之间的可能性为 57.5%。它与标准误差  $\sigma$  的关系为

$$\eta=0.7979\sigma\approx0.8\sigma$$

## 3. 极限误差 $\delta$

$$\delta=3\sigma$$

它的概率含义是:  $p(-\delta<\Delta<+\delta)=\int_{-\delta}^{+\delta}f(\Delta)d\Delta=99.7\%$ 。它表示任作一次测量时,测量值的误差在  $[-3\sigma, +3\sigma]$  之间的概率为 99.7%,即在 1000 次测量中只有 3 次测量值的误差绝对值会超过  $3\sigma$ 。由于在一般测量中次数很少超过几十次,因此,可以认为测量值误差超过  $\pm 3\sigma$  范围的概率是极小的,故称其为极限误差。

上述三种随机误差的表示法,其区别在于概率有大小不同,换一个其他概率又可以有一种随机误差表示法。但是,由于真值  $x_0$  是无法测得的,所以误差  $\Delta_i=x_i-x_0$  也是无法计算的,  $\delta$ 、 $\eta$ 、 $\sigma$  均无法算出。那么如何来估算随机误差的大小呢?

### 1.3.4 有限次测量列的随机误差估算

由于真值无法知道,因而误差  $\Delta_i$  也无法计算,但有限次测量列的算术平均值  $\bar{x}$  是真值的最佳值,且当  $n\rightarrow\infty$  时,  $\bar{x}\rightarrow x_0$ 。所以,可以用测量列中各次测量值与算术平均值之差——偏差来估算误差。

$$v_i=x_i-\bar{x}\tag{1.12}$$

式中,  $v_i$  是可以计算的,当由  $v_i$  来计算标准误差时,由误差理论可以证明其计算式为