

面向新世纪课程教材  
Textbook Series for the New Century

# 大学物理实验教程

曾金根 刘 崧 戚小平 主编

同济大学出版社

**图书在版编目(CIP)数据**

大学物理实验教程/曾金根,刘崧,戚小平主编.

1 版. —上海:同济大学出版社,2002. 1

ISBN 7-5608-2355-6

I. 大... II. ①曾... ②刘... ③戚... III. 物理—  
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 073508 号

**大学物理实验教程**

作 者 曾金根 刘 崧 戚小平 主编

责任编辑 张智中 责任校对 郁 峰 装帧设计 陈益平

---

出 版  
发 行

同济大学出版社

(上海四平路 1239 号 邮编 200092 电话 021-65985622)

经 销

全国各地新华书店

印 刷

常熟大宏印刷厂印刷

开 本

787mm×1092mm 1/16

印 张

21.25

字 数

544 000

版 次

2002 年 1 月第 1 版 2004 年 1 月第 2 次印刷

书 号

ISBN 7-5608-2355-6/O·203

定 价

27.50 元

---

本书若有印装质量问题,请向本社发行部调换

## 内容提要

本书根据“高等工业学校物理实验课程教学基本要求”，针对普通院校的特点与教学条件，在多年使用的自编实验教材的基础上，总结和吸收历年来的教学经验和教材的优点修改编写而成。全书内容包括绪论(第一章)和41个实验。实验部分分为力学和热学实验(第二章)、电磁学实验(第三章)、光学和近代物理实验(第四章)以及计算机仿真实验(第五章)。本书的内容着重于基础实验，书后附有部分常用物理常数。

本书为高等工业院校本科各专业的物理实验教材基础部分，可作为工科本、专科物理教学实验教材或供成人教育、函授大学、职工大学使用。

## 前 言

本书根据“高等工业学校物理实验课程教学基本要求”，结合普通院校的实际教学情况和仪器设备状况而编写。全书内容包括绪论(第一章)和 41 个实验,其中包括 31 个力学、热学(第二章),电磁学(第三章),光学、近代物理(第四章)实验和 10 个计算机仿真实验(第五章)。

为了更好地适应社会主义现代化对人才素质的要求,本书以着重培养大学生严谨的科学态度为目的,初步掌握科学的实验方法,锻炼实验技能和加深对物理理论的理解。在编写本书时,以南昌大学多年使用的自编物理教材为基础,吸收其他教材的优点,兼顾本、专科通用。选材注重基本内容,同时注意体系性和适当提高扩充。本书特点:

1. 所选 31 个实验中,大多数实验内容为各校通用,且适用于专科和成人教育。

2. 常用基本仪器均分述于第二、三、四章各部分实验之前,各实验所用主要仪器则在各实验中介绍。

3. 各实验的原理、方法和步骤等的介绍力求详简适度而易懂,并配有预习思考题和分析讨论题,以利培养学生独立分析问题和解决问题的能力。

4. 本书选用了少量难度较大的实验和 10 个计算机仿真实验作为提高和扩充内容,以供因材施教。

5. 鉴于目前正推广使用不确定度表示实验结果的方法,本书在绪论中作了必要的阐述,并提供了选择性的过渡方法,以便灵活掌握。

本书由曾金根、刘崧、戚小平主编,参加编写的有:曾金根、赵万霖(第一章 绪论),陈淑文(第二章 力学、热学实验),欧阳红、胡萍(第三章 电磁学实验),钱小霞(第四章 光学实验),戚小平、杨淑芬、韩道福(第四章 近代物理实验),刘崧、邹春华、左小军(第五章 计算机仿真实验)。全书由曾金根副教授统稿。

本书由王鸣教授主审。李菊芳副教授、杨淑芬副教授审阅。

在本书的编写过程中,得到了南昌大学物理实验教学小组全体同志的大力协助,参阅了兄弟院校的有关教材,在此表示衷心感谢。

由于编者水平有限,不当之处在所难免,恳请读者批评指正。

编者

2001 年 10 月

# 目 录

第一章 绪 论	(1)
一、物理实验课程的地位、作用和任务	(1)
二、物理实验课程的基本教学程序	(2)
三、测量及数据处理	(3)
第二章 力学和热学实验	(19)
力学、热学实验常用仪器简介	(19)
实验 1 长度和均质圆柱体密度的测量	(27)
实验 2 杨氏弹性模量的测定	(31)
实验 3 气垫导轨上测滑块的速度和加速度	(38)
附录 2-3-1 气垫导轨	(42)
实验 4 动量守恒定律的验证	(44)
第三章 电磁学实验	(48)
电磁学实验常用基本仪器简介	(48)
实验 5 用模拟法测静电场	(57)
实验 6 非线性电阻伏安特性的研究	(64)
实验 7 用惠斯登电桥测电阻	(69)
实验 8 用双臂电桥测低电阻	(76)
实验 9 电位差计的使用	(83)
I 用线式电位差计测微小电位差	(83)
II 用箱式电位差计测温差电动势	(87)
附录 3-9-1 福廷式气压计	(94)
实验 10 霍尔效应法测磁感应强度	(96)
实验 11 示波器的使用	(102)
附录 3-11-1 DC4210A 型示波器控制机件	(109)
实验 12 电表的改装	(111)
实验 13 灵敏电流计的研究	(117)

第四章 光学和近代(综合性)物理实验	(123)
光学实验基本仪器简介	(123)
实验 14 薄透镜焦距的测定	(127)
实验 15 照相技术	(133)
附录 4-15-1 常用显影液和定影液的配方	(140)
实验 16 等厚干涉 牛顿环、劈尖	(142)
实验 17 分光计的调整和使用(一)	(149)
测光栅常数或光波波长	(149)
实验 18 分光计的调整和使用(二)	(160)
测三棱镜的折射率	(160)
实验 19 偏振光的研究	(166)
实验 20 全息照相与观察	(176)
实验 21 迈克尔逊干涉仪	(181)
I 观察非定域等倾干涉条纹和测 He-Ne 激光波长	(183)
II 观察定域等厚干涉条纹和测量钠光的相干长度 $L$	(186)
实验 22 气体中声速的测定	(190)
实验 23 真空的获得与测量	(197)
附录 4-23-1 放电管简介	(205)
附录 4-23-2 复合真空计使用说明	(206)
实验 24 气体导热系数的测定	(208)
附录 4-24-1 低真空实验	(214)
实验 25 弗兰克-赫兹实验	(219)
实验 26 光电效应	(227)
附录 4-26-1 直线的拟合	(235)
实验 27 塞曼效应	(238)
实验 28 法拉第效应	(245)
实验 29 应变式交流全桥测重系统——电子秤	(252)
实验 30 光纤红外传输位移、频率测量系统	(256)
实验 31 霍尔式传感器	(261)
附录 4-31-1 CSY <sub>10</sub> 型传感器实验仪简介	(272)
第五章 计算机仿真实验	(275)
CAI1 用模拟法测静电场	(276)

CAI2	测螺线管磁场 .....	(280)
CAI3	热敏电阻 .....	(284)
CAI4	示波器 .....	(288)
CAI5	单透镜实验 .....	(299)
CAI6	用分光计测棱镜折射率 .....	(303)
CAI7	偏振光的研究 .....	(310)
CAI8	光电效应 .....	(312)
CAI9	弗兰克-赫兹实验 .....	(316)
CAI10	塞曼效应 .....	(320)
<b>总附表</b> .....		(322)
1. 中华人民共和国法定计量单位 .....		(322)
2. 一些常用的物理数据表 .....		(325)

# 第一章 绪 论

## 一、物理实验课程的地位、作用和任务

物理实验课已成为我国高校工科专业的一门独立的必修基础课程,它和物理学理论课教学具有同等重要的地位。两者既有深刻的内在联系和配合,又有各自的任务和作用。

本课程是对工科大学生进行系统的实验方法和实验技能训练的开端,也是对学生进行科学实验训练的重要基础。本课程应在中学物理实验的基础上,按照循序渐进的原则,指导学生学习和掌握物理实验知识、方法和技术,使学生初步掌握实验的主要程序与基本方法,为后继课程的学习和今后的工作奠定良好的实验基础。

本课程的具体任务:

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,并加深对物理学原理的理解。

2. 培养和提高学生的科学实验能力,其中包括:

(1) 独自阅读实验教材或资料,作好实验前的准备;

(2) 借助于教材或仪器说明书正确使用常用仪器;

(3) 运用物理学理论对实验现象进行初步分析判断;

(4) 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) 完成简单的设计性实验。

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和遵守纪律、爱护公共财物的优良品德。

以上三项任务是不能由物理学理论课程代替完成的。

应当指出,对于工程技术人员来说,只有既具备较为深广的理论知识又有足够的现代科学实验能力,才能适应科学技术飞速发展的需要,担负起建设社会主义祖国的重任。



### 3. 写实验报告

实验报告是对实验过程及其结果的全面总结,要用简明的形式将实验结果完整而又真实地表达出来。实验报告要用统一规格的纸张书写(可加附页),必须各自独立地及时完成。要做到文字通顺、表述明确、字迹端正、图表规范、结果正确和讨论认真。好的实验报告应作为研究资料保存。

完整的实验报告内容通常包括下列几个部分:实验名称、目的要求、实验条件(主要仪器设备)、实验原理、数据表格、数据处理与结果表述、误差分析及问题讨论。

## 三、测量及数据处理

### 1. 测量与误差

#### (1) 测量

在物理实验中,要以不同方式对各种物理量进行测量。通常按测量方式把测量分为直接测量和间接测量。所谓直接测量,就是在一定条件下利用一定的仪器将被测的量与同类量的标准单位进行比较,直接得出它的量值,例如用米尺量长度,用天平称质量,用伏特计测电压等;而间接测量则是指被测量的量值要用相关的直接测量量值通过公式运算间接地获得,例如用单摆测重力加速度。

#### (2) 误差

如果测量对象本身不变,那么对于一个被测的物理量,客观上存在一个真实的量值,称为真实值或真值。实际上,不管使用多么精密的仪器,测量出来的只是真值的近似值。测量值 $\tilde{x}$ 和真值 $x$ 之间总存在差异。其差 $(\tilde{x}-x)$ 称为误差或绝对误差,记为 $\Delta x$ 。用公式表示为

$$\Delta x = \tilde{x} - x \neq 0 \quad (1-1)$$

### 2. 误差的分类

按误差的基本性质和特点,可把误差分为三大类:过失误差、系统误差和偶然误差。正常情况下只有后两类误差。

#### (1) 过失误差(又叫粗差)

过失误差是由于测量者在测量过程中操作、读数、运算和记录等方面的差错而造成的误差。其特点是:它使得测量结果大大地偏离真实值(即误差“粗大”),并且使得数据的结构显著地偏离正常规律。由于这类误差是与人的过失相联系的,故实验者应加强责任心,做到充分准备(如预习),熟悉步骤,集中精力,认真正确地地完成实验测量的全过程,尽力避免出现差错;一旦出现差错而又未及时发现,就会造

成个别数据的异常取值。处理数据时应按一定的原则判别取舍量值,以排除粗差。粗差严重或难以判别时,实验要重做。

### (2) 系统误差

在相同条件下多次测量一个量时,若每次的测量值总是比真值偏大或偏小一个固定的量值,或者按一定的规律变化,具有这种特点的误差就称为系统误差。仪器的缺陷、个人的习惯、公式和测量方法的不完善等都会引起这种误差。系统误差不能通过在相同条件下重复测量而发现;往往是通过在不同条件下对同一量的测量结果进行比较或利用已有知识对有关因素进行分析才能发现。

为了尽可能消除系统误差,在设计实验时应加以周密的考虑。若无法消除,则设法抵偿或修正(具体方法将在各实验项目中有针对性地介绍)。

### (3) 偶然误差(又叫随机误差)

在相同条件下多次测量同一个量时,误差的绝对值时大时小,符号时正时负,不可预定而随机出现者,称为偶然误差。它是由于实验条件和环境因素的微小变化、测量者的生理分辨能力及操作熟练程度等多方面的影响而产生的。这些大量微小变化因素的不定组合,使偶然误差显得毫无规律性。但在相同条件下发生的大量同类随机事件却具有一定的统计规律性。偶然误差通常遵循“正态分布”(即“高斯分布”)规律。

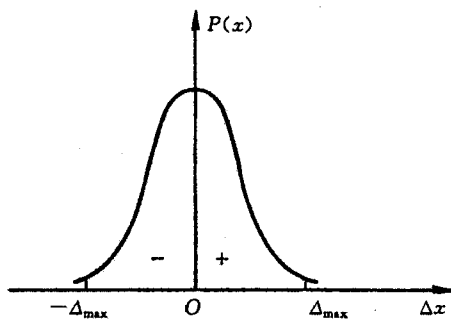


图 1-1 误差正态分布曲线

如果以误差  $\Delta x$  为横坐标,以误差出现的概率密度(即相应的测量值出现的概率密度)  $P(x)$  为纵坐标,则多次测量结果的偶然误差概率密度可用图 1-1 所示的正态分布曲线表示。不难看出偶然误差有如下特点:

① 误差的绝对值不会超过某一最大值  $\Delta_{\max}$ ——具有有界性。

② 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

——具有单峰性。

③ 绝对值相同的正、负误差出现的概率相等——具有对称性。

④ 误差的算术平均值随着测量次数的无限增加而趋于零——具有抵偿性。

由此可见,偶然误差虽因不可预知而无法避免,但却可以通过多次测量,利用其统计规律性而达到互相抵偿,因而能找到真值的最佳近似值(又叫最佳值或最近真值)。

在一般情况下,实验测量的系统误差和偶然误差是同时存在的。有时系统误

差突出,有时偶然误差突出,而且有时两者难以严格区分。这就要求我们对每一个实验作具体的误差分析,并采取有效而方便的方法进行数据处理。在评估测量结果的优劣时,通常把偶然误差小的评为精密度高,把系统误差小的评为准确度高,而把这两种误差都小的评为精确度高。

### 3. 直接测量中偶然误差的估计

#### (1) 多次测量的算术平均值

设在相同条件下对某一物理量进行了  $n$  次独立的直接测量,所得  $n$  个测量值为  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , 则其算术平均值为

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n x_i / n \quad (1-2)$$

若无系统误差,则由偶然误差特点可证:当  $n \rightarrow \infty$  时,  $\bar{x}$  与真值  $x$  趋于重合;当  $n$  为有限次数时,  $\bar{x}$  则为根据  $n$  次测量数据所得的最佳值。

#### (2) 多次测量结果的偶然误差

在多次测量时,各次测量值不同,误差也就不同。如何表示其测量的误差呢?这里有两个问题:一是如何说明这一列多次测量值的分散性(或精密度);另一是如何估计所得平均值  $\bar{x}$  的误差范围(或准确度)。

在一般情况下,真值无法确切知道,误差也就无法算出。因此,当可忽略系统误差时,常以算术平均值  $\bar{x}$  代替真值;相应地以测量值  $x_i$  与平均值  $\bar{x}$  之差(即所谓“残差”或“偏差”)代替各次测量的误差,即

$$\delta x_i = x_i - \bar{x} \approx x_i - x = \Delta x_i$$

很明显,基于偶然误差的对称性和抵偿性,各次偏差的直接平均值总为零或者接近于零(当有舍入误差时),即

$$\overline{\delta x_i} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) / n = 0$$

它不能说明测量的精密度。因此,为了说明测量的精密度就要避免正负偏差完全抵消。为此,取绝对值或平方是常用的数学手段。所以,通常采用平均绝对偏差或标准偏差来表示一系列测量值的分散性(亦指精密度)。具体介绍如下:

#### ① 平均绝对偏差 $\overline{\Delta x}$

设  $\bar{x}$  为前述  $n$  个测量值的平均值,  $\Delta x_1 = |x_1 - \bar{x}|$ ,  $\Delta x_2 = |x_2 - \bar{x}|$ ,  $\dots$ ,  $\Delta x_n = |x_n - \bar{x}|$  为各次测量的偏差的绝对值,并把它们的平均值定义为平均绝对偏差

$$\overline{\Delta x} = \sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}| / n \quad (1-3)$$

显然,  $\overline{\Delta x}$  的值越大,表明这一列测量值的分散性越大;  $\overline{\Delta x}$  越小,则表明测量的

精密度越高。

② 标准偏差(即均方根偏差) $\sigma$

若按贝塞尔公式将各次偏差求平方和,再除以 $(n-1)$ 取平均值,然后再取其平方根,便得到所谓单次测量的标准偏差

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (1-4)$$

它表示,根据这列  $n$  次测量值可知,在同一条件下任作一次测量,所得测量值有 68.3% 的概率会落在  $\bar{x} \pm \sigma$  的范围内( $n$  应足够大,下同)。

同样,标准偏差  $\sigma$  的值越大,表示测量列的分散性越大; $\sigma$  值越小,则表示测量的精密度越高。

在科学实验和工业计量中常用标准偏差来表示测量的精密度,但在简单的物理教学实验中,测量次数较少,迄今仍常用平均绝对偏差来表示。

③ 测量平均值的标准偏差  $\sigma_{\bar{x}}$

对测量平均值  $\bar{x}$  的误差作估计,本应涉及系统误差。对于(已知)系统误差,可设法消除或对测量值进行修正。但总会有一些微小的系统误差因素难以消除或查明;有限次测量本身也使  $\bar{x}$  会偏离真值。这些因素综合起来,使平均值  $\bar{x}$  也成为一随机量,因而可用统计方法来估计  $\bar{x}$  的误差。可以证明,平均值的标准偏差  $\sigma_{\bar{x}}$  是单次测量的标准偏差  $\sigma$  的  $\frac{1}{\sqrt{n}}$ ,即

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (1-5)$$

$\sigma_{\bar{x}}$  在一定程度上反映了测量的准确度,也反映了测量的精密度。

(3) 相对误差

评价测量结果的优劣,既要看见绝对误差的大小,又要看被测量本身的大小。为此引入相对误差的概念。

相对误差被定义为绝对误差与真值之比(或它们的对应同类量之比),常以百分数表示:

$$\sigma_r = \frac{\Delta x}{x} = \frac{\Delta x}{x} \times 100\% \quad (1-6)$$

根据具体情况, $\Delta x$  可取为  $\overline{\Delta x}$ ,  $\sigma$  或  $\sigma_{\bar{x}}$ ; 而  $x$  则常以最佳值  $\bar{x}$  表示。对于验证性测量,常取理论值或公认值表示真值,则式(1-6)可相应地写为

$$\sigma_r = \frac{x_{\text{测}} - x_{\text{公认}}}{x_{\text{公认}}} \times 100\%$$

#### 4. 直接测量结果的表达与不确定度的估计

一般说来,测量的目的是为了找到真值  $x$ ,而实际上我们只能找到真值的最佳近似值(通常取为多次测量值的平均值  $\bar{x}$ );同时估计其误差的存在范围  $\pm\Delta$ 。因此,通常将测量结果表示为

$$x = \bar{x} \pm \Delta \quad (1-7)$$

这就是说,我们的测量结果表明:在某一很大的概率下,真值  $x$  可能处在  $(\bar{x} - \Delta, \bar{x} + \Delta)$  的范围之内,然而不能确定真值的位置。显然,最佳值  $\bar{x}$  的误差仍是未知的,它并不等于  $\pm\Delta$ 。但  $\Delta$  的取值说明了测量结果的不确定程度。 $\Delta$  越大,不确定程度越大; $\Delta$  越小,测量结果的精确度越高。因此,把  $\Delta$  称为不确定度,或者称为总不确定度(以区别于其分量)。

对不确定度的估计是以误差分析为基础的。通常,已知的系统误差已被设法消除或者从测量值中扣除,因而其余的各种误差分量都影响着不确定度的大小。由于误差的来源很多,很难按偶然误差和系统误差来严格区分全部误差分量(有的甚至难以发现),故不宜按误差的性质来划分不确定度的分量。因此,国际计量委员会通过一项指导性文件:《BIPM 实验不确定度的说明 建议书 INC-1(1980)》。根据此建议精神,应将测量结果的不确定度按其数值评定方法划分成两类分量:A类为用统计方法计算的分量(记为  $\Delta_A$ );B类为用其他方法估计的分量(记为  $\Delta_B$ )。它们均适用“方和根法”合成:

$$\Delta = \sqrt{\Delta_A^2 + \Delta_B^2} \quad (1-8)$$

对于特殊用途,还须乘以一个因子,才能得到总不确定度。

在普通物理实验中,为了回避一些新的概念和运算,宜选择重复测量次数在  $5 < n \leq 10$  的范围内,使  $\Delta_A = t_p(n-1)\sigma_x \approx \sigma$ ,从而可简化地直接引用单次测量的标准偏差  $\sigma$  来计算  $\Delta_A$ ,即取

$$\Delta_A = \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

但  $\Delta_A$  与  $\sigma$  概念不同。

对于某些条件很好的可直接测量,其  $\Delta_B$  可以忽略,则有  $\Delta = \Delta_A = \sigma$ 。这时真值落在  $\bar{x} \pm \sigma$  范围内的概率约为 95% 或更大(前已指出,按  $\sigma$  的原义,它表示单次测量值落在此范围的概率为 68.3%)。

在一般情况下,不确定度的 B 类分量不可忽略。然而,要对  $\Delta_B$  作恰当的估计是需要足够的计量知识和经验的,这已超出本课程的要求。为了便于教学,我们仅用仪器的示值误差限或基本误差限  $\Delta_{\text{仪}}$  来估计  $\Delta_B$ :当测量条件符合标准时,常取  $\Delta_B = \Delta_{\text{仪}}/\sqrt{3}$ (对于均匀分布);当条件改变需考虑变动误差等因素时,常取  $\Delta_B = \Delta_{\text{仪}}$ (或者由实验室直接给定)。

对于另外两种特殊情况,即  $\sigma < \frac{1}{3}\Delta_B$ ,或者仅作一次测量时,则可不计  $\Delta_A$ ,而取  $\Delta = \Delta_B$ 。

需要说明,在实验教学中,目前仍相当广泛地按传统方法,当可不计系统误差时,用平均值和平均绝对偏差来表示测量结果,即

$$x = \bar{x} \pm \overline{\Delta x} \quad (1-9)$$

这是方便的。但其含义则是说明单次测量值有 57.5% 的概率会落在  $(\bar{x} - \overline{\Delta x}, \bar{x} + \overline{\Delta x})$  范围之内。当  $\overline{\Delta x} < \frac{1}{3}\Delta_{\text{仪}}$  时(相当于  $\sigma < \frac{1}{3}\Delta_B$ ),或者仅作一次测量时,也常将结果表示为  $x = \bar{x} \pm \Delta_{\text{仪}}$ 。

下面讨论一实例。

设用一级螺旋测微器对钢球的直径进行了六次测量。消去零点偏差后,所得测量值分别为:  $D_1 = 9.543\text{mm}$ ,  $D_2 = 9.545\text{mm}$ ,  $D_3 = 9.544\text{mm}$ ,  $D_4 = 9.543\text{mm}$ ,  $D_5 = 9.542\text{mm}$ ,  $D_6 = 9.544\text{mm}$ , 则其算术平均值为

$$\begin{aligned} \bar{D} &= \frac{9.543 + 9.545 + 9.544 + 9.543 + 9.542 + 9.544}{6} \\ &= 9.5435 \approx 9.544(\text{mm}) \end{aligned}$$

各次偏差的绝对值为(单位: mm)

$$\Delta D_1 = |9.543 - 9.544| = 0.001, \quad \Delta D_2 = |9.545 - 9.544| = 0.001,$$

$$\Delta D_3 = |9.544 - 9.544| = 0.000, \quad \Delta D_4 = |9.543 - 9.544| = 0.001,$$

$$\Delta D_5 = |9.542 - 9.544| = 0.002, \quad \Delta D_6 = |9.544 - 9.544| = 0.000$$

其平均绝对误差为

$$\overline{\Delta D} = \frac{0.001 + 0.001 + 0.000 + 0.001 + 0.002 + 0.000}{6} \approx 0.001(\text{mm})$$

而一级螺旋测微器的示值误差限为  $\Delta_{\text{仪}} = 0.004\text{mm}$ , 可见  $\overline{\Delta D} < \frac{1}{3}\Delta_{\text{仪}}$ , 于是测量结

果可按简易方式表示为

$$D = \bar{D} \pm \Delta_D = (9.544 \pm 0.004) \text{ mm}$$

$$\sigma_r = \frac{\Delta_D}{\bar{D}} \times 100\% \approx 0.04\%$$

若采用不确定度来表示,则相应的估算如下:

$$\begin{aligned} \Delta_A = \sigma &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (D_i - \bar{D})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{(1+1+0+1+4+0) \times 10^{-6}}{6-1}} \\ &\approx 1.2 \times 10^{-3} \text{ (mm)} \end{aligned}$$

$$\Delta_B = \frac{\Delta_D}{\sqrt{3}} \approx \frac{0.004}{1.73} \approx 2.3 \times 10^{-3} \text{ (mm)}$$

$$\Delta = \sqrt{\Delta_A^2 + \Delta_B^2} = \sqrt{(1.2^2 + 2.3^2) \times 10^{-6}} = 2.6 \times 10^{-3} \approx 0.003 \text{ (mm)}$$

于是测量结果应表示为

$$D = \bar{D} \pm \Delta = (9.544 \pm 0.003) \text{ mm}$$

$$\sigma_r = \frac{\Delta}{\bar{D}} \times 100\% = 0.03\%$$

### 5. 间接测量的结果及其表示

在实验中,常常对某些物理量只能进行间接测量。设间接测量量  $\varphi$  是几个相互独立的直接测量量  $x, y, z, \dots$  的函数,即

$$\varphi = f(x, y, z, \dots)$$

并已测出各直接测量量  $x = \bar{x} \pm \Delta x, y = \bar{y} \pm \Delta y, z = \bar{z} \pm \Delta z, \dots$ , 那么,当各直接测量量取值为  $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, \dots$  时,可得间接测量量的近真值

$$\tilde{\varphi} = f(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, \dots) \quad (1-10)$$

当各直接测量值分别有一微增量  $dx, dy, dz, \dots$  时,间接测量量必然会有相应的变化。按全微分公式有

$$d\varphi = \frac{\partial f}{\partial x} dx + \frac{\partial f}{\partial y} dy + \frac{\partial f}{\partial z} dz + \dots$$

若近似地以误差取代微分,并考虑正负号的最不利组合,则可估算间接测量值的误差:

$$\Delta\varphi = \left| \frac{\partial f}{\partial x} \Delta x \right| + \left| \frac{\partial f}{\partial y} \Delta y \right| + \left| \frac{\partial f}{\partial z} \Delta z \right| + \dots \quad (1-11)$$

$$\sigma_r = \frac{\Delta\varphi}{\tilde{\varphi}} = \left| \frac{\partial f}{\partial x} \times \frac{\Delta x}{\tilde{\varphi}} \right| + \left| \frac{\partial f}{\partial y} \times \frac{\Delta y}{\tilde{\varphi}} \right| + \left| \frac{\partial f}{\partial z} \times \frac{\Delta z}{\tilde{\varphi}} \right| + \dots \quad (1-12)$$

相应地可将间接测量结果表示为

$$\varphi = \tilde{\varphi} \pm \Delta\varphi$$

但是,按式(1-11)和式(1-12)计算误差时,一般会扩大误差,与实际情况有较大的出入;若用不确定度  $\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z, \dots$  表示直接测量值的微小增量,并考虑其统计性质,则可用方和根合成公式估算间接测量值的不确定度,即有

$$\Delta_\varphi = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 \Delta_x^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 \Delta_y^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)^2 \Delta_z^2 + \dots} \quad (1-13)$$

相应地有

$$\sigma_r = \frac{\Delta_\varphi}{\tilde{\varphi}} = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x} \times \frac{\Delta_x}{\tilde{\varphi}}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y} \times \frac{\Delta_y}{\tilde{\varphi}}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z} \times \frac{\Delta_z}{\tilde{\varphi}}\right)^2 + \dots} \quad (1-14)$$

以上两式是不确定度传递的一般公式。当函数  $f(x, y, z, \dots)$  为单纯的和差关系时,式(1-13)将化为简单的方和根关系,有

$$\Delta_\varphi = \sqrt{\Delta_x^2 + \Delta_y^2 + \Delta_z^2 + \dots}$$

宜直接按此式求  $\Delta_\varphi$ ;当函数为单纯的积商关系时,则常将(1-14)式改写成

$$\sigma_r = \frac{\Delta_\varphi}{\tilde{\varphi}} = \sqrt{\left(\frac{\partial \ln f}{\partial x} \Delta_x\right)^2 + \left(\frac{\partial \ln f}{\partial y} \Delta_y\right)^2 + \left(\frac{\partial \ln f}{\partial z} \Delta_z\right)^2 + \dots} \quad (1-15)$$

且在此情况下,(1-15)式可变得更简单,即变为

$$\sigma_r = \frac{\Delta_\varphi}{\tilde{\varphi}} = \sqrt{\left(\frac{\Delta_x}{x}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_y}{y}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_z}{z}\right)^2 + \dots}$$

这时先算  $\sigma_r$ , 再按  $\Delta_\varphi = \sigma_r \tilde{\varphi}$  计算不确定度  $\Delta_\varphi$  较为方便。最后也可将结果表示为

$$\varphi = \tilde{\varphi} \pm \Delta_\varphi$$

间接测量结果的表示应与有关直接测量结果的表达形式一致。不要用错传递公式。为方便起见,此处提供误差传递与不确定度(标准差)传递的常用公式表(见表 1-1),以供参考和比较。