



高等院校自动化专业“十二五”规划系列教材

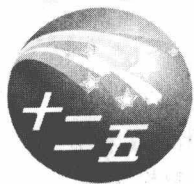
# 检测技术及 工程应用

潘炼 主编



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>



高等院校自动化专业“十二五”规划系列教材

# 检测技术及 工程应用

潘炼 主编



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

中国·武汉

## 内 容 简 介

本书主要介绍现代检测技术的基本原理、方法、相关技术及其在工程实际中的应用。全书共分14章,具体包括现代检测技术理论基础、传感器及基本特性、传感器基本工作原理、温度检测技术、压力检测技术、流量检测技术、物位检测技术、成分分析检测技术、机械量检测技术、轧制力检测技术、轧制过程参数检测技术、电参数检测技术、无损检测技术和现代检测技术理论在工程中的应用等。

本书取材新颖、内容丰富、系统性强、条理清晰、技术实用,反映了现代检测技术领域的新发展和新成果。书中穿插了大量的实践知识,充分体现了理论联系实际、重在工程实际应用的原则。

本书既可作为高等学校自动化、测控技术与仪器、机电工程、电气工程及自动化等专业的教材,也可供相关专业领域的研究生和工程技术人员学习参考。

本书配有电子教案,可免费提供,需要者可与出版社联系。电子邮箱:15071456980@163.com

### 图书在版编目(CIP)数据

检测技术及工程应用/潘炼 主编. —武汉:华中科技大学出版社,2010.12

ISBN 978-7-5609-6685-4

I. 检… II. 潘… III. 技术测量-高等学校-教材 IV. TG806

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第207072号

## 检测技术及工程应用

潘炼 主编

策划编辑:刘万飞

责任编辑:余涛

封面设计:潘群

责任校对:张琳

责任监印:熊庆玉

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87557437

录排:武汉正风图文照排中心

印刷:华中科技大学印刷厂

开本:787mm×960mm 1/16

印张:26.25

字数:573千字

版次:2010年12月第1版第1次印刷

定价:45.80元



华中科大

本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换  
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务  
版权所有 侵权必究

# 前 言

检测技术、通信技术、计算机技术是信息产业的三大支柱。信息的获取对于机械电子工程、控制、测试、计量等领域都是必不可少的。本书从工程应用和技术发展的角度出发,全面、系统地介绍了现代检测技术的相关理论、相关技术及其在工程实际中的应用。

本书是编者在多年教学、科研及生产实际工作的基础上总结、提炼而成的。在编写过程中,编者对国内外检测技术领域的最新发展进行了充分的跟踪和调研,参考了国内外相关教材和学术成果,保留和精炼了传统检测技术的基础内容,对现代检测技术做了较为全面和详细的论述。教材注重检测技术基础理论的阐述,同时将工程实际应用贯穿全书始终。所介绍的实践知识大多来自工业企业现场,符合当前技术发展和生产实际要求。具体内容包括目前已成熟的检测技术和仪器仪表,以及刚开始使用或即将使用的新理论、新技术、新方法和新设备等,紧跟该领域的技术发展步伐,实用性强。

全书共分14章。第1章为现代检测技术理论基础;第2章介绍传感器及基本特性;第3章介绍传感器基本工作原理;第4章介绍温度检测技术;第5章介绍压力检测技术;第6章介绍流量检测技术;第7章介绍物位检测技术;第8章介绍成分分析检测技术;第9章介绍机械量检测技术;第10章介绍轧制力检测技术;第11章介绍轧制过程参数检测技术;第12章介绍电参数检测技术;第13章介绍无损检测技术;第14章介绍现代检测技术理论在工程中的应用。

本书由潘炼担任主编。第1章、第2章、第5章和第6章第1~13、15、16节、第10章、第11章、第12章、第13章、第14章由潘炼教授编写;第3章由刘宏志老师和曹毅老师编写;第4章和第6章第14节由李文涛教授编写;第7章、第8章第6~12节和附录由李忠虎副教授编写;第8章第1~5节和第9章第2、5、7节由程继红副教授编写;第9章第1、3、4、6节由袁有臣副教授编写。

本书在编写过程中参阅了大量相关书籍及国家标准,在此对相关作者和单位表示诚挚的感谢!

由于编者水平有限,书中不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

2010年6月

# 目 录

<b>第 1 章 现代检测技术理论基础</b> .....	(1)
1.1 检测技术概论 .....	(1)
1.2 检测数据的估计和处理 .....	(8)
思考题与习题 .....	(27)
<b>第 2 章 传感器及基本特性</b> .....	(28)
2.1 传感器概论 .....	(28)
2.2 传感器的基本特性 .....	(29)
2.3 检测仪表的分类 .....	(38)
2.4 检测技术的发展 .....	(41)
思考题与习题 .....	(43)
<b>第 3 章 传感器基本工作原理</b> .....	(44)
3.1 电感式传感器 .....	(44)
3.2 应变式传感器 .....	(48)
3.3 电容式传感器 .....	(50)
3.4 压电式传感器 .....	(52)
3.5 磁电式传感器 .....	(53)
3.6 光电式传感器 .....	(56)
思考题与习题 .....	(59)
<b>第 4 章 温度检测技术</b> .....	(60)
4.1 概述 .....	(60)
4.2 膨胀式温度计 .....	(63)
4.3 热电阻温度计 .....	(66)
4.4 热电偶温度计 .....	(74)
4.5 辐射式温度计 .....	(92)
4.6 光纤温度计 .....	(102)
4.7 集成温度传感器 .....	(111)
4.8 温度检测仪表的选用 .....	(117)
思考题与习题 .....	(120)

<b>第 5 章 压力检测技术</b> .....	(121)
5.1 概述 .....	(121)
5.2 液柱式压力计 .....	(121)
5.3 弹性式压力计 .....	(122)
5.4 压阻式压力计 .....	(124)
5.5 压力计的安装 .....	(125)
5.6 膜盒压力计 .....	(126)
5.7 变隙式差动电感压力计 .....	(127)
5.8 差动电容式压力计 .....	(128)
5.9 压电式测力计 .....	(128)
5.10 光纤压力计 .....	(130)
5.11 压力变送器 .....	(131)
5.12 电阻应变式压力计 .....	(136)
5.13 电气式压力计 .....	(152)
5.14 压力计的选择 .....	(155)
5.15 压力计的校验和使用 .....	(156)
思考题与习题 .....	(158)
<b>第 6 章 流量检测技术</b> .....	(160)
6.1 概述 .....	(160)
6.2 节流式流量计 .....	(161)
6.3 电磁流量计 .....	(167)
6.4 涡街式流量计 .....	(171)
6.5 涡轮流量计 .....	(175)
6.6 超声波流量计 .....	(176)
6.7 光纤流量计 .....	(179)
6.8 质量流量计 .....	(179)
6.9 靶式流量计 .....	(184)
6.10 均速管流量计 .....	(185)
6.11 容积式流量计 .....	(186)
6.12 弯管流量计 .....	(189)
6.13 转子流量计 .....	(189)
6.14 相关流量计 .....	(192)
6.15 流量标准装置 .....	(196)
6.16 智能化流量积算仪 .....	(199)
6.17 流量检测仪表的选用 .....	(200)
思考题与习题 .....	(201)

<b>第 7 章 物位检测技术</b> .....	(202)
7.1 概述 .....	(202)
7.2 直读式液位计 .....	(203)
7.3 静压式液位计 .....	(204)
7.4 浮力式液位计 .....	(212)
7.5 电气式物位计 .....	(217)
7.6 超声波物位计 .....	(224)
7.7 核辐射式物位计 .....	(230)
7.8 机械接触式物位计 .....	(233)
7.9 雷达物位计 .....	(235)
7.10 磁致伸缩式液位计 .....	(238)
7.11 物位检测仪表的选用 .....	(239)
思考题与习题 .....	(241)
<b>第 8 章 成分分析检测技术</b> .....	(242)
8.1 概述 .....	(242)
8.2 热导式气体分析仪 .....	(243)
8.3 红外线气体分析仪 .....	(245)
8.4 色谱分析仪 .....	(247)
8.5 氧分析仪 .....	(251)
8.6 工业电导仪 .....	(258)
8.7 浓度计 .....	(262)
8.8 pH 计 .....	(264)
8.9 硅酸根表 .....	(267)
8.10 钠表 .....	(268)
8.11 溶氧表 .....	(269)
8.12 成分分析仪表的选用 .....	(270)
思考题与习题 .....	(270)
<b>第 9 章 机械量检测技术</b> .....	(271)
9.1 概述 .....	(271)
9.2 位移检测仪表 .....	(272)
9.3 厚度检测仪表 .....	(279)
9.4 力、应力与力矩检测仪表 .....	(280)
9.5 转速检测仪表 .....	(286)
9.6 转矩检测仪表 .....	(290)
9.7 振动与加速度检测仪表 .....	(294)
思考题与习题 .....	(298)

<b>第 10 章 轧制力检测技术</b> .....	(299)
10.1 轧制力测量 .....	(299)
10.2 旋转件的扭矩测量 .....	(309)
10.3 轧件张力检测 .....	(316)
思考题与习题 .....	(319)
<b>第 11 章 轧制过程参数检测技术</b> .....	(320)
11.1 带钢厚度检测 .....	(320)
11.2 板凸度检测 .....	(324)
11.3 板平直度检测 .....	(327)
11.4 板宽度检测 .....	(330)
11.5 辊缝检测 .....	(331)
11.6 轧件位置和切头形状检测 .....	(332)
11.7 带钢表面缺陷检测 .....	(334)
11.8 型棒材在线尺寸检测 .....	(339)
11.9 轧件运动速度检测 .....	(344)
11.10 刚度测量 .....	(345)
思考题与习题 .....	(347)
<b>第 12 章 电参数检测技术</b> .....	(349)
12.1 直流电机电参数测量 .....	(349)
12.2 交流电机电参数测量 .....	(351)
思考题与习题 .....	(353)
<b>第 13 章 无损检测技术</b> .....	(354)
13.1 工件表面缺陷检测技术 .....	(354)
13.2 工件内部缺陷检测技术 .....	(359)
13.3 超声波探伤在轧钢生产中的应用 .....	(361)
思考题与习题 .....	(377)
<b>第 14 章 现代检测技术理论在工程中的应用</b> .....	(378)
14.1 智能检测技术的应用 .....	(378)
14.2 模糊检测技术的应用 .....	(384)
14.3 神经网络检测技术的应用 .....	(388)
14.4 专家系统检测技术的应用 .....	(393)
14.5 多传感器信息融合检测技术的应用 .....	(400)
思考题与习题 .....	(403)
<b>附录</b> .....	(404)
<b>参考文献</b> .....	(411)

# 第 1 章 现代检测技术理论基础

## 1.1 检测技术概论

在科学技术高度发达的现代社会中,人类已进入瞬息万变的信息时代。人们在从事工业生产和科学实验等活动中,主要依靠对信息资源的开发、获取、传输和处理。传感器处于研究对象与测控系统的接口位置,是感知、获取与检测信息的窗口,一切科学实验和生产过程,特别是自动检测和自动控制系统要获取的信息,都要通过传感器将其转换为容易传输与处理的电信号。

在工程实践和科学实验中提出的检测任务是正确、及时地掌握各种信息,大多数情况下是要获取被测对象的信息,如被测量的大小。这样,信息采集的主要含义就是测量,以取得测量数据。

“测量系统”这一概念是传感技术发展到现在一定阶段的产物。在工程中,需要传感器与多台仪表组合在一起,才能完成信号的检测,这样便形成了测量系统。尤其是随着计算机技术及信息处理技术的发展,测量系统所涉及的内容也不断得以充实。为了更好地掌握传感器,需要对测量的基本概念、测量系统的特性、测量误差及数据处理等方面的理论及工程方法进行学习和研究,只有了解和掌握了这些基本理论,才能更有效地完成检测任务。

### 1.1.1 测量

测量是以确定被测量的值为目的的一系列操作。所以,测量也就是将被测量与同种性质的标准量进行比较,确定被测量对标准量的倍数。它可由下式表示:

$$x = nu \quad (1-1)$$

$$n = \frac{x}{u} \quad (1-2)$$

式中: $x$  为被测量值; $u$  为标准量,即测量单位; $n$  为比值(纯数),含有测量误差。

由测量所获得的被测量的值称为测量结果,测量结果可用一定的数值表示,也可以用一条曲线或某种图形表示,但无论其表现形式如何,测量结果应包括比值和测量单位。测量结果仅仅是被测量的最佳估计值,并非真值,所以还应给出测量结果的质量,即测量结果的可信程度。这个可信程度用测量不确定度表示,测量不确定度表征测量值的分散程度。因此,测量结果的完整表述应包括估计值、测量单位及测量不确定度。

被测量值和比值等都是测量过程的信息,这些信息依托于物质才能在空间和时间上进行传递。被测量作用到实际物体上,使其某些参数发生变化,这些参数承载了信息而成为信号。选择其中适当的参数作为测量信号,例如,热电偶温度传感器的工作参数是热电偶的电势,差压流量传感器中的孔板工作参数是差压  $\Delta p$ 。测量过程就是传感器从被测对象获

取被测量的信息,建立起测量信号,经过变换、传输、处理,从而获得被测量值的过程。

### 1.1.2 检测方法

实现被测量与标准量比较而得出比值的方法,称为测量方法。针对不同测量任务,进行具体分析,找出切实可行的测量方法,对测量工作是十分重要的。

对于测量方法,从不同角度有不同的分类方法。根据获得测量值的方法可分为直接测量、间接测量和组合测量三种;根据测量方式可分为偏差式测量、零位式测量和微差式测量三种;根据测量条件不同可分为等精度测量和不等精度测量两种;根据被测量变化快慢可分为静态测量和动态测量两种;根据测量敏感元件是否与被测介质接触可分为接触式测量和非接触式测量两种;根据测量系统是否向被测对象施加能量可分为主动式测量和被动式测量两种。

#### 1. 直接测量、间接测量和组合测量

在使用仪表或传感器进行测量时,测得值直接与标准量进行比较,不需要经过任何运算,直接得到被测量的数值,这种测量方法称为直接测量。被测量与测得值之间的关系可用下式表示:

$$y = x \quad (1-3)$$

式中: $y$ 为被测量的值; $x$ 为直接测得值。

例如,用磁电式电流表测量电路的某一支路电流,用弹簧管压力表测量压力等,都属于直接测量。直接测量的优点是测量过程简单、迅速,缺点是测量精度不是很高。

在使用仪表或传感器进行测量时,首先对与被测量有确定函数关系的几个量进行直接测量,将直接测量所得值代入函数关系式,经过计算得到所需要的结果,这种测量方法称为间接测量。间接测量与直接测量不同,被测量 $y$ 是一个测得值 $x$ 或几个测得值 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 的函数,即

$$y = f(x) \quad (1-4)$$

或

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1-5)$$

被测量 $y$ 不能直接测量求得,必须由测得值 $x$ 或 $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 及其与被测量 $y$ 的函数关系确定。直接测量电压值 $U$ 和电阻值 $R$ ,根据式 $P = U^2/R$ 求电功率 $P$ 即为间接测量的实例。间接测量过程较多,花费时间较长,一般用在直接测量不方便,或缺乏直接测量手段的场合。

若被测量必须经过求解联立方程组而得,如有若干个被测量 $y_1, y_2, \dots, y_m$ ,直接测得值为 $x_1, x_2, \dots, x_n$ ,把被测量与测得值之间的函数关系列成方程组,即

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= f_1(y_1, y_2, \dots, y_m) \\ x_2 &= f_2(y_1, y_2, \dots, y_m) \\ &\vdots \\ x_n &= f_n(y_1, y_2, \dots, y_m) \end{aligned} \right\} \quad (1-6)$$

方程组中方程的个数  $n$  要大于被测量  $y$  的个数  $m$ , 用最小二乘法求出被测量的数值, 这种测量方法称为组合测量。组合测量是一种特殊的精密测量方法, 操作手续复杂, 花费时间长, 多适用于科学实验或特殊场合。

## 2. 偏差式测量、零位式测量和微差式测量

用仪表指针的位移(即偏差)确定被测量的量值, 这种测量方法称为偏差式测量。应用这种方法测量时, 仪表刻度事先用标准器具分度。在测量时, 按照仪表指针在标尺上的示值确定被测量的值。偏差式测量的测量过程简单、迅速, 但测量结果的精度较低。

用指零仪表的零位反映测量系统的平衡状态, 在测量系统平衡时, 用已知的标准量确定被测量的值, 这种测量方法称为零位式测量。在零位式测量时, 将已知标准量直接与被测量相比较, 已知标准量应连续可调, 在指零仪表指零时, 被测量应与已知标准量相等。例如, 天平测量物体的质量、电位差计测量电压等都属于零位式测量。零位式测量的优点是可以获得比较高的测量精度, 但测量过程比较复杂, 费时较长, 不适用于测量变化迅速的信号。

微差式测量是综合了偏差式测量与零位式测量的优点而提出的一种测量方法。它将被测量与已知的标准量进行比较, 获得差值后, 再用偏差法求得此差值。应用这种方法测量时, 不需要调整标准量, 而只需测量二者的差值。设  $N$  为标准量,  $x$  为被测量,  $\Delta$  为二者之差, 则  $x = N + \Delta$ 。由于  $N$  是标准量, 其误差很小, 因此可选用高灵敏度的偏差式仪表测量  $\Delta$ , 即使测量  $\Delta$  的精度不高, 但总的测量精度仍很高。微差式测量的优点是反应快, 而且测量精度高, 特别适用于在线控制参数的测量。

## 3. 等精度测量和不等精度测量

在整个测量过程中, 若影响和决定误差大小的全部因素(条件)始终保持不变, 如由同一个测量者, 用同一台仪器, 用同样的方法, 在同样的环境条件下, 对同一被测量进行多次重复测量, 称为等精度测量。在实际中, 极难做到影响和决定误差大小的全部因素(条件)始终保持不变, 所以一般情况下只近似认为是等精度测量。

有时在科学研究或高精度测量中, 往往在不同的测量条件下, 用不同精度的仪表, 不同的测量方法, 不同的测量次数及不同的测量者进行测量和对比, 这种测量称为不等精度测量。

## 4. 静态测量和动态测量

被测量在测量过程中认为是固定不变的, 对这种被测量进行的测量称为静态测量。静态测量不需要考虑时间因素对测量的影响。

若被测量在测量过程中是随时间不断变化的, 则将对这种被测量进行的测量称为动态测量。

### 1.1.3 检测系统

#### 1. 检测系统构成

检测系统应具有对被测对象的特征量进行检测、传输、处理及显示等功能, 一个测

量系统是传感器、变送器(变换器)和其他变换装置等的有机组合。图 1-1 所示的是检测系统组成结构框图。

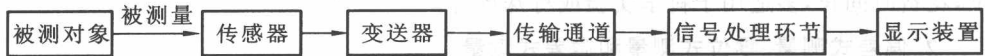


图 1-1 检测系统组成结构框图

传感器是感受被测量(物理量、化学量、生物量等)的大小,并输出相对应的可用信号(一般多为电量)的器件或装置。

变送器将传感器输出的信号变换成便于传输和处理的信号,大多数变送器的输出信号是统一的标准信号(目前多为 4 ~ 20 mA 直流电流),信号标准是系统各环节之间的通信协议。

当测量系统的几个功能环节被独立地分隔开时,必须由一个地方向另一个地方传输信号,传输环节就是完成这种传输功能的。传输通道将测量系统各环节间的输入、输出信号连接起来,通常用电缆连接,或用光导纤维连接,以传输数据。

信号处理环节将传感器输出信号进行处理和变换。例如,对信号进行放大、运算、线性化、数-模或模-数转换,使其输出信号便于显示、记录。这种信号处理环节可用于自动控制系统,也可与计算机系统连接,以便对测量信号进行处理。

显示装置是将被测量信息变成人的感官能接受的形式,以达到监视、控制或分析的目的。测量结果可采用模拟显示,也可采用数字显示或图形显示,还可以由记录装置自动记录或由打印机打印出来。

## 2. 开环检测系统与闭环检测系统

(1) 开环检测系统 开环检测系统全部信息变换只沿着一个方向进行,如图 1-2 所示。其中, $x$  为输入量, $y$  为输出量, $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$  为各个环节的传递系数,则输入与输出的关系表示如下:

$$y = k_1 k_2 k_3 x \quad (1-7)$$

因为开环检测系统是由多个环节串联而成的,因此系统的相对误差等于各环节相对误差之和,即

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 + \cdots + \delta_n = \sum_{i=1}^n \delta_i \quad (1-8)$$

式中: $\delta$  为系统的相对误差; $\delta_i$  为各环节的相对误差。

采用开环方式构成的检测系统,结构较简单,但各环节的特性的变化都会造成检测误差。



图 1-2 开环检测系统框图

(2) 闭环检测系统 闭环检测系统有两个通道,一个为正向通道,另一个为反馈

通道,其结构如图 1-3 所示。图中,  $\Delta x$  为正向通道的输入量,  $\beta$  为反馈环节的传递系数,正向通道的总传递系数  $k = k_1 k_2$ 。由图 1-3 可知:

$$\begin{aligned}\Delta x &= x_1 - x_f \\ x_f &= \beta y \\ y &= k \Delta x = k(x_1 - x_f) = kx_1 - k\beta y \\ y &= \frac{k}{1 + k\beta} x_1 = \frac{1}{\frac{1}{k} + \beta} x_1\end{aligned}$$

当  $k \gg 1$  时,

$$y \approx \frac{1}{\beta} x_1 \quad (1-9)$$

系统的输入与输出的关系为

$$y = \frac{kk_1}{1 + k\beta} x \approx \frac{k_1}{\beta} x \quad (1-10)$$

显然,这时整个系统的输入与输出的关系由反馈环节的特性决定,放大器等环节特性的变化不会造成检测误差,或者说造成的误差很小。

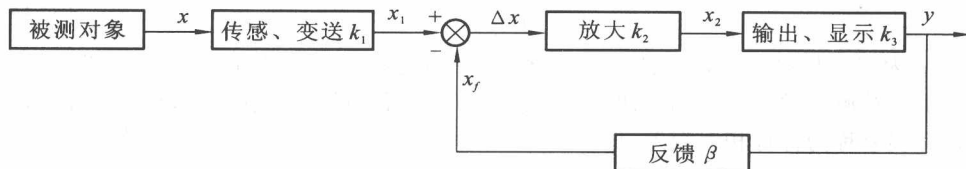


图 1-3 闭环检测系统框图

### 1.1.4 检测误差

检测误差是测得值减去被测量的真值。

由于真值往往未知,因此检测的目的是希望通过检测获取被测量的真实值。但由于种种原因,例如,传感器本身性能不十分优良,测量方法不十分完善,外界干扰的影响等,造成被测量的测得值与真实值不一致,因而测量中总是存在误差。由于真值未知,所以在实际中,有时用约定真值代替真值,常用某量的多次测量结果来确定约定真值,或用精度高的仪器示值代替约定真值。

在工程技术及科学研究中,对被测量进行检测时,测量的可靠性至关重要,不同场合对检测结果可靠性的要求也不同。例如,在量值传递、经济核算、产品检验等场合应保证测量结果有足够的准确度。当测量值用作控制信号时,要注意测量的稳定性和可靠性。因此,测量结果的准确程度,应与测量的目的与要求相联系、相适应,那种不惜工本,不顾场合,一味追求越准越好的作法是不可取的,要有技术与经济兼顾的意识。

#### 1. 检测误差的表示方法

检测误差的表示方法有多种,含义各异。

(1) 绝对误差 绝对误差可用下式定义:

$$\Delta = x - L \quad (1-11)$$

式中: $\Delta$ 为绝对误差; $x$ 为测量值; $L$ 为真值。

绝对误差是有正、负并有量纲的。

在实际检测过程中,有时要用到修正值,修正值是绝对误差大小相等、符号相反的值,即

$$c = -\Delta \quad (1-12)$$

式中, $c$ 为修正值,通常用高一等级的测量标准或标准仪器获得修正值。

利用修正值可对测量值进行修正,从而得到准确的实际值,修正后的值 $x'$ 为

$$x' = x + c \quad (1-13)$$

修正值给出的方式,可以是具体的数值,也可以是一条曲线或公式。

采用绝对误差表示测量误差,不能很好地说明测量质量的好坏。例如,在温度测量时,绝对误差 $\Delta = 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,对体温测量来说是不允许的,而对钢水温度测量来说是极好的测量结果,所以用相对误差可以比较客观地反映测量的准确性。

(2) 实际相对误差 实际相对误差的定义由下式给出:

$$\delta = \frac{\Delta}{L} \times 100\% \quad (1-14)$$

式中: $\delta$ 为实际相对误差,一般用百分数给出; $\Delta$ 为绝对误差; $L$ 为真值。

由于被测量的真值 $L$ 无法知道,故实际测量时用测量值 $x$ 代替真值 $L$ 进行计算,这个相对误差称为标称相对误差,即

$$\delta = \frac{\Delta}{x} \times 100\% \quad (1-15)$$

(3) 引用误差 引用误差是仪表中通用的一种误差表示方法。它是相对于仪表满量程的一种误差,又称为满量程相对误差,一般也用百分数表示,即

$$\gamma = \frac{\Delta}{\text{测量范围上限} - \text{测量范围下限}} \times 100\% \quad (1-16)$$

式中: $\gamma$ 为引用误差; $\Delta$ 为绝对误差。

仪表精度等级是根据最大引用误差来确定的。例如,0.5级表的引用误差的最大值不超过 $\pm 0.5\%$ ;1.0级表的引用误差的最大值不超过 $\pm 1\%$ 。

在仪表和传感器使用时,经常会遇到基本误差和附加误差两个概念。

(4) 基本误差 基本误差是指传感器或仪表在规定的标准条件下所具有的误差。例如,某传感器是在电源电压 $(220 \pm 5)\text{V}$ 、电网频率 $(50 \pm 2)\text{Hz}$ 、环境温度 $(20 \pm 5)\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、湿度 $65\% \pm 5\%$ 的条件下标定的,如果该传感器在这个条件下工作,则其所具有的误差为基本误差。仪表的精度等级就是由基本误差决定的。

(5) 附加误差 附加误差是指传感器或仪表的使用条件偏离额定条件下出现的误差,如温度附加误差、频率附加误差、电源电压波动附加误差等。

## 2. 检测误差的性质

根据检测数据中的误差所呈现的规律及产生的原因,可将其分为系统误差、随机

误差和粗大误差。

(1) 随机误差 在同一测量条件下,多次测量被测量时,其绝对值和符号以不可预定的方式变化着的误差称为随机误差。

在我国新制定的国家计量技术规范 JJF1001—1998《通用计量术语及定义》中,对随机误差的定义是根据国际标准化组织(ISO)等七个国际组织制定的《测量不确定度表示指南》定义的,即随机误差是测量结果与在重复性条件下,对同一被测量进行无限多次测量所得结果的平均值之差。重复性条件包括:相同的测量程序,相同的观测者,在相同的条件下使用相同的测量仪器,相同的地点,在短时间内重复测量。随机误差可用下式表示:

$$\text{随机误差} = x_i - \bar{x}_\infty \quad (1-17)$$

式中: $x_i$  为被测量的某一个测量值; $\bar{x}_\infty$  为重复性条件下无限多次的测量值的平均值,即

$$\bar{x}_\infty = \frac{x_1 + x_2 + \cdots + x_n}{n} \quad (n \rightarrow \infty)$$

由于重复测量实际上只能测量有限次,因此实用中的随机误差只是一个近似估计值。

对于随机误差不能用简单的修正值来修正,当测量次数足够多时,随机误差就整体而言,服从一定的统计规律,通过对测量数据的统计处理可以计算随机误差出现的可能性的概率大小。

(2) 系统误差 在同一测量条件下,多次测量被测量时,其绝对值和符号保持不变,或在条件改变时,按一定规律(如线性、多项式、周期性等函数规律)变化的误差称为系统误差。前者为恒值系统误差,后者为变值系统误差。

在我国新制定的国家计量技术规范 JJF1001—1998《通用计量术语及定义》中,对系统误差的定义是,在重复性条件下对同一被测量进行无限多次测量所得结果的平均值与被测量的真值之差。系统误差可用下式表示:

$$\text{系统误差} = \bar{x}_\infty - L \quad (1-18)$$

式中: $L$  为被测量的真值。

因为真值不能通过测量获知,所以通过有限次测量的平均值 $\bar{x}$ 与 $L$ 的约定真值近似地得出系统误差,称为系统误差的估计,再用得出的系统误差对测量结果进行修正。但由于系统误差不能完全获知,因此通过修正值只能有限程度地补偿。

引起系统误差的原因复杂,如测量方法不完善,零点未调整,采用近似的计算公式,测量者的经验不足等。对于系统误差,首先要查找误差根源,并设法减小和消除,而对于无法消除的恒值系统误差,可以在测量结果中加以修正。

(3) 粗大误差 超出在规定条件下预期的误差称为粗大误差,粗大误差又称疏忽误差。

这类误差的发生是由测量者疏忽大意,测错、读错或环境条件的突然变化等引起的。含有粗大误差的测量值明显地歪曲了客观现象,故含有粗大误差的测量值称为坏值或异常值。

在数据处理时,要采用的测量值不应该包含有粗大误差,即所有的坏值都应当剔除。所以,进行误差分析时,要估计的误差只有系统误差和随机误差两类。

## 1.2 检测数据的估计和处理

### 1.2.1 随机误差的统计处理

#### 1. 正态分布

多次等精度地重复测量同一测量值时,会得到一系列不同的测量值,即使剔除了坏值,并采取措施消除了系统误差,然而由于所测得的数据各异,故可以肯定每个测量值还会含有误差。这些误差的出现没有确定的规律,具有随机性,所以称为随机误差。

随机误差的分布规律,可以在大量测量数据的基础上总结出来,就误差的总体来说是服从统计规律的。由于大多数随机误差服从正态分布,因而正态分布理论就成为研究随机误差的基础。

随机误差一般具有以下几个性质。

(1) 绝对值相等的正误差与负误差出现的次数大致相等,误差所具有的这个特性称为对称性。

(2) 在一定测量条件下的有限测量值中,其随机误差的绝对值不会超过一定的界限,这一特性称为有界性。

(3) 绝对值小的误差出现的次数比绝对值大的误差出现的次数多,这一特性称为单峰性。

(4) 对同一量值进行多次测量,其误差的算术平均值随着测量次数  $n$  的增加趋向于零,这一特性称为误差的抵偿性。

抵偿性是由第一个特性推导出来的,因为绝对值相等的正误差与负误差之和可以互相抵消。对于有限次测量,随机误差的平均值是一个有限小的量,而当测量次数无限增多时,它趋向于零。抵偿性是随机误差的一个重要特征,凡是具有抵偿性的,原则上都可以按随机误差来处理。

设对某一被测量进行多次重复测量,得到一系列的测量值为  $x_i$ , 设被测量的真值为  $L$ , 则测量列中的随机误差  $\delta_i$  为

$$\delta_i = x_i - L \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1-19)$$

正态分布的概率分布密度  $f(\delta)$  为

$$f(\delta) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}} \quad (1-20)$$

正态分布的分布密度曲线如图 1-4 所示,即为一条钟形的曲线,称为正态分布曲线,其中  $L, \sigma (\sigma > 0)$  是正态分布的两个参数。从图中还可以看到,曲线在  $L \pm \sigma$  (或  $\pm \sigma$ ) 处有两个拐点。

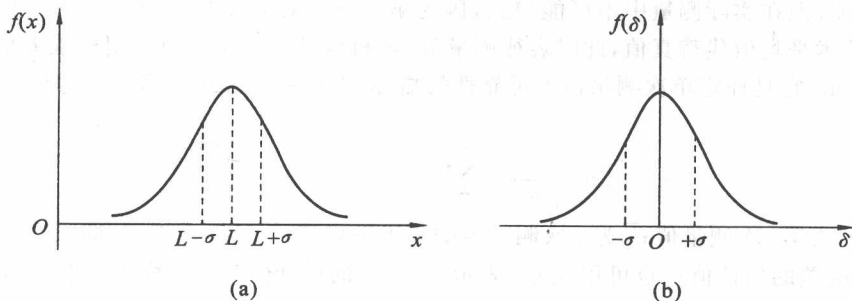


图 1-4 正态分布的分布密度曲线

## 2. 随机误差的数字特征

(1) 算术平均值  $\bar{x}$  正态分布是以  $x = L$  为对称轴,它是正态总体的平均值。由于在测量过程中,不可避免地存在随机误差,因此无法求得被测量的真值,但如果随机误差服从正态分布,算术平均值处随机误差的概率密度最大,即算术平均值与被测量的真值最为接近,则随着测量次数的增加,算术平均值越趋近于真值。如果对某一量进行无限多次测量,就可以得到不受随机误差影响的值,或其影响甚微,可以忽略。由于实际上是有限次测量,因而有限次直接测量中算术平均值是诸测量值中最可信赖的,可把它作为等精度多次测量的结果,即被测量的最佳估计值。

若对被测量进行等精度的  $n$  次测量,得到  $n$  个测量值  $x_1, x_2, \dots, x_n$ ,则它们的算术平均值为

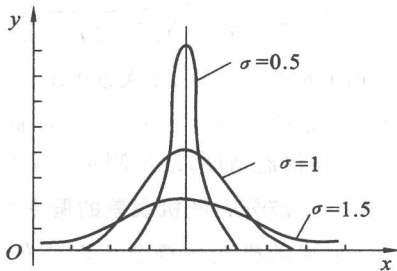
$$\bar{x} = \frac{1}{n}(x_1 + x_2 + \dots + x_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1-21)$$

由于被测量的真值未知,故不能按式(1-19)求得随机误差。这时,可用算术平均值代替被测量的真值进行计算,则有

$$v_i = x_i - \bar{x} \quad (1-22)$$

式中:  $v_i$  为  $x_i$  的残余误差(简称残差)。

(2) 标准偏差  $\sigma$  标准偏差简称为标准差,又称均方根误差。标准差  $\sigma$  刻画总体的分散程度,图 1-5 给出了  $L$  相同,  $\sigma$  不同( $\sigma = 0.5, \sigma = 1, \sigma = 1.5$ ) 的正态分布曲线,  $\sigma$  值越大,曲线越平坦,即随机变量的分散性越大;反之,  $\sigma$  值越小,曲线越尖锐(集中),随机变量的分散性越小。

图 1-5 不同  $\sigma$  的正态分布曲线

标准差  $\sigma$  由下式算得:

$$\sigma = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - L)^2}{n}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \delta_i^2}{n}} \quad (1-23)$$

$\sigma$  是在测量次数趋于无穷时得到的,它是正态总体的平均值,称为理论标准差或总