

通·信·与·控·制·系·列·教·程

检测与转换技术

JIANCE YU ZHUANHUAN JISHU

高延滨 曾建辉 周雪梅 编 著

COMMUNICATION & CONTROL



通信与控制系列教程

检测与转换技术

高延滨 曾建辉 周雪梅 编著

哈尔滨工程大学出版社

内 容 简 介

本教材立足于让读者能够具备较高的检测与转换技术的理论基础和工程实践能力,教材从基本理论入手,重在实际应用。全书共 11 章,较全面地介绍了检测系统的基础理论、基本传感器的应用以及检测过程中的信号变换、计算机接口、嵌入式系统和虚拟仪器等内容。

本教材可作为高等学校工科专业本科生教材和参考书,也可供从事检测技术和自动化工作的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

检测与转换技术/高延滨编著. —哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2007.8

ISBN 978-7-81073-152-2

I. 检… II. 高… III. ①自动检测②传感器
IV. TP274 TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 119527 号

出版发行 哈尔滨工程大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区东大直街 124 号
邮政编码 150001
发行电话 0451-82519328
传 真 0451-82519699
经 销 新华书店
印 刷 黑龙江省教育厅印刷厂
开 本 787mm×1092mm 1/16
印 张 17.5
字 数 432 千字
版 次 2007 年 8 月第 1 版
印 次 2007 年 8 月第 1 次印刷
定 价 30.00 元
<http://press.hrbeu.edu.cn>
E-mail: heupress@hrbeu.edu.cn

前 言

随着电子技术及计算机技术的迅速发展,各行各业对信息资源的要求日益增长,因此传感器信息的检测与转换也越来越受到人们的重视。为了适应高科技的需要,科技专业人才应具备较高的检测与转换技术的理论基础和工程实践能力,本教材就是基于这种思想编写的。

本教材共 11 章,分成三大部分。第 1 章介绍检测与转换技术的基础知识及误差分析。第 2 章至第 4 章介绍各种传感器的工作原理、特性、测量电路等。第 5 章至第 11 章介绍信号的放大、滤波、信号转换、计算机接口、嵌入式系统以及虚拟仪器在检测中的应用。

本书第 1 章至第 4 章由哈尔滨工程大学周雪梅博士编写,第 5 章至第 9 章由哈尔滨工程大学高延滨教授编写,第 10 章和第 11 章由哈尔滨工程大学曾建辉副教授编写。全书由高延滨教授主编,孙华教授主审。

本教材可作为高等学校工科专业本科生教材和参考书,也可供从事检测技术和自动化工作的工程技术人员参考。

本书编写过程中得到了许德新博士的帮助,编者在此表示真挚的感谢。本书部分内容参考了一些院校编写的教材及文献资料,在此也致以谢意。

由于本书涉及学科较多,编者学识有限,书中尚有疏漏和不妥之处,敬请读者批评指正。

编 者

2007 年 6 月

目 录

绪论	1
0.1 本课程的主要内容	1
0.2 本课程与相关学科的关系及特点	2
0.3 检测与转换系统的一个典型例子	2
第1章 检测与转换技术的理论基础	6
1.1 检测与转换技术的基本概念	6
1.2 测量误差	7
1.3 传感器的一般特性	14
第2章 阻抗式传感器	20
2.1 电阻式传感器	20
2.2 电感式传感器	30
2.3 电容式传感器	39
第3章 电压式传感器	51
3.1 压电式传感器	51
3.2 磁电式传感器	65
3.3 热电偶传感器	72
3.4 光电式传感器	79
3.5 霍尔式传感器	92
第4章 数字式传感器	100
4.1 编码器	100
4.2 光栅	104
4.3 感应同步器	115
第5章 信号的放大与滤波技术	124
5.1 信号的放大技术	124
5.2 有源滤波电路的设计与应用	131
第6章 模拟开关和采样/保持电路	139
6.1 模拟开关的工作原理及应用	139
6.2 采样/保持器工作原理及应用	143
6.3 电压比较器	147
第7章 信号的转换电路	151
7.1 数/模转换器的典型工作电路	151
7.2 数/模转换器的性能分析	152
7.3 模/数转换电路的工作原理	153
7.4 常用的 A/D, D/A 转换器芯片介绍	154
7.5 AD7656 原理及应用	157

7.6	ADSI212 原理及应用	163
7.7	16 位 D/A 转换芯片 AD669 原理及应用	167
第 8 章	计算机接口电路	176
8.1	PC 系列微机 ISA 总线 I/O 通道简介	176
8.2	ISA 总线 A/D 接口电路设计	178
8.3	ISA 计数器接口电路设计	181
8.4	ISA 总线串行接口电路设计	187
8.5	CAN 总线及串口通信	191
8.6	CAN 与 RS-422A 通信适配器的设计	203
第 9 章	物体轴角信号的检测	216
9.1	自整角机和旋转变压器	216
9.2	编码式轴角信号的数字转换电路	219
9.3	跟踪式轴角-数字转换	222
9.4	跟踪式轴角-数字转换的一个具体应用实例——磁通门罗经系统的实现	224
第 10 章	SOPC 技术在信号检测与转换系统中的应用	231
10.1	SOPC 概述	231
10.2	SOPC 开发工具	235
10.3	SOPC 数据采集系统设计实例	235
第 11 章	虚拟仪器技术在检测中的应用	251
11.1	虚拟仪器概述	251
11.2	LabVIEW 概述	256
11.3	LabVIEW 实现数据采集	261
11.4	LabVIEW 实现数字信号处理	265
11.5	虚拟仪器展望	269
参考文献		271

绪 论

0.1 本课程的主要内容

本课程的重点是论述被检测信号的信息获取、信息处理、信息传输等相关的理论和技術。本课程属于专门研究、开发、制造和应用各种人类的感覺、思维和体能器官并使之得以延伸的学科。

0.1.1 检测与转换的基本概念

检测:通过各种科学的手段和方法获得客观事物的量值。

转换:通过各种技术手段把客观事物的大小转换成人们能够识别、存储和传输的量值。

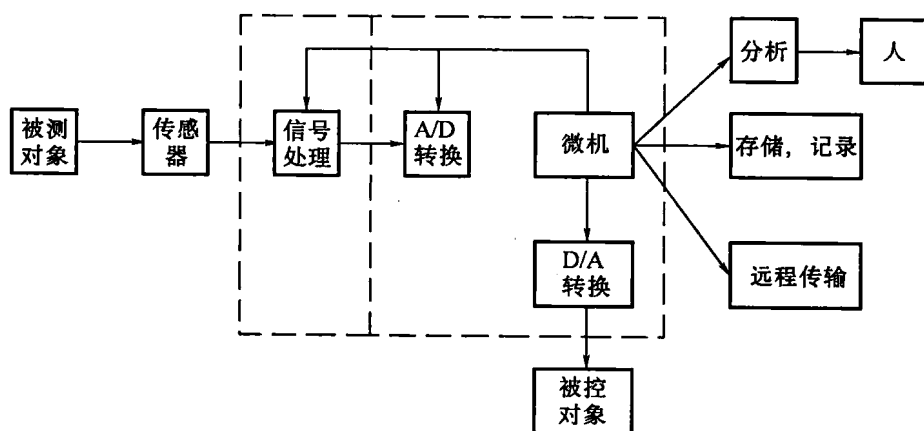


图 0-1-1 检测与转换系统的组成

结合图 0-1-1,可以看出被检测对象的某种信息经过传感器件转变成系统能够识别的形式(通常是电压或电流),然后经过信号处理电路对传感器输出的小信号(通常是淹没在噪声中的)进行放大、滤波等预处理,这部分工作一般来讲也是十分重要的,只有信号质量比较好时才能被后面的 A/D 转换电路进行转换,使其成为计算机能够识别的数字编码。

从传感器输出到微机这部分,我们称之为信号的前向通道(或输入通道)。在有些场合,微机根据前向通道得到的信息,依照一定的规律,还要对被控对象输出一定的控制量(主要也是电流或电压),这就是所谓的 D/A 转换,也称之为后向通道(或输出通道)。在这里我们将包括信号处理、A/D 转换、D/A 转换以及微机对这几个部分的控制等内容作为“检测与转换系统”的主要内容。

0.2 本课程与相关学科的关系及特点

与本课程相关的学科有:光学工程学科、机械工程学科、电子信息工程学科、计算机科学与技术学科、控制科学与工程学科、信息与通信工程学科。本课程知识结构如图 0-2-1 所示。

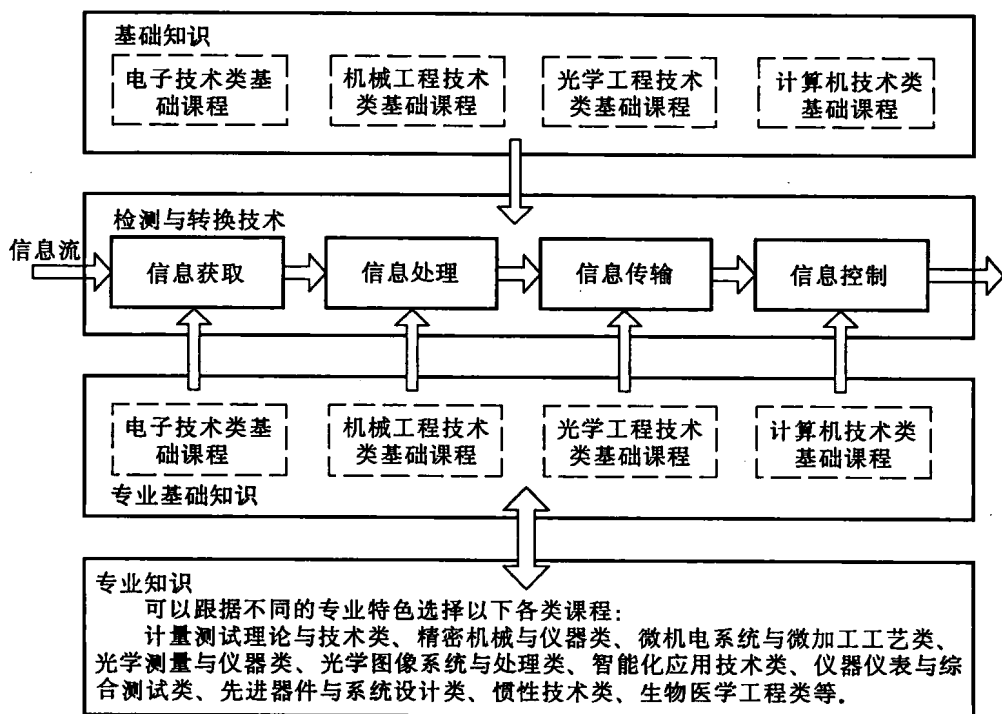


图 0-2-1 检测与转换技术的知识结构

另外,本教材在编写过程中注意突出以下几个特点:

- (1)以微机原理、模拟电子技术、数字电子技术等前期课程为基础;
- (2)以实际应用的系统和电路为讲解重点,内容前后呼应,软硬件相结合;
- (3)注意强调所讲内容的深度和细节,注意点面结合;深入浅出。

0.3 检测与转换系统的一个典型例子

下面以人体心电信号的计算机检测与分析系统(图 0-3-1)为例,介绍检测与转换系统的具体内容。

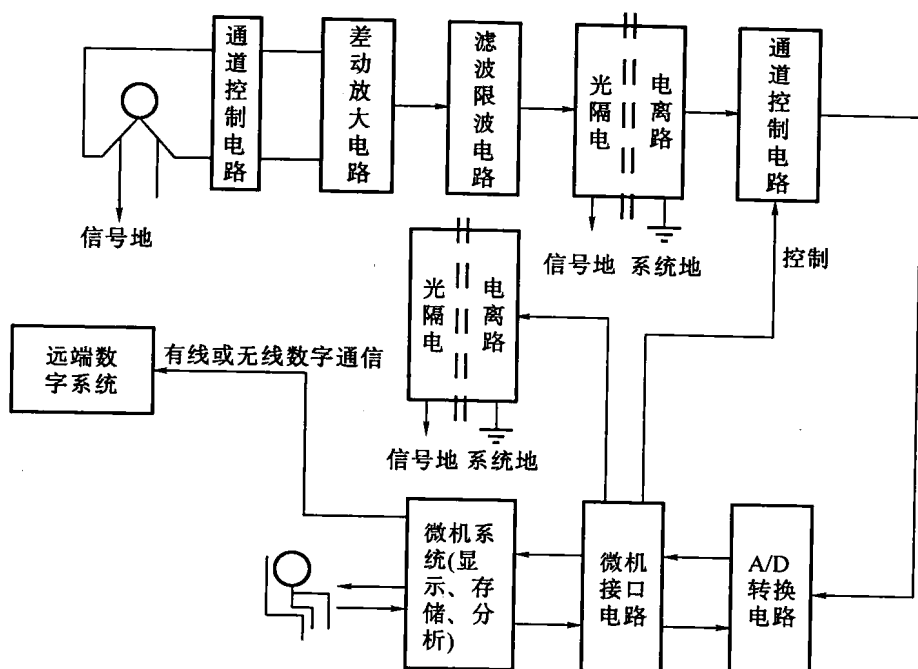


图 0-3-1 人体心电信号检测电路构成的方框图

0.3.1 信号源和信号地

人体作为心电信号的信号源,首先要选择心电信号的参考地,在这里选择人体的右脚为参考地信号,以此电位为参考,选择人体其他不同的两个部位的电位差为信号源。此信号源具有信号幅度小(一般为微伏至毫伏的数量级)、内阻大(一般人体的内阻为几百千欧)等特点,显然这是一个很不理想的信号源。

由于这里直接获取的是电压差形式的人体心电信号,选用接触电阻较小的金属片就可以拾取人体的电压差,因此传感器部分在此例中被省略掉。如果对应的是非电类信号,则一般一定需要用传感器类的器件使其转换成电类信号。

0.3.2 “地”的不同定义和概念

在这个例子中,出现了“系统地”、“信号地”等概念。“信号地”一般是指被检测信号的参考电位,而“系统地”是指整个电气系统(或检测系统)的公共电流回路和参考电位。一般情况下,“信号地”与“系统地”应该是连接在一起的,但也有一些情况是不能将它们连接在一起。除了“信号地”和“系统地”之外,还有“大地”。“大地”是指“地球”,通过在地下埋设铜板或插入金属棒,或利用金属排水管道实现“系统地”与“大地”的连接。

如果“系统地”与“大地”绝缘,则称系统为“浮地系统”,“浮地系统”的“系统地”不一定是零电位。

如果把“系统地”与“大地”相连,则称该系统为“共地系统”。“共地系统”的“系统地”与“大地”电位相同,具有“绝对零电位”。“共地系统”中不能把“系统地”连接到交流电源的零线上,也不应该连到大功率用电设备的安全地线上,需另设一个接地线。因为上述“零线”或

“安全地线”与大地之间存在着随机变化的电位差,其变化范围从几十毫伏到几十伏。“系统地”与“交流地”之间的距离不应少于 800 m。

0.3.3 接地方式

- (1) 串联单点接地:两个或两个以上电路共用一段地线的接地方式,如图 0-3-2 所示。
- (2) 并联单点接地:各电路地线只在一点汇合,如图 0-3-3 所示。

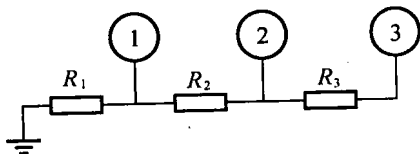


图 0-3-2 串联单点接地

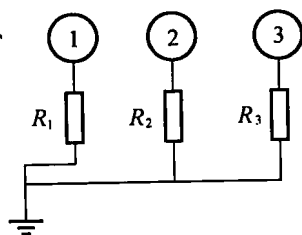


图 0-3-3 并联单点接地

- (3) 多点接地:如图 0-3-4 所示。
信号频率大于 10 MHz 时,应采用多点接地。

0.3.4 差动放大器

放大器分共模放大器、差模放大器等不同种类。对于差动(差模)信号,我们这里只能采用差动放大器,而对于人体心电信号这种信号源采用普通的一级差动放大器还不行,还要采用用于微弱差动信号检测的仪用放大器。

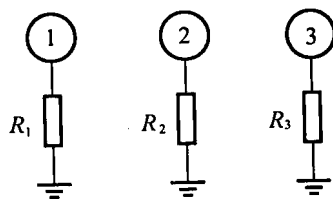


图 0-3-4 多点接地

0.3.5 滤波器与陷波器

由于小信号被淹没于噪声中,如果只进行简单的放大,则噪声和信号一起得到放大,我们仍然得不到干净、理想的信号。如果信号和噪声在性质上(共模、差模等)有所不同,或者在频域分布上有所不同,那么我们可以采用不同的放大器形式和滤波器形式将噪声去除。如果信号与噪声在信号性质上和频率分布上都相同或相近,那么原理上就很难将信号和噪声分离开,只能依靠 Kalman 滤波器等现代控制方法作进一步的努力。

0.3.6 光电隔离电路

有些特殊应用场合要求被检测对象与检测系统之间没有直接的电气连接,如在人体心电检测系统中,从安全的角度,要求人体检测回路与市电($\sim 220\text{ V}$)没有电气连接,这就要求系统采用光电隔离(或其他隔离方式)电路。而信号的隔离不仅要求对数字信号、控制信号进行隔离,而且也要求被检测的模拟信号通路也是隔离的。

0.3.7 通道控制电路

检测系统所采集的信号往往是多路的,而 A/D 转换器、计算机等资源往往又是利用一套设备,这就需要利用通道控制电路进行切换和控制。

0.3.8 A/D 转换电路

经过放大、滤波等预处理的信号在达到了合适的大小和一定的信噪比之后,下一步的工作就是要将其量化成计算机能够识别、存储、运算、传输等的数字编码,这一部分工作就由所谓的 A/D 转换电路来完成。当然,由于被采样信号性质的不同,要求 A/D 转换电路完成一次转换的时间、位数等也不同,这些内容要在后面的有关内容中专门介绍。A/D 转换器要对多路信号同时进行转换,除了要有通道控制电路进行配合外,还须采样保持电路等配合工作。

0.3.9 微机接口电路及微机系统

在数字化(智能化)检测与控制系统中,微机无疑起着大脑神经中枢的作用,它控制着整个系统中各个需要控制的部分。而微机从它的构成层次上又可分为嵌入式系统(单片机、DSP 等)和系统机(台式机、PC-104 等)。

一般来讲,嵌入式的接口电路较为透明,而系统机的接口电路所要遵从的规定就多一些,但是无论是哪一种接口,都要求读者对微机系统有较为深入的研究和了解,因此本课程要求读者对微机系统有一定的基础。

A/D 转换器的数据经过接口电路进入微机的存储器后,就可以利用微机的资源对这些信息进行加工、处理,并根据所处理的结果得出一定的结论。如果是一个闭环系统,根据所得到的结论,将控制量经 D/A 重新变换成电压(或电流)等模拟量,从而控制被控对象。

0.3.10 微机数字通信系统

被检测的信息经过上述各处理过程被处理加工后,如果需要,可以利用微机(或嵌入式系统)的有线或无线数字通信功能将该信息发送给远端的其他用户。因此本课程也要涉及到一些较基本的计算机通信的原理与内容。

第1章 检测与转换技术的理论基础

1.1 检测与转换技术的基本概念

1.1.1 检测与转换技术

检测与转换技术是以研究自动检测系统中的信息提取、转换以及信号处理的理论和技术为主要内容的一门应用技术学科。

信息提取是指从自然界诸多的被检测与测量量(物理量、化学量、生物量与社会量)中提取出有用的信息(一般都是电信号),以便组成自动检测系统。

信息转换是将所提取出的有用信息进行电量形式、幅值、功率等的转换。为了适应下一单元的需要和满足精确度的需要,在此对信息提取及转换过程中引入的干扰进行了补偿。

信息处理的任务,视输出环节的需要,可将变换后的电信号进行数字运算(求均值、极值等)、模拟量-数字量变换等处理。

信息传输的任务是在排除干扰的情况下经济地,准确无误地把信息进行远、近距离的传递。

1.1.2 自动检测系统

自动检测系统是自动测量、自动计量、自动保护、自动诊断、自动信号等诸系统的总称,它的组成框图如图1-1-1所示。

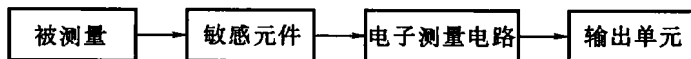


图 1-1-1 自动检测系统框图

检测系统各部分的特点如下。

(1)为便于有效测量,有时需要给被测对象施加激励信号,这样可使被测对象处于预定状态,并将其有关方向的内在联系充分显示出来。

(2)被测对象的特性均以信号的形式给出,而被测信号一般都是随时间变化的动态量,即使在检测不随时间变化的静态量时,由于混有动态的干扰噪声,因此通常也按动态量进行检测。

(3)敏感元件是将感知的被测量按一定规律转化为某一种量值输出,通常是电信号。如果不是电信号,就需经变换电路将其变成电信号。

(4)电子测量电路一般有两个作用,一是信号转换和放大;二是信号处理,即滤波、调制与解调、衰减运算、数字化处理等。

(5)输出装置的种类很多,可根据需要进行配置。现代检测系统采用了计算机和网络技术将调理电路输出的信号直接送到信号分析设备中进行在线处理。为保证测量结果的准确性、稳定性,上述环节的输出量与输入量之间应保持一一对应和尽量不失真关系。

1.1.3 传感器

传感器是检测系统的第一个环节。它是以一定的精度把被测量转换成与之有确定关系的,便于应用的某种量值的测量装置。传感器是由敏感元件、传感元件和其他辅助元件组成的,有时也包括信号调节与转换电路。

传感器分为以下几种类型。

1.按结构分类

A型结构的传感器,一般叫做电量传感器。

B型结构的传感器,一般是电参数传感器。

C型结构的传感器,也属于电参数传感器,但在敏感元件与测量电路间有二次转换元件。

A,B,C型结构的传感器统称为简单结构型传感器。

D型结构的传感器,是由两个简单结构型传感器构成的差动结构型传感器。

2.按被测物理量分类

速度传感器、位移传感器、加速度传感器、温度传感器、压力传感器等。

3.按工作原理分类

应变式、电压式、电容式、涡流式、差动变压器式等。

4.按能量的传递方式分类

有源的和无源的传感器。

1.2 测量误差

1.2.1 测量误差及其分类

1.测量误差的基本概念

(1)等精度测量 在同一条件下所进行的一系列重复测量称为等精度测量。

(2)非等精度测量 在多次测量中,如对测量结果精确度有影响的一切条件不能完全维持不变,称为非等精度测量。

(3)真值 被测量本身所具有的真正值称为真值。真值是一个理想的概念,一般是不知道的。但在某些特定情况下,真值又是可知的,例如一个整圆周角为 360° 等。

(4)实际值 实际测量中,不可能都直接与国家基准相比,所以国家通过一系列的各级实务计量标准构成量值传递网,将国家基准所体现的计量单位逐级比较传递到日常工作仪器或量具上去。通常只能把精度更高一级的标准器具所测得的值作为“真值”。为了强调它并非是真正的“真值”,故把它称为实际值。

(5)标称值 测量器具上所标出来的数值。

(6)示值 由测量器具读数装置所指示出来的被测量的数值。

(7)测量误差 用器具进行测量时,所测量出来的数值与被测量的实际值之间的差值。

任何自动检测系统的测量结果都有一定的误差,即所谓精度。一般来说,不存在没有误差的测量结果,也不存在没有精度要求的自动检测系统。精度(误差)是一项重要技术指标。

2. 误差的分类

在测量中由不同因素产生的误差是混合在一起同时出现的。为了便于分析研究误差的性质、特点和消除方法,下面将对各种误差进行分类讨论。

(1) 按表示方法分类

①绝对误差 绝对误差是示值与被测量真值之间的差值。设被测量的真值为 A_0 , 器具的标称值或示值为 x , 则绝对误差 Δx 为

$$\Delta x = x - A_0 \quad (1-2-1)$$

由于一般无法求得真值 A_0 , 在实际应用时常常用精度高一级的标准器具的示值(作为实际值) A 代替真值 A_0 。必须指出, A 并不等于 A_0 , 一般来说, A 总比 x 更接近于 A_0 。

x 与 A 之差常称为器具的示值误差, 记为

$$\Delta x = x - A \quad (1-2-2)$$

通常即以此值来代表绝对误差。

绝对误差一般只适用于标准器具的校准。

绝对值是与 Δx 相等但符号刚好相反的值, 称为修正值, 常用 c 表示, 如

$$c = -\Delta x = A - x \quad (1-2-3)$$

通过检定, 可以由上一级标准(或基准)给出受检测系统的修正值。利用修正值便可求出检测系统的实际值, 有

$$A = x + c \quad (1-2-4)$$

②相对误差 相对误差是绝对误差 Δx 与被测量的约定值之比, 用它较绝对误差更能确切地说明测量质量。

在实际测量中, 相对误差有下列表示形式。

a. 实际相对误差。实际相对误差 γ_A 是用绝对误差 Δx 与被测量的实际值 A 的百分比值来表示的相对误差, 记为

$$\gamma_A = \frac{\Delta x}{A} \times 100\% \quad (1-2-5)$$

b. 示值相对误差。示值相对误差 γ_x 是用绝对误差 Δx 与器具的示值 x 的百分比值来表示的相对误差, 记为

$$\gamma_x = \frac{\Delta x}{x} \times 100\% \quad (1-2-6)$$

c. 满度(或引用)相对误差。满度相对误差 γ_m 又称满度误差, 是用绝对误差 Δx 与器具的满度值 x_m 之比来表示的相对误差, 记为

$$\gamma_m = \frac{\Delta x}{x_m} \times 100\% \quad (1-2-7)$$

这是应用得最多的表示方法。

③容许误差 容许误差是根据技术条件的要求, 规定某一类器具误差不应超过的最大范围。

(2) 按误差出现的规律分类

①系统误差 系统误差(简称系差), 是按某种已知的函数规律变化而产生的误差。系

统误差又可分为以下几种。

- a. 恒定系差。该系差是指在一定的条件下,误差的数值及符号都保持不变的系统误差。
- b. 变值系差。该系差是指在一定的条件下,误差按某一确切规律变化的系统误差。

系统误差表明了一个测量结果偏离真值或实际值的程度。系统误差愈小,测量就越准确,所以还经常用准确度一词来表征系统误差大小。

②随机误差 随机误差(简称随差)又称偶然误差,它是由未知变化规律产生的误差。

随机误差具有随机变量的一切特点,在一定条件下服从统计规律,因此经过多次测量后,对其总和可以用统计规律来描述,可以从理论上估计对测量结果的影响。

随机误差表现了测量结果的分散性。在误差理论中,用精密度来表征随机误差的大小。随机误差愈小,精密度愈高。如果一个测量结果的随机误差和系统误差均很小,则表明测量既精密又准确,简称精确。

③粗大误差 粗大误差是指在一定的条件下测量结果显著地偏离其实际值时所对应的误差,简称粗差。从性质上来看,粗差并不是单独的类别,它本身既可能具有系统误差的性质,也可能具有随机误差的性质,只不过在一定测量条件下其绝对值特别大而已。

粗大误差是由于测量方法不妥当,各种随机因素的影响以及测量人员粗心(又称这类误差为疏失误差)所造成的。在测量及数据处理中,当发现某次测量结果所对应的误差特别大时,应认真判断该误差是否属于粗大误差,如属粗差,则该值应舍去不用。

(3)按误差来源分类

①工具误差 工具误差是指因测量工具本身不完善引起的误差,主要包括读数误差、内部噪声引起的误差。此外,还有灵敏度不足引起的误差;器件老化引起的误差;检测系统工作条件变化时引起的误差。

②方法误差 方法误差是指测量时方法不完善、所依据的理论不严密以及对被测量定义不明确等诸因素所引起的误差,有时也称之为理论误差。

(4)按被测量随时间变化的速度分类

①静态误差 静态误差是指在测量过程中,被测量随时间变化很缓慢或基本不变时的测量误差。

②动态误差 动态误差是指在被测量随时间变化很快的过程中测量所产生的附加误差。动态误差是由于有惯性、有纯滞后,因而不能让输入信号的所有成分全部通过;或者输入信号中不同频率成分通过时受到不同程度的衰减或延迟而引起的。

(5)按使用条件分类

①基本误差 基本误差是指检测系统在规定的标准条件下使用时所产生的误差。所谓标准条件一般指检测系统在实验室(或制造厂、计量部门)标定刻度时所保持的工作条件,电源电压 $220\text{ V} \pm 5\%$; 温度 $20 \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$; 湿度小于 85% ; 电源频率 50 Hz 等。

基本误差是检测系统在额定条件下工作所具有的误差,检测系统的精确度就是由基本误差决定的。

②附加误差 当使用条件偏离规定的标准条件时,除基本误差外还会产生附加误差。例如,由于温度超过标准引起的温度附加误差、电源附加误差以及频率附加误差等。这些附加差在使用时应叠加到基本误差上去。

(6)按误差与被测量的关系分类

①定值误差 定值误差指误差对被测量来说是一个定值,不随被测量变化。这类误差

可以是系统误差,也可以是随机误差。

②累积误差 累积误差是指在整个检测系统量程内误差值 Δx 与被测量 x 成比例地变化,即

$$\Delta x = \gamma_e x \quad (1-2-8)$$

式中 γ_e ——为比例常数。

由上式可见, Δx 随 x 的增大而逐步累积,故称之为累积误差。

1.2.2 随机误差

对于随机误差可以采用统计学方法来研究其规律来处理测量数据,以减弱其对测量结果的影响,并估计出其最终残留影响的大小。对于随机误差所作的概率统计处理,是在完全排除了系统误差的前提下进行的。

1. 正态分布

随机误差的分布规律,可以在大量重复测量数据的基础上总结出来,由此得出统计规律。根据多次测量实践的统计分析发现,在正常情况下,随机误差的经验分布曲线大致如图 1-2-1 所示,称之为正态分布曲线,其数学表达式为

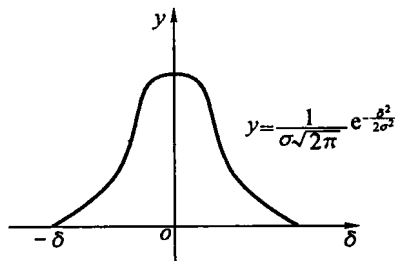


图 1-2-1 正态分布曲线

$$y = f(\delta) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}} \quad (1-2-9)$$

式中 y ——概率密度;

δ ——随机误差;

σ ——均方根误差;

e ——自然对数底数。

随机误差分布规律具有以下特点。

(1)集中性 大量重复测量时所得到的数值均集中分布在其平均值附近,即测量得到的数值 x_i 在平均值 $\bar{x}$ 附近出现的机会最多。 $\bar{x}$ 也称为分布中心,其值可以表示为

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1-2-10)$$

(2)对称性 当测量的次数足够多时,符号相反、绝对值相等的误差出现的机会(或称概率)大致相等,即随机误差的分布具有对称性。

(3)有限性 绝对值很大的误差,出现的机会极少。因此在有限次的测量中,误差绝对值不超过一定的范围,即随机误差的分布存在有限性。

(4)抵偿性 从对称性中可以推论出,当测量次数趋于无穷多时,随机误差的平均值的极限将趋于零,即随机误差具有抵偿性。

2. 随机误差的评价指标

由于随机误差是按正态分布规律出现的,具有统计意义,通常以正态分布曲线的两个参数:算术平均值 $\bar{x}$ 和均方根误差 σ 作为评定指标。

(1)算术平均值

$\bar{x}$ 的真值 A_0 是无法得到的,因此只能从一系列测得的值 x_i 中找一个接近真值 A_0 的数

值作为测量结果,这个值就是算术平均值 $\bar{x}$ 。

假设对某一量作一系列等精度的测量,得到一系列不同的数值 $x_1, x_2, \dots, x_n$, 则这些数值的算术平均值 $\bar{x}$ 定义为

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n} \quad (1-2-11)$$

又由各测量值与真值得随机误差值为 $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n$, 有

$$\begin{cases} \delta_1 = x_1 - A_0 \\ \delta_2 = x_2 - A_0 \\ \vdots \\ \delta_n = x_n - A_0 \end{cases} \quad (1-2-12)$$

即

$$\sum_{i=1}^n \delta_i = \sum_{i=1}^n x_i - nA_0 \quad (1-2-13)$$

由随机误差的对称性规律推出, 当 $n \rightarrow \infty$ 时

$$\sum_{i=1}^n \delta_i \rightarrow 0 \quad (1-2-14)$$

所以

$$\sum_{i=1}^n x_i = nA_0 \quad (1-2-15)$$

即

$$A_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \bar{x} \quad (1-2-16)$$

上式表明, 测量次数无限多时, 所有测量值的算术平均值等于真值。

(2) 均方根误差

由于随机误差的出现是符合正态分布曲线的, 因此它的出现概率就是该曲线下所包围的面积, 因为全部随机误差出现的概率 P 之和为 1, 所以曲线与横轴间所包围的面积应等于 1, 有

$$P = \int_{-\infty}^{+\infty} y d\delta = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}} d\delta \quad (1-2-17)$$

式中 y ——概率密度;
 δ ——随机误差;
 σ ——均方根误差;
 e ——自然对数底数;
 P ——概率。

正态分布曲线是一个指数方程式, 它是随着随机误差 δ 和均方根误差 σ 的变化而变化的。图 1-2-2 表示均方根误差 σ 和正态分布曲线的关系。从图中可以明显地看出 σ 与表示的分布曲线的形状和分散度有关; σ 值越小, 曲线形状越陡, 随机误差的分布越集中, 测量精密度越高; 反之, σ 值

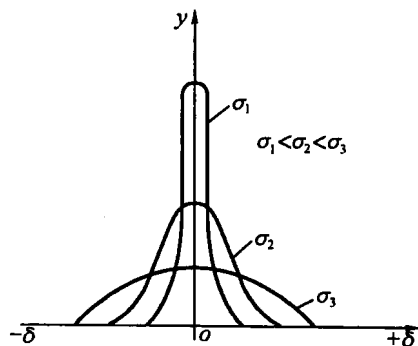


图 1-2-2 三种不同 σ 的正态分布曲线