

自动化专业本科系列教材

Xiandai Jiance Jishu

# 现代检测技术

海 涛 李啸骢 韦善革 陈 苏 等编著



重庆大学出版社

<http://www.cqup.com.cn>

# 现代检测技术

海 涛 李啸骢 韦善革 陈 苏 等编著

重庆大学出版社

## 内 容 提 要

全书共分13章,主要介绍检测原理、误差来源、传感器的数学模型与特性、线性拟合方法,测量电压、电流、频率、相位角、功率因数等参数的常用方法,以及电阻式、电感式、压电式、光电式等传感器的工作原理和应用。针对温度、压力、流量、物位、转速、加速度等各种非电量参数分析和测量方法,特别注重了新知识的融合,包括智能传感器和一些具有实用价值的新技术的介绍。参数检测的各章具有相对独立性,可根据教学课时和不同专业的教学需要选用。

本书可以作为自动化及相关专业本科生和研究生教材,也可作为相关技术人员的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

现代检测技术/海涛等编著. —重庆:重庆大学出版社,2010.8

自动化专业本科系列教材

ISBN 978-7-5624-6289-7

I. ①现… II. ①海… III. ①自动检测—高等学校—教材 IV. ①TP274

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第153484号

## 现代检测技术

海 涛 李啸骢 韦善革 陈 苏 等编著

策划编辑:曾显跃

责任编辑:李定群 高鸿宽 高曼琦 版式设计:曾显跃

责任校对:刘 真 责任印制:赵 晟

\*

重庆大学出版社出版发行

出版人:邓晓益

社址:重庆市沙坪坝正街174号重庆大学(A区)内

邮编:400030

电话:(023) 65102378 65105781

传真:(023) 65103686 65105565

网址:<http://www.cqup.com.cn>

邮箱:fxk@cqup.com.cn(营销中心)

全国新华书店经销

重庆现代彩色书报印务有限公司印刷

\*

开本:787×1092 1/16 印张:20.25 字数:505千

2011年8月第1版 2011年8月第1次印刷

印数:1—3 000

ISBN 978-7-5624-6289-7 定价:39.50元

---

本书如有印刷、装订等质量问题,本社负责调换

版权所有,请勿擅自翻印和用本书

制作各类出版物及配套用书,违者必究

# 前言

当前,我国高等教育正面临新时期的发展需求,培养应用型人才是工科教育的一个重要教学目标。为了满足在应用能力培养实施过程中对教材的同步需求,本书综述了检测技术的主要理论知识和应用技术,简要阐述了检测系统综合设计的原则和方法。

全书共由 13 章组成,内容包括检测技术概论,测量误差、数据处理与信号分析,检测系统的特性,电气参数测量技术,电阻式传感器,电感式传感器,电容式传感器,压电式传感器,光电式传感器,固态图像传感器,红外和辐射式传感器,温度传感器,位移、流量参量的测量。本书针对温度、压力、流量、物位、转速、加速度等各种非电量参数分析和测量方法,特别注重了新知识的融合,包括智能传感器和一些具有实用价值的新技术的介绍。参数检测的各章具有相对独立性,可根据教学课时和不同专业的教学需要选用。

本书作为普通高等教育应用型本科教材编写的,重点突出了知识的应用性。书中许多章节中有面向工程实践的详细举例。为突出对应用能力的培养,书中不仅在误差处理、参数检测、信号变换等内容上注意介绍知识的具体应用,而且在第 4 章中专门讨论了电力参数检测的具体方法,给出了相应的微机化检测系统的设计实例,对课程设计或相关专业的综合性教学有参考价值。本书附有与教材对应的电子课件,该课件获得全国第八届高校理工组优秀奖。本书每章开头有内容提要,结尾有小结和习题,便于教学和自学。

本书的编写工作开始于 2006 年 7 月,由广西大学电气工程学院硕士生导师海涛、广西大学电气工程学院博士生导师李啸骢教授、韦善革、陈苏等编著。参与本书编著工作的还有广西工学院刘瑞琪,广西大学电气工程学院徐辰华、王佳亮、陈快,广西大学行健文理学院孔德宾,广西公安厅交警总队科研所副所长廖炜斌,广西伊灵烟叶复烤有限责任公司华磊等。广西比迪光电科技工程有限责任公司林波对此书的编写提出许多宝贵意见,广西大学海涛负责全书编写和统稿工作。

本书可作为自动化专业的本科教材,也可作为硕士研究生及从事相关工程技术人员参考书。

在本书的编写过程中,丁才文、邵红硕、王钧、陶虎、李昭勇等人为本书的撰写做了很多工作,广西诺斯贝电气有限公司对编撰此书也给予了大力支持和帮助,在此对他们的辛勤工作表示感谢。

由于时间紧迫,编者水平有限,书中谬误之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

2011 年 5 月

# 目 录

|                            |    |
|----------------------------|----|
| 第 1 章 检测技术概论 .....         | 1  |
| 1.1 检测的基本概念 .....          | 1  |
| 1.2 检测系统的定义及其基本功能 .....    | 4  |
| 1.3 检测系统的组成 .....          | 5  |
| 1.4 检测系统的结构形式 .....        | 10 |
| 本章小结 .....                 | 11 |
| 习 题 .....                  | 11 |
| 第 2 章 测量误差、数据处理与信号分析 ..... | 13 |
| 2.1 测量误差的概念和分类 .....       | 13 |
| 2.2 误差的基本性质 .....          | 16 |
| 2.3 测量误差的处理 .....          | 21 |
| 2.4 测量的不确定度 .....          | 29 |
| 2.5 测量数据的处理方法 .....        | 34 |
| 2.6 信号分析与处理 .....          | 36 |
| 本章小结 .....                 | 52 |
| 习 题 .....                  | 53 |
| 第 3 章 检测系统的特性 .....        | 55 |
| 3.1 检测系统的基本要求 .....        | 55 |
| 3.2 检测系统的数学模型 .....        | 56 |
| 3.3 检测系统的静态特性 .....        | 58 |
| 3.4 检测系统的动态特性 .....        | 63 |
| 3.5 检测系统不失真测量的条件 .....     | 72 |
| 本章小结 .....                 | 74 |
| 习 题 .....                  | 74 |

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| <b>第4章 电气参数测量技术</b> .....  | 75  |
| 4.1 电压和电流的测量 .....         | 75  |
| 4.2 阻抗的测量 .....            | 91  |
| 4.3 频率的测量 .....            | 102 |
| 4.4 相位角 $\theta$ 的测量 ..... | 104 |
| 4.5 功率因数角及功率因数的测量 .....    | 106 |
| 本章小结 .....                 | 114 |
| 习 题 .....                  | 114 |
| <b>第5章 电阻式传感器</b> .....    | 115 |
| 5.1 电位器式传感器 .....          | 115 |
| 5.2 弹性敏感元件 .....           | 122 |
| 5.3 电阻应变式传感器 .....         | 131 |
| 本章小结 .....                 | 153 |
| 习 题 .....                  | 154 |
| <b>第6章 电感式传感器</b> .....    | 156 |
| 6.1 自感式传感器 .....           | 156 |
| 6.2 差动变压器 .....            | 169 |
| 6.3 涡流式电感传感器 .....         | 177 |
| 本章小结 .....                 | 185 |
| 习 题 .....                  | 186 |
| <b>第7章 电容式传感器</b> .....    | 188 |
| 7.1 电容式传感器的工作原理及分类 .....   | 188 |
| 7.2 电容式传感器的测量电路 .....      | 195 |
| 7.3 电容式传感器的设计要点 .....      | 201 |
| 7.4 电容式传感器的应用 .....        | 203 |
| 本章小结 .....                 | 206 |
| 习 题 .....                  | 206 |
| <b>第8章 压电式传感器</b> .....    | 208 |
| 8.1 压电效应和压电材料 .....        | 208 |
| 8.2 压电式传感器等效电路和测量电路 .....  | 211 |
| 8.3 压电式传感器的使用 .....        | 214 |
| 8.4 压电式传感器的应用 .....        | 216 |
| 本章小结 .....                 | 218 |
| 习 题 .....                  | 219 |

|                        |     |
|------------------------|-----|
| <b>第9章 光电式传感器</b>      | 220 |
| 9.1 光电效应               | 220 |
| 9.2 常见光电元件(传感器)        | 221 |
| 9.3 光电式传感器及其应用         | 225 |
| 9.4 光纤传感器              | 228 |
| 本章小结                   | 233 |
| 习 题                    | 234 |
| <b>第10章 固态图像传感器</b>    | 235 |
| 10.1 CCD 图像传感器         | 235 |
| 10.2 CCD 图像传感器分类       | 240 |
| 10.3 CCD 的基本特性参数及特点    | 241 |
| 10.4 CCD 的应用实例         | 243 |
| 本章小结                   | 251 |
| 习 题                    | 252 |
| <b>第11章 红外和辐射式传感器</b>  | 253 |
| 11.1 红外辐射传感器           | 253 |
| 11.2 超声波传感器            | 260 |
| 11.3 核辐射传感器            | 266 |
| 本章小结                   | 271 |
| 习 题                    | 272 |
| <b>第12章 温度传感器</b>      | 273 |
| 12.1 有关温度的概述           | 273 |
| 12.2 热膨胀式测温方法          | 275 |
| 12.3 热阻式测温             | 275 |
| 12.4 热电偶测温             | 283 |
| 12.5 新型热电式传感器          | 289 |
| 本章小结                   | 293 |
| 习 题                    | 293 |
| <b>第13章 位移、流量参量的测量</b> | 294 |
| 13.1 感应同步器             | 294 |
| 13.2 光栅传感器             | 298 |
| 13.3 流量的测量             | 303 |
| 本章小结                   | 313 |
| 习 题                    | 313 |
| <b>参考文献</b>            | 314 |

# 第 1 章

## 检测技术概论

检测技术,就是利用各种物理化学效应,选择合适的方法和装置,将生产、科研、生活中的有关信息通过检查与测量的方法赋予定性或定量结果的过程。检测技术对促进企业技术进步、传统工业技术改造和技术装备的现代化有着重要的意义。本章主要介绍测量的基本方法和要求、检测系统的组成和分类等内容。

### 1.1 检测的基本概念

#### 1.1.1 测量与检测

对于每一个物理对象,都包含有一些能表征其特征的定量信息,这些定量信息往往可用一些物理量的量值来表示,测量就是借助于一定的仪器或设备,采用一定的方法和手段,对被测对象获取表征其特征的定量信息的过程,是以确定被测对象的量值为目的的全部操作。测量的实质是将被测量与同种性质的标准单位量进行比较的过程:

$$\text{被测量} \xrightarrow[\text{直接\间接}]{\text{比较}} \text{标准量} \longrightarrow \text{倍数} \times \text{单位} = \text{测量结果}$$

由测量的定义可知,测量过程中必不可少的环节是比较,在大多数情况下,被测量和测量单位不便于直接比较,这时需把被测量和测量单位都变换到某个便于比较的中间量,然后才进行比较。测量过程三要素为测量单位、测量方法和测量装置。

通过测量可以得到被测量的测量值,但是,在有些情况下测量的目标还没有全部达到。为了准确地获取表征对象特性的定量信息,在有些情况下还要对测量数据进行数据处理和误差分析,估计测量结果的可靠程度,等等。

检测则是意义更为广泛的测量——测量 + 信息获取,检测过程包括测量、信息提取、信号转换与传输、存储与显示等过程,检测技术包括测量方法、检测装置和检测信号处理等内容。

#### 1.1.2 测量方法的分类

测量可从不同的角度进行分类,按测量的手段可分为直接测量和间接测量;按测量敏感元

件(传感器)是否与被测介质接触,可分为接触式测量和非接触式测量;按测量的方式,可分为偏差法测量、零位法测量和微差法测量;按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。

### (1) 直接测量

在使用仪表进行测量时,对仪表读数不需要经过任何运算,就能直接表示测量所需要的结果,这种测量方法称为直接测量。直接测量过程简单、迅速,缺点在于测量准确度往往不高。例如,使用米尺测长度,用玻璃管水位计测水位等为直接测量。

### (2) 间接测量

某些被测量的量值不能通过直接测量获取。在对这类被测量进行测量时,首先应对与被测量有确定函数关系的几个量进行直接测量,然后将测量结果代入函数关系式,经过计算得到所需要的结果,这种测量方法称为间接测量。对于未知待测变量  $y$  有确切函数关系的其他变量  $x$  (或  $n$  个变量) 进行直接测量,然后再通过确定的函数关系式  $y=f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , 计算出待测量  $y$ 。间接测量的缺点在于测量过程比较烦琐,所需的时间比较长,且由于需要测量的量较多,引起误差的因素也较多。通过测量导线电阻、长度及直径求电阻率即为间接测量的典型例子。

### (3) 接触式测量

在测量过程中,检测仪表的敏感元件或传感器与被测介质直接接触,感受被测介质的作用,这种测量方法称为接触式测量。典型例子为使用热电偶测量物体温度。接触式测量比较直观、可靠,但传感器会对被测介质引起干扰,造成测量误差,且当被测介质具有腐蚀性等特殊性质时,对传感器的性能会有特殊要求。

### (4) 非接触式测量

在测量过程中,检测仪表的敏感元件或传感器不直接与被测介质接触,而是采用间接方式来感受被测量的作用,这种测量方法称为非接触式测量。典型例子为使用红外测温仪测量物体的温度。非接触式测量在测量时不干扰被测介质,适于对运动对象、腐蚀性介质及在危险场合下的参数测量。

### (5) 偏差法测量

以检测仪表指针相对于刻度起始线(零线)的偏移量(即偏差)的大小来确定被测量值的大小。

在应用这种测量方法时,标准量具没有安装在检测仪表的内部,但是事先已经用标准量具对检测仪表的刻度进行了校准。输入被测量以后,按照检测仪表在刻度标尺上的示值来确定被测量值的大小。偏差法测量过程简单、迅速,但是当偏移量较大时,测量误差也会增大。如图 1.1 所示的使用压力表测量压力就是这类偏差法测量的例子。

由于被测介质压力的作用,使弹簧变形,产生一个弹性反作用力。被测介质压力越高,弹簧反作用力越大,弹簧变形位移越大。当被测介质压力产生的作用力与弹簧变形反作用力相平衡时,活塞达到平衡,这时指针位移在标尺上对应的刻度值,就表示被测介质的压力值。

### (6) 零位法测量

被测量和已知标准量都作用在测量装置的平衡机构上,根据指零机构示值为零来确定测量装置达到平衡,此时被测量的量值就等于已知标准量的量值。在测量过程中,用指零仪表的零位指示来检测测量装置的平衡状态。在应用这种测量方法时,标准量具一般安装在检测装

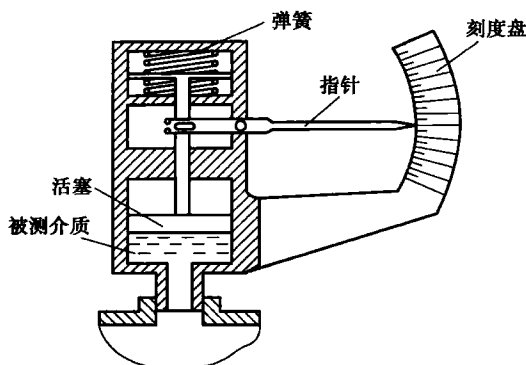


图 1.1 压力表测量原理

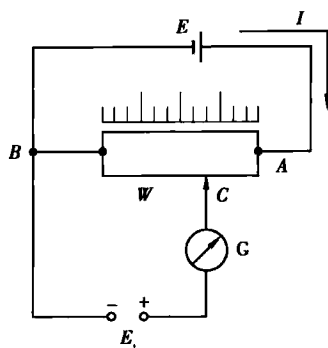


图 1.2 电位差计测量原理

置内部,以便于调整。零位法测量精度较高,但在测量过程中需要调整标准量以达到平衡,耗时较多。零位法在工程参数测量和实验室测量中应用很普遍,如天平称重、电位差计和平衡电桥测毫伏信号或电阻值、零位式活塞压力计测压等。

如图 1.2 所示为电位差计的简化等效电路。图中  $E_i$  为被测电势,滑线电位器  $W$  与稳压电源  $E$  组成一闭合回路,因此流过  $W$  的电流  $I$  是恒定的,这样就可以将  $W$  的标尺刻成电压数值。测量时,调整  $W$  的触点  $C$  的位置,使检流计  $G$  的指针指向零位(即  $U_{CB} = E_i$ ),此时  $C$  所指向的位置即为被测电压  $E_i$  的大小。

### (7) 微差法测量

微差法测量是偏差法测量和零位法测量的组合,用已知标准量的作用去抵消被测量的大部分作用,再用偏差法来测量被测量与已知标准量的差值。微差法测量综合了偏差法测量和零位法测量的优点,由于被测量与已知的标准量之间的差值是比较微小的,因此微差法测量的测量精度高,反应也比较快,比较适合于在线控制参数的检测。

如图 1.3 所示的用不平衡电桥测量电阻就是用微差法测量的例子。图中,  $R_x$  为待测电阻,  $R_2 = R_3 = R_4 = R$  为平衡电阻,则当  $R_x$  与  $R$  很接近时,有  $R_x = R + 4U_o R/U$ 。

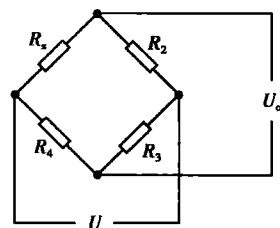


图 1.3 不平衡电桥测电阻原理

### (8) 主动式测量

测量过程中,需从外部辅助能源向被测对象施加能量,这种测量方法称为主动式测量。主动式测量相当于用被测量对一个能量系统的参数进行调制,故又称为调制式测量。主动式测量不破坏被测对象的物理状态,往往可以取得较强的信号,但测量装置的结构一般比较复杂。

### (9) 被动式测量

测量过程中,无须从外部向被测对象施加能量,这种测量方法称为被动式测量。被动式测量所需能量由被测对象提供,被测对象的部分能量转换为测量信号,故又称为转换式测量。被动式测量的测量装置一般比较简单,但对被测对象的物理状态有一定的影响,所取得的信号较弱。

## 1.2 检测系统的定义及其基本功能

### 1.2.1 检测系统的定义

检测的基本任务是获取信息,信息是客观事物的时间、空间特性,是无所不在、无时不存的。为了从海量的信息中提取出有用的部分,以达到观测事物某一内在规律的目的,人们需要通过各种技术手段将所需要了解的那部分信息以容易理解和分析的形式表现出来,这种对信息的表现形式称为“信号”,信号是信息的载体。

检测系统就是由一些部件以一定的方式组合起来,采用一定的方法和手段,以发现与特定信息对应的信号表现形式,并完成在特定环境下进行最佳的信号获取、变换、处理、存储、传输、显示记录等任务的全套检测装置的总体,它是检测装置的有机组合。

### 1.2.2 检测系统的基本功能

各种类型的检测系统,尽管它们的被测对象及参数、工作原理和结构千差万别,但它们在完成检测任务时所必备的基本功能是相同的。检测系统的基本功能有检出变换、信号选择、运算比较、数据处理及结果显示等。

#### (1) 检出变换

检出变换是检测系统最基本的功能之一,是检测技术的核心,它是指把某一个物理量按一定的规律变换成便于被后一个环节接受和处理的另一个物理量的过程,检出变换通常是基于某种物理的、化学的或生物的效应来进行的,要求得到的测量信号  $y$  与被测量  $x$  之间有确定的关系。最简单也是最理想的变换规律是线性变换,即变换后的量  $y$  与变换前的量  $x$  呈线性关系,也即  $y = kx$ ,  $k$  为常数,称为变换系数。

#### (2) 信号选择

信号选择功能是指检测系统仅对被测量  $x$  有响应,而对干扰量的影响有抑制作用。实际的检测系统中,除了被测量  $x$  外,还有许多其他的影响量,它们以不同程度影响输出信号  $y$ ,这些影响量称为干扰量。为了保证输出信号  $y$  与被测量  $x$  之间有一一对应的单值函数关系,检测系统必须具有信号选择功能。

#### (3) 运算比较

比较功能也是检测系统最基本的功能之一。在任何一个检测系统中,代表被测量的作用一定要与代表标准量的反作用进行比较,通过比较才能得到被测量的数值。现代的检测系统往往还具有极强的运算功能,在比较前或比较后对信号进行各种运算。

#### (4) 数据处理

检测系统通常还应能按照一定的规则和方法对测量数据进行分析、加工和处理,以便从大量的、可能是杂乱无章的、难以理解的数据中将测量数据所代表的被测系统的运行规律和特点提炼出来。

#### (5) 测量结果显示

结果显示功能是检测系统实现人机联系的一种手段,即把测量结果用便于人们观察的形

式表示出来。通常人们都希望及时知道被测参量的瞬时值、累积值或其随时间的变化情况,因此,各类检测仪表和检测系统在信号处理器计算出被测参量的当前值后通常均需送至各自的显示器进行实时显示。显示器是检测系统与人联系的主要环节之一。

### 1.3 检测系统的组成

一般说来,检测系统由传感器、信号调理电路、信号处理和显示记录装置等部分组成,如图1.4所示。

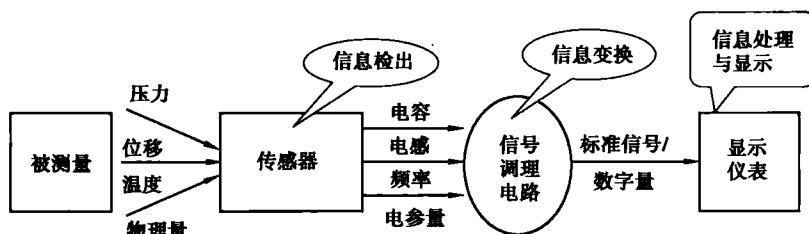


图 1.4 检测系统的组成结构图

#### 1.3.1 传感器

##### (1) 定义

传感器是检测系统与被测对象直接发生联系的器件或装置。它的作用是将被测物理量（如压力、温度、流量等非电量）检出并转换为一个相应的便于传递的输出信号（通常为电参量），变送器将这些电参量转换成标准信号/数字量后送到显示仪表中进行分析（提取特征参数、频谱分析、相关分析等）、处理和显示等。例如，半导体应变片式传感器能把被测对象受力后的微小变形感受出来，通过一定的桥路转换成相应的电压信号输出。

传感器是一种检测装置，能感受到被测量的信息，并能将检测感受到的信息，按一定规律变换成为电信号或其他所需形式的信息输出，以满足信息的传输、处理、存储、显示、记录和控制等要求。它是实现自动检测和自动控制的首要环节。

人们为了从外界获取信息，必须借助于感觉器官，而单靠人们自身的感觉器官，在研究自然现象和规律以及生产活动中它们的功能就远远不够了。为适应这种情况，就需要传感器。因此，传感器是人类五官的延长，又称为电五官。传感器的功能是将被测对象的信息转化为便于处理的信号。传感器的被测量包括电量和非电量，在此偏重于非电量。传感器的输出为可用信号。所谓可用信号，是指便于显示、记录、处理、控制和可远距离传输的信号，往往是一些电信号（如电压、电流、频率等）。

##### (2) 作用

新技术革命的到来，世界开始进入信息时代。在利用信息的过程中，首先要解决的就是要获取准确可靠的信息，而传感器是获取自然和生产领域中信息的主要途径与手段。在现代工业生产尤其是自动化生产过程中，要用各种传感器来监视和控制生产过程中的各个参数，使设备工作在正常状态或最佳状态，并使产品达到最好的质量。因此，没有众多的优良的传感器，

现代化生产也就失去了基础。

传感器早已渗透到诸如工业生产、宇宙开发、海洋探测、环境保护、资源调查、医学诊断、生物工程,甚至文物保护等极其广泛的领域。可以毫不夸张地说,从茫茫的太空,到浩瀚的海洋,以至各种复杂的工程系统,几乎每一个现代化项目,都离不开各种各样的传感器。由此可知,传感器技术在发展经济、推动社会进步方面的重要作用,是十分明显的。

### (3) 特点

知识密集度高、边缘学科色彩极浓。由于传感技术是以材料的电、磁、光、声、热、力等功能效应和形态变换原理为基础,并综合了物理学、化学、生物学、微电子学、材料科学、机械原理、误差理论等多方面的基础理论和技术而形成的一门学科,因此,在传感技术中多种学科交错应用,知识密集程度高,与许多基础学科和应用学科都有着密切的关系,是一门边缘学科色彩极浓的技术学科。

内容广泛,知识点分散。传感器是基于各种物理、化学、生物的原理、规律或效应将被测量转换为信号的,这些原理、效应和规律不仅为数众多,而且它们往往彼此独立,甚至完全不相干。因此,传感器所涉及的内容极为广泛,而知识点分散。

技术复杂、工艺要求高。传感器的开发、设计与制造涉及了许多高新技术,如集成电路技术、薄膜技术、超导技术、微机械加工等。在应用过程中,要求传感器具有良好的选择性和抗干扰能力,这就对传感器的材料及材料处理、制造及加工等方面都提出了较高的要求。因此,传感器的技术复杂,制造工艺难度大,要求高。

### (4) 组成和分类

传感器的基本功能是检测信号和信号转换。传感器总是处于测试系统的最前端,用来获取检测信息,其性能将直接影响整个测试系统,对测量精确度起着决定性作用。传感器一般由敏感元件、转换元件和基本转换电路3部分组成,如图1.5所示。

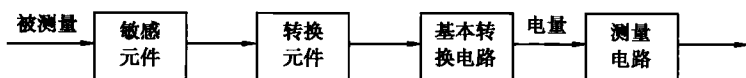


图 1.5 传感器组成框图

①敏感元件:又称为检测元件,其作用为直接感受被测量,并以确定关系输出某一物理量。如弹性敏感元件将力转换为位移或应变输出。

②转换元件:将敏感元件的输出非电物理量(如位移、应变、光强等)转换成电路参数(如电阻、电感等)或电量。

③基本转换电路:将电路参数转换成便于测量的电量,如电压、电流、频率等。

传感器有多种分类方法,可按测量原理、被测量、信号转换机理、构成原理、能量传递方式,输出信号形式等来分类。

#### 1) 按测量原理分类

传感器是基于物理、化学、生物等学科的某种原理、规律或效应将被测量转换为信号,通常可按其测量原理分为应变式、压电式、电感式、电容式及光电式等。

#### 2) 按被测量分类

按被测量分为位移传感器、力传感器、加速度传感器、温度传感器等。这种分类方法阐明了传感器的用途,这对传感器的选用来说是很方便的,但是将不同测量原理的传感器归为一

类,这对掌握传感器的基本原理是不利的。

### 3) 按信号转换机理分类

传感器可分为物理型传感器、化学型传感器、生物型传感器。物理型传感器的信号转换机理是基于某些物理效应和物理定律。化学型传感器的信号转换机理是基于某些化学反应和化学定律。生物型传感器的信号转换机理是基于某些生物活性物质的特性。物理型传感器利用检测元件材料的物理特性或化学特性的变化,将被测量转换为信号。

### 4) 按能源分类

传感器分为有源传感器(如热电式传感器和压电式传感器)和无源传感器(如电阻式、电感式传感器等)。

### 5) 按输出信号形式分类

传感器可分为模拟式传感器和数字式传感器。模拟式传感器的输出信号为电压、电流、电阻、电容、电感等模拟量。数字式传感器的输出信号为数字量或频率量。

### 6) 按能量传递方式分类

传感器可分为能量转换型传感器和能量控制型传感器。能量转换型传感器又称为有源传感器,它无须外加能源,从被测对象获取信息能量,并将信息能量直接转换为输出信号。能量控制型传感器又称为无源传感器,它需外部辅助能源(电源)供给能量,从被测对象获取的信息能量用来控制或调制辅助能源,将辅助能源的部分能量加载信息而形成输出信号。

## (5) 结构形式

### 1) 简单结构

简单结构的传感器仅由敏感元件(检测元件)构成。在这种结构中,检测元件有易于传输的并足够强的信号输出。此类传感器的典型例子如热电偶,只有检测元件,直接感受被测温度并输出电动势。此外,有些简单结构传感器由敏感元件和转换元件组成,无须基本转换电路,如压电式加速度传感器,通过质量弹簧惯性系统将加速度转换成力,作用在压电元件上产生电荷。

### 2) 电参量结构

电参量结构传感器由敏感元件、检测元件和转换电路构成。敏感元件和检测元件将被测量转换成电阻、电容、电感等电参量,再通过转换电路将电参量转换为易于传输的电压、电流信号输出。典型的如电容式位移传感器。

### 3) 多级转换结构

有些传感器,转换元件不止一个,要经过若干次转换才能输出电量。多级转换结构的传感器由检测元件、转换元件和转换电路构成,如图 1.6 所示。检测元件的输出通过转换元件转换成中间参量,再通过转换电路将中间参量转换为易于传输的信号输出。

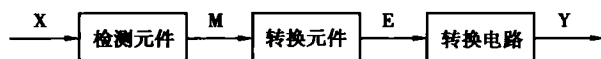


图 1.6 多级转换结构框图

### 4) 补偿结构

补偿结构的传感器如图 1.7 所示,由两个检测元件 A、B 组成。其中, A 的输入为被测量  $x = X + \Delta x$  (其中  $X$  为被测量的设定值,  $\Delta x$  为被测量的变化值), 以及环境干扰量  $u = U + \Delta u$ ;

$B$  的输入为被测量的设定值  $X$  以及环境干扰量  $U + \Delta u$ 。

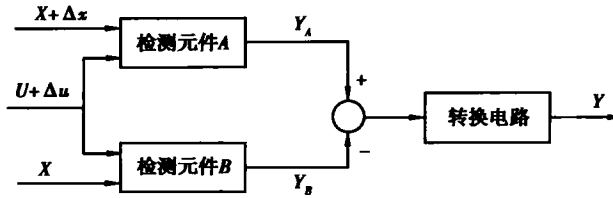


图 1.7 传感器的补偿结构

假设两个检测元件的输入输出之间的函数关系为  $Y_A = f_A(x, u)$ ,  $Y_B = f_B(x, u)$ , 其中,  $f_A$  和  $f_B$  为非线性函数, 且在被测量和干扰量的变化范围  $\Delta x$ 、 $\Delta u$  内, 两检测元件的特性相同, 即有  $f_A(x, u) = f_B(x, u) = f(x, u)$ 。

当被测量  $x$  和干扰量  $u$  分别在某一范围内变化, 即  $x = X + \Delta x$ ,  $u = U + \Delta u$  时, 有

$$Y_A = f(X + \Delta x, U + \Delta u) \quad (1.1)$$

$$Y_B = f(X, U + \Delta u) \quad (1.2)$$

使用泰勒级数式对式(1.1)和式(1.2)进行展开并略去 3 次及以上非线性项, 得

$$Y_A = f(X, U) + \frac{\partial f(X, U)}{\partial x} \cdot \Delta x + \frac{\partial f(X, U)}{\partial u} \Delta u + \frac{1}{2} \left[ \frac{\partial^2 f(X, U)}{\partial x^2} \cdot (\Delta x)^2 + 2 \frac{\partial^2 f(X, U)}{\partial x \partial u} \cdot \Delta x \Delta u + \frac{\partial^2 f(X, U)}{\partial u^2} \cdot \Delta u^2 \right] \quad (1.3)$$

$$Y_B = f(X, U) + \frac{\partial f(X, U)}{\partial u} \Delta u + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f(X, U)}{\partial u^2} \cdot \Delta u^2 \quad (1.4)$$

由式(1.3)和式(1.4)可得传感器的输出为

$$Y = Y_A - Y_B = \frac{\partial f}{\partial x} \Delta x + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} (\Delta x)^2 + \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial u} \cdot \Delta x \Delta u \quad (1.5)$$

对比式(1.1)和式(1.5)可知, 补偿结构可以大大减小环境干扰量的影响(式(1.1)中的  $\Delta u$  项消失了), 即在一定程度上实现对环境干扰量影响的补偿, 但补偿结构对干扰量影响的补偿不一定是完全的(仍剩下  $\Delta u$  的二次项), 且非线性项( $\Delta x$  的平方项)没有被克服。

### 5) 差动结构

差动结构的传感器如图 1.8 所示, 与补偿结构所不同的是, 将被测量  $x$  的变化量  $\Delta x$  取反后输入到检测元件 B。差动结构的特点不仅是能够减少干扰量  $\Delta u$  的影响, 还能提高测量灵敏度和减小非线性度。

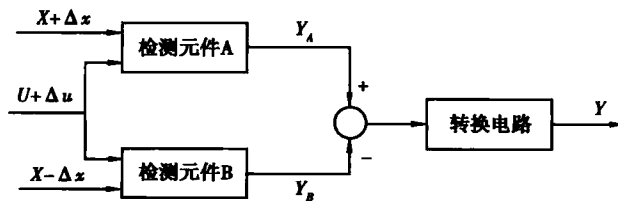


图 1.8 传感器的差动结构

当被测量的变化量为  $\Delta x$ , 干扰量的变化量为  $\Delta u$  时, 传感器的输出为

$$Y = Y_A - Y_B = 2 \frac{\partial f}{\partial x} \Delta x + 2 \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial u} (\Delta x, \Delta u) \quad (1.6)$$

对比式(1.5)和式(1.6)可知,差动结构不仅可大大减小环境干扰量的影响,而且还可以提高传感器的灵敏度和线性度(输出信号幅值增加了1倍,且式(1.5)中 $\Delta x$ 的平方项消失)。

### 1.3.2 信号调理

在检测系统中,通常需要将传感器检测到的信号转换成标准信号以进行传输,当传感器的输出为单元组合仪表中规定的标准信号时称为变送器。信号调理电路在检测系统中的作用就是,通过对传感器输出的微弱信号进行检波、转换、滤波、放大等处理后变换为方便检测系统后续环节处理或显示的标准信号。常见的标准信号如图1.9所示。

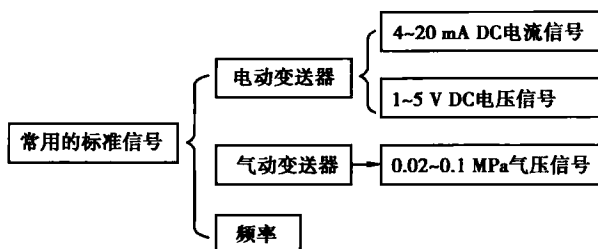


图 1.9 常见标准信号的分类

变送器种类很多,总体来说就是由变送器发出一种信号来给二次仪表使二次仪表显示测量数据,将物理测量信号或普通电信号转换为标准电信号输出或能够以通信协议方式输出的设备。它一般分为温度/湿度变送器、压力变送器、差压变送器、液位变送器、电流变送器、电量变送器、流量变送器及重量变送器等。对信号调理电路的一般要求是,能准确转换、稳定地转换、传输信号,且具有较强的抗干扰能力。

### 1.3.3 信号处理

对于经信号调理后的信号,现代检测系统通常使用各类模/数(A/D)转换器进行采样、编码等离散化处理转换成与模拟信号相对应的数字信号,并传递给单片机、工业控制计算机、PLC(可编程逻辑控制器)、DSP、嵌入式微处理器等数字信号处理模块,进行特征提取、频谱分析、相关运算等信号处理与分析。

由于大规模集成电路技术的迅速发展和数字信号处理芯片的价格不断降低,数字信号处理模块相对于模拟式信号处理模块具有明显的性价比优势,因此,在现代检测系统的信号处理环节都应尽量考虑选用数字信号处理模块,从而使所设计的检测系统获得更高的性能价格比。

### 1.3.4 显示仪表

显示仪表是一种能接受检测元件或传感器、变送器送来的信号,以一定的形式显示测量结果的装置。显示仪表由信号调理环节和显示器构成,并在结构上构成一个整体。有一些显示仪表仅由显示器构成。

显示仪表按照其显示结果的形式,可分为模拟式显示仪表、数字式显示仪表和图像式显示仪表3种类型。