

校企(行业)合作  
系列教材

CHUANGANQI  
YU JIANCE JISHU

# 传感器 与检测技术

郑志霞 张琴 陈雪娇 ◎编著



厦门大学出版社 国家一级出版社  
XIAMEN UNIVERSITY PRESS 全国百佳图书出版单位



校企(行业)合作  
系列教材



# 传感器与检测技术

郑志霞 张 琴 陈雪娇 © 编著



厦门大学出版社  
XIAMEN UNIVERSITY PRESS

国家一级出版社  
全国百佳图书出版单位

## 图书在版编目(CIP)数据

传感器与检测技术/郑志霞,张琴,陈雪娇编著. —厦门:厦门大学出版社,2018.12  
校企(行业)合作系列教材  
ISBN 978-7-5615-7135-4

I. ①传… II. ①郑…②张…③陈… III. ①传感器—检测—教材 IV. ①TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 268565 号

---

**出版人** 郑文礼  
**策划编辑** 张佐群  
**责任编辑** 郑丹  
**封面设计** 蒋卓群  
**技术编辑** 许克华

---

**出版发行** 厦门大学出版社  
**社址** 厦门市软件园二期望海路 39 号  
**邮政编码** 361008  
**总编办** 0592-2182177 0592-2181406(传真)  
**营销中心** 0592-2184458 0592-2181365  
**网址** <http://www.xmupress.com>  
**邮箱** [xmupress@126.com](mailto:xmupress@126.com)  
**印刷** 三明市华光印务有限公司

---

**开本** 787 mm×1 092 mm 1/16  
**印张** 11.75  
**插页** 1  
**字数** 302 千字  
**版次** 2018 年 12 月第 1 版  
**印次** 2018 年 12 月第 1 次印刷  
**定价** 39.00 元

---

本书如有印装质量问题请直接寄承印厂调换



厦门大学出版社  
微信二维码



厦门大学出版社  
微博二维码

# 前 言

“传感器与检测技术”是电子类专业的重要专业基础课程,同时也是一门实践性非常强的课程。现有的传感器与检测技术类教材过于强调知识的完整性,理论性偏强。本书主要针对工科专业的需要,并结合编者多年的教学实践经验与校企合作案例,适合作为测控技术与仪器、电气工程及其自动化等专业的专业基础课教材。建议学时48课时左右,可根据不同专业的实际需要适当调整。

全书以传感器在工业控制中的应用为主线,遵循理论够用为度、突出应用性的编写原则。本书共分12章,包括4个知识模块:第1章为基础知识模块;第2~9章为传统传感技术模块;第10~11章为医学传感器应用模块;第12章为传感器实验指导模块。另外,每章后面均安排了一定的思考题,用以检验学生灵活运用所学理论知识的能力,促进学生充分发挥主观能动性,调动学习积极性。为加强对学生动手能力的培养,教学单位应配合进行专门的实训教学,使学生学会对各种传感器的选用和检测系统的集成。

本书在编写过程中结合企业产品,充分考虑了各工科专业的不同需求,根据教学实际需要精选教材内容。本书内容的选取充分考虑到我国目前工业生产中检测与控制的要求及其传感器的最新应用情况,以被测信号的获取、传输处理为核心,从最基本的概念分析入手,理论分析简洁透彻,深入浅出,内容精练,重点突出传感器的应用情况分析,知识面宽,应用性强。

本书的成功出版是校企合作的一个重要成果。参与本书编写的企业有锐马(福建)电气制造有限公司、浙江求是科技有限公司和浙江天煌有限公司。书中介绍了本书编者与锐马(福建)电气制造有限公司共同研发的荷重传感器,包括S型传感器、悬臂梁传感器、桥式传感器等。在教学过程中,使用了编者与浙江求是科技有限公司和浙江天煌有限公司合作研发的CSY910系列和CSY998系列传感器实验箱开展实验教学。

本书由莆田学院机电工程学院的郑志霞任主编,其负责第1~5章的编写及全书的统稿工作;张琴负责第6~9章和第12章的编写;陈雪娇编写了第10、11章的内容。在本书的编纂过程中,得到了校内外广大同行的大力支持和批评指正,在此向他们表示衷心的感谢。

由于时间仓促,加上编者水平有限,书中难免存在一些问题和不足,欢迎广大读者批评指正。

编 者

2018年7月

# 目 录

<b>第 1 章 传感器与检测技术基本理论</b> .....	1
1.1 传感器简述 .....	1
1.1.1 传感器的作用与定义 .....	1
1.1.2 传感器的组成与分类 .....	2
1.2 传感器的基本特性 .....	4
1.2.1 传感器的静态特性 .....	4
1.2.2 传感器的动态特性 .....	7
思考题 .....	9
<b>第 2 章 检测技术概述</b> .....	10
2.1 测量的定义和测量误差 .....	10
2.1.1 测量的定义及方法 .....	10
2.1.2 测量系统的组成 .....	12
2.1.3 测量误差 .....	13
2.1.4 测量误差的估计和处理 .....	16
2.2 我国传感器行业发展现状与方向 .....	21
思考题 .....	23
<b>第 3 章 电阻应变式传感器</b> .....	24
3.1 电阻应变片工作原理 .....	24
3.1.1 金属电阻应变片工作原理 .....	24
3.1.2 半导体电阻应变片工作原理 .....	25
3.2 电阻应变片的结构、材料与粘贴 .....	26
3.2.1 金属电阻应变片的结构 .....	26
3.2.2 金属电阻应变片材料 .....	28
3.2.3 金属电阻应变片的粘贴 .....	29
3.3 电阻应变片的特性 .....	29
3.3.1 弹性敏感元件基本特性 .....	29
3.3.2 电阻应变片的静态特性 .....	30

3.3.3	电阻应变片的温度误差及补偿 .....	31
3.4	电阻应变片的测量电路 .....	34
3.4.1	直流电桥 .....	34
3.4.2	交流电桥 .....	36
3.5	应变式力传感器应用举例 .....	38
3.5.1	应变式测力传感器 .....	38
3.5.2	应变式压力传感器 .....	40
3.5.3	应变式加速度传感器 .....	40
3.6	应变式荷重传感器企业范例 .....	41
3.6.1	应变式荷重传感器发展历史 .....	41
3.6.2	锐马(福建)电气制造有限公司荷重传感器产品 .....	42
3.6.3	荷重传感器的材料选择 .....	43
3.6.4	弹性体结构设计 .....	44
3.6.5	测量电路 .....	44
	思考题 .....	45
<b>第4章</b>	<b>电感式传感器</b> .....	<b>46</b>
4.1	自感式电感传感器 .....	46
4.1.1	工作原理 .....	46
4.1.2	类型及特性 .....	47
4.1.3	测量电路 .....	50
4.1.4	零点残余电压 .....	53
4.1.5	自感式传感器的应用 .....	53
4.2	差动变压器式传感器 .....	54
4.2.1	工作原理 .....	54
4.2.2	基本特性 .....	55
4.2.3	测量电路 .....	56
4.2.4	零点残余电压的补偿 .....	57
4.2.5	应用举例 .....	58
4.3	电涡流式传感器 .....	59
4.3.1	工作原理 .....	59
4.3.2	基本特性 .....	59
4.3.3	电涡流形成范围 .....	61
4.3.4	测量电路 .....	62
4.3.5	应用举例 .....	63
	思考题 .....	64
<b>第5章</b>	<b>电容式传感器</b> .....	<b>66</b>
5.1	电容式传感器的工作原理和结构 .....	66
5.1.1	变极板间距型电容式传感器 .....	66

5.1.2	变相对面积型电容式传感器 .....	67
5.1.3	变介质型电容式传感器 .....	68
5.2	电容式传感器的灵敏度及非线性 .....	70
5.3	电容式传感器的等效电路 .....	71
5.4	电容式传感器的测量电路 .....	72
5.4.1	调频电路 .....	72
5.4.2	调幅电路 .....	73
5.4.3	运算放大器式电路 .....	74
5.4.4	二极管双 T 形交流电桥 .....	75
5.5	电容式传感器的应用 .....	76
5.5.1	电容式压力传感器 .....	76
5.5.2	电容式加速度传感器 .....	76
	思考题 .....	77
<b>第 6 章</b>	<b>压电式传感器 .....</b>	<b>78</b>
6.1	压电效应及压电材料 .....	78
6.1.1	压电效应 .....	78
6.1.2	石英晶体 .....	78
6.1.3	压电陶瓷 .....	80
6.1.4	压电材料的分类与性能参数 .....	82
6.2	压电式传感器测量电路 .....	83
6.2.1	压电式传感器的测量特点 .....	83
6.2.2	压电式传感器的测量电路 .....	84
6.3	压电式传感器的应用 .....	88
6.3.1	压电式加速度传感器 .....	88
6.3.2	压电式测力传感器 .....	89
6.3.3	PVDF 压电薄膜 .....	89
	思考题 .....	90
<b>第 7 章</b>	<b>磁电式传感器 .....</b>	<b>91</b>
7.1	磁电感应式传感器 .....	91
7.1.1	工作原理 .....	91
7.1.2	结构 .....	91
7.1.3	特性 .....	93
7.1.4	测量电路 .....	95
7.1.5	应用举例 .....	95
7.2	霍尔式传感器 .....	96
7.2.1	霍尔效应 .....	97
7.2.2	霍尔元件 .....	98
7.2.3	测量电路 .....	100
7.2.4	应用举例 .....	101
	思考题 .....	102

<b>第 8 章 光电式传感器</b> .....	103
8.1 光电效应 .....	103
8.1.1 外光电效应 .....	103
8.1.2 内光电效应 .....	104
8.2 光电器件 .....	104
8.2.1 外光电效应型光电器件 .....	104
8.2.2 内光电效应型光电器件 .....	106
8.3 CCD 图像传感器 .....	114
8.3.1 CCD 基本结构和工作原理 .....	114
8.3.2 CCD 图像传感器的分类 .....	117
8.3.3 应用举例 .....	118
思考题 .....	119
<b>第 9 章 传感器在工程检测中的应用</b> .....	120
9.1 温度测量 .....	120
9.1.1 热电阻测量温度 .....	120
9.1.2 数字型集成温度传感器 .....	124
9.1.3 热电偶 .....	125
9.2 压力测量 .....	133
9.2.1 压力的分类及对应的传感器 .....	133
9.2.2 压力传感器简介 .....	134
9.2.3 差动电容式压力传感器的工作原理与结构 .....	136
9.2.4 压力表的安装与选型 .....	136
9.2.5 压力表的校验 .....	138
9.2.6 压力变送器 .....	139
9.2.7 智能压力变送器的应用 .....	140
9.3 流量测量 .....	142
9.3.1 流量测量的基本概念 .....	142
9.3.2 流量测量的方法和分类 .....	142
9.3.3 电磁流量计 .....	143
9.3.4 多叶片转子涡轮流量计 .....	144
9.3.5 卡门涡街流量计 .....	144
9.4 振动测量 .....	145
9.4.1 振动的基本概念 .....	145
9.4.2 绝对式和相对式测振传感器 .....	145
9.4.3 压电式振动加速度传感器 .....	146
9.4.4 汽车发动机爆震检测 .....	147
<b>第 10 章 生物医学传感器技术概述</b> .....	148
10.1 生物医学信息的类别 .....	148
10.2 生物医学传感器的作用 .....	149
10.3 生物医学传感器的分类 .....	149

10.4	生物医学传感器的特点和要求 .....	150
10.4.1	生物医学传感器的特点 .....	150
10.4.2	生物医学传感器的要求 .....	151
10.5	生物医学传感器发展概述 .....	151
10.5.1	发展现状 .....	151
10.5.2	发展趋势 .....	152
<b>第 11 章</b>	<b>传感器在生物医学中的应用 .....</b>	<b>153</b>
11.1	电阻式传感器的应用 .....	153
11.1.1	眼内压的测量 .....	153
11.1.2	血压的测量 .....	155
11.2	电感式传感器的应用 .....	156
11.3	电容式传感器的应用 .....	157
11.3.1	电容式微音器 .....	158
11.3.2	电容式心输出量计 .....	158
11.3.3	助听器 .....	159
11.4	压电式传感器的医学应用 .....	160
11.4.1	血压测量传感器 .....	160
11.4.2	压电式微震颤传感器 .....	161
11.4.3	压电薄膜 .....	162
11.5	磁电式传感器的应用 .....	163
11.5.1	电磁血液流量计 .....	163
11.6	光电式传感器的应用 .....	164
11.6.1	光电式脉搏检测 .....	164
11.6.2	光电法测血氧饱和度 .....	165
<b>第 12 章</b>	<b>传感器实验 .....</b>	<b>167</b>
12.1	CSY998 型传感器与检测技术实验台简介 .....	167
12.1.1	CSY 传感器实验仪简介 .....	167
12.1.2	主要技术参数、性能及说明 .....	167
12.1.3	注意事项 .....	170
12.2	传感器实验内容 .....	170
12.2.1	金属箔式应变片性能——单臂电桥 .....	170
12.2.2	金属箔式应变片:单臂、半桥、全桥比较 .....	171
12.2.3	差动变压器性能 .....	173
12.2.4	电涡流式传感器性能 .....	174
12.2.5	差动变面积式电容传感器实验 .....	175
12.2.6	霍尔式传感器的特性——直流激励 .....	176
12.2.7	光纤位移传感器的特性及应用 .....	177
<b>参考文献</b>	<b>.....</b>	<b>180</b>

# 第1章 传感器与检测技术基本理论

## 1.1 传感器简述

### 1.1.1 传感器的作用与定义

#### 1. 传感器的作用

人类已进入信息化时代,信息通过传感技术获取,是信息化时代的重要内容之一。传感技术的水平直接影响检测控制系统和信息系统的技术水平,是一个国家科技发展水平的重要标志。传感器作为各种信息感知、采集、转换、传输和处理的功能器件,已成为自动检测、自动控制系统、物联网等应用领域不可缺少的核心部件。传感器技术正深刻影响着国民经济和国防建设的各个领域。

近年来,国内外都将传感器技术列为尖端技术而倍加重视,并投入大量人力、物力进行开发和研究。伴随着电子技术的发展,传感器已从单一的物性型向多功能、高精度、高质量、集成化方向发展。其应用领域也在不断扩大,已广泛应用于航空航天、军事工程、汽车工业、工业自动化、海洋探测、环境监测、医疗卫生等领域。

例如在工业生产过程中,必须对温度、压力、流量、液位和气体成分等参数进行检测,从而实现对工作状态的监控。诊断生产设备的各种情况,使生产系统处于最佳状态;从而保证产品质量,提高效益。目前传感器与微机、通信等的结合渗透,使工业监测自动化更具有准确、效率高等优点。如果没有传感器,现代工业生产程度将会大大降低。

又如,随着人们生活水平的提高,汽车已逐渐走进千家万户。汽车的安全舒适、低污染、高燃率越来越受到社会重视。而传感器在汽车中相当于感官,它们能准确地采集汽车工作状态的信息,提高汽车的自动化程度。汽车传感器主要分布在发动机控制系统、底盘控制系统和车身控制系统。普通汽车上大约装有10~20只传感器,而有的高级豪华车使用的传感器多达300个。因此传感器作为汽车电控系统的关键部件,将直接影响汽车技术性能的发

传感器技术是现代科技的前沿技术,许多国家已将传感器技术列于与通信技术和计算机技术同等重要的位置,称之为信息技术的三大支柱之一。目前,敏感元器件与传感器在工业部门的应用普及率已被作为衡量一个国家智能化、数字化、网络化的重要标志。可见,应用、研究与开发传感器与传感器技术是信息时代的必然要求。

#### 2. 传感器的定义

国家标准《传感器通用术语》(GB/T 7665-2005)对传感器下的定义是:“能感受被测量并按照一定的规律转换成可用输出信号的器件或装置,通常由敏感元件和转换元件组成。”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。

“可用输出信号”是指便于处理、传输的信号,其中,电信号属于最易于处理和传输的。因此,还可以把传感器定义为“能把外界非电信息转换成电信号输出的器件或装置”,或“能把非电量转换为电量的器件或装置”,简单地说,就是非电量电测技术。

传感器的定义包括以下四个方面的含义:

- (1)传感器是测量器件或测量装置的一部分,能完成信号获取;
- (2)它的输入量是某一被测量,可能是化学量、物理量、生物量等;
- (3)它的输出量是某种物理量,该物理量要便于传输、转换、处理、显示等,其主要是电量;
- (4)输出与输入有对应关系,且应有一定的精度。

传感器曾出现过多种名称,如发送器、变送器、传送器、换能器等,它们的内涵相同或相似,所以近来逐渐趋于统一使用“传感器”这一名称。但市面上仍有些产品沿用变送器、换能器等传统名称。

### 1.1.2 传感器的组成与分类

#### 1. 传感器的组成

传感器的种类繁多,其工作原理、性能特点和应用领域各不相同,所以结构、组成差异很大。但总的来说,传感器通常由敏感元件、转换元件及测量电路三部分组成,有时还要加上辅助电源,如图 1-1 所示。

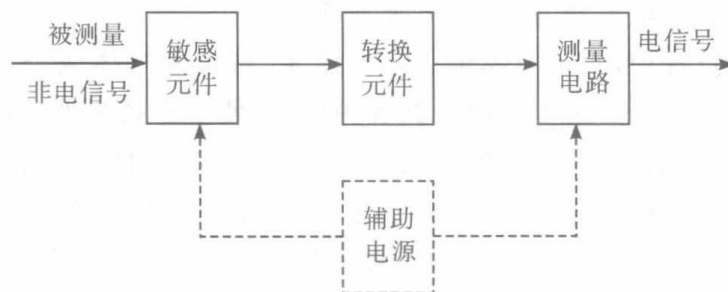


图 1-1 传感器组成框图

#### (1)敏感元件。

敏感元件是指传感器中能直接感受被测量的变化,并输出与被测量成确定关系的某一物理量的元件。敏感元件是传感器的核心,也是研究、设计和制作传感器的关键。

#### (2)转换元件。

转换元件是指传感器中能将敏感元件输出的物理量转换成适于传输或测量的电信号的部分。需要指出的是,并不是所有的传感器都能明显地区分为敏感元件和转换元件两部分,有的传感器的转换元件不止一个,需要经过若干次的转换,有的则是二者合二为一。最简单的传感器可由一个敏感元件(兼转换元件)组成,它感受被测量时直接输出电量,如热电偶等。

#### (3)测量电路。

测量电路又称转换电路或信号调理电路,它的作用是将转换元件输出的电信号进行进

一步的转换和处理,如放大、滤波、线性化、补偿等,以获得更好的品质特性,便于后续电路实现显示、记录、处理及控制等功能。测量电路的类型视传感器的工作原理和转换元件的类型而定,一般有电桥电路、阻抗变换电路、振荡电路等。

## 2. 传感器的分类

传感器是知识密集、技术密集的器件或装置,它与许多学科有关,其种类繁多。通常,在实际应用中,一种传感器可以检测多种参数,一种参数又可以用多种传感器测量,所以传感器的分类方法也很多。常用的分类方法有以下几种:

### (1) 按测量的工作原理分类。

这是传感器最常见的分类方法,这种分类方法将物理、化学、生物等学科的原理、规律和效应作为分类的依据,有利于对传感器工作原理的阐述和对传感器的深入研究与分析。本书主要就是按这一分类方法介绍各种类型的传感器。按照传感器工作原理的不同,传感器可分为电阻式、电感式和电容式传感器,压变式传感器,光电式传感器,温度式传感器,磁电式传感器,光纤式传感器,波式传感器等。

### (2) 按被测参数分类。

按被测参数的性质进行分类,有利于准确表达传感器的用途,对人们系统地使用传感器很有帮助。为更加直观、清晰地表述各类传感器的用途,将种类繁多的被测量分为基本被测量和派生被测量,对于各派生被测量的测量亦可通过对基本被测量的测量来实现。

按被测量的不同可以分为:温度传感器、湿度传感器、压力传感器、位移传感器、流量传感器、液位传感器、力传感器、加速度传感器、转矩传感器等。

### (3) 按能量传递方式分类。

按能量的传递方式分类,传感器可分为有源传感器和无源传感器两大类。

有源传感器又称能量控制型传感器,可将非电量转换为电量,如压电式传感器、霍尔传感器;无源传感器本身并不是一个换能器,被测非电量仅对传感器中的能量起控制或调节作用,所以它必须具有辅助能源——电源,如电阻、电感、电容等电参数传感器。

### (4) 按结构分类。

按传感器的结构可分为结构型、物性型和复合型传感器。

结构型传感器是依靠传感器结构参数(如形状、尺寸等)的变化,利用某些物理规律,实现信号的变换,从而检测出被测量,它是目前应用最多、最普及的传感器。这类传感器的特点是其性能以传感器中元件相对结构(位置)的变化为基础,而与其材料特性关系不大,如电感式、电位移式、电容式传感器等。

物性型传感器则是利用某些功能材料本身所具有的内在特性及效应将被测量直接转换成电量的传感器。例如,热电偶传感器就是利用金属导体材料的温差电动势效应和不同金属导体间的接触电动势效应实现对温度的测量的;而利用压电晶体制成的压力传感器则是利用压电材料本身所具有的压电效应实现对压力的测量。这类传感器的敏感元件就是材料本身,无所谓结构变化,因此通常具有响应速度快的特点,而且易于实现小型化、集成化和智能化,如压电式、压阻式、半导体式传感器等。

复合型传感器则是结构型传感器和物性型传感器的组合,兼有二者的特征。

此外,根据被测量的性质,可以将传感器分成物理型、化学型和生物型传感器三大类;根据传感器的使用材料,也可以将传感器分为半导体传感器、陶瓷传感器、金属材料传感器、复

合材料传感器、高分子材料传感器等；根据应用领域的不同，还可分为工业用、农用、民用、医用及军用传感器等不同类型；根据具体的使用目的，又可分为测量用、监视用、检查用、诊断用、控制用和分析用传感器等。

## 1.2 传感器的基本特性

在生产过程和科学实验中，要对各种各样的参数进行检测和控制，就要求传感器能感受被测非电量的变化并不失真地转换成相应的电量。为了更好地掌握和使用传感器，必须充分地了解传感器的基本特性。传感器的基本特性是指系统的输出与输入关系特性，即系统输出信号(输出量) $y(t)$ 与输入信号(被测量) $x(t)$ 之间的关系。根据传感器所测量的物理量的不同，传感器的基本特性通常分为静态特性和动态特性。对传感器的特性的分析同样适用于测量系统。不同传感器的参数不同，因此其基本特性也表现出不同的特点。一个高精度传感器，必须具有良好的静态特性和动态特性，才能保证信号无失真地按规律转换。

### 1.2.1 传感器的静态特性

传感器的静态特性是指被测量的值处于稳定状态时的输入输出特性，表示传感器在被测量各个值处于稳定状态时的输出-输入关系。如果被测量是一个不随时间变化，或随时间变化非常缓慢的量，可以只考虑其静态特性。这时传感器的输出量与输入量之间在数值上一般具有一定的对应关系，而且关系式不随时间变化。传感器的静态特性通常通过以下性能指标进行衡量：线性度、灵敏度、迟滞、重复性、漂移、测量范围和量程、精度、分辨率和阈值、稳定性等。

#### 1. 线性度

传感器的输出与输入关系可分为线性特性与非线性特性。理想的输出与输入关系是线性关系，但实际传感器大多为非线性关系。传感器的线性度是指传感器的输出与输入之间数量关系的线性程度，所谓的线性度也称非线性误差。经常用实际特性曲线与拟合直线(也称理论直线)之间的最大偏差与传感器满量程输出的百分比来表示。从传感器的性能看，希望具有线性关系，即具有理想的输出-输入关系。但实际遇到的传感器大多为非线性的，如果不考虑迟滞和蠕变等因素，传感器的输出与输入关系可用一个多项式表示：

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \cdots + a_nx^n \quad (1-1)$$

可见，各项系数不同，决定了特性曲线的具体形式不相同。

静态特性曲线可通过实际测试获得。在实际使用中，为了标定和数据处理方便，希望得到线性关系，要引入各种非线性补偿环节。例如，采用非线性补偿电路或计算机软件进行线性化处理，从而使传感器的输出与输入关系为线性或接近线性。

如果传感器非线性的方次不高，输入量变化范围较小，则可用一条直线(切线或割线)近似地代表实际曲线的一段，所采用的直线称为拟合直线。选择拟合直线的方法很多，同一种传感器，拟合方法不同，其线性度也是不同的。最常用的求解拟合直线的方法有两种：一种是端点法，通过连接实测特性曲线的两个端点得到，所得直线称为端基直线，以端基直线作为基准来确定的线性度称为端基线性度，如图 1-2(a)所示；另一种是最小二乘法，所得直线与实测特性曲线相应点之间偏差的平方和为最小，称为最小二乘直线，以最小二乘直线作为

基准来确定的线性度称为最小二乘线性度,如图 1-2(b)所示。

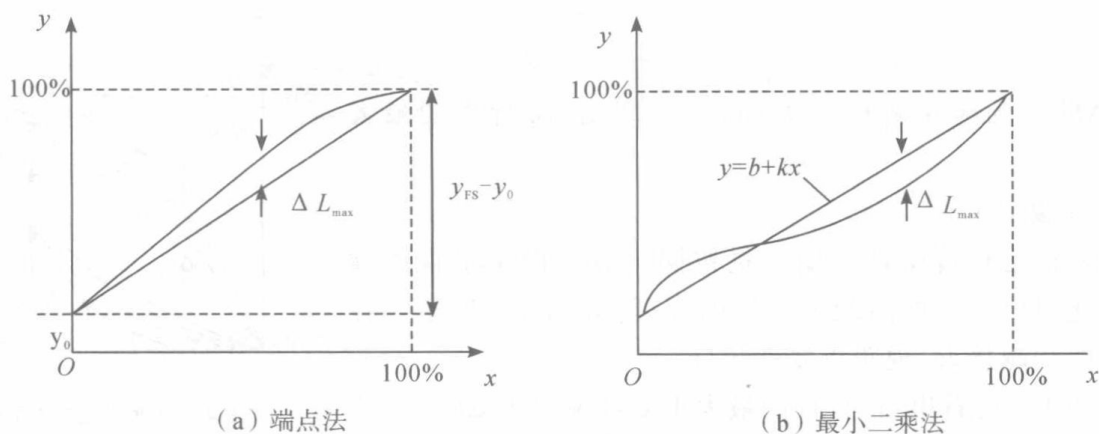


图 1-2 线性度

其中,  $\Delta L_{\max}$  为实际输出-输入特性曲线与其拟合直线之间的最大偏差,  $Y_{FS}$  为满量程输出值。

传感器的线性度是指在全量程范围内实际特性曲线与拟合直线之间的最大偏差值  $\Delta L_{\max}$  与满量程输出值  $Y_{FS}$  之比。即

$$\gamma_L = \pm (\Delta L_{\max} / Y_{FS}) \times 100\% \quad (1-2)$$

式中:  $\gamma_L$  —— 最大非线性误差;

$Y_{FS}$  —— 满量程输出, 如图 1-2(a) 中  $Y_{FS} = y_{FS} - y_0$

## 2. 灵敏度

灵敏度是传感器静态特性的一个重要指标。其定义为输出量的增量  $\Delta y$  与引起该增量的相应输入量增量  $\Delta x$  之比, 表达式为:

$$S = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (1-3)$$

它表示单位输入量的变化所引起传感器输出量的变化, 显然, 灵敏度  $S$  值越大, 表示传感器越灵敏。当某些检测系统或组成环节的输入与输出具有同一量纲时, 常用“增益”或“放大倍数”来代替灵敏度。

线性检测系统的灵敏度为一常量, 可由静态特性曲线(直线)的斜率求得, 直线的斜率越大, 其灵敏度越高。对于非线性检测系统, 其灵敏度则是变化的。若检测系统是由灵敏度分别为  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$  等各相互独立的环节串联而成, 则其总灵敏度为各组成环节灵敏度的乘积。

## 3. 迟滞

传感器在输入量由小到大(正行程)及输入量由大到小(反行程)变化期间, 其输入输出特性曲线不重合的现象称为迟滞, 如图 1-3 所示。也就是说, 对于同一大小的输入信号, 传感器的正、反行程输出信号大小不相等, 这个差值称为迟滞差值, 也叫回程误差、迟滞误差或回差。

这种现象主要是由于传感器敏感元件材料的物理性质和机械零部件的缺陷所造成的, 例如弹性敏感元件的弹性滞后、运动部件摩擦、传动机构的间隙、紧固件松动等。迟滞大小通常由实验确定。迟滞误差可由下式计算:

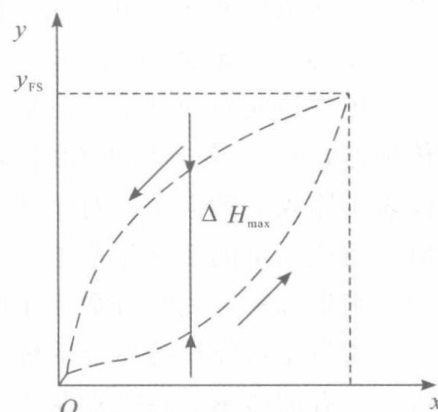


图 1-3 迟滞特性

$$e_H = \frac{\Delta H_{\max}}{y_{FS}} \times 100\% \quad (1-4)$$

其中,  $\Delta H_{\max}$  为全量程中最大的迟滞, 即正、反行程的最大差值。

#### 4. 重复性

重复性是指传感器在输入量按同一方向做全量程连续多次变化时所得特性曲线不一致的程度, 如图 1-4 所示。各条特性曲线越接近, 说明重复性越好。

由图 1-4 可看出: 正行程的最大重复性偏差为  $\Delta R_{\max 1}$ , 反行程的最大重复性偏差为  $\Delta R_{\max 2}$ 。再以满量程输出的百分数表示, 这就是重复性误差, 即:

$$\lambda_R = \pm \frac{\Delta R_{\max}}{y_{FS}} \times 100\% \quad (1-5)$$

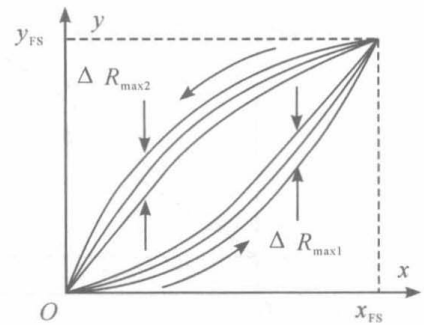


图 1-4 传感器的重复性

#### 5. 漂移

传感器的漂移是指在输入量不变的情况下, 传感器输出量随着时间变化。产生漂移的原因有两个方面: 一是传感器自身结构参数; 二是周围环境(如温度、湿度等)。最常见的漂移是温度漂移, 即周围环境温度变化而引起输出量的变化。温度漂移主要表现为温度零点漂移和温度灵敏度漂移。

温度漂移通常用传感器工作环境温度偏离标准环境温度(一般为  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ )时的输出值的变化量与温度变化量之比表示。

#### 6. 测量范围和量程

传感器所能测量到的最小输入量与最大输入量之间的范围称为传感器的测量范围。传感器测量范围的上限值与下限值的代数差, 称为量程。例如  $-50\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$  的温度检测系统, 其量程为  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 又如  $100\sim 200\text{ g}$  的加速度检测系统, 其量程为  $100\text{ g}$  等。

#### 7. 精度

传感器的精度是指测量结果的可靠程度, 是测量中各类误差的综合反映。测量误差越小, 传感器的精度越高。传感器的精度用其量程范围内的最大基本误差与满量程输出之比的百分数表示。其基本误差是传感器在规定的正常工作条件下所具有的测量误差, 由系统误差和随机误差两部分组成。详细讨论见“2.1.3 测量误差”一节内容。

#### 8. 分辨率和阈值

传感器能检测到输入量最小变化量的能力称为分辨力。对于某些传感器, 如电位器式传感器, 当输入量连续变化时, 输出量只做阶梯变化, 则分辨力就是输出量的每个“阶梯”所代表的输入量的大小。对于数字式仪表, 分辨力就是仪表指示值的最后一位数字所代表的值。当被测量的变化量小于分辨力时, 数字式仪表的最后一位数不变, 仍指示原值。当分辨力以满量程输出的百分数表示时则称为分辨率。

阈值是指能使传感器的输出端产生可测变化量的最小被测输入量值, 即零点附近的分辨力。有的传感器在零点附近有严重的非线性, 形成所谓“死区”, 则将死区的大小作为阈值; 更多情况下, 阈值主要取决于传感器噪声的大小, 因而有的传感器只给出噪声电平。

### 9. 稳定性

稳定性表示传感器在一个较长的时间内保持其性能参数的能力。理想的情况是不论什么时候,传感器的特性参数都不随时间变化。但实际上,随着时间的推移,大多数传感器的特性会发生改变。这是因为敏感元件或构成传感器的部件的特性会随时间发生变化,从而影响传感器的稳定性。

稳定性一般以室温条件下经过一规定时间间隔后,传感器的输出与起始标定时输出之间的差异来表示,称为稳定性误差。稳定性误差可用相对误差表示,也可用绝对误差表示。

## 1.2.2 传感器的动态特性

动态特性是指传感器对随时间变化的输入量的响应特性。动态特性好的传感器,其输出量随时间变化的曲线与被测量随时间变化的曲线一致或者相近。

### 1. 传感器的基本动态特性

传感器的动态数学模型是指传感器在受到随时间变化的输入量作用时输出与输入之间的关系,通常称为响应特性。

数学上要精确建立传感器的动态数学模型是很困难的,因此,像研究其他科学一样忽略一些影响不大的因素,如非线性和随机变量等复杂因素,将传感器作为线性定常系统来考虑,因而其动态数学模型可以用线性常系数微分方程来表示,这种方程式的通式为:

$$a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \cdots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_m \frac{d^m x}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x}{dt^{m-1}} + \cdots + b_1 \frac{dx}{dt} + b_0 x \quad (1-6)$$

式中: $x$ 为输入量, $y$ 为输出量; $a_0, a_1, a_2, \cdots, a_n, b_0, b_1, b_2, \cdots, b_m$ 为与传感器特性有关的常数。大多数传感器的动态特性都可归属于零阶、一阶、二阶系统,尽管实际上存在更高阶的复杂系统,但在一定的条件下,都可以用上述三种系统的组合来进行分析。

#### (1) 零阶特性。

在方程(1-6)式中,除了 $a_0$ 和 $b_0$ 外,其他系数均为零,则微分方程变成简单的代数方程,即:

$$a_0 y(t) = b_0 x(t) \quad (1-7)$$

通常将该代数方程写成 $y(t) = kx(t)$ ,式中, $k = b_0/a_0$ ,为传感器的静态灵敏度。传感器的动态特性用方程(1-7)表示的称为零阶系统。零阶系统具有理想的动态特性,无论被测量 $x(t)$ 如何随时间变化,零阶系统的输出都不会失真,其输出在时间上也无任何滞后,所以零阶系统又称为比例系统。

在工程应用中,电位器式的电阻传感器、变面积式电容传感器及利用静压式压力传感器测量液位均可看成零阶系统。

#### (2) 一阶系统。

若方程(1-6)中的系数除了 $a_0, a_1$ 和 $b_0$ 外,其他系数均为零,则微分方程变成

$$a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_0 x$$

上式通常改写成

$$\tau \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = kx(t) \quad (1-8)$$

式中： $\tau$ ——传感器的时间常数， $\tau = a_1/a_0$ ；

$k$ ——传感器的静态灵敏度或放大系数， $k = b_0/b$ 。

时间常数是时间的量纲，反映传感器惯性的大小，静态灵敏度则说明其静态特性。用方程(1-8)描述其动态特性的传感器称为一阶系统，一阶系统又称为惯性系统。如常用的热电偶测温系统，电路中常用的阻容滤波器等均可看作一阶系统。

### (3) 二阶系统。

二阶系统的微分方程为

$$a_2 \frac{d^2 y}{dt^2} + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_0 x$$

二阶系统的微分方程改写为

$$\frac{d^2 y(t)}{dt^2} + 2\xi\omega_n \frac{dy(t)}{dt} + \omega_n^2 y(t) = \omega_n^2 k x(t) \quad (1-9)$$

式中： $k$ ——传感器的静态灵敏度或放大系数， $k = b_0/b$ ；

$\xi$ ——传感器的阻尼系数， $\xi = a_1/(2\sqrt{a_0 a_2})$ ；

$\omega_n$ ——传感器的固有频率， $\omega_n = \sqrt{a_0/a_2}$ 。

根据二阶微分方程特征方程根的性质不同，二阶系统又可分为二阶惯性系统和二阶振荡系统。

#### 2. 传感器的动态响应特性

由于传感器的惯性和滞后，当被测量随时间变化时，传感器的输出往往来不及达到平衡状态，而处于动态过渡过程中，所以其输出量也是时间的函数，其间的关系要用动态特性来表示。在实际工作中，传感器的动态特性常用它对某些标准输入信号的响应来表示。这是因为传感器对标准输入信号的响应容易用实验方法求得，并且它对标准输入信号的响应与它对任意输入信号的响应之间存在一定的关系，往往知道了前者就能推定后者。最常用的标准输入信号有阶跃信号和正弦信号两种，所以传感器的动态特性也常用阶跃响应和频率响应来表示。

#### 3. 传感器的标定与校准

标定是指在明确传感器的输出与输入关系的前提下，利用某种标准器具对传感器进行标度。对新研制或生产的传感器进行全面的检定，称为标定；将传感器在使用中或储存后进行的性能进行复测，称为校准。标定与校准的本质相同。

标定的基本方法是：利用标准仪器产生已知的非电量（如标准力、压力、位移等）作为输入量，输入待标定的传感器中，然后将传感器的输出量与输入的标准量做比较，获得一系列校准数据或曲线。有时输入的标准量是利用一个标准传感器检测而得，这时的标定实质上是待标定传感器与标准传感器之间的比较。

传感器的标定系统一般可由以下几部分组成：

- (1) 被测非电量的标准发生器，如活塞式压力计、测力机、恒温源等。
- (2) 被测非电量的标准测试系统，如标准压力传感器、标准力传感器、标准温度计等。
- (3) 待标定传感器所配接的信号调节器、显示器和记录器等，其精度是已知的。

#### 4. 提高传感器性能的方法

- (1) 非线性校正；(2) 温度补偿；(3) 零位法、微差法；(4) 闭环技术；(5) 平均技术；(6) 差动