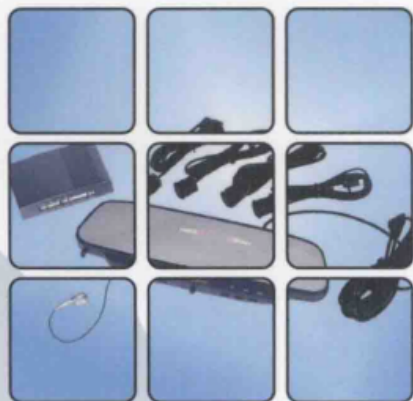
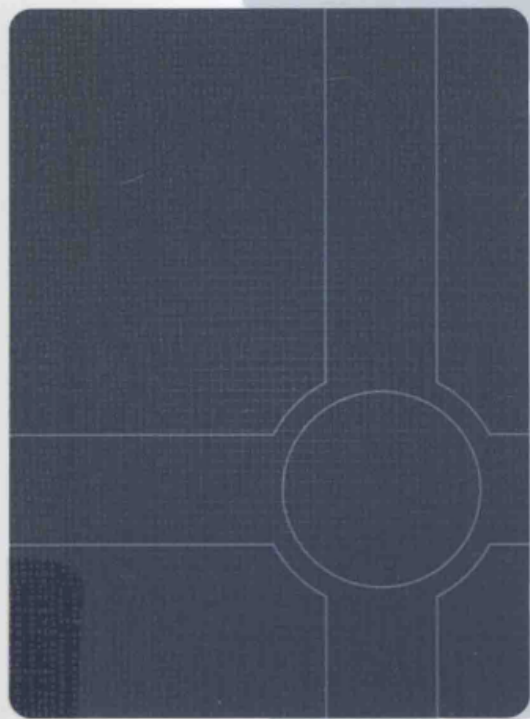




全国高职高专应用型规划教材·机械机电类

传感器与检测技术

党安明 张钦军 主编 CHUANGANQI YU JIANCE JISHU



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS



全国高职高专应用型规划教材·机械机电类

数字电子技术

机械加工设备

工程力学

机械制造技术

液压与气压传动

电工电子实验指导书

机械制造工艺学基础

传感器与检测技术

机械设计基础与实践

互换性与测量技术

模拟电子技术

北京大学出版社

地址：北京市海淀区成府路205号

邮编：100871

编辑部：(010) 62754934

发行部：(010) 62750672

出版部：(010) 62754962

E-mail: zyjy@pup.cn

http://www.pup.cn

ISBN 978-7-301-18913-9



9 787301 189139 >

定价：23.00元

全国高职高专应用型规划教材·机械机电类

传感器与检测技术

主 编 党安明 张钦军
副主编 项云霞 夏学峰
夏 岩 姜兰兰



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

本书根据教育部高职高专培养目标和高职高专院校对本课程教学的基本要求编写, 主要内容包括传感器技术基础、温度传感器、力传感器、光电传感器、图像传感器、霍尔传感器与其他磁传感器及应用、位移、物位传感器、新型传感器、传感器接口电路、智能传感器、传感器网络等。此外, 本书根据高职高专学生学习的特点增加了实训内容, 突出了高职高专重实验、实训能力培养的目标。

本书可作为高等职业院校机电类专业规划教材使用, 也可作为成人教育、职业培训的教材, 并可作为自动化、电气化、仪表、电器等相关专业的工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

传感器与检测技术/党安明, 张钦军主编. —北京: 北京大学出版社, 2011. 8
(全国高职高专应用型规划教材·机械机电类)
ISBN 978-7-301-18913-9

I. ①传… II. ①党… ②张… III. ①传感器—检测—高等学校—教材 IV. ①TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 093030 号

书 名: 传感器与检测技术

著作责任者: 党安明 张钦军 主编

策划编辑: 傅 莉

责任编辑: 傅 莉 刘红娟

标准书号: ISBN 978-7-301-18913-9/TP·1169

出版发行: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路 205 号 100871

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62754934 出版部 62754962

网 址: <http://www.pup.cn>

电子信箱: zyjy@pup.cn

印 刷 者: 三河市富华印装厂

经 销 者: 新华书店

787 毫米×1092 毫米 16 开本 11.75 印张 278 千字

2011 年 8 月第 1 版 2011 年 8 月第 1 次印刷

定 价: 23.00 元

未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有, 侵权必究

举报电话: 010-62752024 电子信箱: fd@pup.pku.edu.cn

前 言

今天，人类已进入科学技术空前发展的信息社会，电子计算机、机器人、自动控制技术以及单片机嵌入系统的迅速发展，迫切需要形形色色的传感器。作为“感觉器官”，传感器应用于各种各样的信息检测，并将之转换为工作系统所能进行处理的信息。了解、掌握和应用传感器已成为许多专业工程技术人员的必备知识和技能，“传感器技术与应用”也已成为应用电子技术、自动控制技术、自动信号技术、测量技术、机器人技术及计算机应用等专业的必修课。在此背景下，我们编写了本书。

本书系大学专科和高职教育使用教材，讲述的是作为一门新兴学科的传感器的技术开发与应用，其参考学时为 64 学时。本书以传感器原理、特性和使用为主线，介绍了传感器的分类、数学模型、特性、材料及技术指标的标定，并分别介绍了温度、力、光电、磁、位移、温度及气体、生物、微波、超声波、机器人等传感器的原理、结构、性能与应用，此外还介绍了传感器输入、输出信号的处理以及与微型计算机的连接。

在编写中，本书力求做到叙述简练，保持内容新颖，以便学生能够灵活应用。作者在每章介绍了知识点之后，还添加了实训环节和习题练习。通过实训，既可培养学生查阅各种传感器的手册和资料的能力，又可使学生自己动手制作传感器的电路，在实际操作中了解并掌握传感器。每章的课后习题则针对本章的知识点进行设置，以帮助学生加深对知识点的理解。教师在讲授本书时，可根据实际情况和具体条件，选择完成一部分实训课题或全部实训课题，也可安排在课余时间进行。

本书由山东省东营职业学院的党安明和张钦军担任主编，负责书稿前期筹划、拟定编写大纲、统一修改定稿。具体编写分工如下：党安明负责第 1、2 章的编写，夏岩负责第 3、4 章的编写，项云霞负责第 5 章的编写，夏学峰负责第 6、7 章的编写，姜兰兰负责第 8、9 章的编写，张钦军负责第 10、11 章的编写。

本书可作为高等职业院校机电类专业规划教材使用，也可作为成人教育、职业培训的教材，并可作为自动化、电气化、仪表、电器等相关专业的工程技术人员的参考用书。

由于编者水平有限，书中难免有不足之处，恳请广大读者批评指正。

编 者

2011 年 6 月

目 录

第 1 章 传感器技术基础	(1)
1.1 自动测控系统与传感器	(1)
1.2 传感器的分类	(3)
1.3 传感器的数学模型	(4)
1.4 传感器的特性与技术指标	(6)
1.5 传感器性能的提高及标定与校准	(10)
1.6 习题	(11)
第 2 章 温度传感器	(12)
2.1 温度测量概述	(12)
2.2 热电偶传感器	(12)
2.3 金属热电阻传感器	(18)
2.4 集成温度传感器	(20)
2.5 半导体热敏电阻	(21)
2.6 负温度系数热敏电阻	(23)
2.7 温度传感器应用实例	(25)
2.8 实训	(32)
2.9 习题	(32)
第 3 章 力传感器	(33)
3.1 弹性敏感元件	(33)
3.2 电阻应变片传感器	(37)
3.3 压电传感器	(40)
3.4 电容式传感器	(45)
3.5 电感式传感器	(50)
3.6 力传感器应用实例	(55)
3.7 实训	(58)
3.8 习题	(58)
第 4 章 光电传感器	(59)
4.1 光电效应	(59)
4.2 光电器件	(60)
4.3 红外线传感器	(70)
4.4 光纤传感器	(74)

4.5	实训	(78)
4.6	习题	(79)
第5章	图像传感器	(81)
5.1	图像传感器概述	(81)
5.2	CCD 图像传感器	(81)
5.3	CMOS 图像传感器	(85)
5.4	CCD 和 CMOS 图像传感器应用实例	(88)
5.5	实训	(91)
5.6	习题	(91)
第6章	霍尔传感器与其他磁传感器及应用	(92)
6.1	霍尔传感器的工作原理	(92)
6.2	霍尔传感器	(94)
6.3	其他磁传感器	(95)
6.4	霍尔传感器及其他磁传感器应用实例	(99)
6.5	实训	(101)
6.6	习题	(102)
第7章	位移、物位传感器	(103)
7.1	接近传感器	(103)
7.2	光栅位移传感器	(104)
7.3	磁栅位移传感器	(106)
7.4	转速传感器	(108)
7.5	液位传感器	(109)
7.6	流量及流速传感器	(112)
7.7	实训	(113)
7.8	习题	(114)
第8章	新型传感器	(115)
8.1	生物传感器	(115)
8.2	微波传感器	(120)
8.3	超声波传感器	(123)
8.4	机器人传感器	(130)
8.5	实训	(139)
8.6	习题	(139)
第9章	传感器接口电路	(140)
9.1	传感器输出信号的处理方法	(140)
9.2	传感器信号检测电路	(141)
9.3	传感器和微型计算机的连接	(147)
9.4	传感器接口电路应用实例	(149)



9.5	实训	(150)
9.6	习题	(151)
第 10 章	智能传感器	(152)
10.1	智能传感器概述	(152)
10.2	计算型智能传感器	(155)
10.3	特殊材料型智能传感器	(158)
10.4	几何结构型智能传感器	(158)
10.5	智能传感器实例	(159)
10.6	实训	(162)
10.7	习题	(163)
第 11 章	传感器网络	(164)
11.1	传感器网络概述	(164)
11.2	传感器网络信息交换体系	(166)
11.3	OSI 开放系统互联参考模型	(167)
11.4	传感器网络通信协议	(169)
11.5	实训	(175)
11.6	习题	(176)
参考文献	(177)

第 1 章 传感器技术基础



本章要点

- 传感器的分类；
- 传感器的技术指标；
- 传感器的加工技术。

世界是由物质组成的，表征物质特性或其运动形式的参数很多，根据物质的电特性，可分为电量和非电量两类。

非电量不能直接使用一般电工仪表和电子仪器测量，而是需要转换成与非电量有一定关系的电量再进行测量。实现这种转换技术的器件叫传感器。

自动检测和自动控制系统处理的大多是电量，故需要通过传感器对通常是非电量的原始信息进行精确可靠的捕获，并将之转换为电量。

1.1 自动测控系统与传感器

1.1.1 自动测控系统

自动检测和自动控制技术是人们对事物的规律进行定性了解和定量掌握以及预期效果控制所从事的一系列的技术措施。自动测控系统是完成这一系列技术措施之一的装置，它是检测和控制器与研究对象的总和。通常可将自动测控系统分为开环与闭环两种自动测控系统，如图 1-1 和图 1-2 所示。

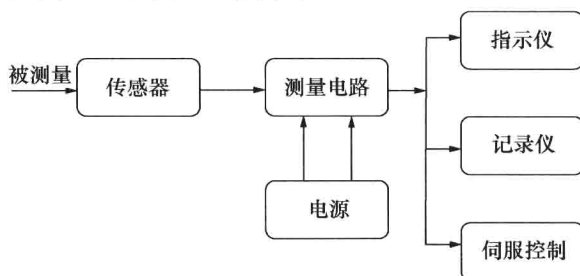


图 1-1 开环自动测控系统

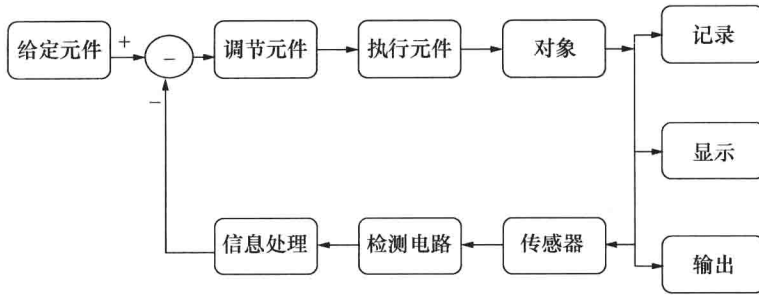


图 1-2 闭环自动测控系统框图

由图 1-1 和图 1-2 可知，一个完整的自动测控系统，一般由传感器、测量电路、显示记录装置或调节执行装置、电源 4 部分组成。

1.1.2 传感器

传感器的作用是将被测非电物理量转换成与其有一定关系的电信号，由图 1-2 可知它获得的信息正确与否，直接关系到整个系统的精度。依照《中华人民共和国国家标准》的规定，传感器的定义是：能感受规定的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。其中敏感元件是指传感器中能直接感受或响应被测量的部分；转换元件是指传感器中能将敏感元件感受或响应的被测量转换成适于传输或测量的电信号的部分。传感器的组成如图 1-3 所示。

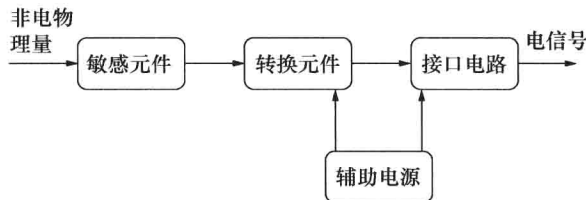


图 1-3 传感器组成框图

需要指出的是，并不是所有的传感器必须包括敏感元件和转换元件，如压电晶体、热电偶、热敏电阻、光电器件等是敏感元件与转换元件两者合二为一的传感器。

传感器转换能量的理论基础都是利用物理学、化学、生物学现象和效应来进行能量形式的变换。被测量和它们之间能量的相互转换是各种各样的，如图 1-4 所示。传感器技术就是掌握和完善这些转换的方法和手段。

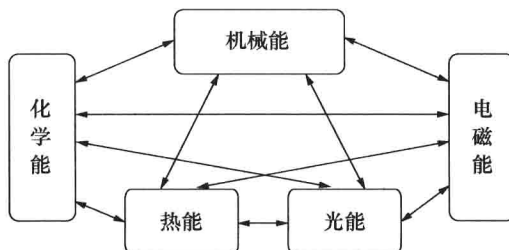


图 1-4 传感器的能量转换关系



1.2 传感器的分类

传感器有许多分类方法，但常用的分类方法有两种，一种是按被测物理量来分类；另一种是按传感器的工作原理来分类。

1.2.1 按被测物理量分类

这一种方法是根据被测量的性质进行分类，如温度传感器、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。

这种分类方法把种类繁多的被测量分为基本被测量和派生被测量两类（参见表 1-1）。例如力可视为基本被测量，从力可派生出压力、重量、应力、力矩等派生被测量。当需要测量这些被测量时，只要采用力传感器就可以了。

表 1-1 基本被测量和派生被测量

基本被测量		派生被测量	基本被测量		派生被测量
位移	线位移	长度、厚度、应变、振动、磨损	力	压力	重量、应力、力矩
	角位移	旋转角、偏转角、角振动	时间	频率	周期、计数、统计分布
速度	线速度	速度、振动、流量、动量	温度		热容、气体速度、涡流
	角速度	转速、角振动	光		光通量和密度、光谱分布
加速度	线加速度	振动、冲击、质量	湿度		水汽、水分、露点
	角加速度	角振动、转矩、转动惯量			

这种分类方法的优点是比较明确地表达了传感器的用途，便于使用者根据其用途选用；缺点是没有区分每种传感器在转换机理上有何共性和差异，不便使用者掌握其基本原理及分析方法。

1.2.2 按传感器工作原理分类

这一种分类方法是以工作原理划分，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。这种分类法的优点是对传感器的工作原理比较清楚，类别少，有利于传感器专业工作者对传感器的深入研究分析；缺点是不便于使用者根据用途选用。具体划分为以下几类。

1. 电学式传感器

电学式传感器是应用范围较广的一种传感器，常用的有电阻式传感器、电容式传感器、电感式传感器、磁电式传感器及电涡流式传感器等。

2. 磁学式传感器

磁学式传感器是利用铁磁物质的一些物理效应而制成，主要用于位移、转矩等参数



的测量。

3. 光电式传感器

光电式传感器是利用光电器件的光电效应和光学原理而制成，主要用于光强、光通量、位移、浓度等参数的测量。

4. 电势型传感器

电势型传感器是利用热电效应、光电效应、霍耳效应等原理而制成，主要用于温度、磁通量、电流、速度、光强、热辐射等参数的测量。

5. 电荷传感器

电荷传感器是利用压电效应原理而制成，主要用于力及加速度的测量。

6. 半导体传感器

半导体传感器是利用半导体的压阻效应、内光电效应、磁电效应、半导体与气体接触产生物质变化等原理而制成，主要用于温度、湿度、压力、加速度、磁场和有害气体的测量。

7. 谐振式传感器

谐振式传感器是利用改变电或机械的固有参数来改变谐振频率的原理而制成，主要用来测量压力。

8. 电化学式传感器

电化学式传感器是以离子导电原理为基础而制成，可分为电位式传感器、电导式传感器、电量式传感器、级谱式传感器和电解式传感器等。电化学式传感器主要用于分析气体成分、液体成分、溶于液体的固体成分、液体的酸碱度、电导率及氧化还原电位等参数的测量。

除了上述两种分类方法外，还有按能量的关系分类，即将传感器分为有源传感器和无源传感器；按输出信号的性质分类，即将传感器分为模拟式传感器和数字式传感器。数字式传感器输出为数字量，便于与计算机联用，且抗干扰性较强，例如盘式角度数字传感器、光栅传感器等。

本书的传感器主要是按被测物理量分类编写的，适当加以工作原理的分析。

1.3 传感器的数学模型

传感器作为感受被测量信息的器件，总是希望它能按照一定的规律输出有用信号，因此，需要研究其输入-输出之间的关系及特性，以使用理论指导其设计、制造、校准与使用。要在理论和技术上表征输入-输出之间的关系，通常的方法是建立数学模型，这也是研究科学问题的基本出发点。

传感器可能用来监测静态量、准静态量或动态量，由于输入信号的状态不同，传感





器表现出来的输出特性也不相同。为了便于分析,下面从静态输入-输出关系和动态输入-输出关系两个方面建立数学模型。

1.3.1 传感器的静态数学模型

传感器的静态数学模型是指被测量的值处于稳定状态时的输出与输入的关系。如果被测量是一个不随时间变化,或随时间变化缓慢的量,可以只考虑其静态特性,这时传感器的输入量与输出量之间在数值上一般具有一定的对应关系,关系式中不含有时间变量。对静态特性而言,传感器的输入量 x 与输出量 y 之间的关系通常可用一个如下的多项式表示:

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

式(1-1)中, x 为输入量; y 为输出量; a_0 为零输入时的输出,也叫零位输出; a_1 为传感器线性项系数(也称线性灵敏度),常用 K 表示; a_2, a_3, \cdots, a_n 为非线性项系数,其数值由具体传感器非线性特性决定。

传感器静态数学模型有以下3种有用的特殊形式。

1. 理想的线性特性

$$y = a_1x \quad (1-2)$$

其线性度好,通常是所希望的传感器应具有的特性,只有具备这样的特性才能正确无误地反映被测的真值。

2. 仅有偶次非线性项

$$y = a_0 + a_2x^2 + a_4x^4 + \cdots + a_{2n}x^{2n} \quad (1-3)$$

其线性范围较窄,线性度较差,灵敏度为该曲线的斜率,一般传感器设计很少采用这种特性。

3. 仅有奇次非线性项

$$y = a_1x + a_3x^3 + \cdots + a_{2n+1}x^{2n+1} \quad (1-4)$$

其线性范围较宽,且相对坐标原点对称的,线性度较好,灵敏度为该曲线的斜率。使用时一般都加以线性补偿措施,可获得较理想的线性特性。

1.3.2 传感器的动态数学模型

传感器的动态数学模型是指输入量随时间变化时传感器的响应特性。很多传感器要在动态条件下检测,被测量可能以各种形式随时间变化。只要输入量是时间的函数,则其输出量也将是时间的函数,其间的关系要用动态特性来说明。动态数学模型一般采用微分方程和传递函数描述。

1. 微分方程

忽略了一些影响不大的非线性和随机变量等复杂因素后,可将传感器作为线性定常数系统来考虑,因而其动态数学模型可以用线性常系数微分方程来表示,其解得到传感器的暂态响应和稳态响应。

$$a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \cdots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y$$



$$= b_m \frac{d^m x}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x}{dt^{m-1}} + \dots + b_1 \frac{dx}{dt} + b_0 x \quad (1-5)$$

式 (1-5) 中, $x(t)$ 为输入量, $y(t)$ 为输出量, $a_n, a_{n-1}, \dots, a_1, a_0; b_m, b_{m-1}, \dots, b_1, b_0$ 分别为与传感器结构有关的常数。

对于复杂的系统, 其微分方程的建立和求解都是很困难的。有时也可以采用传递函数的方法研究传感器的动态特性。

2. 传递函数

对式 (1-5) 两边取拉氏变换, 则得:

$$Y(s)(a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_0) = X(s)(b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_0) \quad (1-6)$$

$$H(S) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_0} \quad (1-7)$$

$H(S)$ 即为该系统的传递函数。等号右边是一个与输入无关的表达式, 只与系统结构参数有关, 可见传递函数 $H(s)$ 是描述传感器本身传递信息的特性, 即传输和变换特性。传递函数可由输入激励和输出响应的拉普拉斯变换求得。当传感器比较复杂或传感器的基本参数未知时, 可以通过实验求得传递函数。

1.4 传感器的特性与技术指标

传感器测量静态量表现为静态特性, 测量动态量表现为动态特性。传感器必须有良好的静态特性和动态特性, 才能使信号和能量按准确的规律转换。

1.4.1 静态特性

传感器的静态特性可以用一组性能指标来描述, 如灵敏度、线性度、迟滞、重复性和漂移等, 如图 1-5 所示。

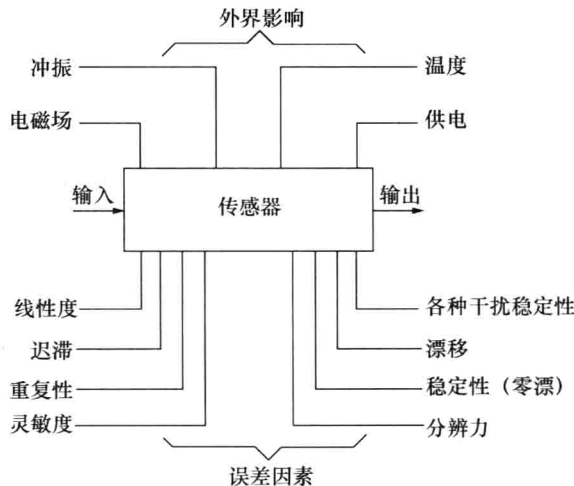


图 1-5 传感器的静态性能指标



1. 灵敏度

灵敏度是传感器静态特性的一个重要指标。其定义是输出量增量 Δy 与引起输出量增量 Δy 的相应输入量增量 Δx 之比，如图 1-6 所示。用 S 表示灵敏度，即：

$$S = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{dy}{dx} \quad (1-8)$$

它表示单位输入量的变化所引起传感器输出量的变化，很显然，灵敏度 S 值越大，表示传感器越灵敏。

2. 线性度

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。输出与输入关系可分为线性特性和非线性特性。从传感器的性能看，希望具有线性关系，即理想输入-输出关系。但实际遇到的传感器大多为非线性，如图 1-7 所示。

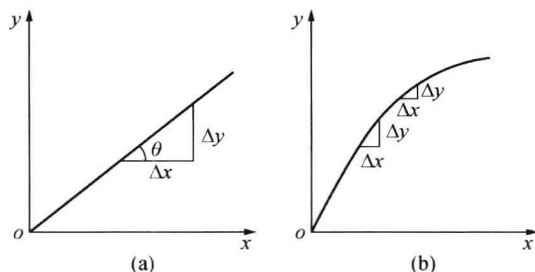


图 1-6 传感器的灵敏度

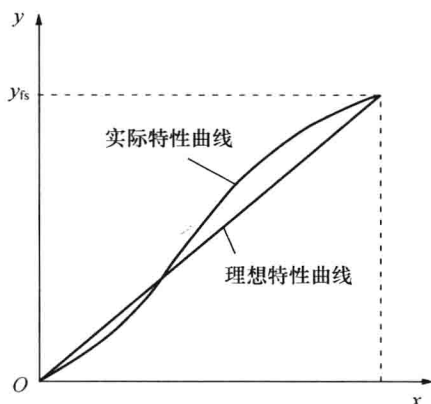


图 1-7 传感器的线性度

在实际使用中，为了标定和数据处理的方便，希望得到线性关系，因此引入各种非线性补偿环节，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。但如果传感器非线性的方次不高，输入量变化范围较小时，可用一条直线（切线或割线）近似地代表实际曲线的一段，使传感器输入-输出特性线性化，所采用的直线称为拟合直线。

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 Δ_{\max} 与满量程输出值 y_{fs} 之比。线性度也称为非线性误差，用 E 表示，即：

$$E = \frac{\Delta_{\max}}{y_{fs}} \times 100\% \quad (1-9)$$

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 1-8 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。传感器在全量程范围内最大的迟滞差值 ΔH_{\max} 与满量程输出值 y_{fs} 之比称为迟滞误差，用 E_{\max} 表示，即：

$$E_{\max} = \frac{\Delta H_{\max}}{y_{fs}} \times 100\% \quad (1-10)$$

4. 重复性

重复性是传感器在输入量按同一方向作全量程多次测试时，所得特性曲线不一致性的程度，如图 1-9 所示。

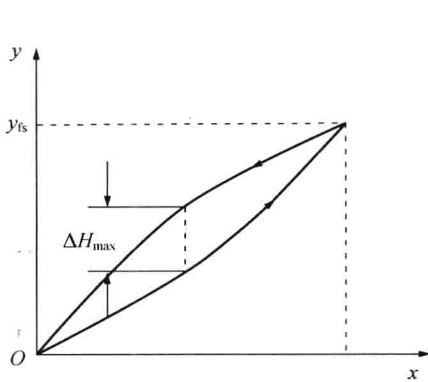


图 1-8 迟滞特性

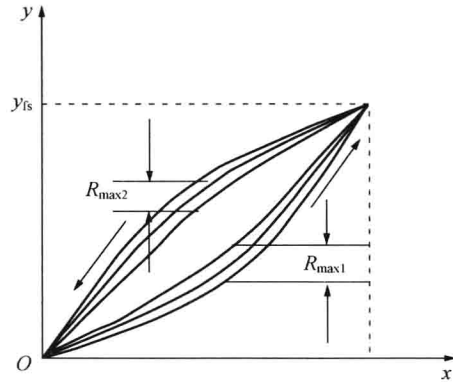


图 1-9 重复性特性

图 1-9 中 $R_{\max1}$ 和 $R_{\max2}$ 为多次测试的不重复误差，多次测试的曲线越重合，其重复性越好。

传感器输出特性的不重复性主要由传感器的机械部分的磨损、间隙、松动，部件的内摩擦、积尘，电路元件老化、工作点漂移等原因产生。

不重复性极限误差由式 (1-11) 表示：

$$E_z = \frac{R_{\max}}{y_{fs}} \times 100\% \quad (1-11)$$

5. 分辨力

传感器的分辨力是在规定测量范围内所能检测的输入量的最小变化量。有时也用该值相对满量程输入值的百分数表示。

6. 稳定性

稳定性有短期稳定性和长期稳定性之分。传感器常用长期稳定性，指在室温条件下，经过相当长的时间间隔，如一天、一月或一年，传感器的输出与起始标定时的输出之间的差异。通常又用传感器的不稳定性来表征其稳定程度。

7. 漂移

传感器的漂移是指在外界的干扰下，输出量发生与输入量无关的不需要的变化。漂移包括零点漂移和灵敏度漂移等。零点漂移和灵敏度漂移又可分为时间漂移和温度漂移。



时间漂移是指在规定的条件下,零点或灵敏度随时间的缓慢变化;温度漂移为环境温度变化而引起的零点或灵敏度的变化。

1.4.2 动态特性

传感器的动态特性是指输入量随时间变化时传感器的响应特性。很多传感器要在动态条件下检测,被测量可能以各种形式随时间变化。只要输入量是时间的函数,则其输出量也将是时间的函数,其间的关系要用动态特性来说明。

在动态(快速变化)的输入信号情况下,要求传感器能迅速准确地响应和再现被测信号的变化。也就是说,传感器要有良好的动态特性。最常用的是通过几种特殊的输入时间函数,例如阶跃函数和正弦函数来研究其响应特性,称为阶跃响应法和频率响应法。

1. 阶跃响应特性

在传感器初始状态为零的情况下,给传感器输入一个单位阶跃函数信号:

$$u(t) = \begin{cases} 0 & t \leq 0 \\ 1 & t > 0 \end{cases} \quad (1-12)$$

其输出特性称为阶跃响应特性,如图1-10所示。由图1-10可衡量阶跃响应的几项指标。

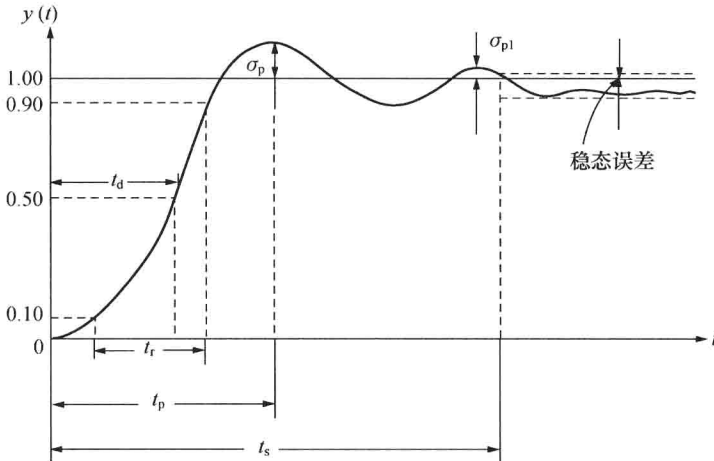


图 1-10 传感器阶跃响应特性

(1) 最大超调量 σ_p : 响应曲线偏离阶跃曲线的最大值,常用百分数表示,能说明传感器的相对稳定性。

(2) 延迟时间 t_d : 传感器输出达到稳态值的 50% 所需的时间。

(3) 上升时间 t_r : 传感器输出达到稳态值的 90% 所需的时间。

(4) 峰值时间 t_p : 二阶传感器输出响应曲线达到第一个峰值所需的时间。

(5) 响应时间 t_s : 响应曲线逐渐趋于稳定,到与稳态值之差不超过 $\pm (5\% \sim 2\%)$ 所需要的时间,也称过渡过程时间。

