



全国职业教育机电类专业精品教材

传感器技术及应用

主编 周志东 田兆清 哈斯花

CHUANGANQI JISHU
JI YINGYONG

 电子科技大学出版社
University of Electronic Science and Technology of China Press



全国职业教育机电类专业精品教材

传感器技术及应用

主 编 周志东 田兆清 哈斯花

副主编 赵亚平 艾佳琨 靳 雷

尤天生 夏龙生

CHUANGANQI JISHU
JI YINGYONG



电子科技大学出版社

University of Electronic Science and Technology of China Press

· 成都 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

传感器技术及应用/周志东, 田兆清, 哈斯花主编
—成都: 电子科技大学出版社, 2020. 8
ISBN 978-7-5647-8249-8

I. ①传… II. ①周… ②田…③哈… III. ①传感器
IV. ①TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2020) 第 166592 号

内 容 简 介

本书分为 11 个项目, 主要内容包括传感器的工作原理、结构、性能和具体的应用。项目 1 介绍了自动测控系统与传感器的作用、传感器的分类和传感器性能指标; 项目 2 至项目 8 介绍了温度、力、光电式、图像、磁、位移、气体和湿度等基本物理量传感器; 项目 9 介绍了生物、无线电波与微波、超声波、机器人、指纹、触摸屏和机电系统等新型传感器; 项目 10 和项目 11 介绍了智能传感器和传感器网络。本书每个项目后面附有实训和思考与练习, 以便增强读者对知识的理解, 提高学生的动手能力。

本书可作为职业院校应用电子技术、自动控制、仪器仪表、测量、机电技术、人工智能、计算机应用等相关专业的课程教材, 也可作为相关工程技术人员的参考用书。

传感器技术及应用

周志东 田兆清 哈斯花 主编

策划编辑 曾 艺

责任编辑 曾 艺

出版发行 电子科技大学出版社

成都市一环路东一段 159 号电子信息产业大厦 邮编: 610051

主 页 www.uestcp.com.cn

服务电话 028-83203399

邮购电话 028-83201495

印 刷 三河市新新艺印刷有限公司

成品尺寸 185mm×260mm

印 张 15.5

字 数 350 千字

版 次 2020 年 8 月第 1 版

印 次 2020 年 8 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5647-8249-8

定 价 42.80 元

版权所有 侵权必究

前言

在科学技术迅猛发展的信息时代，传感器技术是信息技术发展的重要支撑。电子计算机、互联网、机器人、自动控制、物联网、嵌入式系统以及人工智能技术的迅速发展，迫切需要各种各样的传感器。作为“感觉器官”，传感器用于各种各样信息的感知、获取和检测，并转换为能被工作系统处理的信息。显而易见，传感器在现代科学技术领域中占有极其重要的地位，了解和掌握传感器技术与应用成为应用电子技术、自动控制技术、仪器仪表技术、测量技术、机器人技术、人工智能技术、物联网及计算机应用等专业的必修课。

本书围绕培养学生的职业技能这条主线来组织内容。以“必需、够用”为度，强调专业技术能力的训练，将新知识、新技术、新工艺和新案例融入教材中，注重吸收最新的教学理念，力求内容新颖、叙述简明、实例面广、引导应用。

本书分为11个项目，主要内容包括传感器的工作原理、结构、性能和具体的应用。项目1介绍了自动测控系统与传感器的作用、传感器的分类和传感器性能指标；项目2至项目8介绍了温度、力、光电式、图像、磁、位移、气体、湿度等基本物理量传感器；项目9介绍了生物、无线电波与微波、超声波、机器人、指纹、触摸屏和机电系统等新型传感器；项目10和项目11介绍了智能传感器和传感器网络。在介绍传感器基本知识的同时，还介绍了它们在工农业生产、科学研究、医疗卫生、环境保护、交通管理、家用电器等方面的应用实例。

本书每个项目后面附有实训和思考与练习，实训内容通过介绍传感器实验和传感器应用电路，增强读者对知识的理解，提高学生的动手能力。在讲授和学习本书的内容时，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，也可以安排在课余时间进行。参考学时为60学时。

本书可作为职业院校应用电子技术、自动控制、仪器仪表、测量、机电技术、人工智能、计算机应用等相关专业的课程教材，也可作为相关工程技术人员的参考用书。



本书由周志东、田兆清、哈斯花任主编，赵亚平、艾佳琨、靳雷、尤天生、夏龙生任副主编，具体编写分工如下：项目1由广西电子高级技工学校田远达编写；项目2由赤峰工业职业技术学院哈斯花编写；项目3由苏州农业职业技术学院赵亚平编写；项目4由广西电子高级技工学校夏龙生编写；项目5由广西电子高级技工学校李军编写；项目6由广西电子高级技工学校尤天生编写；项目7、项目8由广西电子高级技工学校周志东编写；项目9由广西电子高级技工学校田兆清编写；项目10由河南质量工程职业学院靳雷编写；项目11由苏州农业职业技术学院艾佳琨编写。全书由周志东统稿、定稿。

在本书编写过程中，参考了其他相关书籍的内容与资料，同时得到许多同行的热情关心和帮助，并提出了许多宝贵的意见，在此一并表示衷心地感谢。

由于编者水平及时间有限，书中难免存在疏漏之处，恳请广大读者批评指正。

编 者
2020年5月

目 录

项目 1 传感器概述	1
任务 1.1 自动测控系统的组成与传感器的作用	2
任务 1.2 传感器的分类	3
任务 1.3 传感器的性能指标	5
项目实训	10
思考与练习	11
项目 2 温度传感器	12
任务 2.1 温度测量概述	13
任务 2.2 热电偶传感器	13
任务 2.3 热电阻传感器	21
任务 2.4 热敏电阻	23
任务 2.5 半导体温度传感器	26
任务 2.6 集成温度传感器	27
任务 2.7 温度传感器的应用	28
项目实训	35
思考与练习	36
项目 3 力传感器	38
任务 3.1 弹性敏感元件	39
任务 3.2 电阻应变片传感器	42
任务 3.3 压电式传感器	46
任务 3.4 电容式传感器	51
任务 3.5 电感式传感器	55
任务 3.6 加速度传感器	59



任务 3.7 力传感器的应用	63
项目实训	67
思考与练习	69
项目 4 光电式传感器	71
任务 4.1 光电效应	72
任务 4.2 光电器件	73
任务 4.3 红外线传感器	82
任务 4.4 色彩传感器	85
任务 4.5 紫外火焰传感器	87
任务 4.6 核辐射传感器	88
任务 4.7 光纤传感器	88
任务 4.8 光电式传感器的应用	92
项目实训	98
思考与练习	100
项目 5 图像传感器	102
任务 5.1 CCD 图像传感器	103
任务 5.2 CMOS 图像传感器	107
任务 5.3 CCD 和 CMOS 图像传感器的应用	109
项目实训	115
思考与练习	116
项目 6 霍尔传感器及其他磁传感器	118
任务 6.1 霍尔传感器工作原理	119
任务 6.2 霍尔传感器	122
任务 6.3 其他磁传感器	123
任务 6.4 霍尔传感器及其他磁传感器的应用	127
项目实训	130
思考与练习	131
项目 7 位移传感器	133
任务 7.1 机械位移传感器	134



任务 7.2 光栅位移传感器	137
任务 7.3 磁栅位移传感器	139
任务 7.4 磁电式转速传感器	140
任务 7.5 导电式液位传感器	141
任务 7.6 流量及流速传感器	142
任务 7.7 位移传感器应用	143
项目实训	146
思考与练习	147
项目 8 气体和湿度传感器	148
任务 8.1 气体传感器	149
任务 8.2 湿度传感器	154
任务 8.3 气体和湿度传感器的应用	159
项目实训	161
思考与练习	162
项目 9 几种新型传感器	163
任务 9.1 生物传感器	164
任务 9.2 无线电波与微波传感器	170
任务 9.3 超声波传感器	176
任务 9.4 机器人传感器	183
任务 9.5 语音识别和人像识别	192
任务 9.6 指纹传感器	194
任务 9.7 触摸屏	197
任务 9.8 微机电系统	200
项目实训	203
思考与练习	204
项目 10 智能传感器	205
任务 10.1 智能传感器的功能和层次结构	206
任务 10.2 计算型智能传感器	207
任务 10.3 特殊材料型智能传感器	209



传感器技术及应用

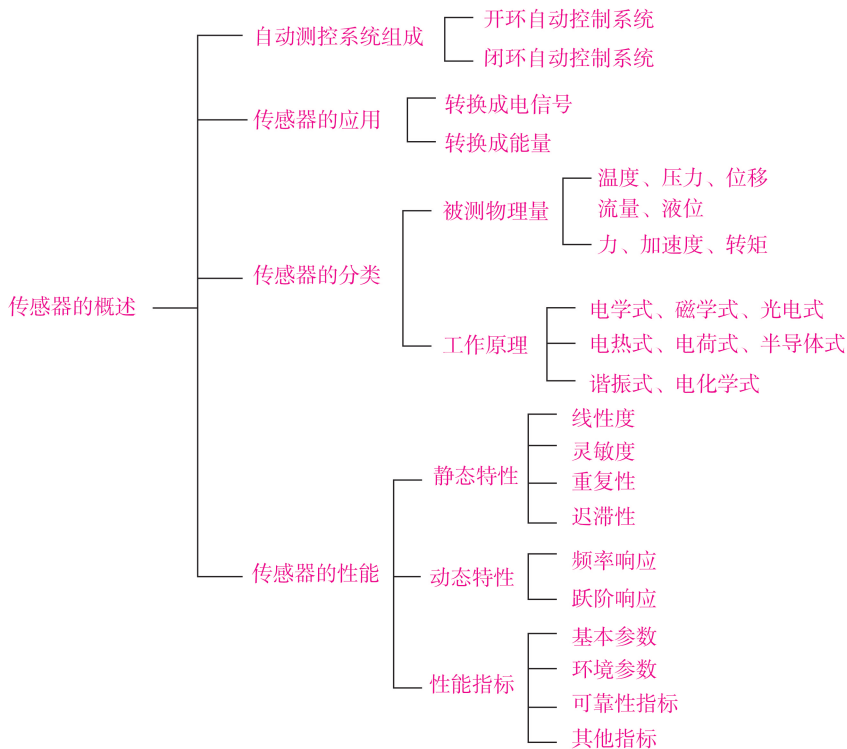
任务 10.4 几何结构型智能传感器	210
任务 10.5 多传感器融合系统	210
任务 10.6 模糊传感器	213
任务 10.7 智能传感器的应用	215
项目实训	220
思考与练习	221
项目 11 传感器网络	222
任务 11.1 传感器网络概述	222
任务 11.2 传感器网络信息交换体系	224
任务 11.3 开放系统互连 (OSI) 参考模型	224
任务 11.4 传感器网络通信协议	226
任务 11.5 无线传感器网络	230
任务 11.6 物联网	233
项目实训	235
思考与练习	237
参考文献	238

项目1 传感器概述

学习目标

- (1) 了解传感器的概念、作用及自动测控系统的组成。
- (2) 熟悉传感器的分类及工作原理。
- (3) 掌握传感器的线性度、灵敏度、重复性及迟滞现象等静态特性。

思维导图



相关知识

世界是由物质组成的，根据物质的电特性，可分为电物理量和非电物理量两类。电物理量一般是指物理学中的电学量，例如电压、电流、电阻、电容及电感等；非电物理量则是指除电物理量之外的一些参数，例如压力、流量、尺寸、位移量、重量、力、速度、加速度、转速、温度、浓度及酸碱度等。非电物理量的测量不能直接使用一般的电工仪表和电子仪器，因为一般的电工仪表和电子仪器只能测量电物理量，要求输入的信号为电信



号。非物理量的测量需要将非物理量转换成与其有一定关系的电物理量，再进行测量。实现这种转换技术的器件被称为传感器。传感器是实现自动检测和自动控制的首要环节。没有传感器对原始信息进行精确可靠的捕获和转换，就没有现代化的自动检测和自动控制系统；没有传感器，就没有现代科学技术的迅速发展。

任务 1.1 自动测控系统的组成与传感器的作用

▶▶▶ 1. 自动测控系统的组成

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分析预期效果所采取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的装置之一，它是检测控制器与研究对象的总和。自动测控系统通常可分为开环与闭环两种，如图 1-1 和图 1-2 所示。

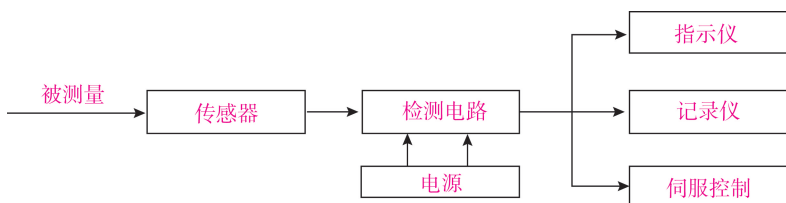


图 1-1 开环自动测控系统框图

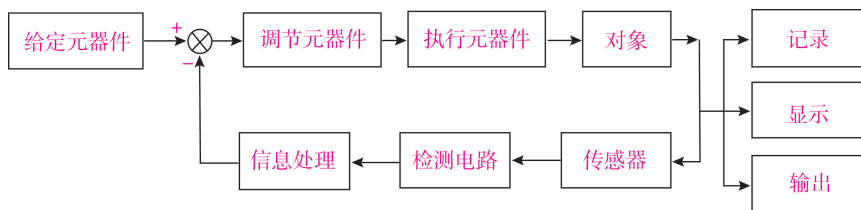


图 1-2 闭环自动测控系统框图

由图 1-1 和图 1-2 可以看出，一个完整的自动测控系统一般由传感器、检测电路、显示记录装置或调节执行装置以及电源 4 部分组成。

▶▶▶ 2. 传感器的作用

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，它获得的信息正确与否，直接关系到整个系统的精度。依据《传感器通用术语》GB/T 7665-2005 的规定，传感器的定义是：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。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部分。传感器的组成框图如图 1-3 所示。

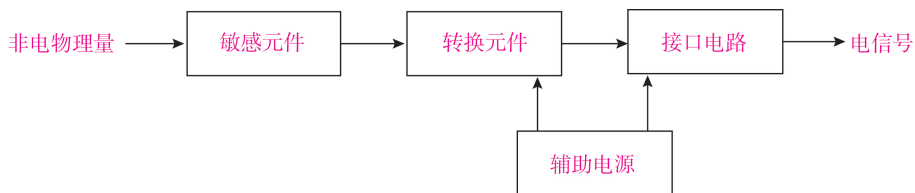


图 1-3 传感器的组成框图

应该指出的是，并不是所有的传感器必须包括敏感元件和转换元件。如果敏感元件直接输出的是电物理量，它就同时兼为转换元件；如果转换元件能直接感受被测量而输出与之成一定关系的电物理量，此时传感器就无敏感元件。例如，压电晶体、热电偶、热敏电阻及光电器件等。将敏感元件与转换元件两者合二为一的传感器是很多的。

由图 1-3 可知，接口电路的作用是把转换元件输出的电信号变换为便于处理、显示、记录 and 控制的可用电信号。其电路的类型视转换元件的不同而定，经常采用的有电桥电路和其他特殊电路，例如，高阻抗输入电路、脉冲电路、振荡电路等。辅助电源供给转换能量。有的传感器需要外加电源才能工作，例如，应变片组成的电桥、差动变压器等；有的传感器则不需要外加电源便能工作，例如压电晶体等。

传感器转换能量的理论基础是利用物理学、化学、生物学现象和效应来进行能量形式的变换。传感器各种能量之间的转换关系如图 1-4 所示。可见，被测量和它们之间能量的相互转换是各种各样的。传感器技术就是掌握和完善这些转换的方法和手段，它涉及传感器能量转换原理，材料选取与制造，器件设计、开发和应用等多项综合技术。

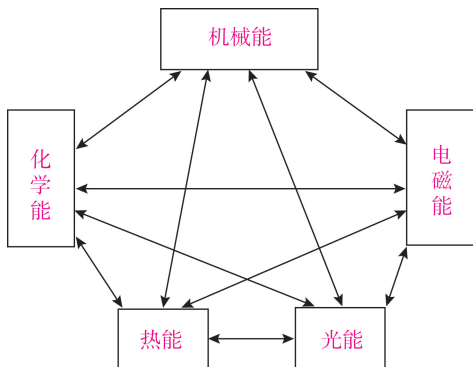


图 1-4 传感器各种能量之间的转换关系

任务 1.2 传感器的分类

根据某种原理设计的传感器，有时可用一类传感器测量多种非电物理量，而有时一种非电物理量又可以用几种不同的传感器测量。所以，传感器的分类方法有许多种，但常用的分类方法有：一种是按被测物理量分类；另一种是按传感器的工作原理分类。



▶▶▶ 1. 按被测物理量分类

按被测物理量分类的方法是根据被测物理量的性质进行分类的。按被测物理量分类的传感器有温度传感器、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、加速度传感器及转矩传感器等。

这种分类方法把种类繁多的被测物理量分为基本被测物理量和派生被测物理量两类。例如，可将力视为基本被测物理量，从力可派生出压力、重量、应力和力矩等派生被测物理量。当需要测量这些被测物理量时，只要采用力传感器就可以了。了解基本被测物理量和派生被测物理量的关系，对于系统使用何种传感器是很有帮助的。

常见的非电基本被测量和派生被测量如表 1-1 所示。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。其缺点是没有区分每种传感器在转换机理上的共性和差异，不便于使用者掌握其基本原理及分析方法。

表 1-1 常见的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、平面度	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		比热容、气体速度、涡流
	角速度	转速、角振动	光		光通量与密度、光谱分度
加速度	线加速度	振动、冲击、质量	湿度		水气、水分、露点
	角加速度	角振动、转矩、转动惯量			

▶▶▶ 2. 按传感器工作原理分类

按传感器工作原理的分类方法是以工作原理划分的，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表达比较清楚，而且类别少，有利于传感器专业工作者对传感器进行深入研究分析。其缺点是不便于使用者根据用途选用。具体划分如下。

(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。

①电阻式传感器是利用变阻器将被测非电物理量转换为电阻信号的原理制成。电阻式传感器一般有电位器式、触点变阻式、电阻应变片式及压阻式等。电阻式传感器主要用于位移、压力、力、应变、力矩、气体流速、液位和液体流量等参数的测量。

②电容式传感器是利用改变电容的几何尺寸或改变介质的性质和含量，从而使电容量发生变化的原理制成的。电容式传感器主要用于压力、位移、液位、厚度及水分含量等参数的测量。

③电感式传感器是利用改变磁路几何尺寸、磁体位置来改变电感或互感的电感量或利用压



磁效应原理制成的。电感式传感器主要用于位移、压力、力、振动及加速度等参数的测量。

④磁电式传感器是利用电磁感应原理，把被测非电物理量转换成电物理量而制成的，主要用于流量、转速和位移等参数的测量。

⑤电涡流式传感器是利用金属在磁场中运动切割磁感线，在金属内形成涡流的原理而制成的。电涡流式传感器主要用于位移及厚度等参数的测量。

(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制成的。磁学式传感器主要用于位移、转矩等参数的测量。

(3)光电式传感器。光电式传感器在非电物理量电测及自动控制技术中占有重要的地位。它是利用光电器件的光电效应和光学原理制成的。光电式传感器主要用于光强、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、光电效应及霍尔效应等原理制成的。电势型传感器主要用于温度、磁通量、电流、速度、光通量及热辐射等参数的测量。

(5)电荷型传感器。电荷型传感器是利用压电效应原理制成的。电荷型传感器主要用于力及加速度的测量。

(6)半导体型传感器。半导体型传感器是利用半导体的压阻效应、内光电效应、磁电效应及半导体与气体接触产生物质变化等原理制成的。半导体型传感器主要用于温度、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的。谐振式传感器主要用来测量压力。

(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制成的。根据其电特性的形成不同，电化学传感器可分为电位式传感器、电导式传感器、电量式传感器、极谱(极化)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。

任务 1.3 传感器的性能指标

▶▶▶ 1. 静态特性

传感器在稳态下的输出—输入关系称为静态特性。

(1)线性度。理想传感器的输出量与输入量之间的关系应是线性的，如图 1-5(a)所示。但实际传感器输出量与输入量之间的关系大多是非线性的，如图 1-5(b)所示。各种传感器的非线性程度不相同。



线性度是传感器输出量与输入量之间的实际关系曲线偏离直线的程度，又称为非线性误差。线性度可表示为

$$E = \pm \frac{\Delta_{\max}}{y_{fs}} \times 100\% \tag{1-1}$$

式中， Δ_{\max} 为实际曲线与拟合直线之间的最大偏差； y_{fs} 为输出满量程值。

对传感器输出量与输入量之间的非线性应进行线性补偿处理，可以提高测量准确性。

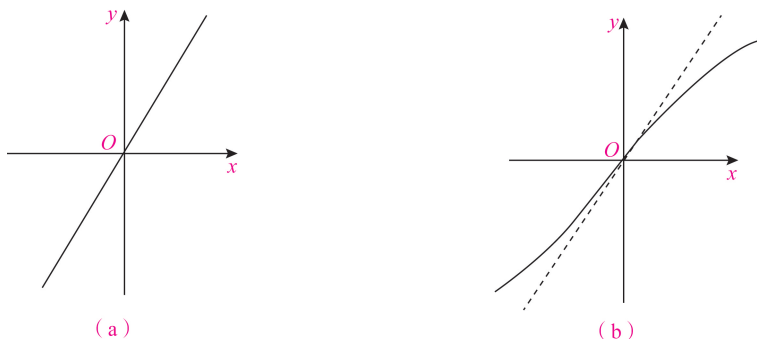


图 1-5 传感器的线性度

(2) 灵敏度。灵敏度是传感器在稳态下输出增量与输入增量的比值。对于线性传感器，其灵敏度就是它的静态特性的斜率，如图 1-6(a) 所示。其中

$$S_n = \frac{y}{x} \tag{1-2}$$

非线性传感器的灵敏度是一个随工作点而变的变量，如图 1-6(b) 所示，其表达式为

$$S_n = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{dy}{dx} = \frac{df(x)}{dx} \tag{1-3}$$

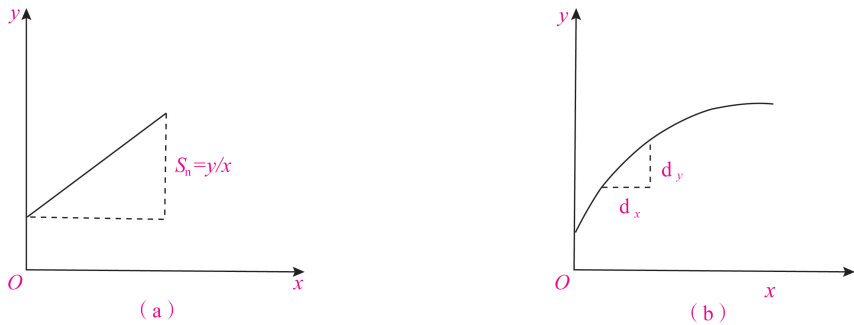


图 1-6 传感器的灵敏度

(3) 重复性。重复性是传感器在输入量按同一方向做全程多次测试时，所得特性曲线不一致性的程度，如图 1-7 所示。 Δ_{m_1} 和 Δ_{m_2} 即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，电路元器件老化、工作点漂移等原因产生。不重复性极限误差表示为

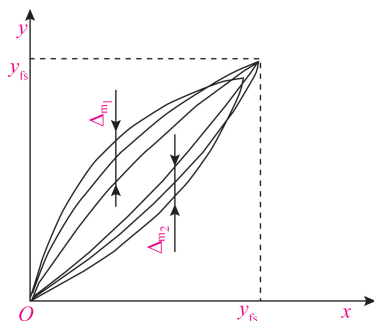


图 1-7 传感器的重复性

$$E_z = \frac{\Delta_{\max}}{y_{fs}} \times 100\% \quad (1-4)$$

式中, Δ_{\max} 为输出最大不重复误差; y_{fs} 为满量程输出值。

(4) 迟滞现象。迟滞现象是传感器在正向行程(输入量增大)和反向行程(输入量减小)期间, 输出—输入特性曲线不一致的程度, 如图 1-8 所示。

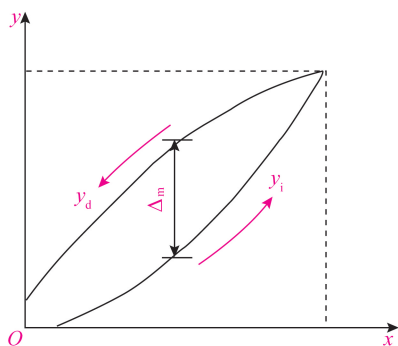


图 1-8 传感器的迟滞现象

在行程环中同一输入量 x_i 对应的不同输出量 y_i 、 y_d 的差值叫滞环误差, 最大滞环误差用 Δ_m 表示, 它与满量程输出值的比值称最大滞环率 E_{\max} , 即

$$E_{\max} = \frac{\Delta_m}{y_{fs}} \times 100\% \quad (1-5)$$

迟滞现象形成的主要原因与重复误差形成的原因类似。

(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表示, 它是指在室温条件下, 经过相当长的时间间隔, 如一天、一个月或一年, 传感器的输出与起始标定时输出之间的差异。通常又用其不稳定度来表征其输出的稳定程度。

(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。



2. 动态特性

在动态(快速变化)的输入信号情况下,要求传感器不仅能精确地测量信号的幅值,而且能测量出信号变化的过程。这就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。在研究传感器的动态特性时,通常从时域和频域两方面采用瞬态响应法和频率响应法来分析。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,称为阶跃响应特性和频率响应特性。

1) 阶跃响应特性

给传感器输入一个单位阶跃函数被测信号,即

$$u(t) = \begin{cases} 0, & t \leq 0 \\ 1, & t > 0 \end{cases} \quad (1-6)$$

其输出特性称为阶跃响应特性。传感器阶跃响应特性如图 1-9 所示。可衡量阶跃响应的几项指标如下。

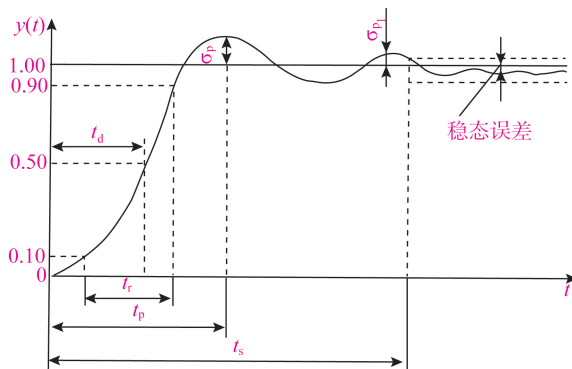


图 1-9 传感器阶跃响应特性

(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,说明传感器的相对稳定性。

(2)延迟时间 t_d 。阶跃响应达到稳态值 50% 所需要的时间。

(3)上升时间 t_r 。响应曲线从稳态值的 10% 上升到 90% 所需要的时间。

(4)峰值时间 t_p 。响应曲线上升到第一个峰值所需要的时间。

(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 $\pm(2\% \sim 5\%)$ 所需要的时间,也称为过渡过程时间。

2) 频率响应特性

给传感器输入各种频率不同而幅值相同、初相位为零的正弦函数被测输入量,其输出量的幅值和相位与频率之间的关系,则为频率响应曲线。

如图 1-10 所示为由弹簧阻力器组成的机械压力传感器。

系统输入量为作用力 $F(t)$, 令其与弹簧刚度成正比, $F(t) = Kx(t)$ 。系统输出量为位