

高等学校工程应用型 “十二五” 系列规划教材



传感技术应用基础

饶志强 钮文良 编著



科学出版社

高等学校工程应用型“十二五”系列规划教材

传感技术应用基础

饶志强 钮文良 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书系统地介绍了传感器的基本结构、工作原理、特性及相应的测量电路。全书共8章,第1章介绍了传感器的基本概念及传感器的静、动态特性;第2~8章分别介绍了电阻式、电容式、电感式、压电式、热电式、气敏式、湿敏式、辐射式、光电式、光纤式传感器的结构、工作原理及应用。书中每章都提供了大量的应用实例,并且将一些实际案例通过二维码技术实现,读者可扫描二维码参考这些案例。每章后还附有课后习题。

全书按工作原理分章,条理清晰,内容的选取反映了我国当前工业生产和科研的实际,同时加强了传感器的特性分析、精度分析及实际应用。本书可作为理工科院校电气、电子、自动化、通信、应用物理、计算机应用、物联网等工程应用型本科教材,也可作为其他相关专业技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

传感技术应用基础 / 饶志强, 钮文良编著. —北京: 科学出版社, 2016.8
高等学校工程应用型“十二五”系列规划教材
ISBN 978-7-03-049469-6

I. ①传… II. ①饶… ②钮… III. ①传感器—高等学校—教材
IV. ①TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 179850 号

责任编辑: 潘斯斯 张丽花 / 责任校对: 郭瑞芝

责任印制: 徐晓晨 / 封面设计: 迷底书装

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>



北京中石油彩色印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 8 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2016 年 8 月第一次印刷 印张: 9 1/2

字数: 225 000

定价: 29.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

传感技术是测量技术、半导体技术、计算机技术、信息处理技术、微电子学、光学、声学、精密机械、仿生学和材料科学等众多学科相互交叉的综合性和高新技术密集型前沿技术之一，是现代新技术革命和信息社会的重要基础，是自动检测和自动控制技术不可缺少的重要组成部分。目前，传感技术已成为我国国民经济不可或缺的支柱产业的一部分。传感器在工业部门的应用普及率已被国际社会作为衡量一个国家智能化、数字化、网络化的重要标志。

本书通过精选内容、归类编排的方法增强传感器教学的系统性，有利于读者对传感器的现状和发展有一个完整的概念。鉴于传感器种类繁多，涉及的学科广泛，不可能也没有必要对各种具体传感器逐一剖析。本书在编写中力求突出共性技术基础，对各类传感器则注重机理分析，筛选我国当前工业生产和科研实际应用广泛的内容，纳入重点编写。

全书共8章，内容包括传感器的基本概念、传感器的特性及测量电路分析、电阻式传感器、电容式传感器、电感式传感器、压电式传感器、热电式传感器、气敏式传感器、湿敏式传感器、辐射式传感器、光电式传感器、光纤式传感器等。注重理论与实践相结合，力求能用一定理论去解决实际问题；既能掌握一定的先进技术，又能着眼当前的技术应用服务。

与此同时，本书将一些实际案例通过二维码技术实现，读者可扫描二维码参考这些案例。

本书可作为高等学校电气、电子、检测技术、仪器仪表、自动化、物联网工程等专业的教材，也可作为跨专业选修课教材。除绪论外，传感器各章均具有一定的独立性。可供有关专业本科生、大专生和研究生选用；同时，也可作为有关工程技术人员的参考书。

本书由饶志强、钮文良编著，负责总体设计和统稿；龙建雄、路铭、陈景霞、肖琳、申海伟、杜丽娟参编，采用集体讨论、分工编写、交叉修改的方式进行。

本书的编写得到了北京联合大学人才培养定额专项“跨学科多层次可持续人才培养模式研究”的资助。与此同时得到了北京联合大学应用科技学院的教师和相关领导的大力支持。编写时参考了诸多书籍，在此对参考文献的作者表示感谢！最后，感谢科学出版社各位编辑为本书的出版倾注了大量的心血和热情，也正是他们前瞻性的眼光，才让读者有机会看到本书。

由于本书的编写风格和内容是一种新的尝试，加之作者水平有限，书中难免存在疏漏之处，欢迎读者批评指正，可通过电子邮箱 yykjtzhqiang@bnu.edu.cn 与作者进行交流。

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 传感器的定义及作用	1
1.2 传感器的分类	4
1.3 传感器的基本特性	4
1.4 传感器的动态模型	8
习题	9
第 2 章 电阻式传感器	10
2.1 传感器的弹性敏感元件	10
2.2 应变式电阻传感器	11
2.2.1 应变效应	11
2.2.2 电阻应变片的结构和工作原理	12
2.2.3 电阻应变片的温度误差及其补偿方法	12
2.2.4 电阻应变片的测量电路	15
2.3 电阻式传感器的应用	18
2.4 应变片的应用	20
习题	24
第 3 章 电容式传感器	26
3.1 电容式传感器的工作原理	26
3.2 电容式传感器的等效电路	30
3.3 电容式传感器的测量电路	31
3.4 电容式传感器应用举例	34
习题	36
第 4 章 电感式传感器	37
4.1 变磁阻式传感器	38
4.1.1 自感式传感器	38
4.1.2 差动自感传感器	41
4.2 互感(差动变压器)式传感器	43
4.3 电涡流式传感器	48
4.4 电感式传感器应用举例	50

4.5 电感式传感器的应用	51
4.5.1 位移测量	51
4.5.2 压力测量	52
习题	60
第 5 章 压电式传感器	62
5.1 压电式传感器原理	62
5.1.1 压电效应	62
5.1.2 压电式传感器等效电路和测量电路	63
5.1.3 测量电路	64
5.1.4 压电式传感器的应用	66
5.2 热电式传感器	69
5.2.1 热电偶	69
5.2.2 热电偶测温原理	71
5.2.3 热电偶基本定律	71
5.2.4 热电偶的误差及其补偿措施	73
5.2.5 热电偶的材料与种类	75
5.2.6 热电偶实用测量电路	75
5.3 热电阻	78
5.4 热敏电阻	79
5.5 PN 结型温度传感器	81
5.6 热电式温度传感器应用举例	82
5.6.1 高精度 K 型热电偶数字温度计	82
5.6.2 热电阻式传感器的应用	86
习题	88
第 6 章 气敏和湿敏传感器	90
6.1 气敏传感器	90
6.2 湿敏传感器	91
6.2.1 湿度的定义	91
6.2.2 湿敏传感器的主要参数	92
6.2.3 湿敏传感器的测量电路	92
6.3 气敏传感器的应用	93

6.3.1 换气扇的自动控制电路·····93	7.4 超声波应用电路·····109
6.3.2 吸排油烟机自动控制电路·····93	习题·····116
6.3.3 家用气体报警器·····95	第8章 光电式与光纤传感器·····117
6.3.4 具有温湿度补偿的气体报警器·····95	8.1 光电效应·····117
6.3.5 气体/烟雾报警器·····96	8.2 外光电效应的光电器件·····118
6.3.6 气敏传感器在汽车上的应用·····97	8.3 内光电效应的光电器件·····119
6.4 一种简单的湿度控制器的设计·····100	8.4 光电耦合器件·····121
6.4.1 室内湿度控制器·····100	8.5 光电传感器的应用·····122
6.4.2 汽车玻璃挡板结露控制电路·····101	8.6 光导纤维(光纤)传感器·····126
6.4.3 录像机结露报警控制电路·····102	8.6.1 光纤结构·····127
习题·····102	8.6.2 斯涅耳定理·····127
第7章 辐射式传感器·····103	8.6.3 光纤的传(导)光原理·····127
7.1 红外辐射传感器·····103	8.6.4 光纤传感器结构原理及分类·····128
7.1.1 红外辐射的基本特点·····103	8.6.5 光纤传感器的调制原理·····130
7.1.2 红外辐射的基本定律·····104	8.6.6 光电传感器与光纤传感器应用 举例·····130
7.1.3 红外探测器(传感器)·····104	8.7 光纤光栅传感器的应用·····131
7.2 超声波传感器·····105	8.7.1 光纤光栅传感器的优势·····131
7.2.1 超声波及其波形·····106	8.7.2 光纤光栅的传感应用·····131
7.2.2 超声波的传播速度·····106	8.8 现状与展望·····144
7.2.3 超声波的物理性质·····107	习题·····144
7.2.4 超声波传感器·····108	参考文献·····146
7.2.5 超声波传感器的应用·····108	
7.3 辐射式传感器应用举例·····108	

第1章 绪 论

1.1 传感器的定义及作用

1. 传感器的定义

传感器是能感受规定的被测量并按照一定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直接感受被测量的部分，转换元件是指传感器能将敏感元件的输出转换为适于传输和测量的电信号部分。

有些国家和有些科学领域，将传感器称为变换器、检测器或探测器等。应该说明，并不是所有的传感器都能明显区分敏感元件与转换元件两个部分，而是二者合为一体。例如，半导体气体、湿度传感器等，它们一般都是将感受的被测量直接转换为电信号，没有中间转换环节。

传感器输出信号有很多形式，如电压、电流、频率、脉冲等，输出信号的形式由传感器的原理确定。

2. 传感器的组成

通常由敏感元件和转换元件组成，但是由于传感器输出信号一般都很微弱，需要由信号调节与转换电路将其放大或变换为容易传输、处理、记录和显示的形式。随着半导体器件与集成技术在传感器中的应用，传感器的信号调节与转换可以安装在传感器的壳体里或与敏感元件一起集成在同一芯片上。因此，信号调节与转换电路以及所需电源都应作为传感器的组成部分。

常见的信号调节与转换电路有放大器、电桥、振荡器、电荷放大器等，它们分别与相应的传感器相配合。

3. 传感器技术的发展动向

传感器技术所涉及的知识非常广泛，渗透到各个学科领域。但是它们的共性是利用物理定律和物质的物理、化学和生物特性，将非电量转换成电量。所以，如何采用新技术、新工艺、新材料以及探索新理论达到高质量的转换，是总的发展途径。

当前，传感器技术的主要发展动向，一是开展基础研究，发现新现象，开发传感器的新材料和新工艺；二是实现传感器的集成化与智能化。

4. 测量的定义

测量（measurement）是人们借助于仪器、设备，采用一定的方法，对客观事物取得某种结果的认识过程。从概念中可以看出测量是把一个量（被测量）和作为比较单位的另一个量（标准）相比较的过程。因此，测量过程实际上就是一个比较过程。

5. 检测技术的定义

检测技术属于信息科学的范畴，与计算机技术、自动控制技术和通信技术构成完整的信息技术学。测量是指确定被测对象属性量值为目的的全部操作，测试是具有实验性质的测量，或者可以理解为测量和试验的综合。

6. 现代信息技术

感测技术——获取信息的技术（感官）；通信技术——传递信息的技术（神经）；计算机技术——处理信息的技术（大脑）；控制技术——利用信息的技术（大脑的决策）。

（1）计算机技术+传感器技术=智能传感器。

（2）计算机技术+通信技术=计算机网络技术。

（3）计算机网络技术+智能传感器=网络化智能传感器。

7. 现代测控技术

（1）检测系统：它单纯以测试或检测为目的，主要实现数据的采集，所以又称为数据采集系统。

（2）控制系统：它单纯以控制为目的，使控制对象实现预期的要求。

（3）测控系统：它是以微机为核心，测控一体化的系统。

8. 采集系统概述

（1）传感器：用于完成信号的获取，它将被测参量（非电量或电量）转换成相应的可用信号（电信号）。

（2）信号调理作用：其一是放大，将信号放大到与数据采集卡中的 A/D 转换器相适配；其二是预滤波，抑制干扰噪声信号的高频分量。

（3）通用的数据采集系统：数据采集（DAQ）是指从传感器和其他待测设备等模拟和数字被测单元中自动采集非电量或者电量信号，送到上位机中进行分析、处理，如图 1-1 所示。数据采集系统是结合基于计算机或者其他专用测试平台的测量软硬件产品来实现灵活的、用户自定义的测量系统，其构成如图 1-2 所示。

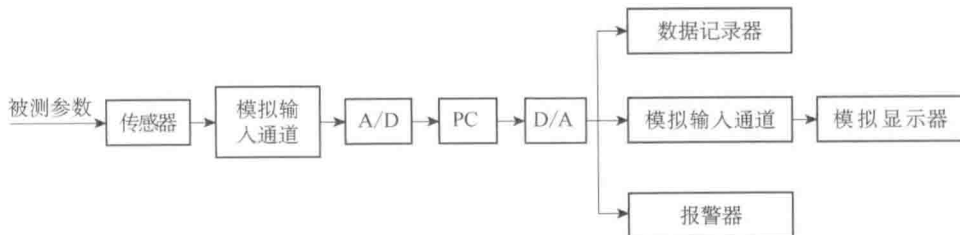


图 1-1 数据采集系统的基本组成框图

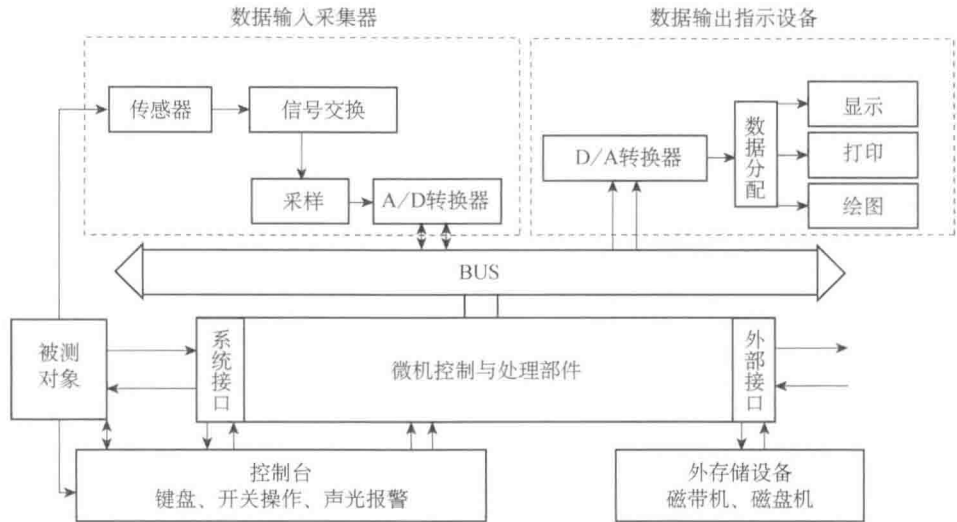


图 1-2 数据采集系统的功能结构框图

一台计算机可搭载多块板卡，一块板卡可连接多路信号采集，可在一块板卡上实现不同类型的信号采集，如图 1-3 所示。

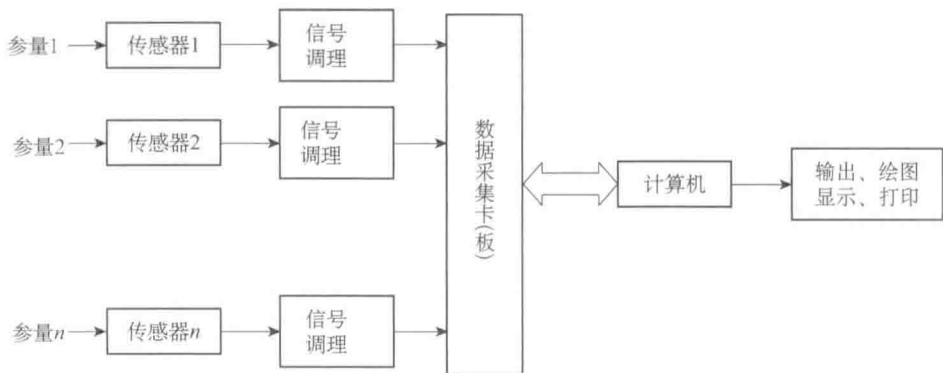


图 1-3 数据采集连接

(4) 数据采集卡(板)的主要功能：一是由衰减器和增益可控放大器进行量程自动变换；二是由多路切换开关完成对多点多通道信号的分时采样；三是将信号的采样值转换为幅值离散的数字量。

9. 闭环控制型

闭环控制是控制论的一个基本概念，是指作为被控的输出以一定方式返回到作为控制的输入端，并对输入端施加控制影响的一种控制关系。在控制论中，闭环通常指输出端通过“旁链”方式回馈到输入，称为闭环控制。输出端回馈到输入端并参与对输出端再控制，这才是闭环控制的目的，这种目的是通过反馈来实现的，如图 1-4 所示。

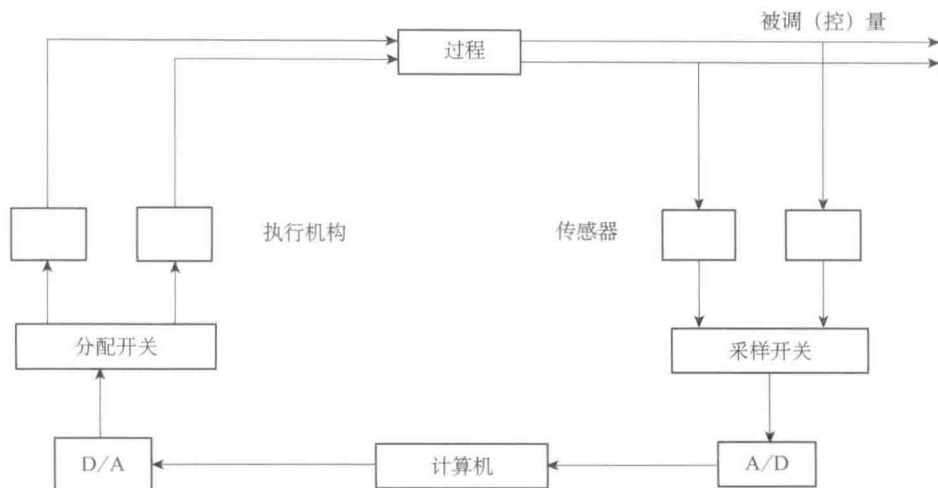


图 1-4 闭环控制框图

1.2 传感器的分类

(1) 按被测量分类：传感器分为温度、湿度、压力、位移、速度、加速度等传感器。

(2) 按测量原理分类：传感器的测量原理主要基于电磁原理和固体物理学原理。

根据变电阻原理：传感器分为电位器式和应变式电阻传感器。

根据变磁阻原理：传感器分为电感式、差动变压器式和电涡流式传感器。

根据半导体理论：传感器分为半导体力敏、热敏、光敏和气敏等固态传感器。

(3) 按结构型和物性型分类：传感器分为结构型传感器和物性型传感器。

1.3 传感器的基本特性

1. 传感器的静态模型

传感器的静态模型是指在静态信号（输入信号不随时间变化或变化极其缓慢）情况下，传感器的输出量与输入量之间的函数关系，如图 1-5 所示。

图 1-5 输入-输出

$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + \cdots + a_nx^n$ ，如图 1-6 (a) 所示，其中， a_0 为零位输出； a_1 为灵敏度，常用 K 表示； $a_2, a_3, \cdots, a_n$ 为非线性项的待定系数。

(1) 理想线性： $y = a_1x$ ，如图 1-6 (b) 所示。

(2) 具有 X 偶次阶项： $y = a_1x + a_2x^2 + a_4x^4 + \cdots$ ，如图 1-6 (c) 所示。

(3) 具有 X 奇次阶项： $y = a_1x + a_3x^3 + a_5x^5 + \cdots$ ，如图 1-6 (d) 所示。

借助实验方法确定传感器静态特性（校准特性）的过程，如图 1-6 所示。

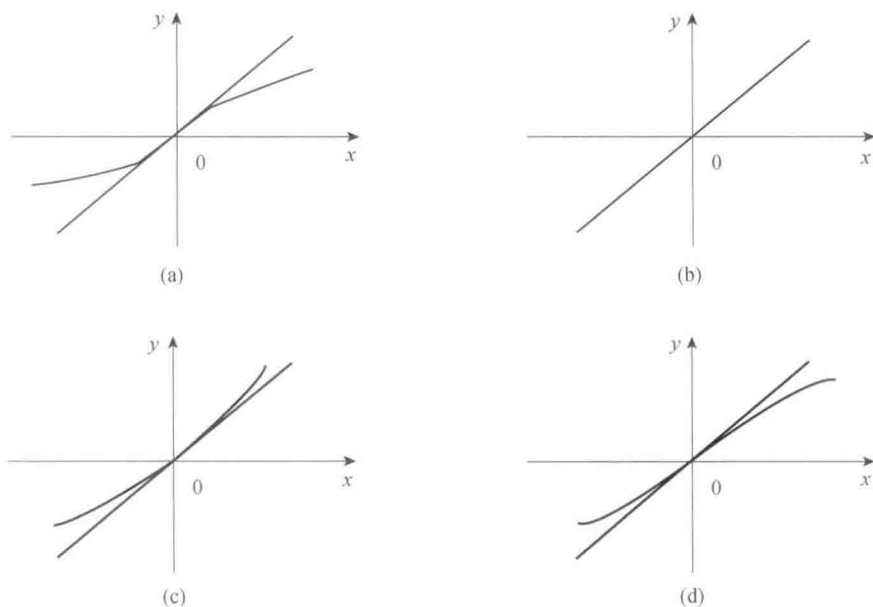


图 1-6 静态信号特性图

2. 传感器的静态特性

传感器的静态特性是指在静态信号作用下，所呈现出来的输入-输出特性。

传感器的静态特性主要由下面几种性能指标来描述。

1) 线性度（非线性误差）

$$\delta_L = \pm \frac{\Delta Y_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\%$$

式中， Y_{FS} 为传感器的满量程输出。

注：线性度（非线性误差）是以一定的拟合直线为基准计算的，所选取的拟合直线不同，则计算出的线性度（非线性误差）不同，如图 1-7 所示。

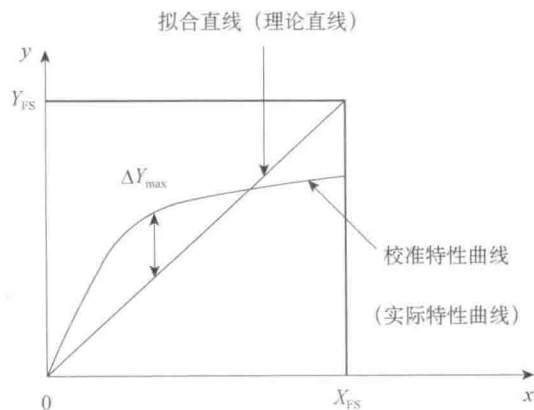


图 1-7 线性度

两种常用的拟合直线的方法（回归分析）：端基法、最小二乘法等。

最小二乘法（拟合精度最高）

令拟合直线方程为 $y = a_0 + Kx$ ，假设实际校准点有 n 个，即 $(x_1, Y_1), (x_2, Y_2), \dots, (x_n, Y_n)$ 。

任一校准数据 Y_i 与拟合直线上对应的理想值 y_i 之间的差为

$$\Delta_i = Y_i - y_i = Y_i - (a_0 + Kx_i)$$

拟合原则

如何选择 a_0 , K 的值，使 $J = \sum_{i=1}^n \Delta_i^2 \rightarrow \min$ 。

即

$$\frac{\partial}{\partial K} \sum_{i=1}^n \Delta_i^2 = 2 \sum_{i=1}^n (Y_i - a_0 - Kx_i)(-x_i) = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial a_0} \sum_{i=1}^n \Delta_i^2 = 2 \sum_{i=1}^n (Y_i - a_0 - Kx_i)(-1) = 0$$

由此可得

$$a_0 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 \sum_{i=1}^n y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n (x_i Y_i)}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2}$$

$$K = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n Y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2}$$

测量范围和量程

测量上限：传感器所能测量的最大被测量（输入量）的数值。

测量下限：传感器所能测量的最小被测量（输入量）的数值。

测量范围：测量下限~测量上限。量程=测量上限-测量下限。

例：有一力敏传感器。

测量范围为：-5~+10N 量程为：15N

2) 灵敏度

灵敏度是指某方法对单位浓度或单位量待测物质变化所致的响应量变化程度，它可以用仪器的响应量或其他指示量与对应的待测物质的浓度或量之比来描述。

灵敏度指示器的相对于被测量变化的位移率，灵敏度是衡量物理仪器的一个标志，特别是电学仪器注重仪器灵敏度的提高。通过灵敏度的研究，可加深对仪表的构造和原理的理解，如图 1-8 所示。

$$K = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta x} = \left. \frac{dy}{dx} \right|_{x=x_0}$$

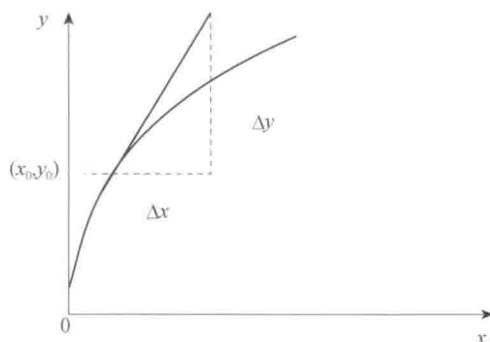


图 1-8 灵敏度

3) 分辨率

输入分辨率

在传感器的全部测量范围内都能产生可观测的输出量变化的输入量的最小变化量 $\Delta X_{\min}$ ，以满量程输入的百分比表示，如图 1-9 所示。

$$R_x = \frac{\Delta X_{\min}}{X_{FS}} \times 100\%$$

式中， $\Delta X_{\min}$ 为在规定测量范围所能检测输入量的最小变化量； X_{FS} 为规定的测量范围。

阈值（最小检测量）

阈值（最小检测量）包括灵敏限、灵敏阈、失灵区、死区。

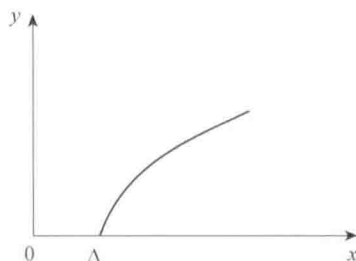


图 1-9 最小变化量

4) 精确度（精度）

精度是测量值与真值的接近程度，包含精密度和准确度两个方面。每一种物理量要用数值表示时，必须先要制定一种标准，并选定一种单位。

精密度(δ)：说明测量结果的分散性。

正确度(ε)：说明测量结果偏离真值大小的程度。

精确度(τ)： $\tau = \delta + \varepsilon$ 。

5) 迟滞

迟滞特性表明检测系统在正向（输入量增大）和反向（输入量减小）行程期间，输入-输出特性曲线不一致的程度。对同样大小的输入量，检测系统在下行、反行程中，往往对应两个大小不同的输出量。通过实验找出输出量的这种最大差值，并以满量程输出 Y_{FS} 的百分

数表示, 就得到了迟滞的大小, 如图 1-10 所示。

$$\delta_H = \frac{\Delta m}{Y_{FS}} \times 100\%$$

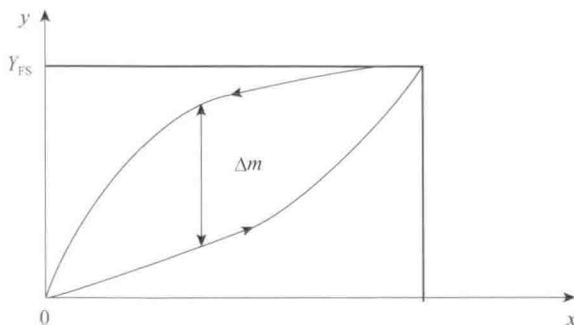


图 1-10 迟滞

6) 零漂和温漂

零漂和温漂是表示传感器性能稳定性的重要指标。

零点漂移 (零漂)

传感器无输入时, 输出偏离零值的大小。

$$\text{零漂} = \frac{\Delta Y_0}{Y_{FS}} \times 100\%$$

式中, ΔY_0 为最大零点偏差。

温漂

温度变化时, 传感器输出值的偏离程度。

$$\text{温漂} = \frac{\Delta Y_{\max}}{Y_{FS} \cdot \Delta T} \times 100\%$$

式中, $\Delta Y_{\max}$ 为输出最大偏差; ΔT 为温度变化范围。

1.4 传感器的动态模型

传感器的动态模型是指传感器在准动态信号或动态信号 (输入信号随时间而变化的量) 作用下, 描述其输出和输入信号的一种数学关系。

通常采用微分方程和传递函数等来描述。

1) 传感器的动态特性

传感器的动态特性是反映传感器对随时间变化的输入量的响应特性。

通常采用阶跃响应法 (时域)、频率响应法 (频域) 来分析。

2) 传感器的发展趋向

半导体技术已进入超大规模集成化阶段, 各种制造工艺、材料性能的研究已达到相当高的水平。

纳米科学是一门集基础科学与应用科学于一体的新兴科学。主要包括纳米电子学、纳米

材料、纳米生物学等学科。

纳米科学具有很广阔的应用前景，它将促使现代科学技术从目前的微米（ $1\mu\text{m}=10^{-6}\text{m}$ ）尺度（微型结构）上升到纳米（毫微米， $1\text{nm}=10^{-9}\text{m}$ ）或原子尺度。已研制出碳分子电线、纳米开关、纳米马达（直径为 10nm ）等。

从发展前景来看，具有以下几个特点：①传感器的固态化；②传感器的集成化和多功能化；③传感器的图像化；④传感器的智能化。

传感器的发展趋向为开展基础研究，重点研究传感器的新材料、新工艺，实现传感器的智能化。

习 题

1. 一个可供实用的传感器由哪几部分构成？各部分的作用是什么？试用框图示出你所理解的传感器系统。

2. 什么是传感器、自动检测技术？

3. 简述传感器的分类。

4. 什么是传感器的静态特性和动态特性？为什么要把传感器的特性分为静态特性和动态特性？

5. 有一台测量压力的仪表，测量范围为 $0\sim 106\text{Pa}$ ，压力 p 与仪表输出电压之间的关系为

$$U_o = a_0 + a_1 p + a_2 p^2$$

式中， $a_0=2\text{mV}$ ， $a_1=10\text{mV}/(10^5\text{Pa})$ ， $a_2=-0.5\text{mV}/(10^5\text{Pa})^2$ 。求：

(1) 该仪表的输出特性方程。

(2) 画出输出特性曲线示意图（ x 轴、 y 轴均要标出单位）。

(3) 该仪表的灵敏度表达式。

第2章 电阻式传感器

电阻应变式传感器是一种利用电阻应变片将应变转换为电阻的传感器。任何被测量只要能转换成应变，都可以利用应变片进行测量。电阻应变片具有悠久的历史，是应用最广泛的传感器之一。它具有以下几个特点。

(1) 精度高、范围广。测力传感器的量程可从零点几 N 至几百 kN，精度可达 0.05%，测量范围可由数 $\mu\epsilon$ (微应变， $1\mu\epsilon$ 相当于长度为 1m 的试件，其变形为 $1\mu\text{m}$ 时的相对变形量，即 $1\mu\epsilon=1\times 10^{-6}$) 至数千 $\mu\epsilon$ 。

(2) 适合动、静态测量。一般应变式传感器的响应时间为 10^{-7}s ，半导体应变式传感器可达 10^{-11}s 。

(3) 结构简单，尺寸小，性能稳定可靠。

(4) 存在非线性，抗干扰能力较差。



2.1 传感器的弹性敏感元件

弹性体的敏感元件利用弹性体的弹性形变将被测量物体由一种物理状态转换成另一种物理状态，直接作用测量和被测量的关系，如图 2-1 所示。

物体的变形：在外力作用下，物体将产生尺寸和形状的变化。

弹性变形：在外力作用下，物体将产生尺寸和形状的变化，当去掉外力后，物体即恢复原来的尺寸和形状，这种变形称为弹性变形。

弹性敏感元件：利用弹性变形来进行测量和变换的元件称为弹性敏感元件。

弹性敏感元件的弹性特性

弹性敏感元件的基本特性可用刚度和灵敏度来表征。刚度是对弹性敏感元件在外力作用下变形大小的定量描述，即产生单位位移所需要的力（或压力）。灵敏度是刚度的倒数，它表示单位作用力（或压力）使弹性敏感元件产生形变的大小。实际的弹性材料在不同程度上普遍存在弹性滞后和弹性后效现象。弹性滞后是指弹性材料在加载、卸载的正反行程中，位移曲线是不重合的，构成一个弹性滞后环，即当载荷增加或减少至同一数值时位移之间存在一差值，如图 2-2 所示。弹性滞后的存在表明在卸载过程中没有完全释放外力所做的功，在一

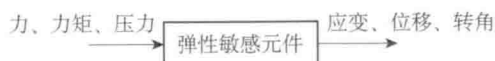


图 2-1 敏感元件输入-输出

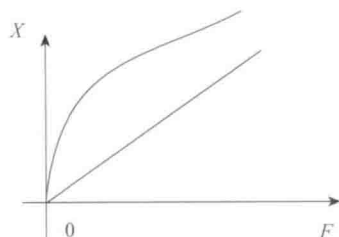


图 2-2 差值

个加卸载的循环中所消耗的能量相当于滞后环包围的面积。弹性后效是指载荷在停止变化之后,弹性元件在一段时间之内还会继续产生类似蠕动的位移,又称弹性蠕变。这两种现象在弹性元件的工作过程中是相随出现的,其后果是降低元件的品质因素并引起测量误差和零点漂移,在传感器的设计中应尽量使它们减小。

1) 灵敏度

$$K = \frac{dx}{dF}$$

2) 刚度

$$S = \frac{dF}{dx} = \frac{1}{K}$$



2.2 应变式电阻传感器

用于测量力、力矩、压力、加速度、重量等非电量参数,如图 2-3 所示。



图 2-3 应变构成

2.2.1 应变效应

导体或半导体材料在受到外界力(拉力或压力)作用时,产生机械变形,引起其阻值变化,这种现象称为应变效应。

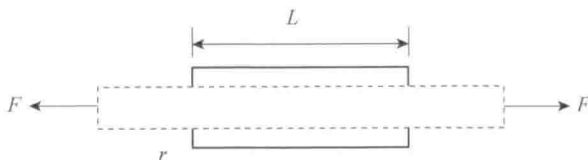


图 2-4 应变效应

根据

$$R = \rho \frac{l}{s}$$

式中, ρ 为金属丝电阻率; l 为金属丝长度; s 为金属丝截面积。

$$\ln R = \ln \rho + \ln l - \ln s$$

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l} - \frac{ds}{s}$$

$$s = \pi r^2 \Rightarrow \frac{ds}{s} = \frac{2\pi r dr}{\pi r^2} = 2 \frac{dr}{r}$$

$$\varepsilon_x = \frac{dl}{l} \quad (\text{轴向应变})$$

$$\varepsilon_y = \frac{dr}{r} \quad (\text{径向应变})$$

根据材料力学,有

$$\varepsilon_y = -\mu \varepsilon_x$$