

21世纪高职高专系列规划教材

通信技术专业



高职高专“十二五”规划教材



传感器技术及应用

CHUANGANQI JISHU JI YINGYONG

主 编◎张 彪

副主编◎胡 慧

主 审◎田庆龙

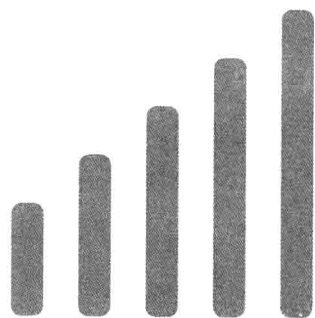
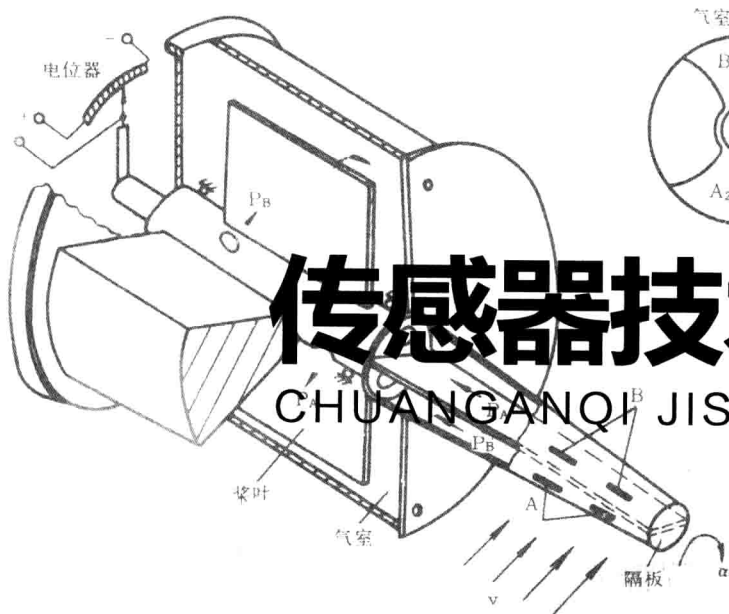


北京师范大学出版集团
BEIJING NORMAL UNIVERSITY PUBLISHING GROUP
北京师范大学出版社

21世纪高职高专系列规划教材

通信技术专业

高职高专“十二五”规划教材



传感器技术及应用

CHUANGANQI JISHU JI YINGYONG

主 编◎张 彪

副主编◎胡 慧

参 编◎李建娜 张 玲

党华丽 张金生

贾爱茹 李 辉

主 审◎田庆龙



北京师范大学出版集团
BEIJING NORMAL UNIVERSITY PUBLISHING GROUP
北京师范大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

传感器技术及应用 / 张彪主编. —北京: 北京师范大学出版社, 2012.2

(21世纪高职高专系列规划教材)

ISBN 978-7-303-13944-6

I. ①传… II. ①张… III. ①传感器—高等职业教育—教材 IV. ①TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第264248 号

出版发行: 北京师范大学出版社 www.bnup.com.cn

北京新街口外大街19号

邮政编码: 100875

印 刷: 保定市中画美凯印刷有限公司

经 销: 全国新华书店

开 本: 184 mm × 260 mm

印 张: 12.5

字 数: 300 千字

版 次: 2012 年 2 月第 1 版

印 次: 2012 年 2 月第 1 次印刷

定 价: 25.00 元

策划编辑: 周光明

责任编辑: 周光明

美术编辑: 高 霞

装帧设计: 锋尚设计

责任校对: 李 菡

责任印制: 孙文凯

版权所有 侵权必究

反盗版、侵权举报电话: 010—58800697

北京读者服务部电话: 010—58808104

外埠邮购电话: 010—58808083

本书如有印装质量问题, 请与印制管理部联系调换。

印制管理部电话: 010—58800825

前言

传感器技术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。近两年，随着物联网技术的发展，传感器的应用越来越广。

本书讲述了工业中常用传感器的工作原理、结构及应用实例。同时为了满足高等职业教育的需要，本书在讲解基本理论知识的同时，侧重于常用传感器的应用实例，突出了高职教材的实用性。

全书共有 10 章内容：第 1 章讲述了传感器技术的基础知识、介绍了传感器技术领域较新的无线传感器网络技术及传感器的发展趋势。第 2~8 章系统介绍了电阻式、电感式、电容式、压电式、磁电式、光电式、热电式等传感器的工作原理、基本结构、测量电路和大量的应用实例。第 9 章介绍了几类较新型的传感器，包括生物传感器、机器人传感器和微波传感器。第 10 章介绍了传感器输出信号的特点、信号的检测与处理以及与微控制器的接口。

本书的主要特点：

1) 根据高职学生的特点，合理安排理论知识与实践知识的比例，注重高职教材的实用性；

2) 符合学生的学习特点及认知规律，对基本理论知识的讲解清晰简洁，同时注重相关技术在生产实际中的应用；

3) 内容丰富，针对通信、电子专业的就业需求，讲述了工业中常用传感器的工作原理、结构及应用实例，并紧随经济与技术的发展，将传感器新技术引入教材；

本书既可以作为通信技术专业、应用电子技术专业以及机电一体化、自动化等相关专业高职高专学生的教材，也可以作为相关专业工程技术人员的参考书。

本书由张彪任主编，负责全书的统稿；胡慧任副主编并负责全书的初审；第 1 章由天津铁道职业技术学院张彪编写，第 2 章、第 7 章的第 1 节由天津铁道职业技术学院胡慧编写，第 3、6 章由天津天狮学院李建娜编写，第 4 章由天津铁道职业技术学院张玲编写，第 5、8 章由天津铁道职业技术学院党华丽编写，第 7 章的第 2 至 5 节由天津铁道职业技术学院张金生编写，第 9 章由天津铁道职业技术学院贾爱茹编写，第 10 章由天津冶金职业技术学院李辉编写。全书由第二炮兵工程设计研究院科技处处长、高级工程师田庆龙审订。

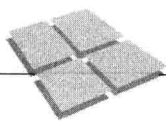
由于时间仓促，加之编者水平有限，书中难免有疏漏之处，恳请各位读者批评指正。

编者

2011 年 12 月

目 录

第 1 章 概 论	(1)		
1.1 绪言	(1)		
1.1.1 传感器的定义与作用	(1)		
1.1.2 传感器的组成	(2)		
1.2 传感器的分类	(2)		
1.3 传感器的基本特性	(2)		
1.3.1 传感器的静态特性	(3)		
1.3.2 传感器的动态特性	(4)		
1.4 传感器的性能指标及改善性能方法	(7)		
1.4.1 传感器的性能指标	(7)		
1.4.2 改善传感器性能指标的方法	(7)		
1.5 传感器网络技术	(8)		
1.5.1 传感器网络概述	(9)		
1.5.2 传感器网络的组成及特点	(10)		
1.5.3 传感器网络的应用	(12)		
1.6 传感器的发展趋势	(13)		
习题	(13)		
第 2 章 电阻式传感器	(14)		
2.1 电位器式传感器	(14)		
2.1.1 电位器式传感器的工作原理	(14)		
2.1.2 电位器式传感器的应用	(16)		
2.2 电阻应变式传感器	(17)		
2.2.1 电阻应变式传感器的工作原理	(18)		
2.2.2 电阻应变式传感器的应用	(22)		
2.3 气敏电阻传感器	(25)		
2.3.1 气敏电阻传感器的工作原理	(25)		
2.3.2 气敏电阻传感器的应用	(27)		
2.4 湿敏电阻传感器	(29)		
2.4.1 湿敏电阻传感器的工作原理	(30)		
2.4.2 湿敏电阻传感器的应用	(33)		
习题	(34)		
第 3 章 电感式传感器	(36)		
3.1 自感式电感传感器	(36)		
3.1.1 工作原理	(36)		
3.1.2 测量转换电路	(38)		
3.1.3 自感式电感传感器的应用	(39)		
3.2 互感式电感传感器	(41)		
3.2.1 工作原理	(41)		
3.2.2 测量转换电路	(42)		
3.2.3 差动变压器式传感器的应用	(44)		
3.3 电涡流式传感器	(46)		
3.3.1 工作原理	(46)		
3.3.2 测量转换电路	(47)		
3.3.3 电涡流式传感器的应用	(49)		
习题	(51)		



第4章 电容式传感器 (52)

4.1 电容式传感器的工作原理及结构类型 (52)

4.1.1 电容式传感器的工作原理 (52)

4.1.2 电容式传感器的结构类型 (52)

4.2 电容式传感器测量电路 (55)

4.2.1 运算放大器电路 (56)

4.2.2 电桥式测量电路(调幅电路) (56)

4.2.3 调频式测量电路 (56)

4.2.4 脉冲宽度调制电路 (57)

4.2.5 二极管双T型网络 (58)

4.2.6 谐振电路 (60)

4.2.7 影响电容式传感器精度的因素及提高措施 (60)

4.3 电容式传感器的应用 (61)

4.3.1 电容式测厚仪 (61)

4.3.2 电容式差压传感器 (62)

4.3.3 电容式加速度传感器 (62)

4.3.4 电容传声器 (63)

4.3.5 电容式指纹传感器 (63)

习题 (64)

第5章 压电式传感器 (65)

5.1 压电效应及压电材料 (65)

5.1.1 石英晶体 (66)

5.1.2 压电陶瓷 (67)

5.1.3 高分子压电材料 (69)

5.2 压电式传感器的连接及变形方式 (69)

5.3 压电式传感器测量电路 (71)

5.3.1 压电式传感器的等效电路 (71)

5.3.2 压电式传感器的测量电路 (72)

5.4 压电式传感器的应用 (74)

5.4.1 压电式测力传感器 (74)

5.4.2 压电式加速度传感器 (74)

5.4.3 压电式血压传感器 (75)

5.4.4 玻璃破碎报警装置 (76)

习题 (76)

第6章 磁敏式传感器 (77)

6.1 霍尔传感器 (77)

6.1.1 霍尔效应及霍尔元件 (77)

6.1.2 霍尔集成传感器 (79)

6.2 磁敏电阻 (81)

6.3 结型磁敏管 (82)

6.4 磁敏式传感器的应用 (84)

6.4.1 霍尔传感器的应用 (84)

6.4.2 磁敏电阻的应用 (86)

6.4.3 结型磁敏管传感器的应用 (87)

习题 (88)

第7章 光电式传感器 (89)

7.1 光电式传感器的工作原理 (90)

7.1.1 光源与光辐射体 (90)

7.1.2 光电效应 (91)

7.1.3 光电器件 (92)

7.2 光电式传感器的应用 (104)

7.3 红外传感器 (105)

7.3.1 红外传感器工作原理 (106)

7.3.2 红外传感器应用 (108)

7.4 光纤传感器 (111)

7.4.1 光纤传感器工作原理 (111)

7.4.2 常见光纤传感器及其应用 (117)

7.5 电荷耦合器件(CCD)及接触式传感器 CIS (119)

7.5.1 电荷耦合器件(CCD) (119)

7.5.2 固态图像传感器 (121)

7.5.3 CCD 摄像器件的主要特性 (122)

7.5.4 面阵 CCD 图像传感器不均匀性的校正	(123)	习题	(151)
7.5.5 CCD 器件的应用举例	(124)	第 9 章 其他传感器	(152)
7.5.6 CIS 技术	(126)	9.1 生物传感器	(152)
习题	(128)	9.1.1 生物传感器的工作原理	(152)
第 8 章 热电式传感器	(129)	9.1.2 生物传感器应用	(154)
8.1 温标及温度的测量方法	(129)	9.2 机器人传感器	(165)
8.1.1 温标	(129)	9.2.1 机器人传感器分类	(165)
8.1.2 温度的测量方法	(129)	9.2.2 机器人传感器的应用及发展	(167)
8.2 热电阻	(130)	9.3 微波传感器	(171)
8.2.1 铂热电阻	(130)	9.3.1 概述	(171)
8.2.2 铜热电阻	(131)	9.3.2 微波传感器的应用	(173)
8.2.3 热电阻传感器的结构	(132)	习题	(177)
8.2.4 热电阻传感器的测量电路	(133)	第 10 章 传感器接口电路	(178)
8.3 热敏电阻	(134)	10.1 传感器输出信号的特点	(178)
8.3.1 热敏电阻的特点与分类	(135)	10.1.1 传感器输出信号的形式	(178)
8.3.2 热敏电阻的电阻—温度(R_t-t)特性	(135)	10.1.2 传感器输出信号的特点	(179)
8.3.3 热敏电阻的外形结构及符号	(136)	10.1.3 输出信号的处理方法	(179)
8.3.4 热敏电阻的应用	(136)	10.2 传感器输出信号的检测电路	(180)
8.4 热电偶温度传感器	(138)	10.2.1 检测电路的形式	(180)
8.4.1 热电偶温度传感器的工作原理	(139)	10.2.2 常用信号的检测电路	(180)
8.4.2 热电偶的常用材料及常用热电偶传感器的结构	(144)	10.3 传感器和微控制器的连接	(182)
8.4.3 热电偶冷端温度补偿	(146)	10.4 传感器接口电路应用实例	(186)
8.4.4 热电偶测温线路	(148)	习题	(189)
8.4.5 热电偶温度传感器的应用	(150)	参考文献	(190)

第1章 概论

学习目标

- 1)理解传感器的定义与作用。
- 2)掌握传感器的组成与分类。
- 3)明确传感器的基本特性。
- 4)了解传感器的发展趋势。

1.1 绪言

人类为了认识物质及其本质,需要对物质的特性参数进行测量,其中大多数参数为非电量,如温度、湿度、压力、速度、重量、流量、浓度等。对非电量的测量通常采用非电量电测方法,即将非电量转换成电量后再进行测量;实现这种转换技术的器件称为传感器。

传感器是传感技术的物理形式。传感技术主要研究各种功能材料的物理效应、化学反应和生物反应机理,并将研究成果应用于信息检测的一门应用性技术。近年来,随着物联网的大力发展,传感器技术作为物联网中实现信息采集的主要技术之一,越来越受到人们的重视;同时,在现代测量、控制和自动化技术的发展推动下,在工业生产自动化、灾害预测、安全防卫、环境保护、健康诊断等方面开发出了各种用途的传感器。可以说传感技术是当今最活跃、最生机勃勃的热门技术之一。

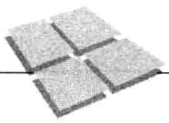
1.1.1 传感器的定义与作用

传感器的通俗定义可表述为“信息拾取的器件或装置”。其严格定义在国家标准 GB7665—87 中的表述是:“能感受规定的被测量并按照一定的规律转换成可用信号的器件或装置,通常由敏感元件和转换元件组成”。这一定义与美国仪表学会(ISA)的定义相类似,是比较确切的。

传感器处于检测系统的最前端,起着获取检测信息与转换信息的作用。它是实现自动检测和自动控制的首要环节。

当今世界已进入信息时代。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。

在现代工业自动化生产过程中,传感器用来监视和控制生产过程中的各个参数,保障设备在正常状态下运转;在基础学科研究中,传感器用来获取大量人类感官无法直接获取的信息,为进一步的科学研究扫清障碍;在诸如宇宙开发、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中,都使用了传感器。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。



由此可见，传感器是现代科学技术迅速发展的基础，它对发展经济、推动社会进步方面有十分重要的作用。

1.1.2 传感器的组成

传感器的输出信号通常是电量，它便于传输、转换、处理、显示等。电量有很多形式，如电压、电流、电容、电阻等，输出信号的形式由传感器的原理确定。

传感器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。由于传感器的输出信号一般都很微弱，因此需要有信号调理与转换电路对其进行放大、运算处理等。随着半导体器件与集成技术在传感器中的应用，传感器的信号调理与转换电路可能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。此外，信号调理转换电路以及传感器工作必须有辅助的电源，因此，信号调理转换电路以及所需的电源都应作为传感器组成的一部分。传感器组成框图如图 1-1 所示。

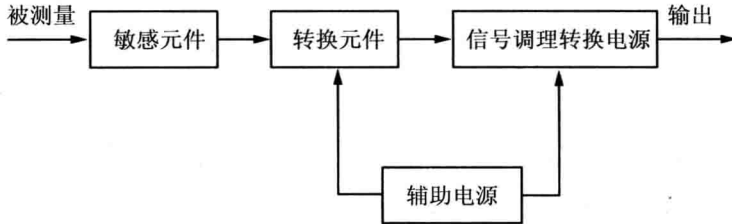


图 1-1 传感器组成框图

1.2 传感器的分类

传感器技术是一门知识密集型技术，它与许多学科有关。传感器的原理各种各样，其种类十分繁多，分类方法也很多，可按被测物理量、工作原理、能量的传递方式及输出信号的形式等进行分类。

按被测物理量划分为：温度传感器、湿度传感器、压力传感器、位移传感器、加速度传感器、力传感器、液位传感器、转矩传感器等。

按传感器的工作原理划分为：电阻式传感器、电容式传感器、电感式传感器、压电式传感器、光电式传感器、磁电式传感器等。

按能量的传递方式划分为：有源传感器和无源传感器。

按传感器输出信号的形式划分为：模拟式传感器和数字式传感器。

1.3 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将其不失真地变换成相应的电量，这取决于传感器的输入—输出特性。传感器的这一基本特性可用静态特性和动态特性来描述。

1.3.1 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出与输入关系。传感器静态特性的主要技术指标有线性度、灵敏度、迟滞和重复性等。

1. 线性度

线性度指传感器输出量与输入量之间的实际关系曲线偏离拟合直线的程度。定义为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与满量程输出值之比。

从传感器的性能分析，希望其具有理想的输出与输入关系，即线性关系。但实际上多数传感器的输入与输出关系存在非线性问题，如果不考虑迟滞和蠕变等因素，传感器的静态特性可用一个多项式表示

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n \quad (1.1)$$

式中， x 为输入量； y 为输出量； a_0 为零位输出； a_1 为传感器的灵敏度； a_2, a_3, \dots, a_n 为非线性项系数。

各项系数不同，决定了特性曲线的具体形式各不相同。

静态特性曲线可通过实际测试获得。在实际中，为了标定和数据处理方便，希望得到线性关系，要进行线性化处理。如采用非线性补偿电路或计算机软件补偿等处理方法。在线性误差不太大的情况下，总是采用直线拟合的办法来线性化。

在采用直线拟合线性化时，输出—输入的校正曲线与拟合直线之间的最大偏差，称为非线性误差或线性度。通常用相对误差来表示

$$e_{L.} = \pm \frac{\Delta L_{\max}}{y_{FS}} \times 100\% \quad (1.2)$$

式中， ΔL_{\max} 为非线性最大偏差； y_{FS} 为满量程输出值。

目前常用的拟合方法有：a. 理论拟合；b. 过零旋转拟合；c. 端点连线拟合；d. 端点连线平移拟合等；如图 1-2 所示，实线为输出的校正曲线，虚线为拟合直线。

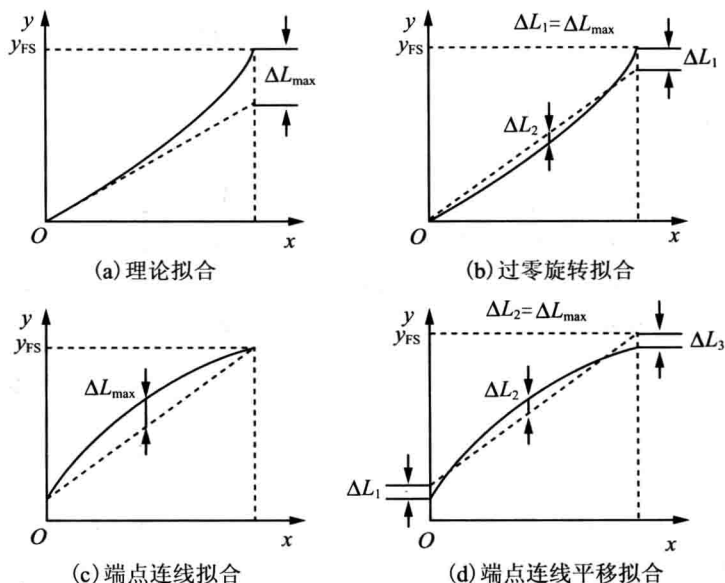


图 1-2 几种直线拟合方法

2. 灵敏度

灵敏度是指传感器输出量的变化量 Δy 与引起该变化量的输入量变化量 Δx 的比值, 用 S 表示

$$S = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (1.3)$$

对于线性传感器, 它的灵敏度就是它的静态特性的斜率, 即 S 为常数, 而非线性传感器的灵敏度为一变量, 用 $S = dy/dx$ 表示。传感器的灵敏度如图 1-3 所示。

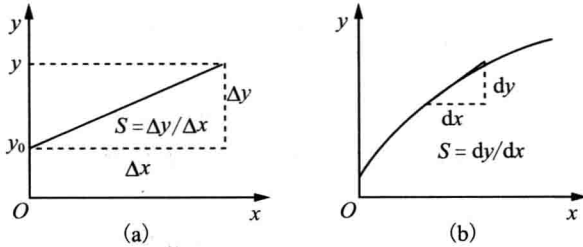


图 1-3 传感器的灵敏度

3. 迟滞

传感器在正(输入量增大)反(输入量减小)行程期间其输出—输入特性曲线不重合的现象称为迟滞, 如图 1-4 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。产生迟滞的因素包括传感器机械结构中的摩擦、间隙和结构材料受力变形的滞后等。

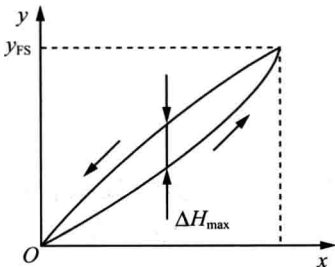


图 1-4 传感器的迟滞

迟滞大小通常由实验确定。迟滞误差(γ_H)一般以正反行程中输出的最大差值与满量程输出值之比的百分数表示, 即

$$\gamma_H = \frac{\Delta H_{\max}}{y_{FS}} \times 100\% \quad (1.4)$$

式中, ΔH_{\max} 为正反行程输出值间的最大差值。

4. 重复性

重复性是指传感器在输入量按同一方向作全量程连续多次变化时, 所得特性曲线不一致的程度, 如图 1-5 所示为实际输出的校正曲线的重复特性, $\Delta R_{\max 1}$ 、 $\Delta R_{\max 2}$ 分别为正反行程最大重复性偏差。重复性误差可用正反行程中的最大偏差与满量程输出值之比的百分数表示, 即

$$\gamma_R = \frac{\Delta R_{\max}}{y_{FS}} \times 100\% \quad (1.5)$$

式中, ΔR_{\max} 取 $\Delta R_{\max 1}$ 、 $\Delta R_{\max 2}$ 中较大者。

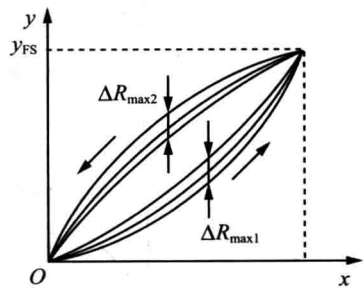


图 1-5 传感器的重复性

1.3.2 传感器的动态特性

传感器的动态特性是指其输出对随时间变化的输入量的响应特性。当被测量是时

间的函数时,则传感器的输出量也是时间的函数,其间的关系要用动态特性来说明。动态特性好的传感器,其输出将再现输入量的变化规律。在使用传感器时,要根据其动态特性与使用条件确定合适的使用方法。实际上输出信号与输入信号的时间函数并不完全相同,这种输出与输入间的差异就是所谓的动态误差。

在研究传感器动态特性时,通常只根据规律性的输入来考察传感器的响应。通常选用的输入信号有阶跃信号和正弦信号两种。

在分析阶跃输入响应(阶跃响应)和正弦输入响应(频率响应)的特性及性能指标之前先建立传感器的动态模型并确定其传递函数。

1. 数学模型和传递函数

大部分传感器在工作点附近范围内的动态数学模型可用如下线性微分方程表示

$$a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \cdots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_m \frac{d^m x}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x}{dt^{m-1}} + \cdots + b_1 \frac{dx}{dt} + b_0 x \quad (1.6)$$

式中,系数 $a_0, a_1, \dots, a_n; b_0, b_1, \dots, b_m$ 为常数,由传感器的结构参数决定。

对上式两边逐项进行拉氏变换,可得

$$a_n s^n Y(s) + a_{n-1} s^{n-1} Y(s) + \cdots + a_1 s Y(s) + a_0 Y(s) = b_m s^m X(s) + b_{m-1} s^{m-1} X(s) + \cdots + b_1 s X(s) + b_0 X(s) \quad (1.7)$$

系统的传递函数 $H(s)$ 为

$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \cdots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \cdots + a_1 s + a_0} \quad (1.8)$$

从上式中可见,等式右侧是一个与输入无关的表达式,只与传感器的结构参数有关。分子的阶次 m 不能大于分母的阶次 n ,这是由物理条件决定的。分母的阶次用来代表传感器的特征。 $n=0$ 时,称为零阶传感器; $n=1$ 时,称一阶传感器; $n=2$ 时,为二阶传感器; n 更大时,为高阶传感器。

稳定的传感器系统所有极点都位于复平面的左半平面,零点极点可能是实数,也可能是共轭复数。

2. 阶跃响应特性

下面以传感器的单位阶跃响应来评价传感器的动态性能指标。

对初始状态为零的传感器,输入一个单位阶跃信号

$$u(t) = \begin{cases} 0 & t \leq 0 \\ 1 & t > 0 \end{cases} \quad (1.9)$$

其输出信号特性称为阶跃响应特性,衡量阶跃响应的技术指标如图 1-6 所示,主要包括以下几项:

(1) 时间常数 τ : 传感器输出值达到稳态值的 63.2% 所需的时间,传感器时间常数 τ 越小,响应速度越快。

(2) 延时时间 t_d : 传感器输出达到稳态值的 50% 所需时间。

(3) 上升时间 t_r : 传感器输出值由稳定值的 10% 上升到稳态值的 90% 所需时间。

(4) 超调量 σ_p : 传感器输出超过稳态值的最大值。

(5) 响应时间 t_s : 传感器输出值达到误差允许范围所经历的时间。

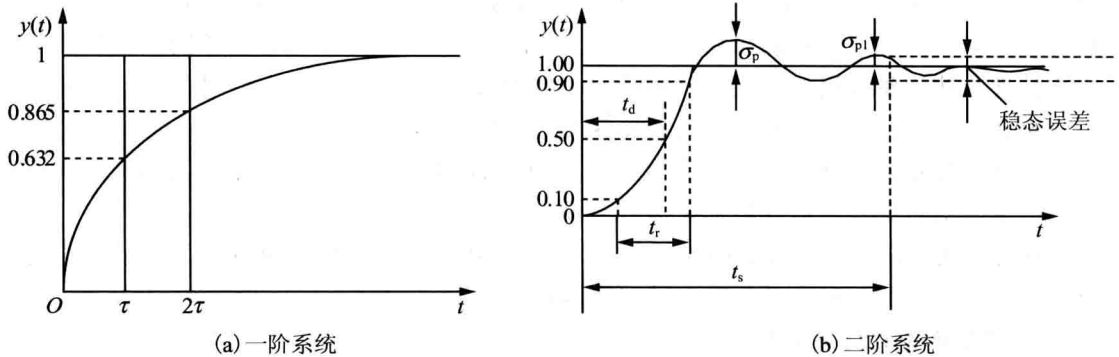
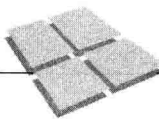


图 1-6 传感器单位阶跃响应特性

(6) 稳态误差；无限长时间后传感器的稳态输出值与目标值之间的偏差。

3. 频率响应特性

传感器对正弦输入信号的响应特性，称为频率响应特性。对于传感器的动态特性可以从传感器的频率特性出发进行研究。

将 $s=j\omega$ 代入传递函数得

$$H(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} = \frac{b_m (j\omega)^m + b_{m-1} (j\omega)^{m-1} + \dots + b_1 j\omega + b_0}{a_n (j\omega)^n + a_{n-1} (j\omega)^{n-1} + \dots + a_1 j\omega + a_0} \quad (1.10)$$

现只分析一阶传感器的频率响应。

一阶传感器的频率特性表达式为

$$H(j\omega) = \frac{1}{\tau(j\omega) + 1} \quad (1.11)$$

幅频特性

$$A(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}} \quad (1.12)$$

相频特性

$$\Phi(\omega) = -\arctan(\omega\tau) \quad (1.13)$$

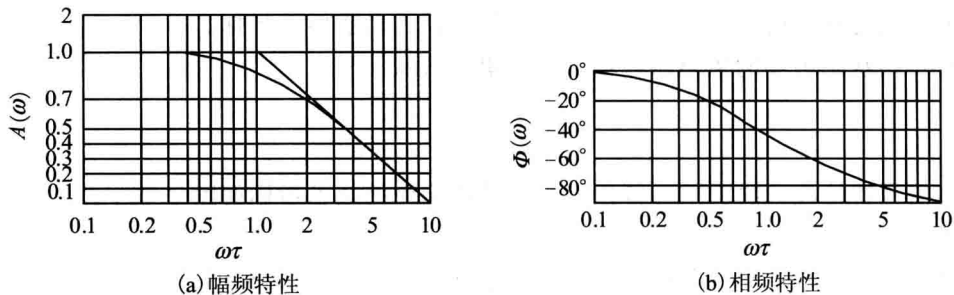


图 1-7 一阶传感器频率响应特性

从式(1.12)、式(1.13)和图 1-7 可以看出，时间常数 τ 越小，频率响应特性越好。当 $\omega\tau \ll 1$ 时， $A(\omega\tau) \approx 1$ ， $\Phi(\omega) \approx 0$ ，表明传感器输出与输入为线性关系，且相位差也很小，输出 $y(t)$ 比较真实地反映输入 $x(t)$ 的变化规律。因此，减小 τ 可改善传感器的频

率特性。

频率响应特性指标有：

- (1) 频带：传感器增益保持在一定值内的频率范围为传感器频带或通频带，对应上有、下截止频率。
- (2) 时间常数 τ ：用时间常数 τ 来表征一阶传感器的动态特性。 τ 越小，频带越宽。

1.4 传感器的性能指标及改善性能方法

1.4.1 传感器的性能指标

传感器的应用范围十分广泛，种类繁多，使用要求也各不相同，若要列出用来全面衡量传感器质量的统一指标十分困难。下面从基本参数、环境参数、可靠性及其他指标四个方面列出传感器的一些常用性能指标，它可作为检验、使用和评价传感器的依据。

1. 基本参数指标

- (1) 量程：包括测量范围、过载能力等。
- (2) 灵敏度：包括灵敏度、满量程输出、分辨力和输入—输出阻抗等。
- (3) 其他环境参数：包括精度(误差)、重复性、线性、滞后、灵敏度误差、稳定值及漂移等。
- (4) 动态性能：包括时间常数、固有频率、频率范围、频率特性、阻尼系数及响应时间。

2. 环境参数指标

- (1) 温度：包括工作温度范围、温度误差、温度漂移、灵敏度温度系数及热滞后等。
- (2) 抗冲振性能：包括各向冲振容许频率、振幅值、加速度及冲振引起的误差等。
- (3) 精度：包括抗潮湿、抗腐蚀及抗电磁场干扰能力等。

3. 可靠性指标

可靠性指标主要包括工作寿命、平均无故障时间、疲劳性能、绝缘电阻及耐压等。

4. 其他指标

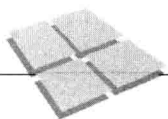
- (1) 结构方面：包括外形尺寸、重量、材质及结构特点等。
- (2) 安装连接方面：包括安装方式、馈线等。
- (3) 使用方面：包括电源方式、功耗等。

决定传感器性能的指标很多，对于一种具体的传感器而言，要求其具有全面良好的性能指标，不仅给设计制造带来困难，而且在实用上也没有必要。因此，应根据实际需要，在保证主要指标的基础上，其余指标满足基本要求即可。

1.4.2 改善传感器性能指标的方法

1. 结构、材料与参数的合理选择

根据实际的需要和可能，合理选择材料、结构设计传感器，确保主要指标，放弃对次要指标的要求，以求得到高的性价比，同时满足使用要求，即使对于主要的参数



也不能盲目追求高指标。

2. 差动技术

差动技术是非常有效的一种方法，它可显著减小温度变化、电源波动、外界干扰等对传感器的影响，抵消共模误差，减小非线性误差，增大灵敏度等。如电阻应变式传感器、电感式传感器、电容式传感器中都应用了差动技术，不仅减小了非线性，而且灵敏度提高了一倍，抵消了共模误差。

3. 平均技术

常用的平均技术有误差平均效应和数据平均处理。误差平均效应的原理是：利用 n 个传感器单元同时测量，其输出为这些单元的总和；数据平均是在相同条件下对同一传感器重复测量 n 次然后进行数据平均处理。常用的多点测量方案与多次采样平均就是这样的例子。

4. 稳定性处理

造成传感器性能不稳定的原因是：随着时间的推移或环境条件的变化，构成传感器的各种材料与元器件性能将发生变化。为了提高传感器性能的稳定性，应该对材料、元器件或传感器整体进行必要的稳定性处理。使用传感器时，如果测量要求较高，必要时也应应对附加的调整元件、后接电路的关键元器件进行老化处理。

5. 屏蔽、隔离与干扰抑制

屏蔽、隔离与干扰抑制可以有效削弱或消除外界影响因素对传感器的作用。常见的干扰有机械干扰、热干扰、光干扰、化学干扰、电磁干扰等。如对于电磁干扰，可以采取屏蔽、隔离措施，也可以用滤波等方法抑制。

6. 零示法、微差法与闭环技术

零示法是指被测量与标准量相互平衡时，使仪表指零。微差法是指在不易做到被测量与标准量完全相等时，如果标准量与被测量的差值减小到一定程度，那么由于它们的相互抵消作用，就能使指示仪表的误差影响大大消弱，在指示仪表上直接读出被测量的数值。闭环技术采用电子技术和控制理论的反馈技术，利用传感器、伺服放大电路、反相传感器组成闭环反馈测量系统，提高了传感器的输出精度及线性动态测量范围。

7. 补偿与校正

补偿与校正主要针对两种情况：一种是对传感器本身特性的补偿与校正；另一种是对传感器的工作环境而进行的补偿和校正。可采取的方法有：利用电子技术通过线路(硬件)来解决；采用微型计算机通过软件来实现。

8. 集成化、智能化与信息融合

集成化、智能化与信息融合将大大扩大传感器的功能，改善传感器的性能，提高性价比。

1.5 传感器网络技术

随着信息技术的不断发展，在控制系统中对传感信息交换提出了新的要求。为了适应现代控制技术和检测技术的发展，数据的采集主要通过分布式数据采集系统(由众

多传感器构成)组成的传感器网络来完成。

通过传感器网络可以实施远程采集数据, 并进行分类存储和应用, 网络上的多个用户可同时对同一过程进行监控。

1.5.1 传感器网络概述

传感器网络最早由美国先进国防研究项目局 DARPA(Defense Advanced Research Projects Agency)于 20 世纪 70 年代末提出, 在 2000 年以后随着微机电系统(Micro-Electro-Mechanism System, MEMS)、片上系统(System on Chip, SOC)、无线通信和低功耗嵌入式技术的快速发展, 孕育出无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSN), 并以其低功耗、低成本、分布式和自组织的特点带来了信息感知的一场变革。

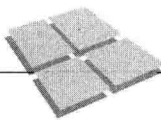
无线传感器网络是由部署在监测区域内大量的廉价微型传感器节点组成, 通过无线通信方式形成的一个多跳自组织网络。

无线传感器网络是一种特殊的 Ad-hoc 网络。可应用于布线和电源供给困难的区域、人员不能到达的区域(如受到污染、环境不能被破坏或敌对区域)和一些临时场合(如发生自然灾害, 固定通信网络被破坏)等。它不需要固定网络支持, 具有快速展开、抗毁性强等特点, 可广泛应用于军事、工业、交通、环保等领域。

无线传感器网络典型工作方式如下: 将大量传感器节点(数量从几百到几千个)放置到待测区域, 节点通过自组织快速形成一个无线网络。节点既是信息的采集和发出者, 也充当信息的路由者, 采集的数据通过多跳路由到达网关。网关(Sink node)是一个特殊的节点, 可以通过 Internet、移动通信网络、卫星等与监控中心通信。也可以利用无人机飞越网络上空, 通过网关采集数据。

无线传感器网络作为信息领域的一个全新的方向, 得到了学术界和工业界的广泛关注。国外的许多大学和研究机构纷纷投入了大量的研发力量从事无线传感器网络软硬件系统的研究工作, 最具代表性的是美国加州大学伯克利分校(UC/Berkeley)和英特尔公司(Intel)联合成立的“智能尘埃(Smart Dust)”实验室, 它的目标是为美国军方提供能够在 1 立方毫米的体积内自治地完成感知和通信功能的无线传感器网络节点。

此外, 美国其他大学也在无线传感器网络方面开展了大量工作。如加州大学洛杉矶分校(UCLA)的 CENS(Center for Embedded Networked Sensing)实验室、WINS(Wireless Integrated Network Sensors)实验室、NESL(Networked and Embedded Systems Laboratory)实验室、LECS(Laboratory for Embedded Collaborative Systems)实验室等。另外, 麻省理工学院(MIT)获得了 DARPA 的支持, 从事着极低功耗的无线传感器网络方面的研究, SPIN(Sensor Protocols for Information via Negotiation)协议就是出自 MIT; 奥本大学(Auburn University)也获得 DARPA 支持, 从事了大量关于自组织传感器网络方面的研究, 并完成了一些实验系统的研制; 宾汉顿大学(Binghamton University)计算机系统研究实验室在移动自组织网络协议、传感器网络系统的应用层设计等方面做了很多研究工作; 斯坦福(Stanford)大学的无线传感器网络实验室、新泽西(New Jersey)州立大学的无线传感器网络实验室、南加州大学的 RESL(The Robotic Embedded Systems Laboratory)实验室、佛蒙特大学(University of Vermont)的无线自组织网络实验室等。



国内很多研究所和高校在无线传感器网络领域也展开了研究。中科院计算技术研究所信息网络室承担的国家 863 项目“软硬件协同的低功耗系统设计”，已经取得了许多创新性成果，在嵌入式系统芯片设计、低功耗系统设计等方面具有较深厚的积累。在无线传感器网络所涉及部分关键技术，如支持 IPv6 协议的无线传感器网络协议、嵌入式操作系统及编译技术，高频混合信号系统级集成、大规模集成电路设计及片上系统设计，低功耗系统设计等方面都有专门的团队在进行较深入的工作。中科院上海微系统所凭借其在微系统和微机电系统(MEMS)技术方面良好的基础，对无线传感器网络进行了跟踪和研究，已经通过系统集成的方式完成了一些终端节点和基站的研发。中科院电子所和沈阳自动化所也分别从传感器技术和控制技术角度入手开展工作，他们专注于传感或控制执行部分，对上层的通信技术和核心微处理器部分涉及较少；浙江大学现代控制工程研究所成立了“无线传感器网络控制实验室”，联合相关单位专门从事面向传感器网络的分布自治系统关键技术及协调控制理论方面的研究；山东省科学院于 2004 年 10 月正式启动了关于无线传感器网络节点操作系统的研究；另外中科院软件所、中科院自动化所、国防科技大学、清华大学、中国科学技术大学、哈尔滨工业大学、北京邮电大学等单位在无线传感器网络方面也都有一定的工作。

近年来，无线传感器网络理论和应用的研究取得了很大进展。2003 年 MIT 技术评出对人类未来生活产生深远影响的十大新兴技术，传感器网络被列为十大新兴技术之首。随着各项技术的不断进步，无线传感器网络将在人类的生产和生活中起到越来越重要的作用。

1.5.2 传感器网络的组成及特点

1. 无线传感器网络的体系结构

无线传感器网络系统是由无线传感器节点、汇聚节点、数据处理中心以及任务管理中心等构成的一种新型信息获取系统。网络结构如图 1-8 所示。传感器节点负责采集各类信息，然后通过专用网络协议实现信息的交流、汇集，之后采集的数据信息经过 Internet、GPRS、GSM 等途径汇聚于网络数据库服务器中，这样待测的数据信息就进入到了信息世界中。最终信息用户可以通过浏览器、手机、PDA 等各种方式随时随地地获取这些信息。这样一套系统就可以极大地扩展人们感知和了解世界的能力。

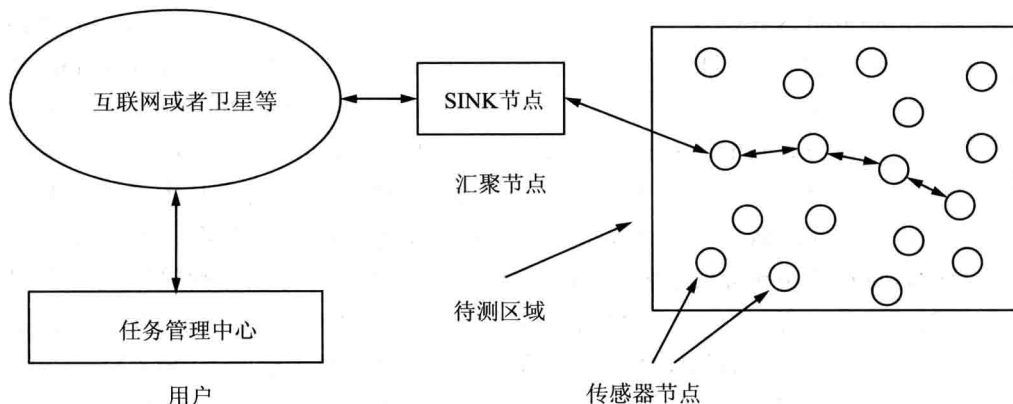


图 1-8 无线传感器网络体系结构图