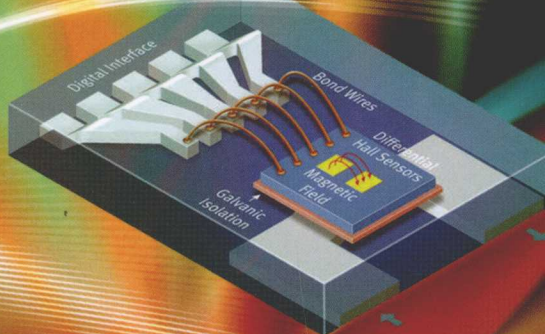




卓越工程师培养计划

“十二五”高等学校规划教材

<http://www.phei.com.cn>



周润景 刘晓霞 韩 丁 朱 莉 编著



# 传感器

# 与检测技术 (第2版)



电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

014025653

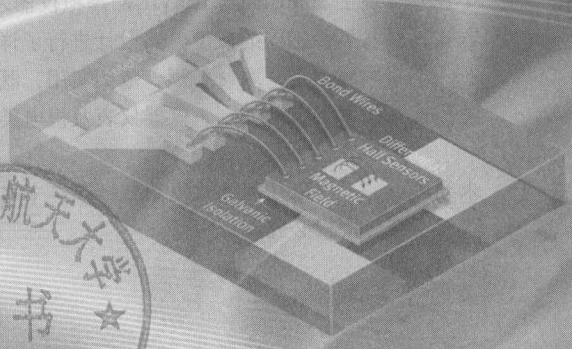
TP212  
225-2



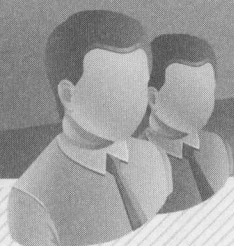
卓越工程师培养计划

“十二五”高等学校规划教材

<http://www.phei.com.cn>



周润景 刘晓霞 韩丁 朱莉 编著



# 传感器

# 与检测技术 (第2版)

TP212  
225-2

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry



北航

C1711154

01402823

## 内 容 简 介

本书系统介绍了常用传感器的基本原理、工作特性及其信号调理电路的设计, 基于 LabVIEW 的虚拟检测系统的设计方法, 以及检测系统的抗干扰设计。本书将 EDA 技术应用于传感器的建模和调理电路的设计中, 并实现了 Multisim 与 LabVIEW 虚拟仪器之间的无缝互调。本书采用原理知识与应用实例相结合的讲解方式, 对各类传感器的典型电路设计进行了详细介绍。

本书内容丰富, 取材新颖, 范例实用, 既适合传感器和检测专业的工程技术人员阅读, 也可作为高等学校检测技术、自动控制、仪器仪表及机电类专业的教学用书。

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。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

传感器与检测技术/周润景等编著. —2 版. —北京: 电子工业出版社, 2014. 1

(卓越工程师培养计划)

ISBN 978-7-121-22289-4

I. ① 传… II. ① 周… III. ① 传感器-检测-高等学校-教材 IV. ① TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 002525 号

责任编辑: 张 剑 (zhang@phei.com.cn)

印 刷: 北京京师印务有限公司

装 订: 北京京师印务有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编: 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 22.25 字数: 570 千字

印 次: 2014 年 1 月第 1 次印刷

印 数: 3 000 册 定价: 49.90 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zlt@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

# 前 言

随着计算机辅助设计技术 (CAD)、微机电系统 (MEMS) 技术、光纤技术和信息技术的发展, 获取各种信息的传感器已经成为各个应用领域, 特别是自动检测、自动控制系统中不可缺少的重要技术工具, 也越来越成为信息社会赖以生存和发展的物质与技术基础。因此, 传感器与检测技术在现代测量与控制系统中具有非常重要的地位。在国内的高等学校中, “传感器与检测技术” 这门课程已经成为自动化、电气工程及其自动化、测控技术与仪器等专业的主干课程。本书是作者在总结多年教学经验和科研成果的基础上编写而成的。

本书共 18 章, 第 1 章介绍了传感器的基本概念与特性; 第 2 章至第 10 章分别介绍了应变式传感器、电感式传感器、电容式传感器、压电式传感器、磁敏式传感器、热电式传感器、光电式传感器、超声波传感器、半导体传感器的结构、工作原理及应用; 第 11 章介绍了检测技术基础; 第 12 章介绍了虚拟仪器技术; 第 13 章至第 18 章分别介绍了各种常用传感器的实际应用电路, 并通过使用 LabVIEW 虚拟仪器与 Multisim 的联合仿真, 使读者掌握传感器检测系统设计的原理与方法, 并了解传感器与检测技术领域内的新技术和新动向。

与国内现有的教材相比, 本书具有以下特色:

- ① **注重系统性**——将传感器与检测技术有机地结合起来, 使读者能够更全面地学习和掌握信号传感、信号采集、信号处理及信号传输的整个过程。
- ② **注重实用性**——针对每种传感器, 提供了实际的应用电路, 并做了详尽的分析, 内容丰富, 取材新颖, 范例实用。
- ③ **注重先进性**——将 EDA 技术应用于传感器的建模、调理电路的设计中, 并使用 LabVIEW 虚拟仪器进行联合仿真。借助现代新技术和新方法扩展功能, 拓宽读者的眼界。

本书由周润景、刘晓霞、韩丁和朱莉编著。其中, 韩丁编写了第 4 章和第 5 章, 李伟峰编写了第 6 章和第 7 章, 刘晓霞编写了第 11 章和第 12 章, 朱莉编写了第 18 章, 其余章节由周润景编写。全书由周润景教授统稿。参加本书编写的还有张龙龙、姜攀、托亚、贾雯、陈艳梅、刘怡芳、陈雪梅、张丽娜、丁莉和张红敏。

由于作者水平有限, 书中难免有错误和不足之处, 敬请读者批评指正!

编著者



# 目 录

<b>第1章 传感器概述</b> .....	1
1.1 基本概念 .....	1
1.2 传感器的一般特性 .....	3
1.3 传感器的标定和校准 .....	12
1.4 传感器选择的一般原则 .....	14
习题 .....	15
<b>第2章 应变式传感器</b> .....	16
2.1 工作原理 .....	16
2.2 电阻应变片特性 .....	17
2.3 电阻应变片的测量电路 .....	24
2.4 应变式传感器应用 .....	29
习题 .....	33
<b>第3章 电感式传感器</b> .....	34
3.1 变磁阻式传感器 .....	34
3.2 互感式传感器 .....	40
3.3 电涡流式传感器 .....	46
习题 .....	52
<b>第4章 电容式传感器</b> .....	53
4.1 电容式传感器的工作原理和结构 .....	53
4.2 电容式传感器的灵敏度及非线性 .....	56
4.3 电容式传感器的特点及应用中存在的问题 .....	58
4.4 电容式传感器的测量电路 .....	60
4.5 电容式传感器的应用 .....	64
习题 .....	67
<b>第5章 压电式传感器</b> .....	69
5.1 压电效应及压电材料 .....	69
5.2 压电式传感器的等效电路 .....	73
5.3 压电式传感器的测量电路 .....	73
5.4 压电式传感器的应用 .....	75
习题 .....	77



<b>第6章 磁敏式传感器</b> .....	78
6.1 磁电感应式传感器 .....	78
6.2 霍尔传感器 .....	81
6.3 磁敏电阻器 .....	89
6.4 磁敏式传感器的应用 .....	92
习题 .....	95
<b>第7章 热电式传感器</b> .....	96
7.1 热电偶 .....	96
7.2 热电阻传感器 .....	104
7.3 热敏电阻 .....	114
7.4 集成温度传感器 .....	116
7.5 热电式传感器的应用 .....	118
习题 .....	122
<b>第8章 光电式传感器</b> .....	123
8.1 光电器件 .....	123
8.2 光纤传感器 .....	141
8.3 红外传感器 .....	147
习题 .....	150
<b>第9章 超声波传感器</b> .....	151
9.1 超声波及其性质 .....	151
9.2 超声波发生法与振动因子的设计 .....	157
9.3 超声波传感器的结构 .....	160
9.4 超声波传感器的基本电路 .....	160
9.5 超声波传感器的应用 .....	166
习题 .....	169
<b>第10章 半导体传感器</b> .....	170
10.1 半导体气敏传感器 .....	170
10.2 湿敏传感器 .....	172
10.3 色敏传感器 .....	174
10.4 半导体传感器的应用 .....	177
习题 .....	180
<b>第11章 检测技术基础</b> .....	181
11.1 测量技术 .....	181
11.2 测量数据的估计和处理 .....	184
11.3 测量系统 .....	198

习题	200
<b>第12章 虚拟仪器技术</b>	202
12.1 LabVIEW 软件的特点	202
12.2 LabVIEW 虚拟仪器的创建方法	203
12.3 LabVIEW 和 Multisim 软件的联合	206
习题	215
<b>第13章 小型称重系统的设计</b>	216
13.1 设计任务	216
13.2 测量电路原理与设计	216
13.3 LabVIEW 虚拟仪器设计	228
13.4 将 Multisim 导入 LabVIEW	232
习题	238
<b>第14章 铂热电阻温度测量系统的设计</b>	239
14.1 设计任务	239
14.2 电路设计	239
14.3 LabVIEW 虚拟仪器设计	249
14.4 将 Multisim 导入 LabVIEW	254
习题	262
<b>第15章 热电偶温度测量系统的设计</b>	263
15.1 设计任务	263
15.2 电路原理与设计	263
15.3 LabVIEW 虚拟仪器设计	270
15.4 将 Multisim 导入 LabVIEW	274
习题	282
<b>第16章 位移测量系统的设计</b>	283
16.1 设计要求	283
16.2 电路原理与设计	283
16.3 LabVIEW 显示模块设计	288
16.4 将 Multisim 导入 LabVIEW	292
16.5 硬件验证与数据采集卡的应用	300
习题	305
<b>第17章 转速测量系统的设计</b>	306
17.1 设计任务	306
17.2 电路原理与设计	306
17.3 LabVIEW 频率计的设计	310

005	习题 .....	322
<b>第18章</b>	<b>检测系统的抗干扰设计 .....</b>	<b>323</b>
18.1	概述 .....	323
18.2	电源电路的抗干扰设计 .....	325
18.3	处理器(计算机)部分的抗干扰设计 .....	328
18.4	数字电路的抗干扰设计 .....	331
18.5	模拟电路的抗干扰设计 .....	334
18.6	信号传输回路的抗干扰措施 .....	336
18.7	接地 .....	341
18.8	滤波、去耦及屏蔽 .....	343
18.9	静电及其防护 .....	346
习题	.....	347
参考文献	.....	348



# 第1章

## 传感器概述

### 1.1 基本概念

#### 1. 传感器的定义

传感器 (Transducer/Sensor) 是一种以一定的准确度把被测量转换为与之有确定对应关系的、便于应用的某种物理量的测量装置, 能完成检测任务; 它的输入量是某一被测量, 可能是物理量, 也可能是化学量、生物量等; 它的输出量是某种物理量, 这种物理量要便于传输、转换、处理、显示等, 可以是气、光、电量等, 但主要是电量。传感器的输入—输出转换规律 (关系) 已知, 转换精度要满足测控系统的应用要求。

传感器应用场合 (领域) 不同, 叫法也不同, 如在过程控制中称为变送器, 标准化的传感器在射线检测中则称为发送器、接收器或探头。

作为对比, 下面介绍一下敏感器。敏感器是一种把被测的某种非电量转换为传感器可用非电量的器件或装置。设  $x$  为被测非电量,  $z$  为传感器可用非电量,  $y$  为传感器输出电量, 则

敏感器传输函数:  $z = \psi(x)$

传感器传输函数:  $y = \varphi(z)$

敏感器传感器复合函数:  $y = \varphi(z) = \varphi[\psi(x)] = f(x)$

#### 2. 传感器的组成

传感器的组成如图 1-1 所示。其中, 敏感元件直接感受被测量, 并输出与被测量成确定关系的物理量; 转换元件把敏感元件的输出信号作为它的输入信号, 并将其转换成电路参量; 将上述电路参量接入转换电路, 便可转换成电量输出。

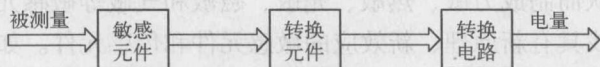


图 1-1 传感器的组成

由半导体材料制成的物性型传感器基本是将敏感元件和转换元件合二为一的, 它可以直接将被测量转换为电量输出, 如压电传感器、光电池、热敏电阻等。

### 3. 传感器的分类

传感器的品种很多,原理各异,检测对象门类繁多,因此其分类方法甚繁,至今尚无统一的规定。人们通常是站在不同的角度,突出某一侧面而进行分类的。下面是几种常见的分类方法。

**1) 按工作机理分类** 这种分类方法将物理、化学和生物等学科的原理、规律、效应作为分类的依据,于是可分为物理型传感器、化学型传感器和生物型传感器。其中按构成原理可分为结构型、物性型和复合型三大类。

(1) 结构型传感器是利用物理学的定律等构成的,其性能与构成材料关系不大。这是一类其结构的几何尺寸(如厚度、角度、位置等)在被测量作用下会发生变化,并可获得比例于被测非电量的电信号的敏感元器件或装置。

(2) 物性型传感器是利用物质的某种或某些客观属性构成的,其性能因其构成材料的不同而有明显的区别。这是一类由其构成材料的物理特性、化学特性或生物特性直接敏感于被测非电量,并可将被测非电量转换成电信号的敏感元器件或装置。

(3) 复合型传感器是指将中间转换环节与物性型敏感元件复合而成的传感器。之所以要采用中间环节,是因为在大量被测非电量中,只有少数(如应变、光、磁、热、水分和某些气体)可直接利用某些敏感材料的物质特性转换成电信号,所以为了增加非电量的测量种类,就必须将不能直接转换成电信号的非电量转换成上述少数物理量中的一种,然后再利用相应的物性型敏感元器件将其转换成电信号。

按工作机理进行分类的优点是对于传感器的工作原理分析得比较清楚,类别少,有利于从原理与设计上进行归纳性的分析和研究。

**2) 按能量关系分类** 按能量关系分类可将传感器分为能量控制型和能量转换型两种。能量控制型传感器又称为无源传感器,它本身不是一个换能装置,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,这类传感器分为电阻式、电容式和电感式等,常用电桥和谐振电路等电路测量。能量转换型传感器又称为换能器或有源传感器,它一般是将非电能量转换成电能量,通常配有电压测量和放大电路,如压电式、热电式、压阻式传感器等。

**3) 按输入量分类** 按输入量分类,传感器可分为常用的有机、光、电和化学等传感器,如位移、速度、加速度、力、温度和流量传感器等。

**4) 按输出信号的性质分类** 可分为模拟式传感器和数字式传感器两种。

### 4. 传感器技术的发展方向

**1) 开发新的敏感、传感材料** 在发现力、热、光、磁、气体等物理量都会使半导体材料的性能发生改变,从而制成力敏、热敏、光敏、磁敏和气敏等敏感元件后,人们更加重视相关的基础研究,寻找具有新原理、新效应的敏感元件和传感元件。如果没有进行深入细致的研究,就不会有新传感元件的问世,也就无法利用新型传感器组成新型测试系统。

#### 2) 开发研制新型传感器及组成新型测试系统

(1) 利用 MEMS 技术研制微型传感器,如用于微型侦察机的 CCD 传感器,用于管道爬壁机器人的力敏、视觉传感器等。

- (2) 研制仿生传感器。
- (3) 研制海洋探测用传感器。
- (4) 研制成分分析用传感器。
- (5) 研制微弱信号检测传感器。

3) 研究新一代的智能化传感器及测试系统 如电子血压计, 智能水、电、煤气、热量表等。它们的特点是将传感器与微型计算机有机结合, 构成智能传感器, 其系统功能最大程度地用软件来实现。

4) 传感器发展集成化 随着固体功能材料的进一步开发和集成技术的不断发展, 传感器集成化也得到了迅猛发展。所谓集成化, 即在同一芯片上将更多同一类型的单个传感元件集成为一维线型或二维阵列型传感器; 或者将传感器与调节、补偿等电路集成一体化。

5) 多功能与多参数传感器的研究 如同时检测压力、温度和液位的传感器已逐步市场化。

## 1.2 传感器的一般特性

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, 就要求传感器能够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, 这取决于传感器的基本特性, 即输入—输出特性。如果把传感器看做二端口网络, 即有两个输入端和两个输出端, 那么传感器的输入—输出特性是与其内部结构参数相关的外部特性。传感器的基本特性可用静态特性和动态特性来描述。

### 1. 传感器的静态特性

传感器的静态特性是指当被测量的值处于稳定状态时的输入—输出关系。只考虑传感器的静态特性时, 输入量与输出量之间的关系式中不含有时间变量。衡量静态特性的重要指标是线性度、灵敏度、迟滞特性、重复性和漂移等。

1) 线性度 传感器的线性度是指传感器的输出量与输入量之间数量关系的线性程度。输入—输出关系可分为线性特性和非线性特性两种。从传感器的性能来看, 希望其具有线性关系, 即具有理想的输入—输出关系。但实际的传感器大多为非线性的, 若不考虑迟滞和蠕变等因素, 传感器的输入—输出关系可用一个多项式表示, 即

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2^2 + \cdots + a_nx_n^2 \quad (1-1)$$

式中,  $a_0$  为输入量  $x$  为零时的输出量;  $a_1$  为传感器线性灵敏度,  $a_2, \dots, a_n$  为非线性项系数。

式 (1-1) 中各项系数不同, 决定了特性曲线的具体形状也各不相同。

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, 希望得到线性的输入—输出关系, 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, 从而使传感器的输入—输出关系为线性或接近线性。但若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, 如图 1-2 所示, 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。实际特性曲线与拟合直线之间的偏差称为传感器的非线性误差 (或线性度), 通常用相

对误差  $r_L$  表示, 即

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

式中,  $\Delta L_{\max}$  为最大非线性绝对误差;  $Y_{FS}$  为满量程输出。

从图 1-2 中可见, 即使是同类传感器, 拟合直线不同, 其线性度也是不同的。选取拟合直线的方法很多, 用最小二乘法求取的拟合直线的拟合精度最高。

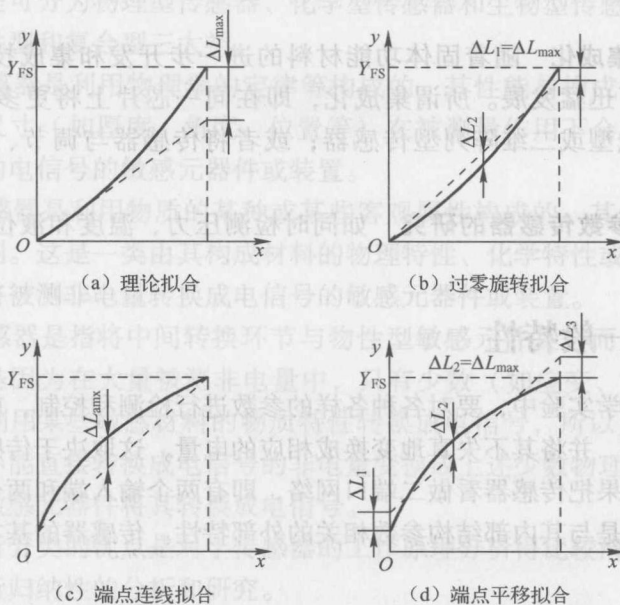


图 1-2 几种直线拟合方法

2) 灵敏度 灵敏度  $S$  是指传感器的输出量增量  $\Delta y$  与引起输出量增量  $\Delta y$  的输入量增量  $\Delta x$  的比值, 即

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

对于线性传感器, 它的灵敏度就是其静态特性的斜率 ( $S = \Delta y / \Delta x$  为常数), 即

$$S = \frac{y - y_0}{x}$$

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。

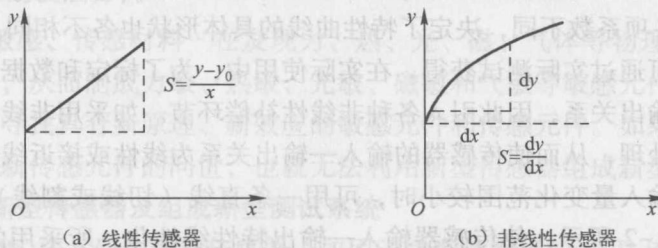


图 1-3 传感器的灵敏度

3) **迟滞特性** 传感器在正(输入量增大)、反(输入量减小)行程期间其输入—输出特性曲线不重合的现象称为迟滞特性,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。迟滞特性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,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来确定。迟滞误差  $r_H$  可由式(1-4)计算:

$$r_H = \pm \frac{1}{2} \frac{\Delta H_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (1-4)$$

式中,  $\Delta H_{\max}$  为正、反行程输出值之间的最大差值。

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。重复性误差属于随机误差,常用标准偏差  $\sigma$  表示,也可用正、反行程中的最大偏差  $\Delta R_{\max}$  表示,即

$$r_R = \pm \frac{(2 \sim 3)\sigma}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (1-5)$$

$$r_R = \pm \frac{1}{2} \frac{\Delta R_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (1-6)$$

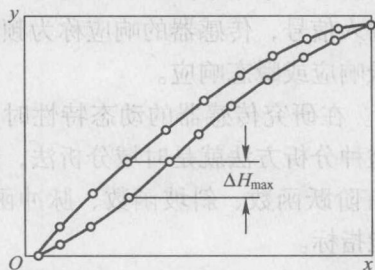


图1-4 迟滞特性

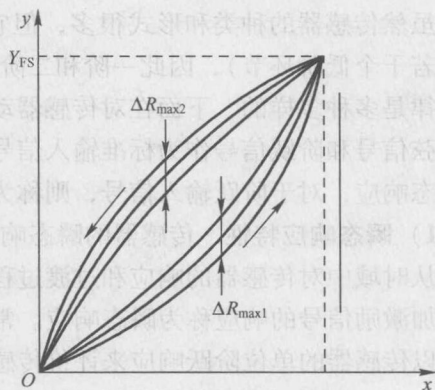


图1-5 重复性

5) **漂移** 传感器的漂移是指在外界干扰下,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。其中,零点漂移或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推移而发生的缓慢变化。温度漂移是指由环境温度变化而引起的零点或灵敏度的漂移。

## 2. 传感器的动态特性

传感器的动态特性是指其输出量对随时间变化的输入量的响应特性。当被测量随时间变化(即时间的函数)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表示。一个动态特性好的传感器,其输出量将再现输入量的变化规律,即具有相同的时间函数。实际上除了具有理想的比例特性外,输出信号将不会与输入信号具有相同的时间函数,这种差异就是所谓的动态误差。

为了说明传感器的动态特性,下面简要介绍动态测温的问题。在被测温度随时间变化或

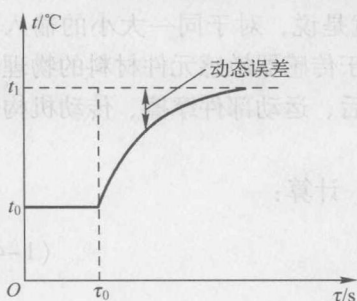


图 1-6 动态测温

传感器突然插入被测介质中,以及传感器以扫描方式测量某温度场的温度分布等情况下,都存在动态测温问题。如把一支热电偶从温度为  $t_0$  环境中迅速插入一个温度为  $t$  的恒温水槽中(插入时间忽略不计),这时热电偶测量的介质温度从  $t_0$  突然上升到  $t$ ,而热电偶反映出来的温度从  $t_0$  变化到  $t$  需要经历一段时间,即有一段过渡过程,如图 1-6 所示。热电偶反映出来的温度与介质温度的差值就称为动态误差。之所以会造成热电偶输出波形失真和产生动态误差,是因为温度传感器有热惯性(由传感器的比热容和质量大小决定)和传热热阻,使得在动态测温时传感器的输出总是滞后于被测介质的温度变化。如带有套管的热电偶的热惯性要比裸热电偶大得多。这种热惯性是热电偶固有的,它决定了热电偶测量快速温度变化时产生动态误差。影响动态特性的“固有因素”在任何传感器中都必然存在,只是其表现形式和作用程度不同而已。

动态特性除了与传感器的固有因素有关外,还与传感器输入量的变化形式有关。也就是说,在研究传感器动态特性时,通常是根据不同输入变化规律来考察传感器的响应的。

虽然传感器的种类和形式很多,但它们一般可以简化为一阶或二阶系统(高阶可以分解成若干个低阶环节),因此一阶和二阶的传感器是最基本的。传感器的输入量随时间变化的规律是多种多样的,下面在对传感器动态特性进行分析时,采用最典型、最简单、易实现的正弦信号和阶跃信号作为标准输入信号。对于正弦输入信号,传感器的响应称为频率响应或稳态响应;对于阶跃输入信号,则称为传感器的阶跃响应或瞬态响应。

**1) 瞬态响应特性** 传感器的瞬态响应是时间响应。在研究传感器的动态特性时,有时需要从时域中对传感器的响应和过渡过程进行分析。这种分析方法就是时域分析法,传感器对所加激励信号的响应称为瞬态响应。常用激励信号有阶跃函数、斜坡函数、脉冲函数等。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。

(1) 一阶传感器的单位阶跃响应。在工程上,一般将式(1-7)视为一阶传感器单位阶跃响应的通式。

$$\tau \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = x(t) \quad (1-7)$$

式中,  $x(t)$ 、 $y(t)$  分别为传感器的输入量和输出量(均是时间的函数);  $\tau$  表征传感器的时间常数,具有时间“秒”的量纲。

一阶传感器的传递函数:

$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{1}{\tau s + 1} \quad (1-8)$$

对初始状态为零的传感器,若输入一个单位阶跃信号

$$x(t) = \begin{cases} 0, & t \leq 0 \\ 1, & t > 0 \end{cases}$$

由于  $x(t)$  为单位阶跃信号,  $X(s) = 1/s$ , 传感器输出的拉普拉斯变换为

$$Y(s) = H(s)X(s) = \frac{1}{\tau s + 1} \cdot \frac{1}{s} \quad (1-9)$$

一阶传感器的单位阶跃响应信号为

$$y(t) = 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (1-10)$$

相应的响应曲线如图 1-7 所示。由图 1-7 可见, 传感器存在惯性, 它的输出不能立即复现输入信号, 而是从零开始, 按指数规律上升, 最终达到稳态值。理论上传感器的响应只在  $t$  趋于无穷大时才达到稳态值, 但实际上当  $t = 4\tau$  时其输出达到稳态值的 98.2%, 可以认为已达到稳态。 $\tau$  越小, 响应曲线越接近于输入阶跃曲线, 因此,  $\tau$  值是一阶传感器重要的性能参数。

(2) 二阶传感器的单位阶跃响应。二阶传感器的单位阶跃响应的通式为

$$\frac{d^2 y(t)}{dt^2} + 2\xi\omega_n \frac{dy(t)}{dt} + \omega_n^2 y(t) = \omega_n^2 x(t) \quad (1-11)$$

式中,  $\omega_n$  为传感器的固有频率;  $\xi$  为传感器的阻尼比。

二阶传感器的传递函数:

$$H(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (1-12)$$

传感器输出的拉普拉斯变换:

$$Y(s) = H(s)X(s) = \frac{\omega_n^2}{s(s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2)} \quad (1-13)$$

二阶传感器对阶跃信号的响应在很大程度上取决于阻尼比  $\xi$  和固有频率  $\omega_n$ 。固有频率  $\omega_n$  由传感器主要结构参数所决定,  $\omega_n$  越高, 传感器的响应越快。当  $\omega_n$  为常数时, 传感器的响应取决于阻尼比  $\xi$ 。图 1-8 所示为二阶传感器的单位阶跃响应曲线。阻尼比  $\xi$  直接影响超调量和振荡次数。当  $\xi = 0$  时, 为临界阻尼, 超调量为 100%, 产生等幅振荡, 达不到稳态。当  $\xi > 1$  时, 为过阻尼, 无超调也无振荡, 但达到稳态所需时间较长。当  $\xi < 1$  时, 为欠阻尼, 衰减振荡, 达到稳态值所需时间随  $\xi$  的减小而加长。当  $\xi = 1$  时, 响应时间最短。但实际使用中常按欠阻尼调整,  $\xi$  取 0.7 ~ 0.8 为最好。

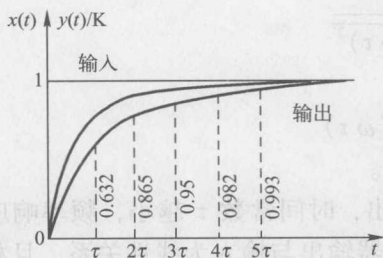


图 1-7 一阶传感器单位阶跃响应

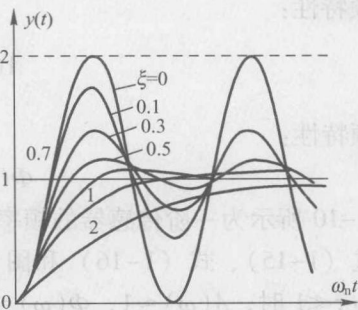


图 1-8 二阶传感器单位阶跃响应

(3) 瞬态响应特性指标。给传感器输入一个单位阶跃信号时,其输出特性如图 1-9 所示。瞬态响应特性指标的定义如下所述。

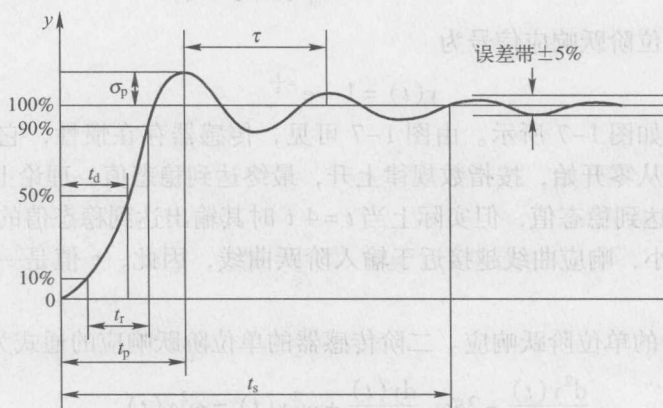


图 1-9 瞬态响应特性指标

【时间常数  $\tau$ 】一阶传感器时间常数  $\tau$  越小,响应速度越快。

【延时时间  $t_d$ 】传感器输出达到稳态值的 50% 所需的时间。

【上升时间  $t_r$ 】传感器输出达到稳态值的 90% 所需的时间。

【最大超调量  $\sigma_p$ 】传感器输出超过稳态值的最大值,  $\sigma_p = \frac{y(t_p) - y(\infty)}{y(\infty)} \times 100\%$ 。

【峰值时间  $t_p$ 】响应曲线到达第一个峰值所需的时间。

【响应时间  $t_s$ 】响应曲线衰减到稳态值  $\pm 5\%$  或  $\pm 2\%$  范围内所需的时间。

2) 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。频率响应法是从传感器的频率特性出发研究传感器的动态特性的。

(1) 一阶传感器的频率响应。将一阶传感器的传递函数中的  $s$  用  $j\omega$  代替后,即可得频率特性表达式,即

$$H(j\omega) = \frac{1}{\tau(j\omega) + 1} \quad (1-14)$$

幅频特性:

$$A(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}} \quad (1-15)$$

相频特性:

$$\Phi(\omega) = -\arctan(\omega\tau) \quad (1-16)$$

图 1-10 所示为一阶传感器的频率响应特性曲线。

从式 (1-15)、式 (1-16) 和图 1-10 可以看出,时间常数  $\tau$  越小,频率响应特性越好。当  $\omega\tau \ll 1$  时,  $A(\omega) \approx 1$ ,  $\Phi(\omega) \approx 0$ ,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  $\tau$  可以改善传感器的频率特性。



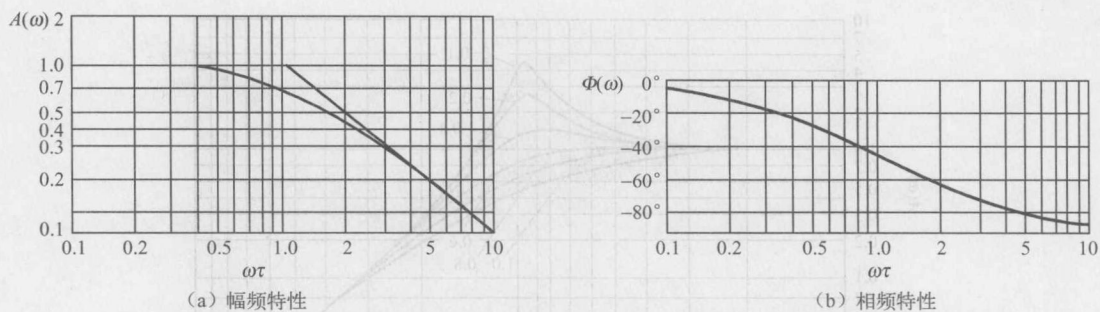


图 1-10 一阶传感器频率响应特性

(2) 二阶传感器的频率响应。由二阶传感器的传递函数 (式 (1-12)) 可写出它的频率特性表达式, 即

$$H(j\omega) = \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2 + 2j\xi \frac{\omega}{\omega_n}} \quad (1-17)$$

其幅频特性和相频特性分别为

$$A(\omega) = \frac{1}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + \left(2\xi \frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}} \quad (1-18)$$

$$\Phi(\omega) = -\arctan \frac{2\xi \frac{\omega}{\omega_n}}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2} \quad (1-19)$$

图 1-11 所示为二阶传感器的频率响应特性曲线。从式 (1-17)、式 (1-18) 和图 1-11 可见, 传感器的频率响应特性的好坏主要取决于传感器的固有频率  $\omega_n$  和阻尼比  $|\xi|$ 。当  $\xi < 1$ ,  $\omega_n \ll \omega$  时,  $A(\omega) \approx 1$ ,  $\Phi(\omega)$  很小, 此时, 传感器的输出  $y(t)$  再现了输入  $x(t)$  的波形。通常, 固有频率  $\omega_n$  至少应大于被测信号频率  $\omega$  的 3~5 倍。

为了减小动态误差和扩大频率响应范围, 一般需提高传感器固有频率  $\omega_n$ 。而固有频率  $\omega_n$  与传感器运动部件质量  $m$  和弹性敏感元件的刚度  $k$  有关, 即  $\omega_n = (k/m)^{1/2}$ 。增大刚度  $k$  和减小质量  $m$  均可提高其固有频率, 但刚度  $k$  的增加, 会使传感器灵敏度降低。所以, 在实际应用中, 应综合各种因素来确定传感器的各个特征参数。

### 3. 传感器的其他特性

静态特性和动态特性并不能完全描述传感器的性能。表 1-1 列出了在选择传感器时应当考虑的传感器和待检测量有关的另一些特性。除这些传感器特性外, 测量方法也必须始终适合于应用。例如, 在测量流量时, 若插入流量计对疏通段造成显著妨碍时, 便会引起误差。