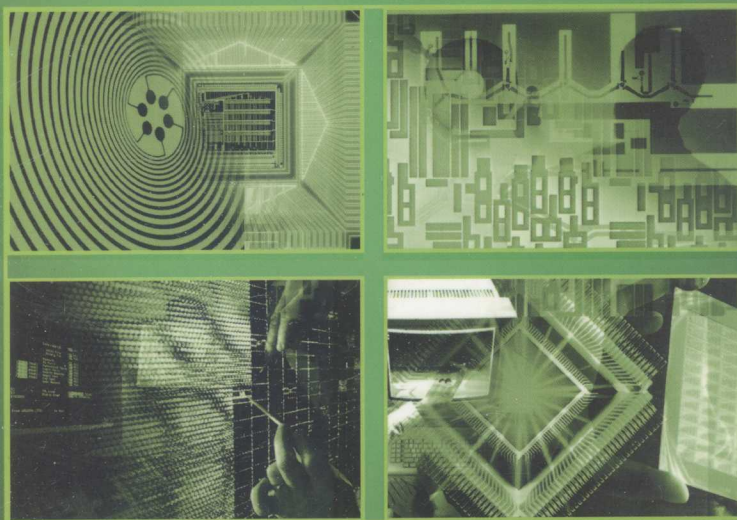


◆ 普通高等教育电子信息类规划教材 ◆

传感器技术 及应用

TECHNOLOGY AND APPLICATION OF SENSOR



康瑞清 吴华怡 郝彦爽 等编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



014010775

TP212-43

93

普通高等教育电子信息类规划教材

传感器技术及应用

康瑞清 吴华怡 郝彦爽 等编著



北航

C1697165

机械工业出版社

TP212-43
93

01401077

普通高等教育电子类教材

本书的主要内容包括：传感器的基础知识，电子行业中常用的传统传感器和新型传感器的原理及特点，物联网和自动化行业中常用的 MEMS 传感器和 RFID 的基本原理和特点以及传感器抗干扰设计方法等。

本书可以作为高等院校自动化、智能以及物联网等电子类专业的本科生教材，也可供从事传感器应用及检测技术研究开发等方面工作的相关工程技术人员参考。

本书配有电子课件，欢迎使用该教材的老师登录 www.cmpedu.com 免费注册、审核后下载，或联系编辑（QQ：1157122010，电话：010-88379753）索取。

图书在版编目（CIP）数据

传感器技术及应用/康瑞清，吴华怡，郝彦爽等编著. —北京：机械工业出版社，2013.8

普通高等教育电子信息类规划教材

ISBN 978-7-111-44165-6

I. ①传… II. ①康…②吴…③郝… 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（2013）第 226720 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）

策划编辑：李馨馨

责任编辑：尚 晨 李馨馨

责任印制：杨 曦

北京中兴印刷有限公司印刷

2013 年 10 月第 1 版·第 1 次印刷

184mm×260mm·10.75 印张·264 千字

0 001—3 000 册

标准书号：ISBN 978-7-111-44165-6

定价：26.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心：(010)88361066 教材网：<http://www.cmpedu.com>

销售一部：(010)68326294 机工官网：<http://www.cmpbook.com>

销售二部：(010)88379649 机工官博：<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线：(010)88379203 封面无防伪标均为盗版

机械工业出版社

前 言

目前,传感器在各行各业中的应用已非常普遍,尽管传感器技术应用在不同的行业中会体现出不同的特点,但绝大多数的人员是使用传感器对物理量进行检测,所以虽然传感器原理与制造技术涉及物理、化学、材料等多门学科,但是从使用传感器的角度出发可以快速掌握某个行业的传感器技术。本书针对自动化、物联网等专业特点,以传感器的实际应用为重点讲解内容,书中减少了纯粹的理论推导,在传感器类型的选择上,以行业应用较多的传感器为主要讲解对象,此外,本书还重点介绍了新型的传感器。

本书在阐述传感器原理的基础上,侧重于讲解传感器的实际应用,本书的主要内容包括:传感器的基础知识,电子行业中常用的传统传感器和新型传感器的原理及特点,物联网和自动化行业中常用的 MEMS 传感器和 RFID 的基本原理和特点以及传感器抗干扰设计方法等。各章均附有习题,便于读者的理解和掌握。全书共分为 7 章,建议的教学课时为 32 学时。

本书由北京科技大学康瑞清、吴华怡和郝彦爽等编著,其中第 1、2、3 章由康瑞清编写,第 4 章由郝彦爽编写,第 5 章由康瑞清编写,第 6 章由吴华怡编写,第 7 章由康瑞清和迟建男合编。

本书在编写的过程中,借鉴了国内外的一些优秀教材和文献,在此向相关作者表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,书中的不足和疏漏之处恳请读者批评指正。

作 者

康瑞清 吴华怡 郝彦爽

康瑞清 吴华怡 郝彦爽

康瑞清 吴华怡 郝彦爽

康瑞清 吴华怡 郝彦爽

康瑞清 吴华怡 郝彦爽

康瑞清 吴华怡 郝彦爽

康瑞清 吴华怡 郝彦爽

康瑞清 吴华怡 郝彦爽

康瑞清 吴华怡 郝彦爽

康瑞清 吴华怡 郝彦爽

康瑞清 吴华怡 郝彦爽

康瑞清 吴华怡 郝彦爽

康瑞清 吴华怡 郝彦爽

目 录

前言	1
第1章 绪论	1
1.1 传感器的定义	2
1.2 传感器的组成	2
1.3 传感器的技术指标	3
1.3.1 传感器的静态技术指标	3
1.3.2 传感器的动态技术指标	6
1.4 习题	11
第2章 电阻式传感器	12
2.1 应变式传感器	13
2.1.1 金属应变片的工作原理	13
2.1.2 电阻应变片的转换电路	15
2.1.3 应变式传感器的特点及实际应用	19
2.2 热电阻式传感器	20
2.2.1 金属热电阻的特点	20
2.2.2 半导体热敏电阻的特点	21
2.2.3 热敏电阻的应用	23
2.3 习题	25
第3章 电感式传感器	26
3.1 自感式传感器	27
3.1.1 工作原理及分类	27
3.1.2 变气隙式自感传感器	28
3.1.3 变面积式自感传感器	31
3.1.4 螺线管式自感传感器	31
3.1.5 自感式传感器常用的测量电路	32
3.1.6 自感式传感器的特点及实际应用	34
3.2 差动变压器	35
3.2.1 差动变压器的基本特性分析	37
3.2.2 差动变压器测量电路	40
3.2.3 差动变压器的应用	43
3.3 习题	45
第4章 电容式传感器	46



4.1	电容式传感器的工作原理	47
4.1.1	变面积式电容传感器	47
4.1.2	变极板间距式电容传感器	49
4.1.3	变介质介电常数式电容传感器	52
4.2	电容式传感器的测量电路	53
4.2.1	交流电桥	54
4.2.2	运算放大器测量电路	54
4.2.3	脉冲宽度调制电路	55
4.2.4	电容数字转换芯片	57
4.3	电容式传感器的应用	58
4.3.1	电容式差压变送器	58
4.3.2	电容式液位计	59
4.3.3	电容式振动位移传感器	60
4.3.4	电容式加速度传感器	60
4.3.5	电容式指纹传感器	61
4.4	习题	62
第5章	热电偶传感器	63
5.1	热电偶传感器的测温原理	64
5.2	热电偶传感器的基本定律	66
5.2.1	中间导体定律	66
5.2.2	中间温度定律	68
5.2.3	标准电极定律	69
5.3	热电偶传感器的测温方法和冷端补偿方法	69
5.3.1	0℃恒温法	70
5.3.2	冷端恒温法	70
5.3.3	补偿导线法	70
5.3.4	补偿电桥法	71
5.4	热电偶传感器的应用	71
5.5	习题	73
第6章	现代传感器	74
6.1	微波传感器	75
6.1.1	微波的概念及特性	75
6.1.2	微波传感器的原理	76
6.1.3	微波传感器的分类	76
6.1.4	微波传感器的应用	79
6.2	超声波传感器	82
6.2.1	超声波的概念及特性	83
6.2.2	超声波传感器的原理及主要性能指标	83
6.2.3	超声波传感器的应用	86



6.3	光纤传感器	89
6.3.1	光纤的结构及工作原理	89
6.3.2	光纤传感器的特点及分类	91
6.3.3	光纤传感器的应用	92
6.4	红外传感器	94
6.4.1	红外辐射的基本概念	95
6.4.2	红外传感器的分类	95
6.4.3	红外传感器的应用	98
6.4.4	红外传感器的发展前景	100
6.5	RFID 射频识别技术	100
6.5.1	RFID 的基本原理	101
6.5.2	RFID 的分类	102
6.5.3	RFID 的行业应用	104
6.6	MEMS 技术与微型传感器	107
6.6.1	MEMS 技术概述	107
6.6.2	微型传感器及应用	108
6.7	压电传感器	111
6.7.1	压电效应	111
6.7.2	压电系数	113
6.7.3	压电材料	113
6.7.4	压电传感器及应用	114
6.8	霍尔传感器	125
6.8.1	工作原理	125
6.8.2	霍尔传感器的特性	127
6.8.3	霍尔传感器的测量电路	133
6.8.4	霍尔传感器应用	133
6.9	习题	138
第7章	抗干扰技术	140
7.1	干扰的种类、噪声源	141
7.1.1	干扰的种类	141
7.1.2	噪声源	142
7.2	噪声耦合的方式	142
7.2.1	噪声形成干扰的三要素	142
7.2.2	噪声的耦合方式	143
7.3	干扰的作用方式	146
7.3.1	串模干扰	146
7.3.2	共模干扰	147
7.3.3	共模干扰抑制比	148
7.4	抗干扰技术	149



7.4.1 屏蔽技术	149
7.4.2 接地技术	150
7.4.3 浮置技术	152
7.4.4 隔离技术	153
7.5 习题	154
附录	155
附录 A 铂铑 10-铂热电偶分度表	155
附录 B Pt100 热电阻分度表	161
参考文献	164

第1章

绪论

- 1.1 传感器的定义
- 1.2 传感器的组成
- 1.3 传感器的技术指标
- 1.4 习题

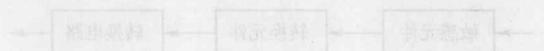


图 1-1 传感器的组成



随着工业现代化程度的提高以及工业过程自动化规模不断扩大,需要人们监测、控制及传输的物理量也越来越多。物理量的检测是由传感器完成的,传感器是检测系统中的第一个环节,承担的是信号检出的任务,传感器的性能会直接影响整个工业过程自动化的准确性、安全性和可靠性。社会相关产业的发展对传感器技术提出进一步的要求,这会不断促进传感器技术的发展。

传感器的作用是工业自动化过程以及其他行业,如能源、交通、环境保护、医疗卫生等提供正确的测量信号,从而提供给后续系统进行信号的分析、判断等工作。所以传感器是检测系统的基础,是现场信号进入检测系统的通道,是人类感知系统的补充和延伸,在人们的生活中具有很重要的作用。

1.1 传感器的定义

传感器是指能够感受到被测物理量并按一定规律转换成可用输出信号的元器件或装置。

传感器定义中需要注意以下几个方面的问题。

(1) 传感器只感受自身设定的被测量信息

例如一个用于测量压力的传感器,如果环境温度的改变也能够引起传感器输出的变化。那么这个传感器就感受到了自身设定以外的量,必须采取一定的措施杜绝此类事情的发生。

(2) 传感器需按一定规律转换

传感器的输入和输出可以通过一个确定的数学表达式或者数学模型表示,这样通过观察研究传感器的输出信号就可以了解到被测物理量的变化情况。

(3) 被测物理量涵盖了各行各业需要测量的量

例如物理量、化学量、生物量等,如果某种被测物理量还没有传感器可以测量出来,说明传感器技术在这个方面还有发展的空间。

不同的传感器,其组成部分可能稍有不同,一般来说,传感器都由敏感元件、转换元件以及转换电路组成。其中敏感元件是由特定的材料制成的,它可以直接感受被测物理量,并将被测物理量按照一定的对应关系转换为容易处理或转换的信号,如果敏感元件的输出信号可以方便地进行后续处理与检测,则转换元件及转换电路部分就都不需要了,例如热电偶传感器。如果经过敏感元件后输出的信号是直流电压信号,经过信号放大后就可以直接测量;如果经过敏感元件后的信号仍然不方便检测,例如应变式传感器的输出信号是电阻的变化量,则需要经过转换电路将其转换为电压信号才能再进行检测。

1.2 传感器的组成

传感器是用来感受外界的被测物理量,并按照一定的规律测量该物理量的装置,是所有过程控制、数据分析与评价等工作的基础。

传感器一般由敏感元件、转换元件和转换电路组成,其组成框图如图 1-1 所示。

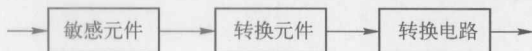


图 1-1 一般传感器的组成框图

敏感元件是能够灵敏地感受被测量并作出响应的元件,它的输出是与被测量成一定数学关系的物理量。不同材料的敏感元件,其能够感受的被测量不同,可以构成不同的传感器。材料科学的发展对敏感元件的发展有直接的推动作用,如金属或半导体应变片,能通过感受压力的大小而引起形变,形变程度就是对压力大小的响应。铂电阻能通过感受温度的升降而改变其阻值,阻值的变化就是对温度升降的响应,所以铂电阻就是一种温度敏感元件,而金属或半导体应变片,就是一种压力敏感元件。

转换元件是将敏感元件输出的物理量进一步加以转换的元件,它输出的一般是电路参数,便于使用电路进行处理。有些传感器,其敏感元件的输出已经是电路参数,那么该敏感元件就具有了敏感和转换两个功能。如热敏电阻,它不仅能直接感受温度的变化,而且能将温度的变化转换成电阻的变化,也就是将非电路参数(温度)直接变成了电路参数(电阻),这样的传感器就不需要转换元件了。

转换电路是将转换元件输出的电路参数进行处理,最后转换成电量输出的装置。

需要说明的是,图 1-1 仅表示一般情况下的传感器的组成,有些传感器,由于采用的敏感材料不同,其组成可能比图中更简单或更复杂。

1.3 传感器的技术指标

传感器在使用前和使用中,其对被测物理量的敏感程度需要一些技术指标进行量化,传感器的技术指标对传感器的选择和使用都有指导作用。

针对被测物理量的不同,传感器的技术指标可分为静态技术指标和动态技术指标两类。如果传感器的输入信号不随时间变化或变化非常缓慢,则其技术指标由静态技术指标进行衡量;如果被测物理量随着时间的变化而变化,传感器需要反映被测物理量的大小和随时间变化的规律,则由传感器的动态技术指标来进行衡量。

1.3.1 传感器的静态技术指标

传感器的静态技术指标,指的是被测量值处于稳定状态时传感器的输出与输入的关系,在不考虑传感器的迟滞和蠕变效应的情况下,传感器的输出-输入关系可以由下面的公式确定:

$$Y = a_0 + a_1 X + a_2 X^2 + \cdots + a_n X^n \quad (1-1)$$

式中 X ——输入量,即传感器的被测量;

Y ——传感器的输出量;

a_0 ——零位输出;

a_1 ——传感器的灵敏度,常用 K 表示;

$a_2, a_3, \cdots, a_n$ ——非线性项待定常数,其数值由具体传感器的非线性特性决定。

从式(1-1)中可以看出,当 $a_0=0$ 且传感器的被测量为 0 时,传感器的输出量也为 0。此时,传感器输出量的表达式由线性项($a_1 X$)和非线性项($a_2 X^2, \cdots, a_n X^n$)组成,如果其非线性项小于等于传感器的允许值,则该传感器可以近似为线性传感器。实际中制造传感器时,在一定使用条件下,其非线性部分可以忽略不计,这样传感器在使用中可以近似为线性

传感器,方便测量和数据分析。

1. 灵敏度

传感器的灵敏度是表示传感器在稳态工作情况下输入增量与由它引起的输出增量之间的函数关系,是有单位的量。更确切地说,灵敏度 k 等于传感器输出增量与被测物理量增量之比,是传感器在稳态输出输入特性曲线上各点的斜率,可用下式表示

$$K = \frac{dy}{dx} = \frac{df(x)}{dx} = f'(x) \quad (1-2)$$

对于线性传感器,其灵敏度为传感器输入输出特性直线的斜率,为常数。灵敏度为常数的传感器有两个优势:方便读数和便于分析处理测量的结果。从灵敏度的定义中可以看出,传感器的灵敏度值越高表示该传感器越灵敏。

为了使用方便,实际中经常使用相对灵敏度来表示传感器的灵敏程度,相对灵敏度表示的是传感器输出的增量对被测物理量的相对变化率而言的灵敏度,其数学表达式为

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

另一种相对灵敏度的表示式为

$$S_g = \frac{\Delta y}{\frac{\Delta x}{x} 100\%} \quad (1-4)$$

相对灵敏度的两种表达方式在实际中可以根据具体情况选择使用。

从灵敏度的表达式中可以得知,灵敏度的量纲与输入、输出的量纲有关系。例如,某位移传感器在位移变化 1mm 时输出电压变化为 200mV,则根据式(1-2)可知,其灵敏度为 200mV/mm。相对灵敏度的量纲以此类推。

2. 线性度

理想情况下的传感器都是线性传感器,其灵敏度为常数,在使用中便于分析和处理测量结果。而实际中的传感器大多数不是线性传感器,但在一定情况下可以近似为线性传感器,在近似过程中会出现一定的误差,叫做传感器的线性度,也称为传感器的非线性误差,传感器的线性度表征的是传感器由非线性近似为线性所产生的误差。

线性度的定义是传感器实际的输入-输出特性曲线对理想直线的输入-输出特性曲线的近似程度。传感器的线性度用实际输入-输出特性曲线与理想的输入-输出特性直线的最大偏差对满量程的百分比表示,如图 1-2 所示,线性度的数学表达式为

$$\alpha_L \frac{\Delta}{A} \times 100\% \quad (1-5)$$

式(1-5)中, Δ 是最大偏差值; A 为 100% 输入时对应的理想输出。

如果传感器的线性度超过允许值,则表示该传感器不能近似为线性传感器,其灵敏度为变化的量。

从图 1-2 可以得出,传感器的线性度值与理想直线的选择有关系,一般情况下,使用最小二乘法得出的理想直线的传感器的线性度最小。

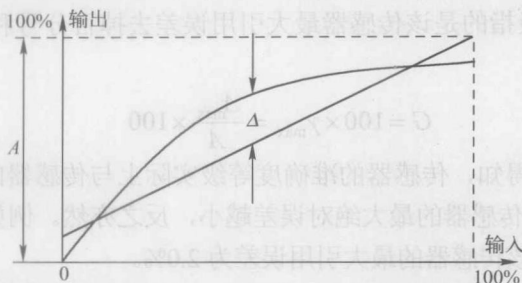


图 1-2 传感器的线性度

3. 重复性

传感器的重复性是指在同一工作条件下, 输入被测物理量按照同一方向作全量程 (0~100%) 变化多次 (一般要求三次以上) 时, 输入-输出特性的一致性。重复性的数学表达式为输入-输出特性曲线间最大的不一致性对满量程的百分数表示, 没有正负号, 如图 1-3 所示, 其数学表达式为

$$\alpha_K = \frac{\Delta}{A} \times 100\% \quad (1-6)$$

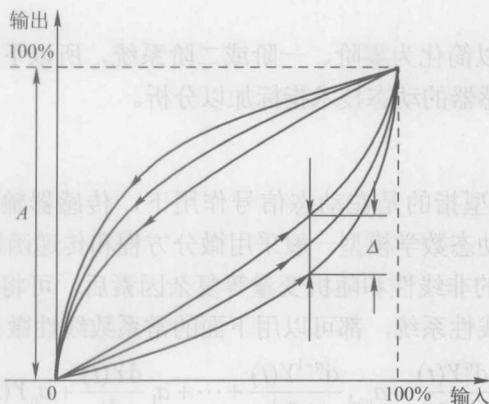


图 1-3 传感器的重复性

4. 准确度等级

传感器的准确度等级是根据传感器的引用误差来确定的。引用误差指的是传感器测量的绝对误差与其满量程之比, 一般用百分数表示, 其数学表达式为

$$\gamma = \frac{\Delta}{A} \times 100\% \quad (1-7)$$

式中 γ ——引用误差;

Δ ——绝对误差;

A ——满量程。

从引用误差的表达式中可以看出, 对于一个具体的传感器而言, 其分母是一个常数, 与被测物理量的大小无关, 所以引用误差表达的是一个绝对误差。

传感器的准确度等级指的是该传感器最大引用误差去掉百分号和正负号后对应的值,用 G 表示,即

$$G = 100 \times \gamma_{\max} = \frac{\Delta_{\max}}{A} \times 100 \quad (1-8)$$

从式(1-8)中可以得知,传感器的准确度等级实际上与传感器的绝对误差的最大值 $\Delta_{\max}$ 相关,准确度等级越小,传感器的最大绝对误差越小,反之亦然。例如某种压力传感器的准确度等级 G 为 2.0,则表示该传感器的最大引用误差为 2.0%。

又如,如果某温度传感器的测量范围为 100°C ,若该传感器的准确度等级为 0.5,则表示在该测量范围内,最大测量误差不超过 0.5°C 。所以在选择同种传感器时,要根据实际要求选择合适传感器的准确度等级。

1.3.2 传感器的动态技术指标

传感器的动态技术指标指的是传感器对于随时间变化的输入量的响应特性。当传感器被测量是随时间变化的信号时,在理想情况下,其输出量与被测量随时间变化的规律应该相同。但在实际情况下,它们只能在一定的频率范围内和一定的动态范围内保持一致。一般根据传感器对一些标准的动态激励信号的响应来判定它的动态特性,从而得到它的动态技术指标。研究动态技术指标的激励信号有正弦函数信号、阶跃函数信号和斜坡函数信号,经常使用的是前两种指标。

绝大多数传感器都可以简化为零阶、一阶或二阶系统,所以下面将从时域和频域两个方面对零阶、一阶和二阶传感器的动态技术指标加以分析。

1. 数学模型

传感器的动态数学模型指的是在动态信号作用下,传感器输入-输出量之间的函数关系,通常称为响应特性。动态数学模型一般采用微分方程和传递函数描述。

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,对于任何一个线性系统,都可以用下面的常系数线性微分方程表示:

$$\begin{aligned} a_n \frac{d^n Y(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} Y(t)}{dt^{n-1}} + \cdots + a_1 \frac{dY(t)}{dt} + a_0 Y(t) \\ = b_m \frac{d^m X(t)}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} X(t)}{dt^{m-1}} + \cdots + b_1 \frac{dX(t)}{dt} + b_0 X(t) \end{aligned} \quad (1-9)$$

式中 $Y(t)$ ——输出量;

$X(t)$ ——输入量;

t ——时间;

$a_0, a_1, \cdots, a_n$ 和 $b_0, b_1, \cdots, b_n$ ——常数。

在满足 $X(0)$ 、 $Y(0)$ 和各阶导数的初始值都为零的情况下,对上式进行拉普拉斯变换,得

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

其传递函数 $H(s)$ 为

$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \cdots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \cdots + a_1 s + a_0} \quad (1-10)$$

则传感器的输出响应为

$$Y(s) = H(s)X(s) \quad (1-11)$$

式(1-10)中, 等号右边是一个与输入无关的表达式, 只与传感器本身的特性有关。

传递函数 $H(s)$ 用于描述传感器本身传递信息的特性, 即传输和变换特性, 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。

从式(1-9)可以得出零阶、一阶和二阶传感器的数学模型分别为

对零阶传感器而言, 只有系数 a_0 、 b_0 不为零, 微分方程为

$$a_0 Y(t) = b_0 X(t) \quad (1-12)$$

或者可以表示为

$$Y(t) = \frac{b_0}{a_0} X(t) = KX(t)$$

其中 $K=b_0/a_0$, 称为传感器的静态灵敏度, 为常数。

对一阶传感器而言, 不为零的系数为 a_0 、 a_1 、 b_0 , 微分方程为

$$a_1 \frac{dY(t)}{dt} + a_0 Y(t) = b_0 X(t) \quad (1-13)$$

从式(1-10)可以得出其传递函数为

$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{b_0}{a_1 s + a_0} \quad (1-14)$$

对二阶传感器而言, 不为零的系数为 a_0 、 a_1 、 a_2 、 b_0 , 微分方程为

$$a_2 \frac{d^2 Y(t)}{dt^2} + a_1 \frac{dY(t)}{dt} + a_0 Y(t) = b_0 X(t) \quad (1-15)$$

其传递函数为

$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{b_0}{a_2 s^2 + a_1 s + a_0} \quad (1-16)$$

2. 动态特性

最常用研究传感器动态特性的方法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。本节通过阶跃响应和频率响应方法, 研究一阶和二阶传感器系统的动态特性。

传感器输入的阶跃函数及其拉普拉斯变换分别为

阶跃函数

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

拉普拉斯变换

$$X(s) = \frac{1}{s} \quad (1-17)$$

(1) 一阶传感器系统

将一阶传感器系统的传递函数做如下变换

$$H(s) = \frac{b_0}{a_1 s + a_0} = \frac{b_0/a_0}{a_1/a_0 s + 1} = \frac{K}{\tau s + 1} \quad (1-18)$$

其中, $K=b_0/a_0$ 为静态灵敏度, 为方便计算, 一般进行归一化处理, 令 $K=1$, $\tau=a_1/a_0$ 为传感器的时间常数。

1) 阶跃响应特性

将式 (1-17) 和式 (1-18) 带入式 (1-11), 得到在输入为阶跃函数的情况下, 一阶传感器输出的拉普拉斯变换为。

$$Y(s) = \frac{1}{\tau s + 1} \cdot \frac{1}{s} \quad (1-19)$$

对式 (1-19) 进行拉普拉斯反变换得到传感器的输出信号为

$$Y(t) = 1 - e^{-t/\tau} \quad (1-20)$$

从式 (1-20) 可以看出, 传感器的输出由两部分组成, 第一部分是理想状态的输出, 与输入信号相同; 第二部分是一个指数函数, 该部分衰减得越迅速, 传感器的动态特性越好。从该指数函数的表达式中可知, 时间常数 τ 越小, 该部分衰减的速度越快, 即系统需要达到稳定的时间越少, 所以时间常数 τ 是反映一阶传感器的重要参数。

当 $t=4\tau$ 时, 传感器的输出达到稳定值的 98.2%, 一般在工程上认为已经达到稳定状态, 即认为输出信号随时间的变化规律与被测量随时间的变化规律基本一致, 可以进行测量。

2) 频率响应特性

传感器的频率响应特性包括幅频特性和相频特性, 其物理意义是: 当传感器的输入信号是一个幅值不变而频率变化的正弦波时, 传感器输出信号的幅值和相位随频率的变化而变化。

当传感器输入信号为 $X(t)=\sin(\omega t)$, 其幅-相频率特性函数可以通过将式 (1-18) 中的 s 用 $j\omega$ 代替来得到, 即

$$H(j\omega) = \frac{1}{\tau j\omega + 1} \quad (1-21)$$

$H(j\omega)$ 的模和相角分别代表一阶传感器的幅频特性和相频特性, 即

幅频特性

$$A(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1+(\tau\omega)^2}} \quad (1-22)$$

相频特性

$$\Phi(\omega) = -\arctan(\omega\tau) \quad (1-23)$$

一阶传感器的幅频特性、相频特性如图 1-4 所示。

从一阶传感器的频率特性公式和图 1-4 可以看出, 时间常数 τ 越小, 频率响应特性越好。当 $\tau \ll 1$ 或者 $\tau\omega \ll 1$ 时, 满足 $A(\omega) \approx 1$, $\Phi(\omega) \approx \omega\tau$, 表面传感器的输出与输入为线性关系, 相位差与频率 ω 呈线性关系, 输出信号比较真实地反映了输入信号的变化规律, 即一阶传感器的频率响应特性主要取决于时间常数 τ , 减小时间常数 τ 可以有效地改善传感器的频

率特性。

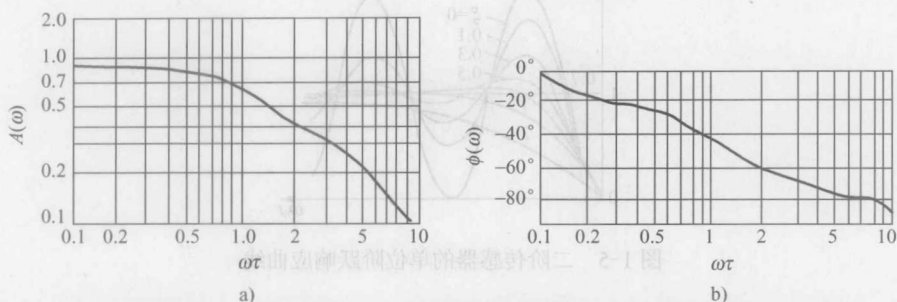


图 1-4 一阶传感器的频率特性

a) 幅频特性 b) 相频特性

(2) 二阶传感器系统

典型的二阶传感器系统是由质量、弹簧和阻尼组成的，其传递函数做如下变换

$$H(s) = \frac{b_0}{a_2 s^2 + a_1 s + a_0} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (1-24)$$

式中， $K=b_0/a_0$ 为静态灵敏度，为方便计算，一般进行归一化处理，令 $K=1$ ； $\xi = \frac{a_1}{2\sqrt{a_0 a_2}}$ 为阻尼系数； $\omega_n = \sqrt{a_0/a_2}$ 为传感器无阻尼固有频率，由传感器结构确定。

1) 阶跃响应特性

将阶跃函数的拉普拉斯变换式 (1-17) 和二阶传感器传递函数式 (1-24) 的表达式带入式 (1-11)，得到二阶传感器在输入为阶跃函数的情况下，其输出的拉普拉斯变换为

$$Y(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \cdot \frac{1}{s} \quad (1-25)$$

对式 (1-25) 进行拉普拉斯反变换，得到传感器的输出信号表达式

$$Y(t) = 1 - \left[\frac{e^{-\xi\omega_n t}}{\sqrt{1-\xi^2}} \right] \cdot \sin(\omega_d t + \varphi) \quad (1-26)$$

其中

$$\varphi = -\arctan\left[\frac{\sqrt{1-\xi^2}}{\xi}\right], \quad \omega_d = \omega_n \sqrt{1-\xi^2}$$

式中， ω_d 为存在阻尼时的固有频率。

图 1-5 为根据式 (1-26) 画出的二阶传感器单位阶跃响应曲线。从中可以看出，不同的阻尼系数对应不同的曲线，下面分别进行讨论。

当传感器的固有频率 ω_n 为常数时，传感器的响应特性取决于阻尼系数 ξ ，根据阻尼系数的不同取值，分为下面几种情况：

$\xi=0$ 的情况称为零阻尼，输出为一个等幅振荡函数，系统永远达不到稳定，其振荡频率就是传感器的固有频率 ω_n 。实际上任何传感器系统总包含一定的阻尼，所以总有 $\omega_d < \omega_n$ 成立。