



电气与信息学科精品课程系列教材

传感器技术及应用

CHUANGANQI JISHU JI YINGYONG

夏银桥 吴亮 李莫 / 编著



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

电气与信息学科精品课程系列教材

传感器技术及应用

夏银桥 吴 亮 李 莫 编著

华中科技大学出版社
中国·武汉

内 容 简 介

本书既详细阐述了各类传感器的基本原理、工作特性,又着重分析了传感器应用电路的设计原理和工程电路实例。全书共有12章,第1章介绍测量技术的理论基础和有关传感器的基本知识;第2~12章依据传感器的工作原理分类,分别讲述应变式、电感式、电容式、压电式、磁电式、光电式、温度、辐射与波式、气敏、湿敏、生物及智能传感器的工作原理、性能、测量电路和实际应用电路。本书内容丰富,许多传感器的应用电路已在工程实际中得到验证并采用,读者可以直接拿来使用,具有很强的实用性。

本书可作为自动化、测控技术、电子信息、机电工程、计算机应用等电类专业的本科,以及职业技术学院专科学生的教材,也可供其他相近专业、中等专业学校的师生和相关领域的工程技术人员参考。

本书备有PPT多媒体资料,可免费提供给使用本书作为教材的教师参考。

图书在版编目(CIP)数据

传感器技术及应用/夏银桥 吴亮 李莫 编著. —武汉:华中科技大学出版社,2011.2
ISBN 978-7-5609-6860-5

I. 传… II. ①夏… ②吴… ③李… III. 传感器-高等学校-教材 IV. TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 259645 号

传感器技术及应用

夏银桥 吴亮 李莫 编著

策划编辑:谢燕群

责任编辑:田 密

封面设计:刘 卉

责任校对:刘 竣

责任监印:熊庆玉

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87557437

录 排:武汉市兴明图文信息有限公司

印 刷:华中科技大学印刷厂

开 本:787mm×1092mm 1/16

印 张:17.5

字 数:415千字

版 次:2011年2月第1版第1次印刷

定 价:29.80元



本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究

前 言

信息领域的三大技术包括信息采集技术、信息传输技术和信息处理技术,而首当其冲的信息采集技术则依赖于传感器技术,因此传感器被称为信息技术的“五官”。现代化生产与自动控制系统是以计算机为核心,以传感器为基础组成的。传感器是实现自动检测和自动控制的首要环节,如果没有高度保真和性能可靠的传感器,没有先进的传感器技术,信息的准确获得与精密检测就成了一句空话,通信技术和计算机技术也就成了无源之水、无本之木,现代测量与自动化技术随之变成水中月、镜中之花。因此,传感器与传感器技术的发展水平是衡量一个国家综合实力的重要标志,也是判断一个国家科学技术现代化程度与生产水平高低的重要依据。

近年来,随着传感器技术的发展,各种类型的传感器已广泛应用到工业生产与控制的各个领域,因此从事相关技术领域工作的人们非常渴望掌握这方面的知识,尤其是对掌握和运用传感器电路应用技术的意愿越来越迫切。这是因为要及时、准确地获取各种信息,解决工程、生产及科研中遇到的各种具体的检测问题,就必须了解和熟悉传感器,同时也要学会合理选择和应用各种传感器及传感器技术。

传感器技术内涵极为宽广,正在成为诸多自然科学领域共性技术,成为多学科交汇点,而且多功能智能化集成传感器技术与信息科学另外两个部分——信息传输、信息处理正逐渐融为一体,因此本书各章节内容具有相互独立性。本书是编者在多年从事传感器的本科和职业技术学院专科的教学,以及科研工作的基础上编写成的,书中内容丰富、全面,原理描述由浅入深、浅显易懂,应用实例来自于工程实际,具有实用性。

全书共分12章,包括三个方面的内容:一是介绍传感器和工程测量的基础知识;二是介绍各种传感器的原理、结构和应用;三是介绍传感器在工程应用中的设计方法,以及设计应用实例分析。全书内容以传统的典型传感器为主,同时增加了新型的传感器,主要介绍传感器的原理、结构特点、测量电路,以及传感器在工业生产、日常生活中的实际应用。书中每章内容具有独立性,使用本教材时,可根据不同专业的要求和特点,有选择性地教学。

本书由夏银桥编写第1章、第3章、第6章、第8章,北方民族大学吴亮编写第2章、第4章、第5章、第7章,武汉大学李莫编写第9~12章。该书在编写过程中,得到了华中科技大学容太平、涂仁发等许多教授的支持和帮助,他们提出了许多宝贵意见,对他们的悉心指导和帮助表示真挚的谢意。同时也对本书参考文献中的有关作者致以衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中错误和不妥之处在所难免,恳请广大读者批评指正,提出宝贵意见。

编 者

2010年12月

目 录

第 1 章 传感器概述与测量技术基础	(1)
1.1 传感器概述	(1)
1.2 测量技术理论基础	(15)
1.3 测量误差及数据处理	(19)
思考题与习题	(31)
第 2 章 应变式传感器	(33)
2.1 金属电阻应变式传感器	(33)
2.2 压阻应变式传感器	(44)
2.3 应变式传感器的测量电路	(45)
2.4 应变式传感器在工程中的应用	(48)
思考题与习题	(53)
第 3 章 电感式传感器	(55)
3.1 自感式传感器	(55)
3.2 差动变压器式传感器	(66)
3.3 电涡流式传感器	(69)
3.4 电感式传感器的产品应用简介	(73)
思考题与习题	(77)
第 4 章 电容式传感器	(78)
4.1 电容传感器工作原理及其分类	(78)
4.2 电容式传感器的等效电路	(86)
4.3 电容式传感器的转换测量电路	(86)
4.4 电容式传感器在工程中的应用	(92)
思考题与习题	(97)
第 5 章 压电式传感器	(100)
5.1 压电式传感器的工作原理	(100)
5.2 压电式传感器等效电路和测量电路	(104)
5.3 压电式传感器的应用	(108)
思考题与习题	(111)
第 6 章 磁电式传感器	(112)
6.1 磁电感应式传感器	(112)

6.2 霍尔式传感器	(116)
思考题与习题	(121)
第7章 光电式传感器	(122)
7.1 光电效应	(122)
7.2 外光电效应器件	(124)
7.3 内光电效应器件	(127)
7.4 光电式传感器的应用	(134)
7.5 图像传感器	(139)
7.6 光纤与光纤传感器	(143)
思考题与习题	(150)
第8章 热电式传感器	(151)
8.1 热电偶温度传感器	(152)
8.2 热电阻温度传感器	(168)
8.3 热敏电阻温度传感器	(173)
8.4 集成温度传感器及其应用	(176)
思考题与习题	(182)
第9章 波式传感器和辐射式传感器	(184)
9.1 超声波的物理特性	(184)
9.2 超声波传感器及其应用	(186)
9.3 微波传感器及其应用	(193)
9.4 红外传感器	(197)
9.5 核辐射式传感器	(202)
思考题与习题	(207)
第10章 气敏传感器和湿敏传感器	(208)
10.1 气敏传感器	(208)
10.2 湿敏传感器	(218)
思考题与习题	(225)
第11章 生物传感器	(226)
11.1 生物传感器的基本概念	(226)
11.2 生物传感器原理	(229)
11.3 生物组分固化技术	(235)
11.3 酶电极生物传感器	(239)
11.4 生物芯片	(244)
11.5 生物传感器应用及展望	(249)

思考题与习题	(251)
第 12 章 智能传感器	(252)
12.1 智能传感器概述	(252)
12.2 智能传感器的功能及特点	(255)
12.3 智能传感器的实现途径	(257)
12.4 智能传感器实例	(260)
12.5 智能化传感器的发展与应用现状	(270)
思考题与习题	(270)
参考文献	(272)

第 1 章 传感器概述与测量技术基础

在系统学习各类传感器之前,首先应该掌握传感器的基本理论及检测技术的相关知识,主要包括传感器的概念、分类和基本特性,检测系统的组成与功能,基本测量方法,测量误差及数据处理等内容,为后续知识的学习打下基础。

1.1 传感器概述

现代社会科学技术高度发达,是因为人类有认识自然、改造自然的能力,人类是通过眼(视觉)、鼻(嗅觉)、耳(听觉)、口(味觉)、肌肤(触觉)五种器官来感知、接收外界的各种信息,并将这些信息通过神经网络传送到大脑,从而获取外界信息的。大脑对这些信息分析处理后做出相应的命令,通过神经网络传递到人体相应的器官组织指挥人的行为。因此,从某种意义上来说,人的五官就是一种传感器。

但是,人类仅仅依靠自身的五官去认识和改造自然还远远不够,必须不断地创造先进的生产工具。当今的信息领域三大技术是信息的采集、信息的传输和信息的处理,其中信息的采集涉及传感器技术。人们越来越迫切地希望能准确地掌握自然界和生产领域更多的各类信息,而传感器则是人们获取这些信息的主要途径和手段,因此传感器与人们的关系越来越密切。传感器是实现自动测控的首要环节,是人类的电五官,它对于提高生产的自动化程度、促进现代科学技术的发展具有极其重要的作用(见图 1-1)。

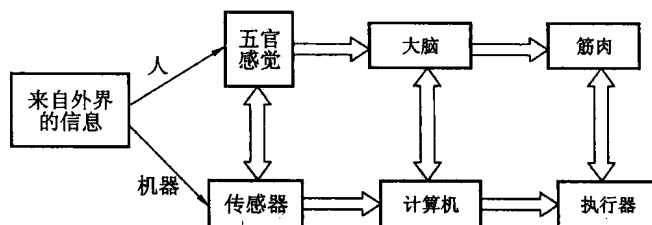


图 1-1 传感器 → 电五官

1.1.1 传感器的概念

传感器(sensor)是一种获取信息的装置,它的定义可以分为广义的和狭义的两种。广义传感器是指能感受外界信息并按一定规律转换成便于处理和控制的信息的装置;狭义传感器是指能将外界信息按一定规律转换成电信号的装置。通俗的说法:传感器是对物理、化学、生物等非电量敏感,并能将其转换成电信号的器件(元件);传感器是将物理、化学、生物等非电量转换成电量,并具有传输、显示等功能的装置。

关于传感器的定义,我国国标 GB/T 7665—1987 规定:“传感器是能感受规定的测量量并按一定规律转换成可用输出信号的器件或装置。”也就是说,传感器是一种按一定的精度

把被测量转换为与之有确定关系的、便于应用的某种物理量的测量器件或装置,用于满足系统信息传输、存储、显示、记录及控制等要求。

(1) 传感器首先是一种测量器件或装置,它的作用体现在测量上。例如,常见的发电机是一种可以将机械能转变成电能的转换装置。从能量转换的角度看,它是一种发电设备,不能称为传感器;但从另一个角度看,人们可以通过发电机发电量的大小来测量调速系统的机械转速,这时,发电机就可看成是一种用于测量转速的测量装置,是一种速度传感器,通常称为测速发电机。应用传感器就是为了获得被测量的准确信息,这也是本课程的学习目的。

(2) 传感器定义中所谓“可用输出信号”是指便于传输、转换及处理的信号,主要包括气、光、电等信号,现在一般就是指电信号(如电压、电流、电势及各种电参数等),而“规定的测量量”一般是指非电量信号,主要包括各种物理量、化学量和生物量等,在工程中常需要测量的非电量信号有力、压力、温度、流量、位移、速度、加速度、转速、浓度等。正是由于这类非电量信号不能像电信号那样可由电工仪表和电子仪器直接测量,所以需要利用传感器技术来实现由非电量到电量的转换。

(3) 传感器的输入和输出信号应该具有明确的对应关系,并且应保证一定的精度。

1.1.2 传感器的组成和分类

1. 传感器的组成

传感器的种类繁多,其工作原理、性能特点和应用领域各不相同,所以结构、组成差异很大。但总的来说,传感器通常由敏感器件、转换器件及测量电路组成,有时还加上电源电路,如图 1-2 所示。

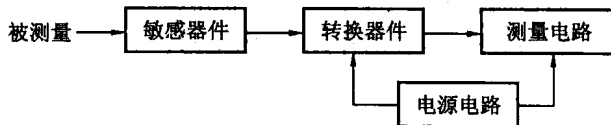


图 1-2 传感器组成框图

1) 敏感器件

敏感器件(sensing element)是指传感器中能直接感受被测量的变化,并输出与被测量成为确定关系的某一物理量的器件。敏感器件是传感器的核心,也是研究、设计和制作传感器的关键。如图 1-3 所示是一种气体压力传感器的示意图。膜盒 2 的下半部与壳体 1 固定,上半部通过连杆与磁芯 4 相连,磁芯 4 置于两个电感线圈 3 中,电感线圈接入测量电路 5。这里膜盒就是敏感器件,其外部与大气压力相通,内部感受被测压力 p 。当压力 p 变化时,引起膜盒上半部移动,即输出相应的位移量。

2) 转换器件

转换器件(transduction element)是指传感器中能

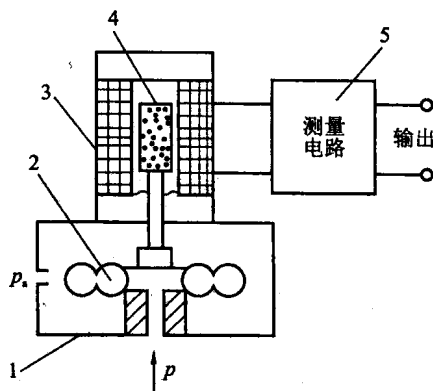


图 1-3 气体压力传感器

1—壳体;2—膜盒;3—电感线圈;
4—磁芯;5—测量电路

将敏感器件输出的物理量转换成适于传输或测量的电信号的部分。在图 1-3 所示结构中,转换器件是电感线圈 3,它把输入的位移量转换成电感的变化。需要指出的是,并不是所有的传感器都能明显地区分敏感器件和转换器件两部分的,有的传感器转换器件不止一个,需要经过若干次的转换,有的传感器则是两者合二为一的。

3) 测量电路

测量电路(measuring circuit) 又称转换电路或信号处理电路,它的作用是将转换器件输出的电信号进行进一步的转换和处理,如放大、滤波、线性化、补偿等,以获得更好的品质特性,便于后续电路实现显示、记录、处理及控制等功能。测量电路的类型视传感器的工作原理和转换器件的类型而定,一般有电桥电路、信号放大电路、阻抗变换电路、振荡电路等。

2. 传感器的分类

传感器是知识密集、技术密集的产品,它与许多学科有关,它的种类十分繁多。通常,一种传感器可以检测多种参数,一种参数又可以用多种传感器测量,所以传感器的分类方法也很多,至今尚无统一规定。为了很好地掌握它、应用它,需要有一个科学的分类方法。下面将目前广泛采用的分类方法作简单介绍。

(1) 按传感器的工作机理不同,可分为物理型传感器、化学型传感器、生物型传感器等。

在物理型传感器中,作为传感器工作物理基础的基本定律有场的定律、物质定律、守恒定律和统计定律等。

(2) 按传感器的构成原理不同,可分为结构型传感器与物性型传感器两大类。

结构型传感器是利用物理学中场的定律构成的,包括动力场的运动定律、电磁场的电磁定律等。物理学中的定律一般是以方程式给出的。对于传感器来说,这些方程式也就是许多传感器在工作时的数学模型。这类传感器的特点是传感器的工作原理以传感器中元件相对位置变化引起场的变化为基础,而不是以材料特性变化为基础。

物性型传感器是利用物质定律构成的,如虎克定律、欧姆定律等。物质定律是表示物质某种客观性质的法则。这种法则,大多数是以物质本身的常数形式给出的,这些常数的大小决定了传感器的主要性能。因此,物性型传感器的性能随材料的不同而异。例如,光电管就是物性型传感器,它利用了物质法则中的外光电效应。显然,其特性与涂覆在电极上的材料有着密切的关系。又如,所有半导体传感器,以及所有利用各种环境变化而引起的金属、半导体、陶瓷、合金等性能变化的传感器,都属于物性型传感器。

(3) 根据传感器的能量转换情况,可分为能量控制型传感器和能量转换型传感器。能量控制型传感器,在信息变化过程中,其能量需要外电源供给。如电阻、电感、电容等电路参量传感器都属于能量控制型传感器。基于应变电阻效应、磁阻效应、热阻效应、光电效应、霍尔效应等的传感器也属于此类传感器。能量转换型传感器,主要由能量变换元件构成,它不需要外电源。如基于压电效应、热电效应、光电效应等的传感器都属于此类传感器。

(4) 按传感器的物理原理不同,可分为以下几种。

① 电参量式传感器,包括电阻式、电感式、电容式等。

② 磁电式传感器,包括磁电感应式、霍尔式、磁栅式等。

③ 压电式传感器。

④ 光电式传感器,包括一般光电式、光栅式、激光式、光电码盘式、光导纤维式、红外式、摄像式等。

⑤ 气电式传感器。

⑥ 热电式传感器。

⑦ 波式传感器,包括超声波式、微波式等。

⑧ 射线式传感器。

⑨ 半导体式传感器。

⑩ 其他原理的传感器。

有些传感器的工作原理具有两种以上原理的复合形式,如不少半导体式传感器,也可看成电参量式传感器。

(5) 按照传感器的用途不同,可分为位移传感器、压力传感器、振动传感器、温度传感器,等等。

另外,根据传感器输出模拟信号还是数字信号,可分为模拟传感器和数字传感器;根据转换过程可逆与否,可分为双向传感器和单向传感器等。

在工程实际应用中往往按照传感器的用途来分类,而在阐述传感器的原理时一般按照传感器的物理原理来分类。

1.1.3 传感器的基本特性

为了更好地掌握和使用传感器,必须充分地了解传感器的基本特性。传感器的基本特性是指系统的输入-输出关系特性,即系统输出信号 $y(t)$ 与输入信号(被测量) $x(t)$ 之间的关系,如图 1-4 所示。

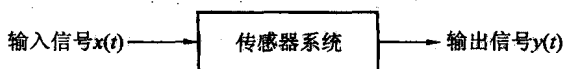


图 1-4 传感器系统

根据传感器输入信号 $x(t)$ 是否随时间变化而变化,其基本特性分为静态特性和动态特性两类,它们是系统对外呈现的外部特性,但与其内部参数密切相关。不同的传感器,其内部参数不同,因此其基本特性也表现出不同的特点。一个高精度传感器,必须具有良好的静态特性和动态特性,才能保证信号无失真地按规律转换。

1. 静态特性

当传感器的输入信号是常量,不随时间变化而变化(或变化极缓慢)时,其输入-输出关系特性称为静态特性。传感器的静态特性主要由以下几种性能来描述。

1) 测量范围和量程

传感器所能测量到的最小输入量 $x_{\min}$ 与最大输入量 $x_{\max}$ 之间的范围称为传感器的测量范围。传感器测量范围的上限值 $x_{\max}$ 与下限值 $x_{\min}$ 的代数差 $x_{\max} - x_{\min}$,称为量程。

2) 精度

传感器的精度是指测量结果的可靠程度,是测量中各类误差的综合反映,测量误差越小,传感器的精度越高。

传感器的精度用其量程范围内的最大基本误差与满量程输出之比的百分数表示,其基本误差是传感器在规定的正常工作条件下所具有的测量误差,由系统误差和随机误差两部分组成,如用 S 表示传感器的精度,则有

$$S = \frac{\Delta}{y_{FS}} \times 100\% \quad (1-1)$$

式中: Δ 为测量范围内允许的最大基本误差; y_{FS} 为满量程输出(FS是英文 full scale(满量程)的缩写)。

工程技术中为简化传感器精度的表示方法,引用了精度等级的概念。精度等级以一系列标准百分比数值分挡表示,代表传感器测量的最大允许误差。如果传感器的工作条件偏离正常工作条件,还会带来附加误差,温度附加误差就是最主要的附加误差。

3) 线性度

所谓传感器的线性度是指其输出量与输入量之间的关系曲线偏离理想直线的程度,又称为非线性误差。如不考虑迟滞、蠕变等因素,一般传感器的输入-输出特性关系可用 n 次多项式表示为

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \cdots + a_nx^n \quad (1-2)$$

式中: x 为输入量; y 为输出量; a_0 为零输入时的输出,也称零位输出; a_1 为传感器线性项系数,也称为线性灵敏度; $a_2, \dots, a_n$ 为非线性项系数。

在不考虑零位输出的情况下,传感器的线性度可分为以下几种情况。

(1) 理想线性特性。

当式(1-2)中 a_1 为常数,而 $a_0 = a_2 = a_3 = \cdots = a_n = 0$ 时,有

$$y = a_1x \quad (1-3)$$

称为理想线性特性,如图 1-5(a) 所示。这时传感器的线性最好,也是我们最希望传感器所具有的特性。具有该特性的传感器的灵敏度为直线 $y = a_1x$ 的斜率,即

$$k = \frac{y}{x} = a_1 \quad (1-4)$$

(2) 仅有偶次非线性项。

传感器的输入-输出特性为

$$y = a_0 + a_2x^2 + a_4x^4 + \cdots + a_{2n}x^{2n} \quad (1-5)$$

由于没有对称性,此特性线性范围较窄,线性度较差,如图 1-5(b) 所示,一般传感器设计很少采用这种特性。

(3) 仅有奇次非线性项。

传感器的输入-输出特性为

$$y = a_1x + a_3x^3 + \cdots + a_{2n+1}x^{2n+1} \quad (1-6)$$

此传感器特性相对于坐标原点对称,其线性范围较宽,线性度较好,如图 1-5(c) 所示,是比较接近理想直线的非线性特性。

(4) 普遍情况。

一般情况下,传感器的输入-输出特性为

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \cdots + a_nx^n \quad (1-7)$$

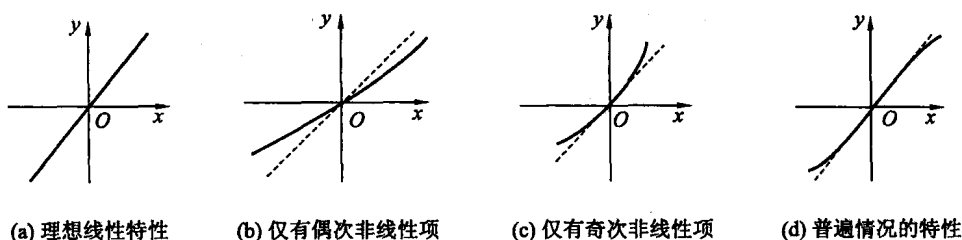


图 1-5 传感器的非线性

如图 1-5(d) 所示。

在实际使用非线性传感器时,如果非线性项的次数不高,则在输入量变化范围不大的情况下,可采用直线近似地代替实际输入-输出特性曲线的某一段,使传感器的非线性特性得到线性化处理,这里所采用的直线称为拟合直线。实际输入-输出特性曲线与拟合直线的最大相对误差,就是非线性误差,用 γ_L 来表示,即

$$\gamma_L = \pm \frac{\Delta L_{\max}}{y_{FS}} \times 100\% \quad (1-8)$$

式中: $\Delta L_{\max}$ 为非线性最大误差; y_{FS} 为满量程输出值。

目前常用的拟合方法有理论拟合、过零旋转拟合、端点拟合、端点平移拟合及最小二乘拟合等。

在图 1-6(a) 所示曲线中,拟合直线表示了传感器的理论特性,与实际测试值无关,这种方法称为理论拟合,应用十分简便,但一般说来, $\Delta L_{\max}$ 很大。图 1-6(b) 为过零旋转拟合,常用于校正特性曲线过零的传感器。拟合时, $\Delta L_1 = \Delta L_2 = \Delta L_{\max}$, 这种方法也比较简单,非线性误差比前一种的小很多。图 1-6(c) 所示的端点拟合,是把实际特性曲线两端点的连线作为拟合直线来实现拟合的。这种方法比较简便,但 $\Delta L_{\max}$ 较大。图 1-6(d) 是在图 1-6(c) 的基础上

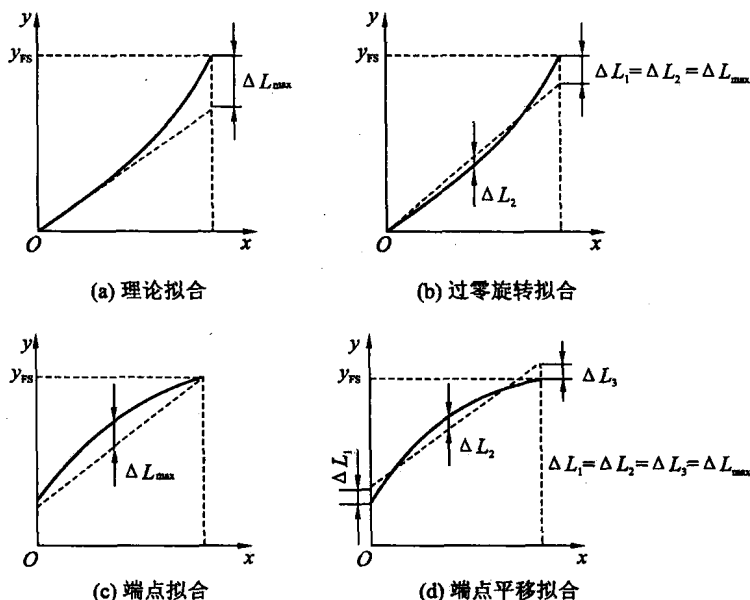


图 1-6 各种直线拟合方法

将直线平移,移动距离为图 1-6(c) 所示 $\Delta L_{\max}$ 的 $1/2$ 。这条特性曲线分布于拟合直线的两侧, $\Delta L_1 = \Delta L_2 = \Delta L_3 = \Delta L_{\max}$,与图 1-6(c) 相比,非线性误差减小了 $1/2$,提高了精度。

最小二乘拟合是选取在量程范围内与特性曲线上各点的偏差平方和最小的直线作为拟合直线的方法,这种拟合方法有严格的数学依据,尽管计算过程复杂,但得到的拟合直线精度高、误差小。

4) 灵敏度

灵敏度是指传感器输出的变化量与引起该变化量的输入变化量之比,即

$$k = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (1-9)$$

对于线性传感器,它的灵敏度就是其特性曲线的斜率,是一个常数,与输入量大小无关;对于非线性传感器,其灵敏度是一个随工作点变化而变化的变量,如图 1-7 所示。一般希望传感器的灵敏度高,且在满量程范围内是恒定的,这样就可保证在传感器输入量相同的情况下,输出信号尽可能大,从而有利于对被测量进行转换和处理。

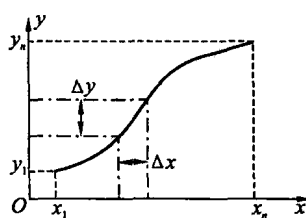


图 1-7 传感器的灵敏度

某种原因会引起灵敏度变化,产生灵敏度误差。灵敏度误差用相对误差表示,即

$$\gamma_s = \frac{\Delta k}{k} \times 100\% \quad (1-10)$$

5) 分辨率和阈值

传感器能检测到的输入量最小变化量的能力称为分辨力。对于某些传感器,如电位器式传感器,当输入量连续变化时,输出量只做阶梯变化,则分辨力就是输出量的每个阶梯所代表的输入量的大小。对于数字式仪表,分辨力就是仪表指示值的最后一位数字所代表的值。当被测量的变化量小于分辨力时,数字式仪表的最后一位数不变,仍指示原值。当分辨力以其占满量程输出的百分数表示时则称为分辨率。

阈值是指能使传感器的输出端产生可测变化量的最小被测输入量值,即零点附近的分辨力。有的传感器在零位附近有严重的非线性,形成所谓死区(dead band),则可将死区的大小作为阈值;更多情况下,阈值主要取决于传感器噪声的大小,因而有的传感器只给出噪声电平。

6) 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动时所得特性曲线不一致的程度。各条特性曲线越靠近,说明重复性越好,随机误差就越小。如图 1-8 所示为输出特性曲线的重复特性,正行程的最大重复性偏差为 $\Delta R_{\max 1}$,反行程的最大重复性偏差为 $\Delta R_{\max 2}$ 。取这两个最大偏差中的较大者为 $\Delta R_{\max}$,再以其占满量程输出的百分数表示,就是重复误差,即

$$\gamma_R = \pm \frac{\Delta R_{\max}}{y_{FS}} \times 100\% \quad (1-11)$$

重复性是反映传感器精密程度的重要指标。同时,重复性的好坏也与许多随机因素有关,它属于随机误差,要用统计规律来确定。

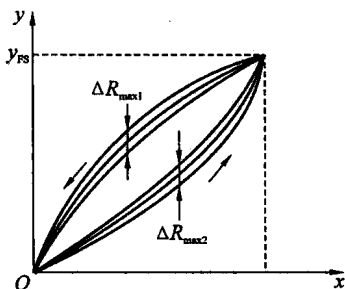


图 1-8 传感器的重复性

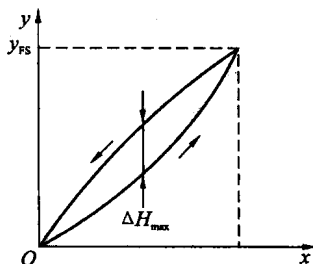


图 1-9 传感器的迟滞特性

7) 迟滞

迟滞特性表明传感器在正(输入量增大)、反(输入量减小)行程中输入-输出特性曲线不重合的程度,如图 1-9 所示。迟滞大小一般由实验方法测得。迟滞误差以正、反向输出量的最大偏差与满量程输出之比的百分数表示,即

$$\gamma_H = \pm \frac{1}{2} \frac{\Delta H_{\max}}{y_{FS}} \times 100\% \quad (1-12)$$

式中, $\Delta H_{\max}$ 为正、反行程间输出的最大误差。

传感器材料的物理性质是产生迟滞的主要因素。例如,把应力施加于某弹性材料时,弹性材料产生形变,应力取消后,弹性材料仍不能完全恢复原状。又如,铁磁体、铁电体在外加磁场、电场作用下均有迟滞现象。

此外,传感器机械部分存在不可避免的缺陷,如摩擦、磨损、间隙、松动、积尘等,这也是造成迟滞现象的重要因素。

8) 稳定性

稳定性表示传感器在一个较长的时间内保持其性能参数的能力。理想的情况是不论什么时候,传感器的特性参数都不随时间变化。但实际上,随着时间的推移,大多数传感器的特性会发生改变。这是因为敏感器件或构成传感器的部件,其特性会随时间发生变化,从而影响传感器的稳定性。

稳定性一般以室温条件下经过一规定时间间隔后,传感器的输出与起始标定时的输出之间的差异来表示,称为稳定性误差。稳定性误差可用相对误差表示,也可用绝对误差来表示。

9) 漂移

传感器的漂移是指在外界的干扰下,在一定时间间隔内,传感器输出量发生与输入量无关的、不需要的变化。漂移量的大小也是衡量传感器稳定性的重要性能指标。传感器的漂移有时会导致整个测量或控制系统处于瘫痪。

漂移包括零点漂移和灵敏度漂移等,如图 1-10 所示。

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缓慢变化;温度漂移则是由环境温度变化而引起的。

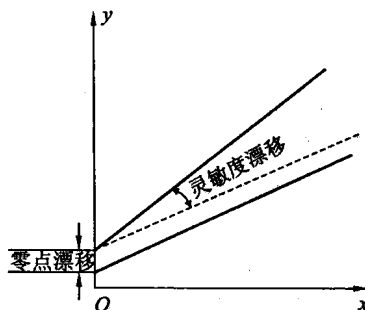


图 1-10 传感器的漂移

2. 动态特性

输入信号变化时,输出信号随时间变化而相应地变化,这个过程称为响应。传感器的动态特性是指传感器对随时间变化的输入量的响应特性。动态特性好的传感器,当输入信号是随时间变化的动态信号时,传感器能及时精确地跟踪输入信号,按照输入信号的变化规律输出信号。当传感器输入信号的变化缓慢时,是容易跟踪的,但随着输入信号的变化加快,传感器的及时跟踪性能会逐渐下降。通常要求传感器不仅能精确地显示被测量的大小,而且还能复现被测量随时间变化的规律,这也是传感器的重要特性之一。

传感器的动态特性与其输入信号的变化形式密切相关,在研究传感器动态特性时,通常是根据不同输入信号的变化规律来考察传感器响应的。实际传感器输入信号随时间变化的形式可能是多种多样的,最常见、最典型的输入信号是阶跃信号和正弦信号。这两种信号在物理上较容易实现,而且也便于求解。

对于阶跃输入信号,传感器的响应称为阶跃响应或瞬态响应。它是指传感器在瞬变的非周期信号作用下的响应。这对传感器来说是一种最严峻的状态,如传感器能复现这种信号,那么就能很容易地复现其他种类的输入信号,其动态性能指标也必定会令人满意。而对于正弦输入信号,传感器的响应称为频率响应或稳态响应。它是指传感器在振幅稳定不变的正弦信号作用下的响应。稳态响应的重要性,在于工程上所遇到的各种非电信号的变化曲线都可以展开成傅里叶(Fourier)级数或进行傅里叶变换,即可以用一系列正弦曲线的叠加来表示原曲线。因此,当知道传感器对正弦信号的响应特性后,也就可以判断它对各种复杂变化曲线的响应了。

为便于分析传感器的动态特性,必须建立动态数学模型。建立动态数学模型的方法有多种,如采用微分方程、传递函数、频率响应函数、差分方程、状态方程、脉冲响应函数等。建立微分方程是对传感器动态特性进行数学描述的基本方法。在忽略了一些影响不大的非线性和随机变化的复杂因素后,可将传感器作为线性定常系统来考虑,因而其动态数学模型可用线性常系数微分方程来表示。

能用一、二阶线性微分方程来描述的传感器分别称为一、二阶传感器,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环节的传感器(高阶可以分解成若干低阶环节),因此一阶和二阶传感器是最基本的。

求解出微分方程的解就能够得到系统的瞬态响应和稳态响应。微分方程的通解是系统的瞬态响应,特解是系统的稳态响应。对于一些较复杂的系统,求解微分方程比较麻烦,可采用数学上的拉普拉斯(Laplace)变换将实数域的微分方程变换成复数域的代数方程,这样可使运算简化,求解就相对容易了。

在采用阶跃输入信号研究传感器时域动态特性时,为表征传感器的动态特性,常用时间常数 τ 、上升时间 t_r 、响应时间 t_s 和超调量 σ 等参数来综合描述;在采用正弦输入信号研究传感器频域动态特性时,常用幅频特性和相频特性来描述,其重要指标是频带宽度(简称带宽)及相位误差等。

1.1.4 传感器的命名、代号和图形符号

国标 GB 7666—1987 规定了传感器的命名方法及图形符号,并将其作为统一传感器命

名及图形符号的依据。该标准适用于传感器的生产、科学研究、教学及其他相关领域。

1. 传感器的命名

根据国标 GB/T 7666—2005 的规定,传感器的全称应由“主题词加四级修饰语”组成:

主题词 —— 传感器;

一级修饰语 —— 被测量,包括修饰被测量的定语;

二级修饰语 —— 转换原理,一般可后缀以“式”字;

三级修饰语 —— 特征描述,指必须强调的传感器结构、性能、材料特征、敏感器件及其他必要的性能特征,一般可后缀以“型”字;

四级修饰语 —— 主要技术指标(如量程、精度、灵敏度等)。

2. 传感器的代号

根据国标 GB/T 7666—2005 的规定,一种传感器的代号应包括以下四部分:

a—— 主称(传感器);

b—— 被测量,用其一个或两个汉字汉语拼音的第一个大写字母标记,当这组代号与该部分的另一代号重复时,则用其汉语拼音的第二个大写字母标记;

c—— 转换原理,用其一个或两个汉字汉语拼音的第一大写字母标记;

d—— 序号,用阿拉伯数字标记,序号可表征产品设计特征、性能参数、产品系列等。

传感器四部分代号表述格式如图 1-11 所示。在被测量、转换原理、序号三部分代号之间需有连字符“-”连接。

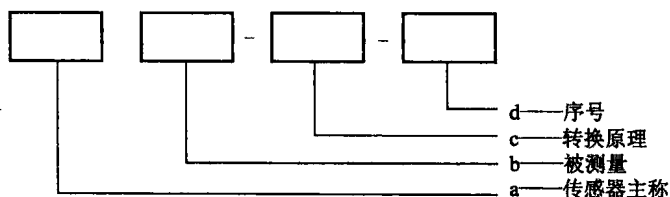
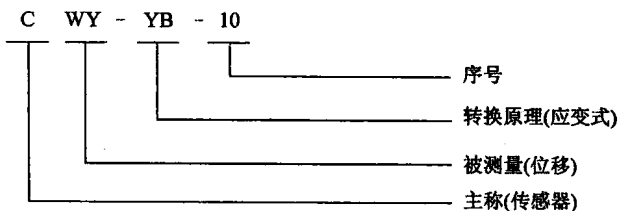


图 1-11 传感器产品代号的编制格式

例如,应变式位移传感器的代号为



例如,电磁式流量传感器的代号为

