



“十三五”应用型人才培养规划教材

传感器技术

◎ 关大陆 刘丽华 主编

清华大学出版社



“十三五”应用型人才培养规划教材

传感器技术

◎ 关大陆 刘丽华 主编

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书介绍了传感器的基本知识和基本特性、传感器的标定和校准方法以及应用技术,重点阐述了各类传感器(电阻应变式、电感式、电容式、压电式、热电式、光电式、数字式、磁敏、气敏、湿敏传感器等)的转换原理、组成结构、特性分析、设计方法、信号调理技术及其在日常生活和生产过程中的典型应用,并对其他现代新型传感器做了简要介绍。

本书可作为高等院校测控技术与仪器、自动化、电子信息工程、物联网等专业的教材,也可作为其他相近专业高年级本科生和硕士研究生的学习参考书,同时可供从事电子仪器及测控技术工作的人员参考使用。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

传感器技术/关大陆,刘丽华主编. —北京:清华大学出版社,2017

(“十三五”应用型人才培养规划教材)

ISBN 978-7-302-44987-4

I. ①传… II. ①关… ②刘… 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 216219 号

责任编辑:王剑乔

封面设计:刘 键

责任校对:李 梅

责任印制:刘海龙

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课件下载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62770175-4278

印 装 者:北京泽宇印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:9.25

字 数:210 千字

版 次:2017 年 3 月第 1 版

印 次:2017 年 3 月第 1 次印刷

印 数:1~2000

定 价:26.00 元

产品编号:069135-01

传感器技术是测量技术、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;与通信技术、计算机技术构成信息产业的三大支柱。

随着应用型本科教育的逐步深入,急需探索一种不同于科研型院校和职业性技能型院校的教育模式。本书立足于常见检测方法和手段的基础之上,在注重实际应用的同时,也注重传感器内部电路的实现和设计,注重对现代传感器技术的技术前瞻进行介绍,主要体现应用型人才的培养。本书重点介绍了热工生产过程中温度、压力、物位、流量和气体含量等参数的常用检测方法和常见物理量的检测方法,重点突出了各种检测方法的典型电路和实际应用。

本书内容丰富、全面、新颖,传感器原理部分概念清晰,应用部分充分结合生产和工程实践。同时,该书对传感器与检测技术的工程应用和技术思路做了引导,使读者在阅读中可将传感器与工程检测方面的知识有机联系起来,为解决实际工程问题打下基础。

本书由辽宁科技学院关大陆和刘丽华教授编写,其中,关大陆教授编写了第1~4章,刘丽华教授编写了第5~8章,全书由关大陆教授统稿。

由于作者水平有限,书中难免有疏漏和不妥之处,恳请广大读者批评和指正。

编 者

2017年1月

目 录

CONTENTS

第 1 章 传感器的基本概念	1
1.1 传感器的定义、组成与分类	1
1.2 传感器的技术特点和发展趋势	4
1.3 传感器的基本特性	7
1.3.1 静态模型和静态特性	7
1.3.2 动态模型和动态特性	10
本章小结	12
思考题与习题	13
第 2 章 温度测量	14
2.1 热电阻	14
2.1.1 热电阻的主要组成	15
2.1.2 常用热电阻传感器	15
2.1.3 测量电路	16
2.2 热电偶	17
2.2.1 热电效应	17
2.2.2 热电偶基本定律	18
2.2.3 热电偶的基本构造	19
2.2.4 常用热电偶	20
2.2.5 热电偶冷端补偿方式	21
2.2.6 热电偶实用测量电路	23
2.3 半导体测温	27
2.3.1 DS18B20 数字式温度传感器	27
2.3.2 集成模拟式温度传感器	30
2.4 红外辐射测温	32
2.4.1 红外线测温的原理	32
2.4.2 红外测温的电路	33
本章小结	34

思考题与习题	34
第3章 压力检测	35
3.1 电容式传感器	35
3.1.1 电容式传感器简介	35
3.1.2 电容式传感器的主要特性	36
3.1.3 电容式传感器的等效电路	39
3.1.4 电容式传感器的转换电路	40
3.1.5 电容式传感器的主要性能指标	45
3.1.6 电容式压力传感器	46
3.1.7 1151 型压力变送器	47
3.2 应变片式传感器	50
3.2.1 应变片与应变效应	50
3.2.2 测量电路	51
3.2.3 应变片式传感器在衡器中的应用	53
3.3 其他压力传感器	54
3.3.1 半导体应变片	54
3.3.2 陶瓷压力传感器	54
3.3.3 蓝宝石压力传感器	55
3.3.4 扩散硅压力传感器原理	55
本章小结	55
思考题与习题	55
第4章 流量检测	57
4.1 差压式流量检测	58
4.1.1 节流式流量计	58
4.1.2 靶式流量计	65
4.1.3 浮子流量计	66
4.2 电磁式流量计	67
4.2.1 电磁式流量计的特点和结构	67
4.2.2 电磁流量计工作原理	69
4.2.3 电磁流量传感器安装	69
本章小结	70
思考题与习题	70
第5章 物位和位移检测	71
5.1 超声波式物位检测	71
5.1.1 超声波测距原理	72

5.1.2 超声波发射驱动的硬件实现	72
5.1.3 超声波测距模块	72
5.1.4 超声波测距的硬件实现	74
5.1.5 基于超声波的物位检测	75
5.2 电感式传感器	75
5.2.1 自感式传感器	76
5.2.2 差动变压器式传感器	83
5.2.3 电涡流式传感器	89
5.3 光栅尺位移检测	95
5.3.1 光栅尺的工作原理	95
5.3.2 光栅尺在位移检测中的应用	96
本章小结	97
思考题与习题	98

第 6 章 转速检测

6.1 霍尔传感器	99
6.1.1 霍尔传感器的原理	99
6.1.2 霍尔传感器的应用	102
6.2 光电式传感器	104
6.2.1 光电效应	104
6.2.2 光生伏特器件	106
6.2.3 外光电效应器件	108
6.2.4 光电式传感器的转速测量	111
6.3 磁敏二极管、磁敏三极管和磁敏电阻	114
6.3.1 磁敏二极管	114
6.3.2 磁敏三极管	116
6.3.3 磁敏电阻	118
6.3.4 磁敏式转速传感器	118
本章小结	118
思考题与习题	119

第 7 章 气体检测

7.1 烟雾和 CO 气体检测	121
7.2 CO ₂ 传感器和最新敏感材料	125
7.2.1 检测电路的工作原理	126
7.2.2 检测电路的设计原理	127
本章小结	127
思考题与习题	127

第 8 章 湿度测量	128
8.1 湿度的基本概念	128
8.2 湿度传感器	128
8.2.1 分离元件式湿度传感器	128
8.2.2 集成式湿度传感器	131
8.3 典型的湿度检测电路	133
8.3.1 HS1000 的应用电路	133
8.3.2 DHT11 的应用电路	134
本章小结	135
思考题与习题	135
附录 Pt100 分度表	136
参考文献	139
第 9 章 流量检测	140
9.1 流量检测概述	140
9.2 流量检测的常用方法	140
9.2.1 节流式流量检测	140
9.2.2 差压式流量检测	140
9.2.3 速度式流量检测	140
9.2.4 容积式流量检测	140
9.2.5 质量式流量检测	140
9.2.6 热式流量检测	140
9.2.7 电磁式流量检测	140
9.2.8 超声波式流量检测	140
9.2.9 激光式流量检测	140
9.2.10 其他流量检测方法	140
本章小结	140
思考题与习题	140
第 10 章 物位和位移检测	151
10.1 物位和位移检测概述	151
10.2 物位和位移检测的常用方法	151
10.2.1 接触式物位和位移检测	151
10.2.2 非接触式物位和位移检测	151
10.2.3 光电式物位和位移检测	151
10.2.4 超声波式物位和位移检测	151
10.2.5 激光式物位和位移检测	151
10.2.6 微波式物位和位移检测	151
10.2.7 红外式物位和位移检测	151
10.2.8 其他物位和位移检测方法	151
本章小结	151
思考题与习题	151

传感器的基本概念

传感器(Transducer 或 Sensor)被誉为“工业眼睛”,是当今世界重要的技术发展方向之一,与信息技术、计算机技术并列成为支撑整个现代信息产业的三大支柱。它是各种信息感知、采集、转换、传输和处理的功能器件,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。例如,在冶金企业中,为保证产品质量,要检测温度、流量、物位、压力、气体含量等参数;在化工企业中,要检测物重、浓度、压力、液位等;飞行器上,要检测飞行参数、姿态、转速等参数,使航天器按人们预先设计的轨道正常运行。这些都要依靠传感器。

1.1 传感器的定义、组成与分类

1. 传感器的定义和组成

传感器有时也被称为换能器、变换器、变送器或探测器,其主要特征是能感知和检测某一形态的信息,并将其转换成另一形态的信息。因此,传感器是指那些对被测对象某一确定的信息具有感受(或响应)与检出功能,并使之按照一定规律转换成与之对应的有用输出信号的元器件或装置。这里的信息应包括电量和非电量。在不少场合,人们将传感器定义为敏感于待测非电量并可将其转换成与之对应的电信号的元件、器件或装置的总称。

国家标准 GB 7665—87 对传感器下的定义是:“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”。传感器是一种检测装置,能感受到被测量的信息,并能将检测感受到的信息按一定规律变换成为电信号或其他所需形式的信息输出,以满足信息的传输、处理、存储、显示、记录和控制等要求。它是实现自动检测和自动控制的首要环节。

此外,人们从其功能出发,形象地将传感器定义为,具有视觉、听觉、触觉、嗅觉和味觉等功能的元器件或装置。不仅可应用于人无法忍受的高温、高压、辐射等恶劣环境,还可以检测出人类“五官”不能感知的各种信息(如微弱的电磁场等)。

传感器组成的细节有较大差异。但总体来说,传感器应由敏感元件、转换元件、转换电路和其他辅助电路组成,如图 1.1 所示。

敏感元件是指传感器中能直接感受(或响应)与检出被测对象的待测信息(非电量)的部分。转换元件是指传感器中能将敏感元件所感受(或响应)出的信息直接转换成电信号

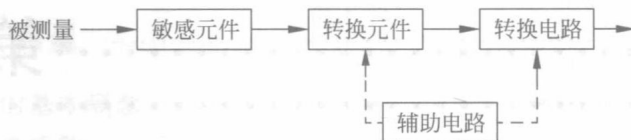


图 1.1 传感器组成框图

的部分。转换电路是能把转换元件输出的电信号转换为便于显示的信号的电路。辅助电路通常包括电源,即交、直流供电系统。

日常生活中电子秤的传感器由弹性体(敏感元件)和电阻应变片组成。其中,弹性体就是敏感元件,它能将压力转换成应变(形变);弹性体的形变施加在电阻应变片上,它能将应变量转换成电阻的变化量,电阻应变片就是转换元件。

但不是所有的传感器都必须包括敏感元件和转换元件。如果敏感元件直接输出的是电量,它就同时兼为转换元件,敏感元件和转换元件两者合一的传感器是很多的。例如,热电偶等就是这种形式的传感器。

在国外,传感器和变送器是可以画等号的,但是在我国,将输出标准信号的传感器称为变送器。 $4\sim 20\text{mA DC}$ ($1\sim 5\text{V DC}$)信号制是国际电工委员会(IEC)过程控制系统用模拟信号标准。我国从DDZ-Ⅲ型电动仪表开始采用该国际标准信号制,仪表传输信号采用 $4\sim 20\text{mA DC}$,联络信号采用 $1\sim 5\text{V DC}$,即采用电流传输、电压接收的信号系统。

2. 传感器的分类

传感器的品种很多,检测原理各异,因此其分类方法甚繁,常见的分类方法如下。

1) 按输出信号分

(1) 模拟传感器:将被测量的非电学量转换成模拟电信号。常见的有 $4\sim 20\text{mA}$ 或 $1\sim 5\text{V}$ 。

(2) 数字传感器:将被测量的非电学量转换成数字输出信号(包括标准的总线信号和频率信号等)。

(3) 开关传感器:当被测量的信号达到某个特定的阈值时,传感器相应地输出一个设定的低电平或高电平信号,一般只有两个状态,常用于位式控制中。

2) 按工作机制分

这种分类方法以其工作原理划分,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。按传感器工作机制的不同,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,并可获得与被测非电量的电信号相关的敏感元器件或装置。例如电容式、电感式传感器均属此类。这类传感器开发得最早,至今仍然广泛应用于工业流程检测设备中。一般它的结构复杂、体积偏大、价格偏高。

(2) 物性型传感器利用物质的某种和某些客观属性构成,其性能因构成材料的不同而有明显区别。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。由于它的“敏感体”本

来就是材料本身,故不存在显著的结构特征,也无所谓“结构变化”,所以这类传感器通常具有响应快的特点;又因为它多以半导体为敏感材料,故易于集成化、小型化、智能化,显然,这对于与微型计算机接口是有利的。半导体传感器以及一切利用因环境发生变化而导致本身性能发生变化的金属、半导体、陶瓷、合金等制成的传感器都属于物性型传感器。典型的有热敏电阻、光敏电阻等。

(3) 复合型传感器是由结构型传感器和物性型传感器组合而成的兼有两者特性的传感器。例如温度振动传感器,通过结构型检测振动参数;通过物性型检测温度参数。

3) 按被测量分类

按被测量的性质不同可分为位移、力、速度、温度、流量、气体成分等传感器。基本被测量和派生被测量见表 1.1。

表 1.1 基本被测量和派生被测量

基本被测量		派生被测量
位移	线位移	长度、厚度、应变、振动、磨损、平面度
	角位移	旋转角、偏转角、角振动
速度	线速度	振动、流量
	角速度	转速、角振动
加速度	线加速度	振动、冲击、质量
	角加速度	角振动、转矩、转动惯量
力	压力	质量、应力、力矩
时间	频率	周期、计数
光		光通量与密度、光谱
温度		热容
湿度		水汽、含水量、露点
浓度		气(液)体成分、黏度

由于这种分类方式是按照被测量命名传感器的,其优点是明确指出传感器的用途,便于使用者根据其用途选用。但是这种分类方法是将原理互不相同的传感器归为一类,很难找出每种传感器在转换机制上有何共性和差异,因此,对掌握传感器的一些基本原理及分析是不利的。

4) 按其制造工艺分类

(1) 集成传感器:用标准的生产硅基半导体集成电路的工艺技术制造。集成传感器通常还将用于初步处理被测信号的部分电路也集成在同一芯片上。

(2) 薄膜传感器:是通过沉积在介质衬底(基板)上的、相应敏感材料的薄膜形成的。使用混合工艺时,同样可将部分电路制造在此基板上。

(3) 厚膜传感器:利用相应材料的浆料,涂覆在陶瓷基片上制成的,基片通常由 Al_2O_3 制成,然后进行热处理,使厚膜成形。

(4) 陶瓷传感器:采用标准的陶瓷工艺或某种变种工艺(溶胶、凝胶等)生产。完成适当的预备性操作之后,已成形的元件在高温中烧结。厚膜传感器和陶瓷传感器的工艺之间有许多共同特性,在某些方面,可以认为厚膜工艺是陶瓷工艺的一种变形。

每种工艺技术都有自己的优点和不足。由于研究、开发和生产所需的资本投入较低,以及传感器参数的高稳定性等原因,采用陶瓷传感器和厚膜传感器比较合理。

5) 按能量的关系分类

根据能量关系分类,可将传感器分为有源传感器和无源传感器两大类。前者一般是将非电能量转换为电能量,称为能量转换型传感器,也称为换能器。通常它们配有电压测量和放大电路,如压电式、热电式、压阻式等。无源传感器又称为能量控制型传感器,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,它们必须具有辅助能源(电源)。这类传感器有电阻式、电容式和电感式等。无源传感器常用电桥和谐振电路等电路测量。

6) 按传感器工作原理分类

按传感器工作原理可分为电阻传感器、电容传感器、电感传感器、电压传感器、霍尔传感器、光电传感器、光栅传感器、热电偶传感器等。

1.2 传感器的技术特点和发展趋势

1. 技术特点

1) 内容范围广且离散

传感器可涉及的内容广而离散的特点主要体现在传感器技术可利用的物理学、化学、生物学、电子学等中的基础“效应”“反应”“机制”不仅数量甚多,而且往往彼此独立甚至完全不相关。

2) 知识密集程度高,边缘学科色彩极浓

由于传感器技术是以材料的电、磁、光、声、热、力等功能效应和功能形态变换原理为基础,并综合了物理学、化学、生物工程、微电子学、材料科学、精密机械、微细加工、试验测量等方面的知识和技术而形成的一门科学。因此,传感器技术是学科交错应用极多、知识密集极高、与许多基础科学和专业工程学有着极为密切关系的技术。

3) 技术复杂,工艺要求高

传感器的制造涉及了许多高新技术,如集成技术、薄膜技术、超导技术、微细或纳米加工技术、黏合技术、高密封技术、特种加工技术以及多功能化、智能化技术等,因此,传感器的制造工艺难度很大,要求很高。

4) 功能优,性能好

传感器功能优主要体现在其功能的扩展性好、适应性强。具体地说,传感器不但具备人类“五官”所具有的视觉、听觉、触觉、嗅觉、味觉,还能检测“五官”不能感觉到的信息,同时能在人类无法忍受的高温、高压等恶劣环境下工作。

性能好体现在传感器的量程宽、精度高、可靠性好等方面。

5) 品种繁多,应用广泛

由于现代信息系统中待测的信息(待测量)很多,而且一种待测量往往可用几种传感器来测量,因此,传感器产品品种极为庞杂、繁多。

传感器的应用范围很广,从航天、航空、兵器、船舶、交通、冶金、机械、电子、化工、轻

工、能源、环保、煤炭、石油、医疗卫生、生物工程、宇宙开发等领域至农、林、牧、副、渔业,甚至人们日常生活的各个方面,几乎无处不使用传感器,无处不需要传感器技术。

2. 发展趋势

传感器作为人类认识和感知世界的一种工具,其发展历史相当久远,可以说是伴随着人类文明进程而发展起来的。传感器技术的发展程度影响、决定着人类认识世界的程度与能力。

随着科学进步和社会发展,传感器技术在国民经济和人们的日常生活中占有越来越重要的地位。人们对传感器的种类、性能等方面的要求越来越高,这也进一步促进了传感器技术的快速发展。目前许多国家把传感器技术列为重点发展的关键技术之一。美国曾把20世纪80年代看成是传感器技术时代,并将其列为20世纪90年代22项关键技术之一;日本把传感器技术列为20世纪80年代十大技术之首。从20世纪80年代中后期开始,我国也把传感器技术列为国家优先发展的重要技术之一。

传感器技术是一项与现代技术密切相关的尖端技术,近年来发展很快,主要特点及发展趋势表现在以下几个方面。

1) 发现利用新现象、新效应

利用物理现象、化学反应和生物效应是各种传感器工作的基本原理,所以发现新现象与新效应是发展传感器技术的重要工作,是研制新型传感器的理论基础,其意义极为深远。

例如,日本夏普公司利用超导技术研制成功高温超导磁性传感器,是传感器技术的重大突破,其灵敏度高,仅次于超导量子干涉器件。但它的制造工艺远比超导量子干涉器件简单,可用于磁成像技术,具有广泛的推广价值。

2) 开发新材料

传感器材料是传感器技术发展的物质基础,随着材料科学的快速发展,人们可根据实际需要,控制传感器材料的某些成分或含量,从而设计制造出用于各种传感器的新功能材料。例如,用高分子聚合物薄膜制成温度传感器;用光导纤维制成压力、流量、温度、位移等多种传感器;用陶瓷制成压力传感器,用半导体氧化物制成各种气体传感器等。这些新材料的应用,极大地提高了各类传感器的性能,促进了传感器技术的发展。

3) 采用高新技术

随着微电子技术、计算机技术、精密机械技术、高密封技术、特种加工技术、集成技术、薄膜技术、网络技术、纳米技术、激光技术、超导技术、生物技术等高新技术的迅猛发展,传感器技术进入了一个更为广阔的发展空间。高新技术成果的采用成为传感器技术发展的技术基础和强大推动力。因此,传感器的高科技化不但是传感器技术的主要特征,而且是21世纪传感器及其产业的发展方向。

4) 拓展应用领域

目前检测技术正在向宏观世界和微观世界纵深发展。空间技术、海洋开发、环境保护以及地震预测等都要求检测技术满足开发、研究宏观世界的要求,而细胞生物学、遗传工程、光合作用、医学及微加工技术等又希望检测技术跟上研究微观世界的步伐,因此,科学的发展对当前传感器技术的研究与开发提出许多新的要求,其中重要的一点就是要拓宽

应用领域和检测范围,不断突破参数测量的极限。通过这些应用领域的开发和研究,不但可以提高传感器的应用性能,而且可以促进其他相关技术的发展,甚至会诞生一些新学科。

5) 提高传感器的性能

检测技术的发展必然要求传感器的性能不断提高。例如,对于火箭发动机燃烧室的压力测量,希望测量精度高于 0.1%;对于超精密机械加工的在线测量,要求误差小于 $0.1\mu\text{m}$ 等,由此需要人们研制出更多性能优异的各类传感器。

对传感器而言,其主要性能指标包括检测精度、线性度、灵敏度和稳定性等,其中检测精度是其中最重要的性能指标。在 20 世纪 30 年代至 40 年代,检测精度一般为百分之几到千分之几。近年来,随着传感器技术的不断发展,其检测精度提高很快,有些被测量的检测精度可达万分之几,甚至百万分之几。例如,用直线光栅测线位移时,测量范围在几米时,误差仅为几微米。

6) 传感器的微型化与低功耗

目前各种测控仪器设备的功能越来越强大,同时各个部件的体积却越来越小,这就要求传感器自身的体积也要小型化、微型化,现在一些微型传感器,其敏感元件采用光刻、腐蚀、沉积等微机械加工工艺制作而成,尺寸可以达到微米级。此外,由于传感器工作时大多离不开电源,在野外或远离电网的地方,往往是用电池或太阳能等供电,因此开发低功耗的传感器及无源传感器就具有重要的实际意义,这样不仅可以节省能源,还可以提高系统的工作寿命。

7) 传感器的集成化与多功能化

传感器的集成化是指将信息提取、放大、变换、传输以及信息处理和存储等功能都制作在同一基片上,实现一体化。与一般传感器相比,它具有体积小、反应快、抗干扰、稳定性好及成本低等优点。目前,随着半导体集成技术与厚、薄膜技术的不断发展,传感器的集成化已成为传感器技术发展的一种趋势。

传感器的多功能化是与“集成化”相对应的一个概念,是指传感器能感知与转换两种以上不同的物理量,例如,使用特殊的陶瓷材料把温度和湿度敏感元件集成在一起,制成温湿度传感器;将检测几种不同气体的敏感元件用厚膜制造工艺制作在同一基片上,制成检测氧、氨、乙醇、乙烯等气体的多功能传感器等。利用多种物理、化学及生物效应使传感器多功能化,已日益成为当今传感器发展的方向。

8) 传感器的智能化与数字化

利用计算机及微处理技术使传感器智能化是 20 世纪 80 年代以来传感器技术的一大飞跃。智能传感器是一种带有微处理器的传感器,与一般传感器相比,它不仅具有信息提取、转换等功能,而且具有数据处理、双向通信、信息记忆存储、自动补偿及数字输出等功能。

随着人工神经网络、人工智能和信息处理技术(如多传感器信息融合技术、模糊理论等)的进一步发展,智能传感器将具有更高级的分析、决策及自学功能,可完成更复杂的检测任务。

此外,目前传感器的功能已突破传统的界限,其输出不再是单一的模拟信号,而是经

过微处理器处理过的数字信号,有的甚至带有控制功能,这就是所谓的数字传感器。数字传感器的特点:①将模拟信号转换成数字信号输出,提高了传感器的抗干扰能力,特别适用于电磁干扰强、信号传输距离远的工作现场;②可通过软件对传感器进行线性修正及性能补偿,减少了系统误差;③一致性与互换性好。

可以预见,随着计算机和微处理技术的不断发展,智能化、数字化传感器一定会迎来更为广阔的发展前景。

9) 传感器的网络化

传感器的网络化是传感器领域近些年发展起来的一项新兴技术,它利用 TCP/IP 协议,使现场测量数据就近通过网络与网络上有通信能力的节点直接进行通信,实现了数据的实时发布和共享。由于传感器自动化、智能化水平的提高,多台传感器联网已推广应用,虚拟仪器、三维多媒体等新技术已开始实用化。传感器网络化的目标就是采用标准的网络协议,同时采用模块化结构将传感器和网络技术有机地结合起来,实现信息交流和技术维护。

1.3 传感器的基本特性

传感器所测量的非电量一般有两种形式:一种是稳定的,即不随时间变化或变化极其缓慢的信号,称为静态信号;另一种是随时间变化而变化的信号,称为动态信号。由于输入量的状态不同,传感器所呈现出来的输入-输出特性也不同,因此存在所谓的静态特性和动态特性。

为了降低或消除传感器在测量控制系统中的误差,传感器必须具有良好的静态特性和动态特性,才能使信号(或能量)按规律准确地转换。

1.3.1 静态模型和静态特性

1. 静态模型

静态模型是指在静态信号(输入信号不随时间变化的量)情况下,描述传感器输出量与输入量间的一种函数关系。如果不考虑蠕动效应和迟滞特性,传感器的静态模型一般可用多项式来表示:

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

式中: x 为输入量; y 为输出量; a_0 为零位输出; a_1 为传感器线性灵敏度; $a_2, \dots, a_n$ 为非线性项的待定系数。

传感器的静态模型有三种有用的特殊形式:

$$y = a_1x \quad (1.2)$$

$$y = a_0 + a_2x^2 + a_4x^4 + \cdots \quad (1.3)$$

$$y = a_1x + a_3x^3 + a_5x^5 + \cdots \quad (1.4)$$

式(1.2)表示传感器的输出量和输入量呈严格的线性关系,也称为理想特性;式(1.3)和式(1.4)均为非线性关系,但是由于式(1.4)具有基于原点的对称性,因此,也是较理想的特性之一,而且可以在一定程度上简化为理想特性。

2. 静态特性

静态特性是指对静态的输入信号,传感器的输出量与输入量之间所具有的相互关系。因为这时输入量和输出量都与时间无关,所以它们之间的关系,即传感器的静态特性可用一个不含时间变量的代数方程,或以输入量作横坐标,把与其对应的输出量作纵坐标而画出的特性曲线来描述。表征传感器静态特性的主要参数有线性度、灵敏度、重复性、迟滞特性、分辨率、稳定性和漂移等。

1) 线性度

通常情况下,传感器的实际静态特性输出是条曲线而非直线。在实际工作中,为使仪表具有均匀刻度的读数,常用一条拟合直线近似地代表实际的特性曲线,线性度(非线性误差)就是这个近似程度的一个性能指标。

拟合直线的选取有多种方法,如将零输入和满量程输出点相连的理论直线作为拟合直线,或将与特性曲线上各点偏差的平方和为最小的理论直线作为拟合直线,此拟合直线称为最小二乘法拟合直线。

所谓传感器的线性度就是其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,又称为非线性误差。非线性误差可用下式表示:

$$\gamma_L = \pm \frac{\Delta L_{\max}}{y_{FS}} 100\% \quad (1.5)$$

式中: $\Delta L_{\max}$ 为输出量和输入量实际曲线与拟合直线之间的最大偏差; y_{FS} 为输出满量程值。

2) 灵敏度

传感器的灵敏度是其在稳态工作情况下,输出增量与输入增量的比值,常用式(1.6)表示:

$$S = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (1.6)$$

对于线性传感器,其灵敏度就是输出-输入特性曲线的斜率,灵敏度 S 是一个常数,这是最理想的特性。而非线性传感器的灵敏度是一个变量,应用中需要线性化处理或进行线性补偿。

灵敏度的量纲是输出量与输入量的量纲之比。例如,某位移传感器,在位移变化 1mm 时,输出电压变化为 200mV,则其灵敏度应表示为 200mV/mm。当传感器的输出量和输入量的量纲相同时,灵敏度可理解为放大倍数,比如运放的放大倍数。

提高灵敏度,可得到较高的测量精度。但灵敏度越高,测量范围越窄,稳定性也往往变差。

3) 重复性

重复性表示传感器在输入量按同一方向作全量程的多次测试时,所得特性曲线不一致的程度(见图 1.2)。多次按相同输入条件测试的输出特性曲线越重合,其重复性越好,误差也越小。传感器输出特性的不重复性主要由传感器机械部分的磨损、间隙、松动、部件的内摩擦、积尘以及辅助电路老化和漂移等原因产生的。

不重复性一般采用下式的极限误差式表示:

$$r_R = \pm \frac{\Delta_{\max}}{y_{FS}} \times 100\% \quad (1.7)$$

式中: $\Delta_{\max}$ 为输出最大不重复误差, 是进程和回程的最大误差; y_{FS} 为满量程输出值。

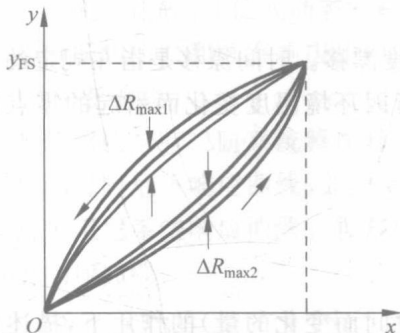


图 1.2 传感器的重复性

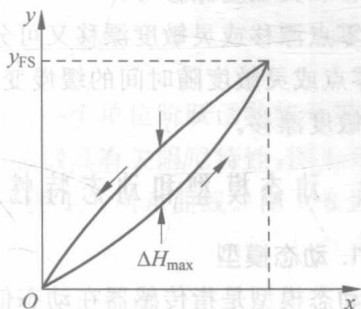


图 1.3 传感器的迟滞性

4) 迟滞(回差滞环)特性

迟滞特性能表明传感器在正向(输入量增大)行程和反向(输入量减少)行程期间, 输出-输入特性曲线不重合的程度, 如图 1.3 所示。对于同一大小的输入信号, 在 x 连续增大的行程中, 对应某一输出量为 y , 在 x 连续减小过程中, 对应于输出量为 y 之间的差值叫作滞环误差, 这就是所谓的迟滞现象。产生这种现象的主要原因类似重复误差的原因。迟滞特性表征传感器在正向(输入量增大)和反向(输入量减小)行程期间输出-输入特性曲线不一致的程度, 通常用这两条曲线之间的最大差值 $\Delta H_{\max}$ 与满量程输出 y_{FS} 的百分比表示。

$$r_H = \pm \frac{1}{2} \times \frac{\Delta H_{\max}}{y_{FS}} \times 100\% \quad (1.8)$$

迟滞可由传感器内部元件存在能量的吸收造成。

5) 分辨率

分辨率是指在规定测量范围内所能检测输入量的最小变化。有时也用该值相对满量程输入值的百分数表示。

分辨率表示传感器可能感受到的被测量的最小变化的能力。也就是说, 如果输入量从某一非零值缓慢地变化, 当输入量变化值未超过某一数值时, 传感器的输出量不会发生变化, 即传感器对此输入量的变化是分辨不出来的。只有当输入量的变化超过分辨率时, 其输出量才会发生变化。

通常传感器在满量程范围内各点的分辨率并不相同, 因此常用满量程中能使输出量产生阶跃变化的输入量中的最大变化值作为衡量指标。上述指标若用满量程的百分比表示, 则称为分辨率。

6) 稳定性

稳定性有短期稳定性和长期稳定性之分, 对于传感器, 常用长期稳定性描述其稳定性。所谓传感器的稳定性是指在室温条件下, 经过相当长的时间间隔, 如一天、一个月或一年, 传感器的输出与起始标定时输出之间的差异。因此, 通常也用其不稳定性来表征