



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

传感器与传感器技术

(第三版)

何道清 张 禾 谌海云 编著



科学出版社

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

传感器与传感器技术

(第三版)

何道清 张 禾 湛海云 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书系统地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作了简要介绍。每章后面附有相当数量的思考题与习题,书末附有全部计算题参考答案。

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、机电一体化等专业的教材,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的工程技术人员参考。

本书配有立体化教学包,包含电子课件、习题解答、图片、动画等,可以免费赠送给任课教师。

图书在版编目(CIP)数据

传感器与传感器技术/何道清,张禾,湛海云编著.—3版.—北京:科学出版社,2014.1

(普通高等教育“十五”国家级规划教材)

ISBN 978-7-03-039849-0

I. ①传… II. ①何…②张…③湛… 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309849号

责任编辑:李一凡、张丽花 / 责任校对:韩 杨

责任印制:阎 磊 / 封面设计:迷底书装

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京市文林印务有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2004年8月第一版 开本:787×1092 1/16

2008年6月第二版 印张:24 1/2

2014年1月第三版 字数:611 000

2014年1月第13次印刷

定价:46.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

第三版前言

本书自 2004 年出版以来,特别是 2008 年作为普通高等教育“十一五”国家级规划教材再版以来,深受高校师生和工程技术人员的喜爱,部分兄弟院校老师与编者进行了一定的教学交流,并提出一些宝贵意见和建议,编者对此谨表感谢!

然而,随着人类进入生产过程自动化和信息时代以来,作为现代信息技术基础和自动测控系统主要环节的传感器与传感器技术发展迅速,应用广泛。为了反映传感器研究的新成果与传感器技术应用的新成就,并优化教材体系,以满足课程教学和工程应用的要求,再次对本书内容进行适当的调整、更新与完善。

(1)调整部分章节内容体系,使其更趋科学合理;删除部分烦琐的理论分析内容(作为电子课件内容,以供教学参考)。

(2)更新和新增部分新型传感器及其应用技术:传感器设计优化技术、压电新材料传感器及其应用、湿敏传感器应用技术、超声波传感器应用技术、压力传感器动态特性标定技术、温度检测仪表与温度传感器标定技术等。

(3)更新和新增部分习题。

(4)全部插图大小比例优化,插图风格、体例统一规范。

(5)调整、更新、充实与完善与本书配套的电子课件。

本书由何道清、张禾、湛海云修订而成。

鉴于编者水平有限,书中难免有疏漏和不妥之处,恳请读者批评指正。

编 者

2013 年 8 月于成都

第一版前言

传感器(transducer/sensor)是获取信息的工具,它能感受规定的被测量,并按照一定规律转换成可用输出信号(一般为电信号);传感器技术是关于传感器的设计、制造及应用的综合技术。随着科学技术的发展,在现代工业生产尤其是自动化生产过程中,传感器是自动检测与自动控制系统的主要环节,对系统测控质量起决定作用。测控系统的自动化程度越高,对传感器的依赖性越大。随着21世纪信息化时代的到来,传感器与传感器技术的重要性更为突出。信息社会的特征是人类社会活动和生产活动的信息化。现代信息科学(技术)的三大支柱是信息的采集、传输与处理技术,即传感器技术、通信技术和计算机技术。传感器既是现代信息系统的源头或“感官”,又是信息社会赖以存在和发展的物质与技术基础。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,那么信息的准确获取和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。因此,应用、研究和发​​展传感器与传感器技术是生产过程自动化和信息时代的必然要求。传感器与传感器技术正日益广泛地应用于航空航天、资源探测、石油化工、交通通信、灾害预报、安全防卫、环境保护、医疗卫生和日常生活等各个领域,从而促进现代科学技术的迅速发展。

本书系统地介绍了传感器的基本知识、标定和校准方法以及工程应用技术,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、光纤、气敏、湿敏传感器等)的转换原理、组成结构、基本特性、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作了简要介绍。本书主要作为高等院校测控技术与仪器、电子信息工程、自动化、机电一体化等专业的教材,也可作为其他相近专业高年级本科生或硕士研究生的学习参考用书,同时可供从事电子仪器及测控技术工作的工程技术人员参考。书中各章内容有一定的独立性,可根据不同学时、不同专业要求和特点,选用不同章节。

另外,本书有配套的教学支持包,内容包括电子课件、习题解题指导、传感器图库和动画等。如果需要,可与科学出版社联系,电子邮件:gk@mail.sciencep.com。

本书在编写过程中,力求做到取材广泛、概念清楚、通俗易懂、便于学习,并注重理论与工程实际相结合,尽可能反映传感器与传感器技术的发展水平。每章后面附有相当数量的思考题与习题供使用,以便加深理解、巩固知识。书末附有全部计算题参考答案。编写时参考了国内外有关传感器技术方面的书籍和资料,谨向其作者及译者表示感谢。张禾、蒲正刚绘制和处理了所有图稿,并提供部分习题,在此一并致谢。

由于编者水平有限,恳请读者对书中不妥和错误之处给予批评指正。

编者

2003年10月

目 录

| | |
|----------------------|-----|
| 第三版前言 | |
| 第一版前言 | |
| 绪论 | 1 |
| 第 1 章 传感器的一般特性 | 6 |
| 1.1 传感器的静态特性 | 6 |
| 1.2 传感器的动态特性 | 11 |
| 1.3 传感器动态特性分析 | 16 |
| 1.4 传感器无失真测试条件 | 23 |
| 1.5 机电模拟和变量分类 | 24 |
| 思考题与习题 | 27 |
| 第 2 章 电阻应变式传感器 | 29 |
| 2.1 金属电阻应变式传感器 | 29 |
| 2.2 半导体应变片及压阻式传感器 | 54 |
| 2.3 电位计式传感器 | 60 |
| 思考题与习题 | 63 |
| 第 3 章 电感式传感器 | 65 |
| 3.1 电感式传感器 | 65 |
| 3.2 差动变压器 | 80 |
| 3.3 电涡流式传感器 | 92 |
| 思考题与习题 | 99 |
| 第 4 章 电容式传感器 | 101 |
| 4.1 电容式传感器的工作原理及结构类型 | 101 |
| 4.2 电容式传感器的静态特性 | 102 |
| 4.3 电容式传感器的等效电路 | 107 |
| 4.4 电容式传感器的测量电路 | 108 |
| 4.5 电容式传感器的应用 | 113 |
| 思考题与习题 | 120 |
| 第 5 章 压电式传感器 | 122 |
| 5.1 压电式传感器的工作原理 | 122 |
| 5.2 压电材料及其压电机理 | 123 |
| 5.3 压电元件常用的结构形式 | 129 |
| 5.4 压电式传感器的信号调理电路 | 130 |
| 5.5 压电式传感器的应用 | 135 |
| 思考题与习题 | 141 |
| 第 6 章 磁电式传感器 | 143 |
| 6.1 磁电式传感器的原理和结构 | 143 |

| | | |
|-------------|----------------|-----|
| 6.2 | 磁电式传感器的设计要点 | 145 |
| 6.3 | 磁电式传感器的应用 | 147 |
| | 思考题与习题 | 149 |
| 第7章 | 热电式传感器 | 150 |
| 7.1 | 热电阻 | 150 |
| 7.2 | PN 结型温度传感器 | 161 |
| 7.3 | 热电偶 | 165 |
| | 思考题与习题 | 180 |
| 第8章 | 光电式传感器 | 182 |
| 8.1 | 光电效应 | 182 |
| 8.2 | 光电器件 | 183 |
| 8.3 | 光源及光学元件 | 196 |
| 8.4 | 光电式传感器的应用 | 198 |
| 8.5 | 光纤传感器 | 203 |
| 8.6 | 红外传感器 | 216 |
| 8.7 | 图像传感器简介 | 228 |
| | 思考题与习题 | 230 |
| 第9章 | 磁敏传感器 | 231 |
| 9.1 | 霍尔传感器 | 231 |
| 9.2 | 磁敏电阻 | 247 |
| 9.3 | 结型磁敏管 | 255 |
| | 思考题与习题 | 263 |
| 第10章 | 数字式传感器 | 264 |
| 10.1 | 光栅传感器 | 264 |
| 10.2 | 磁栅传感器 | 273 |
| 10.3 | 感应同步器 | 276 |
| 10.4 | 角数字编码器 | 282 |
| 10.5 | 频率式数字传感器 | 285 |
| | 思考题与习题 | 295 |
| 第11章 | 气体传感器 | 297 |
| 11.1 | 热导式气体传感器 | 297 |
| 11.2 | 接触燃烧式气敏传感器 | 298 |
| 11.3 | 半导体气体传感器 | 299 |
| 11.4 | 红外气体传感器 | 311 |
| 11.5 | 湿式气体传感器 | 312 |
| | 思考题与习题 | 312 |
| 第12章 | 湿度传感器 | 313 |
| 12.1 | 湿度及湿度传感器的特性和分类 | 313 |
| 12.2 | 电解质系湿度传感器 | 315 |
| 12.3 | 半导体及陶瓷湿度传感器 | 318 |

| | | |
|---------------|-------------------------------------|------------|
| 12.4 | 有机物及高分子聚合物湿度传感器 | 321 |
| 12.5 | 非水分子亲合力型湿度传感器 | 323 |
| 12.6 | 湿度传感器的应用 | 324 |
| | 思考题与习题 | 329 |
| 第 13 章 | 其他传感器简介 | 330 |
| 13.1 | 超声波传感器 | 330 |
| 13.2 | 微波传感器 | 342 |
| 13.3 | 超导传感器 | 345 |
| 13.4 | 智能传感器 | 349 |
| | 思考题与习题 | 356 |
| 第 14 章 | 传感器的标定与校准 | 357 |
| 14.1 | 测量误差基本概念 | 357 |
| 14.2 | 传感器的静态特性标定 | 360 |
| 14.3 | 传感器的动态特性标定 | 361 |
| 14.4 | 压力传感器的标定与校准 | 363 |
| 14.5 | 振动传感器的标定与校准 | 368 |
| 14.6 | 温度传感器的标定与校准 | 369 |
| | 思考题与习题 | 371 |
| | 习题参考答案 | 373 |
| | 参考文献 | 375 |
| | 附录 | 376 |
| | 附录 A 具有固体介质的变间隙电容式传感器原理特性分析推导 | 376 |
| | 附录 B 变介电常数电容式传感器原理特性分析推导 | 376 |
| | 附录 C 电容测厚原理推导 | 377 |
| | 附录 D 分度表 | 378 |

绪 论

0.1.1 传感器与传感器技术的地位和作用

传感器是获取信息的工具。传感器技术是关于传感器设计、制造及应用的综合技术。它是信息技术(传感与控制技术、通信技术和计算机技术)的三大支柱之一。

产业革命以来,发明了各种各样的机器以代替人力劳动,人类的生产活动逐步进入工业社会时代。人们为了改善机器性能和提高机器的自动化程度,需要实时地测量反映机器工作状态的信息,并利用这些信息去控制机器,使之处于最佳工作状态。为了便于测量和控制,传感器就应运而生了,它能将各种被测控量(信息)检出并转换成便于传输、处理、记录、显示和控制的可用信号(一般为电信号)。传感器在现代工业生产尤其是自动化生产过程中的作用可用图 0-1 说明。

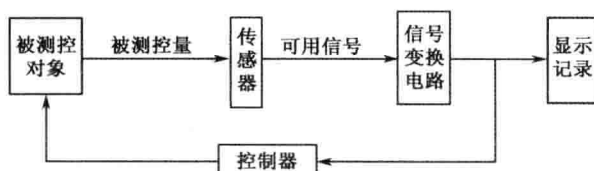


图 0-1 自动测控系统框图

由此可见,在自动检测与自动控制系统中,传感器位于系统之首,其作用相当于人的五官,直接敏感外界信息。传感器能否正确感受信息并将其按相应规律转换为可用信号,对系统测控质量起决定作用,自动化程度越高,系统对传感器的依赖性就越大,传感器是系统的重要部件。所以,国内外都将传感器列为高技术,在美、日等发达国家传感器备受重视。

当今人类社会正由高度工业化社会向信息社会过渡,21 世纪将是信息化时代,传感器与传感器技术的重要性更为突出。信息社会的特征是人类社会活动和生产活动的信息化。现代信息科学(技术)的三大支柱是信息的采集、传输与处理技术,即传感器技术、通信技术和计算机技术。传感器是信息采集系统的首要部件,可以认为,它既是现代信息技术系统的源头或“感官”,又是信息社会赖以存在和发展的物质与技术基础。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,那么信息的准确获得和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亦会变成水中月、镜中花。因此应用、研究和发展传感器与传感器技术是信息化时代的必然要求。

目前,传感器已广泛应用于各个学科领域,如现代化工农业生产、交通运输、航空航天技术、军事工程、资源探测、海洋开发、环境监控、安全保护、医疗诊断、生物工程、家用电器等,而且传感器的应用促进了上述各领域的发展。例如,“阿波罗 10”的运载火箭部分共用 2077 个传感器,宇宙飞船部分共有各种传感器 1218 个,保证了宇宙飞船的精密测控。

当然,由于现代科学技术的发展也促进了传感器与传感器技术的发展。特别是微电子加工技术、微计算机技术、信息处理技术、材料科学与技术的发展,使传感器技术得到飞速发展,传感器的体积越来越小,精度越来越高,数字化、多功能化、智能化、集成化等已成趋势。

0.1.2 传感器

1. 传感器的定义和组成

传感器亦称为换能器、变换器、变送器、探测器等。根据中华人民共和国国家标准(GB 7665—87),传感器(transducer/sensor)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输出信号的器件或装置,通常由敏感元件和转换元件组成(见图 0-2)。其中敏感元件(sensing element)是指传感器中能直接感受或响应被测量并输出与被测量成确定关系的其他量(一般为非电量)部分,如应变式压力传感器的弹性膜片就是敏感元件,它将被测压力转换成弹性膜片的变形;转换元件(transduction element)是指传感器中能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可用输出信号(一般为电信号)部分,如应变式压力传感器中的应变片就是转换元件,它将弹性膜片在压力作用下的变形转换成应变片电阻值的变化。如果敏感元件直接输出电信号,则这种敏感元件同时兼为转换元件,如热电偶将温度变化直接转换成热电势输出。

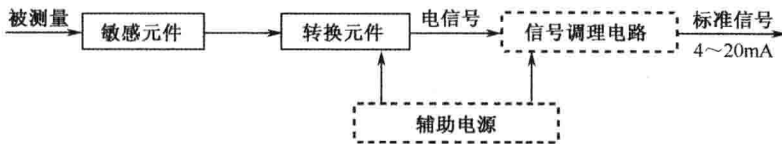


图 0-2 传感器组成框图

由于传感器输出电信号一般较微弱,而且存在非线性和各种误差,为了便于信号的处理,传感器还需配以适当的信号调理电路,将传感器输出电信号转换成便于传输、处理、显示、记录 and 控制的有用信号,常用的电路有电桥、放大器、振荡器、阻抗变换、补偿等。如果传感器信号经信号调理后输出信号为规定的标准信号(0~10mA,4~20mA;0~2V,1~5V;…)时,通常称为变送器,如热电偶温变器可将热电偶的热电势放大、线性校正和冷端补偿后输出需要的标准信号。由于集成电路技术的发展,信号调理电路集成化后,常与传感器组合在一起,构成可直接输出标准信号的一体化传感器,这是目前传感器技术的主要趋势。特别是 DDZ-III 型仪表二线制电流型变送器,以 20mA 电流信号为满刻度值,以满刻度值的 20%即 4mA 表示零点,这种“活零点”安排有利于识别仪表断电、断线故障,应用更广。

2. 传感器的分类

传感器的种类繁多、原理各异,检测对象几乎涉及各种参数,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至今尚无统一规定,主要按工作原理、输入信息和应用范围来分类。

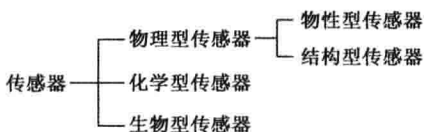


图 0-3 传感器的分类

(1) 按工作原理分类。按传感器的工作原理不同,传感器大体上可分为物理型、化学型及生物型三大类(见图 0-3)。

物理型传感器是利用某些变换元件的物理性质以及某些功能材料的特殊物理性能制成的传感器,它又可以分为物性型传感器和结构型传感器。

物性型传感器是利用某些功能材料本身所具有的内在特性及效应将被测量直接转换为电量的传感器。例如,热电偶制成的温度传感器,就是利用金属导体材料的温差电动势效应和不

同金属导体间的接触电动势效应实现对温度的测量；而利用压电晶体制成的压力传感器则是利用压电材料本身所具有的正压电效应而实现对压力的测量。这类传感器的“敏感体”就是材料本身，无所谓“结构变化”，因而，通常具有响应速度快的特点，而且易于实现小型化、集成化和智能化。结构型传感器是以结构(如形状、尺寸等)为基础，在待测量作用下，其结构发生变化，利用某些物理规律，获得比例于待测非电量的电信号输出的传感器。例如石油天然气地震勘探中的检波器(磁电式传感器，见图 0-4)。当地面存在地震波机械振动时，线圈相对于磁铁运动而切割磁力线，根据电磁感应定律，线圈中产生感生电动势，且感生电动势的大小与线圈和磁铁间相对运动速度成比例，线圈输出的电信号与地面机械振动的速度变化规律是一致的。这类传感器性能与其结构材料关系不大，仅与其“结构变化”有关。

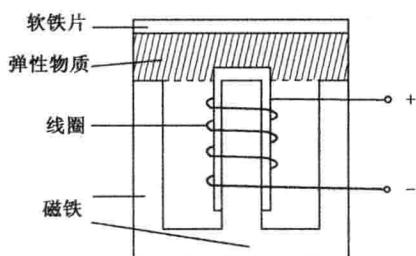


图 0-4 磁电式地震检波器

化学传感器是利用敏感材料与物质间的电化学反应原理，把无机和有机化学成分、浓度等转换成电信号的传感器，如气体传感器、湿度传感器和离子传感器等。

生物传感器是利用材料的生物效应构成的传感器，如酶传感器、微生物传感器、生理量(血液成分、血压、心音、血蛋白、激素、筋肉强力等)传感器、组织传感器、免疫传感器等。

(2) 按输入信息分类。传感器按输入量分类有位移传感器、速度传感器、加速度传感器、温度传感器、压力传感器、力传感器、色传感器、磁传感器等，以输入量(被测量)命名。这种分类对传感器的应用很方便。

(3) 按应用范围分类。根据传感器的应用范围不同，通常可分为工业用、农用、民用、科研用、医用、军用、环保用和家电用传感器等。若按具体使用场合，还可分为汽车用、舰船用、飞机用、宇宙飞船用、防灾用传感器等。如果根据使用目的的不同，又可分为计测用、监视用、检查用、诊断用、控制用和分析用传感器等。

0.1.3 传感器技术

传感器技术是关于传感器的研究、设计、试制、生产、检测和应用的综合技术，它已逐渐形成一门相对独立的专门学科，并具有以下特点。

1. 内容的离散性

传感器技术所涉及和利用到的物理学、化学、生物学中的基本“效应”、“反应”和“机理”，不仅为数甚多，而且往往彼此独立，甚至完全不相关。

2. 知识的密集性

传感器技术是以材料的力、热、声、光、电磁等功能效应和功能形态变换原理为理论基础，并综合了物理学、微电子学、化学、生物工程、材料科学、精密机械、微细加工和试验测量等方面的知识和技术而形成的一门科学，因此具有突出的知识密集性和学科边缘性，所以它与许多基础学科和专业工程学关系极为密切。正因为如此，在上述领域中，一旦有新的发现，就有人迅速地应用于传感器技术。如超导材料的约瑟夫逊效应发现不久，以该效应作为工作原理的超导量子干涉器件(SQUID)测磁传感器就问世了，它具有极高的灵敏度，可测 10^{-9} Gs 的极弱磁场。

3. 技术(工艺)的复杂性

传感器的制造涉及许许多多的高新技术,如薄膜技术、集成技术、超导技术、键合技术、高密封技术、特种加工技术,以及多功能化、智能化技术等。传感器的制造工艺难度大、要求高,如微型传感器尺寸 $\leq 1\text{mm}$;半导体硅片厚度有时 $< 1\mu\text{m}$;温度传感器测量范围 $-196\sim 1800^\circ\text{C}$;压力传感器的耐压范围 $10^{-6}\text{Pa}\sim 10^2\text{MPa}$ 等。

4. 品种的多样化与用途的广泛性

传感器与传感器技术已广泛应用于科学研究、生产过程和日常生活各个领域,几乎无处不使用传感器,无处不需要传感器技术。传感器技术的广泛应用,则需要测量的量(待测量)很多,而且一种待测量往往可用多种传感器来检测(如线位移传感器,其品种近20种)。因此,传感器产品的品种极为复杂、繁多。而传感器作为一种商品,用户对其品种的要求通常很多,但对每一品种需求的数量往往甚少,品种多、数量少的矛盾不仅使传感器成为高价位商品,而且有碍传感器的快速发展。

正确认识传感器技术上述特点,才能有效地促进传感器的研究、开发和应用。

0.1.4 传感器与传感器技术的发展趋势

随着现代科学技术的发展,作为“五官”(感觉)的传感器远远赶不上作为“大脑”的计算机的发展速度,信息采集技术滞后于信息处理技术。特别是现代测控系统自动化、智能化的发展,要求传感器的准确度高、可靠性高、稳定性好,而且具有一定的数据处理能力和自检、自校、自补偿能力,有些场合还需要能同时测量多个参数的体积小的多功能传感器。传感器与传感器技术的发展水平已成为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,也是衡量一个国家综合实力的重要标志。传感器的研究、开发和应用技术受到各国政府和科技人员的高度重视。

目前,传感器与传感器技术的主要发展趋势:一是开展基础研究,探索新理论,发现新现象,开发传感器的新材料和新工艺;二是实现传感器的集成化、多功能化和智能化。

1. 发现新现象

传感器工作的基本原理就是各种物理现象、化学反应和生物效应,所以发现新现象与新效应是发展传感器技术、研制新型传感器的重要理论基础。例如,日本夏普公司利用超导技术研究成功高温超导磁传感器,是传感器技术的重大突破,其灵敏度比霍尔器件高,仅次于超导量子干涉器件(SQUID),而其制造工艺远比超导量子干涉器件简单,它可用于磁成像技术,具有广泛的推广价值。

2. 开发新材料

新型传感器敏感元件材料是研制新型传感器的重要物质基础,因此必须开发新型的传感器敏感元件,特别是物性型敏感材料。例如,蓝宝石上外延生长单晶硅膜制作的井下数字压力传感器,可耐 180°C 高温;半导体氧化物可以制造各种气体传感器;而陶瓷传感器工作温度远高于半导体;光导纤维的应用是传感器材料的重要突破,用它研制的传感器与传统的传感器相比较具有其突出特点;高分子聚合物材料作为传感器敏感材料的研究,已引起国内外学者极大兴趣。

3. 采用微细加工技术

半导体技术中的加工方法如氧化、光刻、扩散、沉积、平面电子工艺、各向异性腐蚀以及蒸

镀、溅射薄膜工艺都可引进用于传感器制造,因而产生了各式各样新型传感器。例如,利用半导体技术制造出压阻式传感器;利用晶体外延生长工艺制造出硅-蓝宝石井下数字压力传感器;利用薄膜工艺制造出快速响应的气敏传感器;利用各向异性腐蚀技术进行高精度三维加工,在硅片上构成孔、沟、棱、锥、半球等各种形状研制出全硅谐振式压力传感器。

4. 智能传感器

智能传感器(intelligent sensor/smart sensor)是传统传感器与微处理器赋予智能的结合,兼有信息检测与信息处理功能的传感器(系统)。智能传感器充分利用微处理器的计算和存储功能,对传感器的数据进行处理并能对它的内部进行调节,使其采集的数据最佳。

智能传感器的结构可以是集成的,也可以是分离的,按结构可以分成集成式、混合式和模块式三种形式。集成智能传感器(integrated smart sensor)是将传感器与微处理器、信号调理电路做在同一芯片上所构成的,集成度高、体积小,这种传感器在目前技术水平上较难实现。混合集成式传感器(hybrid smart sensor)是将传感器的微处理器、信号调理电路作在不同芯片上构成的,目前这类结构的传感器较多。初级智能传感器也可以由许多相互独立的模块组成,如将微计算机、信号调理电路模块、输出电路模块、显示电路模块与传感器装配在同一壳体内,则组成模块式智能传感器。这种传感器虽集成度不高,体积大,但在目前技术条件下,仍不失为一种实用的结构形式。

5. 多功能传感器

多功能传感器能转换两种以上的不同物理量。例如,使用特殊陶瓷把温度和湿度敏感元件集成在一起,构成温湿度传感器;将检测 Na^+ 、 K^+ 和 H^+ 的敏感元件集成在 $2.5\text{mm} \times 0.5\text{mm}$ 的芯片上构成多离子传感器,可直接用导管送到心脏内检测血液中的钠、钾和氢离子浓度,对诊断心血管疾病有很大的意义;利用厚膜制造工艺将六种不同的敏感材料(ZnO 、 SnO_2 、 WO_3 、 $\text{WO}_3(\text{Pt})$ 、 $\text{SnO}_2(\text{Pd})$ 、 $\text{ZnO}(\text{Pt})$)制作在同一基板上,具有同时测量 H_2S 、 C_8H_{18} 、 $\text{C}_{10}\text{H}_{20}\text{O}$ 、 NH_3 四种气体的多功能传感器,如果将六个敏感膜所输出的信息输入微计算机,就是一种多功能智能传感器。

作为多功能传感器的智能传感器,最成功的典型产品是美国 Honeywell 公司研制的 ST-3000 型智能差压压力传感器,在 $3\text{mm} \times 4\text{mm} \times 0.2\text{mm}$ 的一块基片上,采用半导体工艺,制作静压、差压、温度三种敏感元件和 CPU、EPROM,其精度高达 0.1%。工作温度范围 $-40 \sim 110^\circ\text{C}$,压力量程 $0 \sim 2.1 \times 10^7 \text{Pa}$,具有自诊断、自动选择量程、存贮补偿数据等功能。

6. 仿生传感器

大自然是生物传感器的优秀设计师和工艺师。它通过漫长的岁月,不仅造就了集多种感官于一身的人类,而且还构造了许多功能奇特、性能高超的生物感官。例如,狗的嗅觉(灵敏阈为人的 10^{-6}),鸟的视觉(视力为人的 $8 \sim 50$ 倍),蝙蝠、飞蛾、海豚的听觉(主动型生物雷达——超声波传感器)等。这些动物的感官功能超过了当今传感器技术所能实现的范围。研究它们的机理,开发仿生传感器,也是引人注目的方向。所谓仿生传感器,就是模拟人(或动物)的感觉器官的传感器,即视觉传感器、听觉传感器、嗅觉传感器、味觉传感器、触觉传感器等。仿生传感器在机器人技术向智能化高级机器人发展的今天尤为重要。

传感器与传感器技术是现代检测与控制系统的关键部件和技术,其应用已深入到国民经济和人们日常生活各个领域,传感器与传感器技术的研究和开发工作,具有广阔的前景。

第 1 章 传感器的一般特性

传感器测量系统的示意图如图 1-1 所示。传感器系统的基本特性是指系统的输出-输入关系特性,即系统输出信号 $y(t)$ 与输入(被测物理量)信号 $x(t)$ 之间的关系。从误差角度去分析输出-输入特性是测量技术研究的主要内容之一。输出-输入特性虽然是传感器的外部特性,但与其内部参数密切相关。对传感器系统的基本特性研究,主要用于两个方面:

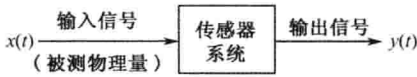


图 1-1 传感器系统

第一,用作为一个测量系统。这时必须已知传感器系统的基本特性,才能测量输出信号 $y(t)$ 。这样可通过基本特性和输出来推断导致该输出的系统的输入信号 $x(t)$ 。这就是未知被测物理量的测量过程。

第二,用于传感器系统本身的研究、设计与建立。这时必须观测系统的输入 $x(t)$ 及与其相应的输出 $y(t)$,才能推断、建立系统的特性。如果系统特性不满足要求,则应修改相应的内部参数,直至合格为止。

根据输入信号 $x(t)$ 是随时间变化的还是不随时间变化,基本特性分为静态特性和动态特性,它们是系统对外呈现出的外部特性,但这类特性由其自身的内部参数决定。不同的传感器具有不同的内部参数,其基本特性也表现出不同的特点,对测量结果的影响也各不相同。一个高精度的传感器,必须具有良好的静态特性和动态特性,这样才能完成信号无失真的转换。

1.1 传感器的静态特性

传感器在稳态信号($x(t)=\text{常量}$)作用下,其输出-输入关系称为静态特性。衡量传感器静态特性的性能指标是线性度、灵敏度、分辨率、迟滞、重复性和量程等。

1.1.1 线性度(非线性误差)

传感器的线性度(linearity)是指传感器的输出与输入之间的线性程度。传感器的理想输出-输入线性特性,具有以下优点:

- (1) 可大大简化传感器的理论分析和设计计算;
- (2) 为传感器的标定和数据处理带来很大方便,只要知道线性输出-输入特性上的两点(一般为零点和满度值)就可以确定其余各点;
- (3) 可使仪表刻度盘均匀刻度,因而制作、安装、调试容易,提高测量精度;
- (4) 避免非线性补偿环节。

实际上许多传感器的输出-输入特性是非线性的,如果不考虑其迟滞和蠕变效应,传感器的静态特性可以由下列方程式表示为

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + \dots + a_nx^n \quad (1-1)$$

式中, x 为被测物理量; y 为输出量; a_0 为零位输出; a_1 为传感器线性灵敏度,常用 K 表示; a_2, a_3, \dots, a_n 为待定系数。

从式(1-1)可见,一般的静态特性由线性项($a_0 + a_1x$)和非线性项($a_2x^2 + a_3x^3 + \dots +$

$a_n x^n$)所决定。当 $a_0 \neq 0$ 时,表示即使在没有输入($x=0$)的情况下,仍有输出($y_0=a_0$),通常称为零点偏移(零偏),零位值应从测量结果中设法消除。当 $a_0=0$ 时,静态特性通过原点。在不考虑零位情况下,静态特性可分为以下四种典型情况:

(1) 理想线性特性。如图 1-2(a)所示直线,其输出-输入特性方程式为

$$y = a_1 x \quad (1-2)$$

测量系统的灵敏度为

$$S_n = y/x = a_1 = \text{常数}$$

(2) 具有 x 偶次项的非线性。如图 1-2(b)所示,其输出-输入特性方程为

$$y = a_1 x + a_2 x^2 + a_4 x^4 + \dots \quad (1-3)$$

由于没有对称性,所以其线性范围很窄。一般传感器设计很少采用这种特性。

(3) 具有 x 奇次项的非线性。如图 1-2(c)所示,其输出-输入特性方程为

$$y = a_1 x + a_3 x^3 + a_5 x^5 + \dots \quad (1-4)$$

具有这种特性的传感器,在原点附近较大的范围内具有较宽的准线性。这是比较接近于理想直线的非线性特性,它相对于原点对称的,即 $y(x) = -y(-x)$,所以它具有相当宽的近似线性范围。

(4) 普遍情况。如图 1-2(d)所示,其输出-输入特性方程为

$$y = a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + a_4 x^4 + \dots \quad (1-5)$$

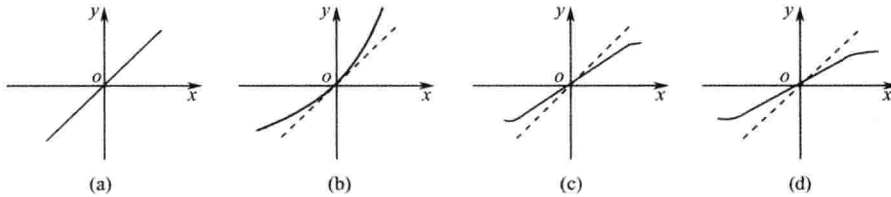


图 1-2 传感器的静态特性

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条件下,可以用切线或割线等直线来近似地代替实际的静态特性曲线的某一段,使传感器的静态特性近于线性,如图 1-3 所示。这种方法称为传感器非线性特性的线性化,所采用的直线称为拟合直线。实际静态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,如图 1-3 中所示的 Δ 值,取其中最大值与输出满量程之比作为评价非线性误差(或线性度)的指标,即

$$\delta_L = \pm \frac{\Delta_{\max}}{y_{F.S}} \times 100\% \quad (1-6)$$

式中, δ_L 为非线性误差(线性度); Δ_{\max} 为最大非线性绝对误差; $y_{F.S}$ 为输出满量程。

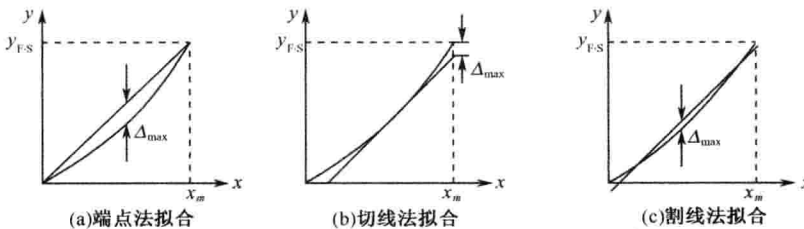


图 1-3 传感器静态特性非线性的线性拟合

传感器的静态特性曲线是在静态标准条件下进行校准的。静态标准条件是没有加速度、振动、冲击(除非这些参数本身就是被测物理量);环境温度一般为室温(20±5℃);相对湿度不大于85%;大气压力为101.3±8.0kPa。传感器的静态特性是在这种标准条件下,利用一定等级的标准设备,对传感器进行反复测试,得到的输出-输入数据所列成的表格或曲线。

拟合直线的选取方法很多,除端点法、切线法和割线法(见图1-3)外,一般是选取在标称输出范围中和标定曲线的各点偏差平方之和最小(即最小二乘法原理)的直线作为拟合直线(也称参考直线或理论直线)。

1.1.2 灵敏度

灵敏度(sensitivity)是指传感器在稳态下的输出变化对输入变化的比值,用 S_n 来表示,即

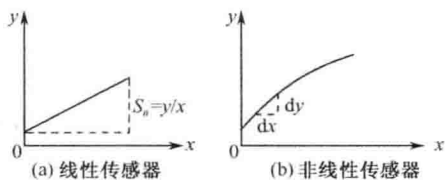


图1-4 灵敏度定义

$$S_n = \frac{\text{输出量的变化量}}{\text{输入量的变化量}} = \frac{dy}{dx} \quad (1-7)$$

对于线性传感器,它的灵敏度就是它的静态特性的斜率(或传递系数),即 $S_n = y/x = K$ 。非线性传感器的灵敏度为一变量,如图1-4所示。一般希望传感器的灵敏度高,在满量程范围内是恒定的,即传感器的输出-输入特性为直线。为此,对一般的非线性传感器,常通过一些校正网络,使其输出-输入之间具有线性关系,此时传感器的灵敏度就可写成 $K = y/x$ 。

1.1.3 分辨率和分辨力

分辨率和分辨力(resolution)都是用来表示传感器能够检测被测量的最小量值的性能指标。前者是以满量程的百分数来表示,是一个无量纲比率的量;后者是以最小量程的单位值来表示,是一个有量纲的量值。

1.1.4 迟滞(滞环)

迟滞(hysteresis)特性表明传感器的正向(输入量增大)和反向(输入量减小)行程输出-输入特性曲线不重合的程度,如图1-5所示。亦即对于同一大小的输入信号,传感器的正、反行程的输出信号大小不相等,这就是迟滞现象。迟滞大小一般由实验测定,以正、反向输出量的最大偏差对满量程输出 $y_{F.S}$ 的百分数表示,即

$$\delta_H = \pm \frac{\Delta_{\max}}{y_{F.S}} \times 100\% \quad (1-8)$$

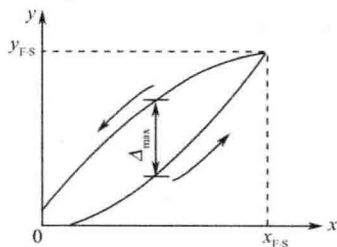


图1-5 滞环特性示意图

1.1.5 重复性

重复性(repeatability)表示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,如图1-6所示。多次重复测试特性曲线重复性好,误差就小。重复性指标(不重复性误差)一般采用输出最大不重复误差 Δ_{\max} 与满量程输出 $y_{F.S}$ 的百分数表示,即

$$\delta_R = \pm \frac{\Delta_{\max}}{y_{F.S}} \times 100\% \quad (1-9)$$

不重复性误差是属于随机误差性质的,按上述方法计算就不太合理了。校准数据的离散程度是与随机误差的精密度相关的,应根据标准偏差来计算重复性指标。因此重复性误差可按下式计算:

$$\delta_R = \pm \frac{(2 \sim 3)\sigma}{y_{F.S}} \times 100\% \quad (1-10)$$

式中, σ 为标准偏差。

误差服从正态分布, σ 前的置信系数取2,则概率为95%;置信系数取3,概率为99.73%。标准偏差可用贝塞尔(Bessel)公式计算:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1}}$$

式中, y_i 为第*i*次的测量值; \bar{y} 为测量值的算术平均值; n 为测量次数。

1.1.6 精度

传感器的精度(accuracy)是指测量结果的可靠程度,它以给定的准确度表示重复某个读数的能力,误差越小,则传感器的精度越高。

传感器的精度由其量程范围内的最大基本误差与满量程之比的百分数表示。基本误差是由系统误差和随机误差两部分组成的。迟滞与线性度所表示的误差为传感器的系统误差,重复性所表示的误差为随机误差。所以传感器的精度 δ 为

$$\delta = \frac{\Delta_m}{y_{F.S}} \times 100\% = \delta_L + \delta_H + \delta_R \quad (1-11)$$

式中, Δ_m 为测量范围内允许的最大基本误差。

工程技术中为简化传感器精度的表示方法,引用精度等级概念。精度等级以一系列标准百分比数值分档表示,如压力传感器的精度等级分别为0.05、0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5等。传感器设计和出厂检验时,其精度等级代表的误差指传感器测量的最大允许误差。

1.1.7 改善传感器性能的技术措施

1. 差动技术

在传感器的使用中,对传感器的性能要求较高,然而,通常由单一敏感元件与单一变送器组成的传感器,其输出-输入特性较差,很难满足检测要求。如果采用差动、对称结构和差动电路(如电桥)相结合的差动技术,可以达到消除零位值、减小非线性、提高灵敏度、实现温度补偿和抵消共模误差干扰等的效果,改善传感器的技术性能。

本书在相关章节将具体介绍传感器性能改善技术措施。

2. 累加平均技术

在传感器中采用平均技术可产生平均效应。其原理是利用若干个传感单元同时感受被测量,其输出则是这些单元输出的平均值,若将每个单元可能带来的误差 δ 均可看做随机误差且服从正态分布,根据误差理论,总的误差将减小为

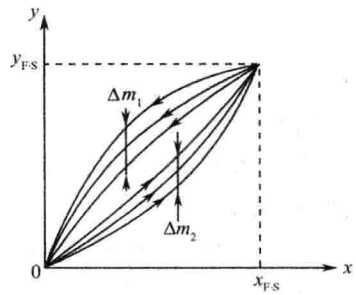


图 1-6 重复性