

高等职业教育机电类“十三五”规划教材

传感器技术与应用

项目式教学创新示范教程

林若波 陈耿新 编著
陈炳文 姜世芬

清华大学出版社

高等职业教育机电类“十三五”规划教材

传感器技术与应用

林若波 陈耿新 编著
陈炳文 姜世芬

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书是高等职业教育“十三五”规划教材。全书采用模块化设计,以项目式教学模式为主线,简明扼要介绍了传感器与检测技术的基本概念、基本原理和典型应用。全书分为传感技术基础知识、现代传感技术概述、电阻式与热电式传感器的应用、电感式与电容式传感器的应用、压电式与磁电式传感器的应用、光电式传感器的应用、半导体式传感器的应用、辐射与波式传感器的应用和课程设计九个章节。本书体系结构清晰,内容围绕高职高专课程教学改革,注重传感器技术应用和项目制作,体现学生知识能力、实操技能和综合能力的有机结合,强调发散性思维能力、工程实践应用能力、团队合作能力与创新能力的综合运用。

本书可作为高职高专和中职教育的机电一体化、测控技术与仪器、电气工程及其自动化、自动化、电子信息工程等专业的教材,也可供其他专业学生和从事传感器与检测技术的有关技术人员参考。

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

传感器技术与应用/林若波等编著. —北京:清华大学出版社,2016

高等职业教育机电类“十三五”规划教材

ISBN 978-7-302-45026-9

I. ①传… II. ①林… III. ①传感器—高等职业教育—教材 IV. ①TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 218992 号

责任编辑:许 龙

封面设计:常雪影

责任校对:刘玉霞

责任印制:宋 林

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

印 刷 者:北京富博印刷有限公司

装 订 者:北京市密云县京文制本装订厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:15.75

字 数:377千字

版 次:2016年9月第1版

印 次:2016年9月第1次印刷

印 数:1~2000

定 价:36.00元

产品编号:070485-01

检

测技术作为信息科学的一个重要分支,与计算机技术、自动控制技术和通信技术 etc 一起构成信息技术的完整学科。人类进入信息时代的今天,人们的一切社会活动均以信息获取与信息转换为中心,而传感器作为信息获取与信息转换的重要手段,是实现信息化的基础技术之一。随着“工业 4.0”和“中国制造 2025”的提出,先进信息技术和自动化系统成为引领与衡量各个国家迈向高度现代化的支撑性技术之一。传感器与检测技术正成长为自动化系统、物联网与信息域等的源头与基石。“没有传感器就没有现代科学技术”早已成为人们的共识。根据国家相关发展规划,传感器与检测技术相关内容列入国家中长期科技发展规划的“重点领域及其优先主题”,到 2020 年,我国仪器仪表产业将有一系列产品在微型化、集成化、无线化、智能化、网络化等方面取得重大突破。与此同时,它对人才培养的内容和目标提出了与时俱进的新要求。

传感器与检测技术是一门适用广泛的专业课程,传统教学由于过于注重理论性,导致教学枯燥无味,教学效果不佳。本教材采用项目式教学模式,简明扼要地介绍传感器与检测技术的基本概念、基本原理和典型应用,分为上篇、中篇和下篇三部分,共九章。上篇为基础与发展介绍,包括传感技术基础知识、现代传感技术概述;中篇为项目制作篇,包括电阻式与热电式传感器的应用、电感式与电容式传感器的应用、压电式与磁电式传感器的应用、光电式传感器的应用、半导体式传感器的应用、辐射与波式传感器的应用,每一个项目均从知识能力、技能能力、综合能力三方面进行培养,并根据任务单和考核标准进行综合评价;下篇为综合设计篇,主要作为课程设计的内容,着重培养学生的综合设计能力和课程报告撰写能力。

本书充分考虑了高职高专应用型人才培养的特点,以提高学生分析问题及解决问题能力为目标。具体特点如下。

(1) 面向创新教学。围绕高职高专课程教学改革,针对每一类传感器的应用,介绍相关知识点,采用项目式教学方式,重点突出,应用性强。

(2) 精选教学内容。立足基础理论,面向应用技术,以“必需、够用”为度,以掌握概念、强化应用为重点,加强理论知识与实际应用的统一。

(3) 力求实用简单。第 3~8 章所选项目均为传感器基础应用项目,电路制作简单,易于实现,直观性强,效果好,能激发学生学习兴趣。

(4) 突出系统应用。第9章课程设计项目均为综合实训项目,系统培养性强、作品实用性好,能积极引导学生在项目设计思路,提升综合应用能力。

(5) 注重能力培养。每个项目均通过任务单和考核标准,实施项目教学,提高学生的综合分析能力和设计能力,培养学生的团队合作意识。

本书可作为高职高专和中职教育的机电一体化、测控技术与仪器、电气工程及其自动化、自动化、电子信息工程等专业的教材,也可供其他专业学生和从事传感器与检测技术的有关技术人员参考。课程标准学时为72学时或54学时,教学过程可根据具体情况进行选学。

本书由林若波主编和统稿,其中第1、3、6、9章由林若波编写,第2、4、5章由陈耿新编写,第7章由姜世芬编写,第8章由陈炳文编写,张柏畅等参与部分章节的图文编辑与排版工作。

本书由华南理工大学博士生导师刘桂雄教授主审,对本书的总体结构和内容细节等进行了全面审订,提出许多宝贵的审阅意见,在此表示衷心的感谢。

本书在编写和出版过程中,得到清华大学出版社的指导和支持,对他们的辛勤劳动和无私奉献表示真挚的谢意。同时,对本书参考文献中的有关作者致以诚挚的感谢。

传感器与检测技术内容丰富、应用广泛,传感技术处于不断发展进步中,本书的出版是我们在此领域的一次努力尝试。限于自身的水平和学识,书中难免存在疏漏和错误之处,诚望读者不吝赐教,以便修正。我们的电子邮箱是: jylinrb@jyc.edu.cn。

作者

2016年7月

上篇 基础与发展介绍

第 1 章 传感技术基础知识	3
1.1 传感器的认识与标定	3
1.1.1 传感器的认知	3
1.1.2 传感器的基本特性	6
1.1.3 传感器的标定与校准	9
1.2 测量误差与测量不确定度	10
1.2.1 测量误差	10
1.2.2 测量误差的处理方法	12
1.2.3 测量不确定度	14
习题与思考	16
第 2 章 现代传感技术概述	17
2.1 几种新型传感技术	17
2.1.1 智能传感器	17
2.1.2 模糊传感器	21
2.1.3 微传感器	23
2.1.4 网络传感器	26
2.1.5 机器视觉	29
2.1.6 多传感器数据融合技术	30
2.2 网络化虚拟仪器技术	32
2.2.1 网络化虚拟仪器	32
2.2.2 LabVIEW 虚拟仪器软件	34
习题与思考	36

中篇 项目制作篇

第3章 电阻式与热电式传感器的应用	39
3.1 基于电阻式传感器的称重电子秤系统设计	39
3.1.1 电阻应变式传感器	39
3.1.2 半导体压阻式传感器	43
3.1.3 任务描述	45
3.1.4 任务分析	45
3.1.5 任务实施	47
3.1.6 结果分析	51
3.1.7 任务单	52
3.1.8 考核标准	52
3.2 基于热电式传感器的温度测量设计	55
3.2.1 热电偶	55
3.2.2 热电阻	58
3.2.3 热敏电阻	59
3.2.4 任务描述	61
3.2.5 任务分析	61
3.2.6 任务实施	62
3.2.7 结果分析	64
3.2.8 任务单	64
3.2.9 考核标准	65
习题与思考	67
第4章 电感式与电容式传感器的应用	69
4.1 基于电感式传感器的位移测量设计	70
4.1.1 自感式电感传感器	70
4.1.2 差动变压器式传感器	73
4.1.3 电涡流电感式传感器	74
4.1.4 任务描述	77
4.1.5 任务分析	77
4.1.6 任务实施	78
4.1.7 结果分析	80
4.1.8 任务单	80
4.1.9 考核标准	80
4.2 基于电容式传感器的接近开关控制设计	83
4.2.1 电容式传感器的结构及工作原理	83
4.2.2 电容式传感器的测量电路	86

4.2.3	任务描述	89
4.2.4	任务分析	90
4.2.5	任务实施	91
4.2.6	结果分析	92
4.2.7	任务单	92
4.2.8	考核标准	93
	习题与思考	96
第5章	压电式与磁电式传感器的应用	97
5.1	基于压电式传感器的玻璃破碎报警器设计	97
5.1.1	压电式传感器	98
5.1.2	测量电路	102
5.1.3	任务描述	106
5.1.4	任务分析	106
5.1.5	任务实施	107
5.1.6	结果分析	108
5.1.7	任务单	108
5.1.8	考核标准	109
5.2	基于霍尔传感器的自行车转速测量设计	112
5.2.1	霍尔传感器	112
5.2.2	其他半导体磁敏传感器及应用	117
5.2.3	任务描述	118
5.2.4	任务分析	119
5.2.5	任务实施	121
5.2.6	结果分析	122
5.2.7	任务单	122
5.2.8	考核标准	123
	习题与思考	127
第6章	光电式传感器的应用	128
6.1	基于光电式传感器的烟雾报警器设计	128
6.1.1	光电效应	128
6.1.2	光电器件	129
6.1.3	光纤传感器	143
6.1.4	任务描述	147
6.1.5	任务分析	148
6.1.6	任务实施	149
6.1.7	结果分析	150
6.1.8	任务单	150

6.1.9	考核标准	150
6.2	基于光电式传感器的电机转速测量设计	152
6.2.1	光电式编码器	152
6.2.2	计量光栅	157
6.2.3	任务描述	161
6.2.4	任务分析	161
6.2.5	任务实施	162
6.2.6	结果分析	163
6.2.7	任务单	163
6.2.8	考核标准	164
	习题与思考	167
第7章	半导体式传感器的应用	168
7.1	基于气敏传感器的有毒气体报警器设计	169
7.1.1	半导体气敏传感器	169
7.1.2	任务描述	173
7.1.3	任务分析	174
7.1.4	任务实施	174
7.1.5	结果分析	176
7.1.6	任务单	176
7.1.7	考核标准	176
7.2	基于湿敏传感器的镜面水汽清除器设计	178
7.2.1	湿敏传感器	178
7.2.2	任务描述	182
7.2.3	任务分析	182
7.2.4	任务实施	183
7.2.5	结果分析	184
7.2.6	任务单	184
7.2.7	考核标准	185
	习题与思考	189
第8章	辐射与波式传感器的应用	190
8.1	基于热释电红外传感器的防盗报警电路设计	190
8.1.1	红外传感器	190
8.1.2	热释电人体红外线传感器	194
8.1.3	任务描述	195
8.1.4	任务分析	196
8.1.5	任务实施	197
8.1.6	结果分析	198

8.1.7	任务单	198
8.1.8	考核标准	199
8.2	基于超声波传感器的测距电路设计	201
8.2.1	超声波及其物理性质	201
8.2.2	超声波传感器	202
8.2.3	超声波传感器的应用	202
8.2.4	任务描述	204
8.2.5	任务分析	205
8.2.6	任务实施	206
8.2.7	结果分析	207
8.2.8	任务单	207
8.2.9	考核标准	208
	习题与思考	211

下篇 综合设计篇

第9章	课程设计	215
9.1	基于 AT89S51 单片机的超声波测距系统设计	215
9.1.1	设计任务要求	215
9.1.2	设计任务分析	215
9.1.3	设计项目实施	220
9.1.4	课程设计报告	224
9.2	基于 ZigBee 的智能家居控制系统设计	224
9.2.1	设计任务要求	224
9.2.2	设计任务分析	224
9.2.3	设计项目实施	231
9.2.4	课程设计报告	233
附录	中国(国际)传感器创新大赛	234
	参考文献	239

上篇

基础与发展介绍

第1章

传感技术基础知识

学习目标

知识能力：熟悉传感器静态和动态特性，了解传感器标定方式，掌握测量数据处理方法。

实操技能：掌握传感器的识别和标定方法。

综合能力：提高学生分析问题和解决问题的能力，加强学生沟通能力及团队协作精神的培养。

在科学技术迅速发展的今天，人类已进入瞬息万变的信息时代。人们在从事工业生产和科学实验等活动时，主要依靠对信息的开发、获取、传输和处理。检测技术就是研究自动检测系统中信息提取、信息转换及信息处理的一门技术学科，而传感器则是感知、获取与检测信息的窗口。

“检测系统”是传感技术发展一定阶段的产物，工程需要由传感器与多台仪表或多个功能模块组合在一起，才能完成信号的检测，这样便形成了检测系统。

为更好掌握传感器的应用方法，有效完成检测任务，工程人员需要掌握检测的基本概念、检测系统的特性、测量误差的基本概念及数据处理的方法等。

1.1 传感器的认识与标定

1.1.1 传感器的认知

1. 传感器的定义

根据中华人民共和国国家标准，传感器的定义是：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。传感器是一种以一定的精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。

传感技术、通信技术和计算机技术是现代信息技术的三大支柱，构成信息系统的感官、

神经和大脑,实现信息的获取、传递、转换和控制。传感技术是信息技术的基础,传感器的性能、质量和水平直接决定了信息系统的功能和质量。因此,国外一些著名专家评论说“征服了传感器就等于征服了科学技术”。

2. 传感器的组成与分类

如图 1-1 所示,传感器一般由敏感元件、转换元件、转换电路三部分组成。



图 1-1 传感器的组成框图

(1) 敏感元件: 直接感受被测量,并输出与被测量成确定关系的某一物理量的元件。

(2) 转换元件: 以敏感元件的输出为输入,把输入转换成电路参数。

(3) 转换电路: 上述电路参数接入转换电路,便可转换成电量输出。

实际上,有些传感器很简单,仅由一个敏感元件组成,它感受被测量时直接输出电量,如热电偶。有些传感器由敏感元件和转换元件组成,没有转换电路。有些传感器,转换元件不止一个,要经过若干次转换。

目前,传感器通常按照两种方式分类:一种是按被测量分类,另一种是按传感器的原理分类,见表 1-1、表 1-2。

表 1-1 按被测量分类

按测量类别	被 测 量
热工量	温度、热量、比热容,压力、压差、真空度,流量、流速、风速
机械量	位移(线位移、角位移),尺寸、形状;力、力矩、应力;重量、质量;转速、线速度;振动幅度、频率、加速度、噪声
特性和成分量	气体化学成分、液体化学成分,酸碱度(pH)、盐度、浓度、黏度,密度、相对密度
状态量	颜色、透明度、磨损量、材料内部裂缝或缺陷、气体泄漏、表面质量

表 1-2 按传感器的原理分类

序 号	工 作 原 理	序 号	工 作 原 理
1	电阻式	8	光电式(红外式、光导纤维式)
2	电感式	9	谐振式
3	电容式	10	霍尔式(磁电式)
4	阻抗式(电涡流式)	11	超声式
5	磁电式	12	同位素式
6	热电式	13	电化学式
7	压电式	14	微波式

3. 传感技术的特点与作用

传感技术是现代科技的前沿技术,是现代信息技术的三大支柱之一,其水平高低是衡量一个国家科技发展水平的重要标志之一。它的特点主要体现在:

(1) 属边缘学科。传感技术机理涉及多门学科与技术,包括测量学、微电子学、物理学、

光学、机械学、材料学、计算机科学等。在理论上以物理学中的“效应”“现象”，化学中的“反应”，生物学中的“机理”作为基础。在技术上涉及电子、机械制造、化学工程、生物工程等学科的技术。这是多种高技术的集合产物，传感器在设计、制造和应用过程中技术的多样式、边缘性、综合性和技艺性呈现出技术密集的特性。

(2) 产品、产业分散，涉及面广。自然界中各种信息(如光、声、热、湿、气等)千差万别，传感器品种繁多，被测参数包括热工量、电工量、化学量、物理量、机械量、生物量、状态量等。应用领域广泛，无论是高新技术，还是传统产业，乃至日常生活，都需要应用大量的传感器。

(3) 功能、工艺要求复杂，技术指标不断提高。传感器应用要求千差万别，有的量大面广，有的专业性很强，有的要求耐热、耐振动，有的要求防爆、防磁等。面对复杂的功能要求，设计制造工艺也越来越复杂，技术指标更是与时俱进。

(4) 性能稳定、测试精确。传感器应具有高稳定性、高可靠性、高重复性、低迟滞、快响应和良好的环境适应性。

(5) 基础、应用两头依附，产品、市场相互促进。基础依附是指传感器技术的发展依附于敏感机理、敏感材料、工艺设备和测量技术；应用依附是指传感器基本上属于应用技术，其开发多依赖于检测装置和自动控制系统，才能真正体现它的高附加效益，并形成现实市场。

分析传感技术在现代科学技术、国民经济和社会生活中的地位与作用，著名科学家、两院院士王大珩对仪器仪表做了非常精辟的论述：“当今世界已进入信息时代，信息技术成为推动科学技术和国民经济发展的关键技术。测量控制与仪器仪表作为对物质世界的信息进行采集、处理、控制的基础手段和设备，是信息产业的源头和重要组成部分。仪器仪表是工业生产的‘倍增器’，科学研究的‘先行官’，军事上的‘战斗机’，国民活动的‘物化法官’，应用无所不在。”

4. 传感器技术的发展趋势

当前，传感器技术的主要发展动向包括两方面：一是开展基础研究，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与智能化。

(1) 发现新现象，开发新材料。新现象、新原理、新材料是发展传感器技术，研究新型传感器的重要基础，每一种新原理、新材料的发现都会伴随新的传感器种类诞生。

(2) 集成化，多功能化。传感器的集成化和多功能化就是将半导体集成电路技术用于传感器的制造，并向敏感功能装置发展。如采用厚膜和薄膜技术制作传感器，采用微细加工技术制作微型传感器。

(3) 向未开发的领域挑战。到目前为止，正大力研究、开发的传感器大多为物理传感器，今后将积极开发研究化学传感器和生物传感器。特别是智能机器人技术的发展，需要研制各种模拟人的感觉器官的传感器，如已有的机器人力觉传感器、触觉传感器、味觉传感器等。

(4) 智能化传感器。具有判断能力、学习能力的传感器，事实上是一种带微处理器的传感器，它具有检测、判断和信息处理功能。同一般传感器相比，智能化传感器具有精度高、稳定可靠性好、检测与处理方便、功能广、性价比高的显著特点。

1.1.2 传感器的基本特性

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内部结构参数有关的外部特性。传感器的基本特性通常可以分为静态特性和动态特性。

1. 静态特性

传感器静态特性是指被测量值处于稳定状态时输出与输入的关系。对静态特性而言,在不考虑迟滞蠕变及其他不确定因素的情况下,传感器的输入量 x 与输出量 y 之间的关系通常可用如下的多项式表示:

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

式中: a_0 ——输入量 x 为零时的输出量;

a_0, a_1, \dots, a_n ——非线性项系数。

传感器的静态特性可以用一组性能指标来描述,如灵敏度、线性度、分辨率、迟滞、重复性和漂移等。

1) 灵敏度(sensitivity)

灵敏度是传感器静态特性的一个重要指标,其定义是输出量增量 Δy 与引起输出量增量 Δy 的相应输入量增量 Δx 之比,用 S 表示灵敏度,即

$$S = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (1-2)$$

它表示单位输入量变化所引起传感器输出量的变化,灵敏度 S 越大,则传感器越灵敏。

线性传感器灵敏度就是它的静态特性斜率,其灵敏度 S 是常量,如图 1-2(a) 所示;非线性传感器的灵敏度为一变量,用 $S = dy/dx$ 表示,实际上就是输入输出特性曲线上某点的斜率,且灵敏度随输入量的变化而变化,如图 1-2(b) 所示。

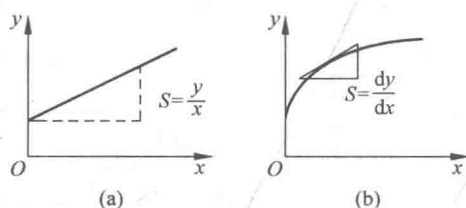


图 1-2 灵敏度定义

(a) 线性测量系统; (b) 非线性测量系统

2) 线性度(linearity)

线性度是指传感器输出与输入之间数量关系的线性程度。传感器理想输入-输出特性应是线性的,但实际输入-输出特性大都具有一定程度的非线性。在输入量变化范围不大的条件下,可以用切线或割线拟合、过零旋转拟合、端点平移拟合等来近似地代表实际曲线的一段,这就是传感器非线性特性的线性化,如图 1-3 所示。

所采用的直线称为拟合直线,实际特性曲线与拟合直线间的偏差称为传感器的非线性误差,取其最大值与输出满刻度值(full scale,即满量程)之比作为评价非线性误差(或线性度)的指标,即

$$\gamma_L = \pm \frac{\Delta L_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (1-3)$$

式中: γ_L ——非线性误差;

ΔL_{\max} ——最大非线性绝对误差;

Y_{FS} ——输出满量程。

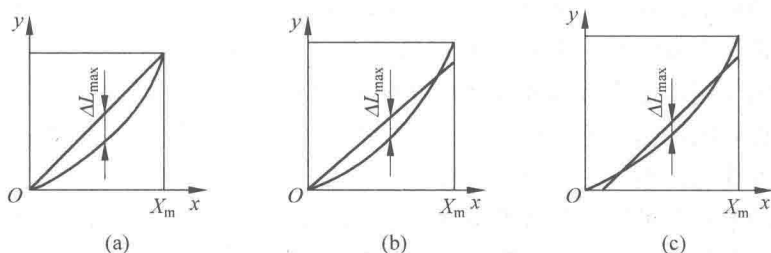


图 1-3 输入-输出特性的线性化

(a) 切线或割线; (b) 过零旋转; (c) 端点平移

3) 分辨率(resolution)

分辨率是指传感器能够感知或检测到的最小输入信号增量,反映传感器能够分辨被测量微小变化的能力。分辨率可以用增量的绝对值或增量与满量程的百分比来表示。

4) 迟滞(hysteresis)

迟滞也叫回程误差,是指在相同测量条件下,对应于同一大小输入信号,传感器正(输入量由小增大)、反(输入量由大减小)行程的输出信号大小不相等的现象。产生迟滞的原因是:传感器机械部分存在不可避免的摩擦、间隙、松动、积尘等,引起能量吸收和消耗。

迟滞特性表明传感器正、反行程期间输出-输入特性曲线不重合的程度。迟滞的大小一般由实验方法来确定。用正反行程间的最大输出差值 ΔH_{\max} 对满量程输出 Y_{FS} 的百分比来表示,如图 1-4 所示。

5) 重复性(repeatability)

重复性表示传感器在输入量按同一方向进行全量程多次测试时所得输入-输出特性曲线一致的程度。实际特性曲线不重复的原因与迟滞的产生原因相同。重复性指标一般采用输出最大不重复误差 ΔR_{\max} 与满量程输出 Y_{FS} 的百分比表示,如图 1-5 所示。

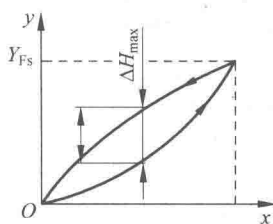


图 1-4 迟滞特性

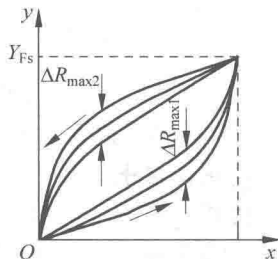


图 1-5 重复性

6) 漂移(drift or shift)

漂移是指传感器在输入量不变的情况下,输出量随时间变化的现象;漂移将影响传感器的稳定性或可靠性(stability or reliability)。产生漂移的原因主要有两个:一是传感器自身结构参数发生老化,如零点漂移(简称零漂);二是在测试过程中周围环境(如温度、湿度、压力等)发生变化,最常见的是温度漂移(简称温漂)。

2. 动态特性

传感器动态特性是指传感器对动态激励(输入)的响应(输出)特性,即其输出对随时间