

方法一：微信扫描书中二维码看视频  
方法二：下载立体书城 APP 登录账号扫码看视频



“十四五”职业教育国家规划教材

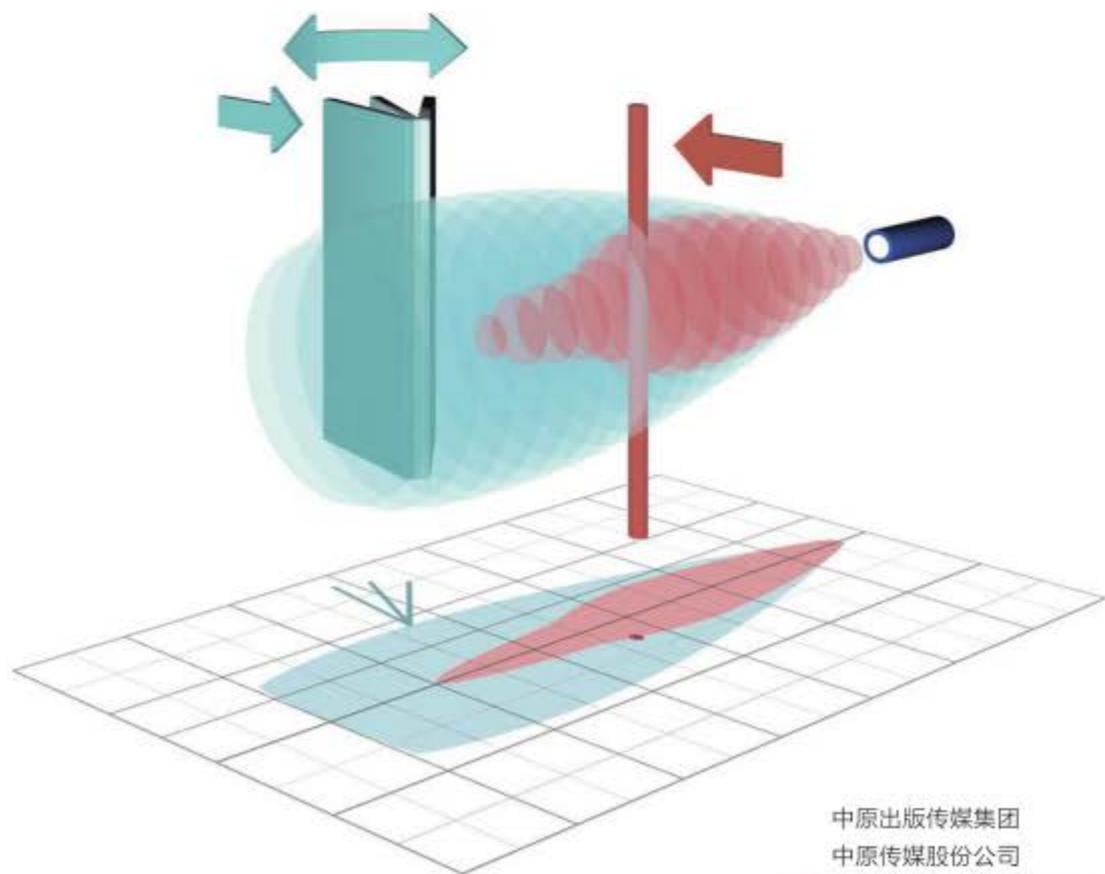


“十四五”职业教育国家规划教材

# 传感器与检测技术

## CHUANGANQI YU JIANCE JISHU

马质璞 主编



传感器与检测技术

马质璞 主编

河南科学技术出版社



下载应用

ISBN 978-7-5349-9469-2



9 787534 994692 >

定价：34.00 元

策划编辑 徐素军  
责任编辑 徐素军  
责任校对 司丽艳  
封面设计 张伟  
责任印制 张艳芳

中原出版传媒集团  
中原传媒股份公司  
河南科学技术出版社



“十四五”职业教育国家规划教材

# 传感器与检测技术

CHUANGANQI YU JIANCE JISHU

马质璞 主编

河南科学技术出版社

· 郑州 ·

## 内容提要

本教材共分为3个模块17个项目。项目分别是：项目1 传感器基础知识，项目2 传感器基本特性，项目3 应变式传感器，项目4 电感式传感器，项目5 电容式传感器，项目6 压电式传感器，项目7 霍尔式传感器，项目8 热电式传感器，项目9 光电式传感器，项目10 光栅式传感器，项目11 码盘式传感器，项目12 光纤传感器，项目13 红外传感器，项目14 超声波传感器，项目15 气敏传感器，项目16 湿敏传感器，项目17 传感器的应用案例。

本教材内容由浅入深、通俗易懂，可作为高职高专院校机电专业的专业课教材，为后期综合实训、毕业设计、顶岗实习等打下基础；也可作为职业素质养成与职业能力培养的理论实践一体化课程的教材。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

传感器与检测技术/马质璞主编. —郑州：河南科学技术出版社，2019.7  
(2022.12 修订)

“十三五”高等职业教育立体化教材

ISBN 978-7-5349-9469-2

I. ①传… II. ①马… III. ①传感器-检测-高等职业教育-教材 IV. ①TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 134657 号

---

出版发行：河南科学技术出版社

地址：郑州市郑东新区祥盛街 27 号 邮编：450016

电话：(0371) 65788865

网址：www.hnstp.cn

策划编辑：徐素军

责任编辑：徐素军

责任校对：司丽艳

封面设计：张 伟

责任印制：张艳芳

印 刷：河南博雅彩印有限公司

经 销：全国新华书店

开 本：787 mm×1092 mm 1/16 印张：11.75 字数：300 千字

版 次：2019 年 7 月第 1 版 2022 年 12 月第 5 次印刷

定 价：34.00 元

---

如发现印、装质量问题，影响阅读，请与出版社联系并调换。

## 《传感器与检测技术》编写人员

主 编 马质璞

副主编 杨子林 谢 靖 张 扬

编 者 (以姓氏笔画为序)

马质璞 王 伟 田达奇 杨子林

张 扬 张 抗 陈飞飞 范 乐

韩艳赞 谢 靖

河南科学技术出版社  
Henan Science and Technology Press



党的二十大报告提出，“教育、科技、人才是全面建设社会主义现代化国家的基础性、战略性支撑。”教育、人才、科技是辩证统一的整体，科技进步靠人才，人才培养靠教育，教育是人才培养和科技创新的根基，科技创新又将为教育注入新动能，特别是人工智能、大数据等新技术的导入，将对教育产生重大影响。建设现代化产业体系，推进新型工业化，加快建设制造强国、质量强国、航天强国、交通强国、网络强国、数字中国。实施产业基础再造工程和重大技术装备攻关工程，支持专精特新企业发展，推动制造业高端化、智能化、绿色化发展。巩固优势产业领先地位，在关系安全发展的领域加快补齐短板，提升战略性资源供应保障能力。推动战略性新兴产业融合集群发展，构建新一代信息技术、人工智能、生物技术、新能源、新材料、高端装备、绿色环保等一批新的增长引擎。构建优质高效的服务业新体系，推动现代服务业同先进制造业、现代农业深度融合。

为深入贯彻落实二十大精神和《教育部关于印发〈高等职业教育创新发展行动计划（2015—2018年）〉的通知》（教职成〔2015〕9号）及《河南省人民政府关于深化高等教育综合改革全面提升服务经济社会发展能力的意见》（豫政〔2015〕41号）文件精神，按照习近平总书记在党的二十大报告中的要求，要重视培养“破界”思维能力，鼓励学生关注本质、打破局限，开展更有价值和战略性的创新；要遵循人才成长规律和教学规律，把知识传授、素质提升、能力培养和价值塑造融为一体，深化素质教育与专业教育并重、科学素养与人文素养互促的培养模式改革。根据《河南省教育厅关于开展2017年度高职院校立体化教材建设工作的通知》（教高〔2017〕378号）精神，结合河南省高等职业教育培养高等技术应用人才的培养目标和任务要求，顺应“互联网+”的发展趋势，推进信息技术与教育教学的全面深度融合，加快提升高等职业教育信息化整体水平，以高等职业院校机电专业人才培养方案为依据编写了《传感器与检测技术》这本立体化教材。

教育数字化事关我国高质量教育体系建设、事关办好人民满意的教育、事关实现教育现代化的战略行动。教育数字化是指利用现代信息技术支持教育在育人方式、办学模式、管理体制、保障机制等方面创新，构建以人为本的教育发展观，促进教育研究和实践范式变革，形成适应数字时代的高质量教育体系。教育改革的主阵地课堂，课堂教学是数字化转型的核心，教学内容是数字化应用和服务的根本。借助传统纸质课本和练习本、数字化教材、智能化教学工具和装备，探索新型教学模式、提高课堂教学效率、减轻师生负担、培养学生新型能力，是一条有望解决当下难题

的可行性路径。数字化教材,即以数字形态存在、可装载于数字终端阅读、可动态更新内容、可及时记录交互轨迹的新型学习材料。数字化教材建设是撬动课堂教学数字化转型、实现优质教育资源共享的基础,重点在于探索新型教材建设标准和知识体系编写规范,研发新型教材互动设计与编辑工具,建设知识图谱、支撑平台和示例教材等,探索基于各种应用场景的数字化教学新模式。面向未来,着眼未来社会人才需求,大力实施教育数字化战略行动,编写了这本融合丰富数字化内容的职业教育教材。

《传感器与检测技术》充分利用现代信息技术,将传统纸质教材与声音、视频、动漫等其他线上资源有机结合,实现了学习方式灵活、学习内容丰富、学习效果好的目标。该教材是一门多学科交叉的专业课程教材,采用任务驱动模式编写,围绕简单易懂的项目,通过多媒体网络技术,开发出了二维、三维动画及视频等多种媒介的教学资源,将知识点融入其中,介绍各种传感器的工作原理和特性,结合工程应用实际,了解传感器在各种电量和非电量检测系统中的应用,增强了教学设计的实用性和趣味性。学生可以通过手机 APP 或者微信扫描二维码学习,培养学生使用各类传感器的技巧和能力,掌握常用传感器的测量设计方法和实验研究方法,了解传感器技术的发展新动向,提高了学生参与学习的动力。本课程为后期综合实训、毕业设计、顶岗实习等打下基础,也是职业素养养成与职业能力培养最基本的理论实践一体化课程。每个章节新增思政元素,以职业素养、科学精神和爱国情怀为主线,为学生提供内涵丰富、感染力强的案例,引领学生了解科技前沿,培养学生严谨务实的工作作风和探索创新的钻研精神,增强学生的民族自信心和自豪感。

教材内容共分为 3 个模块 17 个项目。项目分别是:项目 1 传感器基础知识,项目 2 传感器基本特性,项目 3 应变式传感器,项目 4 电感式传感器,项目 5 电容式传感器,项目 6 压电式传感器,项目 7 霍尔式传感器,项目 8 热电式传感器,项目 9 光电式传感器,项目 10 光栅式传感器,项目 11 码盘式传感器,项目 12 光纤传感器,项目 13 红外传感器,项目 14 超声波传感器,项目 15 气敏传感器,项目 16 湿敏传感器,项目 17 传感器的应用案例。

本书由南阳农业职业学院马质璞担任主编并统稿,南阳农业职业学院杨子林、谢靖、张扬任副主编,南阳农业职业学院张抗、陈飞飞、王伟及河南工业职业技术学院韩艳赞、田达奇、范乐参与了编写工作。

由于编者水平有限,书中可能存在不当或错误之处,恳请广大读者批评指正。

编 者

2022 年 12 月

## 模块 1 传感器技术基础

项目 1 传感器基础知识 .....	(2)
1.1 检测技术及检测系统的组成 .....	(2)
1.2 传感器的组成 .....	(3)
1.3 传感器的分类 .....	(4)
项目 2 传感器基本特性 .....	(7)
2.1 传感器的静态特性和动态特性 .....	(7)
2.2 传感器的选用 .....	(12)

## 模块 2 传感器原理与应用

项目 3 应变式传感器 .....	(16)
3.1 应变式传感器的工作原理 .....	(16)
3.2 应变式传感器的分类及结构 .....	(18)
3.3 应变式传感器的测量电路 .....	(21)
3.4 金属箔式应变片的单臂电桥、半桥和全桥电路性能测试 .....	(24)
项目 4 电感式传感器 .....	(31)
4.1 自感式传感器 .....	(31)
4.2 差动变压式传感器 .....	(34)
4.3 电涡流式传感器 .....	(37)
4.4 差动变压器的性能测试 .....	(39)
项目 5 电容式传感器 .....	(43)
5.1 电容式传感器的工作原理和结构 .....	(43)
5.2 电容式传感器的测量电路 .....	(48)
5.3 电容式传感器的应用 .....	(51)
5.4 电容式传感器的性能测试 .....	(53)
项目 6 压电式传感器 .....	(57)
6.1 压电效应及压电材料 .....	(57)
6.2 压电式传感器的电路 .....	(62)
6.3 压电式传感器的应用 .....	(65)
6.4 压电式传感器振动实验 .....	(67)
项目 7 霍尔式传感器 .....	(70)
7.1 霍尔效应及霍尔元件 .....	(70)

	7.2 霍尔式传感器的应用 .....	(74)
	7.3 霍尔式传感器测量转速实验 .....	(75)
项目 8	热电式传感器 .....	(78)
	8.1 热电偶传感器 .....	(79)
	8.2 热电阻传感器 .....	(85)
	8.3 热敏电阻传感器 .....	(87)
	8.4 PN 结温度传感器 .....	(90)
	8.5 热电式传感器的温度测试 .....	(91)
项目 9	光电式传感器 .....	(97)
	9.1 光电式传感器的工作原理 .....	(97)
	9.2 光电元件的原理与特性 .....	(99)
	9.3 光电式传感器的应用 .....	(107)
项目 10	光栅式传感器 .....	(110)
	10.1 光栅式传感器的结构 .....	(110)
	10.2 光栅式传感器的工作原理 .....	(111)
	10.3 光栅式传感器的应用 .....	(113)
项目 11	码盘式传感器 .....	(115)
	11.1 绝对式码盘传感器 .....	(116)
	11.2 增量式码盘传感器 .....	(118)
	11.3 角编码器的应用 .....	(119)
项目 12	光纤传感器 .....	(123)
	12.1 光纤传感器的结构 .....	(123)
	12.2 光纤传感器的类型 .....	(125)
	12.3 光纤传感器的应用 .....	(126)
	12.4 光纤位移传感器特性测试 .....	(128)
项目 13	红外传感器 .....	(131)
	13.1 红外传感器的工作原理 .....	(131)
	13.2 红外传感器的结构 .....	(133)
	13.3 红外传感器的应用 .....	(134)
	13.4 红外传感器特性测试 .....	(137)
项目 14	超声波传感器 .....	(139)
	14.1 超声波传感器的工作原理 .....	(139)
	14.2 超声波传感器的结构 .....	(142)
	14.3 超声波传感器的应用 .....	(143)
	14.4 超声波传感器性能测试 .....	(146)
项目 15	气敏传感器 .....	(148)
	15.1 气敏传感器的分类 .....	(149)
	15.2 半导体气敏传感器的工作原理及结构 .....	(149)
	15.3 气敏传感器的应用 .....	(152)







# 项目 1 传感器基础知识



扫一扫

## 项目分析

在现代工业生产中，为了检查、监督和控制某个生产过程或运动对象，并且使它们处于最佳工况状态，就必须掌握它们各种特性参数，并测量这些参数的大小、方向、变化速度等。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等一系列一起构成了信息技术的完整学科。

“没有传感器就没有现代科学技术”的观点已被科技人员所公认。

以传感器为核心的检测系统就像人的感官和神经一样，源源不断地向人类提供宏观与微观世界的种种信息，成为人们认识自然、改造自然的有力工具。

## 学习目标

1. 了解检测技术的概念和检测系统的组成。
2. 掌握传感器的定义、组成和作用，了解传感器的分类。

## 1.1 检测技术及检测系统的组成

### 1.1.1 检测技术的概念和作用

#### 1. 概念

检测技术是人们为了对被检测对象所包含的信息进行定性了解和定量掌握所采取的一系列技术措施，是产品检验和质量控制的重要手段。

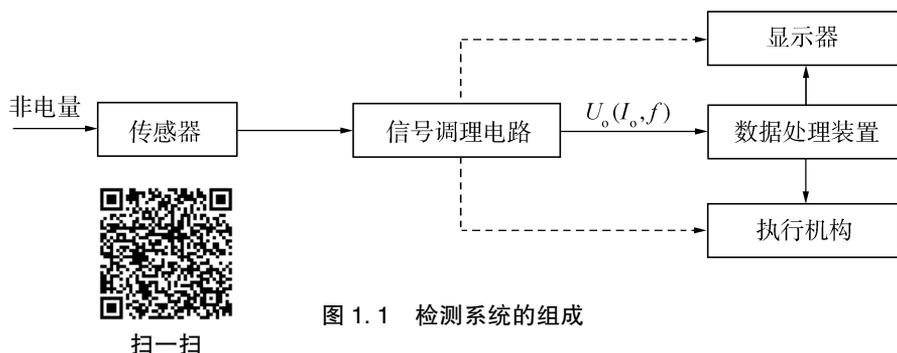
#### 2. 作用

通过检测可对产品进行质量评价；检测能保证大型设备安全经济运行；生产中对多种参数进行长期动态检测，可及时发现异常情况，加强故障预防，达到早期诊断的目的，避免严重的突发事故，保证设备和人员的安全，提高经济效益；检测中可采用计算机来处理检测信息，对信息进行分析、判断，及时诊断出故障并自动报警或采取相应的对策；检测技术是自动化系统中不可缺少的组成部分。

### 1.1.2 检测系统的组成

在现代的自动检测系统中，各个组成部分常常以信息流的过程来划分，一般可分为信息的获取、信息的转换、信息的显示和信息的信息的处理等几个部分。

一个完整的检测系统或装置通常是由传感器、信号调理电路和显示记录装置等几部分组成，分别完成信息获取、转换、显示和处理等功能，如图 1.1 所示。



### 1. 传感器

传感器是把被测非电量转换成可被测量的物理量的装置。显然，传感器是检测系统与检测对象直接发生联系的部件，是检测系统最重要的环节。检测系统所获取信息的质量往往是由传感器的性能决定的，因为检测系统的其他环节无法添加新的监测信息，并且不易消除传感器所引入的误差。传感器通常以电信号的形式输出，以便于传输、转换、处理和显示。输出电量的形式多种多样，如电压、电流等。输出信号的形式一般由传感器的原理确定。

### 2. 信号调理电路

信号调理电路包括放大（衰减）电路、滤波电路、隔离电路等。其中放大电路的作用是把传感器输出的电量变成具有一定驱动和传输能力的电压、电流或频率信号，以推动后级的显示器、数据处理装置及执行机构。

### 3. 显示器

显示器是检测人员和监测系统联系的主要设备，其主要作用是使人们了解被测物理量的大小或变化的过程。目前常用的显示记录装置有四类：模拟显示、数字显示、图像显示及记录仪等。模拟量是指连续变化量。模拟显示是利用指针相对标尺的位置来表示读数的，常见的有毫伏表、微安表、模拟光柱等。

### 4. 数据处理装置

数据处理装置用来对测试所得的实验数据进行处理、运算、逻辑判断、线性变换，对动态测试结果做频谱分析（幅值谱分析、功率谱分析）、相关分析等，完成这些工作必须采用计算机技术。

### 5. 执行机构

执行机构通常是指各种继电器、电磁铁、电磁阀门、电磁调节阀、伺服电动机等。它们在电路中是起通断、控制、调节、保护等作用的电器设备。许多检测系统能输出与被测量有关的电流或电压信号，自动控制系统的控制信号，通过这些信号驱动相应的执行机构，并对测试结果做频谱分析、相关分析。

## 1.2 传感器的组成

传感器由敏感元件、转换元件、信号调理与转换电路组成，如图 1.2 所示。

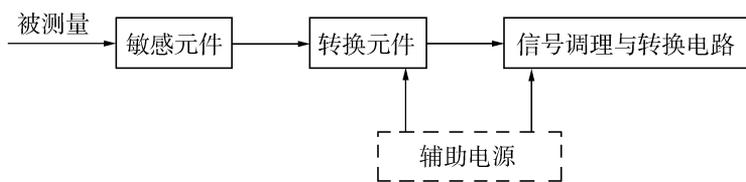


图 1.2 传感器的组成



扫一扫

敏感元件是指传感器中能直接感受或响应被测量的部分。

转换元件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电信号的部分。

信号调理与转换电路对信号进行放大、运算调制。

信号调理与转换电路以及传感器的工作必须有辅助电源。



扫一扫

### 1.3 传感器的分类

传感器有许多分类方法，常用的分类方法有两种：一种是按被测物理量来分类；另一种是按传感器的工作原理来分类。

按被测物理量划分的传感器，常见的有温度传感器、湿度传感器、压力传感器、位移传感器、流量传感器、位置传感器、力传感器、加速度传感器、转矩传感器等。

按工作原理可划分为电学量传感器、磁学量传感器、光电式传感器、电势型传感器、电荷传感器、半导体传感器、谐振式传感器、电化学式传感器。

#### 1. 电学量传感器

电学量传感器是非电量电测技术中应用范围较广的一种传感器，常用的有电阻式传感器、电容式传感器、电感式传感器、磁电式传感器及电涡流式传感器等。

(1) 电阻式传感器是利用变阻器将被测非电量转换为电阻信号的原理制成的。电阻式传感器一般有电位器式、触点变阻式、电阻应变片式及压阻式传感器等。电阻式传感器主要用于位移、压力、应变、力、力矩、气流流速、液位和液体流量等参数的测量。

(2) 电容式传感器是根据改变电容的几何尺寸或改变介质的性质和含量，使电容量发生变化的原理制成的，主要用于压力、位移、液位、厚度、水分含量等参数的测量。

(3) 电感式传感器是根据改变磁路几何尺寸、磁体位置来改变电感或互感的电感量或压磁效应的原理制成的，主要用于位移、压力、力、振动、加速度等参数的测量。

(4) 磁电式传感器是根据电磁感应原理，把被测非电量转换成电量，主要用于流量、转速和位移等参数的测量。

(5) 电涡流式传感器是根据金属在磁场中运动切割磁力线可在金属内形成涡流的原理制成的，主要用于位移及厚度等参数的测量。

#### 2. 磁学量传感器

磁学量传感器是根据铁磁物质的一些物理效应制成的，主要用于位移、转矩等参数的

测量。

### 3. 光电式传感器

光电式传感器在非电量电测技术及自动控制技术中占有重要的地位。它是利用光电器件的光电效应和光学原理制成的，主要用于光强、光通量、位移、浓度等参数的测量。

### 4. 电势型传感器

电势型传感器是根据热电效应、光电效应、霍尔效应等原理制成的，主要用于温度、磁通量、电流、速度、光强、热辐射等参数的测量。

### 5. 电荷传感器

电荷传感器是根据压电效应原理制成的，主要用于力及加速度的测量。

### 6. 半导体传感器

半导体传感器是根据半导体的压阻效应、内光电效应、磁电效应、半导体与气体接触发生变化等原理制成的，主要用于温度、湿度、压力、加速度、磁场和有害气体的测量。

### 7. 谐振式传感器

谐振式传感器是利用改变电或机械的固有参数来改变谐振频率的原理制成的，主要用来测量压力。

### 8. 电化学式传感器

电化学式传感器是以离子导电为基础制成的。根据其电特性形成的不同，电化学式传感器可分为电位式传感器、电导式传感器、电量式传感器、极谱式传感器和电解式传感器等。电化学式传感器主要用于分析气体、液体或可溶于液体的固体成分，以及对液体的酸碱度、电导率及氧化还原电位等的测量。

另外，根据传感器对信号的检测转换过程，传感器还可划分为直接转换型传感器和间接转换型传感器两大类。前者是把输入给传感器的非电量一次性地变换为电信号输出，如光敏电阻受到光照射时，电阻值会发生变化，直接把光信号转换成电信号输出；后者则要把输入给传感器的非电量先转换成另外一种非电量，然后再转换成电信号输出，如采用弹簧管敏感元件制成的压力传感器就属于这一类，当有压力作用到弹簧管时，弹簧管产生形变，传感器再把形变量转换为电信号输出。

## 知识拓展

### 检测技术的发展趋势

科学技术的迅猛发展，为检测技术的现代化创造了条件，主要表现在以下两个方面：

(1) 人们研究新原理、新材料和新工艺所取得的成果，将产生更多品质优良的新型传感器。

(2) 检测系统或检测装置目前正迅速地由模拟式、数字式向智能化方向发展。

检测系统具有系统故障自测、自诊断、自调零、自校准、自选量程、自动测试和自动分选、自校正功能，强大的数据处理和统计功能，远距离数据通信和输入、输出功能，可配置各种数字通信接口，传递检测数据和各种操作命令等，可方便地接入不同规模的自动检测、控制与管理信息网络系统。

思考与练习

1. 检测技术的含义是什么?
2. 检测系统由哪几部分组成?
3. 传感器由哪几部分组成?

河南科学技术出版社  
Henan Science and Technology Press

## 项目 2 传感器基本特性

### 项目分析

传感器一般要变各种信息为电量，描述此种变换的输入与输出关系即传感器的基本特性。但对不同的输入信号，输出特性是不同的，对快变信号与慢变信号，由于受传感器内部储能元件的影响，反应大不相同。对快变信号要考虑输出的动态特性，即随时间变化的特性；而对慢变或稳定信号，则要研究其静态特性，即不随时间变化的输入与输出特性。一个高精度传感器，必须同时具有良好的静态特性和动态特性，才能完成对信号无失真的转换。这样检测结果才尽可能准确地反映被测量的原始特征。

### 学习目标

1. 掌握传感器的静态特性。
2. 了解传感器的动态特性。
3. 掌握传感器的选用原则。

## 2.1 传感器的静态特性和动态特性

传感器必须要尽可能准确地反映输入物理量的状态，因此传感器所表现出来的输入-输出特性也就不同，即存在静态特性和动态特性。静态特性是指输入不随时间而变化的特性，表示传感器在被测量各值处于稳定状态下输入输出的关系。动态特性是指输入随时间而变化的特性，表示传感器对随时间变化的输入量的响应特性。静态特性和动态特性表现出不同的特点，对测量结果也产生不同的影响。

### 2.1.1 传感器的静态特性

当被测量不随时间变化或变化缓慢时，可以认为传感器与检测系统的输入量和输出量都与时间无关，由此确定的检测装置的性能参数称为静态特性。

#### 1. 静态数学模型的描述

如果不考虑迟滞及蠕变效应，传感器的静态特性可用下列代数方程式来表示：

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \cdots + a_nx^n \quad (2.1)$$

式中， $x$  表示传感器的输入量； $y$  表示传感器的输出量； $a_0, a_1, \cdots, a_n$  表示决定特性曲线的形状和位置的系数，一般通过传感器的校准实验数据经曲线拟合求得，可正可负。

这种固体材料在保持应力不变的条件下，应变随时间延长而增加的现象称为蠕变。

理想线性情况下：



扫一扫

$$y = a_1 x \quad (2.2)$$

传感器的静态特性指标主要是通过校准实验来获取的。所谓校准实验，就是在规定的实验条件下，利用一定等级的校准设备，给传感器加上标准的输入量而测出其相应的输出量，进行反复测试，得到的输出-输入数据一般用表列出或曲线画出。

## 2. 静态特性主要性能指标

(1) 线性度。线性度又称非线性度或非线性误差，是指实际输入输出特性曲线与拟合直线（理想直线）之间的最大偏差与传感器满量程输出值的百分比，如图 2.1 所示。线性度可用公式 (2.3) 表示：

$$\gamma_L = \pm \frac{\Delta L_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (2.3)$$

式中， $\Delta L_{\max}$  为实际输入输出曲线与拟合直线之间的最大偏差； $Y_{FS}$  为满量程输出值。

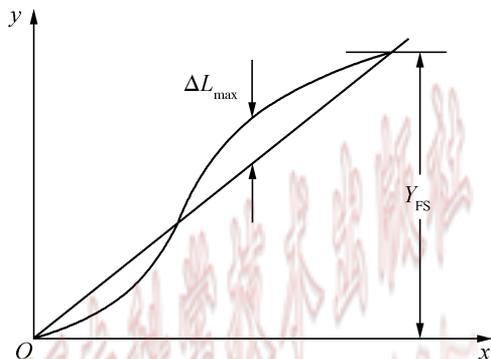


图 2.1 线性度示意图

(2) 迟滞性。迟滞性又称回差或滞后，是指传感器与检测系统在正（输入量增大）、反（输入量减小）行程中输入输出特性曲线之间最大差值与传感器满量程输出值的百分比，如图 2.2 所示。迟滞性可用公式 (2.4) 表示：

$$\gamma_H = \pm \frac{\Delta H_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (2.4)$$

式中， $\Delta H_{\max}$  为输入输出特性曲线正、反行程之间的最大差值。

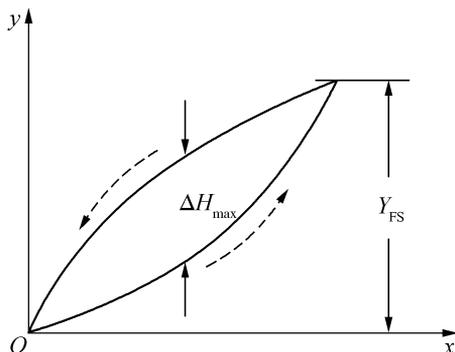


图 2.2 迟滞性示意图

(3) 重复性。重复性是指输入量按同一方向作全量程连续多次测试时所得特性曲线最大不重复误差与传感器满量程输出值的百分比。重复性可用公式 (2.5) 表示:

$$\gamma_R = \pm \frac{\Delta R_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (2.5)$$

式中,  $\Delta R_{\max}$  为输出最大不重复误差。

(4) 灵敏度。灵敏度是指传感器与检测系统对被测量变化的反应能力。当输入量  $x$  有一个变化量时, 引起输出量  $y$  相应的变化量  $\Delta y$ , 则输出变化量与输入变化量之比称为灵敏度。

灵敏度可用公式 (2.6) 表示:

$$S = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{dy}{dx} \quad (2.6)$$

灵敏度的注意点:

- 1) 灵敏度  $S$  是有量纲的。但  $x$  与  $y$  是同类量时,  $S$  无量纲, 其比值称为放大倍数  $K$ 。
- 2) 若系统是由多个环节组成的串联式系统, 每个环节的灵敏度分别为  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$ , 则系统总灵敏度为各个环节灵敏度的乘积, 即  $S = S_1 S_2 S_3$ 。

- 3) 灵敏度越高, 测量精度越高, 但测量范围越窄, 稳定性越差。

(5) 分辨率。分辨率是指传感器能够检测出的被测量的最小变化量, 是有量纲的数。当被测量的变化小于分辨率时, 传感器对输入量的变化无任何反应, 对数字式仪表, 该表的最后一位数值就是它的分辨率; 一般模拟式仪表分辨率为最小刻度分格数值的一半。灵敏度越高, 分辨率越好。

(6) 测量范围与量程。传感器所能测量的最大被测量称为测量上限, 所能测量的最小被测量称为测量下限。用测量上限和测量下限表示的测量区间称为测量范围。测量上限和测量下限的代数差称为量程。如某温度计测量范围为  $-20 \sim 200 \text{ }^\circ\text{C}$ , 其量程为  $220 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

(7) 稳定性。稳定性是指传感器在较长时间内保持其原性能的能力, 反映相同输入量, 其输出量发生变化的程度。

(8) 漂移。漂移是指在外界干扰的情况下, 在一定的时间间隔内, 传感器输出量发生与输入量无关的变化程度, 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的缓慢变化; 温度漂移是指周围温度变化引起的零点或灵敏度的变化。最常见的漂移是温度漂移, 即周围环境温度变化而引起输出量的变化, 主要表现为温度零点漂移和温度灵敏度漂移。

温度漂移通常用传感器工作环境温度偏离标准环境温度 (一般为  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ) 时输出值的变化量与温度的变化量之比 ( $\xi$ ) 来表示, 即

$$\xi = \frac{y_t - y_{20}}{\Delta t} \quad (2.7)$$

式中,  $\Delta t$  为工作环境温度  $t$  与标准环境温度  $t_{20}$  之差, 即  $\Delta t = t - t_{20}$ ;  $y_t$  为传感器在工作环境温度  $t$  时的输出值;  $y_{20}$  为传感器在标准环境温度  $t_{20}$  时的输出值。

- (9) 阈值。阈值是指传感器产生可测输出变化量时的最小被测输入量值。

## 2.1.2 传感器的动态特性

动态特性是指传感器的输入为随时间变化的信号时, 传感器的输出与输入之间的关

系。传感器的动态特性可通过动态数学模型和动态特性指标来描述。

在实际检测中,大量的被测量是随时间变化的动态信号,传感器的输出不但需要精确测量被测量的大小,而且要显示被测量随时间变化的规律。评价一个传感器的优劣,须从静态和动态两方面的特性来衡量。

### 1. 动态数学模型的描述

由于被测量是随时间变化的动态信号,用线性常系数微分方程来描述传感器输出量  $y(t)$  与输入量  $x(t)$  的动态关系:

$$a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \cdots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_m \frac{d^m x}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x}{dt^{m-1}} + \cdots + b_1 \frac{dx}{dt} + b_0 x \quad (2.8)$$

式中,  $a_0, a_1, \dots, a_n; b_0, b_1, \dots, b_m$  是与传感器的结构特性有关的常系数。

对于常见的传感器,其动态模型通常可用零阶、一阶、二阶的常微分方程来描述,分别称为零阶系统、一阶系统、二阶系统。

(1) 零阶系统。当式(2.8)中除了  $a_0, b_0$  外,其他系数均为零时,则  $a_0 y = b_0 x$ , 即  $y(t) = kx(t)$ ,  $k = \frac{b_0}{a_0}$  是传感器静态灵敏度或放大系数。这样的系统为零阶系统。

(2) 一阶系统。当式(2.8)中除了  $a_0, a_1, b_0$  外,其他系数均为零时,则  $a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_0 x$ , 即  $\tau \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = kx(t)$ ; 其中,  $\tau$  为时间常数,  $k$  为静态灵敏度。这样的系统为一阶系统或惯性系统。

例如,不带套管的热电偶测温系统可看作一阶系统。

(3) 二阶系统。二阶系统的微分方程  $a_2 \frac{d^2 y}{dt^2} + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_0 x$  可改写为

$$a_2 \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + 2\xi\omega_n \frac{dy(t)}{dt} + \omega_n^2 y(t) = \omega_n^2 kx(t)$$

式中,  $\xi$  为阻尼比;  $k$  为静态灵敏度;  $\omega_n$  为系统的固有频率。

二阶系统分为两种情况:二阶惯性系统(特征方程的解为两个负实数)和二阶振荡系统(特征方程的解为一对带实部的共轭复数)。

带有套管的热电偶、RLC 振荡电路均可看作二阶系统。

用微分方程作为传感器的数学模型的优点是:求解微分方程容易分清暂态分量和稳态分量。

求解微分方程很麻烦,通常用传递函数来研究传感器的动态特性。

### 2. 动态特性的主要指标

研究传感器的动态特性有时需要从时域对传感器的响应和过渡过程进行分析,在进行时域分析时常用的标准输入信号有阶跃信号和脉冲信号。

动态特性的主要指标有时域单位阶跃响应性能指标和频域频率特性性能指标。

(1) 时域单位阶跃响应性能指标。

1) 二阶传感器。二阶传感器的时域单位阶跃响应在很大程度上取决于阻尼比  $\xi$  和固有频率  $\omega_n$ 。

$\omega_n$  即等幅振荡的频率，由传感器的结构参数决定， $\omega_n$  越高，传感器的响应越快。

图 2.3 所示为衰减振荡的二阶传感器输出的时域单位阶跃响应曲线。此时时域单位阶跃响应的性能指标主要有：峰值时间、最大超调量、上升时间、延迟时间、调节时间、误差带、稳态误差。

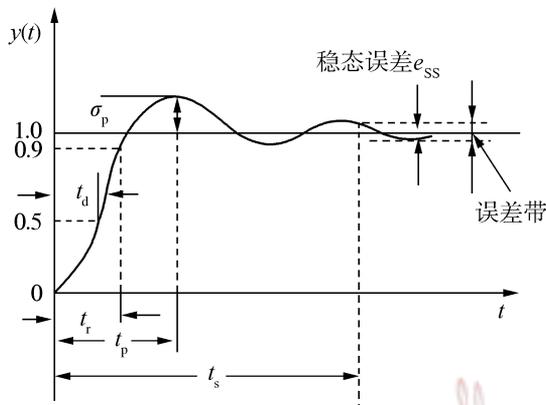


图 2.3 二阶传感器的时域单位阶跃响应曲线

- 峰值时间  $t_p$ ——振荡峰值所对应的时间。
- 最大超调量  $\sigma_p$ ——响应曲线偏离稳态值的最大值。
- 上升时间  $t_r$ ——响应曲线上升到稳态值的 90% 所需的时间。
- 延迟时间  $t_d$ ——响应曲线上升到稳态值的 50% 所需的时间。
- 调节时间  $t_s$ ——响应曲线进入并且不再超出误差带所需要的时间。
- 误差带——通常规定为稳态值的  $\pm 5\%$  或  $\pm 2\%$ 。
- 稳态误差  $e_{ss}$ ——系统响应曲线的稳态值与希望值之差。

2) 一阶传感器。图 2.4 所示为一阶传感器输出的时域单位阶跃响应曲线。此时时域单位阶跃响应的性能指标主要有：时间常数、延迟时间、上升时间。

- 时间常数  $\tau$ ——响应曲线上升到稳态值的 63.2% 所需的时间。
- 延迟时间  $t_d$ ——响应曲线上升到稳态值的 50% 所需的时间。
- 上升时间  $t_r$ ——响应曲线上升到稳态值的 90% 所需的时间。

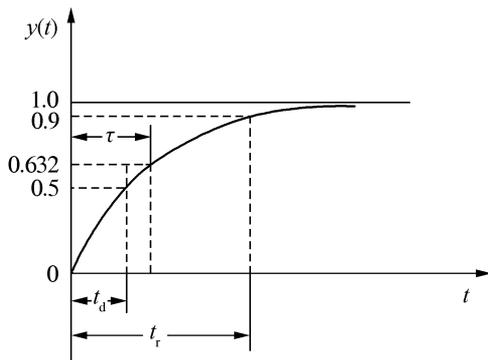


图 2.4 一阶传感器的时域单位阶跃响应曲线

(2) 频域频率特性性能指标。频域频率特性性能指标反映的是传感器接收各种频率不同而幅值相同初相位为 0 的正弦信号时其输出的正弦信号的幅值和相位与频率之间的关系。

与频率响应特性有关的指标：频带、时间常数、固有频率。

1) 频带：传感器增益保持在一定范围内时对应的上、下截止频率之间的频率。

2) 时间常数  $\tau$ ：一阶传感器（如测温传感器等）用  $\tau$  表征其动态性能， $\tau$  越小，频带越宽。

3) 固有频率：固有频率表征二阶传感器（如加速度传感器等）的动态特性。



扫一扫

## 2.2 传感器的选用

由于传感器在原理与结构上千差万别，即使是测量同一物理量，也有多种原理的传感器可供选用。如何合理选用传感器，是应用时首先要解决的问题。一般来说，传感器的选择应根据测量对象与测量环境，综合考虑测量条件与测量目的、传感器的性能指标、传感器的使用条件、数据采集和辅助设备配套情况以及价格、备件和售后服务等多种因素。

### 传感器的选用原则

在现代社会，传感器得到了广泛应用。各类传感器性能技术指标很多，如果要求一个传感器具有全面的性能指标，可能给设计、制造带来困难，在实际应用中也没有必要。因此应根据实际需要，在确保主要指标实现的基础上，放宽对次要指标的要求，以达到较高的性能价格比。

传感器选用总的原则是：在满足检测系统对传感器所有要求的情况下，价格低廉、工作可靠、容易维修。在具体选用传感器时，可综合考虑以下六个方面：灵敏度、响应特性、线性范围、稳定性、精确度、测量方式。

#### 1. 灵敏度

一般来说，传感器灵敏度越高越好。灵敏度越高，意味着传感器所能感知的变化量越小，被测量有一微小变化，传感器就有较大的输出。但是，在确定灵敏度时，要考虑以下两个方面：

(1) 当传感器的线性工作范围一定时，传感器的灵敏度越高，干扰噪声越大，难以保证传感器的输入在线性区域内工作。过高的灵敏度，影响其适用的测量范围，应要求传感器的信噪比越大越好。

(2) 当被测量是一个向量并且是一个单向向量时，就要求传感器单向灵敏度越高越好，而横向灵敏度越小越好；如果被测量是二维或三维的向量，那么还应要求传感器的交叉灵敏度越小越好。

#### 2. 响应特性

传感器的响应特性是指在所测频率范围内，保持不失真的测量条件。实际上传感器的响应总不可避免地有一定延迟，但总希望延迟的时间越短越好。

一般物性型传感器，如光电效应、压电效应等传感器，响应时间短，工作频率宽；而

结构型传感器，如电感、电容、磁电等传感器，由于受到结构特性的影响和机械系统惯性质量的限制，其固有频率低，工作频率范围窄。

在动态测量中，传感器的响应特性对测试结果有直接影响，在选用时，应充分考虑到被测量的变化特点，如稳态、瞬变、随机等。

### 3. 线性范围

在线性范围内，传感器的输出与输入成比例关系，线性范围愈宽，表明传感器的工作量程愈大。为了保证测量的精确度，传感器工作在线性区域内是保证测量精度的基本条件。例如，机械式传感器中的测力弹性元件，其材料的弹性极限是决定测力量程的基本因素，当超出测力元件允许的弹性范围时，将产生非线性误差。

然而，在某些情况下，保证传感器绝对工作在线性区域内也是不容易的，在许可限度内，也可以取其近似线性区域，而且必须考虑被测量的变化范围，令其非线性误差在允许限度以内。例如，变间隙型的电容、电感式传感器，其工作区均选在初始间隙附近。

### 4. 稳定性

传感器的稳定性是指经过长期使用以后，其输出特性不发生变化的性能。为了保证传感器长期稳定地工作，而不需经常地更换或校准。在选择和使用传感器时应注意以下两个问题：

(1) 根据环境条件选择传感器。例如，选择电阻应变式传感器时，应考虑湿度的影响；对变极距型电容式传感器和光电传感器，环境灰尘油剂浸入间隙时，会改变电容器的电介质和光电传感器的感光性质；对于磁电式传感器或霍尔效应元件等，应考虑周围电磁场带来的测量误差；滑线电阻式传感器表面有灰尘时，将会引入噪声。

(2) 要创造或保持良好的使用环境。

### 5. 精确度

传感器的精确度是表示传感器的输出与被测量的对应程度。

传感器处于测试系统的输入端，因此，传感器能否真实地反映被测量，对整个测试系统具有直接的影响。

在某些情况下，要求传感器的精确度愈高愈好。例如，对现代超精密切削机床，测量其运动部件的定位精度，主轴的回转运动误差、振动及热形变等，往往要求它们的测量精确度在 0.001~0.1 mm 范围内。

然而，传感器的精确度也并非越高越好，还应考虑到经济性。传感器精确度越高，价格就越昂贵。

因此，应从实际出发，尤其应从测试目的出发来选择。首先应了解测试目的，判定是定性分析还是定量分析。如果属于定性试验研究，只需获得相对比较值即可，无须要求绝对量值；如果是定量分析，就必须获得精确值，因此要求传感器有足够高的精确度。

在实际中，需要同时兼顾测量目的和经济性。对于定性分析的试验研究，应要求传感器的重复精度高，而不要求测试的绝对量值准确；对于定量分析，则必须获得精确量值。

### 6. 测量方式

传感器在实际条件下的工作方式，也是选择传感器时应考虑的重要因素。例如，接触与非接触测量、破坏性与非破坏性测量、在线与非在线测量等。

工作方式不同，对传感器的要求也不同。在机械系统运动部件的测试（如回转轴的回

转误差、振动、扭力矩等)中,往往需要非接触测试。因为对部件的接触式测试不但会造成对被测系统的影响,而且还存在诸如测量头的磨损、接触状态的变动等问题。而采用电容式、涡电流式等非接触式传感器,将会更加方便。

在线测试是与实际情况更接近的测试方式。特别是自动化过程的控制与检测系统,必须在现场实时条件下进行检测。实现在线检测是比较困难的,对传感器及测试系统都有一定的特殊要求。

在加工过程中,若要实现表面粗糙度的在线检测,光切法、干涉法、触针式轮廓检测法等都不能运用,取而代之的是激光检测法。

在机械系统中,对运动部件的被测参数,往往采用非接触测量方式。例如,回转轴的误差、振动、扭矩等情况,采用电容式、涡电流式、光电式等非接触式传感器很方便,若选用电阻应变片,则需配以遥测应变仪。

生产过程监测或产品质量在线检测等,宜采用涡流探伤、超声波探伤、核辐射探伤以及声发射检测等,应尽可能选用非破坏性检验,以直接获得经济效益。研制新型的在线检测传感器,也是当前测试技术发展的一个重要方面。

### 知识拓展

以设计一款新空调(图 2.5)作为案例,详解传感器的选用。



扫一扫

图 2.5 传感器在新空调中的应用



扫一扫

### 思考与练习

1. 传感器的静态特性指标有哪些?
2. 传感器的选用原则有哪些?
3. 观察生活中哪些地方用到传感器。



传感器与检测技术

## 模块2

# 传感器原理与应用

河南科学技术出版社