



国家出版基金项目  
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION



国家出版基金资助项目  
“十三五”国家重点图书出版规划项目  
湖北省学术著作出版专项资金资助项目  
智能制造与机器人理论及技术研究丛书  
总主编 丁汉 孙容磊

# 制造过程的 智能传感器技术

范大鹏◎著



ZHIZAO GUOCHENG DE  
ZHINENG CHUANGANQI JISHU



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

国家出版基金资助项目  
“十三五”国家重点图书出版规划项目  
智能制造与机器人理论及技术研究丛书  
总主编 丁 汉 孙容磊

# 制造过程的智能传感器技术

范大鹏 著

华中科技大学出版社  
中国·武汉

## 内 容 简 介

本书以制造过程的信息化、智能化应用为背景,以实现装备、刀具等关键制造设备和加工、装配、管理等关键制造环节的定量化检测为目标,围绕装备数字化控制、刀具及切削状态监测、加工与装配质量检测、车间级物流管理等关键制造环节的传感与检测需求,对制造过程中各类新型传感器的工作原理及应用方法进行系统的介绍。

本书编写的主要目的是使读者能够较全面地掌握现代智能制造系统中常用传感器的类型、原理、用途和应用特点,从总体上把握制造过程中所用传感器的构成体系,扩展传感器选型设计的知识面。

本书可作为机械制造及其自动化相关专业高年级本科生、研究生的参考书,也可供从事智能制造装备与系统研发的科研开发人员使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

制造过程的智能传感器技术/范大鹏著. —武汉:华中科技大学出版社,2020.12  
(智能制造与机器人理论及技术研究丛书)  
ISBN 978-7-5680-6213-8

I. ①制… II. ①范… III. ①智能传感器 IV. ①TP212.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2020)第 245557 号

## 制造过程的智能传感器技术

Zhizao Guocheng de Zhineng Chuangganqi Jishu

范大鹏 著

策划编辑:俞道凯

责任编辑:戢凤平

责任校对:刘 飞

封面设计:原色设计

责任监印:周治超

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

电话:(027)81321913

武汉市东湖新技术开发区华工科技园

邮编:430223

录 排:武汉市洪山区佳年华文印部

印 刷:湖北新华印务有限公司

开 本:710mm×1000mm 1/16

印 张:16.5

字 数:283千字

版 次:2020年12月第1版第1次印刷

定 价:98.00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



## 总序

近年来,“智能制造+共融机器人”特别引人瞩目,呈现出“万物感知、万物互联、万物智能”的时代特征。智能制造与共融机器人产业将成为优先发展的战略性新兴产业,也是“中国制造 2049”创新驱动发展的巨大引擎。值得注意的是,智能汽车与无人机、水下机器人等一起所形成的规模宏大的共融机器人产业,将是今后 30 年各国争夺的战略高地,并将对世界经济发展、社会进步、战争形态产生重大影响。与之相关的制造科学和机器人学属于综合性学科,是联系和涵盖物质科学、信息科学、生命科学的大科学。与其他工程科学、技术科学一样,制造科学、机器人学也是将认识世界和改造世界融合为一体的大科学。20 世纪中叶,Cybernetics 与 *Engineering Cybernetics* 等专著的发表开创了工程科学的新纪元。21 世纪以来,制造科学、机器人学和人工智能等领域异常活跃,影响深远,是“智能制造+共融机器人”原始创新的源泉。

华中科技大学出版社紧跟时代潮流,瞄准智能制造和机器人的科技前沿,组织策划了本套“智能制造与机器人理论及技术研究丛书”。丛书涉及的内容十分广泛。热烈欢迎各位专家从不同的视野、不同的角度、不同的领域著书立说。选题要点包括但不限于:智能制造的各个环节,如研究、开发、设计、加工、成形和装配等;智能制造的各个学科领域,如智能控制、智能感知、智能装备、智能系统、智能物流和智能自动化等;各类机器人,如工业机器人、服务机器人、极端机器人、海陆空机器人、仿生/类生/拟人机器人、软体机器人和微纳机器人等的发展和应用;与机器人学有关的机构学与力学、机动性与操作性、运动规划与运动控制、智能驾驶与智能网联、人机交互与人机共融等;人工智能、认知科学、大数据、云制造、物联网和互联网等。

本套丛书将成为有关领域专家、学者学术交流与合作的平台,青年科学家茁壮成长的园地,科学家展示研究成果的国际舞台。华中科技大学出版社将与



施普林格(Springer)出版集团等国际学术出版机构一起,针对本套丛书进行全球联合出版发行,同时该社也与有关国际学术会议、国际学术期刊建立了密切联系,为提升本套丛书的学术水平和实用价值,扩大丛书的国际影响营造了良好的学术生态环境。

近年来,高校师生、各领域专家和科技工作者等各界人士对智能制造和机器人的热情与日俱增。这套丛书将成为有关领域专家学者、高校师生与工程技术人员之间的纽带,增强作者与读者之间的联系,加快发现知识、传授知识、增长知识和更新知识的进程,为经济建设、社会进步、科技发展做出贡献。

最后,衷心感谢为本套丛书做出贡献的作者和读者,感谢他们为创新驱动发展增添正能量、聚集正能量、发挥正能量。感谢华中科技大学出版社相关人员在组织、策划过程中的辛勤劳动。

华中科技大学教授  
中国科学院院士

熊有伦

2017年9月



# 前言

传感器被誉为实现智能制造的基石。在现代制造过程中,设备运行状态和产品加工质量很大程度上取决于所用传感器与测量仪器的水平。特别是对实现制造装备和制造过程的智能化而言,其需要配置传感器以进行制造装备运行状态、零件尺寸、形状信息的反馈,以保证制造过程的稳定性,提高制造质量和制造效率。智能传感器技术已成为制造装备和制造系统信息化、智能化的核心技术之一。

围绕典型机械产品的制造过程,本书第1章主要介绍智能传感器在现代智能制造系统中的应用特点和分类方法,使读者对本书编写思路及内容安排有宏观的了解。第2章主要根据制造装备的共性运动控制需求,介绍光栅、磁栅、容栅等常用直线和角位移传感器的原理构造与使用方法。由于切削力取决于刀具、切削用量、材料等多种因素的综合作用,对加工质量、加工效率、加工过程安全性有直接的影响,因此在第3章中系统介绍了电阻应变式、压电式等切削力传感器的原理和应用方法。第4章以实现切削过程中刀具状态监测为目的,主要对刀具状态监测所用的力、温度、振动、刀具磨损破损传感器的原理和使用方法进行说明。第5章以保证制造过程中零部件的表面加工质量为目标,详细论述了加工装配过程中常用的电感式位移传感器和激光位移传感器的原理,以及表面质量的传感与检测方法。第6章主要介绍零部件表层残余应力、加工硬化、表层微观组织及其缺陷的检测方法。鉴于装配对最终产品的精度和力学性能有直接的影响,而传统的装配质量主要以几何精度的检测为主,第7章主要介绍装配过程中力学性能的传感与典型测量方法。第8章则以实现车间级物



流智能化为目标,在对车间物流系统架构和物流设备需求进行分析的基础上,对物流设备中常用的激光导引、光纤、光幕、颜色等传感器的原理进行说明,并对车间无线传感器网络和车间物联网信息处理系统的基本原理进行简要介绍。通过这些内容,读者能够较全面地学习了解现代智能制造系统中常用传感器的类型、原理、用途和应用特点。

本书在编写时力求内容的“新”和“实”。“新”指的是尽可能体现传感器的最新技术成果及应用现状。“实”是指紧贴智能制造装备及制造过程的实际应用,尽可能体现对各种传感器进行选型设计的实用性。

由于作者水平有限,书中难免有不妥之处,敬请读者批评指正。

作者

2020年8月

华中科技大学出版社



# 目录

## 第 1 章 概述 /1

- 1.1 智能制造与智能传感器 /2
  - 1.1.1 智能制造系统的结构 /2
  - 1.1.2 智能传感器的作用 /2
- 1.2 智能传感器概述 /3
  - 1.2.1 智能传感器的概念 /3
  - 1.2.2 智能传感器的功能与特点 /5
  - 1.2.3 智能传感器的分类 /6
- 1.3 智能传感器的发展 /9
  - 1.3.1 微型化 /10
  - 1.3.2 多传感器数据融合 /10
  - 1.3.3 无线传感器网络 /10
- 1.4 本书内容安排 /11

## 第 2 章 制造装备中的位移传感器 /13

- 2.1 光栅传感器 /13
  - 2.1.1 光栅的基础知识 /14
  - 2.1.2 光栅传感器的结构和工作原理 /16
  - 2.1.3 光栅传感器信号检测与处理 /19
  - 2.1.4 典型直线光栅传感器的结构 /21
  - 2.1.5 角位移传感器 /27
- 2.2 磁栅传感器 /31



- 2.2.1 磁栅传感器的结构与工作原理 /31
- 2.2.2 磁栅传感器的信号处理方式 /36
- 2.2.3 磁栅传感器的应用 /38
- 2.3 容栅传感器 /39
  - 2.3.1 容栅传感器的结构及工作原理 /39
  - 2.3.2 容栅传感器的输出信号 /41
  - 2.3.3 容栅传感器的特点 /42
- 第3章 切削力传感器 /44**
  - 3.1 切削力分析 /44
  - 3.2 电阻应变式切削力传感器 /46
    - 3.2.1 电阻应变式传感器原理 /46
    - 3.2.2 应变式测力仪 /52
  - 3.3 压电式切削力传感器 /55
    - 3.3.1 石英晶体压电转换机理 /55
    - 3.3.2 测量电路 /58
    - 3.3.3 压电式测力传感器 /59
    - 3.3.4 切削力传感器的应用 /64
- 第4章 刀具状态监测传感器 /74**
  - 4.1 切削刀具的状态变化特性 /74
    - 4.1.1 刀具磨损 /74
    - 4.1.2 刀具磨损类型 /75
    - 4.1.3 刀具磨损过程 /76
  - 4.2 刀具状态监测的目的和基本方法 /77
    - 4.2.1 刀具状态监测目的 /77
    - 4.2.2 刀具状态监测基本方法 /78
  - 4.3 刀具状态监测的实现 /81
    - 4.3.1 切削力感知式刀具 /83
    - 4.3.2 振动感知式刀具 /87
    - 4.3.3 温度感知式刀具 /90
    - 4.3.4 声发射感知式刀具 /91
    - 4.3.5 智能刀具概述 /96

- 4.4 刀具编码传感器 /102
  - 4.4.1 刀具类型及编码方式 /103
  - 4.4.2 典型刀具编码传感器 /104
  - 4.4.3 刀具管理系统的基本功能 /107
- 第5章 加工表面质量检测传感器 /109**
  - 5.1 高精度位移传感器 /109
    - 5.1.1 电感式位移传感器 /110
    - 5.1.2 激光位移传感器 /120
    - 5.1.3 电容式位移传感器 /126
  - 5.2 零件三维形状及表面轮廓测量 /130
    - 5.2.1 概述 /130
    - 5.2.2 测量仪器的构成原理 /134
    - 5.2.3 接触式形状测量传感器 /137
    - 5.2.4 非接触式形状测量传感器 /142
    - 5.2.5 大尺寸三维形貌测量方法 /154
- 第6章 加工表层质量检测传感器 /159**
  - 6.1 表层残余应力及其检测 /159
    - 6.1.1 表层残余应力产生的原因及影响 /160
    - 6.1.2 残余应力的测量方法 /161
  - 6.2 加工硬化及其检测 /162
    - 6.2.1 表面加工硬化产生的原因 /163
    - 6.2.2 表面加工硬化评价指标 /163
    - 6.2.3 硬度的测量方法 /164
  - 6.3 微观组织特征及其检测 /166
    - 6.3.1 微观组织特征 /167
    - 6.3.2 已加工表层的微观检测方法 /167
  - 6.4 磁探伤检测 /168
    - 6.4.1 涡流检测方法 /168
    - 6.4.2 漏磁检测方法 /172
    - 6.4.3 磁弹法 /172



|       |              |      |
|-------|--------------|------|
| 第 7 章 | 装配力学性能检测传感器  | /175 |
| 7.1   | 装配过程力测量原理    | /176 |
| 7.1.1 | 直接测力         | /176 |
| 7.1.2 | 部分测力         | /177 |
| 7.1.3 | 间接测力         | /177 |
| 7.2   | 典型装配力的测量     | /178 |
| 7.2.1 | 螺栓预紧力测量      | /178 |
| 7.2.2 | 压装力测量        | /179 |
| 第 8 章 | 车间智能物流传感器    | /180 |
| 8.1   | 车间物流概述       | /180 |
| 8.1.1 | 制造车间物流系统架构   | /180 |
| 8.1.2 | 自动化物流设备      | /182 |
| 8.1.3 | 智能物流常用传感器    | /185 |
| 8.2   | 激光测量传感器      | /186 |
| 8.2.1 | 激光传感原理       | /186 |
| 8.2.2 | 激光雷达         | /194 |
| 8.2.3 | AGV 导引传感器    | /201 |
| 8.3   | 车间物流常用传感器    | /208 |
| 8.3.1 | 光电传感器        | /208 |
| 8.3.2 | 光纤传感器        | /213 |
| 8.3.3 | 光幕传感器        | /218 |
| 8.3.4 | 颜色传感器        | /221 |
| 8.3.5 | RFID 传感器     | /226 |
| 8.4   | 车间无线传感器网络    | /229 |
| 8.4.1 | 无线传感器网络概述    | /229 |
| 8.4.2 | 车间无线传感器网络的构成 | /231 |
| 8.4.3 | 无线传感器节点数据处理  | /234 |
| 8.5   | 车间物联网传感器信息处理 | /234 |
| 8.5.1 | 物联网的概念       | /234 |
| 8.5.2 | 车间物联网数据采集    | /237 |
| 参考文献  |              | /242 |



## 第 1 章 概述

制造业是国民经济的主体,随着我国经济的稳步发展,制造业也得到了持续快速发展,产业体系独立完整、种类齐全,提升了我国的工业化和现代化水平。近年来,德国政府提出了“工业 4.0”高科技战略计划,拉开了新一轮工业革命的序幕,越来越多国家的政府和企业都意识到产业变革所带来的机遇。在这一前提下,我国政府也提出了与之对应的《中国制造 2025》制造强国战略行动纲领,以进一步加快我国制造业产业升级步伐。无论是“工业 4.0”还是“中国制造 2025”,其核心都是通过提升制造业的工业化、信息化水平,促进工业化和信息化融合,进而实现智能制造的目标。

智能制造是面向产品全生命周期,实现泛在感知条件下的信息化制造,代表了目前制造业的发展趋势。根据《国家智能制造标准体系建设指南》,智能制造关键技术包括智能装备、智能工厂、智能服务、工业软件和大数据以及工业互联网五大类,其中智能工厂的目标是实现从产品设计到销售,从设备控制到企业资源管理等所有环节信息的传感、传递、变换、存储、处理等的无缝集成和智能化应用,是现代企业实现智能制造的最高形式。

在制造工厂中,主要的生产活动都围绕产品进行,包括产品设计、生产、管理和物流等过程。在这些过程中,大量的数据及信息采集、传输都更加依赖于能感测制造设备状态和产品质量特性的传感器。可以说,传感器是实现智能制造的基石,特别是能与大数据和工厂自动化相融合,且能通过互联网或“云”实现更大范围信息交互的智能传感器,已成为发展智能制造系统的关键。因此,智能制造的快速发展加大了对传感器特别是智能传感器的需求,也推动着传感器技术迅速发展。



## 1.1 智能制造与智能传感器

### 1.1.1 智能制造系统的结构

制造是从概念到实物的过程,通过制造活动可把原材料或毛坯加工成各种用途的产品。产品的制造过程主要包括需求分析、产品设计、工艺设计、生产准备、生产制造、加工装配、销售和服务等产品全生命周期的活动。智能制造是基于新一代信息技术,贯穿设计、生产、管理和服务等制造活动的各个环节,具有信息深度自感知、智慧优化决策、精准控制执行等功能的先进制造过程、系统与模式的总称,其基本特征是生产装备和生产过程的数字化、网络化、信息化、智能化。其根本意义在于运用人工智能技术促进机械加工工艺的优化、加工质量的升级、加工装备的安全高效、车间调度和管理的优化,使制造质量和效率得到显著提高。

智能制造系统的信息层级结构主要包括设备层、感知与控制层、数据采集与监控层、制造运行管理层、规划管理层。设备层:对应实际生产制造过程中的生产制造设备,包括高端数控机床、工业机器人、精密制造装备、智能测控装置、成套自动化生产线、重大制造装备、3D 打印设备等。感知与控制层:对应生产过程的传感识别和执行活动,包括各种传感器、变送器、执行器等。数据采集与监控层:对应生产流程的监视和控制活动,包括各种数据采集与控制系统,可以对现场运行设备进行监视和控制,实现数据采集、设备控制、测量、参数调节以及各类信号报警等功能。制造运行管理层:制定生产期望产品的工作流 / 配方控制活动,包括维护记录和优化生产过程、生产调度、详细排产、可靠性保障等内容。规划管理层:管理工厂/车间所需的业务相关的活动,包括工厂/车间生产任务计划、资源使用、运输、物流、库存、运作管理等内容。

### 1.1.2 智能传感器的作用

传感器(transducer/sensor)是一种检测装置,是实现自动检测和自动控制的首要环节。传感器能感受到被测物理量的变化信息,并将其转换成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。伴随着智能制造及工业物联网的变革,传感器作为感知信息的自主输入装置,对智能制造、智能物流的应用起着技术支撑的作用。传感器不仅仅是将简单的物理信号转换为电信号的检测器,更是一种数据交换器,并能连接到更

广范围的智能传感器网络中,为大数据挖掘及应用等提供丰富的现场数据支撑,提升制造业的生产和运营效率。智能传感器在智能制造中的作用主要表现在以下方面。

(1) 制造设备运行参数的监测。自动化设备运行过程中,要应用各类传感器、测量仪器对生产设备运行的状态参数、被加工零件的尺寸精度参数等进行实时监视、测量与控制,以保证设备的正常运行。

(2) 制造系统运行状态的监测。在全自动装配和生产线上,要利用不同的位置、速度、机器视觉等传感器进行识别、定位、抓取零件,以保证产品位置和姿态的调整精度,或进行产品外观颜色、尺寸、缺陷的检测和自动识别与判断。

(3) 车间/企业级物流信息管理。通过传感器、无线传感器网络等进行信息的收集和分析,能对生产物流进行动态的管理和优化,实现物流系统运行的准确性,提高生产车间/企业物流的运作效率和资源调度水平。智能传感器已成为未来智慧工厂物流控制系统的基础元件。

总之,随着工厂自动化、网络化、智能化的发展,智能传感器将是企业、设备、产品、用户之间互联互通,实现数据信息的实时识别、及时处理和准确交换的重要基础。

## 1.2 智能传感器概述

智能传感器概念最早由美国国家航空航天局在研发宇宙飞船过程中提出来,并于1979年开始逐渐形成产品。与传统的传感器相比,它克服了传统传感器只获取信息而信息处理能力不足的缺点。智能传感器涉及传感器、微机械与微电子、计算机、信息处理、人工智能等多个学科的技术。

### 1.2.1 智能传感器的概念

#### 1. 传感器的组成

传感器是指能够感受规定的被测量并按照一定的规律将其转换成可用输出信号的器件或装置,通常由敏感单元、传感单元、测量电路组成,如图1-1所示。敏感单元(sensing element)是指传感器中能直接感受或响应被测量的部分;传感单元(transduction element)是指传感器中能将敏感单元的输出转换为适于传输或测量的电信号的部分;测量电路的作用是将传感单元输出的电信号进行进一步的转换和处理,以实现存储、显示、记录、控制等功能。测量电路的种类要视传感元件的类型而定,常用的电路有电桥、放大器、振荡器和阻抗变换

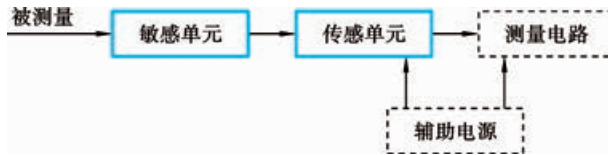


图 1-1 传感器的组成

器等。随着传感器集成技术的发展,传感器的测量电路会安装在传感器的壳体内部或者与敏感元件集成在同一个芯片之上。

实际上很多传感器都难以严格区分敏感单元和传感单元两部分,它们用于将感受的被测量直接转换为电信号。例如半导体气体传感器、测量温度的热电偶等,它们将敏感单元和传感单元合二为一,具有将被测量转换为电阻、电容等电量的功能。

## 2. 智能传感器的组成

智能传感器(intelligent sensor)是一种带微处理器的兼有信息检测、信息处理、信息记忆、逻辑思维和判断功能的传感器。相对于传统传感器,智能传感器集感知、信息处理、通信于一体,可实现自校准、自补偿、自诊断等处理功能。

从具体结构上来讲,智能传感器由传感器、微处理器和相关电路构成。图 1-2 所示为典型智能传感器的构成框图。传感器负责信号的获取,微处理器根据设定,对输入信号进行分析处理,得到特定的输出结果。智能传感器通过外

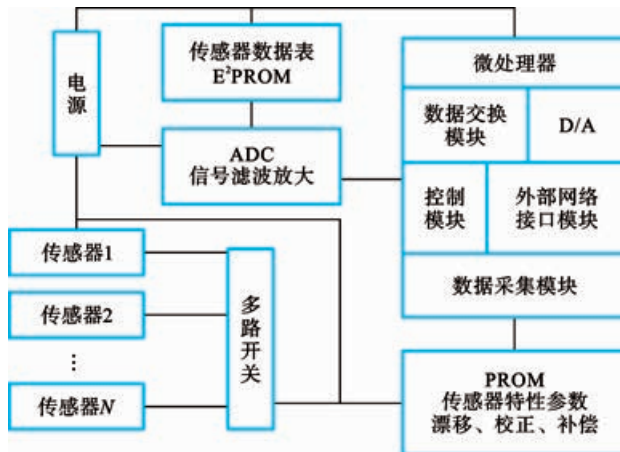


图 1-2 典型智能传感器的构成框图

注: E<sup>2</sup> PROM—电可擦可编程只读存储器; ADC—模数转换器; D/A—数/模; PROM—可编程只读存储器。

部网络接口模块与外部系统进行数据交换。

## 1.2.2 智能传感器的功能与特点

### 1. 智能传感器的功能

智能传感器在传统传感器的基础上增加了丰富的信息处理功能。在智能传感器系统中,微处理器能够按照给定的程序对传感器实现软件控制,与传统传感器相比,智能传感器一般具有如下功能。

(1) 数字输出功能。智能传感器内部集成了模数转换电路,能够直接输出数字信号,可缓解控制器的信号采集处理压力。

(2) 数据处理功能。智能传感器充分利用微处理器的计算和存储能力,不仅能对被测参数进行直接测量,还可对被测参数进行特征分析和变换,获取被测参数变化的更多特征。

(3) 信息存储功能。智能传感器内含一定的存储空间,除了能够存储信号处理、自补偿、自诊断等相关程序外,还能够进行历史数据、校正数据、测量参数、状态参数等数据的存储。

(4) 自校准补偿功能。通过软件计算对传统传感器的非线性、温度漂移、时间漂移以及环境影响因素引起的信号失真进行自动校准补偿,达到软件补偿硬件的目的,实现自动调零、自动平衡、自动补偿等功能,提高传感器应用的灵活性。

(5) 自动诊断功能。智能传感器通过其故障诊断软件和自检测软件,自动对传感器和系统工作状态进行定期和不定期的检测、测试,及时发现故障,诊断发生故障的原因、位置,并给予相应的提示。

(6) 自学习与自适应功能。智能传感器可以通过编辑算法使传感器具有学习功能,利用近似公式和迭代算法认知新的被测量值,即有再学习能力。此外,还可以根据一定的行为准则自适应地重置参数。例如,自选量程、自选通道、自动触发、自动滤波切换和自动温度补偿等。

(7) 多参数测量功能。智能传感器设有多种模块化的硬件和软件,根据不同的应用需求,可选择其模块的组合状态,实现多传感单元、多参数的测量。

(8) 双向通信功能。智能传感器采用双向通信接口,既可向外部设备发送测量、状态信息,又能接收和处理外部设备发出的指令。

### 2. 智能传感器的特点

与传统传感器相比,智能传感器的功能更加丰富,主要具有以下特点。

(1) 测量精度高。智能传感器有多项功能来保证它的精度,如通过自动校



零去除零点,与标准参考基准实时对比,进行自动标定与非线性校正、异常值处理等。

(2) 可靠性与稳定性高。智能传感器能自动补偿测量时环境因素带来的干扰影响,如温度变化导致的零点和灵敏度漂移;被测参数变化后能自动切换量程;能实时进行自检,检查各部分工作是否正常,并可诊断发生故障的部件。

(3) 信噪比和分辨率高。智能传感器具有信息处理、信息存储和记忆功能,通过信息处理可以去除测量数据中的噪声,将有用信号提取出来;通过信息处理中的数据融合可以消除多参数测量状态下交叉灵敏度的影响,保证在多参数状态下对特定参数测量时具有高的分辨率。

(4) 自适应性强。智能传感器具有判断分析与处理功能,能根据系统工作情况决策各部分的供电,使系统工作在最优功耗状态,也可根据情况优化与上位机的数据传送速率等。

(5) 性能价格比高。智能传感器主要是通过软件而不是硬件实现传感测量功能,随着集成电路工艺的进步,微处理器芯片成本也越来越低,因此智能传感器具有较高的性能价格比。

(6) 网络化。智能传感器以嵌入式微处理器为核心,集成了传感单元、信号处理单元和网络接口单元,能够将各种现场数据直接在有线/无线网络上传输、发布与共享。

### 1.2.3 智能传感器的分类

智能传感器可从集成化程度、信号处理硬件、应用领域等方面来分类,如图 1-3 所示。

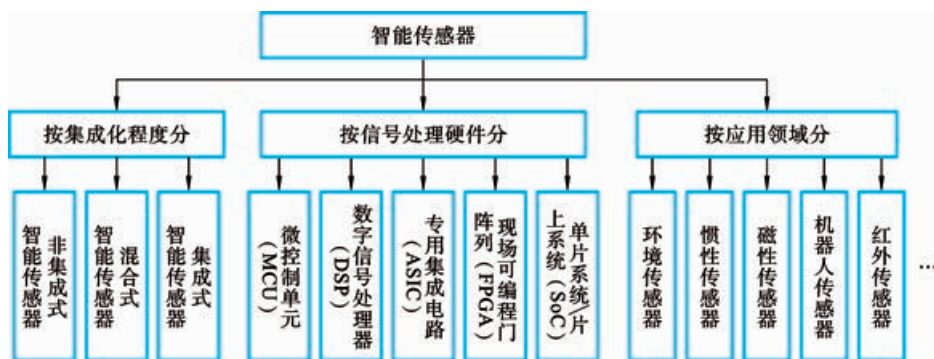


图 1-3 智能传感器的分类