

# 智能传感器综述

华中科技大学人工智能

**摘要:** 智能传感器作为新一代信息技术与感知技术融合的核心产物，正推动各领域向智能化与自动化方向发展。本文系统回顾了传感器从机械式、电气化到固态化、集成化、智能化的发展历程，阐述了智能传感器的基本结构原理与关键技术特征，包括自校准、自补偿、自诊断、多参数融合及网络通信等。随后从器件、系统与应用三个层面综述了智能传感器的最新研究进展与典型应用案例，重点分析了其在生物医学、航空航天与工业制造中的落地实践与技术优势，如实时监测、分布式控制与预测性维护等。最后，本文总结了智能传感器未来的发展趋势，指出高集成度、低功耗化、能量自给、网络化与人工智能融合将成为核心方向。综上所述，智能传感器正逐步由信号采集单元演变为具备感知、处理与决策能力的智能节点，其在智慧医疗、智能制造、智慧交通及国防等领域具有广阔的应用前景。

**关键词:** 智能传感器；物联网；未来发展趋势

## 1 引言

### (1) 传感器的概念

传感器是一种检测装置，能感受到被测量的信息（通常是物理量、化学量或生物量），并能将感受到的信息，按一定规律变换成为电信号（或其他所需形式的输出信号），以满足信息的传输、处理、存储、显示、记录和控制等要求。

简单来说，传感器就是机器的“感官”，它充当了连接物理世界和电子系统的桥梁。

一个传感器通常包含三个基本部分：

1. 敏感元件：直接感受被测量，并输出与被测量有确定关系的其他量。
2. 转换元件：将敏感元件的输出转换为电信号。
3. 信号调理电路：对转换元件输出的电信号进行放大、滤波、调制等，以便于后续处理。

举例：

- 手机中的加速度计和陀螺仪是传感器，它们感知手机的移动和方向。
- 智能家居中的温湿度传感器，感知环境温度和湿度。
- 汽车里的氧气传感器，监测尾气中的氧含量，以优化燃油喷射。

### (2) 传感器的历史

传感器的发展史与人类对自然界的认知和工业革命的进程紧密相连，大致可以分为以下几个阶段：

第一阶段：早期萌芽（17世纪 - 19世纪中期）—— 基于物理原理的机械式传感器

这个阶段的“传感器”更多是物理原理的直观应用，结构简单，多为机械式，没有电信号输出。

- 1592年：伽利略发明了温度计的雏形，利用空气热胀冷缩的原理。
- 1643年：托里拆利发明了水银气压计，用于测量大气压。
- 19世纪早期：塞贝克发现了热电效应，为后来的热电偶温度传感器奠定了理论基础。

- 1851 年：西门子发明了水银式流速计，被认为是第一个电输出传感器。

特点：精度低，响应慢，主要用于科学观测，无法实现自动控制。

## 第二阶段：诞生与初步发展（19 世纪后期 - 20 世纪中期）—— 电气化与基础传感器诞生

第二次工业革命（电气革命）是传感器发展的关键催化剂。人们开始有意识地将物理量转换为电信号。

- 1883 年：瑞士物理学家发明了铂电阻温度计，实现了高精度的温度测量。
- 1886 年：C. F. Meyers 首次提出了光敏电阻的概念。
- 20 世纪初期：热电偶被广泛应用于工业温度测量。
- 20 世纪 40 年代：应变片被发明。它利用金属丝在受力变形时电阻变化的特性，可以测量压力、重量、加速度等，是传感器发展史上的一个里程碑，至今仍在广泛使用。
- 1948 年：威廉·肖克利等人发明了晶体管。这虽然不是传感器本身，但为传感器的小型化、智能化和低成本化提供了最核心的电子基础。

特点：传感器开始以电信号形式输出，实现了初步的自动监测，但体积较大，功能单一。

## 第三阶段：固态化与集成化（20 世纪 50 年代 - 80 年代）—— 半导体技术的推动

晶体管的发明催生了半导体技术，传感器进入了“固态电子”时代。利用半导体材料（如硅）的压阻、光电、热敏等效应的传感器被大量开发出来。

- 1954 年：C. S. Smith 发现了硅和锗的压阻效应，为固态压力传感器和加速度计打开了大门。
- 1962 年：第一个集成电路（IC）商业化。这为将传感器与电路集成在一起（MEMS 的前身）提供了可能。
- 1970 年：第一个 MEMS（微机电系统）设备——硅谐振器诞生。MEMS 技术使得在微米尺度上制造机械结构和电子电路成为现实。
- 1970 年代：基于 MOSFET 技术的离子敏场效应晶体管（ISFET）被发明，开创了生物化学传感器的新领域。
- 1980 年代：数字传感器开始出现，可以直接输出数字信号，抗干扰能力更强，便于与计算机连接。AD590（模拟器件公司）等集成温度传感器成为经典。

特点：传感器体积显著缩小，成本降低，可靠性提高，开始出现集成化和智能化的趋势。

## 第四阶段：微型化、智能化与网络化（20 世纪 90 年代 - 至今）—— MEMS 与物联网时代

这是传感器技术爆炸式发展的时期，其核心驱动力是 MEMS 技术的成熟和物联网（IoT）概念的兴起。

- 1990 年代以后：MEMS 技术飞速发展，催生了各种微型传感器，如 MEMS 加速度计、MEMS 陀螺仪、MEMS 麦克风、MEMS 压力传感器等。这些传感器体积小、功耗低、性能高、可大批量低成本生产。
- 2007 年：苹果公司发布 iPhone，大规模采用了 MEMS 加速度计和陀螺仪，极大地推动了消费电子领域对传感器的需求。
- 21 世纪：智能传感器成为主流。它们内置微处理器，具有自校准、自补偿、信息处理和数据通信等功能。
- 物联网时代：传感器作为物联网的“神经末梢”，被嵌入到世界的各个角落（城市、家庭、工厂、农田、穿戴设备），通过无线网络将海量数据传输到云端，构成了智慧地球的感知基础。CMOS 图像传感器的普及也让智能手机取代了传统相机。

特点：微型化、智能化、低功耗、无线化、网络化、成本极低、应用无处不在。

## 2 智能传感器的结构原理

智能传感器具有以下特点。

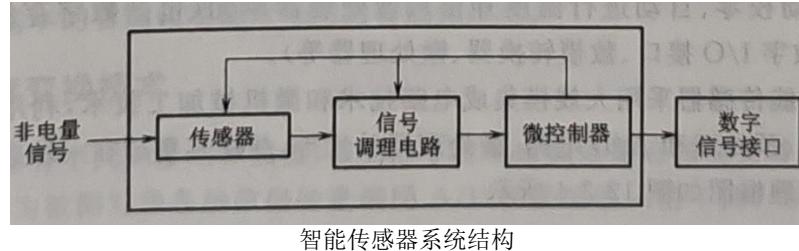
1. 精度高。由于智能传感器采用自动调零、自动补偿、自动校准等多项新技术，因此其测量精度及分辨力得到大幅提高。
2. 多功能，能进行多参数、多功能测量。例如，瑞士盛思锐(Sensirion)公司研制的 SHT11/15 型高精度、自校准、多功能智能传感器，能同时测量相对湿度、温度和露点等参数，兼有数字温度计、湿度计和露点计三种仪表的功能，可广泛用于工农业生产、环境监测、医疗仪器、通风及空调设备等领域。
3. 自适应能力强。美国美高森美(Microsemi)公司相继推出能实现人眼仿真的集成化可见光亮度传感器，可代替人眼感受环境的亮度变化，自动控制 LCD 显示器背光源的亮度，以充分满足用户在不同时间、不同环境中对显示器亮度的需要。
4. 具有高可靠性与高稳定性。
5. 超小型化、微型化、微功耗。

智能传感器 = 传统传感器 + 微处理器(大脑) + 软件算法

核心结构原理：

1. 感知：通过传感单元（如 MEMS 芯片）捕获物理世界的信息，并将其转换为微弱的电信号。
2. 数字化：将模拟电信号转换为数字信号，以便微处理器处理。
3. 智能处理（核心）：微处理器（MCU）运行软件算法，对数字信号进行：
  - 补偿与校正：自动修正温度漂移、非线性等误差，提高精度。
  - 数字滤波：去除信号噪声。
  - 逻辑判断：实现自诊断、阈值报警等功能。
4. 数字通信：通过标准接口（如 I2C、Wi-Fi）将处理后的可靠数据输出给外部系统。

本质：它将一个简单的感测元件，升级为一个具备信息处理、分析和通信能力的微型智能系统。



### 2.1 一般形式及功能特点

智能传感器根据集成化程度可以分为非集成式、混合式和集成式三种形式。

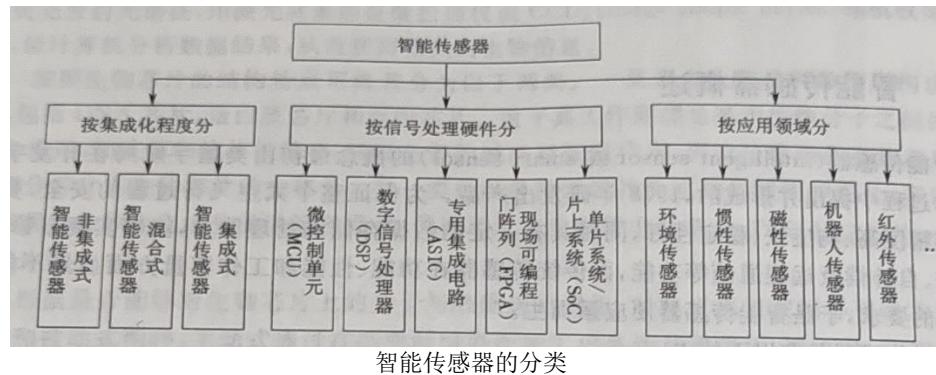
1. 非集成式智能传感器是将传统传感器、预处理电路、模数(A/D)转换、带数字总线接口的微处理器结合为一体的智能传感器系统，实际上是在传统传感器系统上增加了微处理器的连接。

2. 混合式智能传感器是将传感器的敏感单元、信号调整电路、微处理器单元、数字总线接口等以不同的结合方式集成在 2~3 块芯片上，并将其封装于一个外壳内。

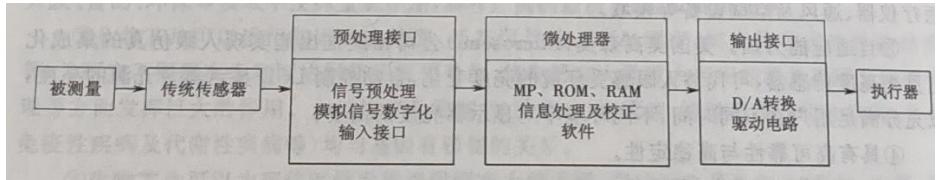
混合集成的模块包括集成化敏感单元(包括敏感元件及变换器)、集成化信号调理电路(包括多路开关、仪用放大器、电源基准、模数转换器等)、智能信号调理电路(带有校正电路和补偿电路，自动校零、自动进行温度补偿)、微处理器单元(包括数字存储器(EPROM ROM、RAM)、数字 I/O 接口、数模转换器、微处理器等)。

3. 集成式智能传感器采用大规模集成电路技术和微机械加工技术，利用硅作为基本材料制作敏感元件、预处理和 A/D 电路、微处理器单元等，并把其集成在一块芯片上。

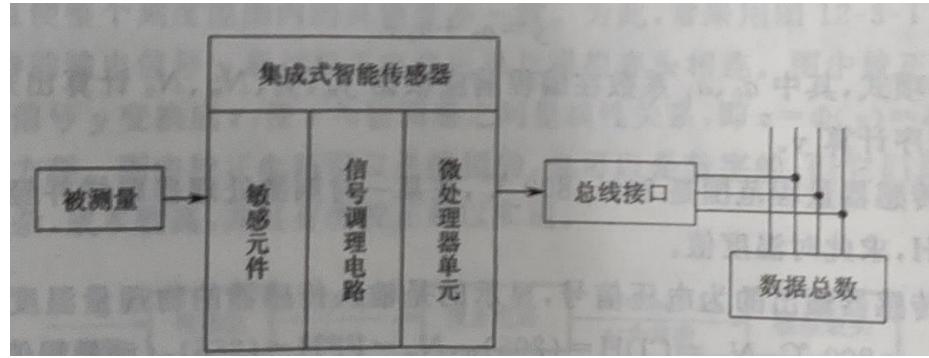
## 2.2 分类及原理框图



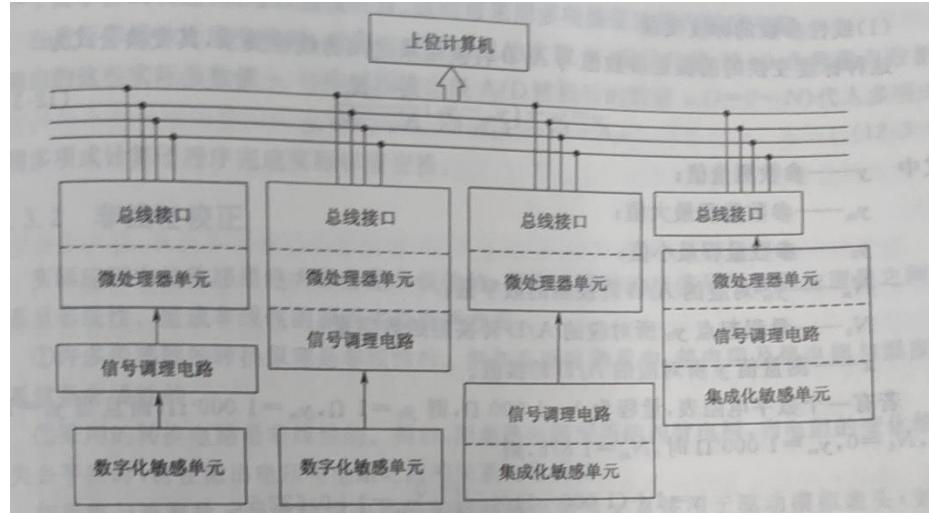
智能传感器的分类



非集成式智能传感器的原理框图



集成式智能传感器的原理框图



混合式智能传感器的原理框图

## 3 智能传感器的发展现状以及应用实例

近年来，智能传感器在器件、系统和应用三个层面均呈现出快速发展的态势：器件微型化与新敏感机理不断涌现，系统向高度集成和端侧智能化演进，应用则从单点测量扩展到大规模分布式感知与场景化解决方案<sup>[1]</sup>。总体上，研究界和产业界正从“能把信号数字化”向“能把知识在端侧产生并传输”转变，这一转型既由 MEMS 与 CMOS 工艺的融合驱动，也受低功耗电路、能量采集技术和轻量化 AI 算法的共同推动<sup>[2]</sup>。国内外大量研究和工程实践表明<sup>[3]</sup>，智能传感器不再是单一器件，而是包含敏感元件、信号调理、模数转换、嵌入式处理、能量管理与通信接口的复合系统，未来的发展正在朝向更高的集成度、更强的自主性与更广的适配性。

智能传感器在器件与材料层面，温度、压力、惯性、生化与射频识别等传感器各自取得了显著进步<sup>[4]</sup>。智能温度传感器

的发展已由早期的低分辨率器件跃升为支持 9–13 位分辨率甚至更高的器件，同时开始向多通道、总线化与自诊断功能演化；智能压力传感器通过 MEMS 与硅工艺实现了高集成度与自动补偿、自诊断功能；惯性传感器方面，借助 MEMS 技术的小型化与阵列化思路，可以通过多传感器融合（“虚拟陀螺”）显著提升测量精度；生物传感器受益于新材料（如二维材料、纳米线）与混合集成工艺，朝着可重构、多参数片上系统发展，并逐步实现与读出、通信和能量模块的同芯片集成<sup>[4]</sup>。

在应用层面，智能传感器的覆盖面已非常广泛且具有代表性的落地方向包括但不限于：医疗健康、工业制造、交通与汽车、航空航天、土木工程、农业与环境以及国防与无人系统。它能够解决传统监测方式“信息不连续、实时性不足、人工依赖强和能耗高”等难题。比如在交通与汽车领域，智能传感器为车辆运行安全、车况管理和自动驾驶环境感知提供了实时且可靠的数据基础，解决了传统传感方案难以满足动态复杂场景的挑战；在土木工程中，传感器网络为桥梁、大坝和建筑等结构提供了健康监测与环境风险预警，解决了人工巡检难以及时发现隐患的局限；在国防与无人系统中，智能传感器通过高精度惯性导航与多模态探测，提升了复杂任务中的自主性与可靠性，解决了传统定位和侦测手段在遮蔽、干扰环境下的不足<sup>[5]</sup>。

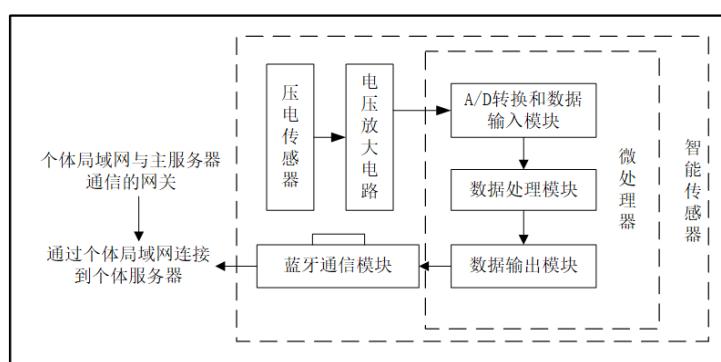
### 3.1 生物医学

在生物医学领域，患者状态多变、发病机制复杂且时间敏感，许多临床决策依赖于对生理与病理参数的高频、精确和连续观测。智能传感器通过把“感知—预处理—判断—通信”能力下沉到传感节点，使得对生物信号的采集从“间断式、人工依赖”转向“连续、自动化与智能化”。其能够在生物医学场景中同时满足连续性、实时性、低能耗、舒适性与数据安全的多重需求，从而解决传统方案难以兼顾的多项痛点<sup>[6,7]</sup>。比如连续性与短时事件捕捉问题：传统门诊/住院检测往往为点测，难以捕捉短暂或间歇性异常，智能传感器支持长时间连续采样，能发现短时但危险的事件，从而提升早期诊断与预警能力。可穿戴植入设备对舒适性与长期可靠性的需求：生物医学传感器必须兼顾微型化、低功耗、生物相容与封装耐久性，才能用于长期佩戴或植入，智能传感器的低功耗硬件设计与封装技术正是为此而生<sup>[8]</sup>。

#### 3.1.1 实例：身体实时监控系统

该身体实时监控系统针对传统生物医学中采样信息不连续即时的痛点，设计了一个实时监控系统，使智能传感器同互联网互联，从而达到实时的效果<sup>[9]</sup>。其为三层体系：节点层（微型智能传感器）——个体服务器/网关（边缘汇聚与本地分析）——主服务器（集中分析、存储与专家系统）。节点层负责传感、嵌入式预处理（滤波、特征提取、轻量判别）与短距通信；个体服务器负责多传感器数据融合、本地报警与向云端的安全上报；主服务器执行更复杂的模型、长期趋势分析与医生端交互。主要实现原理为基于最新的无线通信技术，可以利用蓝牙技术的系统实现。智能传感器中的微处理器融入了汇编语言程序，完成原始信息采集、处理、通信等功能。以心内压监视传感器原理图为例，如图 3.1.1，该单个智能传感器完成了整个测量功能。

图 3.1.1 心内压监视传感器原理图



总体而言，身体实时监控系统通过分层架构、节点端智能预处理、多传感器融合与安全的网络化管理，充分体现了智能传感器在医学场景中解决连续监控、实时响应、数据传输与隐私保护等关键问题的能力。

### 3.2 航空航天

航空航天领域的飞行器与航空发动机运行在高温、高压、强振动和复杂电磁环境中，其安全性、可靠性和实时性能要求远高于普通工业环境<sup>[10]</sup>。发动机温度、压力、应变、姿态等关键参数的实时监测直接关系到飞行安全、推力控制和寿命评估。

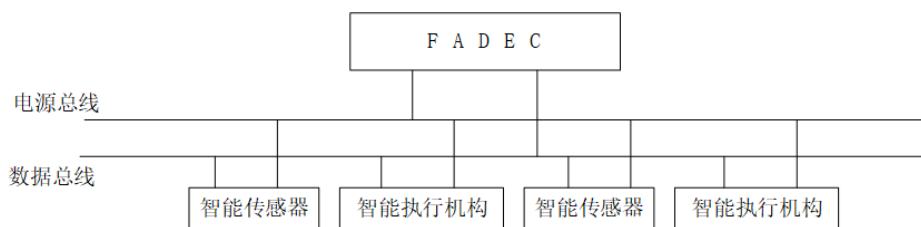
传统传感器仅能输出原始信号，需依赖集中式控制器处理，存在布线复杂、实时性不足、抗干扰能力弱、容错性差等问题。智能传感器则通过在传感单元中集成信号调理、模数转换和微处理器，具备自校准、自诊断、数据预处理和分布式通信能力，可有效提高航空发动机与航天系统的实时监控水平，减少故障率并提升任务成功率<sup>[11]</sup>。

在 IEEE-1451 标准定义了智能传感器通用的数字通信接口后，智能传感器在包括航空航天等多个行业的应用更为方便，智能传感器的研发也更受国内外相关学者的青睐<sup>[12]</sup>。比如，英国 H.A.Thompson 等人开发出基于 CAN 总线的智能传感器，并将其应用在航空发动机分布式控制系统实验平台上<sup>[13]</sup>。

### 3.2.1 实例：航空发动机分布式控制系统

新型航空发动机分布式控制系统主要结构如图 3.2.1 所示，其最典型的特征是依靠先进的数据总线，将智能传感器、智能执行机构和控制器串连，因此大大减少了接口和连接线缆的数量，减轻控制系统的重量，同时降低了系统的故障率，提升系统的可靠性。

图 3.2.1 航空发动机分布式控制系统结构



图中的智能传感器可划分为信号调理电路、解算处理电路、通信电路以及电源电路部分。系统主要运行架构为：首先由温度、压力传感器采集到微弱电信号，经过调理电路放大和滤波消除噪声干扰，然后送入微处理器进行解算，再基于 TTP/C 总线协议进行通信<sup>[14]</sup>。最后对单个传感器进行集成和组网，设计传感器的嵌入式程序。最终成功实现了航空发动机分布式控制系统，实现了自校准、自诊断、数据预处理和分布式通信能力。

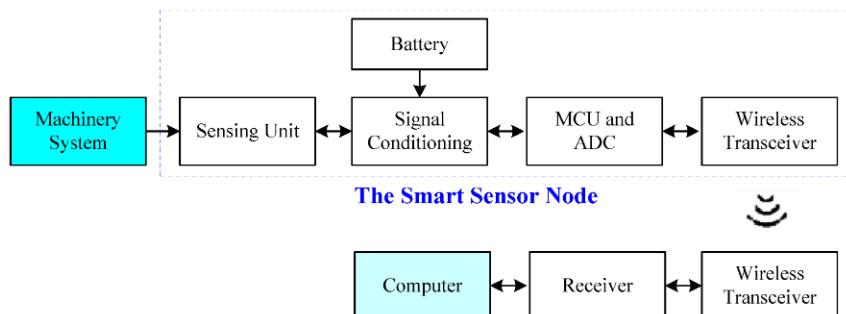
## 3.3 工业生产——基于智能传感器的机械故障检测监控技术

在工业生产中，旋转机械与传动系统（如电机、泵、压缩机、齿轮箱和轴承）是最常见的关键设备，其突发故障不仅会导致生产中断、质量波动，还可能引发严重的安全事故与高额经济损失。运用智能传感器使得对机械状态的监测从离散巡检转向连续在线、从事后维修转向预测性维护。这种设计既能在噪声与非平稳工况下捕捉微弱故障征兆，从而实现早期预警，又能显著降低数据传输量与云端计算压力，提升系统实时性与可扩展性；此外，多模态传感（振动、温度、电流、声发射等）与融合分析进一步增强了故障诊断的定位精度，满足现代制造业对设备高可用率与智能运维的迫切需求。智能传感器在工业现场不仅解决了传统监测体系中“滞后、带宽/能耗高、难以适应复杂工况”的问题，也为实施以数据为驱动的维护策略、优化备件管理与延长设备寿命提供了技术基础。

### 3.3.1 实例：基于智能传感器的机械故障检测监控技术

该智能数据采集（DAQ）系统由现场无线智能采集节点、边缘网关与云端分析平台构成<sup>[15]</sup>。具体系统结构如图 3.3.1 所示：

图 3.3.1 基于智能传感器的 DAQ 系统框图



机械振动信号由现场的传感单元采集，经前端信号调理（包括供电稳压、激励电源/恒流源、放大与抗混叠滤波等）后送入片上模数转换器（ADC），ADC 常由微控制器（MCU）内部模块或外部 ADC 完成；数字化的振动数据由 MCU 暂存于本地 SRAM，然后通过低功耗无线收发器以子频段发送到接收端（receiver）；接收端将数据转发到上位计算机或分析平台进行存储与故障诊断算法处理。

该智能传感器的数据采集（DAQ）系统在面对非平稳、高带宽的振动信号时，能在源头处去噪并提取故障敏感信息，避免把大量原始波形持续上报到云端造成的带宽瓶颈与存储压力；把计算往边缘下沉还提高了系统的鲁棒性，这对降低误报率、提高诊断可靠性尤为关键。

## 4 未来发展趋势

智能传感器作为新一代信息技术与感知技术融合的核心环节，其未来发展趋势主要体现在高集成度、低功耗化、智能化、网络化以及应用场景的纵深拓展等方面。当前的研究和应用实践表明，传统传感器的局限性逐步被突破，但在长期稳定性、跨场景泛化、能量自给以及安全性等方面仍存在瓶颈，未来的发展方向正是围绕这些关键问题展开。

首先，高度集成化与多参数融合将成为主流<sup>[4]</sup>。未来的智能传感器不再是单一功能器件，而是融合多种敏感元件、信号调理电路、模数转换器、嵌入式处理单元和无线通信模块的系统级芯片或封装级系统。这种集成化不仅能够显著降低体积与功耗，还能通过多参数协同感知提升复杂环境下的鲁棒性。其次，低功耗与能量自给将是长期部署的前提。随着可穿戴设备、远程监控和大规模物联网的快速普及，传感节点的能耗问题日益突出。未来研究重点在于低功耗电路设计、事件驱动与自适应采样策略，以及多种能量收集技术的结合。通过实现自供能传感器网络，可以极大降低维护成本，推动无人值守监测系统在医疗、环境和工业中的大规模应用<sup>[5]</sup>。网络化与标准化将是实现大规模互联互通的关键。IEEE 1451 等智能传感器接口标准为不同厂商和系统间的互操作提供了基础，但在大规模物联网和工业互联网环境下，尚需进一步解决多协议共存、时间同步、安全传输和分布式协作等问题。未来的发展趋势是构建具备自组网、时延可控、端云协同的智能传感器网络体系，实现从单节点智能到群体智能的跃升。

总的来说，在未来，跨学科融合如材料、微电子、通信、人工智能，将发挥重大作用，推动智能传感器从实验室研究走向大规模工程化部署，全面支撑智慧医疗、智能制造、智慧交通、航空航天与环境监测等领域的深度发展<sup>[16]</sup>。

## 5 个人贡献及心得体会

下面对该综述进行说明贡献和心得体会。周溢负责了综述的摘要部分、第三部分（智能传感器的发展现状以及应用实例）、第四部分（未来发展趋势）、部分参考文献的查找与阅读以及整体报告的排版。石宇鹏负责了综述引言以及第二部分（智能传感器的结构原理）。

████████ 在完成传感技术课程报告过程中，我通过知网、PubMed、IEEE 等其他途径下载了一些有关智能传感器的文献。通过对文献的阅读，加深了我对智能传感器基本结构的了解以及它广泛的应用、优势所在、能解决的问题，以及未来的发展趋势（集成化、与人工智能结合）。通过报告的撰写，我熟悉了 EndNote 的使用，以及文献管理、科学论文写作的格式规范要求。总的来说，通过这门课程，我对传感器的基本概念有了新的认识，了解了传感器在具体场景中的应用。

████████ 通过本次报告，我获得了以下几点深刻的心得体会：1. 认知的递进性：学习过程清晰地展现了从“是什么”（概念）、到“从哪来”（历史）、再到“如何构成”（结构）和“如何升华”（智能传感器）的认知链条。这说明了建立系统性知识框架的重要性，远比记忆零散知识点更为根本和有效。2. 技术发展的核心驱动力：传感器从简陋的机械装置到智能微系统的演进，其根本驱动力是底层技术的突破（如半导体、MEMS 工艺）和应用场景的牵引（如工业自动化、物联网）。这揭示了技术并非孤立发展，而是与材料、工艺、市场需求紧密交织。3. “结构决定功能”的普适性：传感器的结构特点完美印证了“形式服务于功能”的原则。传统传感器的分立结构决定了其功能的单一性，而智能传感器将“大脑”（MCU）与“感官”（传感单元）集成于一体的结构，从根本上催生了其自诊断、自补偿和智能决策等高级功能。4. “智能化”的本质：“智能”并非一个模糊的概念。在传感器领域，它具体体现为“软件赋能硬件”——通过微处理器和内置算法，对原始数据进行深度加工与解读，使传感器从被动的数据收集者，转变为主动的信息分析与提供者。5. 跨学科的融合趋势：现代智能传感器是一个典型的交叉学科产物，它融合了物理、化学、材料科学、微电子、计算机科学和通信技术。这提

醒我们，解决复杂问题往往需要打破学科壁垒，具备广阔的知识视野。总而言之，这段探讨不仅让我深入理解了传感器本身，更让我看到了技术演进的内在逻辑、系统设计的思想以及未来科技发展的融合趋势。这是一个从具体知识到抽象方法论的有效学习过程。

#### 参考文献：

- [1] KANOUN O. Future prospects for smart sensor systems; proceedings of the 2009 6th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices, F 23-26 March 2009, 2009 [C].
- [2] 宋慧欣. 智能传感器,实现“中国智造”关键利器 [J]. 自动化博览, 2022, 39(09): 5.
- [3] SEHRAWAT D, GILL N S. Smart Sensors: Analysis of Different Types of IoT Sensors; proceedings of the 2019 3rd International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICOEI), F 23-25 April 2019, 2019 [C].
- [4] 尤政. 智能传感器技术的研究进展及应用展望 [J]. 科技导报, 2016, 34(17): 72-8.
- [5] 吴佳汉, 文志江, 冯方平. 智能传感器的研究现状及展望 [J]. 广东科技, 2017, 26(05): 77-9.
- [6] 杭建金, 汪庆华, 吴向阳, et al. 生物医学传感器的应用现状及发展趋势 [J]. 医疗卫生装备, 2007, (01): 40-2.
- [7] NETTLETON D F, MARÍ-BUYÉ N, MARTI-SOLER H, et al. Smart Sensor Control and Monitoring of an Automated Cell Expansion Process [J]. Sensors (Basel), 2023, 23(24).
- [8] WANG B, WANG Z, CHEN T, et al. Development of Novel Bioreactor Control Systems Based on Smart Sensors and Actuators [J]. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 2020, Volume 8 - 2020.
- [9] 冯巍 陈. 智能传感器及其在医学中的新应用 [J]. 中国医学装备, 2005, (06): 27-30.
- [10] 张绍基. 航空发动机控制系统的研发与展望 [J]. 航空动力学报, 2004, (03): 375-82.
- [11] 郭迎清 章. 航空发动机分布式控制系统综述 [J]. 航空发动机, 2003, (03): 52-5.
- [12] IEEE Standard for a Smart Transducer Interface for Sensors and Actuators - Network Capable Application Processor Information Model [J]. IEEE Std 14511-1999, 2000: 1-480.
- [13] THOMPSON H A, BENITEZ-PEREZ H, LEE D, et al. A CANbus-based safety-critical distributed aeroengine control systems architecture demonstrator [J]. Microprocessors and Microsystems, 1999, 23(6): 345-55.
- [14] 吴明. 航空发动机分布式控制系统智能传感器硬件设计与验证 [D]; 南京航空航天大学, 2023.
- [15] ZHANG M, XING X, WANG W. Smart Sensor-Based Monitoring Technology for Machinery Fault Detection [J]. Sensors (Basel), 2024, 24(8).
- [16] 赵丹, 肖继学, 刘一. 智能传感器技术综述 [J]. 传感器与微系统, 2014, 33(09): 4-7.