

传感器技术如何赋能智能制造？

九三学社中央科技委副主任、中国传感器与物联网产业联盟常务副理事长 郭源生

智能制造已成为推动产业升级、提升国家核心竞争力的关键力量。它通过人工智能、信息技术、自动化技术与制造过程的深度融合，实现生产过程的数字化、智能化、柔性化和高效化。传感器作为数据获取的功能器件和“电子五官与皮肤”，在其中扮演着至关重要的角色，能动态实时感知生产过程中的各类物理量、化学量和生物量信息，并将这些信息转化为可处理的数据信号，为智能制造系统的决策与控制提供坚实基础。无论是产业前端的物流配送与状态检测，中端工艺过程对生产效率、产品质量、设备运行的实时监控，还是后端仓储物流对货物存储环境、运输状态的管理，都离不开传感器的支持。随着智能制造的持续迭代，对传感器的性能、功能和集成度也提出了更高要求。因此，如何进一步提升工业离散型传感器的产业化能力和应用水平，成为当前亟待解决的重要课题。

智能制造传感器核心技术演进与品类解析

当前，工业离散型传感器已形成由声、力、光、气、磁、温湿度、RFID、生物八大敏感技术构成的完整产品体系，并围绕精度与可靠性升级、多参数复合、智能化模块、互联化节点四大主线，展开技术创新与全面竞争。

八大敏感技术各具特色

敏感机理是传感器的技术核心与功能载体，不同敏感机理与技术所形成的性能指标和产品形态，决定了其应用场景的适配性。其中，声敏器件与传感技术适用于AGV避障、设备异响监测、焊缝检测、流体流量测量等应用场景；力敏器件与传感技术适用于机器人抓取力控制、冲压工艺压力监测、装配力反馈、设备负载检测；光敏器件与传感技术适用于3D成像、零件定位（激光雷达）、PCB质检、表面缺陷检测（视觉）、远距离信号传输（光纤传感器）；气敏器件与传感技术适用于车间有害气体监测、锂电池生产环境控制、化工原料泄漏检测；磁敏器件与传感技术适用于电机转速检测、金属零件探伤、位置定位、电流测量；温湿度敏感与传感技术适用于仓储环境监控、设备温度监测、工艺温控、冷链物流；RFID器件及技术适用于物料溯源、库存盘点、资产跟踪、人员定位；生物敏感与传感技术适用于生物医药原料检测、食品质量溯源、微生物污染监测。

八大敏感技术各具特色

随着智能制造对感知技术要求的不断提升，形成了精度与可靠性升级、多参数复合集成、智能化深度赋能、互联化节点四大创新主线，推动离散型传感器从“单一感知”向“智能感知”及“微系统”跨越。

主线一：精度与可靠性升级，突破极限工况适配能力。

(1)从模拟向数字跨越式发展：数字传感器通过内置AD转换器(12位~24位)实现信号直接数字化。针对位移检测类传感器，检测精度从模拟式的 $\pm 0.1\text{mm}$ 提升至数字式的 $\pm 0.01\text{mm}$ 。

(2)环境适应性突破：目前，通过采用陶瓷封装、耐高温材料(如

AIN陶瓷、SiC半导体)，传感器可在 $-40^{\circ}\text{C}\sim 150^{\circ}\text{C}$ 环境下稳定工作；高温环境通过防水透气膜技术，在95%RH(无凝结)条件下可将误差率控制在3%以内；抗电磁干扰则采用屏蔽封装、差分信号传输设计，在1000V/m电磁辐射下信号失真率 $<1\%$ ，满足汽车制造、电力设备等复杂场景需求。

主线二：多参数复合集成，降低部署成本与空间占用。

(1)单元件多物理量检测：复合传感器通过集成多种敏感单元，实现“一器多测”。例如，“温度-压力”复合传感器集成热敏电阻与压阻式敏感单元，体积缩小50%，部署成本降低30%以上，已应用于发动机缸体检测。

(2)阵列化感知：通过高密度敏感单元阵列，实现多维度、大面积感知。例如，采用MEMS工艺制造的高密度触觉感应矩阵(最小单元 $0.1\times 0.1\text{mm}$)，可实现人体皮肤级的触觉感知，支撑人形机器人的精细操作。

主线三：智能化深度赋能，从数据采集到智能认知。

(1)边缘计算集成：传感器内置微处理器(MCU)，实现本地数据预处理、筛选与特征提取，仅将有效数据上传云端，可降低云端传输压力50%。例如，工业振动传感器内置FFT(快速傅里叶变换)算法，本地分析振动频率特征，仅上传异常频率数据，可减少90%的数据传输量。

(2)AI算法嵌入：将深度学习、

四大主线推动技术跨越

机器学习算法集成到传感器模块中，实现数据智能分析与决策。例如，内置自诊断功能通过AI算法分析传感器自身工作状态，设备故障预警准确率超85%，可提前30天预测传感器失效风险。

(3)微处理器深度集成：与MCU、DSP(数字信号处理器)深度集成，实现数据实时分析与决策反馈，响应延迟低至毫秒级。例如，集成MCU与PID控制算法的传感器，在机器人装配过程中可实时调整抓取力，响应延迟 $<1\text{ms}$ ，确保精密零件装配无损伤。

主线四：互联化突破，支撑工业物联网协同。

(1)无线通信适配：针对工业物联网大规模部署需求，传感器支持LPWAN(LoRa/NB-IoT)、蓝牙5.0、Wi-Fi6等无线协议，实现低功耗远距离传输。采用LoRa协议的传感器通信距离可达3~10km，工作电流低至 $10\mu\text{A}$ (休眠电流 $1\mu\text{A}$)，适用于工厂车间、仓储物流等大范围部署场景；NB-IoT传感器依托运营商网络，无须自建基站，数据上传稳定，已应用于跨区域资产跟踪。

(2)工业以太网兼容：为满足实时控制需求，传感器适配PROFINET、EtherCAT、Modbus TCP等工业以太网协议，数据传输延迟 $\leq 1\text{ms}$ 。采用EtherCAT协议的传感器支持分布式时钟同步，同步精度达100ns，可支撑多设备协同控制，已在汽车焊装生产线实现128台机器人的同步动作与数据交互；PROFINET传感器与PLC、MES系统无缝对接，数据交互率提升至95%以上，有助于打破“数据孤岛”。

智能制造全流程数字化场景应用深度解析

传感器的价值最终通过场景应用实现。在智能制造全流程中，前端物流配送与仓储物流、中端制造过程与质量管控、后端设备运维与能效优化三大环节，形成了“感知-决策-执行”的闭环体系。

物流配送与仓储物流

物料配送与仓储物流是智能制造的“供应链基石”，其效率与准确性直接影响生产节奏。传感器通过环境感知、位置定位、状态监测等功能，实现物料“精准配送、安全存储、动态溯源”，支撑柔性生产与精益管理。

核心传感器组合包括：光传感(激光雷达)+声传感(超声波)，激光雷达实现三维环境建模与障碍物检测，超声波传感器弥补激光雷达近距离盲区，二者协同实现AGV(自动导引车)的精准避障与路径规划；温湿度+气体传感，实时监测仓储环境温湿度结合气体

传感器检测有害气体与易燃易爆气体，防范物料受潮、氧化及火灾风险；RFID+力敏传感，RFID标签记录物料型号、批次、保质期等全生命周期信息，结合物料装卸过程中的压力监测，避免易碎、精密物料受损。

制造过程与质量管控

工艺过程数字化与质量管控是智能制造的核心，通过工艺参数监测、产品缺陷检测、安全防护等功能，实现生产过程的“实时控制、精准检测、安全高效”，推动制造从“规模化生产”向“个性化定制与精准化配置”转型。

核心传感器组合包括：光敏(3D激光)+视觉传感，3D激光传感器实现零件三维尺寸测量与定位(精度 $\pm 0.01\text{mm}$)，视觉传感器进行表面缺陷检测与字符识别，二者协同支撑精密装配与质量检测；力敏+磁敏传感，实时监测冲压、焊

接、装配等工艺的压力/扭矩参数(分辨率0.01N)，磁传感技术实现电机转速检测与金属零件探伤，保障工艺稳定性与产品一致性；安全光幕(光传感)+振动传感，安全光幕形成红外防护屏障(响应时间 $<10\text{ms}$)，防范人员误入高危作业区域；振动传感器监测设备运行振动(频率范围10Hz~10kHz)，实现设备状态预警与故障诊断。

设备运维与能效优化

设备运维与能效优化是智能制造的保障，传感器通过设备状态监测、能耗数据采集、故障诊断等功能，实现“预测性维护、能效提升、绿色生产”，降低运维成本与能源消耗。

核心传感器组合包括：振动+声敏+温度传感，采集设备旋转部件(电机、轴承、齿轮)振动信号(频率10~1000Hz)，硅麦克风监测噪音变化和异响(频率20Hz~20kHz)，结合监测部件温度(精

度 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$)，协同实现设备健康状态评估；电流+温湿度传感，电流传感器(精度 $\pm 0.5\%$)监测生产设备的电力消耗，温湿度传感器采集车间环境参数，通过动态调整设备运行负载与空调系统，实现能效优化；红外+声敏传感，红外传感器测温范围 $-40^{\circ}\text{C}\sim 500^{\circ}\text{C}$ ，精度 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ，用于检测设备表面温度异常，声敏传感器捕捉设备运行异响，协同实现故障精准诊断。

智能与导航传感器

智能与导航传感器是工程机械无人化、智能化的核心增量，主要用于环境感知、自主定位与路径规划，是近年来增速最快的传感器品类。此类传感器用量占比10%，但年复合增长率达25%，是智能化升级的核心增量。该领域技术门槛最高，国际激光雷达占据高端市场。在应用中，无人工程机械已形成“GNSS+IMU+激光雷达+视觉”的多传感器融合方案，例如无人矿卡搭载的融合系统，可实现矿山环境下的自主行驶、避障与装卸作业，定位精度 $\pm 10\text{cm}$ ，避障响应时间 $<200\text{ms}$ 。

产业化问题、难点及破局方案

尽管我国传感器技术在智能制造中的应用取得进展，但在高端技术突破、系统集成协同、成本控制等方面仍面临诸多挑战。

三大核心挑战

技术瓶颈：其一，敏感芯片及核心元器件依赖进口。传感器的核心——MEMS芯片、高端ASIC电路、敏感材料等国产化率偏低。数据显示，MEMS芯片国产化率约35%，高端ASIC电路国产化率不足20%；BAW滤波器国产化率约8%，制约了工业级高端传感器产业发展。其二，性能差距明显。与国际先进水平存在显著差距。例如，国际车规级激光雷达的测距可达200m，国产主流产品在180m以内；国际工业级视觉传感器帧率可达1000fps，国产多在500fps以下。其三，基础研究薄弱。在敏感材料、MEMS工艺、检测算法等基础研究领域投入不足，专利布局多集中在应用层，基础核心技术专利占比不足10%，长期被欧美企业垄断。

集成难题：其一，协议不统一。当前工业传感器市场存在PROFINET、EtherCAT、Modbus、LoRa、NB-IoT等多种通信协议，不同厂商产品的接口、通信协议差异大，兼容性不足。其二，异构设备协同低效。传感器与PLC、MES系统、数字孪生平台的数据有效交互率不足70%，形成“数据孤岛”。其三，数据安全风险。工业现场数据包含生产工艺、设备参数、产品质量等核心信息，在无线通信场景下易受监听、篡改、伪造等攻击。而低功耗传感器受限于算力与功耗，难以部署复杂的安全防护机制，数据泄露风险较高。

成本压力：其一，研发成本高。传感器涉及多学科融合技术，研发周期长、投入大。单个MEMS芯片产线投资超10亿元，一条封装测试产线投资超2亿元；仅应用研发投入占比就达18%，远高于普通制造业的5%~8%。其二，采购与维护成本高。工业离散型传感器价格昂贵。此外，传感器需定期校准、维修，维护成本占设备总成本的20%以上，中小企业难以承受，制约了传感器的规模化应用。其三，规模效应不足。传感器企业数量众多，但规模较小，年营收超10亿元的企业不足20家，市场集中度低(CR10 $<30\%$)。企业缺乏规模效应，导致生产成本居高不下，难以与国际巨头竞争。

三大破局方向

针对这些问题，需通过国产化、标准化、生态化三大路径，推动产业高质量发展。

首先，加快国产化发展，聚焦核心环节攻关。

随着工业智能化场景的迭代升级和需求的持续扩大，传感器技术将向微型化、低功耗、智能化、多维度感知方向演进，产业也将从离散型、多品种、小批量的生产模式转向产业化规模生产。

技术趋势：

四大核心方向突破

微型化与集成化：MEMS技术、纳米技术的发展将推动传感器尺寸持续缩小，从毫米级向微米级、纳米级突破。例如，未来MEMS芯片尺寸有望实现 $0.1\text{mm}\times 0.1\text{mm}\times 0.05\text{mm}$ 的超微型化；“光-声-力”一体化感知器件将成为主流，通过集成多种敏感单元与微处理器、通信模块，实现

“感知-计算-通信”一体化，满足微型机器人、可穿戴设备等小型化设备的部署需求。

低功耗与长使用寿命：通过优化电路设计(如采用低功耗MCU、休眠技术)、封装技术(如真空封装、低功耗材料)，将传感器功耗降至毫瓦级以下(当前为10~100毫瓦)，使用寿命延长至10年以上，以适应工业物联网大规模、长周期部署场景。例如，采用电磁感应、振动、温差等工业场景适配型微能量收集技术，可实现传感器自供电，无须更换电池，进一步降低维护成本。

自校准与智能化：内置AI自校准算法，可根据环境变化(如温度、湿度)自动调整参数，实现环境自适应，减少人工维护成本；推动传感器从“数据采集”向“智能认知”升级，使其具备自主决策与协同工作能力。例如，多传感器协同感知系统通过AI算法实现数据融合与决策，可自主选择最优感知策略，适应复杂场景需求。

多维度感知：构建阵列化、网络化的全域感知系统。例如，大规模传感器阵列(10万+传感点)可实现大面积、高精度感知；通

过物联网技术形成“端-边-云”协同的感知体系，支撑复杂场景的多参数、高精度监测。此外，量子传感、柔性传感等新兴敏感技术的突破，将拓展感知维度，实现对弱磁场、生物信号等特殊物理量的精准感知。

应用拓展：

从传统制造向新兴领域延伸

传统制造业升级：传感器将深度渗透

汽车、电子、机械、化工等传统制造业，实现生产过程全要素感知与闭环控制。例如，在汽车、家电等制造过程中构建“感知-决策-执行”闭环，部署海量传感器以实现全流程智能化、无人化；电子制造将实现芯片制造、封装测试全流程的自动化检测，传感器精度提升至纳米级，推动电子产品向更高性能、更小尺寸发展。预计到2030年，传统制造业传感器应用覆盖率将达90%以上，生产效率提升20%以上。

新兴领域拓展，呈现新增长点：新能源汽车、半导体、生物医药、人形机器人、智能建造等新兴领域产业工艺的数字化、智能化，将催生大量新的传感器应用场景。预计到2030年，制造业数字化领域的传感器市场规模将突破3600亿元。