

从基础敏感元件到智能超感单元：传感器前沿技术突破与重大变革

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

数十年来,传感器依托硅基、光纤、金属氧化物等敏感机理与材料形成的基础敏感元件,实现物理、化学、生物等量的转换,完成温度、压力、气体、光学等基础信号的采集与测量。然而,这些材料与机理特征面临研发成本增高、性能提升难度加大、边际效益持续低迷等问题。因此,全球传感产业面临跳出固有模式与产业内卷的态势,行业发展逐步告别单纯的硬件参数迭代,迈向“材料革新+机理创新+AI赋能+系统集成”的多重融合,集感知、存储、认知、分析、决策、自适应于一体,以及体系化、集成化、自主化的超级智能感知单元系统(即智能超感单元),步入全新时代跨越的新赛道。

传统敏感元件的技术特征与发展局限

传统敏感元件的技术体系、产品形态和应用模式存在明显的技术短板与发展瓶颈,具体特征与局限如下。

核心技术特征:单一化、被动化、分立化。从功能属性来看,传统敏感元件仅承担原始信号采集工作,不具备数据解析、逻辑判断与环境自适应能力,属于典型的被动式分立独立器件,软硬件单一封闭、缺乏互联互通能力,以孤立作业模式为主,只能实现基础、单一的监测功能,无法适配

现代产业智能化、系统化、网络化的协同感知需求。

产业发展局限:创新难度增大、增量空间缩小。经过数十年技术迭代与成本/规模的产业化竞争,材料、机理、功能三个维度潜力已充分释放。

一是敏感材料局限性。传统的材料在灵敏度、温域耐受能力、抗干扰性、长期可靠性与稳定性方面已接近工艺优化极限。若要性能大幅提升,必须依靠超高精度工艺迭代与复杂结构改良,直接导致研发、量产成

本大幅攀升。

二是感知机理局限。以往传感器普遍遵循“一器一机理、一器一参量”的固化逻辑,存在其固定机理仅能对应单一检测维度,无法实现多物理量、多化学参数的同步采集与融合分析的天然短板。

三是智能功能局限。大都是模拟信号输出为主,不搭载边缘算力。所有信号降噪、数据分析、故障研判、决策控制均依赖后端设备或云端平台二次处理完成,无法直接支撑终端

实时预警、自主调控、智能决策等高端需求。

市场刚需与技术门槛抬高。随着万物互联与智能化升级,对传感器的技术指标、功能属性、集成能力、智能化水平、可靠性标准提出了全新且严苛的准入要求,传统传感器产品难以匹配数字化刚需。同时,行业标准化、本土化发展、高可靠认证等市场准入条件持续收紧,大幅抬高了市场准入门槛,传感器智能化延伸成为产业发展与技术创新的必然趋势。

从基础元件到智能超感单元的四大跃迁

所谓智能超感单元,核心定义为:融合多元颠覆性新材料、创新智能感知机理、多维数据融合与存储、边缘AI算力与优化、网络化协同架构,具备主动感知、数据缓存、自主认知、智能决策、环境自适应能力的新一代智能感知体系,彻底颠覆了传统传感器的底层逻辑与功能边界。

材料变革:从硅基等单一体系,走向多元超感材料体系

二维材料:石墨烯、MXene等原子级厚度二维材料,具备超大比表面积、超高载流子迁移率,其灵敏度较传统硅基材料提升1000倍以上,实现微量、痕量物质的精准检测。在大气环境溯源、室内空气治理、工业废气微量污染物监测等高精度环境检测场景中,可精准捕捉传统传感器无法识别的超低浓度有害物质,支撑生态环境精细化管理。

纳米复合材料:该复合材料兼顾量子限域检测优势与碳纳米管柔力学特性,既实现超微量气体精准检测,又具备优异形变适配能力,可同时适配高精度化工监测与柔性穿戴场景。同时,碳纳米管柔性导电膜极限拉伸到100%~300%形变时,反复弯折、拉伸后导电性能衰减低于10%~30%,完美适配曲面、形变、可穿戴等非结构化应用场景。在智能穿戴健康监测、柔性工业设备形变检测、精密化工超微量气体泄漏排查等场景中,可适配复杂曲面设备与动态形变工况的长期稳定监测需求。

量子功能材料:金刚石NV色心、超导量子干涉器件等前沿量子材料,突破经典物理传感精度限制,开启量子超感新时代。在脑机交互、精密医疗诊断、地质地磁勘探、高端精密装备微弱磁场异常检测等前沿领域,填补了超微弱信号精准感知的技术空白。

柔性仿生材料:有机半导体与仿生高分子材料,打破传统传感器刚性结构束缚,具备柔性贴合特性,可模拟人体皮肤感知机能。该材料适配具身智能手臂、仿生假肢、人体体表、异型工业曲面等场景,可应用于机器人触觉识别、康复穿戴医疗设备、工业全域贴合监测,达成无死角多维感知效果。

机理变革:从物理信号转换,走向智能感知跨越

材料革新是性能升级的基础,感知机理革新是智能超感的核心灵魂。现代传感器彻底颠覆传统单一物理、化学信号转换机理,实现了从“被动机械检测”到“主动智能感知”的根本性跨越。

多机理融合检测:当前国际领域已进入多机理耦合、多参量同步感知的前沿技术研发阶段,形成三条代表性技术路线。

一是光-电-热三模态融合:中国之江实验室于2023年发布成果,将光波导、热阻、电场效应一体化集成,单器件可同步测压力、温度、接近距离,真正做到三参量无串扰,已在工业精密检测、智能仓储、机器人电子皮肤场景小規模示范应用。

二是力-光-电融合传感:由美国斯坦福大学主导的基于微纳光纤/波导结构,把压力先变成光信号,再转电信号,形成压力→光→电链式放大,灵敏度比传统压电传感提升约5倍,主要面向机器人触觉、仿生假肢、柔性电子皮肤,已在实验室完成抓取、纹理识别验证,处于原型机阶段。

三是磁-光-热融合调控:德国慕尼黑工业大学首创,利用磁场精准

调控光热转换效率,实现±0.5℃级温控精度,核心用于肿瘤靶向光热治疗、微创介入手术,已完成动物实验,正推进临床前研究。

整体看,三类技术均突破传统单参量局限,中国在光-电-热一体化融合上形成明显优势,美国、德国分别在力光电、磁光热方向形成壁垒,三方正从实验室快速向工业、医疗、机器人领域落地。

生物仿生感知机理:在仿生嗅觉领域,美国麻省理工学院于2026年发布了“生物-电子融合仿生鼻”成果,依托基因编辑嗅觉受体与纳米光电极结构,对食品腐败标志物三甲胺的检测限达0.01ppb,灵敏度超警犬10倍,10秒即可完成响应,已联合雀巢完成食品工厂实地检测验证。在仿生听觉领域,苏黎世联邦理工于2025年发布了仿猫头鹰听觉定位技术,基于MEMS传感器与多模态信号耦合算法,复刻生物双耳相位差与强度差分辨机理,嘈杂环境声源定位误差仅±0.5°,远优于传统助听器±5°的精度,经20例临床前测试验证,可精准锁定目标声源,在智能助听、机器人高精度感知领域具备极高应用价值。

AI融合认知机理:英国帝国理工学院将轻量化TinyML人工智能算法与传感机理深度融合。可在远端完成数据清洗、特征识别、模式学习、误差自校准,无须依赖后端云端算力,实现“感知+解读+认知+判断”一体化,大幅降低传感数据传输延迟与云端算力压力。可用于智能终端实时感知、工业设备边缘智能预警、车载环境实时研判等对响应速度、自主性、稳定性要求极高的场景,实现本地化智能决策。

架构变革:从分立元器件,走向一体化智能微系统

数字化升级:采用全数字化采集、传输、编码方案,信号抗干扰能力大幅提升,检测精度较传统器件提升10倍以上,数据稳定性、一致性显著优化。从根源上规避了模拟信号传输损耗、受干扰的缺陷。

集成化升级:通过先进微纳加工与封装工艺,将敏感功能材料、MEMS微结构、ASIC专用芯片、微型处理器、存储单元高度集成,单枚芯片即可构成一套完整的智能感知单元。极大适配了微型化、轻量化、低功耗的终端设备搭载需求,降低设备整配成本与空间占用。

网络化升级:原生适配5G、LoRa、工业总线、物联网协议等主流通信方式,单个传感节点不再孤立工作,可快速组网、协同感知、数据互通,形成全域分布式智能超感网络,彻底改变了传统传感器单点独立监测、数据碎片化的弊端。

智能化升级:内置轻量化边缘计算算力,具备自主学习、故障自诊断、环境自适应、数据自校准、实时自决策能力。实现从被动数据采集向主动智能研判的身份转变,大幅降低后端平台运算压力与运维成本,提升自主适配能力与应急响应效率。

能力变革:从被动数据采集,走向主动智能决策

智能超感单元的全新工作链路为:主动全域感知→本地AI智能分析→实时态势研判→自主预警与适配决策。让传感器彻底摆脱了工业“数据配角”的定位,升级为智能社会、数字产业的核心感知神经与边缘智能决策终端,成为物理世界与数字世界交互的核心枢纽。

全球前沿技术成果和产品化实际应用

当前全球智能超感单元已从“机理探索”进入“软硬件一体化模块与产品化落地”阶段,各国顶尖高校、国家实验室与龙头企业系统,形成“材料-机理-芯片-算法-结构”全链条融合产品。

美国:量子超感+AI感知。美国国防高级研究计划局(DARPA)持续布局柔性电子、神经形态传感、量子超感等专项,在量子磁场传感、无创生理监测、植入式多参数监护三大方向形成可查、可采购的实物单元。西北大学发布了柔性汗液传感基础研究成果,依托柔性微流控结构与电化学传感技术,开发皮肤贴附式无创汗液检测单元,可通过汗液代谢物实现血糖等生理指标的无创监测。该柔性传感体系具备轻薄贴肤、实时采集汗液生化信号的技术特征,为无创血糖连续监测提供了前沿技术思路。美敦力(Medtronic)2025年

新一代动态血糖监测传感单元,依托成熟的电化学血糖检测与低功耗无线传输技术,适配胰岛素闭环调控系统,可实现血糖指标的连续动态监测,辅助糖尿病智能化血糖管理。该设备于2025年获得美国FDA官方审批,主要应用于糖尿病居家血糖调控场景。

欧洲:仿生超感+微量检测技术。欧盟依托“量子旗舰计划”“超感地球计划”,在单分子气体检测、仿生听觉/嗅觉、工业多模态诊断领域实现从实验室到工业级模块的跨越。英国剑桥大学(Cambridge)单分子级甲醛智能检测单元(2025),与英国环境署合作,用于室内空气质量监测与工业排放溯源,已由剑桥衍生企业Owlstone Medical量产。瑞士苏黎世联邦理工(ETH Zurich)BionicEar Pro仿生听觉超感单元(2025),瑞士听障中心采购200台用于人工耳蜗辅助,

瑞士铁路用于隧道异响监测。

日本:以光计算传感、微型化多模态集成、工业级可靠性见长,强调“小体积、低功耗、高稳定”。东京大学光算超感模块(2025),应用于丰田汽车零部件分拣、索尼电子元件检测、发那科人形机器人视觉-触觉融合等场景。索尼(Sony)智能视觉超感预研单元,依托堆叠式CMOS感光架构与嵌入式AI ISP智能图像处理技术,通过硬件架构优化与智能算法深度融合,大幅提升成像帧率、动态成像范围与复杂环境抗干扰能力,可有效适配逆光、雨雾等恶劣工况,精准锁定目标特征,同时依托端侧智能算力压缩冗余图像数据,降低传输带宽与算力消耗。该技术可广泛适配自动驾驶感知、无人机高清成像、工业高速质检、人形机器人环境视觉识别等多元前沿场景。

中国:光场/力觉/皮肤多模态超

感单元。亚埃米光谱成像、微尺度六维力觉、高密度电子皮肤、类脑视觉芯片四大方向有所突破。清华大学“玉衡”亚埃米级光谱成像单元(2025),用于锂电池极片微裂纹检测、农业无人机遥感、文物无损鉴定。清华大学深圳研究生院SuperTac超级光电皮肤单元(2026),可用于医疗辅助机器人(抓豆腐不碎)、工业精密装配机器人、假肢触觉反馈。北京大学F-TAC Hand全手高分辨率触觉机器人手(2025),可用于精密装配、易碎品搬运、远程手术机器人。

韩国:韩国科学技术院(KAIST)神经形态人工触觉传感单元(2025),采用忆阻器(Memristor)阵列+神经形态计算,模仿人类皮肤神经,可同时感知压力、振动、温度,具备“疼痛”强度感知与自修复能力,可用于服务机器人人机安全交互、假肢感知、可穿戴医疗监测。

智能超感单元技术全域落地 重塑产业应用范式

当前,全球传感产业已正式告别“硅基等材料改良、单一信号检测”的传统发展模式,全面迈入多元新材料、认知新机理、微系统集成、主动智能决策的智能超感新时代。这场跨代际的行业革命,作为智能制造、智慧医疗、智慧城市、万物互联的核心基础设施,智能超感单元正持续赋能千行百业,为全球传感产业的未来发展划定全新革新方向,开启全域智能感知的全新时代。

医疗健康领域:无创、植入式精准超感,实现全周期健康动态监测。

传统医疗检测多依赖大型精密仪器、穿刺采血等有创手段,存在检测频次低、时效性差、无法连续监测的痛点,难以捕捉人体生理指标的瞬时波动与病变前兆。而新一代医疗级智能超感单元,基于二维材料、柔性高分子材料的超高灵敏感知特性,结合电化学-光学融合感知机理,可实现体表无创、体内植入的高精度、连续性生理信号采集。

在无创健康监测场景中,柔性智能超感单元可贴合人体皮肤曲面,同步采集心电、血氧、脉搏、体温、汗液血糖、电解质等多维度生理参数,依托本地TinyML智能算法完成数据降噪、特征提取与误差自校准,检测精度趋近医用设备标准,无须频繁采血、线下送检,可实现居家常态化慢病筛查与健康状态研判。在高端临床医疗场景中,微型化植入式超感单元凭借低功耗、高兼容、长续航优势,可长期植入人体内部,实时动态监测血糖、乳酸、炎症因子、脏器压力等核心病理指标,精准捕捉病变前期的微弱生理信号变化,为重症预警、术后康复追踪、慢性病精细化管理提供全天候、高密度的数据支撑。同时,依托网络化架构可实现监测数据实时上传、医患协同研判,有效弥补传统医疗间断式检测的短板,大幅提升疾病早期诊断率与临床诊疗效率。

工业制造领域:多模态协同超感,构建预测性智能运维体系。

传统工业监测多采用单一功能传感器,仅能单独采集温度或振动等数据,无法关联多维度设备工况参数,难以识别复杂故障的隐性前兆,极易导致设备突发停机、生产中断、运维成本高昂等问题。

在智能制造场景中,工业智能超感单元依托“光-电-热-力”多模态融合感知机理,搭配高精度三轴振动、温度、声学、压力一体化集成设计,可同步采集工业电机、风机、机床、传动轴承等核心设备的振动频谱、运行温度、工作噪声、负载压力、电流谐波等全维度工况数据,采样频率可精准匹配设备故障特征频率,全面覆盖设备运行核心状态指标。同时,借助内置边缘计算算力,在设备本地完成实时数据清洗、故障特征识别、工况模式分类与健康度研判,无须依赖云端算力即可实现设备磨损、松动、过热、绝缘老化等隐性故障的提前预判,最长可实现72小时设备隐患前置预警。依托

5G与工业总线组网能力,全域分布的传感节点可形成协同感知网络,实现车间、产线、厂区设备状态的全域联动监测与数据互通,构建标准化设备健康台账,通过持续自学习迭代优化预警模型精度,有效降低设备故障率、非计划停机时长与人工运维成本,全面提升智能制造产线的稳定性、安全性与生产效能。

环境监测领域:分布式自供电超感,搭建全域精细化监测网络。

传统环境监测设备多集中部署、定点采样,依赖外接电源或高频电池更换,在山地、河湖、荒野、近海等复杂野外场景部署难度大、运维成本高,且仅能检测常规污染物,无法识别痕量、超低浓度污染物质,难以满足生态环境精细化管理的行业刚需。

新一代环境专用智能超感单元,依托摩擦电-压电耦合自供电机理,可自主收集野外环境风能、水流机械能、形变势能转化为工作电能,实现能量自给自足,彻底摆脱传统供电与电池运维限制,设备野外续航寿命提升10倍以上,完美适配各类复杂野外无人值守场景。同时,基于石墨烯、MXene等二维超感材料的超高灵敏检测特性,单枚设备可同步完成PM2.5、温室气体、挥发性有机物、重金属离子、水质微量污染物等多维度参数检测,精准捕捉ppb、ppq级超低浓度污染物质,实现污染溯源、浓度追踪、趋势预判。通过LoRa、物联网无线组网技术,大量分布式传感节点可快速搭建全域立体监测网络,实现城乡大气、流域水质、矿区生态、极端气候区域的无死角常态化监测,结合本地AI算法完成污染态势智能研判与异常溯源,为生态治理、环境应急处置、气候变化研究提供精准、连续、全域的数据支撑。

消费电子与汽车领域:微型智能超感,赋能终端产品的智能化升级。

传统消费电子、车载传感器多为分立单一功能器件,体积大、功耗高、智能性弱,仅能完成基础姿态、环境参数采集,无法实现自主校准、智能适配与场景自适应调控。

在家庭场景中,高度集成的微型智能超感单元,凭借柔性贴合、多维感知、本地智能决策优势,集合声、光、电、磁等多数据协同,可精准捕捉大、小型家用电器,可穿戴设备等状态监测,实现智能终端从“被动响应”向“主动适配”的升级,大幅提升人机交互精度与智能化体验。在新能源汽车与智能驾驶场景中,车载智能超感单元依托多模态融合感知与实时认知决策能力,同步监测车身姿态、电池温度、舱内环境、路面工况等核心参数,可自主完成数据自校准、异常故障研判、安全风险预警,辅助实现电池热管理、车身自适应调控、行车环境智能感知等核心功能,有效提升智能汽车的行驶安全性、工况适配性与自动驾驶感知精准度,成为智能汽车安全运行与智能化升级的核心感知基础设施。