

传感器如何赋能精细化工行业？

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

精细化工作为石油化工产业的高端延伸,是衡量一个国家石化产业综合竞争力的关键标尺,兼具“多品种、小批量、工艺复杂、反应苛刻、产品附加值高、质量管控严格”的特性,产品涵盖医药中间体、电子化学品、农药化工、涂料工业等多个细分领域,其生产过程对温度、压力、流量、成分、纯度等关键工艺参数的控制精度要求达到极致。因此,严苛的参数管控,成为产品质量达标、产能稳定、效益提升的核心。当前,我国精细化工行业正处于智能化改造攻坚、绿色化转型深化的高质量发展关键攻坚期。与此同时,人工智能算法、物联网技术、高性能智能感知技术等前沿技术加速迭代升级,其与精细化工产业的深度融合,不仅成为破解行业工艺过程数字化程度不足、数据采集不精准、生产调度不智能等核心痛点的关键抓手,更成为推动行业从“经验驱动”向“数据驱动”转型、全面提升智能化生产水平与核心竞争力的核心路径。

精细化工行业特性与传感器核心需求

精细化工行业呈现“大型企业规模化布局、中小型企业定制化突围”的产业格局,两种规模企业的生产模式截然不同,对传感器的配置需求、性能要求也形成显著差异。

大型精细化工企业以规模化生产高附加值通用型精细化工产品为主,主打MDI、涂料树脂、大宗医药中间体、通用农药等产品,单条生产线产能大、连续运转周期长,对传感器的长期稳定性和批量兼容性要求极高。此类企业单条生产线需配套传感器500~800台,核心要求包括:连续稳定工作时长≥2年,无须频繁更换

与校准;不同生产线、不同设备的传感器数据可统一接入企业MES系统,实现数据协同与集中管控;具备抗恶劣环境的能力,可适应长期高温、高压、连续反应的生产场景。

中小型精细化工企业以小批量定制化生产为主,主打高端定制医药中间体、专用电子化学品、特种涂料等产品,单批次产量多为50kg~100kg,生产线品种切换频繁,对传感器的快速校准能力和小量程高精度要求更为突出。此类企业单条生产线配套传感器100~300台,核心要求包括:品种切换时校准时间≤2小时,

可快速适配不同产品的工艺参数要求;小量程测量精度达标;体积小、安装便捷,可适配小型反应釜、提纯设备的安装场景;维护成本低廉,适配中小企业的资金投入能力。

精细化工细分领域众多,其中医药中间体、电子化学品、农药化工、涂料工业是四大核心领域,其生产工艺的特殊性决定了对传感器技术要求具有极强的专属性,无法通用适配,这也是精细化工传感器差异化需求的核心体现。

医药中间体领域,传感器需具备强耐有机溶剂腐蚀能力,同时满足高

精度管控要求。电子化学品领域,传感器需具备超高纯度兼容性,材质需采用PTFE、石英等无金属离子析出的特种材料,同时具备超高精度的纯度、颗粒度检测能力,避免传感器本身对电子化学品造成二次污染。农药化工领域,传感器需具备极强的耐腐蚀性能,膜片、外壳等关键部件需采用耐腐特种合金,同时具备高精度的压力、液位、浓度检测能力,防范釜体泄漏、介质超标等安全风险。涂料工业领域,传感器需具备强效防结垢能力,适配水性涂料、油性涂料的品种切换需求。

传统传感器在精细化工中的应用现状

当前,我国精细化工行业的传感器应用仍以传统传感器为主,高端智能传感器的渗透率不足10%,主要集中在大型企业的高端生产线。

选取四大细分领域,分析其应用现状。

医药中间体生产:在线pH传感器。主要用于头孢类、青霉素类中间体的反应液pH值实时监测,其测量精度直接决定产品收率。目前中小型医药中间体厂普遍采用玻璃电极pH传感器,材质为敏感膜特殊玻璃、外壳PP塑料,是性价比最高的基础监测设备。

电子化学品生产:激光颗粒传感

器。该传感器是电子级双氧水、光刻胶等电子化学品提纯工艺的核心设备,主要用于检测介质中的微小颗粒杂质。主流产品采用光阻法激光颗粒传感器,光源为半导体激光,波长650nm,技术成熟、检测速度快。

农药化工生产:耐腐压力变送器。用于草甘膦、吡虫啉等农药合成反应釜内压监控。主流产品采用电容式耐腐压力变送器,膜片材质为哈氏合金C-276,填充液为氟油,具备一定的耐腐能力。

涂料工业生产:在线粘度计。在线粘度计是涂料生产的核心监测设备,主要用于监控涂料的粘度参数,

不同类型涂料的粘度范围差异较大,若粘度偏差过大,会导致涂料附着力不足、色泽不均、施工性能变差,不合格率上升。主流产品采用旋转式在线粘度计,材质为不锈钢或普通PTFE,适配单一类型涂料的监测。

传统传感器虽能满足基础的实时监测需求,支撑生产线的正常运转,但其在技术性能、适配能力、数据利用、维护成本等方面的核心短板日益凸显,已成为制约精细化工行业高端化升级的重要瓶颈。

适应性不足,难以匹配多品种生产切换需求。精细化工的核心特性是“多品种、小批量”,一条生产线往

前沿技术与传感器融合

AI算法+传统传感器:提升小批量生产精准度。

AI算法的优势是“数据补偿、干扰识别、趋势预测”,与传统传感器的监测功能融合,无须更换传感器硬件,仅通过算法优化,就能解决测量精度不足、抗干扰能力弱、误报率高的核心痛点,尤其适配中小型企业的小批量定制生产需求,性价比极高,是当前传感器智能化升级的“低成本突破路径”。

基于LSTM的医药中间体pH传感器数据补偿。针对传统玻璃电极pH传感器易受温度、有机介质影响,测量误差大、使用寿命短的痛点,利用LSTM神经网络的时间序列分析能力,对pH传感器采集的数据进行实时补

偿,实现高精度监测与使用寿命延长。

随机森林算法优化激光颗粒传感器环境适应性。针对传统激光颗粒传感器对温度敏感、误报率高、需配套恒温机柜的痛点,通过随机森林算法识别温度干扰特征,对颗粒度检测数据进行实时修正,排除温度干扰,提升传感器的环境适应性,降低设备投入成本。

物联网+多传感器:实现多品种生产协同监控。

涂料厂多参数传感器网络与MES系统集成。针对传感器校准慢、数据不互通、切换效率低的痛点,搭建多参数传感器网络,与企业MES系统深度集成,实现涂料生产的协同监控、自动校准、品种快速切换。

农药厂耐腐传感器云平台:远程监控与维护。针对人工每月校准、维护成本高、安全风险大的痛点,搭建耐腐传感器云平台,将所有耐腐传感器接入云端,实现远程监控、自动校准、老化预警、远程维护,降低人力成本,防范安全风险。

新型材料传感器:突破强腐蚀、高纯度场景限制。

传统传感器材质性能不足,无法适配精细化工的强腐蚀、高纯度、高黏性等极端生产场景。通过材质革新,就能实现传感器耐腐蚀性、稳定性、纯度兼容性的跨越式提升,适配电子化学品、医药中间体等高端细分领域的严苛需求,是传感器高端化升级的核心路径。

精细化工传感器市场规模与用量预测

2024年,全球精细化工传感器呈现稳步增长的态势,市场规模约32.5亿美元,同比增长7.8%,增长动力主要来自中国、北美、欧洲等国家和地区的高端精细化工领域需求增长。其中,医药中间体传感器需求增速达9.2%,是增速最快的细分领域;电子化学品传感器需求增速达8.7%,紧随其后;农药化工、涂料工业传感器需求增速分别为6.3%和5.9%,增速相对平缓。

中国作为全球最大的精细化工生产国和消费国之一,2024年精细化工传感器市场规模约8.6亿美元,占全球市场的26.5%,同比增长9.5%,增速远超全球平均水平,成为全球市场

增长的核心引擎。

预计2027年,前沿传感器的渗透率将实现翻倍增长,逐步替代传统传感器,成为高端细分领域的主流产品。

AI融合传感器。2024年,中国AI融合传感器市场规模约0.9亿美元,主要应用于医药中间体(占40%)和电子化学品(占30%),其余应用于农药化工、涂料工业等领域。当前,AI融合传感器的渗透率呈现“大型企业领先、中小型企业滞后”的格局;大型精细化工企业的渗透率达20%,已广泛应用于核心生产线的参数补偿、误报排除、趋势预测;中小型企业企业的渗透率仅达5%,主要原因是成本因

素,仅在核心环节部署。

预计2027年,AI融合传感器的国内市场规模将达1.8亿美元,实现翻倍增长,渗透率将大幅提升;电子化学品领域渗透率达35%,医药中间体领域渗透率达30%,农药化工、涂料工业领域渗透率分别达18%和15%;渗透路径将从大型企业向中小型企业延伸,随着成本下降,中小型企业将逐步扩大AI融合传感器的采购规模,实现“低成本智能化升级”。

新型材料传感器(SiC、石英等)。2024年,中国新型材料传感器市场规模约0.7亿美元,主要应用于电子化学品、高端医药中间体等高端

细分领域,因成本较高,渗透率相对较低;电子化学品领域渗透率达15%,医药中间体领域渗透率达10%,农药化工、涂料工业领域渗透率不足5%。

预计2027年,随着新型材料的规模化生产,新型材料传感器的成本将下降30%,市场规模将达1.6亿美元,渗透率实现翻倍增长;电子化学品领域渗透率提升至30%,成为主流传感器类型;医药中间体领域渗透率提升至20%,逐步替代传统玻璃电极pH传感器、荧光溶氧传感器;农药化工领域渗透率提升至12%,主要用于强酸强碱介质的监测;涂料工业领域渗透率提升至10%。

智能化水平现状与瓶颈

随着智能传感器的技术突破和市场渗透,我国精细化工行业的传感器智能化水平逐步提升,但由于企业规模差异、技术投入差异、人才储备差异等因素,行业智能化发展呈现“两极分化”的格局。

大型精细化工企业:智能化试点领先,逐步实现规模化推广。大型精细化工企业资金实力雄厚、技术储备充足、人才队伍完善,是传感器智能化升级的“先行者”,其智能化发展方向契合未来精细化工高端化、智能化转型要求,当前智能化水平已达到较高层次,逐步实现“监测+优化+维护+安全”的全流程智能化管控。

中小型精细化工企业:智能化起步滞后,仅实现基础监测升级。中小型精细化工企业,资金实力薄弱、技术储备不足、人才短缺,是传感器智能化升级的“滞后群体”,当前智能化水平仍处于“初级阶段”,仅能实现基础的实时监测,无法实现数据优化、远程维护等高端功能。

同时,无论大型企业还是中小型企业,都面临着技术、成本、标准、人才等多重瓶颈,这些瓶颈并非单一企业能够破解,需要行业、企业、科研院所

协同发力,才能实现突破。

技术瓶颈:适配性、融合度、稳定性不足。一是多介质适配性不足。二是算法与工艺融合不深。三是低功耗与稳定性矛盾。

成本瓶颈:采购、集成、运维成本居高不下。一是高端传感器采购成本高。二是系统集成成本高。三是运维成本高。

标准与生态瓶颈:不统一、不安全、不协同。一是行业标准不统一。不同传感器供应商的通信协议、数据格式、技术参数标注不统一,导致多品牌传感器难以实现互联互通。二是数据安全标准缺失。当前行业缺乏针对传感器数据传输、存储、使用的安全标准。三是产业链协同不足。传感器供应商、算法开发商、精细化工企业、高校科研院所之间,缺乏深度协同。

人才瓶颈:复合型人才短缺,中小企业吸引力不足。我国精细化工行业的从业人员,多擅长工艺管控;而物联网、AI行业的从业人员,多擅长技术研发,不了解精细化工的生产工艺和传感器的应用场景。两者脱节,导致复合型人才短缺。二是中小企业人才吸引力不足。三是人才培养体系不完善。

突破路径与发展建议

当前,精细化工传感器智能化发展虽面临技术、成本、标准、人才等多重瓶颈,但在“十四五”规划高端化、智能化、绿色化发展政策的引导下,通过技术创新、成本控制、标准建设和人才培养等多方面举措,有望实现突破。

在技术突破路径方面,建议一是研发多介质适配型智能传感器。在传感器敏感元件表面涂覆多层复合涂层,提升传感器耐强酸、强碱、有机溶剂的能力,实现多介质适配。采用模块化结构,针对不同介质环境更换相应的传感模块,无须更换整个传感器。二是推进算法与工艺深度融合。由行业协会牵头,联合精细化工企业、高校、科研院所,建立不同细分领域的工艺数据库,涵盖反应参数、介质特性、传感器数据等核心信息,为AI算法训练提供精准数据支撑。针对医药中间体、电子化学品等不同细分领域的特殊工艺,开发定制化AI算法。三是优化低功耗与稳定性设计。研发适配恶劣环境的低功耗MEMS传感器芯片,降低传感器功耗,同时提升信号传输稳定性。在生产车间部署无线充电设备,为物联网传感器提供持续供电。

在成本控制方面,建议一是规模化降本。由国家相关部门牵头,制定智能传感器行业标准,统一通信协议、数据格式和核心零部件规格,实现规模化生产。传感器供应商与精细化工企业签订长期合作协议,批量采购降低采购成本,供应

商与原材料企业协同,优化原材料采购渠道。二是分阶段智能化改造。中小型企业可先对核心生产环节的传感器进行智能化升级,再逐步扩展至其他环节。同一区域的中小型企业可联合搭建共享的传感器云平台,共同承担平台建设和运维成本。

在标准与生态建设方面,建议一是制定智能传感器技术标准,明确不同细分领域智能传感器的技术参数、性能要求、测试方法等。制定传感器数据通信协议标准和数据安全标准,要求传感器数据传输采用加密技术,存储采用权限管理模式,保障数据安全。二是构建协同发展生态。由政府牵头,联合传感器企业、算法开发商、精细化工企业、高校科研院所,建立产学研用合作平台,开展关键技术联合攻关。培育专业的第三方技术服务机构,为中小企业提供传感器选型、系统集成、运维等一站式服务。

人才培养是强化高端制造业提升的核心需求,建议一方面在高校开设“精细化工+物联网”“精细化工+AI”等复合型专业课程,培养既懂工艺又懂技术的复合型人才。高校与精细化工企业、传感器企业合作建立实训基地,让学生参与实际智能化改造项目。另一方面,企业定期组织员工参加物联网、AI技术培训,提升现有员工的技术水平。企业出台优惠政策引进高端复合型人才,对内部技术创新人员给予奖励,激发员工创新积极性。