

传感器如何赋能石化产业?

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

石化产业作为国民经济的支柱产业,其上游产业链(采油、输油、炼油)的稳定高效运行直接关系到能源安全与经济发展。近年来,随着石化产业向智能化、高效化升级,上游采油、输油、炼油环节对传感器的依赖已从基础监测转向传统与前沿融合赋能,智能化改造、绿色化转型已成为石化行业的核心发展方向。传感器的角色已从传统的基础数据采集工具升级为传统设备与前沿技术融合赋能的核心载体。

采油环节传感器应用:传统基石与AI赋能

采油环节作为石化上游产业链的起点,涵盖勘探、钻井与完井、采油三大核心阶段,面临高温、高压、强腐蚀、环境复杂等诸多挑战。传统传感器凭借成熟的技术、稳定的性能,成为保障该环节稳定运行的核心支撑;而AI技术与传统传感器的融合,则进一步提升了采油效率与运行安全性。

传统核心传感器应用

勘探阶段:陶瓷地震传感器。油藏勘探是采油环节的前置核心环节,其核心需求是精准定位地下油藏分布,减少勘探盲目性,降低勘探成本。陶瓷地震传感器作为该阶段的核心设备,凭借其优异的机电转换性

能,成为油藏构造反演的关键工具。

钻井与完井阶段:铠装耐高温压力传感器。该阶段的核心需求是实时监测井下钻井液压力、套管压力,及时预警井喷、井漏等安全事故,保障作业安全。铠装耐高温压力传感器凭借其优异的耐高温、耐高压、抗腐蚀性能,成为该阶段的核心监测设备。

采油阶段:电磁流量传感器。核心需求之一是精确计量注水流量(水驱采油工艺的核心参数),通过优化注水强度,提高原油采收率。电磁流量传感器凭借其抗干扰能力强、测量精度高、不易受介质含沙量影响等优势,成为注水流量计量的首选设备。

AI与传统传感器融合升级

基于随机森林算法的抽油机载荷传感器数据校准。

抽油机是采油阶段的核心设备,其运行状态直接影响采油效率与设备的使用寿命。抽油机载荷传感器是监测抽油机运行状态的关键设备,但在实际运行中,易受含沙原油冲刷、机械振动、温度变化等因素影响,数据误差 $\pm 3%$,导致抽油机冲程、冲次调节不准确,造成能耗浪费或设备损坏,这是传统监测模式的核心痛点。

针对这一问题,采用AI与传统传感器融合的升级方案:构建随机森林回归模型,选取抽油机历史运行数据进行模型训练。能够通过识别不

同干扰因素的特征,实时对传感器输出数据进行校准,修正干扰因素带来的测量误差。

AI驱动井下传感器故障预测系统。井下传感器部署环境恶劣,更换需进行停井作业,而单井停井一天损失原油约20吨。传统人工巡检模式难以及时发现传感器故障,导致非计划停机频繁。

AI驱动的井下传感器故障预测系统为解决这一痛点提供了有效路径:基于LSTM(长短期记忆)神经网络构建故障预测模型,采集井下传感器近3年的运行数据,并划分正常、亚健康、故障前兆、故障四个状态标签,训练模型识别故障前兆特征。

输油环节传感器应用:传统监测与前沿技术协同

输油环节作为连接采油与炼油的桥梁,涵盖管道运输、站场运维等核心场景,其核心需求是保障原油输送的安全、高效,减少泄漏损失与环境污染。传统传感器通过流量、压力监测保障基础运行,而分布式光纤、物联网等前沿技术与传统传感器的协同,正推动输油环节监测从单点监测向网络监测、被动响应向主动预警升级。

传统核心传感器应用

管道运输:电磁流量计+差压变送器组合。管道运输是输油环节的核心方式,其核心需求是精准计量输油

流量,确保输送效率;同时监测管道前后端压力差,及时判断管道是否堵塞或泄漏,保障输送安全。电磁流量计与差压变送器的组合,成为管道运输监测的经典方案。

管道泄漏监测:声波传感器。管道泄漏监测的核心需求是及时检测微小泄漏,减少原油损失和环境污染。声波传感器凭借其对泄漏产生的机械声波的敏感识别能力,成为传统泄漏监测的核心设备。

输油站场安防:红外热像仪+RFID门禁传感器。输油站场是输油环节的核心枢纽,其安防需求主要包

括两方面:一是监测输油泵、阀门等关键设备的温度异常,预防设备过热烧毁;二是管控站场人员进出,防止非法操作。红外热像仪与RFID门禁传感器的组合,成为站场安防的核心方案。

前沿技术融合应用

分布式光纤传感器+CNN(卷积神经网络)泄漏定位。针对传统声波传感器定位精度低、抗干扰能力弱,结合分布式光纤传感器的长距离监测优势和CNN的信号分类能力,构建分布式光纤传感器+CNN的泄漏定位方案,实现泄漏监测性能的大幅

提升。

技术方案主要包括三个核心环节:一是传感器部署,二是信号采集,三是AI算法优化。

声波传感器网络与物联网(IoT)平台集成。传统声波传感器数据仅进行本地存储,无法实现远程监控和联动处置,导致泄漏响应时间长,泄漏损失较大。声波传感器网络与物联网平台的集成,为解决这一问题提供了有效路径。

技术方案主要包括三个核心环节:一是传感器组网,二是平台集成,三是联动机制。

炼油环节传感器应用:传统工艺控制与智能优化

炼油环节是石化上游产业链的核心终端环节,通过复杂的工艺将原油转化为汽油、柴油、煤油等高附加值产品。该环节的核心需求是精准控制工艺参数,提升产品质量与收率,同时满足环保排放要求。传统传感器支撑着工艺参数的基础监测,而AI技术与传统传感器的融合,则实现了工艺参数的智能优化,进一步提升了炼油效率与产品质量。

传统核心传感器应用

原油预处理:密度传感器+含水量传感器。原油进入炼油厂后,需先进行预处理,为后续蒸馏、催化裂化工艺提供合格原料。该阶段的核心需求是测量原油密度和含水量,密度传感器与含水量传感器的组合,成为原

油预处理的核心监测方案。密度传感器机理是通过测量振动管在不同密度介质中的振动频率,计算原油密度。含水量传感器的敏感机理是利用微波在原油中传播时,水分子对微波的吸收作用测量含水量。

催化裂化装置:铂铑热电偶温度传感器。催化裂化是炼油环节的核心工艺之一,通过催化剂将重质油转化为汽油、柴油等轻质产品。该工艺的核心需求是精准控制反应温度,反应温度直接影响汽油产率和催化剂使用寿命。铂铑热电偶温度传感器凭借其优异的耐高温性能和测量精度,成为催化裂化反应温度监测的核心设备。

分馏塔:雷达液位传感器。分馏塔是炼油环节的核心分离设备,通过

精馏分离汽油、柴油、煤油等组分。该设备的核心需求是精确监控各组分液位,避免溢罐或抽空。雷达液位传感器凭借其测量精度高、抗干扰能力强等优势,成为分馏塔液位监测的核心设备。

AI与传统传感器融合升级

基于BP神经网络的分馏塔组分纯度优化。分馏塔内汽油、柴油等组分的纯度受温度、压力、液位、进料量等多参数耦合影响。传统PID控制方式仅能实现单参数调节,难以实现多参数协同优化,导致组分纯度波动大,这是传统分馏工艺控制的核心痛点。

基于BP(反向传播)神经网络的分馏塔组分纯度优化方案,为解决这一问题提供了有效路径。该方案构建

BP神经网络模型,选取以下传感器实时数据作为输入层参数:一是铂铑热电偶温度传感器数据;二是压力传感器数据;三是雷达液位传感器数据。模型输出层为汽油纯度、柴油纯度预测值,通过对比预测值与目标值,反向调节进料量、回流量、加热温度等参数,形成闭环控制。VOCs传感器与AI环保预警联动系统。炼油厂罐区、装卸区VOCs(挥发性有机物)排放具有间歇性,传统人工采样监测存在明显滞后性,易出现超标排放问题。VOCs传感器与AI环保预警联动系统,为解决这一问题提供了有效路径。该系统的技术方案主要包括三个核心环节:一是传感器部署,二是AI预警模型,三是联动处置。

石化上游传感器市场规模与需求分析

随着石化上游产业链智能化转型的推进,传感器市场呈现稳步增长态势。全球与中国市场规模持续扩大,采油、输油、炼油各环节需求结构清晰,AI融合传感器等前沿产品成为增长核心动力。

全球与中国石化传感器整体市场规模

从全球市场来看,2024年全球石化传感器市场规模约87.6亿美元,同比增长6.2%。

从中国市场来看,2024年中国石化传感器市场规模约21.3亿美元,占全球市场的24.3%,同比增长8.5%,增速高于全球平均水平,成为全球市场增长的核心引擎。

中国石化传感器市场增速全球领先,核心得益于三大增长动力,且该动力并非短期脉冲式增长,而是长期可持续的结构性增长,将支撑

2024—2027年市场持续高速增长。

一是政策驱动。工信部等六部门印发《关于“十四五”推动石化化工行业高质量发展的指导意见》,推进智能工厂建设,加快传感器、控制器等智能装备应用。在政策引导下,国内大型石化企业2024年智能化改造投入合计超500亿元,其中传感器采购占比约10%,政策红利直接带动传感器需求增长。同时,环保管控趋严,炼油环节VOCs监测、输油环节泄漏监测等环保类传感器需求快速增长,2024年环保传感器占中国石化传感器市场的18%,规模约3.83亿美元。

二是替换需求。国内石化行业传感器平均使用寿命为5~8年,2024—2027年将进入集中替换期。数据显示,2024年国内石化传感器替换量约50万台,预计2027年将增至80万台,替换需求将成为市场增长的稳定支撑。

三是新增产能。2024年国内新增炼油产能1500万吨/年,新增油气探明储量10亿吨,新增产能带动新增传感器需求约3.2亿美元。按照行业经验,每万吨炼油产能需配套传感器约20万元,未来新增产能的持续释放,将进一步推动传感器需求增长。

前沿传感器需求增长预测与成本分析

AI融合传感器。2024年国内AI融合传感器市场规模约2.3亿美元,主要应用于四大场景:管道泄漏AI定位(占比35%)、抽油机AI优化(占25%)、分馏塔AI控制(占20%)、VOCs AI预警(占20%)。

增长预测显示,2024—2027年AI融合传感器市场复合增长率达15.8%,2027年市场规模将增至4.1亿美元。增长动力主要来自两方面:一是AI算法成熟度提升,优化效果显

著,企业应用意愿增强;二是成本下降,推动规模化应用。

成本变化方面,随着算法成熟和规模化应用,AI融合传感器模块成本从2023年的2000元/套降至2024年的1500元/套,预计2027年降至800元/套。与传统传感器的成本差距从3倍缩至1.5倍,将进一步提升中小企业的用量积极性。

量子传感器。当前量子传感器处于试点阶段,目前成本较高,约为传统井下压力传感器的5倍,制约了规模化应用。市场预测显示,预计2028年后量子传感器将逐步突破成本瓶颈,批量生产后成本降至传统传感器的2倍;2030年市场规模有望达1.2亿美元,占石化传感器市场的3%,将在深海钻井、高温炼油等极端场景实现规模化应用。

上游产业链智能化水平现状

随着智能化转型的推进,石化上游产业链传感器智能化水平逐步提升,但不同规模企业之间存在显著差异,大型企业领跑,中小型企业滞后。

从传感器联网率与数据利用情况看,大型石化企业智能化水平领先:传感器联网率方面,采油环节达85%以上,输油环节达90%,炼油环节达95%,实现了核心环节传感器数据的全面联网。数据利用率约40%,传感器数据不仅用于实时监测,还部分用于智能分析与工艺优化。

中小型石化企业智能化水平滞后:传感器联网率普遍低于60%,部分老旧设备仍采用人工读数,数据传输延迟达数小时。数据利用方面存在明显的“数据孤岛”问题,不同厂家传感器数据格式不统一,难以集成分析;同时数据存储周期短,无法用于长期趋势分析,数据利用率不足5%。

制约数据利用的关键因素有两方面:一是硬件限制,部分传统传感器不支持高频数据传输,无法满足AI模型对高频数

据的需求,限制了AI技术的应用效果。二是软件短板,缺乏统一的数据中台,企业内部SCADA系统、MES系统、ERP系统数据不互通,需投入额外成本进行数据清洗和集成。

然而,石化行业传感器智能化发展仍面临硬件性能、数据利用、标准体系等多重瓶颈,制约了智能化水平的全面提升。

技术层面瓶颈:一是传感器硬件性能瓶颈,极端环境下的传感器性能不足,进口依赖度较高。二是AI模型泛化能力弱,目前AI模型多针对单一场景开发,增加了企业的实施成本和周期。

成本层面瓶颈:一是前沿技术部署成本高。二是系统集成成本高,企业升级积极性不高。

标准与人才层面瓶颈:一是行业标准不统一,智能传感器的通信协议、数据格式、校准规范缺乏统一标准,不同厂家产品无法兼容。二是专业人才匮乏,智能化转型需要兼具石化工艺知识、传感器技术和AI算法能力的复合型人才。

未来发展趋势与行业建议

未来,随着传感器硬件性能升级、技术融合深化、全域物联网构建及环保需求爆发,石化上游传感器行业将迎来高质量发展期。

传感器硬件:极端环境性能升级与本土化发展加速。未来5~10年,石化上游传感器将向更耐高温、耐压、抗腐蚀性升级,以适应深海钻井、超深层勘探等极端场景。同时,本土化发展进程将加速,随着国内企业在核心材料、精密制造工艺上的突破,高端传感器进口依赖度将降低。

技术融合:AI与传感器深度融合,实现全链路智能闭环。AI技术将与传感器实现更深度融合,从“单场景优化”向“全链路协同”升级。同时,边缘计算技术将广泛应用于传感器数据处理,实现数据本地实时分析与快速响应,降低云端传输压力和延迟。

网络架构:从“局部联网”向“全域物联网”升级。随着5G、LoRa等通信技术的发展,石化上游产业链将构建全域物联网架构,实现采油、输油、炼油各环节传感器的全面联网与数据互通。大型企业将打造“空-天-地-井”一体化监测网络,结合卫星遥感、无人机巡检与井下传感器数据,实现油气田全域覆盖监测;中小型企业将依托行业网络,实现油气田全区域覆盖监测;中小型企业将依托行业网络,实现油气田全区域覆盖监测;中小型企业将依托行业网络,实现油气田全区域覆盖监测。

应用场景区:绿色低碳导向下的环保传感器需求爆发。在“双碳”目标驱动下,环保监测将成为传感器应用的核心增长场景。除了现有VOCs监测,温室气体传感器、土壤/水体污染监测传感器的需求将快速增长。同时,传感器将与碳足迹追踪系统结合,为石化企业提供全生命周期的碳排放数据支撑。

建议通过加大核心技术攻关,完善标准体系,差异化推进智能化转型。大型企业应发挥引领作用,加大智能化改造投入,打造智能油田、智能工厂标杆项目,为行业提供可复制的经验。中小型企业应采取“分步实施、循序渐进”的策略,优先升级关键环节的传感器,依托行业共性云平台实现基础数据联网与分析,降低初期投入成本。

人才培养层面,完善人才培养体系,缓解复合型人才缺口。一是高校应增设交叉学科专业,培养兼具石化工艺、传感器技术、AI算法知识的复合型人才。二是企业应加强内部培训,提升现有员工的专业能力。三是优化人才激励机制。

政策支持层面,精准施策助力转型,强化政策引导与保障。政府应进一步细化相关配套政策,对中小型企业智能化改造给予专项补贴,降低融资成本;建立绿色低碳传感器应用激励机制,对部署环保监测传感器并实现达标排放的企业给予奖励。