

智能监测仪表在石油化工管道泄漏检测中的应用

张玉恒

中石化石油工程设计有限公司 山东东营 257000

摘要: 石油化工管道一旦发生泄漏, 极易造成重大的安全事故和环境污染。智能监测仪表以其智能化、实时性和自动化等优点, 逐渐取代了常规监控方法。以此为背景, 文章对智能监测仪表的关键技术的支持和功能进行分析, 从多源信息融合预警、全生命周期维护和技术升级优化四个维度, 分别从技术、经济和安全多个维度阐述其实际应用。并对其实施成效进行评价, 对已有的技术优势和不足进行分析和预测, 以期促进石油管道安全和智能化管理。

关键词: 智能监测仪表; 石油化工管道; 泄漏; 检测质量

石化工业是我国经济发展的重要基础, 而管道作为输送原油、天然气和危险化学品的重要媒介, 其输送距离远, 分布广, 工况复杂。根据产业数据, 由于腐蚀、老化和第三方损坏等原因导致的原油泄漏事件时有发生, 给周围的生态和人民的生命财产带来巨大的危害。常规的管道渗漏探测方法, 包括人工巡检、定期压力测试等, 存在检测速度慢、覆盖范围窄、依靠人工经验、不能识别微小渗漏等不足, 已经不能满足当前石化管道高密度、高风险和高要求的安全管控要求。随着传感器技术、人工智能和工业互联网等技术的飞速发展, 智能监测仪器因其具有实时监控、自动识别和精确定位等优点, 可以很好地解决常规监测手段的缺陷。

一、智能监测仪表的核心技术支撑以及在石油化工管道泄漏检测中的作用

(一) 技术支撑

针对石化管道内高压、高温、远距离、易燃易爆介质等苛刻条件, 智能监测仪表以关键技术支持为基础, 实现对石化管道泄漏的有效监控, 是确保管道安全稳定的关键。智能监测仪表将压力、流量、介质组分等多维信息进行集成, 采用信息串联和相互校验的方法, 解决单个参量的错误识别问题, 实现流量突变和压力陡降的联合分析, 提高浓稠原油管线的泄漏检测的可信度^[1]。在此基础上, 研究基于边缘计算的工业互联网和边缘计算, 对监控信息进行实时传输、局部快速分析和分层预警, 规避因云传输时延而引发的安全隐患。

(二) 在石油化工管道泄漏检测中的作用

智能仪表可以实现对石油化工管线的泄漏精确报警和定位, 将反应速度降低到秒量级, 将位置精度提高到

米量级, 从而克服了传统手工巡检存在的“滞后性”和“盲区”, 特别适合于石油化工生产区域的管线和海洋平台的高风险管线^[2]。在大范围泄漏发生之前进行预防和控制, 通过对微小泄漏的及时发现, 防止泄漏演变成爆炸和环境污染等严重安全问题, 减少原油和危险化学品泄漏带来的环境污染和财产损失, 提高管道运维效率, 通过对运行过程中的状态进行预测, 降低运行中断次数, 提高运行效率, 满足长距离输送管线等偏远地区运行维护的需要, 为油气管线的全寿命运行管理奠定基础。

二、智能监测仪表在石油化工管道泄漏检测中的应用措施

(一) 适应应用场景的精准化仪表选型

准确选择和布置仪表是保证泄漏检测有效性的前提, 需要对石化管道的介质特征和工作状态进行严密的调查和布置^[3]。对于石油等高粘度介质管线, 优先采用差压式流动检测装置和分布式光纤振动监测装置相结合的方式, 通过流动突变和振动信号的联合校验, 提高探测的可靠性, 以满足石油化工领域的相关标准。分区差别布局需要考虑到各种管线情景的特点和危险程度, 具体见表1。

根据表格看出, 仪器设备的安全保护需要重点解决三个关键问题: 防爆、防腐和抗干扰。防爆要求: 在发生爆炸的高危场所(例如: 工厂甲类车间和海上平台作业区)使用防爆式仪器, 仪器连接箱应选择耐冲击的密封连接件, 以防止因线路产生的火花引起的安全事故; 防腐部分: 针对沿海地区和盐碱地地区, 采用热镀锌工艺, 在传感器探针上涂上防腐涂层, 并定期检测涂层的完整性; 在抗干扰上, 拟采取屏蔽电缆铺设和信号

表1 不同管道场景的监测仪表选型

管道区域类型	区域核心特征	适配仪表类型	部署要点
长输管道	距离长（数十至数百公里）、穿越沙漠/山区等无人区、环境干扰复杂	分布式光纤传感系统、北斗定位同步的压力监测仪	光纤沿管道伴行敷设，每50公里设置1个信号中继站；压力监测仪部署于泵站进出口，采样频率 $\geq 10\text{Hz}$
厂区管道	管道密集、设备交错、介质种类多、人员流动频繁	点式光纤传感器、红外热成像仪、特异性气体传感器	在阀门、法兰等泄漏高发点加密部署，间距 ≤ 10 米；红外热成像仪覆盖储罐罐区与管廊交汇点，实现24小时可视化监测
海上管道	高盐雾、高压、潮湿、维修难度大	耐盐雾声学监测仪、防水型压力变送器、光纤光栅传感器	仪表外壳采用316L不锈钢材质并做阳极氧化处理；数据传输采用海底光缆，部署冗余备份节点

接地等措施，降低冶炼车间内电动机的电磁干扰，并利用自适应滤波器对外界干扰信号进行过滤，以保证检测结果的精度。

（二）建立基于多源信息的信息融合及智能化预警体系

建立多类别仪表间的联动获取机理，对整体监控具有重要意义，需要基于工业互联网（IIoT）建立全链条的数据收集网络，并结合实际应用实例进行验证^[4]。以一家大型石油化工企业为例，采用红外光谱图像识别方法，对甲烷、乙烷等可燃气体进行在线探测，其探测准确度达到0.01%VOL，反应速度为3s，并与罐区的压力传感器进行对接，从而达到“能谱图像—压力—液面”三源量的同步获取。在数据收集方面，利用“边界计算+云计算协作”的方式，由边缘节点对所收集的多源数据进行预处理（包括异常数据剔除、标准化等），并将其通过5G专用网络传送到云服务平台，保证数据的实时和稳定，且传输时延不超过50ms。针对不同的泄漏事故类型，进行分级的报警标准和应急预案。根据泄露量、扩散速度和介质危害程度，将其划分为1级（轻微泄露，泄露量小于0.1 m³/h），临界值设置为流量波动 $\pm 5\%$ ，压力波动小于0.1 MPa。2级警报（显著泄露，0.1 m³/h以下，泄露小于1 m³/h），临界值设置为流量波动 $\pm 10\%$ ，压力波动0.1–0.5 MPa，触发区域视频监控，维护人员30分钟内到达现场处置；3级警报（严重泄露，泄露量 ≥ 1 m³/h）。警报临界值设置为：流量波动 $\geq 15\%$ ，压力变化 ≥ 0.5 MPa，或燃气含量超过20%。

（三）智能监测仪表运维使用管理

在石油化工行业中，生产运行涉及到众多的仪表设备协调工作，现场仪表设备长年累月不间断的工作，必然会出现各种的设备故障，仪表设备故障的发生会影响

到整个生产运行的安全。根据国家有关的石油化工工业标准（GB/T26249–2010）和《石油化工管道泄漏检测与修复技术规范》的规定，制订仪器的周期校验和运行试验规程^[5]。无偏差标定时间：压力和流量仪表半年一次的标定，使用标准型压力源和流量标准器进行标定。在有腐蚀性的条件下，仪器的标定时间可减少到3个月。对仪表型号、校准时间、校准数据、校准人员等进行了详尽地记录，以保证校准过程的可溯源性。该设备的性能检验采取“在线检验+离线检验”相结合的方式，即对正在使用的仪器进行在线检验，对拆解后的仪器进行离线完全检验，及时淘汰老化和精度不达标的仪器。仪表监控系统的硬件和软件的周期性维修和更新需要建立长效的制度。在硬件维修上，保护外壳的完整性和连接的稳定性，每个月都要对仪器探头上的灰尘和油污等杂物进行清洗，每个季度都要对数据采集终端和传输设备进行一次彻底的维修，以保证硬件设备的正常工作。在软件的维护上，每个月进行漏洞检测和杀毒工作。故障后的紧急处理和备份还原机制需要监控的连续性和数据的安全。

（四）技术升级与场景适应性优化

瞄准产业发展的前沿，选择典型管线应用进行试验研究，如在长距离管线中进行试验，可达到单米量级的精确位置，比常规的分布式光纤定位精度提高5倍。将气敏传感器用于化工园区内，以其小尺寸、低功耗的优势，以提高复杂管道监控的覆盖率。通过试验，构建识别精度、定位误差、运行稳定性等性能评价指标，并对试验中出现的问题（如：强电磁环境下分布式天线的信号干扰等）进行工艺改进。针对复杂工作环境下监控准确性提高的研究与开发，需要针对产业难点问题展开研究。以高粘性石油管线为例子，研发基于超声导波技术

的监测仪表，通过声波在管线中的远距离传输特征，实现低流量条件下的泄漏辨识。

三、智能监测仪表在石油化工管道泄漏检测中的应用效果以及未来发展方向

(一) 应用效果核心评估指标

智能监测仪表在石油化工管道泄漏检测中的应用效果，需通过多维度指标体系科学评估，精度指标方面对于石油等粘性液体，其测量准确度一般要求在 $0.1 \text{ m}^3/\text{h}$ 或更高的范围内，而对于气态介质，测量准确度要求在 $0.01\% \text{ m}^3/\text{h}$ 。响应速度指标中：反应速度要与危险特征相适应，长距离输送管线监控的反应速度要小于 10s ，厂区危险路段要小于 3s ；长距离输送管线的位置精度要求在 5 m 以内，而在工厂的高密度管线中要求在 1 m 以内，以保证操作人员能够迅速找到泄漏位置^[6]。经济性指标中：侧重于工程造价收益均衡，渗漏损耗减少速率为其主要定量标准，通过对实施前、后管线渗漏和介质损耗量的比较，在工业精品工程项目中，此项指标可以达到 85% ；监控体系的投资—输出比例需要覆盖设备购置和安装维护的整个过程，并考虑到泄露的经济损失、环境治理和停产损失等因素，在一个成熟的使用环境中，其初期投资一般可以在 $3\text{--}5$ 年内收回。

(二) 现有应用的不足

部分新型智能监测仪表限制了它的大规模普及，分布式光纤和高精度声学监控等的前期购置和建设费用高昂，使得中小型石油化工企业很难完全承担。在恶劣的温度条件（ -40°C ）、高温（高于 120°C ）或高盐雾和强电磁干扰等条件下，某些仪器的测量结果容易出现误差。由于存在着多介质兼容性差，单个仪器很难满足原油、天然气、酸碱、危险化学品等不同介质的探测需要，且需要配备各种仪器，导致系统复杂性和维护费用高。

(三) 智能监测仪表的改进方向

在技术上重点研究人工智能算法的融合与优化，扩

大漏点检测的样本量，并结合深度学习等方法，提高多个运行状态下的漏检精度。在此基础上，将卷积神经网络在空域信息抽取和短时记忆网络时序分析上的优点相融合，研究多方法的协作建模方法，对漏损信息进行精确判断。仪器的设计思路清晰，小型化，低功耗，多参数集成是其发展的重要方向。小型化仪器可以在工厂内形成高密度的地下通道，而低能耗的方法可以满足不需要外部供电的长距离输送管线，而多参量综合仪器可以将压力、流量、介质组成等多个参量的融合，减少多介质管线仪器的布置费用。

结束语

将智能监测仪表用于石油管线泄漏探测，是石油化工产业安全管理向智能化方向发展的必然，其核心价值是通过科技创新解决现有检验手段存在的问题，建立“事前预警，事中处理，事后追溯”的完整的泄露防控系统。从理论支持走向实际，从影响评价到预测发展，通过智能化监控仪器的深入运用，可以有效提高管网渗漏探测的准确性和及时性。

参考文献

- [1] 李文才. 基于仪控状态监测平台的智能设备状态监测及诊断研究[J]. 办公自动化, 2025, 30(11): 14-16.
- [2] 许正祥. 人工智能算法在页岩气仪表监测与故障预测中的应用[J]. 石化技术, 2024, 31(09): 207-209.
- [3] 李洪滨. 基于在线诊断的智能工厂仪表巡检监测应用和探讨[J]. 天津化工, 2023, 37(S1): 12-14.
- [4] 沙云, 王玲, 徐中豪. 基于LoRa无线通信远程监测系统的设计与应用[J]. 水泥工程, 2023, (05): 59-64.
- [5] 王艳萍. 人工智能仪表在实验监测控制中的应用[J]. 电子技术, 2023, 52(07): 258-259.
- [6] 周丽霞. 在线分析仪表智能监测诊断系统在石化企业的应用[J]. 电工技术, 2023, (12): 101-105.