

化工工艺管道智能巡检与故障预警技术研究

孙 涛 史青姣 (山东杰瑞凯泰科技股份有限公司, 山东 青岛 266000)

摘要: 化工管道出现泄漏与腐蚀的情况会严重影响生产安全。智能巡检借助传感器、机器人以及红外热成像等技术来实时监测管道状态, 泄漏预警运用负压波和实时瞬态模型能够在 3min 内定位漏点。腐蚀监测采用超声测厚和电化学探针精度可达到 0.1mm, 且能预估管道寿命, 智能巡检机器人可在 -30℃ 至 60℃ 的环境下全天开展工作使效率提高 60%, 多源数据融合平台故障预警准确率能够达到 85%。该技术体系推动管道管理从被动应急转变为主动预防进而保障企业安全生产。

关键词: 化工管道; 智能巡检; 泄漏检测; 腐蚀监测; 故障预警

中图分类号: TQ055.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2026) 011-0114-03

Research on Intelligent Inspection and Fault Early Warning Technology of Chemical Process Pipes

Sun Tao, Shi Qingjiao (Shandong Jereh Kaitai Technology Co., Ltd., Qingdao Shandong 266000, China)

Abstract: Leakage and corrosion of chemical pipelines will seriously affect production safety. Intelligent inspection monitors pipeline status in real time with the help of sensors, robots, infrared thermal imaging and other technologies. Leakage early warning can locate the leakage point within 3 minutes by using negative pressure wave and real-time transient model. The accuracy of corrosion monitoring using ultrasonic thickness measurement and electrochemical probes can reach 0.1 mm, and the pipeline life can be estimated. Intelligent inspection robots can work all day in the environment of -30℃ to 60℃, improving efficiency by 60%. The fault early warning accuracy of the multi-source data fusion platform can reach 85%. The technical system promotes pipeline management from passive emergency to active prevention, thereby ensuring the safe production of enterprises.

Keywords: Chemical Pipeline; Intelligent Inspection; Leakage Detection; Corrosion Monitoring; Fault Early Warning

化工管道出现泄漏与腐蚀是生产安全方面重大隐患。智能巡检依靠传感器、机器人及红外热成像技术实现对管道状态实时监控。泄漏检测采用负压波与瞬态模型法能在泄漏后 3min 内精确进行定位。腐蚀监测借助超声和电化学手段精度可达到 0.1mm, 并能预估管道寿命, 巡检机器人能在 -30℃ 至 60℃ 环境中持续进行作业使效率提高 60%。数据融合平台可整合多元信息让预警准确率达到 85%, 该体系推动安全管理从被动应急转变为主动预防进而保障企业安全生产。

1 管道泄漏智能监测与预警技术

1.1 管道泄漏巡检传感器部署技术

为了全面监控化工管道的运行状况, 需要在关键节点合理部署传感装置来构建监测网络。压力传感器按照 500 至 1000m 的间距进行布设, 选用高精度压电式元件实时采集压力数据, 其毫秒级响应特性能够快速捕捉泄漏引起的压力异常。在容易发生泄漏的区域配置红外热成像设备, 通过介质与环境的温差变化来定位泄漏点, 对 0.1mm 孔径、0.03MPa 压力下的微小渗漏具备良好识别能力^[1]。采用分布式光纤传感技术, 沿着管道铺设感温光缆, 运用拉曼或布里渊散射原理实现温度与应变场的连续监测, 空间分辨率可达 1m 且可支持数十公里长距离覆盖。在阀门、法兰等高风险

部位安装超声波气体检测仪, 通过接收泄漏气体产生的超声波信号实现无接触式检测, 有效探测范围可达 20m^[2]。

1.2 管道泄漏智能识别方法

负压波法依靠管道两端压力传感器信号时间差来完成泄漏定位与检测, 系统会获取上下游测点的压力降落信号, 接着借助互相关函数去推算压力波传播的时间差, 再结合管内声波速度来确定泄漏点的具体位置, 此方法能在 0 到 3min 内对突发性大量泄漏作出反应^[3]。实时瞬态模型技术通过构建流体动力学方程描述管道运行状态, 通过对比实测流量和压力值与模型计算结果判断泄漏情况, 可识别超过瞬时流量 0.5% 的泄漏量。机器视觉识别技术使用红外摄像机拍摄管道外表面视频序列, 运用主成分分析方法提取图像特征向量, 基于 k-最近邻分类算法判断图像区域是否出现异常^[4]。模糊神经网络算法突破传统阈值判断局限, 通过学习历史泄漏特征样本构建智能识别模型。

1.3 管道泄漏预警模型构建

管道泄漏位置确定依靠负压波到上下游监测点时间差异和声波在介质中传播速率, 二者构成数学模型核心要素, 原理示意图见图 1。该方法定位精度受传感器采样速率、时钟同步精确性和波速测算准确度等

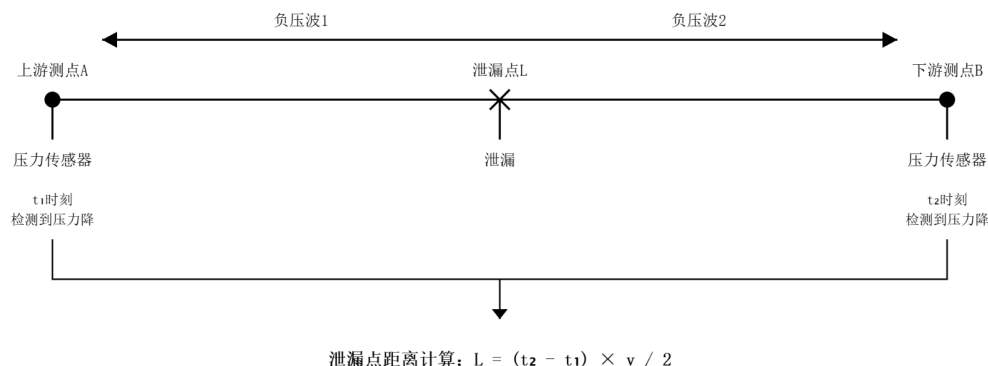


图1 基于负压波法的管道泄漏定位原理示意图

因素制约,严重泄漏时定位偏差能控制在数米至数十米区间内,轻微泄漏因信号强度不足定位误差可能扩大至500m以内。多参数融合预警机制整合压力、流量及温度等多源信息进行关联分析,设定适应工艺操作变化波动的动态预警标准。预警等级依据泄漏规模、介质危险程度和环境敏感度等指标划分为普通、重要和紧急三个级别^[5]。智能巡检机器人配备气体探测装置、红外热成像设备和高清摄像头等多种仪器,按预先规划路线执行泄漏检测任务,能在易燃易爆、高温高压和有毒有害等危险环境替代人工工作,工作温度覆盖范围为-30℃至60℃,防护等级高达IP65,借助SLAM技术构建环境地图实现自主移动与导航。

2 管道腐蚀智能监测与预警技术

2.1 管道腐蚀在线监测技术

超声波测厚技术依靠压电晶片换能器来生成超声波脉冲,通过耦合剂或者波导杆把声波传递到管道壁面,根据超声波发射和接收的时间间隔来推算管道壁厚,其测量精度能够达到0.1mm,传感器固定安装在管道外壁可实现不间断在线监测。电磁超声测厚技术借助电磁耦合方式激发超声波,不需要耦合剂就能在粗糙表面开展测量工作,适用于高温环境下的长期监测,其工作温度最高能够达到150℃。电感探针技术把导磁性金属片当作感应部件安装在管道内壁,金属片因腐蚀变薄会使电感值发生改变。

通过检测电感变化量来推算腐蚀速率,灵敏度达到30nm级别,适用于评估缓蚀剂效能以及优化工艺参数。电阻探针技术基于金属腐蚀会导致电阻增大的原理来测量腐蚀速率。电指纹技术通过在管道外壁焊接网格状电极组来实现监测,电极间距设置为壁厚的2-3倍,通过跟踪电极电位变化识别腐蚀造成的金属损耗,检测灵敏度可达剩余壁厚的0.1%。

2.2 管道壁厚智能评估方法

超声C扫描技术会让探头在管道表面做栅格状移动,同时记录位置编码信息,然后获取不同深度的二维声学图像,以此直观展现腐蚀缺陷形态、具体位置

及分布规律。管道内检测会使用漏磁检测设备或超声测厚仪,让其在管道内部随介质流动完成全面检查,漏磁检测方法通过磁化管道壁面捕捉因腐蚀缺陷产生的磁场变化,高精度设备在80%置信度区间内尺寸测量误差能控制在壁厚10%以内,超声测厚技术依据声波往返时长来推算管壁剩余厚度。管道内腐蚀直接评估方法依托工艺条件和气质分析数据构建多相流模型,进而推算出管道沿线流态分布、液体含量以及腐蚀速率,识别出高风险区域后通过开挖取样,用超声测厚仪对暴露出管段实施网格化壁厚检测。某储气库集输管线评估中7处开挖点最大壁厚损失为5.32%,验证了预测模型的准确性。

2.3 管道腐蚀预警与寿命预测

腐蚀速率计算采用短期腐蚀速率与长期腐蚀速率双指标评价体系,短期腐蚀速率根据相邻两次测厚数据与时间间隔计算得出,计算公式为:

$$V_s = \frac{d_p - d_a}{t_s} \quad (1)$$

式中: V_s 为短期腐蚀速率,mm/a; d_p 为某一位置的前一次测量厚度,mm; d_a 为同一位置的本次实测厚度,mm; t_s 为两次间隔时长,a。

长期腐蚀速率基于原始壁厚与当前壁厚的差值除以服役时长获得,计算公式为:

$$V_l = \frac{d_i - d_a}{t_l} \quad (2)$$

式中: V_l 为长期腐蚀速率,mm/a; d_i 为原始壁厚,mm; t_l 为 d_i 与 d_p 之间的间隔时长,a。

剩余寿命预测要同时考虑失稳压力和泄漏前时长这两个关键参数,失稳压力计算按照ASME B31G准则,根据腐蚀缺陷深度、尺寸以及管道材料力学性能评估承载能力,某地下储气库输气管道评估数据表明其失稳压力超出设计压力25MPa且预期使用寿命可达20年。腐蚀风险等级根据腐蚀发展速度、当前壁厚以及

流体腐蚀特性等指标划分为低、中、高三个级别，高风险管段巡检周期缩短至1-2年，中等风险管段采用3-5年检测间隔，低风险管段评估周期可延长至8年。智能化巡检装置通过感应探头，在每日固定时段采集腐蚀信息并计算均值，每月自动分析短期腐蚀趋势并出具腐蚀状况报告。

3 管道智能巡检与预警系统集成应用

3.1 管道智能巡检机器人系统

防爆巡检机器人会运用激光雷达和惯性导航技术来进行定位，它依靠激光扫描的方式构建出三维点云地图，并且借助SLAM算法实时更新自身所处位置与姿态，其定位精度能够达到厘米级别那样精准。机器人装备了可见光高清摄像头、红外热成像仪以及可燃气体探测器等多种设备，其中1080P可见光摄像头用于读取仪表数据和监测阀门状态，红外热成像仪可以识别管道表面出现的温度异常情况。它的路径规划系统能够依据管道布局和巡检要求自动制定最优路线，结合激光雷达与视觉信息实现智能避障功能。多机器人协同工作由中央调度系统统一分配相应任务，单平台最多支持32台机器人同时进行分区作业，巡检工作完成之后便会自动返航充电以确保全天候运行，该机器人已经通过11项防爆认证，具备IP65防护等级，可以在-30℃至60℃的环境当中稳定开展工作。

3.2 管道安全监控数据融合平台

监控平台是按照四层架构来进行构建的，感知层配置了压力传感器、温度传感器、流量计、腐蚀探针以及巡检机器人等设备，目的是用于组建数据采集网络，网络层采用GPRS/4G无线通信技术。把现场采集到的数据上传到云端服务器，平台层集成了数据库管理系统、实时计算引擎以及机器学习模型，主要负责数据的存储、分析等处理工作，应用层通过Web页面和移动端应用为用户提供可视化界面以及远程控制功能。在巡检点位管理里引入了NFC技术，巡检人员可以凭借防爆移动终端读取设置在管道关键位置的NFC标签，这样系统就会自动记录巡检的时间、地点与详情。数据融合算法能够整合来自多种传感器的不同类型数据，通过对数据进行时间同步与空间坐标校准，并且利用卡尔曼滤波法减少测量误差。云端数据库全面保存了包含管道基础资料、巡检报告、监测信息以及预警事件在内的全流程数据，移动端应用程序允许用户实时掌握管道运行状况并接收告警信息。

3.3 管道智能巡检与预警典型应用

内蒙古有一家大型化工企业在全厂范围内搭建起智能安全监控体系，依托边缘计算设备搭载深度学习模型对监控画面即时处理，主动捕捉人员违规行为以

及设备泄漏等各类风险点，该系统全天候不间断进行监控并且能自动预警，让巡检人员工作负担减轻超过一半。Shell炼油厂采用自动化巡检机器人对工艺管线开展例行排查，机器人配备的红外热成像仪能够识别管线保温层缺陷和法兰泄漏情况，超声波装置对管道壁厚变化趋势进行监测，通过积累历史数据推演设备故障周期，有效减少了30%的非计划停机事件。天然气集气站投入使用的防爆巡检机器人可在易燃易爆环境完成高危区域巡查任务，其搭载的可燃气体检测仪检测精度达到ppm级别，发现气体泄漏时会马上发出声光警示并向主控室发送具体位置，将应急处理时效从原先的30min压缩至5min以内。

4 结语

面对化工管道出现的泄漏和腐蚀这些问题，智能巡检与故障预警技术构建了全面监控防护机制。泄漏检测方法融合多种传感设备和智能分析工具，能在三分钟内实现泄漏迅速识别与精确定位，腐蚀评估技术运用超声波厚度测量和电化学探针等手段，可准确判断管道的具体服役年限。巡检机器人弥补了人工检查存在的各种不足，能在恶劣条件下持续开展工作且效率提高超60%。综合数据管理平台将各类信息进行汇总处理，预警准确度达到了85%推动维护模式从事后修复向事前预防转变。随着人工智能、5G网络以及传感技术不断取得突破，该技术会朝着更精确、更快速、更智能方向发展，为化工企业安全生产提供更坚实的技术保障。

参考文献：

- [1] 何启明, 刘鹏来, 谭展濠, 等. 面向化工管道巡检的低成本智能机器人系统设计——基于多传感器融合与灰度循迹[J]. 电脑知识与技术, 2025, 21(35): 86-89.
- [2] 杨雅琪, 刘涛, 周伟, 等. 腐蚀机理与贝叶斯优化XGBoost结合的油气管道腐蚀预测研究[J]. 石油化工腐蚀与防护, 2025, 42(04): 6-11.
- [3] 郭亮. 石化厂区智能巡检机器人的应用现状与发展趋势[J]. 能源化工, 2025, 46(03): 10-13.
- [4] 贺建建, 梁利平, 刘英飞, 等. 智能巡检机器人在电石生产中的应用[J]. 聚氯乙烯, 2025, 53(01): 24-25+29.
- [5] 肖飞扬, 顾幸生. 基于并行LSTM-CNN的化工过程故障检测[J]. 华东理工大学学报(自然科学版), 2023, 49(03): 382-390.

作者简介：

孙涛(1983-), 男, 汉族, 山东济宁人, 本科, 工程师, 研究方向: 化工工程。

史青姣(1989-), 女, 汉族, 山东日照人, 本科, 助理工程师, 研究方向: 化工工程。