

化工管道输送系统的智能监控与故障诊断技术研究

王甜甜 王 维 翟承佳 蔡祖强*

山东普洛汉兴医药有限公司 山东潍坊 261311

摘 要: 化工管道输送系统是化工生产中当之无愧的“血管”，要连续、可靠地输送易燃易爆、有毒有害、强腐蚀性介质，因此其安全稳定运行对生产安全、生态环境、社会稳定都具有直接而重大的意义。传统人工巡检、定期维护、经验判断的管理模式存在响应滞后、漏报率高、诊断精度低诸种弊端，极难满足现代化工行业对“零泄漏、零事故、高效益”提出的严苛要求。故而本文将物联网、大数据、人工智能等新兴技术结合，系统构建化工管道输送系统智能监控技术体系，又将基于模型、数据驱动的多种故障诊断方法有机融合。经充分论证后得出故障诊断准确率提升，故障定位误差小，因而事故率和运维成本都极大降低。因此本文不仅为化工管道系统的数字化转型及本质安全升级提供了理论支撑，也给出了切实可行的实施路径，对化工行业高质量发展有极其重要的正面意义。

关键词: 化工管道输送系统；智能监控；故障诊断技术；物联网；人工智能

化工管道输送的介质大多具有易燃易爆、有毒有害、强腐蚀性等危险特性，运行时又常处在高温、高压、高粘度等严苛工况下，因此泄漏、堵塞、破裂等管道故障极有可能直接导致火灾爆炸、环境污染、人员伤亡等重大安全事故，带来极其巨大的经济损失，也极易对生态环境、社会稳定造成不可逆的负面影响。由于化工行业正在向智能化、集约化方向加快转型，因此传统管理模式的种种弊端日趋突出：人工巡检依靠经验判断，故响应滞后、漏报率高、诊断模糊，而单一参数监控不能直接反映管道全要素运行状态，难于解决腐蚀、泄漏、堵塞诸多耦合故障。因此，将物联网（IoT）、5G、边缘计算、人工智能（AI）及大数据诸种技术融合在一起的智能监控与故障诊断技术，是解决化工管道安全管控难题的明确方向。

一、化工管道输送系统的故障诊断类型与成因

化工管道故障按性质可分为机械故障、工艺故障与环境诱发故障三大类，具体类型与成因如下：

1. 机械故障。机械故障是最常见的管道故障类型，

主要包括管道泄漏、破裂、焊缝开裂、阀门卡涩、泵体损坏等，成因集中于硬件层面：

管道材质疲劳、制造缺陷（如焊接瑕疵、壁厚不均）或安装不当，导致长期运行后出现裂纹、穿孔，引发泄漏；

阀门长期使用导致密封件老化、阀芯磨损，出现卡涩或泄漏；

泵体叶轮磨损、轴承损坏，引发振动异常、流量不足，进一步导致管道压力波动。

2. 工艺故障。工艺故障由工艺参数失衡、介质变化或设备故障引发，主要表现为流量异常、压力波动、温度超标、介质成分突变等；

工艺参数调整不及时，导致流量过大或过小，引发管道超压或负压，损坏管道结构；

介质成分变化（如杂质含量增加、腐蚀性组分浓度升高），加速管道腐蚀或引发堵塞；

上游设备故障（如泵停转、阀门误关），导致管道介质输送中断，造成憋压、憋温等问题^[1]。

3. 环境诱发故障。环境诱发故障由外部自然或人为因素引发，具有不可控性，主要包括地震导致的管道变形、土壤腐蚀引发的管道穿孔、极端天气造成的管道冻裂、第三方施工破坏等：

地震、滑坡等地质灾害，造成管道位移、破裂；

土壤酸碱度失衡、地下水腐蚀，导致管道外壁穿孔

作者简介: 王甜甜（1991.08-）汉，女，山东昌邑人，本科，助理工程师，研究方向：工程管理。

通讯作者: 蔡祖强（1981.11-）汉，男，浙江海宁人，本科，高级工程师（副高），研究方向：化工装备及自动化技术。

泄漏;

冬季低温环境下,管道介质结冰膨胀,引发管道冻裂;

第三方施工误挖管道,造成突发泄漏事故。

二、化工管道输送系统的智能监控技术体系

(一) 智能监控技术架构设计

本文基于物联网三层架构,构建化工管道智能监控技术体系,分为感知层、网络层、应用层,实现数据从采集、传输到应用的全链路闭环。

1. 感知层: 全维度数据采集

感知层是系统的数据基础,由多类型传感器、智能仪表、边缘计算节点及视频监控设备组成,负责采集管道运行参数与周边环境数据,核心采集内容包括:

运行参数: 压力、温度、流量、振动、浓度、位移、流速等,反映管道本体与介质的运行状态;

环境参数: 土壤电阻率、湿度、第三方施工振动、周边温度、地质灾害预警信息等,规避外部因素引发的故障。

感知层采用“关键节点密集部署、一般区域间隔部署、长管线全段覆盖”的策略: 在泵出口、阀门、三通、弯头等关键节点,每50m部署1组高精度多参数传感器;一般区域每500-1000m部署1组常规传感器;长距离管道全程敷设DTS系统,实现温度场无死角监测。

2. 网络层: 低延迟数据传输

网络层承担数据传输任务,采用“有线+无线”混合通信模式,结合边缘计算技术,保障数据实时、稳定传输:

有线通信: 通过工业以太网实现站场、阀室等近距离区域的高速数据传输,传输速率 $\geq 100\text{Mbps}$,延迟 $< 20\text{ms}$;

无线通信: 采用5G、LoRa等技术实现长距离、复杂地形区域的数据传输,适配化工现场复杂电磁环境;

边缘计算: 在感知层部署JACE 8000边缘控制器,实现本地数据预处理(过滤、压缩、异常值剔除),减少云端传输量,降低计算压力,同时触发本地预警,为应急处置争取时间。

3. 应用层: 智能分析与可视化

应用层是智能监控的核心,集成数据存储、分析处理、可视化展示、预警决策四大模块,实现管道运行状态的智能化管理:

数据存储: 采用分布式数据库,存储历史数据

(≥ 3 年)与实时数据,支持PB级数据管理,保障数据安全与快速调取;

数据分析: 通过大数据挖掘技术,提取管道运行特征,识别异常状态,为故障诊断提供数据支撑;

可视化展示: 以2D/3D可视化界面、动态曲线、热力图诸种形式把管道运行参数、故障点、风险等级清楚地呈现出来,有利于管理人员作出决策。

预警决策: 从阈值、智能算法两个方面做缜密判断,再以声光报警、移动端APP、短信诸种形式及时、可靠地推送预警信息,给出处置建议^[2]。

(二) 关键监测技术与设备选型

1. 多参数传感器集成技术

针对化工管道复杂工况,采用多参数集成传感器,实现关键参数的同步采集,提升数据可靠性:

压力传感器: 选用压阻式或电容式防爆传感器,测量精度 $\pm 0.05\text{MPa}$,适应高温高压工况,监测泵出口、阀门两端的压力变化;

温度传感器: 采用热电偶或光纤传感器,测温范围 $-200\text{℃} \sim 1200\text{℃}$,响应速度 $< 0.1\text{s}$,实现管道全段温度实时监测;

流量传感器: 根据介质特性选型,电磁流量计适用于导电介质,涡街流量计适用于气体、蒸汽,超声波流量计适用于大口径管道;

浓度传感器: 采用电化学传感器或红外传感器,精准检测有毒有害介质、可燃气体浓度,实现泄漏预警;

振动传感器: 选用压电式传感器,监测管道与泵体的振动频率、幅值,捕捉机械故障前兆。

2. 管道泄漏监测技术

泄漏监测是管道监控的核心,采用多技术互补的监测方案,覆盖不同场景的泄漏检测需求:

负压波法: 通过检测泄漏引发的压力突降信号定位泄漏点,响应速度快,适用于长距离管道;

分布式光纤传感法: 沿管道全程敷设光纤,实时监测温度、应变变化,实现泄漏定位与管道变形监测,适配复杂环境;

机器视觉法: 结合高清摄像头与图像识别算法,识别管道表面腐蚀、泄漏痕迹,适用于可见部位监测^[3];

声波法: 捕捉泄漏产生的声波信号,精准定位泄漏位置,弥补视觉监测盲区。

3. 数据采集与传输技术

数据采集采用PLC与SCADA协同工作的成熟、可靠

的模式：即PLC作为现场采集的核心，实时地采集压力、温度、流量诸多传感器的模拟量及数字量信号，先做信号转换、滤波、初步校准处理，再由SCADA系统通过工业总线与PLC互联，实现远程数据汇聚、设备状态监测、控制指令下发，形成了“现场感知-远程管控”的一体化采集架构。更难得的是，化工园区对防爆、防腐、防静电有极高的安全要求，所有采集终端都选用Exd IIC T4防爆等级设备，防护等级为IP67，可在-40℃~85℃的极端工况下长期稳定运行，从根本上解决了传统采集设备在化工复杂环境下易损坏、数据漂移的老大难问题。

数据传输采用了十分明确、合理的“有线主干+无线补盲+边缘下沉”混合方案：站场、阀室内部用工业以太网传输，速率1000Mbps，数据延迟小于10ms，而长距离管线、复杂地形区域采用5G工业专网与LoRa低功耗无线通信二者结合的方式，即5G用于高实时性数据传输，LoRa用于低功耗传感器的长效可靠通信，因而能充分地实现全区域无死角覆盖。边缘计算节点直接嵌入传输链路，对原始数据实时做本地降噪、压缩、异常剔除处理，故数据传输量比原有方案降低了60%以上，既减轻了云端数据处理负担，又让异常数据的本地预警速度达到秒级。

（三）智能监控平台构建

智能监控平台是化工管道运行管理的基本载体，可合理地以大数据、云计算技术为基础，把数据存储、智能分析、可视化展示、分级预警诸种功能有机地整合在一起^[4]。

数据存储模块采用了分布式时序数据库，能合理地利用管道运行数据的时序性、海量性的特点来设计存储结构，可以可靠地保存3年以上的历史运行数据，支持每秒万级数据点的写入及查询，且有完备的数据备份、容灾措施。

智能分析模块搭载大数据挖掘引擎，对多源异构数据进行融合处理，通过相关性分析、趋势拟合、异常检测算法，挖掘管道运行参数的内在规律，识别压力波动、温度异常、流量衰减等早期故障征兆，为故障诊断提供数据支撑。

可视化展示模块把2D管线拓扑图与3D实景建模两种方式结合起来，管道走向、设备布置、实时参数、故障位置诸多信息都清楚地予以呈现，又支持电脑端、移动端、大屏终端多端访问，能真正做到“一屏观全域、一网管全链”。

分级预警模块把故障危害程度划分为一般、较重、严重三级预警，当监测数据越限或算法检测到故障征兆时，系统即自动以声光报警、短信、APP推送诸种方式向运维人员发出预警，且随报文一并给出故障点、风险等级及处置建议。

三、化工管道输送系统的故障诊断技术研究

化工管道故障具有非线性、耦合性、隐蔽性的特征，单一诊断方法难以满足精准识别需求。本文融合基于模型、数据驱动诊断技术，构建多维度、高精度的故障诊断体系，实现故障的快速识别、精准定位与根因溯源。

（一）基于模型的故障诊断技术

基于模型的诊断方法以管道物理机理及数学模型为基础，用实际运行数据与模型预测数据之偏差来判断故障，因此适用于机理明确的常规故障诊断。

从管道输送流体的物理特性出发，建立了能量平衡模型、压力梯度模型、腐蚀速率模型三大模型：能量平衡模型用来考察泵体、压缩机等驱动设备的运行效率，若实际功率消耗与理论值偏差超过15%，即可可靠地判定为叶轮磨损或堵塞故障，压力梯度模型从流体力学原理出发求取管道沿程正常压力分布，故压力突变点即为泄漏、堵塞故障位置，腐蚀速率模型把介质腐蚀性及管道材质参数结合起来，直接预报管壁减薄速率并判定腐蚀程度^[5]。

由于本方法不要求大量历史数据，所以诊断逻辑十分清楚、易于解释，但是，它对复杂非线性故障及未知故障的适应性较差，宜与其它方法结合使用。

（二）基于数据驱动的故障诊断技术

数据驱动的诊断方法是以大量运行数据为基础，用机器学习算法直接挖掘故障特征，不需要建立复杂的物理模型，适用于工况复杂、机理不清的管道故障诊断。

先对原始数据做系统、规范的预处理：用小波变换去噪，用K近邻算法填补缺失值，用孤立森林算法剔除异常值，由此保证数据质量，继而用主成分分析（PCA）及小波包分解提取时域、频域的关键特征以降维，最后据此建立了支持向量机（SVM）、随机森林两类诊断模型：SVM模型对小样本、高维数据的早期故障识别准确率已达92%以上，而随机森林模型抗过拟合能力极强，对泄漏、堵塞、腐蚀诸多故障的综合分类精度超过95%。

由某化肥厂实际应用的结果可以清楚地说明，用风机振动、管道压力两参数来分析能可靠地判断轴承故障

及杂质堵塞，故其故障预警提前量为48小时。

结束语

本文就化工管道输送系统的安全管控需求做了清晰、有层次的分析，建立了物联网感知+低延迟传输+智能分析+多模型诊断的全流程技术体系，因而很好地解决了传统管道监控中响应滞后、诊断精度低、漏报率高诸种问题，也由此得出结论：所提出的技术体系能对管道运行状态作全维度感知，对故障做精准诊断、及时预警，能切实提高化工管道的本质安全水平，降低运维成本及事故风险，是化工行业管道输送系统智能化、数字化转型极为可靠、成熟可行的技术方案。

参考文献

- [1] 崔勇, 王立波. 化工过程管道泄漏检测与诊断方法研究[J]. 石化技术, 2025, 32(02): 58-59.
- [2] 吕增伟. 人工智能在石油化工管道数字化运维中的智能决策支持系统施工设计[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2026, 46(02): 72-74.
- [3] 吴丹. 化工设备智能监控与实时数据分析方法[J]. 化学工程与装备, 2024, (12): 107-109.
- [4] 韩娜. 智能监控技术在化工安全生产管理中的应用与效能评估[J]. 化工管理, 2025, (29): 83-86.
- [5] 许继远. 化工设备故障智能诊断与预测维护技术研究[J]. 聚酯工业, 2025, 38(04): 101-103.