

石油化工管道设备运行状态监测与智能维护策略

郭亮亮（北京帮安迪信息科技股份有限公司，北京 101149）

摘要：石油化工管道设备承担着原油、天然气、各类化工产品等的输送任务，其覆盖范围广泛。但石油化工管道设备在长期运行过程中，在各种因素共同作用下，管道设备发生故障和事故的风险较大。一旦石油化工管道设备发生故障，将会带来一系列严重的后果。因此本文深入分析了石油化工管道设备运行状态监测和智能维护策略，以此来提高石油化工管道设备的可靠性，进一步降低运维成本，保障石油化工生产的连续性和安全性。

关键词：石油化工管道设备；监测技术；故障预测；智能巡检；维护决策

中图分类号：TE973 文献标识码：A 文章编号：1674-5167(2025)019-0153-03

Operation Condition Monitoring and Intelligent Maintenance Strategy of Petrochemical Pipeline Equipment

Guo Liangliang (Beijing Bangandi Information Technology Co., LTD., Beijing 101149, China)

Abstract: Petrochemical pipeline equipment undertakes the transportation tasks of crude oil, natural gas, various chemical products, etc., which covers a wide range. However, in the long-term operation of petrochemical pipeline equipment, under the combined action of various factors, the risk of pipeline equipment failure and accident is greater. Once the petrochemical pipeline equipment fails, it will bring a series of serious consequences. Therefore, this paper deeply analyzes the operation condition monitoring and intelligent maintenance strategies of petrochemical pipeline equipment, so as to improve the reliability of petrochemical pipeline equipment, further reduce operation and maintenance costs, and ensure the continuity and safety of petrochemical production.

Key words: Petrochemical pipeline equipment; Monitoring technology; Failure prediction; Intelligent inspection; Maintenance decision

石油化工管道设备长期处于复杂恶劣的工况环境中，容易出现磨损、泄漏、裂纹等故障，一旦发生事故，不仅会造成巨大的经济损失，还可能对人员安全和生态环境带来严重威胁。随着信息技术的飞速发展，智能化技术在石油化工领域的应用为管道设备运行状态监测与维护提供了新的思路和方法。通过先进的监测技术和智能维护策略，可以及时发现管道设备的潜在问题，提前采取措施进行修复和预防，有效降低事故发生的概率，保障安全生产。实时监测还能为设备的维护管理提供准确的数据支持，实现精准维护，避免过度维护或维护不足的情况，从而降低维护成本，提高设备的使用寿命和运行效率。这有助于推动石油化工行业的可持续发展，减少对环境的负面影响，实现经济、社会和环境的协调发展。

1 石油化工管道设备运行状态监测

1.1 监测技术

1.1.1 压力监测

压力监测中，压力数据采集系统由压力传感器、信号调理模块、数据采集卡及传输网络构成。压力传感器是核心元件，在石油化工管道中，压力传感器多安装于泵出口、阀门前后等关键位置，能够迅速捕捉到压力异

常升高或降低信号，为运行人员判断管道工况提供关键依据。信号调理模块对传感器输出的微弱信号进行放大、滤波等处理，使其满足数据采集卡输入要求。数据采集卡按设定采样频率对处理后的信号数字化采集，并通过有线或无线传输网络，将数据实时传输至监控中心。在大型石油化工企业，分布式压力监测系统可覆盖整个厂区管道网络，各监测点数据经传输网络汇总至中央监控平台，便于集中管理与分析。

1.1.2 温度监测

温度监测以热电偶与热电阻传感器、红外测温等为主。热电偶基于热电效应工作，由两种不同金属丝组成闭合回路，两端温度不同时产生热电动势，通过测量热电动势计算温度。热电阻则利用金属导体或半导体材料电阻值随温度变化特性测温。在石油化工管道设备中，热电偶常用于高温区域测量；热电阻适用于中低温测量。通过在管道的不同位置安装热电偶与热电阻可实时反馈油温，确保油温维持在合适范围。红外测温技术依据物体红外辐射特性测温，在石油化工管道设备巡检中，红外测温仪可快速检测管道表面温度，发现因保温损坏、内部介质泄漏等导致的局部温度异常升高区域^[1]。而红外热成像仪则能生成管道

设备热图像，直观呈现温度场分布，全面评估设备运行状态。

1.1.3 流量监测

流量监测主要以差压式流量计和超声波流量计为主。差压式流量计通过测量流体流经节流装置产生的差压计算流量，在石油化工管道流量测量中大量应用，如原油输送管道、化工原料输送管道等，准确测量流量对生产过程控制与物料平衡计算意义重大。超声波流量计利用超声波在流体中的传播特性测量流量，有时差法、多普勒法等类型。超声波流量计具有非接触测量、安装维护方便、适用范围广等优点，尤其适用于大口径管道、强腐蚀性介质及不易安装节流装置的场合。

1.1.4 泄漏监测

泄漏监测主要包括声学泄漏检测和光纤传感泄漏监测。声学泄漏检测技术基于管道泄漏时产生的声波信号判断泄漏位置与程度。该技术响应速度快、灵敏度高，适用于实时在线监测。光纤传感泄漏监测技术利用光纤传输特性检测管道泄漏，可以精确确定泄漏位置，为抢修提供准确信息。

1.2 数据处理与分析

根据管道设备关键部位与监测需求合理布局传感器网络，确保实现数据的全面和准确采集。同时应选用高精度、稳定性好的传感器，满足石油化工恶劣工况下长期可靠运行要求。对数据实时性要求极高的关键监测可以采用有线传输的方式，在布线困难的区域或临时监测场景则应采取无线传输的方式。而且为了优化传输，可采用数据压缩技术减少传输数据量，利用冗余传输机制提高数据传输可靠性，通过合理设置传输频率与信道避免信号干扰。为了保证数据的质量，还应做好数据清洗与预处理工作，为后续数据分析提供可靠基础。数据分析时运用时域分析、频域分析等方法分析管道设备运行状态。并结合机器学习算法建立数据分析模型，对设备运行状态分类预测。

2 石油化工管道设备智能维护策略

2.1 基于大数据分析的故障预测

2.1.1 数据采集与预处理

石油化工管道设备运行过程中产生海量多源数据，涵盖压力、温度、流量、振动等实时监测数据，以及设备运行参数、维护记录、环境数据等。构建全面的数据采集系统，通过传感器网络实时采集设备运行状态数据，利用信息化系统整合设备档案、维护历史等管理数据。采集到的数据常包含噪声、异常值与缺失值，严重影响分析结果准确性。运用数据清洗技术，采用均值滤波、中值滤波等算法去除监测数据中

的随机噪声；通过设定合理阈值，识别并修正异常数据；针对缺失数据，利用线性插值、K 近邻算法等进行填补。

2.1.2 故障预测模型构建

从预处理后的数据中提取与设备故障紧密相关的特征参数，运用主成分分析（PCA）、线性判别分析（LDA）等降维算法，去除冗余特征，降低数据维度，提高模型训练效率与准确性^[2]。基于机器学习与深度学习算法构建故障预测模型，如支持向量机（SVM）、人工神经网络（ANN）、长短期记忆网络（LSTM）等。利用大量历史故障数据与正常运行数据对模型进行训练，通过交叉验证、网格搜索等方法优化模型超参数，提高模型泛化能力与预测精度。以 LSTM 模型预测管道泄漏故障为例，将时间序列的压力、流量等监测数据作为输入，经过模型训练学习数据中的特征与规律，能够准确预测管道在未来一段时间内发生泄漏的可能性。

2.2 智能巡检技术

在石油化工管道设备的维护中，智能巡检技术发挥着重要作用，其中无人机和机器人等智能巡检设备的应用日益广泛，为管道设备的巡检工作带来了诸多变革。无人机能够快速抵达管道设备的各个位置，实现对管道的全方位巡检。在一些地形复杂的区域，无人机搭载高清摄像头、红外热像仪、气体检测仪等多种设备，能够获取丰富的管道设备信息。无人机还可以通过搭载激光雷达设备，对管道沿线的地形地貌进行扫描，获取三维地形数据，以便及时发现因地形变化对管道造成的影响。管道爬行机器人是一种专门用于管道内部巡检的智能设备，配备有高清摄像头、超声波传感器、漏磁传感器等多种检测设备，它可以沿着管道内壁爬行，对管道内部进行近距离检测。

2.3 智能维护决策支持系统搭建

2.3.1 系统架构设计

智能维护决策支持系统设计时，应包括数据层、分析层和应用层三部分。数据层负责存储设备运行数据、监测数据、维护数据、故障案例库、知识库等各类信息。采用关系型数据库与非关系型数据库相结合的方式，存储结构化与非结构化数据。例如，将设备基本信息、运行参数等结构化数据存储于关系型数据库，便于高效查询与统计分析；将设备维护报告、故障案例文档等非结构化数据存储于非关系型数据库，满足灵活存储与快速检索需求。分析层是集成数据挖掘、机器学习、知识推理等算法引擎，对数据层的数据进行深度分析。通过数据挖掘算法发现设备运行数据中的潜在模式与关联规则，利用机器学习模型进行故障诊断与预测，运用知识推理技术基于故障案例库

与知识库进行故障原因分析与维护策略制定。应用层是为运维人员提供直观、便捷的操作界面，实现设备状态监测、故障诊断、维护决策制定等功能。通过可视化技术将设备运行状态、监测数据、分析结果以图表、图形等形式呈现，方便运维人员快速掌握设备整体情况。例如，以仪表盘形式实时展示管道关键节点的压力、温度、流量等参数，当参数超出正常范围时，系统自动发出预警，并在界面上突出显示异常部位与相关分析结果，辅助运维人员及时做出决策。

2.3.2 维护决策优化方法

石油化工管道设备维护决策优化方法可以从风险和经济两方面入手。具体可以根据设备故障发生概率与故障后果严重程度对设备进行风险评估，划分风险等级。对于高风险设备，制定高频次、高精度的监测与维护计划，优先配置维护资源；对于低风险设备，适当降低维护频率，采用基于状态的维护策略。例如，对输送易燃易爆介质且运行环境复杂的管道，因其故障后果严重，将其列为高风险设备，安排专业巡检人员每日巡检，定期进行无损检测；而对于一些辅助性、运行条件较好的管道，列为低风险设备，通过在线监测系统实时掌握状态，根据需要进行维护。经济方面，应综合考虑维护成本、故障损失成本、设备更换成本等因素，建立经济优化模型^[3]。通过优化算法求解出最优的维护周期与维护方案，在保障设备可靠性的前提下，实现维护成本最小化。例如，在确定管道防腐涂层维护周期时，考虑涂层维护费用、因涂层失效导致管道腐蚀泄漏造成的生产损失、更换管道的高昂成本等，运用遗传算法等优化算法计算出最佳维护时机，平衡维护投入与设备运行效益。

2.4 远程智能维护技术应用

2.4.1 远程监测与诊断系统

借助工业互联网、5G 等通信技术，将石油化工管道设备现场的监测数据实时传输至远程监控中心。运维人员与专家可在远程监控中心通过监控软件，实时查看设备运行状态、监测参数变化，对设备进行全方位远程监控。例如，在偏远地区的石油开采站，通过 5G 网络将站内管道设备的压力、温度、流量等数据快速传输至千里之外的总部监控中心，技术人员无需亲临现场即可实时掌握设备运行情况，及时发现异常。

当设备出现异常时，远程监测与诊断系统利用故障诊断软件与工具，结合设备运行数据与历史故障案例，对故障进行远程诊断。同时，通过视频会议、远程协作平台等工具，组织专家团队与现场维护人员进行远程协同，共同制定故障解决方案。例如，某石化厂管道发生泄漏故障，现场维护人员通过远程监测系

统将故障现场视频、设备运行数据传输至专家团队，专家团队利用故障诊断模型快速分析故障原因，通过视频会议指导现场人员进行抢修，大大提高了故障处理效率。

2.4.2 虚拟现实（VR）/增强现实（AR）辅助维护技术

利用 VR 技术创建高度逼真的石油化工管道设备虚拟维护场景，维护人员可在虚拟环境中进行设备维护培训与模拟操作。通过模拟各种故障场景，让维护人员熟悉设备结构、维护流程与操作规范，提高维护技能与应急处理能力。例如，新入职的维护人员在 VR 虚拟环境中反复练习管道阀门更换、管道焊接修复等操作，通过模拟真实的操作步骤与环境反馈，快速掌握维护技能，降低实际操作中的失误风险。

在实际维护工作中，维护人员佩戴 AR 智能眼镜，通过扫描设备二维码或识别设备特征，AR 系统将设备的三维模型、维护手册、操作指南等信息以增强现实的形式呈现在眼前。同时，AR 系统还可实时显示设备运行数据、故障诊断结果等，辅助维护人员准确判断故障，快速完成维护任务。例如，维护人员在对管道进行巡检时，AR 智能眼镜实时显示管道的压力、温度等参数，当检测到异常时，自动弹出故障诊断提示与维修指导步骤，大大提高了巡检与维护工作的效率与准确性。

3 结语

石油化工管道设备运行状态监测与智能维护策略对于保障石油化工生产安全、提高生产效率、降低运维成本具有重要意义。通过综合应用压力监测、温度监测、流量监测、泄漏监测等多种先进监测技术，能够实时、准确地掌握管道设备运行状态，及时发现潜在故障隐患。基于大数据分析的故障预测、智能维护决策支持系统以及远程智能维护技术等智能维护策略，实现了从传统被动维护向主动、智能维护的转变，提高了维护决策的科学性和准确性，为石油化工管道设备的可靠运行提供了有力保障。而且随着信息技术、人工智能技术等的不断发展，石油化工管道设备运行状态监测与智能维护技术将不断创新和完善，必将在石油化工产业中发挥更加重要的作用。

参考文献：

- [1] 韩旭东, 章卫文, 孙静. 国内油气长输管道检测技术的现状与发展趋势 [J]. 建筑工程技术与设计, 2020(35):4250.
- [2] 韩二龙. 关于石油储运管道的智能监测与维护技术分析 [J]. 中国化工贸易, 2024(16):130-132.
- [3] 高飞. 石油化工管道的维护与检修技术研究 [J]. 中国化工贸易, 2025(04):139-141.