

石油储运管道的智能监测与维护技术

缪绍峰（宁波大榭开发区信海油品仓储有限公司，浙江 宁波 315812）

摘要：针对石油储运管道面临的腐蚀、泄漏、老化等安全隐患及维护难题，本研究从保障管道安全、高效运行的角度出发，提出综合运用基于传感器、智能检测机器人、物联网的智能监测技术，以及智能诊断、智能修复、维护决策支持系统等智能维护技术。旨在构建一套全面、精准、高效的智能监测与维护体系，以降低管道故障风险，提升石油储运的可靠性与安全性。

关键词：石油储运管道；智能监测技术；智能维护技术

0 引言

石油储运管道作为石油运输的关键基础设施，承担着将石油从产地输送到炼油厂、储存库及消费终端的重任。然而，石油储运管道在长期运行过程中面临诸多挑战，比如腐蚀、泄漏、破裂等问题。这些问题会导致石油资源浪费、经济损失、环境污染、安全事故等严重后果。传统的管道监测与维护方法存在效率低、实时性差、检测不全面等缺点，难以满足现代石油储运管道安全运行的需求。随着信息技术、自动化技术和智能控制技术的飞速发展，智能监测与维护技术在石油储运管道领域的应用逐渐成为研究热点。智能监测与维护技术能够实时采集管道运行数据，利用先进的数据分析方法和智能算法，实现对管道运行状态的精准监测、故障诊断和及时维护，有效提高管道运行的安全性和可靠性。因此，深入研究石油储运管道的智能监测与维护技术具有重要的现实意义。

1 石油储运管道概述

1.1 管道分类与结构

石油储运管道按用途可分为输油管道和储油管道。输油管道主要负责将石油从开采地输送至炼油厂、油库等目的地，依据输送距离与规模不同，又可细分为长输管道与短输管道。长输管道通常跨越较长距离，连接不同地区的油田和炼油厂，管径较大，输送压力较高；短输管道则多用于油田内部集输或炼油厂、油库等内部油品输送，管径相对较小。储油管道主要用于石油在储存设施（如油罐）之间的转移与调配。按材质分类，石油储运管道主要包括金属管道和非金属管道。金属管道以钢管为主，具有强度高、耐高压、抗冲击能力强等优点，是目前应用最为广泛的管道材质。钢管又分为无缝钢管和焊接钢管，无缝钢管强度更高，适用于高压、高温等恶劣工况；焊接钢管成本较低，生产效率高，应用也较为普遍。非金属管道主

要有塑料管、玻璃钢管等，它们具有耐腐蚀、重量轻、安装方便等特点，在一些特定场合（如腐蚀性较强的环境）有应用。

石油储运管道的基本结构由管道本体、连接件、阀门及附属设备组成。管道本体是石油输送的载体，通常由钢管或其他材质管材制成。连接件用于连接管道各段，确保管道密封性与整体性，常见连接件有法兰、弯头、三通等。阀门用于控制管道内石油流动，调节流量、压力等参数，如截止阀、闸阀、球阀、安全阀等。附属设备包括泵站、加热炉、清管器收发装置等。泵站为石油输送提供动力，克服管道阻力；加热炉对输送的原油进行加热，降低其黏度，提高输送效率；清管器收发装置用于发射和接收清管器，定期清理管道内污垢、杂质等，保证管道畅通。

1.2 石油储运管道运行特点

石油储运管道输送的介质为石油，具有易燃、易爆、易腐蚀等特性。石油主要成分是碳氢化合物，与空气混合能形成爆炸性混合物，遇明火、高热能引起燃烧爆炸。同时，石油中如硫化物、有机酸等成分会对管道材质产生腐蚀作用，导致管道壁厚减薄、强度降低，增加泄漏风险。

管道运行环境复杂多样，受地理条件、气候因素影响较大。比如，山区管道可能面临山体滑坡、泥石流等地质灾害威胁；河流穿越段可能受水流冲刷、河床变迁影响；沙漠地区管道则要承受风沙侵蚀。气候因素方面，不同地区温度、湿度、降水等差异较大。高温地区管道可能因热胀冷缩导致管道变形；低温地区可能出现凝管现象；湿度大的地区易引发管道外腐蚀；降水过多可能造成管道基础下沉等问题。

石油作为重要能源，其供应要求具有连续性和稳定性，这决定了石油储运管道需连续运行。长期连续运行对管道可靠性提出极高要求，任何突发故障都可

能导致石油供应中断，影响下游产业正常生产和社会经济稳定运行。同时，连续运行使管道各部件持续承受压力、磨损等作用，加速管道老化和损坏，增加维护管理难度和成本。

2 石油储运管道智能监测技术

2.1 基于传感器的监测技术

基于传感器的监测技术是石油储运管道智能监测的基础，通过各类传感器实时采集管道运行过程中的关键参数，为判断管道运行状态提供依据。

压力传感器用于监测管道内压力，其工作原理基于压力与电信号的转换。常见压力传感器有应变片式、压阻式、电容式等类型。应变片式压力传感器通过测量压力作用下弹性元件的应变，进而转化为电阻变化，通过测量电阻值得到压力大小；压阻式压力传感器利用半导体材料的压阻效应，压力变化引起电阻变化来测量压力；电容式压力传感器依靠压力改变电容极板间的距离或介电常数，从而改变电容量来测量压力。在石油储运管道中，压力传感器安装在管道泵站进出口、管道沿线高点和低点等。通过实时采集压力数据并传输至监控系统，当压力异常时，监控系统及时发出预警信号，提示工作人员可能存在管道堵塞、阀门故障等问题。

温度传感器用于监测管道内石油温度及管道外壁温度。常见温度传感器有热电偶、热电阻等。热电偶利用两种不同金属导体的热电效应，将温度变化转化为热电势输出；热电阻基于金属导体电阻随温度变化特性来测量温度。温度监测对管道运行意义重大，一方面可实时了解石油流动性，为调节加热炉加热功率提供依据；另一方面，管道外壁温度异常变化可暗示管道内部存在泄漏或腐蚀等问题。

流量传感器用于测量管道内石油流量，不同类型流量传感器工作原理各异。差压式流量传感器通过测量流体流经节流装置时产生的差压来计算流量；涡轮流量传感器利用流体冲击涡轮叶片，使涡轮旋转，通过测量涡轮转速来确定流量；超声波流量传感器通过检测超声波在流体中的传播时间差或相位差来测量流量。流量监测可评估管道输送效率，判断管道是否存在堵塞、泄漏等影响流量的问题。

泄漏检测传感器用于及时发现管道泄漏情况。声发射传感器检测泄漏原理是，管道泄漏时，泄漏处流体高速喷出产生弹性波，即声发射信号，声发射传感器捕捉信号并转换为电信号处理，通过分析信号特征

判断泄漏发生及大致位置。光纤传感器用于泄漏监测具有优势，分布式光纤温度传感器可通过监测管道沿线温度变化发现泄漏，光纤光栅传感器可通过检测应变变化感知管道泄漏。

2.2 基于智能检测机器人的监测技术

管道检测机器人根据结构特点分为爬行式检测机器人、轮式检测机器人等类型。爬行式检测机器人通常采用履带或多足结构，能适应复杂管道内壁环境，如管道弯曲、变径等部位，通过电机驱动履带或足实现移动。轮式检测机器人以轮子为行走机构，速度快、稳定性好，适用于较为规则、内壁光滑的管道。

检测机器人具备多种功能，可对管道内部全面检测。在内部缺陷检测方面，搭载超声检测、涡流检测、磁粉检测等无损检测设备，检测管道内壁裂纹、腐蚀坑、壁厚减薄等缺陷。检测机器人还能测量管道变形情况，通过激光测距、视觉测量等技术，获取管道直径变化、椭圆度等参数，评估管道变形程度。在数据采集与传输方面，检测机器人配备多种传感器，实时采集管道各种数据，并通过无线通信技术或电缆传输至地面监控中心。

管道检测机器人朝着智能化、多功能化、微型化方向发展。智能化使其具备自主导航、自主决策能力，能根据管道内部情况自动调整检测策略和路径。多功能化要求集成更多检测技术和功能，如同时进行多种无损检测、环境监测等。微型化使检测机器人能进入更细小、复杂管道检测。然而，其发展面临能源供应、通信可靠性及与管道内壁适应性等挑战。在复杂管道环境下，需解决能源有限空间长时间稳定供给问题；确保在管道内部复杂环境下数据准确、及时传输；提高机器人在不同管径、材质、内壁状况管道内运行稳定性和检测精度。

2.3 基于物联网的监测系统

基于物联网技术构建的石油储运管道监测系统架构包括感知层、网络层和应用层。感知层由大量分布在管道沿线的传感器节点组成，这些传感器节点包括压力传感器、温度传感器、流量传感器、泄漏检测传感器等，实时采集管道运行数据，并将数据转换为电信号或数字信号。

网络层负责将感知层采集到的数据传输到应用层。常用通信技术有无线传感器网络（WSN）、光纤通信、卫星通信等。无线传感器网络自组织、低成本、低功耗，适用于短距离、小范围数据传输，实现传感

器节点之间及与汇聚节点之间通信。光纤通信传输速率高、带宽大、抗干扰能力强，常用于长距离、高速率数据传输，将汇聚节点数据传输至远程监控中心。卫星通信在偏远地区或通信基础设施薄弱区域发挥作用，确保数据可靠传输。

应用层是物联网监测系统的核心，包括数据处理与分析平台。该平台对采集数据进行存储、处理和分析，利用数据挖掘、机器学习等技术，深度分析管道运行数据，提取有价值信息，如管道运行状态评估、故障预警、泄漏定位等。通过机器学习算法对历史和实时数据学习训练，建立管道运行状态预测模型，预测管道未来运行状态，提前发现潜在故障隐患。应用层还具备可视化界面，以直观图表、图形等形式展示分析结果，便于管理人员了解管道运行情况，做出科学决策。

3 石油储运管道智能维护技术

3.1 智能诊断技术

基于数据分析的故障诊断通过对石油储运管道历史运行数据挖掘与分析，了解管道不同工况运行规律和常见故障模式。分析不同季节、输送量下管道压力、温度、流量等参数变化，找出与故障相关特征参数和变化趋势。将实时数据与标准模型对比，当实时数据偏离标准模型且超出设定阈值，判断管道可能出现故障。利用数据分析算法如主成分分析、支持向量机、聚类分析等进行故障模式识别。

基于人工智能的诊断方法中，神经网络具有强大的非线性映射和自学习能力。在管道故障诊断中，构建多层神经网络模型，将管道压力、温度、流量等运行参数作为输入，故障类型作为输出，通过大量历史数据训练，学习输入参数与故障类型映射关系，用于实时故障诊断。专家系统收集领域专家知识经验建立知识库，根据采集的管道运行数据在知识库搜索推理，判断故障类型和原因，具有较高可靠性和可解释性，但知识库建立维护耗费人力时间，知识更新困难。

3.2 智能修复技术

在线修复技术在管道不停输情况下进行修复，可以有效减少对石油输送影响。带压封堵技术是常用在线修复技术，其通过在管道泄漏或需维修部位安装封堵设备，将泄漏部位或维修区域与管道内介质隔离，然后在隔离区域内修复。作业时根据管道管径、压力选择合适设备安装，通过注剂阀向封堵器内注入密封剂，使封堵器与管道内壁紧密贴合密封，完成封堵后

进行焊接、更换管件等修复作业。

智能涂层修复技术通过在管道内壁或外壁涂覆智能涂层实现修复和防护。智能涂层具有自修复、防腐蚀、防结蜡等功能。部分智能涂层含微胶囊，涂层损伤时微胶囊破裂释放修复剂自动修复。通过添加缓蚀剂、防蜡剂等成分，提高管道防腐蚀和防结蜡性能。智能涂层修复技术施工简单、成本低、效果好，在石油储运管道修复中有广阔应用前景。

3.3 维护决策支持系统

维护决策支持系统通过综合分析管道运行数据、故障诊断结果和维护资源等信息，为维护人员提供科学维护决策建议。系统架构包括数据层、分析层和决策层。数据层收集存储管道运行数据、故障诊断结果、维护资源信息等。分析层利用数据分析技术和决策模型分析处理数据，评估管道运行状态和风险程度，制定维护策略和方案。决策层将分析结果直观展示给维护人员，提供决策支持。

维护决策支持系统工作流程包括数据采集、数据处理、风险评估、维护策略制定和决策输出。数据采集环节，系统通过传感器、智能检测机器人等采集管道运行数据传输至数据层存储。数据处理环节，清洗、预处理和分析数据，提取有用信息。风险评估环节，利用风险评估模型评估管道运行状态，确定风险等级。维护策略制定环节，根据风险评估结果和维护资源信息，制定维护时间、方式、人员和设备调配等维护策略和方案。决策输出环节，将维护策略和方案以报告、图表等形式展示给维护人员参考决策。

4 结语

石油储运管道的智能监测与维护技术是保障石油能源稳定供应、提高管道运行安全性和可靠性的关键。通过智能监测技术，可实时、全面获取管道运行状态信息；借助智能维护技术，能及时准确诊断故障、高效修复管道并科学制定维护策略。未来，随着科技不断进步，石油储运管道智能监测与维护技术将朝着更加智能化、集成化、高效化方向发展，进一步提升石油储运行业的安全性和经济性。

参考文献：

- [1] 刘文君, 张钰, 张斌. 集群化管道泄漏监测技术的研究和应用 [J]. 信息系统工程 ,2023,(04):65-67.
- [2] 徐国喜. 石油化工管道的安装与运行维护技术研究 [J]. 石化技术 ,2015,22(05):137+79.