

天然气长输管道智能监测与预防性维护策略探讨

赵 振 (中石油昆仑燃气有限公司辽宁分公司, 辽宁 沈阳 110000)

摘要: 天然气长输管道的安全稳定运行关系到国家能源安全、生态环境以及生命财产安全问题。传统模式已难以适应现代管道运维需求,存在监测滞后、维护盲目等问题,经常造成管道泄漏、管道爆裂等安全事故。通过利用智能化监控与预防性维修技术,将物联网、大数据、人工智能融合应用,在管道生命周期内全方位、全过程地实现对管道状况进行智能监控,对出现的进行及时处理和预防性检修,提升管道运维水平。基于此,本文主要对天然气长输管道智能监测与预防性维护策略进行分析。

关键词: 天然气; 长输管道; 智能监测; 预防性维护

中图分类号: TE88 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2026) 002-0145-03

Exploration of Intelligent Monitoring and Preventive Maintenance Strategies for Natural Gas Long distance Pipeline

Zhao Zhen (PetroChina Kunlun Gas Co., Ltd. Liaoning Branch, Shenyang Liaoning 110000, China)

Abstract: The safe and stable operation of natural gas long-distance pipelines is related to national energy security, ecological environment, and the safety of life and property. The traditional mode is no longer suitable for modern pipeline operation and maintenance needs, with problems such as lagging monitoring and blind maintenance, often causing safety accidents such as pipeline leaks and bursts. By utilizing intelligent monitoring and preventive maintenance technology, the integration of the Internet of Things, big data, and artificial intelligence is applied to achieve intelligent monitoring of pipeline conditions in all aspects and processes throughout the pipeline lifecycle, timely handling and preventive maintenance of any issues, and improving pipeline operation and maintenance capabilities. Based on this, this article mainly analyzes the intelligent monitoring and preventive maintenance strategies for natural gas long-distance pipelines.

Keywords: natural gas; Long distance pipelines; Intelligent monitoring; preventive maintenance

目前我国已经形成了覆盖全国的复杂管网系统,但由于管道大多位于山区、河流、荒漠等地形复杂区域,面临着管道沿线存在的地质灾害、第三方破坏以及腐蚀老化等问题。运用智能监测掌握管道实际健康状况,实施“状态修、预测修”的预防性维护,可避免无效维护,减少运维费用。借助大数据平台深度挖掘数据信息,形成管道的健康状况报告,确定合理的维修时间、维修方式和维修手段,有针对性地开展维修工作。因此,加强天然气长输管道智能监测与预防性维护策略的研究具有重要意义。

1 天然气长输管道智能监测技术体系应用

1.1 智能感知技术

智能感知技术是获取管道运行状态与环境信息的核心,需根据监测对象选择适宜的感知设备,构建“点、线、面”结合的感知网络。

1.1.1 管道本体状态监测技术

针对管道内腐蚀与外腐蚀分别采用对应的监测手段。内腐蚀监测采用智能清管器(PIG),搭载超声传感器、漏磁传感器,可精准检测管道内壁的腐蚀坑、壁厚减薄等缺陷,检测精度达0.1mm,结合清管周期数据可分析腐蚀发展趋势;外腐蚀监测采用阴极保护监测系统,阴极保护监测系统实时采集管道保护电位,

确保保护电位维持在 $-0.85V$ 至 $-1.2V$ 的有效范围,防止外腐蚀发生。

在管道穿越地震活动带、山体滑坡区等地质灾害高发段,安装光纤光栅应变传感器,监测管道的应变变化,当应变超过预警阈值时及时发出预警;在管道弯头、三通等应力集中部位,安装无线应力传感器,实时采集应力数据,避免应力过大导致管道破裂。

1.1.2 管道运行状态监测技术

采用泄漏监测技术,声波监测通过安装在管道上的声波传感器,捕捉泄漏产生的特有的声波信号;分布式光纤传感利用瑞利散射原理,可实现管道沿线泄漏的定位;负压波监测通过采集管道压力变化,结合波速计算泄漏位置,适用于长距离管道的泄漏监测,进而有效提升泄漏监测的准确率,降低误报率。在管道首站、末站及沿线阀室安装智能压力变送器与流量传感器,采用无线HART通信协议,实时采集管道压力、流量数据,数据更新周期小于1s。通过分析压力与流量的波动情况,可识别管道堵塞、阀门故障等问题,为管道运行调节提供依据。

1.1.3 外部环境与第三方破坏监测技术

在山体滑坡、泥石流、地面沉降等区域,部署位移传感器、倾角传感器、雨量传感器,实时监测滑坡

体位移、坡度变化及降雨量,结合地质灾害预测模型,提前预警地质灾害风险。例如,当滑坡体日位移量超过 5mm 时,发出橙色预警,启动应急巡查。

采用立体防控模式。在管道沿线关键区域安装高清智能摄像头,具备人形识别、机械识别功能,当检测到施工机械进入预警区域时,自动发出声光报警;在管道上方埋设振动传感器,捕捉施工机械产生的振动信号,区分正常施工与危险作业;分布式光纤传感器可监测管道沿线的振动与声波变化,实现第三方破坏的全方位预警。

1.2 数据传输技术

搭建多链路传输网能够保证监测数据实时、可靠传输。对于管道沿线分散的应力传感器、振动传感器等传感器,使用 LoRa、NB-IoT 等低功耗广域网,适用于偏远区域的传感器数据传输。利用 4G/5G 或卫星通信技术实现实时远距离传输。其中 4G/5G 适合有公网覆盖地区,带宽大、速度快,可以用于大容量的视频监控、实时监测等场景,确保数据传输的连续性。应用工业以太网、光纤通信等有线传输方式,在管道首站、末站及沿线阀室敷设通信干线,传输速度快、性能可靠,是管道监控中心与各检测设备之间的联系纽带。利用数据加密、访问控制、防火墙等安全技术手段,保证数据传输过程的安全性,数据传输前进行 AES 加密处理,在传输过程中利用 VPN 专用通道,防止数据被盗、篡改;建立严格的访问权限管理体系,搭建完善的访问权限管理系统。

1.3 数据融合分析技术

构建管道运维大数据平台,对多源监测数据进行融合分析。建立统一的数据标准,将巡检数据、监测数据、设备档案、维修记录等多源数据进行格式转换与清洗,消除数据冗余与冲突,存储于分布式数据库中。采用数据中台技术,实现各系统数据的互联互通,打破“数据孤岛”。基于管道历史故障数据和监测数据构建的风险预警模型。可以根据管道腐蚀速率、阴极保护电位、土壤腐蚀性等数据得出管道腐蚀风险等级,根据地质灾害监测数据及历史灾害数据确定地质灾害程度。

该模型能按风险进行分级预警(蓝色、黄色、橙色、红色),为运维人员提供处置指引。针对管道常见的泄漏、腐蚀、堵塞等故障构建故障诊断模型,通过监测数据的特征变化实现故障类型的自动识别和精确定位。例如,当泄漏监测系统检测到压力骤降与特定声波信号时,模型可自动判断为管道泄漏,并结合负压波传播速度计算泄漏位置。应用 BIM+GIS 管道可视化管理平台,将管道三维模型与地理信息、监测数据相

结合,直观地展示管道目前的运行状况;当监测数据超过预警阈值时,平台会自动发出声光报警信号并以短信、APP 等形式将预警信息推送到运维人员手中,明确预警位置、预警风险类型和处置建议。

2 天然气长输管道预防性维护策略

2.1 基于管道健康等级的分级维护策略

根据管道健康评估结果,将管道划分成不同的等级并制定差别化维护策略,实现维护资源合理配置。

①优秀等级管道:管道本体情况良好,运行平稳,无较大风险,主要采取“日常巡检+定期监测”的维护方式,日常巡检周期可增加至 15—30 天,按标准定期开展管道内检测,并重点对管道周边环境进行观察,无需进行大规模维护作业。

②良好等级管道:管体本身主体是完好的,出现局部轻微腐蚀、阴极保护电位略偏离标准范围等轻微风险,在此阶段使用监测的方式进行风险检查,有针对性的进行重点检测;在对于管体发生腐蚀较轻的部位,用防腐涂层修复、调整阴极保护参数等局部维护措施,避免发生管体腐蚀现象扩散的情况。

③一般等级管道:存在局部腐蚀严重的、应力超标的管道存在风险大的隐患,在这种情况下应以“强化监测+专项维护”为维护方式。加强对管体缺陷区域的巡检频率,用在线实时监控设备对相关区域实行 24h 监控,做好专项维护方案,用管道内衬修复、更换部分管段等方式来维修管体缺陷,消除潜在风险,完成维修后进行健康评估。

2.2 基于风险类型的分类维护策略

针对管道腐蚀、地质灾害、第三方破坏等不同风险类型,制定针对性的维护策略,实现风险的精准防控。

2.2.1 管道腐蚀风险维护策略

腐蚀是造成管道失效的重要原因,这就需要实现全链条管理维护。

管道内腐蚀的预防性维护主要是从控制输送介质和保护内壁两方面着手,改进天然气处理工艺,采用内涂层管道(如环氧陶瓷内涂层),使介质与管壁间脱离化学作用。定期开展内腐蚀监测,采用智能清管器,在内壁腐蚀坑深度 >0.5 mm 的区域采取挤涂方式修补或局部换管;定期进行管道内清洗作业,清除内壁积垢及腐蚀产物等,每年至少开展一次清管作业。

外腐蚀预防性维护重点是完善防腐层与阴极保护系统。一是加强防腐层完整性维护,采用 PCM(管道电流测绘)技术定期检测防腐层破损情况,对破损点采用无溶剂环氧涂料修补,修补后涂层粘结强度 $\geq 5\text{MPa}$;二是优化阴极保护系统,确保管道保护电

位维持在 -0.85V 至 -1.2V 之间。智能阴保测试桩作为阴极保护系统的关键智能终端,通过自动化、数字化手段实现阴极保护参数的持续监测与数据传输,按照预设频率采集管道保护电位、电流、土壤电阻率等数据,经本地预处理(过滤异常值、数据加密)后,通过无线通信模块上传至云端运维平台,实现数据的实时更新与存储。基于智能阴保测试桩的长期监测数据,优化预防性维护计划,避免由于维护不及时导致腐蚀风险升级。三是改良管道周边土壤环境,对高盐、高碱性土壤区域,采用换土或施加缓蚀剂的方式,降低土壤腐蚀性;四是在管道穿越盐碱地、沼泽等强腐蚀区域,采用套管保护,并填充防腐油脂。

2.2.2 地质灾害风险维护策略

①滑坡风险维护。在滑坡体前缘修建截水沟及排水盲沟,避免雨水入渗引起的滑坡;在滑坡体中部修建抗滑桩约束滑坡体运动;管道穿越滑坡带部位“蛇形敷设”,提高管道柔性的适应性,防止管道被拉断;同时安装光纤光栅应变传感器和倾角传感器,监测滑坡体位移和管道应变,当应变大于 0.15% 时发出预警并启动应急加固。

②地面沉降风险。对于采空区、软土等地基沉降高发区域采取注浆加固地基措施,提高地基承载能力;改变管道直埋敷设为架空或者套管穿越,避免因管道的下沉造成管道受到压力;设置分层沉降仪和管道沉降观测点,每个月测量一次沉降值,若累计沉降大于 30cm ,调整管道支架高度或采用波纹管补偿器吸收变形。

③泥石流风险。对泥石流沟谷上游设置拦挡坝(坝高 $\geq 5\text{m}$),拦截大块石及泥沙;沿管线上游侧适当位置设置导流堤,将泥石流引导至远离管道的地方,对管道埋深加深至高于泥石流的冲刷深度且用混凝土包覆保护管道使其免遭冲击,汛期前清除导流设施内部淤堵,保证排水通畅。

2.2.3 第三方破坏风险维护策略

在管道途经施工密集区,安装高清智能摄像头与振动传感器,当检测到挖掘机、推土机等设备进入预警区域时,立即发出声光报警,并将预警信息推送至运维人员手机 APP;在管道地面标识桩上安装 GPS 定位与电子标签,通过手机扫码即可获取管道走向、埋深等信息,提醒施工单位规避;对多次发生第三方破坏风险的区域,采用管道改线或设置防护套管,从根本上消除风险。与地方政府住建、交通部门建立信息共享平台,提前获取沿线施工计划,主动对接施工单位开展技术交底,明确管道保护要求;在大型施工区域派驻专职监护人员,全程跟踪施工过程,制止违规

开挖行为;建立第三方破坏责任追究机制,对造成管道损伤的施工单位依法追责,形成震慑。

2.2.4 设备故障风险维护策略

采用振动监测与温度监测技术,实时采集阀门运行数据,通过分析振动频率与温度变化,预测阀门密封件老化与阀杆卡涩风险;每 1-2 年对阀门进行一次解体检查,更换老化的密封件与润滑脂,对阀座磨损部位进行研磨修复;每年开展一次阀门打压试验与开关可靠性测试,确保阀门在紧急情况下可快速关闭。

定期检查清管器的皮碗磨损情况与传感器精度,确保清管过程中缺陷检测准确;每季度对清管站的发球筒、收球筒进行内壁检查与防腐处理,避免清管器卡堵;根据管道内杂质含量调整清管周期,杂质含量高的管道每月清管一次,杂质含量低的管道每 3 个月清管一次。建立智能监测设备台账,记录设备型号、设备安装位置、校准时间等信息;对于电池供电的无线传感器,每隔 6 个月更换一次电池,防止出现因为没电而影响到正常的监测工作的进行;定期清理视频监控设备镜头及太阳能板,保证设备处于正常运转状态。

3 结束语

总的来说,天然气长输管道智能监测和预防性维护可以显著提升管道运维水平,通过智能化技术可以实现管道风险的提前感知与精准防控。需要建立相应体系,制定基于健康等级、风险类型、全生命周期的差异化维护策略。未来,需要建立更优化的、智能化程度更高的运维方式,促进我国天然气长输管道安全、稳定运行,推动我国能源输送网络的高质量发展。

参考文献:

- [1] 任霖钦,任浩渊,税旭东.浅谈标准化在天然气长输管道生产运行中的应用[J].中国石油和化工标准与质量,2025,45(17):4-6.
- [2] 赵洁.物联网技术在天然气长输管道实时安全监测中的应用研究[J].中国石油和化工标准与质量,2025,45(08):160-162.
- [3] 延旭博.长输天然气管道智能监测预警系统设计与应用[J].科技与创新,2023,(22):165-168.
- [4] 任小龙,杨喜良,李刚,等.管道离心压缩机组智能化管理技术探讨[J].中国石油和化工标准与质量,2020,40(12):254-256.
- [5] 唐尚.长输天然气管道的管理及相应的腐蚀监测技术[J].中国石油和化工标准与质量,2013,33(23):87.
- [6] 施晓红.智能声波技术在天然气长输管道泄漏监测中的应用[J].经济研究导刊,2012,(15):206-208.