

Leak detection and safety protection technology of natural gas pipeline transmission system

Changyu Liu

Sichuan Guotai Minan Safety and Environmental Protection Technology Service Co., Ltd., Chengdu, Sichuan, 610000, China

Abstract

Natural gas, as an efficient and clean energy source, plays a crucial role in ensuring stable energy supply through its pipeline transportation system. However, pipelines operating under long distances, high pressures, and complex geological conditions are highly susceptible to leakage accidents, which can lead to severe consequences such as fires, explosions, and environmental pollution. This paper systematically analyzes the risk characteristics and causes of natural gas pipeline leaks, summarizes the current mainstream leakage detection technologies, including physical parameter monitoring, sensor network applications, and data model identification methods, and explores the synergistic prevention and control effects of various safety protection technologies within the pipeline system. Additionally, in response to the trend towards integrated and intelligent detection systems, the paper proposes ideas for constructing information fusion and remote management platforms, emphasizing the importance of both institutional norms and technical mechanisms to enhance the intrinsic safety level of natural gas transmission systems, reduce operational risks, and provide technical support and management references for the industry.

Keywords

natural gas pipeline; leakage detection; safety protection; risk identification; system integration

天然气管道输送系统泄漏检测与安全防护技术

刘昌玉

四川国泰民安安全环保技术服务有限公司, 中国 · 四川 成都 610000

摘 要

天然气作为高效清洁能源,其管道输送系统在保障能源稳定供应中具有关键地位。然而,管道在长距离、高压及复杂地质环境下运行,极易发生泄漏事故,带来火灾、爆炸与环境污染等严重后果。本文系统分析天然气管道泄漏的风险特征与成因,归纳当前主流的泄漏检测技术路径,包括物理参数监测、传感网络应用及数据模型识别方法,并探讨多种安全防护技术在管道系统中的协同防控作用。同时,针对检测系统集成化与智能化发展趋势,提出信息融合与远程管理平台建设思路,强调制度规范与技术机制并重,以期提升天然气输送系统的本质安全水平,降低运行风险,为行业提供技术支撑与管理参考。

关键词

天然气管道; 泄漏检测; 安全防护; 风险识别; 系统集成

1 引言

天然气在全球能源结构中占据重要地位,其运输主要依赖管道输送系统。由于输送过程需跨越复杂地质、多种气候及高人口密度区域,导致安全运行风险显著提升。尤其在高压输送环境下,管道一旦发生泄漏,极易引发燃爆事故,影响社会稳定与生态环境安全。因此,构建科学、高效的泄漏检测与安全防护体系是保障天然气输送系统安全运行的核心课题。当前行业内虽已形成多种检测与防护技术体系,但仍面临响应不及时、误报率高、覆盖能力不足等现实挑战。本文旨在通过深入剖析泄漏风险机理与技术发展路径,提出

具有前瞻性和可实施性的系统性解决方案,推动天然气输送领域安全水平的持续提升。

2 天然气管道泄漏风险特征与成因分析

2.1 天然气管道输送系统的运行环境与风险暴露点

天然气管道常跨越城市、农村、山地与河流区域,环境复杂多变,地质结构不稳定,存在滑坡、沉降、地震等自然风险。高压运行条件下,焊缝老化、管体腐蚀与涂层剥落加剧金属疲劳,易形成微裂纹。城市建设施工频繁,第三方破坏成为管道受损的主要人为因素。老旧管网缺乏智能化监控,长期运行状态下难以及时发现早期损伤。气候变化引发的冻融交替和极端天气同样影响地表稳定性,增加埋地管道变形与应力集中风险。运行过程中,如调压系统失效或过压

【作者简介】刘昌玉(1993-),女,中国四川广汉人,本科,注册安全工程师,从事安全评价研究。

操作,亦可能造成机械损伤,诱发泄漏事件。

2.2 常见泄漏类型及诱发机制解析

天然气管道泄漏可分为连续性泄漏、突发性破裂、微渗漏等类型。连续性泄漏常因长期腐蚀作用或小型裂纹扩展造成,难以在初期被察觉。突发性破裂多与应力超载、地基失稳或外力撞击相关,破坏范围广、能量释放强烈。微渗漏则常发生在法兰连接、阀门接口等部位,长期积累可能引发爆炸风险。腐蚀机制包括电化学腐蚀与应力腐蚀开裂,受土壤湿度、电位差和金属疲劳程度影响较大。焊接缺陷、管材瑕疵、安装误差等也会在运行中逐渐演化为泄漏点,形成复杂的多因耦合破坏过程。

3 天然气管道泄漏检测技术体系

3.1 基于物理参数监测的泄漏检测方法

物理参数监测技术通过实时采集管道内外的压力、流量、温度和声波信号等数据,识别异常状态以判断是否发生泄漏。当管道泄漏导致压力突变或流量不匹配时,可通过压差分析实现快速报警。声波检测技术能捕捉泄漏点产生的高频噪声,在高压输送环境中具有灵敏性。温度监测可识别天然气气化吸热效应造成的局部温度降低,用于辅助定位。流量不平衡计算基于进出口流量对比判断泄漏量,适用于长输管道的宏观异常识别。这些方法虽响应速度快、系统简单,但在微泄漏和复杂干扰环境中准确性仍需提高。

3.2 基于传感网络与分布式监测技术的应用

传感网络技术通过在管道沿线布设光纤、声波、气体浓度等多类型传感器,形成分布式实时监控体系,实现大范围、全天候的连续监测。分布式光纤传感技术如DTS(分布式温度传感)和DAS(分布式声波传感)能精准检测泄漏引起的温度或声信号变化,具有高灵敏度与广覆盖能力。无线传感节点则能将局部异常信息迅速上传至控制中心,便于远程决策。该技术可构建泄漏报警、定位、追踪一体化系统,提升反应效率。但对设备布局、传感器灵敏度和数据同步要求较高,建设与运维成本亦需统筹考虑。

3.3 基于数据分析与建模识别的泄漏诊断技术

数据分析与建模方法借助历史运行数据、实时监测数据及环境变量进行模式识别,构建多源融合的泄漏判断模型。通过统计分析、时间序列建模、模式识别等手段提取泄漏特征向量,实现对微小变化的快速识别。概率模型可评估不同类型泄漏的发生可能性与影响范围,提升检测预判能力。机器建模与数学仿真在异常分类、故障识别、故障趋势预估方面具有优势,适用于多参数干扰环境中的复杂决策需求。多模型集成提升整体检测准确率,并通过误差反演实现泄漏位置反推,为精准维护提供支撑,图1为数据分析与建模识别的泄漏诊断技术分析。

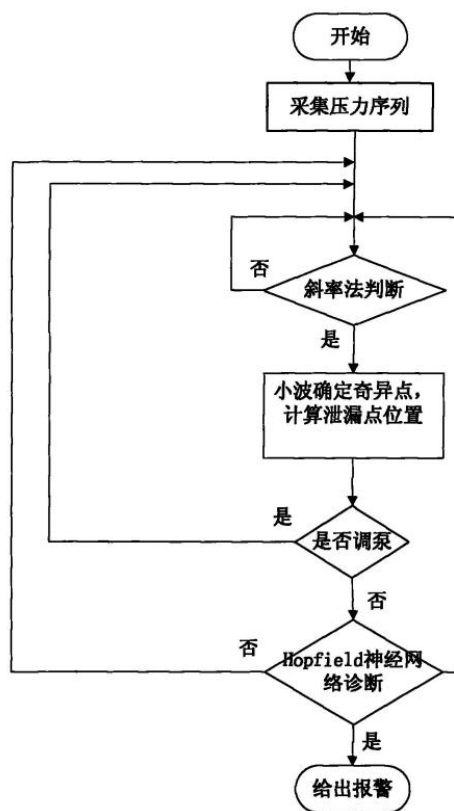


图1 数据分析与建模识别的泄漏诊断技术分析

4 天然气管道安全防护技术措施

4.1 主动防护机制与管道完整性管理技术

主动防护技术以预防性控制为目标,涵盖阴极保护、缓蚀剂注入、管道覆层优化等手段,用于延缓金属腐蚀与疲劳裂纹形成。通过定期实施智能检测如内窥检测(PIG)和超声波检测,获取管道壁厚、焊缝完整性与潜在损伤信息,构建动态风险图谱。管道完整性管理系统基于结构分析、历史工况与检测数据,预测可能的失效模式与关键节点,制定个性化维护策略。定期进行地质风险评估与沉降监测,有助于调整埋深与支撑结构。综合评价结果可用于更新风险矩阵,实现资源最优配置与分级管理,保障输送系统稳定运行。

4.2 紧急切断与事故响应系统设计

天然气输送系统中设置的紧急切断装置可在检测到超压、泄漏或管道破裂等异常信号后快速动作,阻断气源,限制事故影响范围。阀组通常分布于重要节点与高风险区段,可通过远程控制系统或自动化触发机制实现精确响应。事故响应系统包含应急联动、就地控制、报警联动等功能,支持多路径控制信号传输与设备自诊断。与检测系统集成后可实现泄漏识别、区域封闭与排空联动操作,提高初期处置速度。配合完善的事故预案体系与应急演练机制,保障处置行动快速有序,降低安全事故对人员与设施的危害。

4.3 防爆设施与环境适应性防护装置配置

防爆设计贯穿于天然气管道的站场、阀室与控制中心

建设过程中,主要通过设置防爆墙体、泄压装置、防火涂层与隔爆电气系统等形式阻断能量传递路径。阀井与站场周边常配备通风与气体稀释系统,降低气体积聚浓度,抑制火源传播。设备间距与布局设计符合防火间距标准,控制设备采用本安或隔爆型产品以保证运行安全。对于山地、盐碱地、冻土层等特殊环境,采取绝热材料、防冻保护与抗沉降装置,确保长期运行稳定。环境适应性设计通过参数动态调节与反馈控制,维持防护装置与环境变化同步适应,提升系统耐久性。

5 泄漏检测系统的集成优化与智能化发展

5.1 检测系统软硬件集成架构设计

泄漏检测系统在构建过程中需兼顾数据采集、信号传输、分析处理与反馈控制功能,形成完整软硬件协同体系。前端采集模块集成压力、流量、温度、声波与气体浓度等多种传感单元,布局覆盖主干管线与高风险节点。边缘计算设备嵌入管道沿线节点,实现初步数据处理与局部判别。中心处理平台通过高性能服务器运行实时监控程序,支撑大数据存储、模型分析与报警判断。系统软件需具备自学习能力、阈值自适应与设备状态感知功能,实现运行状态自诊断与动态调优。接口统一标准化设计,便于与安全管理系统对接,提升系统整体联动性与维护效率。

5.2 多源信息融合与预警算法优化路径

多源信息融合技术整合来自不同监测模块的数据,通过统一数据格式与时间同步机制形成完整事件画像。融合算法采用贝叶斯推理、支持向量机、卷积神经网络等建模工具提取关键特征值,提高异常检测灵敏度。多尺度分析与频域识别方法可强化微弱信号判别能力,特别适用于微渗漏场景。基于工况分区构建分层报警策略,实现区域化、自适应预警模型。通过引入反馈机制对误报与漏报事件进行历史回溯分析,优化参数设定。事件级联模型与失效演化预测方法用于提升预测准确度,为事故前置干预提供数据支持与决策参考。

5.3 智能管控平台构建与远程协同管控机制

智能管控平台整合GIS空间信息、SCADA监控系统与泄漏识别模块,实现跨区域、跨系统的数据集中管理与可视化展示。平台支持多级权限管理,保障调度中心、巡检单位、应急队伍等多方同步协作。远程管控机制基于5G通信与边缘计算技术,能在关键节点快速获取数据并实时响应操作指令。平台具备动态趋势分析、故障演化模拟与风险热力图生成功能,支持智能调度与辅助决策。应急状态下,系统可推送最优处置路径与资源调配方案,实现全过程、全链条、全要素的远程指挥与联动管控。系统运行数据闭环管理机制也为长期安全运营积累基础数据资源。

6 天然气管道安全管理的制度与技术协同路径

6.1 标准化建设与检测规程制度完善

安全管理标准化是天然气管道系统运行可靠的制度基础,涵盖设计、建设、运营、检测与报废全周期。统一技术标准体系包括泄漏检测设备安装规范、检测频率、判定阈值、报警机制与记录保存要求。规程中明确管道等级分类、隐患排查内容、检测方法适用条件等,形成覆盖面广、执行力强的管理指南。制度体系要求各类检测数据有据可依、有标可循,降低人为主观误差。结合实际运行情况不断动态修订与技术更新,增强制度适配性与前瞻性。建设标准统一的同时,配套推进人员培训与持证上岗管理,实现技术、操作与管理的闭环统一。

6.2 基于风险评估的维护与巡检策略

风险导向管理理念推动管道维护工作由定期制向状态感知与风险分级转变。通过构建涵盖地质条件、运行年限、历史事故、周边干扰与结构完整性等指标的风险评估模型,对管道段落进行风险等级划分与预警等级标注。评估结果作为排定巡检频次、技术手段与维护优先顺序的依据,实现高风险段主动预防、低风险段合理延后。在巡检策略上引入无人机巡线、地面雷达与红外成像等多元技术手段,增强数据获取深度与覆盖广度。多源数据反馈机制实现异常自动识别、动态调度与智能排障,提升巡检效能与风险控制能力。

6.3 多部门协同与应急演练体系构建

天然气管道安全管理涉及建设、运营、安监、消防、环保、交通等多部门协同。构建跨部门联动机制需明确职责边界、沟通流程与信息共享机制,实现资源统筹与快速响应。建立统一应急平台,集成监测预警、通讯调度与行动指令,确保事故发生后各单位可在最短时间内启动相应处置程序。完善应急预案库,涵盖不同泄漏情境下的应对策略与撤离路线。常态化组织多场景、多层级的应急演练,检验协调效率与系统响应能力。演练反应用于修订预案与优化资源配置,强化各方协作默契,提升综合防控与救援能力的系统性与实效性。

参考文献

- [1] 王雅倩.石油与天然气管道输送中BOG处理技术的应用与研究[J].辽宁化工,2025,54(02):328-330.
- [2] 张刚,孙启超,钟炎鑫,方超,庄学良.天然气管道输送安全关键技术与发展研究[J].石化技术,2024,31(10):260-262.
- [3] 李天一.石油与天然气管道输送节能降耗研究[J].中国储运,2024,(07):56-57.
- [4] 李雨琼,董雨茜.天然气管道输送安全关键技术与进展[J].当代化工研究,2024,(06):194-196.
- [5] 薛琪影.天然气管道输送工程消防设计及火灾预防对策[J].消防界(电子版),2024,10(04):81-83.