

Design of long distance pipeline safety monitoring system based on Internet of Things

Zhigang Fan Yuhui Liu

Yunnan Branch of National Oil and Gas Pipeline Network Group Co., Ltd., Kunming, Yunnan, 650500, China

Abstract

As a critical infrastructure for national energy transmission, the operational safety of long-distance pipelines directly impacts the national economy and environmental protection. Under complex geographical conditions and high-intensity operating environments, traditional monitoring methods fall short in real-time performance, accuracy, and system response capabilities. The introduction of IoT technology offers a new solution for the safety monitoring of long-distance pipelines. By using multi-source sensing devices to collect operational data in real time, leveraging wireless communication networks for efficient remote transmission, and relying on platform analysis and integrated control mechanisms to establish a comprehensive, closed-loop safety monitoring system, this paper systematically explores the functional division, technical selection, and integration modes of IoT architecture in monitoring systems. It also proposes optimization strategies for platform deployment and maintenance based on practical application scenarios, aiming to provide theoretical foundations and practical solutions for building intelligent, efficient, and reliable pipeline monitoring systems.

Keywords

long distance pipeline; Internet of Things; safety monitoring; system integration; risk warning

基于物联网的长输管道安全监控系统设计

范志刚 刘玉辉

国家石油天然气管网集团有限公司云南分公司, 中国·云南 昆明 650500

摘要

长输管道作为国家能源输送的关键基础设施,其运行安全直接关系到国民经济和环境保护。在复杂地理条件和高强度运行工况下,传统监控手段在实时性、准确性和系统响应能力方面存在显著不足。物联网技术的引入为长输管道安全监控提供了全新的解决路径,通过多源感知设备实时采集运行数据,借助无线通信网络实现远程高效传输,并依托平台分析与联动控制机制构建起全流程、闭环式的安全监控体系。本文围绕长输管道安全需求,系统探讨了物联网架构在监控系统中的功能划分、技术选型与集成模式,并结合实际应用场景提出平台部署与运维的优化策略,旨在为构建智能、高效、可靠的管道监控系统提供理论依据与实践方案。

关键词

长输管道; 物联网; 安全监控; 系统集成; 风险预警

1 引言

随着国家能源基础设施布局不断延伸,长输管道在石油、天然气等资源跨区域高效输送中的战略地位日益凸显。受制于地形环境、管段老化和外力破坏等多种风险因素,长输管道事故频发,严重威胁输送安全与生态稳定。在传统监控模式中,由于数据感知范围有限、数据更新滞后,安全管控的及时性与精准性难以满足高标准运行要求。以感知层、网络层与平台层为核心架构的新一代物联网技术,具备广域覆盖、高频感知、多协议通信与边云协同等显著优势,为管道安全管理的智能化转型提供了基础支撑。本文围绕长输管

道运行特点,聚焦物联网关键技术在安全监控中的适配方式与系统集成路径,构建全流程技术架构,推动监控系统由静态被动向动态主动转型,从而提升风险响应的效率与决策的科学性。

2 长输管道运行特性分析

2.1 长输管道结构布局及运行环境特点

长输管道通常呈线性跨区域分布,穿越山区、河流、农田、城市等多种复杂地形,线路长度可达数百至数千公里,沿线环境气候多变,地质结构差异显著,运行环境面临不确定因素众多。管道主体包括输送管体、阀室、加压站等组成单元,其结构需兼顾密封性、强度与耐腐蚀性能,且通常埋设于地下或浅覆土层,外部不可见性增强了故障检测难度。管道运营周期长,受地基沉降、自然灾害、第三方施工等干

【作者简介】范志刚(1972-),男,中国陕西周至人,硕士,高级工程师,从事油气储运工程研究。

扰较大,部分管段长期处于高压、高温、高腐蚀状态,极易形成应力集中区域,加速材料疲劳与老化进程,进一步增加事故隐患和安全管理负荷。

2.2 管道运行过程中常见故障类型与成因

长输管道在运行中易发生渗漏、破裂、阻塞、压力波动、腐蚀穿孔等故障类型,其中以腐蚀损伤和机械破坏最为频繁。内腐蚀主要由输送介质中所含的水分、硫化氢或二氧化碳引起,形成局部电化学反应,削弱管壁强度。外腐蚀则多源于土壤湿度、电化学干扰或阴极保护失效。机械破坏往往由第三方非法施工、重物压迫或地质滑移等突发外力作用所致,造成局部结构严重变形或断裂。压力波动可能因启停操作不当、设备失调或突发阻力变化所诱发,引发管道振动与疲劳累积。阻塞问题则与介质中杂质积聚、温度骤变或管径设计不匹配相关,均可能诱发输送中断与安全事故。

3 物联网技术在管道监控中的关键应用要素

3.1 感知层设备的选择与布设策略

感知层作为物联网架构的基础,直接决定了数据感知的覆盖范围、监测精度与响应能力。在长输管道应用中,常选用的感知设备包括压力传感器、温度传感器、流量计、振动监测器、管道应变计和泄漏检测器等。设备选型应考虑所处地段的气候、地质条件及输送介质特性,选用具备高灵敏度、抗干扰能力强、环境适应性好(如耐高温、耐腐蚀、抗电磁干扰等)的工业级设备。布设策略需兼顾连续监测与重点覆盖原则,合理设定传感器的采样周期和数据精度。在高风险管段、易腐蚀区域或交叉复杂地带加密布设,实现数据点位分布的合理性与动态监控能力的平衡,通过合理布网提高整个系统的风险识别效率和响应时效性,构建全面、分层、可拓展的感知体系。

3.2 通信网络构建与数据传输稳定性分析

管道监控通信网络需覆盖数百公里的区域,面对地形复杂、信号遮挡等问题,应构建融合多种通信技术的分层通信架构。在城市及近郊区域可优先采用 4G/5G 等高带宽蜂窝网络,在偏远山区或网络覆盖薄弱地段则通过 LoRa、ZigBee 或 NB-IoT 等低功耗广域网方案保障信号畅通。关键监控点、高风险段或无人值守站点可配置卫星通信或微波链路作为冗余通道,以确保紧急预警与高优先级数据的可靠传输。传输稳定性与时效性取决于网络架构的层次划分、节点容错能力及协议兼容性设计。部署中需实现传输路径的自动切换与重连机制,确保监控数据实时、完整、连续上传至中心平台,避免数据延迟、丢失或失真引发风险识别滞后,保障监控系统在极端环境下的连续稳定运行。

3.3 数据采集与预处理模块的功能实现

长输管道在运行中产生的数据量庞大且更新频繁,必须通过边缘采集设备进行高效数据接入与初步处理。预处理模块主要功能包括数据标准化、异常值剔除、特征提取

与初步融合计算等,其作用在于降低中心平台的数据负荷,提升响应速度与处理效率。内置异常数据标记与事件触发机制,可在检测到如压力突变、流速异常、振动激增等现象时快速生成告警,推送至上级平台。同时具备断点续传机制,在通信中断期间缓存本地数据,并在网络恢复后自动补传,确保数据连续性。通过算法嵌入与本地运算,边缘设备可初步实现故障预判与分类筛查,有效缩短从感知到响应的时间链条,为后端决策系统提供精准、高效、结构化的基础数据支撑。

4 安全监控系统功能架构与运行机制设计

4.1 多源数据融合下的监测模型构建思路

基于物联网技术的长输管道安全监控系统需要在多维数据的基础上构建高效的监测模型以实现复杂环境下的状态识别与动态评估。多源数据包括传感器采集的压力、流速、温度、振动、电位差、应变信息以及外部环境数据如气象、地震和地质资料,需通过多源接入网关和接口协议统一模块进行整合。系统引入特征提取与标准化处理算法,对不同维度、不同时间频率下的数据进行空间与时序映射,将其转化为统一格式便于后续分析。模型设计以数据融合为基础,结合阈值判定、趋势识别与变化速率计算等技术,建立多因子驱动的状态评估模型。实现运行状态的精准表达,并通过训练参数的动态调整适应管道运行条件的变化,构建具有高度自适应能力的智能监测体系,最终实现从数据驱动到风险识别的闭环逻辑链条。

4.2 管道异常事件的实时识别与预警机制

管道监控系统的核心目标是对异常事件实现早发现、快响应、准定位与有效干预。系统在运行过程中以时间窗为单位持续分析各监测点传输的数据流,构建运行基线并实时监测其偏离程度。异常识别机制基于设定阈值、模式比对与变化率突增等策略,对如泄漏、堵塞、地基下沉或非法破坏等风险进行识别,并结合历史事件标签优化识别精度。预警模块按照风险等级划分机制将事件分为低、中、高三个等级,自动触发对应等级的预警信号,并生成详尽的事件报告(含异常类型、时间、位置、变化趋势等),推送至运维中心。预警机制支持多通道响应联动:包括语音播报、短信通知和移动端提醒,并可联动可视化地图展示异常点位,配合内嵌诊断模型对事件影响范围和发展趋势进行预测,为决策者提供直观的数据支撑与处置依据,构建快速响应的数字化预警防线,图 1 为城市管廊地下管网物联网远程监测系统方案。

4.3 系统联动控制与应急响应流程优化

系统联动控制与应急响应机制是管道安全监控体系高效运行的关键,平台通过集成关键设备(如阀门、调压装置、压缩机等)控制接口,在识别高等级预警事件后,自动触发联动控制,执行如:阀门远程关闭、分段压降、管段隔离等操作,防止事故蔓延与次生灾害发生。应急响应流程根据事

件等级启动相应预案,流程涵盖事件识别、信息确认、风险评估、措施调度、处理反馈与结果归档六大环节,确保各责任单位明确分工、快速到位。平台支持多方远程协同机制,各级指挥人员可通过终端查看事件详情、调取监控视频、部署操作指令,实现跨区域、跨部门的应急协同决策,形成统一指挥、高效处置的监控响应体系。

5 安全监控系统平台的集成与运行管理

5.1 监控平台软硬件集成方式与部署原则

长输管道安全监控平台在架构设计中需实现感知层、网络层、平台层与应用层的纵向融合,确保各系统模块协同高效运行。硬件层包括边缘采集终端、通信中继设备、数据处理服务器、控制执行模块等,软件层则包括数据接入中间件、实时数据库、可视化平台、预警推送模块、远程指令控制系统等,二者通过标准化接口与协议进行互联互通。

平台部署遵循分布式与集中式相结合的原则,在沿线设置边缘节点以提升局部响应速度,在控制中心配置主控系统以统一调度。平台系统支持弹性扩容、模块化扩展与多系统对接能力,满足未来功能叠加与管道网络扩容需求。系统构建过程中应充分考虑设备冗余设计、容错能力与负载均衡策略,实现高可用性与持续稳定运行,为管道全生命周期管理提供支撑。

5.2 远程运维支持与系统自诊断功能设计

远程运维模块是保障管道监控系统长期稳定运行的核心组件,承担故障识别、运维调度、远程控制与数据分析等关键功能,平台通过集成统一运维调度接口,可实现对各监测点状态、网络通畅性、电源稳定性等指标的持续监控,必要时可通过后台进行远程修复或重启操作。

系统自诊断功能内置诊断算法对运行参数进行周期性扫描,通过状态比对与阈值评估自动识别异常传感器漂移、通信中断、功耗异常等常见问题,并生成故障报告,提升故障排查效率并减少人工干预需求。系统配备运维日志记录与工单管理功能,便于运维全过程的追踪与责任追溯。平台还支持软件远程升级与补丁推送功能,确保系统持续保持技术先进性与防护能力,为管道全域监控提供高效的技术保障。

5.3 安全权限管理与信息加密防护机制

长输管道监控系统涉及关键基础设施运行数据与调控指令,必须构建严密的信息安全体系保障系统稳定与数据机密。平台采用分级权限控制策略,基于用户角色设置不同访

问范围与操作权限,防止无关人员获取敏感数据或执行控制指令。所有操作行为均通过日志审计系统实时记录,实现全过程审计与追责。

在数据安全层面,系统对采集、传输与存储的全链路数据实施加密保护,采用 AES(对称加密)与 RSA(非对称加密)组合方案,保障数据在公网环境中的机密性与完整性。

身份认证机制方面,系统接入统一身份管理平台,支持多因子认证(MFA),增强账号安全等级。

在网络与系统防护方面,平台集成防火墙、入侵检测系统(IDS)、恶意代码拦截模块等防御手段,定期开展安全漏洞扫描与补丁更新,构建纵深防御体系,防范网络攻击、非法接入与信息泄露等风险,图2为环境监控安全网络构建分析图。

6 结语

基于物联网技术的长输管道安全监控系统,依托感知、通信、智能分析与联动控制等关键技术,系统性重构了传统监控模式的技术架构与运行模式。系统通过多源数据融合、实时预警识别、联动应急处置和远程运维支持,显著提升了对复杂环境下突发风险的应对能力。感知层设备布设科学、通信网络构建稳定、预处理机制高效,为平台提供了坚实的基础数据支撑。平台集成设计突出软硬件融合与功能弹性,确保系统具备良好的扩展性与可维护性。安全策略体系严密,强化了对管道运行信息的保护能力。在日趋复杂的能源输送格局中,该系统为实现长输管道的智能化、高效化、安全化运行提供了切实可行的技术路径,也为相关行业在数字化转型与风险治理方面积累了宝贵的技术路径与实践经验,具有良好的推广前景与应用价值。

参考文献

- [1] 李纯,寇志超,常志浩.原油长输管道安全输送防护技术[J].化工管理,2022,(09):98-100.
- [2] 白宇博.天然气长输管道安全防范及其平稳运行策略探讨[J].石化技术,2021,28(12):176-177.
- [3] 史雄威,姜旭,段秋生,党丽,张旭龙,翟瑞欣.长输管道本质安全技术体系构建探讨[J].石油和化工设备,2021,24(09):11-13.
- [4] 孙伟.油气长输管道安全监控预警系统设计与实现[J].安全、健康和环境,2021,21(03):32-34+61.
- [5] 刘玉杰,王伟,马雨廷.天然气长输管道安全防护预警系统应用[J].中国石油和化工标准与质量,2018,38(24):60-61.