

# 面向云边协同的石油管道智能监测系统设计

孙 灏 (山东联合能源管道输送有限公司, 山东 烟台 264000)

**摘要:** 为增强石油管道运行的安全性及监测效率, 采用云边协同体系来对传统集中式监测架构开展优化设计工作。研究基于分层采集、边缘自治并云端决策的协同模式, 构建多级数据处理跟智能调度机制, 达成监测数据的高效传递、实时剖析与安全守卫。对通信稳定性、计算负载与数据一致性开展系统分析后, 提出相应的技术优化途径。该体系能极大提升异常识别的精确程度和响应时效, 为石油管道智能监测的工程应用提供可行途径。

**关键词:** 石油管道; 云边协同; 智能监测; 边缘计算; 数据安全

**中图分类号:** TE973.6; TP393

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1674-5167 (2026) 001-0088-03

## Design of an Intelligent Monitoring System for Petroleum Pipelines Based on Cloud-Edge Collaboration

Sun Hao (Shandong United Energy Pipeline Transportation Co., Ltd., Yantai Shandong 264000, China)

**Abstract:** To enhance the safety and monitoring efficiency of petroleum pipeline operations, a cloud-edge collaboration system is adopted to optimize the design of traditional centralized monitoring architectures. Research focuses on a collaborative model based on hierarchical data collection, edge autonomy, and cloud-based decision-making. This establishes multi-level data processing and intelligent scheduling mechanisms to achieve efficient transmission, real-time analysis, and security protection of monitoring data. Following systematic analysis of communication stability, computational load, and data consistency, corresponding technical optimization approaches are proposed. This system significantly improves anomaly detection accuracy and response timeliness, providing a viable pathway for the engineering application of intelligent oil pipeline monitoring.

**Keywords:** Oil pipelines; Cloud-edge collaboration; Intelligent monitoring; Edge computing; Data security

石油管道作为国家能源战略的关键基础工程, 其运行安全直接牵扯到油气供应的稳定状态和区域生态环境的风险防控。伴随管网规模持续扩展与运行环境日益繁杂, 传统监测模式在数据实时性、空间覆盖及风险响应方面, 局限愈发明显。为应对多源感知数据在高频采集与远程传输方面的压力, 建设云边协同的智能监测体系是提升管道安全管理水平的关键路径<sup>[1]</sup>。本文就必要性分析、核心问题与协同架构展开相关研究, 制定分层采集、边缘自主运作与云端决策的技术方案, 为石油管道的智能监测和安全运行提供系统化设计思路与工程参考。

### 1 云边协同引入的必要性分析

石油管道监测系统处在广域分布与复杂工作情形下运行, 单一中心化架构在应对海量感知数据实时处理需求上有难处。引入云边协同架构, 让数据能在采集端开展初步分析与筛选, 极大地减少传输带宽占用并提高响应速率。处于跨区域长距离输油网络当中, 传感终端数量庞大且分布不合理, 传统数据回传模式受通信延迟及带宽瓶颈的制约, 造成异常信号在传输链条中被稀释或响应滞后。设备种类繁多、监测数据格式不统一, 也造成集中式处理难以实现快速解析及统一建模, 迫切需要在边缘端搭建具有就地计算和自

主识别能力的分布式节点体系<sup>[2]</sup>。边缘节点有着近源计算的能力, 可对压力、温度、振动等关键参数做本地建模及异常筛查, 实现现场实时预警与状态自适应变更。云端承担全局优化和历史趋势的分析事宜, 集中管理多站点的监测数据, 为管道健康评估及维护计划生成提供支撑。对于穿越高后果区(HCA)、化工园区、城市工业密集带等复杂环境, 由于周边人口密度高、工业设施集中且环境风险敏感度显著提升, 传统监测链路一旦出现延迟或遗漏将导致事故外溢范围急剧扩大。云边协同架构可在此类关键区段实现毫秒级边缘响应、快速异常压制与跨节点风险联动, 使高后果区管段获得更高等级的实时监护能力。

### 2 石油管道监测的主要问题

#### 2.1 数据链路分散

石油管道沿线分布面积广、地形十分复杂, 监测节点往往分布在无人区或恶劣的环境里面, 导致数据链路布局呈现出高度分散的特点。各监测点使用的采集终端、通信协议与数据格式未达成统一, 造成系统间数据传输链出现多跳延迟现象和协议转换损耗。不同厂商设备在接口开放性与协议兼容度上的差异进一步放大了链路碎片化程度。部分管段依赖临时无线链路或卫星中继, 因受天气与地形的影响, 数据丢包和

链路中断较易发生,无法轻易维持监测流的连贯稳定<sup>[3]</sup>。链路状态不稳定可能造成时序数据错乱等一系列问题,使跨站点关联分析与趋势建模面临较高的不确定性。数据链路的分散形势已成为限制监测系统时效性与完整性的关键瓶颈。

## 2.2 通信中断频发

石油管道沿线频繁跨越山区、荒漠及无人的区域,通信基础配套薄弱,导致监测网络在长距离传输当中极易受环境干扰,出现信号衰减与中断问题。部分监测点依赖蜂窝网络或卫星链路,受气候状况、电磁干扰及地理遮挡的影响,通信稳定性起伏明显。在风沙、暴雨及严寒等极端环境下,链路衰减更为显著,使短时通信盲区呈周期性出现。突然出现的供电故障或终端老化也会引发链路掉线,引发关键监测数据无法实时传送<sup>[4]</sup>。系统缺少应对通信中断的冗余容错机制,节点离线时,没办法进行本地数据的缓存以及同步恢复,引发监测时序断裂以及数据缺口。并且在多点同时掉线时,网络拓扑会出现局部瘫痪,进一步降低跨站点状态感知的连续性。通信中断不仅对远程预警的连续性造成削弱,也让异常信息无法在第一时间触发应急响应,形成安全隐患传播时间延迟。

## 2.3 计算负载过高

在现有的石油管道监测体制里,全部传感终端的数据都需汇集到中心服务器进行统一运算与分析,伴随监测点数量的增多以及采样频率的提高,数据的吞吐量呈指数式增长。中心节点长时间维持高负载运行状态,造成任务排队跟处理延迟明显加剧。海量原始信号未作筛选直接进行上传,还会造成数据冗余进一步增多,还让服务器在特征提取与异常识别阶段面临资源方面的难题<sup>[5]</sup>。部分高频监测数据需开展多维建模跟时间序列预测,计算的复杂度偏大,进一步减弱系统的实时响应能力。若出现突发异常或者多源事件并发的情形时,中央处理单元极易出现运算阻滞,影响全网状态评估与决策下发的时效性,让系统在高并发场景中的稳定性与可扩展性变差。

## 2.4 安全防护不足

石油管道监测系统在多级网络的架构下开展运行,数据在采集、传送与存储期间频繁跨越边界节点,安全防护环节极易出现薄弱点。某些前端设备没有加密认证这一功能,传感数据以普通明文方式去上传,存在被拦截或篡改的风险。监测平台缺少统一的访问控制策略,用户权限的分级界限不明,易引起系统接口暴露与非法访问状况。鉴于不同厂商设备之间安全标准不统一,漏洞修复跟补丁更新难以同步起来,产生潜在的攻击缺口<sup>[6]</sup>。云端数据库对大量运行记录和

地理信息进行集中存储,倘若碰到入侵,也许会造成关键设施运行状态外露。防护体系的分散与被动表现,造成系统在应对恶意攻击、异常登录及数据泄漏时反应迟缓,不易形成连贯的安全闭环。在穿越高后果区与工业区的管段,由于存在易燃、易爆、剧毒物料设施与人口聚集点,任何监测数据被篡改、延迟或丢失都可能对周边生产系统与公众安全造成放大效应。因此,安全策略需覆盖更细粒度的权限隔离、更严格的链路加密与跨节点一致性校验,以确保此类关键区段监测数据不可伪造、不可缺失、不可延误。

## 3 云边协同体系设计策略

### 3.1 分层采集架构优化

分层采集架构的优化要点是让数据从现场到云端实现高效传递与分级处理。底层传感层部署高精度的压力、流量、温度及振动传感器,达成连续采样让边缘节点在就地汇聚;边缘计算层承担着数据预处理跟异常筛查的任务,边缘侧需配置用于多源信号同步、数据质量校验与时序对齐的轻量化模块,以确保不同类型传感器在采样周期、量纲转换和特征提取上的一致性,从而提升下游筛查算法的稳定性与阈值判定的可信度。依靠阈值判断与特征压缩减少传输的冗余,保障关键指标实时呈递上报;云端层承担全局数据整合以及长期趋势分析工作,建立跨站点模型以辅助全网运行状态评估。各层借助轻量化通信协议达成动态协同,边缘节点可按照网络状态自行适应调整数据上传频率,防止中心承载过高。分层架构优化之后,监测体系形成了“现场响应—边缘计算—云端决策”的闭合环路,为管道运行的持续感知及精准管理提供了结构依托<sup>[7-8]</sup>。

### 3.2 边缘自治控制机制

边缘自治控制机制凭借在近源节点嵌入计算与决策模块,赋予管道监测独立响应与自我调节的能力。各边缘节点以实时采集的流量、压力和温度数据为基础,进行本地建模并和动态阈值比对,若检测到异常的波动,可直接触发报警信号,或执行限压、关阀等应急举动。各节点利用局域通信组成协同网络,若通信出现受阻情况可维持局部自行运转,保障监测连贯不断。为防止出现错误判定,边缘控制单元采用多参数融合算法开展状态的识别,并采用周期性学习更新决策模型,从而提高在环境里的适应力。自治控制单元可根据长期运行数据构建工况分级体系,将正常、过渡与轻度异常等状态进行精细化划分,实现差异化控制策略的自动切换。在穿越高后果区及工业区的管段,边缘自治机制需进一步强化应急联动能力。当检测到压力突降、振动激增或异常声发射信号时,边缘

节点可结合区段特性自动触发二级响应，如同步通知周边工业设施、启动区段隔离阀组或执行局部泄压策略，确保在云端尚未完成指令下达前实现事件初级压制。该模式能够减少事故扩散窗口，为人员疏散、应急封堵与跨系统联动争取时间。该机制在复杂气候、间歇供能或高噪声背景下依旧能保持稳定可靠的判别能力。系统于执行层和决策层的中间形成“自治—协同—反馈”的自闭环逻辑，实现监测及控制的同步化和智能化。

### 3.3 云端调度决策模型

云端调度决策模型承担起全局优化及动态指令下发的核心作用，利用对多站点数据做集中整合与建模分析，实现资源分配和风险预估的智能把控。模型把时间序列及空间关联特征当作输入，结合压力、流速、温度与振动信号搭建多维状态矩阵，依靠优化算法动态评估管网运行负载与潜在的风险级别。在复杂运行情境下，云端模型还需融合历史事件库、季节性压力波动模式及设备老化系数，构建跨周期预测链路，以增强对缓慢累积型风险及跨区域耦合风险的识别能力，并为维护策略生成提供依据。系统会根据边缘节点所上报的实时状态生成任务优先级队列，对异常区域开展精准指令分拨与巡检调控。为增进决策的适应性，云端模型借助反馈学习机制不断调整参数权重，让预测结果与实际工况达成契合。云端平台可依据大量回传数据持续更新站点之间的拓扑权重，动态识别关键枢纽节点与高敏感区段，使全局调度策略在突发事件、多点同步告警及链路拥塞情况下仍能保持高效协调与稳定调控能力。该模型在整个网络范围内实现从局部事件响应到全局态势控制的智能决策闭环。

### 3.4 数据加密一致性防护

数据加密一致性防护机制借助全链路安全策略，保障监测信息在采集、传输和存储过程中的完整与可信。边缘节点在采集过程中即对关键参数进行端到端加密，再嵌入时间戳以及节点标识防止数据被改动；传输层采用动态密钥来协商与多通道冗余机制，让数据在弱信号或中断的环境下依旧具备恢复能力。传输链路可引入分片编码与自校正机制，将关键监测数据拆分为多段独立校验片段，使其在发生局部丢包、信道抖动或节点短时离线时仍可通过剩余片段实现完整重构，从而提高链路的抗损能力与恢复速度。云端接收数据时，采用哈希校验与区块链式日志管理对数据源和传输路径实施双重验证，完成跨节点数据的一致性核对与异常跟踪。在数据落库与共享阶段，云端还需配置细粒度的访问控制策略，依据数据敏感度和使用场景动态调整权限等级，配合行为基线监测识别异

常检索、频繁读取或越权调用等可疑操作，进一步构建闭环的主动防御体系。系统在云一边的关联中构建安全信任链，任何节点状态变更或访问行为均可实时记录审计，进而建立多层级、可追查的防护体系，为云边协同监测构建稳定的安全支撑。

## 4 结语

面向云边协同模式的石油管道智能监测体系通过分层采集、自治控制与云端决策的协同架构，实现了监测网络的高效配合与动态优化。系统在处理数据链路分散、通信中断与计算负载过高的关键问题的同时，构建起安全可回溯的数据防护手段，为管网运行状态精准察觉与风险预警提供了技术后盾。在持续部署与运行过程中，云边协同体系还展现出对环境扰动、节点老化以及复杂地理条件的稳态适应能力，使监测网络在多源干扰条件下仍保持事件识别的准确性与数据通道的稳定性，为大规模工程化应用奠定了基础。未来研究能够进一步聚焦于跨区域节点间的自适应协同以及多源异构数据的融合剖析，助力智能监测体系向高可靠性与自进化方向前行。

### 参考文献：

- [1] 廖一鹏,李浩,白森杰,等.基于云边协同细粒度分类的内窥锁芯快速识别[J].光学学报,2025(21):1-20.
- [2] 刁安娜,王玉莉,白亮,等.基于云边协同技术的大型工艺气螺杆压缩机性能预测[J].化工机械,2025,52(05):837-842.
- [3] 王军魁,杨灵,杨志刚,等.基于智能传感器的石油天然气管道监测系统设计与优化[J].中国石油和化工标准与质量,2025,45(17):94-96.
- [4] 吴海峰,胡静龙.石油运输管道安装设备的应用与技术创新探讨[J].中国石油和化工标准与质量,2025,45(17):128-130.
- [5] 胡青松,李飞,单露露,等.石油输送管道微小缺陷智能检测方法[J].西安石油大学学报(自然科学版),2025,40(04):134-142.
- [6] 田世川.暗挖地铁隧道下穿石油管道智能监测技术[J].建筑机械化,2025,46(06):115-118.
- [7] 刘泽阳,董晓燕,李磊.云边协同架构下的油气长输管道智能监测与预警系统设计[J].油气储运,2023,42(5):520-527.
- [8] 陈志刚,王涛,赵明.基于边缘计算的管道泄漏监测实时性优化研究[J].仪器仪表学报,2022,43(8):198-206.

### 作者简介：

孙灏(1984-),男,汉族,山东淄博人,本科,中级工程师,从事油气储运方向研究。