

多源传感数据融合的油气管道风险智能管控系统研究

白琛 杨飞 (中国石油天然气股份有限公司长庆油田公司第二输油处, 陕西 西咸新区 712000)

李彬 张婧 (中国铁塔股份有限公司咸阳市分公司, 陕西 咸阳 712000)

摘要: 随着油气管道运行环境日益复杂与高后果区增多, 构建以多源传感数据融合为核心的风险智能管控体系对于提升安全韧性、降低运维成本、支撑科学决策具有重要作用。本文围绕系统总体架构与运行原理, 对油气管道风险类型与特征识别、传感数据需求界定、精度与时效性要求进行研判, 提出分层级融合应用架构与面向实时预警、全生命周期管控的应用策略, 并给出效果评估与动态优化机制, 以期形成可推广的一体化技术路线。

关键词: 油气管道; 多源传感; 数据融合; 风险智能管控

中图分类号: TE88 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2026) 005-0126-03

Research on Intelligent Risk Control System for Oil and Gas Pipelines Based on Multi-Source Sensor Data Fusion

Bai Chen, Yang Fei (Second Oil Transportation Department, Changqing Oilfield Company, petrochina, Xixian New Area Shaanxi 712000, China)

Li Bin, Zhang Jing (Xianyang Branch of China Tower Corporation Limited, Xianyang Shaanxi 712000, China)

Abstract: With the increasingly complex operating environment of oil and gas pipelines and the growth of high-consequence areas, building a risk intelligent control system centered on multi-source sensor data fusion plays a significant role in enhancing safety resilience, reducing operation and maintenance costs, and supporting scientific decision-making. This paper focuses on the overall architecture and operational principles of the system, analyzes the identification of risk types and characteristics of oil and gas pipelines, the definition of sensor data requirements, and the requirements for accuracy and timeliness. It proposes a hierarchical integrated application architecture and an application strategy for real-time early warning and full life cycle control, and provides an effect evaluation and dynamic optimization mechanism, with the aim of forming a scalable integrated technical route.

Key words: Oil and gas pipeline Multi-source sensing Data fusion Intelligent risk management and control

油气管道作为国家能源运输的大动脉, 其安全稳定运行直接关系到公共安全与经济社会效益。当前, 管道沿线第三方施工、地质灾害、本体腐蚀与材料失效等风险交织, 传统单点监测与人工巡检难以满足全时段、全要素、全链条的管控需求, 信息孤岛与响应滞后等问题仍较突出。本研究依托于某单位建成的‘油气管道风险智能管控系统’的运行实践, 系统化梳理其多源数据融合的层级架构、应用策略与评估机制, 进而提炼可复用的技术路线与实施策略, 为行业同类系统建设提供参考。

1 油气管道风险智能管控系统概述及原理

面向油气管道安全运行的复杂工况, 构建以多源传感数据融合为核心的风险智能管控系统, 通过整合卫星遥感、无人机、视频 AI、分布式光纤、地灾与阴保等感知手段, 形成“天空地”一体化监测与协同处置能力。系统以统一时空基准与数据标准为基础, 完成多源异构数据的采集、对齐、关联与融合, 支撑风险识别—评估—

预警—处置—复盘的全流程闭环管理^[1]。

其原理是在边缘计算与云平台协同的架构下, 融合运行参数与外部环境特征, 开展异常检测、事件判别与风险量化, 并以多级预警与联动策略驱动站场设备、巡检力量与应急资源的快速响应, 实现从被动应对向事前预防的转变, 提升管道本质安全与运维效率。

2 油气管道风险识别与多源传感数据需求分析

2.1 油气管道典型风险类型及特征识别

现阶段, 油气管道运行安全主要受多类风险叠加影响, 呈现出跨时空、跨介质的复合特征。外部扰动以第三方施工破坏与地质灾害最为突出, 前者伴随机械作业与临管活动, 表现为人员车辆聚集、轨迹异常与突发性强, 后者包括滑坡、崩塌等, 具有渐进累积与瞬时突变并存的特点。本体失效以腐蚀与疲劳为主, 受土壤腐蚀性、杂散电流与应力循环影响, 缺陷扩展具有隐蔽性与局部化特征, 易在焊缝、弯头与穿跨越段形成穿孔或开裂。管理与操作层面, 误操作、违章

占压、设计与施工遗留缺陷会放大上述风险，并在高后果区内造成放大效应，导致泄漏后的火灾、爆炸与环境污染后果呈链式扩展。在该系统中，曾通过无人机与视频融合识别出一起管线附近非法挖掘事件，系统在3s内发出预警，无人机15min抵达现场喊话干预，避免了事故扩大。

2.2 多源传感数据采集范围与维度界定

在多源传感数据融合的框架下，采集范围应覆盖地基、空基、地基与本体四个层级，形成对管道及其周边环境的立体化感知。地基侧以卫星遥感为主，获取地表形变、土地利用变化、植被指数与季节性要素，用于大尺度风险普查与长期趋势监测。空基侧由无人机与固定视频构成，重点采集近距影像、热红外与行为事件，支撑第三方施工识别、临时占压发现与可疑目标跟踪。地基侧布设分布式光纤振动、土壤含水率与位移、气象要素、阴极保护电位电流等传感设备，刻画微振动、土壤状态、腐蚀与干扰环境等关键物理量^[2]。

2.3 风险识别导向的传感数据精度需求分析

风险识别的精度要求取决于目标类型、后果严重性与预警提前量，需在成本与性能之间取得平衡。对于第三方施工与打孔盗油等行为识别，视频与无人机影像的空间分辨率应足以辨识人员、机械与作业痕迹，并结合轨迹与停留时间特征提升判别可靠性。针对地质灾害，地表位移与土壤含水率的测量精度需能反映毫米级形变与细微含水变化，以支持早期识别与趋势预警。在腐蚀与泄漏监测中，压力与流量的测量精度应覆盖小幅异常波动，阴极保护电位与电流的精度需能区分保护不足与干扰噪声，从而减少误报与漏报。该单位系统针对第三方施工，将视频分辨率设定为1980*1020像素，并结合轨迹停留时间模型，将误报率控制在3%以下。

2.4 复杂工况下传感数据时效性需求研判

复杂工况往往伴随极端天气、地质灾害活动、重载交通扰动与通信受限等条件，对数据时效性与连续性提出更高要求。在灾害演进与施工扰动场景下，监测数据需具备近实时采集与低时延传输能力，以便及时捕捉快速形变与突发行为，并通过边缘计算实现本地快速判别与预警，降低对中心云的依赖。对于泄漏与爆炸风险，压力波与声波信号的采样与上报频率应支持毫秒级事件检测与定位，为关断、放空与疏散争取时间。

3 多源传感数据融合的油气管道风险智能管控系统的应用策略

3.1 分层级多源传感数据融合应用架构设计

为了构建可扩展、可演进且可闭环的油气管道风险智能管控体系，设计团队应当以业务目标为牵引，

采用自底向上的分层融合架构统筹多源异构数据，从设备接入到业务决策形成统一的数据与流程标准。该架构以时空基准为锚点，以统一标识与元数据为纽带，以边云协同为路径，以策略与知识为核心，使传感、通信、计算、算法与业务在一个体系内协同运转。在具体实施上，团队首先应梳理管道全线的物理与业务要素，建立覆盖站场、阀室、管段、高后果区、第三方施工敏感带与地质灾害敏感带的多层级对象模型，并以统一坐标与时间基准对多源数据进行对齐与配准，确保后续融合分析具备一致性的时空语义。随后，团队应当以“边缘—区域—中心”三层协同组织计算与存储，边缘侧完成高频信号预处理、事件初筛与本地联动，区域侧完成多模态特征融合与态势构建，中心侧完成模型训练、策略优化与全局资源调度，从而在实时性、可靠性与算力成本之间取得平衡。

在架构落地过程中，团队需要优先建设统一的数据接入与协议适配层，兼容光纤振动、分布式温度、应变与声波、GNSS地表位移、雨量、阴极保护电位电流、视频与图像、无人机遥感等多类型传感与采集设备，屏蔽底层差异并输出标准化数据产品。继而，团队以知识图谱与规则引擎构建领域语义层，沉淀管道拓扑、设备台账、作业许可、隐患与缺陷、气象与地质等本体关系，为跨模态推理与因果分析提供支撑^[3]。同时，还应建立面向多源融合的算法与策略库，涵盖时空对齐、异常检测、干扰识别、事件识别、风险评估、联动编排与资源优化等能力，并以模型管理与特征仓实现版本化、可追溯与可回滚。

3.2 基于融合数据的风险实时预警应用

在油气管道运行环境日益复杂、风险诱因呈现多源并发与链式传导特征背景下，系统需要依托融合数据构建从信号到事件、从事件到态势、从态势到决策的实时预警链路，并以人机协同实现快速核实与精准干预。团队应当以多源信号的时空一致性为约束，采用滑动窗口与多维索引对光纤振动、视频目标、GNSS位移、气象雨量、阴保电流电位等数据进行对齐，随后在特征层进行多模态融合，提取反映施工机械、人员入侵、车辆靠近、地表微变形、管道温度异常、腐蚀活性与阴极保护失效等的联合特征，并在决策层通过加权投票、贝叶斯推理或证据理论综合各源证据，输出具有置信度与可解释性的事件判定与风险等级。

在运行优化方面，还应以在线学习驱动预警策略自适应，持续利用处置反馈与误报漏报样本校准检测阈值与证据权重，并结合场景上下文动态调整融合策略，使系统在不同季节、不同地形与不同作业密度下均能保持稳健表现。同时，团队需要构建跨源干扰识

别与抑制模块,针对风雨雷电、动物活动、车辆通行、设备自激与通信抖动等常见干扰源建立判别特征与抑制规则,降低虚警率并提升预警可信度^[4]。

3.3 全生命周期风险管控的融合数据应用

鉴于油气管道从规划、建设、投产、运行到退役的全生命周期内风险特征与管理目标存在显著差异,系统应当以融合数据为主线贯通各阶段的关键环节,形成面向不同阶段的数据产品、模型与策略组合,使风险管控在时序上连续、在空间上一致、在决策上协同。在规划与建设阶段,团队应整合历史失效数据、地灾与气象资料、社会与人口经济要素以及设计施工资料,构建选址与路由的风险画像,并以仿真与情景推演评估不同方案的长期风险暴露,从而在立项与可研阶段即内生安全与韧性目标。在投产与运行阶段,需以运行监测、缺陷管理、阴保有效性评估、作业许可与变更管理为核心,汇聚光纤与视频等多源实时数据与地面实测数据,构建管道健康度与风险态势的连续画像,并以知识图谱支撑从事件到根因的因果分析,推动从被动处置向主动预防转变。

而为实现上述贯通,团队需要以数据治理为抓手建立跨阶段的数据资产目录与主数据体系,明确对象、指标、事件与模型的血缘关系与版本策略,并以统一接口与共享机制打破部门与系统壁垒,使规划、建设、运行、检修与退役的数据能够在同一语义层上互证与复用^[5]。同时,团队应当以场景化编排连接业务流与数据流,围绕第三方施工监管、地质灾害防控、腐蚀与泄漏治理、阴极保护运维、应急准备与响应等核心场景,沉淀可复用的融合分析模板与处置流程模板,并以工作流引擎驱动跨部门协同,确保从风险识别、评估、决策到执行与复盘的每个环节都有数据支撑与流程保障。

3.4 系统应用效果评估与动态优化

随着多源传感数据融合的油气管道风险智能管控系统进入常态化运行,组织需要以效果评估为抓手建立持续改进机制,通过可量化的指标体系与闭环的优化流程,推动系统在准确性、时效性、可用性与经济性上螺旋式提升。团队应构建覆盖数据、算法、系统、业务与组织五个维度的评估框架,数据维度关注完整性、一致性、时效性与质量稳定性,算法维度关注召回率、误报率、漏报率、置信度校准与解释性,系统维度关注可用性、时延、吞吐、容错与资源占用,业务维度关注预警闭环率、处置及时率、隐患消除率与事故风险暴露下降幅度,组织维度关注协同效率、培训覆盖与制度落地。在评估方法上,应采用离线评测与在线 A/B 实验相结合的方式,利用历史标注与处置

反馈进行回溯验证,并在真实运行中以小流量灰度发布验证策略调整的有效性,从而在风险控制与运营成本之间找到最优解。

在动态优化方面,团队应当以数据驱动模型运营为核心,持续收集预警确认、误报漏报、现场处置与复盘结论,构建增量训练与在线学习的闭环,使检测与识别能力随业务变化与外部环境演进而自适应更新。同时,需优化资源调度与成本控制策略,依据风险热度与时段特征动态调整传感采样频率、视频分辨率、无人机巡检频次与计算节点负载,并以边缘优先与分层计算降低广域传输与中心算力压力,从而在保证关键场景性能的前提下实现整体成本最优。

4 结束语

综上,面向油气管道安全运行的复杂工况与高后果区增多趋势,本文以多源传感数据融合为核心,提出了可落地的分层级应用架构、面向实时预警与全生命周期风险管控的策略体系,以及效果评估与动态优化机制,形成从数据到决策的一体化技术路线。该单位系统应用表明,通过上述架构与策略,可实现秒级风险识别与分钟级联动响应,显著提升预警准确性与处置效率。未来,应完善评估指标体系与成本—效益优化方法,在保障关键场景性能的前提下实现资源投入最优配置,打造可推广、可复制的行业范式,推动管道安全管理由经验驱动向数据驱动、由被动应对向事前预防持续跃迁。

参考文献:

- [1] 贺永利. 油气管道工程一体化智能管控思考与应用探索 [J]. 油气储运, 2025, 44(10): 1179-1191.
- [2] 程可心. 失效数据驱动方法在油气管道风险评估中的应用与发展 [J]. 天然气与石油, 2025, 43(04): 139-147.
- [3] 杨玉锋. 油气长输管道风险评估技术、标准及软件综述 [J]. 工业安全与环保, 2025, 51(03): 92-97.
- [4] 赵云峰. 基于卷积神经网络的油气管道智能工地监控实现 [J]. 管道技术与设备, 2021(06): 23-26.
- [5] 刘婉莹. 基于三维扫描的油气管道缺陷智能评价系统设计 [J]. 管道技术与设备, 2021(03): 7-10+62.

作者简介:

白琛 (1987-), 男, 回族, 甘肃平凉人, 大学本科, 信息工程工程师, 研究方向: 油气田智能化。
 杨飞 (1988-), 男, 汉族, 陕西商洛人, 本科, 中级职称, 研究方向: 油气储运。
 李彬 (1984-), 男, 汉族, 陕西咸阳人, 本科, 研究方向: 铁塔视联。
 张婧 (1992-), 女, 汉族, 陕西咸阳人, 硕士, 研究方向: 铁塔视联。