

油气储运管道完整性管理与应急安全协同机制研究

王俊华（东明县发展和改革局油田服务中心，山东 菏泽 274500）

摘要：在全球能源需求持续增长与低碳转型双重背景下，油气储运管道的安全高效运行已成为保障能源供应链稳定的核心议题。本文围绕油气储运管道完整性管理与应急安全协同机制展开研究，分析油气储运管道完整性管理，探讨油气储运管道完整性管理与应急安全相协同的重要性，进而提出将完整性管理与应急安全管理深度融合的协同机制，希望构建涵盖风险预警、应急响应、信息共享与资源调度的全链条管理体系。

关键词：油气储运管道；完整性管理；应急安全；协同机制

中图分类号：TE88

文献标识码：A

文章编号：1674-5167（2025）017-0156-03

Research on Coordination Mechanism between Integrity Management and Emergency Safety of Oil and Gas Storage and Transportation Pipeline

Wang Junhua (Oilfield Service Center, Dongming County Development and Reform Bureau, Heze Shandong 274500, China)

Abstract: Under the dual background of continuous growth of global energy demand and low-carbon transition, the safe and efficient operation of oil and gas storage and transportation pipelines has become the core issue to ensure the stability of energy supply chain. This paper focuses on the coordination mechanism between integrity management and emergency safety of oil and gas storage and transportation pipelines, analyzes the integrity management of oil and gas storage and transportation pipelines, discusses the importance of coordination between integrity management and emergency safety of oil and gas storage and transportation pipelines, and then proposes a coordination mechanism that deeply integrates integrity management and emergency safety management. It is hoped to build a whole-chain management system covering risk warning, emergency response, information sharing and resource scheduling.

Key words: Oil and gas storage and transportation pipeline; Integrity management; Emergency safety; Coordination mechanism

近年来，受地质条件变化、第三方施工破坏、材料老化及极端气候等因素影响，管道泄漏、爆炸等事故频发，造成严重经济损失与生态威胁。尽管管道完整性管理以风险评价、检测维护及数据驱动决策等手段有效降低了事故概率，但现有管理体系在突发事件下的应急响应效率不足，暴露出风险防控与应急处置的脱节问题。为此，如何实现完整性管理与应急安全管理的深度协同成为行业研究热点。

1 油气储运管道完整性管理概述

油气储运管道完整性管理是以风险预控为核心，以系统性技术手段保障管道全生命周期安全运行的管理体系。核心框架遵循国际标准（如 API 1160、ASME B31.8S），涵盖数据集成、风险评价、完整性评价、维护决策及效能监控五大环节。管理层面则强调全生命周期动态优化，基于风险的检测计划、腐蚀控制方案及维修策略，最大限度降低泄漏、爆炸等事故概率^[1]。

2 油气储运管道完整性管理与应急安全协同的重要性

2.1 风险防控与应急响应的互补性强化

油气储运管道完整性管理侧重于以数据驱动的风

险评估、缺陷检测与预防性维护，从源头降低事故概率；而应急安全管理则聚焦于事故快速响应与灾害控制。二者的协同机制通过动态风险评估结果与应急预案的联动设计，确保风险识别与应急资源的精准匹配。例如，在管道高后果区（HCA）识别后，可针对性布设应急物资储备点，并提前制定泄漏封堵、人员疏散等专项预案。同时，完整性管理提供的管道腐蚀速率、应力变化等实时数据，可支撑应急情景模拟与响应策略的动态优化。

2.2 应急资源优化与协同调度能力提升

在传统管理中，完整性管理的维护资源（检测设备、维修团队）与应急资源（消防设施、抢险装备）常因归属不同部门而存在调配壁垒。协同机制通过建立统一的资源调度平台，整合管道状态数据、应急物资分布及人员配置信息，实现资源的高效统筹^[2]。例如，基于管道智能监测系统的异常报警，可同步触发应急资源预调度指令，缩短响应时间；无人机巡检与应急指挥系统的联动，可快速生成事故现场三维模型，指导抢险路径规划与人员部署。

2.3 信息共享与多主体协同联动的实现

管道安全涉及设计、运营、监管、地方政府及社

区等多方主体，但传统模式下信息孤岛问题突出。协同机制构建标准化数据共享平台，打通完整性管理数据库（内检测报告、腐蚀监测数据）与应急管理系统

（GIS 地理信息、应急预案库），实现风险预警、事故处置与恢复重建的全链条信息互通。例如，在管道泄漏事故中，运营方可实时向监管部门推送泄漏点压力、扩散范围等关键参数，地方政府则依据数据启动分级响应，社区同步接收疏散指令。

3 油气储运管道完整性管理与应急安全协同机制构建策略

3.1 基于数字孪生的全生命周期数据融合平台建设

在油气储运管道的实际管理中，构建基于数字孪生的全生命周期数据融合平台需围绕数据采集、传输、建模与应用四个维度展开系统性工程。建立覆盖管道全生命周期的数据标准化采集体系，整合设计阶段的结构参数（如管径、壁厚、材质）、施工阶段的焊缝检测记录与地理坐标信息，以及运维阶段的内检测报告、腐蚀速率监测、应力应变数据、SCADA 系统实时运行参数等。

针对复杂异构数据，需开发统一的数据编码规则与元数据管理标准，确保设计图纸、施工日志、智能传感器数据及外部环境数据的结构化存储与语义一致性。在数据传输层面，需依托工业物联网协议（如 OPC UA、MQTT）构建高可靠通信网络，结合边缘计算节点对管道沿线实时数据进行预处理，降低云端负载并提升响应速度^[3]。

平台架构需采用云-边-端协同模式，物理层部署智能感知终端，实时采集管道本体及周边环境状态；模型层融合机理模型与数据驱动模型，构建高精度数字孪生体。例如，基于有限元分析的管道应力分布模型需与机器学习预测的腐蚀退化模型耦合，动态模拟管道在不同工况下的失效风险；同时，将 BIM 模型与 GIS 地理信息叠加，实现管道三维空间可视化及周边敏感区域的精准标定。在数据融合层面，需开发跨系统数据中间件，打通完整性管理数据库、应急指挥平台、外部灾害预警系统的接口，实现数据双向交互。例如，当数字孪生模型监测到某段管道应力异常时，可自动触发应急系统的泄漏扩散模拟模块，预判影响范围并生成封堵方案。

实际应用中，平台需支持动态数据驱动的决策闭环。运维阶段，以孪生模型实时映射管道健康状态，结合风险评价算法生成维护优先级清单，并同步更新应急资源部署策略；应急响应时，平台调用历史维修记录、实时压力波动数据及周边人口密度信息，辅助指挥中心制定最优处置路径。此外，需建立孪生模型

的自学习机制，利用运维反馈数据（如维修效果、检测误差）持续优化模型参数，提升预测精度与应急场景的适配性。

3.2 动态风险评估与智能预警阈值联动机制设计

在油气储运管道实际运维中，动态风险评估与预警联动机制的实施需部署分布式传感器网络，集成管壁腐蚀监测探头光纤声波振动传感器、土壤温湿度传感器以及 SCADA 系统实时压力、流量数据，形成覆盖管道全线的多维度数据采集体系。数据通过工业物联网协议传输至边缘计算节点，进行初步清洗与特征提取，例如提取腐蚀速率、应力波动趋势、异常振动频率等关键参数，并标准化为统一格式输入风险评估模型^[4]。

风险评估模型采用机器学习与物理机理融合架构，根据历史失效数据训练随机森林算法，识别多因子耦合风险模式。例如，针对高后果区管段，模型输入土壤氯离子浓度、管材屈服强度退化数据、第三方施工振动频率及压力循环载荷参数，输出腐蚀-疲劳协同作用下的失效概率。

同时，嵌入基于有限元分析的应力分布模型，实时计算管道在复杂载荷下的局部应力集中系数，与数据驱动模型结果交叉验证，提升风险评估精度。模型输出结果按管段坐标映射至 GIS 平台，生成动态风险热力图，标注高风险管段的位置、风险类型及演变趋势^[4]。预警阈值设计需与风险评估结果动态绑定，针对不同风险类型与等级设定差异化阈值规则。例如，对于土壤腐蚀性较强区域，根据实时监测的管壁厚度数据，设置腐蚀速率的动态阈值：若连续 7 日腐蚀速率超过该管段材质理论退化速率的 1.3 倍，且土壤电阻率低于 $500 \Omega \cdot m$ ，则触发二级预警，自动启动加密巡检；若腐蚀速率持续上升并伴随压力波动超过设计值的 15%，则升级为一级预警，触发 SCADA 系统降压操作并预置应急堵漏资源。

阈值调整规则通过在线优化算法实现，根据实时数据流动态收紧或放宽阈值容差，确保预警灵敏性与误报率的平衡。预警信号触发后，系统自动关联应急响应流程。例如，当某管段因第三方施工振动触发预警时，系统实时调用该区域的地理信息数据，以泄漏扩散模型预测影响范围，生成隔离阀关闭方案及疏散半径建议，并推送至应急指挥中心与属地管理部门；同时，同步启动应急资源调度指令，依据物资储备库位置、抢险队伍实时位置，规划最优抢险路径。

3.3 管道本体缺陷分级响应与应急抢修标准化流程设计

基于智能内检测数据、光纤声波传感实时监测数

据及无人机巡检影像，构建管道本体缺陷数据库，采用机器学习算法对缺陷类型进行自动分类与几何特征提取。

利用有限元分析模型计算缺陷区域的剩余强度与失效压力，结合管道设计压力、实时压力波动及周边人口密度、环境敏感目标距离，建立缺陷风险分级矩阵。例如，针对管体腐蚀缺陷，依据深度-长度比、环向位置及邻近焊缝情况，划分为低风险、中风险与高风险三级，并关联差异化响应策略。

标准化流程要求缺陷数据实时同步至应急指挥平台，触发自动响应机制。当系统判定某缺陷为高风险时，立即启动应急抢修预案：SCADA系统自动执行降压操作，连锁关闭邻近截断阀，并推送缺陷位置坐标、管径、材质及压力参数至抢修决策模块。抢修模块基于缺陷类型调用标准化处置方案库，例如针对环向裂纹采用B型夹具堵漏，针对局部腐蚀采用复合材料修复或换管作业，并依据管道输送介质特性匹配防爆工具与安全防护等级。

同时，平台自动生成资源调度指令，根据抢修方案需求，如所需夹具型号、复合材料规格、焊接设备及物资储备库位置，结合实时路况信息规划最优运输路径，并通知最近抢修队伍携带装备赶赴现场。

抢修作业实施阶段，需以移动终端与数字孪生平台联动，实时获取管道三维模型、缺陷周边应力分布模拟数据及地下管网交叉信息，指导开挖定位与作业面安全防护。

例如，在开挖前利用地质雷达扫描确认地下电缆与光缆走向，避免次生损坏；抢修过程中以无线应计监测修复区域应力变化，确保作业安全。抢修完成后，系统强制录入修复记录，如修复方法、材料批次、检测结果，同步更新管道完整性数据库，并触发修复后评估流程。

3.4 区域化应急资源网格化布局与智能调度体系优化

在油气储运管道应急管理中，需建立资源动态适配机制，精准匹配事故类型、管道工况及环境约束，实现应急资源的高效利用与跨模态协同调度。具体实施中，基于管道本体缺陷数据库、运行参数及外部环境数据，构建“事故类型-资源需求”映射模型。例如，针对不同泄漏介质、泄漏位置、环境敏感度，定义差异化资源需求清单：天然气管道泄漏需优先调配防爆风机、红外气体检测仪及高压封堵装置；水域泄漏则需围油栏、吸油毡及生态修复物资^[5]。

动态适配机制的核心在于实时集成管道完整性管理数据与应急资源状态，即运用物联网标签实时监控应急物资库存位置、有效期及维护状态，并将数据接

入调度平台。例如，当某段管道因腐蚀缺陷触发高风险预警时，系统自动检索邻近储备库中适配管径的复合材料修复套件库存量、特种焊接设备的可用性及抢修队伍资质信息，动态生成资源调集方案。若库存不足，则启动跨区域资源协作协议，向相邻管道运营企业的共享资源库发起借用请求，并通过区块链智能合约记录资源流转路径与责任归属，确保调度过程可追溯。

针对复杂地形与突发交通管制，设计“陆-空-水”多通道联运策略。例如，在山区管道事故中，利用无人机快速投送轻型检测设备与急救物资，同步调度山地越野抢修车运输重型装备；针对跨水域管道泄漏，调用驳船搭载大型围油栏与吸附设备，结合直升机快速部署应急队伍。

为提升调度响应速度，需构建“平急结合”的资源预置机制。基于管道风险动态评估结果，在特定区域预置模块化应急单元。例如，在地质灾害频发区部署车载式快速降压装置与移动式压缩机组，平时处于待命状态，紧急情况下可一键启动并自动驾驶至事故点；在第三方施工密集区设置集装箱式应急工作站，内置管道修复工具包、气体检测设备及临时支护结构，由AI巡检机器人定期检查设备完好性。

4 结语

本文通过系统研究油气储运管道完整性管理与应急安全协同机制，提出以数字孪生技术为核心的数据融合平台、动态风险评估与预警联动机制、缺陷分级响应流程及资源智能调度体系，构建了“预防-监测-响应-恢复”的全链条协同管理模式。整合完整性管理的风险预控优势与应急管理的快速处置能力，可有效破解传统管理中风险识别滞后、资源配置低效及多主体协同不足等痛点，显著提升管道系统的韧性与事故防控能力。

参考文献：

- [1] 苏强.油气储运中的安全隐患及防范路径[J].石化技术,2024,31(11):358-360.
- [2] 李莹玉,孙健刚.油气储运工程中的泄漏事故预防与应急响应机制[J].中国石油和化工标准与质量,2024,44(10):1-3.
- [3] 张川,李文忠,李宝军.智能化技术在管道完整性管理中的研究与应用[J].化工安全与环境,2022,35(28):5-9.
- [4] 李勇,王小斌,夏荣禧,等.油气管道完整性管理技术的发展趋势[J].化工管理,2021(34):142-143.
- [5] 田宇.油气管道完整性管理的工作建议[J].化工管理,2019(20):147-148.