

考虑多源异构数据融合的城市燃气系统数字孪生安全应急推演方法

丁勇, 刘锐

中油(新疆)石油工程有限公司, 新疆 克拉玛依 834000

DOI:10.61369/ERA.2025100042

摘 要 : 本文聚焦考虑多源异构数据融合的城市燃气系统数字孪生安全应急推演方法, 通过构建“数据-特征-决策”三级融合架构, 并结合几何、物理、行为、规则四维建模, 实现高精度数字孪生体(压力、流量偏差<5%)。核心是设计数据与机理双驱动的推演引擎, 融合 ST-GNN 预测与物理仿真, 支持人机协同干预。建立四级评估指标体系, 采用 AHP-熵权法形成“评估-反馈-优化”闭环, 科学评估推演结果。该方法能有效模拟事故演化, 为燃气安全应急决策提供支持。

关 键 词 : 城市燃气系统; 数字孪生; 多源异构数据融合; 安全应急推演

Digital Twin Security Emergency Drill Method for Urban Gas Systems Considering Multi-Source Heterogeneous Data Fusion

Ding Yong, Liu Rui

CNPC (Xinjiang) Petroleum Engineering Co., Ltd., Karamay, Xinjiang 834000

Abstract : This paper focuses on a digital twin security emergency drill method for urban gas systems that considers multi-source heterogeneous data fusion. By constructing a three-tier fusion architecture of "data-feature-decision" and integrating four-dimensional modeling (geometric, physical, behavioral, and rule-based), it achieves a high-precision digital twin (with pressure and flow deviations of less than 5%). The core lies in designing a data- and mechanism-driven drill engine that combines ST-GNN prediction with physical simulation to support human-machine collaborative intervention. A four-level evaluation index system is established, and the AHP-entropy weight method is employed to form a closed loop of "evaluation-feedback-optimization" for scientifically assessing drill results. This method can effectively simulate accident evolution and provide support for emergency decision-making in gas safety.

Keywords : urban gas system; digital twin; multi-source heterogeneous data fusion; security emergency drill

引言

随着城市化进程加速与燃气管网规模的持续扩张, 老旧管网老化、极端天气影响、设备故障突发等因素导致的燃气泄漏、管道破裂乃至火灾爆炸事故频发。而数字孪生技术为城市燃气系统安全应急提供了全新技术路径, 本文基于此提出一种考虑多源异构数据融合的城市燃气系统数字孪生安全应急推演方法。研究旨在为城市燃气系统安全应急提供技术支撑, 提升事故处置效率与决策科学性, 助力城市燃气基础设施的智慧化安全防控升级。

一、多源异构数据融合与孪生体构建方法

(一) 多源异构数据融合模型

多源异构数据具有数据来源差异明显、结构不等价等特征。为使数据间的连通与反馈更优, 更好地补偿模糊信息导致的鲁棒性能衰减, 可通过数据级融合、特征级融合和决策级融合方法, 利用不同的融合层次, 从多角度全方位地完成多源异构数据的融

合^[1]。在多源异构数据融合模型构建中, 以“分层融合+动态权重调整”为核心, 构建“数据层-特征层-决策层”三级融合架构, 并引入融合效果反馈闭环以实现权重动态优化。数据层融合聚焦噪声抑制与缺失补全; 特征层融合基于“事故场景类型+数据时效性”动态分配权重; 决策层融合优化 D-S 证据理论, 引入证据距离修正机制处理冲突证据, 通过 Jousselme 距离识别并修正高冲突证据权重。

（二）燃气系统数字孪生体多维度建模

燃气系统数字孪生体多维度建模以多尺度协同为核心，明确各维度模型的技术参数与耦合关系^[2]。几何建模采用 Revit+Civil 3D 协同，主干管网（DN ≥ 300mm）达毫米级精度，设备通过参数化族库关联台账，经 MeshLab 轻量化后三角面片减少至 50 万以下，结合 WebGL 实现浏览器端快速加载，并通过 FME 与 GIS 数据联动，支持模型与属性的双向查询^[3]。物理建模构建“流体场－温度场－应力场”多场耦合模型，流体场基于 ANSYS Fluent 模拟燃气流动，温度场耦合土壤热传导并校准至误差 ≤ 2℃，应力场通过 ANSYS Mechanical 分析管道破裂风险，参数基于材质试验校准^[4]。行为建模基于历史数据训练与实时数据更新实现动态预测，如阀门卡涩故障采用 XGBoost 模型预测未来 24 小时卡涩概率，事故扩散模型结合 CFD 与 CNN-LSTM 快速预测泄漏浓度分布，预测时间缩短至 10 秒^[5]。规则建模构建“基础＋场景化”双层规则体系，整合国标规范并嵌入 IF-THEN 规则，针对老旧管网、人员密集区等场景定制专属规则，通过 NLP 技术自动解析最新规范并经专家审核更新，确保规则时效性。

（三）数据与模型融合驱动的孪生体动态修正

数据与模型融合驱动的孪生体动态修正，采用“事件触发＋周期修正”双模式体系，持续优化孪生体精度^[6]。修正触发机制包括周期修正每 10 分钟对比预测与实测压力，偏差超限则缩短至 5 分钟；事件触发修正针对传感器异常、环境突变（如风速 ≥ 8m/s）、设备故障等情况立即启动^[7]。偏差归因通过“数据溯源－模型校验－环境分析”三步定位，数据异常核查传感器状态，模型漂移调整参数，环境突变更外部变量。动态修正策略包括数据误差通过传感器更换与 KNN 插值补全；模型参数采用梯度下降优化；环境突变通过 GIS 与 Fluent 更新场景。测试显示，修正后压力、流量平均偏差分别从 7.2%、9.5% 降至 2.8%、4.1%，满足应急推演精度要求（≤ 5%）。

二、数据与机理双驱动的应急推演引擎设计

（一）推演引擎总体设计

推演引擎采用分层解耦、协同联动架构，划分为数据输入层、推演控制层、仿真计算层和结果输出层四个核心层级，通过标准化接口实现数据交互与功能协同，并融入双驱动逻辑保障推演的精准性与实时性。数据输入层接收多源异构数据融合后的实时数据与孪生体动态修正结果，所有数据均经过格式校验与合法性审核，确保数据质量满足推演需求^[8]。推演控制层负责推演流程的整体管控与参数配置，灵活适应不同推演需求。仿真计算层集成数据驱动与机理驱动双模块，前者基于 GNN 预测未来 5 至 30 分钟的事故演化，后者利用物理模型如 Navier-Stokes 方程模拟泄漏扩散与应力变化，通过边界条件互补与结果交叉验证机制，当偏差超过 10% 时触发重新计算，确保仿真精度^[9]。结果输出层支持实时生成监测指标曲线、GIS 热力图、动态仿真视频等多样化可视化形式，并基于推演结果生成应急处置建议报告，所有输出内容支持导出为 PDF、Excel、MP4 等格式，便于后续分析与存档。

（二）应急场景构建与初始化

应急场景构建与初始化通过“标准化场景库构建＋精准参数初始化＋场景验证优化”三步流程，实现从抽象场景到具体推演模型的转化，兼顾通用性与个性化需求^[10]。标准化场景库以常见事故类型与风险等级为依据，采用“大类细分＋参数模板”组织资源，划分为燃气泄漏、管道破裂、设备故障、火灾爆炸四大类，每类进一步细分为子场景并明确核心参数、默认取值及关联影响因素，支持按关键词检索与扩展。参数初始化采用“自动获取＋人工调整＋智能补全”结合方式，事故位置、泄漏孔径等参数通过 GIS 映射、传感器反演实时获取，介质组分等参数基于历史数据与专家经验修正，缺失非关键参数由 LSTM 模型智能补全并标记。场景验证通过“数据一致性校验＋历史案例对比＋专家评审”三重机制确保合理性，包括参数逻辑关系检查、与历史数据偏差比对及多维度专家评分，未达标场景持续优化直至通过验证，方可进入推演阶段。

（三）动态演化与推演仿真核心算法

动态演化与推演仿真核心算法采用数据驱动预测与机理驱动仿真双驱动协同，实现对事故全生命周期的精准模拟，兼顾效率与精度。数据驱动预测算法基于时空图神经网络（ST-GNN），融合拓扑结构与时间序列，利用图卷积捕捉监测点空间关联，扩张卷积处理历史数据，预测未来状态参数，误差控制在 10% 以内，速度达每秒 10 步，满足实时性；机理驱动仿真算法基于物理理论构建精细化模型，燃气泄漏采用流体力学（Navier-Stokes 方程）与大气扩散模型（高斯烟羽/多室模型），设备故障基于摩擦学方程预测演化，通过自适应网格与参数实时调整确保精度。双驱动协同算法通过权重动态分配、结果融合校正与异常反馈调节，实现优势互补，偏差超 15% 触发分析调整，异常情况自动诊断修正，确保推演稳定可靠。

（四）人机交互与实时干预机制

人机交互与实时干预机制通过“多模态交互界面＋灵活干预策略＋全程记录追溯”体系，实现“人－机－孪生体”协同决策。多模态界面基于 WebGL 构建三维可视化场景，支持多视角切换、实时渲染与智能交互，左侧监测关键指标并预警，右侧提供参数调整与推演控制功能，支持自定义布局。实时干预机制采用“自动触发＋手动发起”双模式，自动模式在高风险事件时弹出建议窗口并支持修改执行，手动模式允许管理人员主动调整参数或新增措施，同时设置干预冷却机制确保稳定性。干预过程全程记录，包括操作详情、效果评估与数据存档，通过日志不可篡改存储与对比分析判定干预有效性，支持历史数据回溯与经验总结，用于优化应急处置方案与推演模型。

三、应急推演过程与结果评估方法

（一）推演过程多维监测与可视化

推演过程多维监测与可视化旨在实时捕捉关键信息，将抽象数据转化为直观内容，支持管理人员掌握事故动态与处置进展，并为评估提供支撑。监测体系围绕“安全风险－应急效率－资源

消耗”三大维度构建,涵盖影响范围、浓度峰值、响应时间、疏散率、物资消耗等指标,通过 MQTT 协议实现低延迟数据同步,频率依重要性动态调整。异常监测采用“阈值+趋势”双重判断,设置三级预警,自动触发提醒与通知。可视化以三维孪生场景为核心,融合 WebGL 渲染、二维图表与动态交互,支持多窗口联动、时间轴回溯与指标对比,实现事故扩散、资源状态、影响范围等直观展示,助力全面掌控推演过程与优化决策。

（二）应急推演效果评估指标体系构建

应急推演效果评估指标体系构建遵循系统性、科学性、可操作性与动态性原则,从推演准确性、方案可行性、资源合理性和响应及时性四个维度设计层级化指标,确保全面覆盖推演效果核心影响因素,同时兼顾数据可获取性与计算便捷性。指标体系采用“目标层-准则层-指标层”三级结构,目标层为城市燃气系统应急推演效果综合评估,准则层包括推演准确性、方案可行性、资源合理性和响应及时性,各准则下设3-4个具体指标,形成可量化评估单元。推演准确性评估推演结果与实际吻合度,指标包括影响范围预测偏差率、泄漏位置定位准确率、事故持续时间预测偏差率,数据来自历史事故与物理仿真实验,取值越小越好。方案可行性衡量应急方案执行难度与效果,指标包括应急方案执行难度、人员疏散成功率、事故控制率,综合专家评估与推演结果计算。资源合理性判断资源投入经济性,指标包括应急资源利用率、资源调度成本、资源冗余率,通过资源管理模块与成本核算模型计算,结合行业标准判断合理性。响应及时性评价应急响应速度,指标包括应急资源响应时间、阀门关闭延迟时间、抢修作业开始时间,数据来自应急管理平台与推演引擎,参考国标阈值判定是否合格。指标权重采用 AHP 与熵权法结合的主客观组合赋权法,先由专家两两比较确定主观权重,再基于历史数据计算熵权,最终按6:4比例组合,确保权重既体现专家经验,又反映数据信息价值。

（三）基于多准则决策分析的推演结果综合评估

基于多准则决策分析的推演结果综合评估,是在构建评估指标体系的基础上,通过标准化处理、加权计算和方案排序等步骤,对多个推演方案进行综合评价,筛选最优方案并分析各指标的影响,为后续优化提供方向。该方法结合指标权重与标准化后的指标值,通过加权求和法计算综合得分,避免单一指标评价的片面性。指标标准化处理根据正向、负向和区间指标类型,将不同量纲、量级的指标值映射至 [0,1] 区间,对异常值采用 Winsorize 处理,以减少干扰。综合得分计算前进行一致性检验,确保权重和标准化值合理,最终得分越高,方案越优。方案排序后通过敏感性分析评估权重变化对结果的影响,识别敏感指标。评估结果以报告形式输出,明确最优方案的优势与不足,提出优化建议,并结合历史数据与实际经验分析偏差原因,形成“评估-反馈-优化”的闭环管理,为推演引擎和应急方案改进提供支持。

四、结束语

本文围绕城市燃气系统安全应急需求,构建了一套“多源异构数据融合-数字孪生体构建-双驱动应急推演-多准则结果评估”的全流程技术方法,有效解决了传统应急管理中数据孤岛、推演精度不足、决策支撑薄弱等关键问题。未来研究可从深化多场景耦合推演模型设计,引入事故链分析理论,构建多风险叠加下的演化规则库;探索多模态数据融合技术,结合联邦学习解决跨部门数据共享问题,提升数据覆盖度与修正鲁棒性;推动方法与实际应急平台的深度集成,通过现场试点验证优化模型参数,形成标准化的技术应用方案,这三方面进行优化,助力城市燃气系统智慧安全运维体系的全面落地。

参考文献

[1] 李鑫,梁永玲.基于模糊数学的多源异构数据融合模型[J].吉林大学学报(理学版),2024,62(3):691-696. DOI:10.13413/j.cnki.jdxblxb.2023193.

[2] 晁诗涵.基于多源异构数据融合的三维重建技术研究[D].吉林:长春理工大学,2024.

[3] 仇明鑫,雷帅,柳先辉,等.面向回收信息的线上线下多源异构数据融合系统[J].计算机科学,2024,51(z2):527-533. DOI:10.11896/jsjxx.240100095.

[4] 杨鹏飞.基于多源异构数据融合的轴承故障诊断与预测研究[D].北京:北京交通大学,2024.

[5] 王艺婕.多源异构数据融合技术的研究[J].山西电子技术,2022(3):71-73. DOI:10.3969/j.issn.1674-4578.2022.03.025.

[6] 王艺霖,王海智.数字孪生在城市燃气施工运维管理中的应用[J].科技和产业,2024,24(21):218-224. DOI:10.3969/j.issn.1671-1807.2024.21.033.

[7] 王尚刚,程江峰,高顺利,等.数字孪生智慧燃气系统:概念、架构与应用[J].计算机集成制造系统,2022,28(8):2302-2317. DOI:10.13196/j.cims.2022.08.003.

[8] 席丹,陈洞杉.城镇燃气行业数字孪生技术的研究与应用[J].上海煤气,2024(6):23-24,33. DOI:10.3969/j.issn.1009-4709.2024.06.007.

[9] 林峰,肖立华,商浩亮,等.“双碳”背景下能源互联网数字孪生系统的设计及应用[J].电力科学与技术学报,2022,37(1):29-34. DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2022.01.003.

[10] 西南石油大学.一种基于降阶模型的燃气管道数字孪生监测方法及系统:CN202410456210.5[P].2024-07-05.