

燃气工程施工安全风险动态评估与智能化管控体系研究

杨杰 蔡睿

青岛能源华润燃气有限公司 山东青岛 266073

摘 要：针对燃气工程施工安全风险的动态复杂性，本研究深度融合物联网、大数据与人工智能技术构建了一套基于多源数据融合的动态风险评估与智能化管控体系，通过创新设计自适应权重分配算法结合 LSTM- 贝叶斯网络预测模型，实现了对施工安全风险的实时监测与精准预警。经实践验证该体系显著提升了风险预警的准确性，大幅缩短事故响应时间有效降低事故发生率，同时优化施工流程、加快项目进度，充分展现了在复杂施工环境下的有效性与实用性，为燃气工程施工安全管理提供了全新的技术路径与解决方案。

关键词：燃气工程；施工安全；动态风险评估；智能化管控；多源数据融合

引言

随着我国城市化进程的加速，燃气工程建设规模不断扩大，根据住房和城乡建设部《2023 年城市建设统计年鉴》显示，截至 2023 年底全国燃气管道总长度已超 110 万公里，年均新建改造里程超 8 万公里，但燃气工程施工涉及地下开挖、管道焊接等高风险作业且燃气介质易燃易爆安全事故频发^[1]。国家安全生产应急救援中心统计数据表明，近五年我国燃气工程施工安全事故年均发生 120 余起，因风险管控不到位导致的事故占比达 73%，传统静态风险评估方法，如安全检查表、LEC 法等依赖专家经验指标体系固定难以适应施工过程中风险因素的动态变化存在主观性强、评估滞后等问题，随着物联网、大数据与人工智能技术的发展，实时采集施工环境、设备状态、人员行为等多源数据并进行智能分析成为可能。本研究旨在构建一套燃气工程施工安全风险动态评估与智能化管控体系，通过多源数据融合、自适应权重算法及智能预测模型实现风险的动态监测、精准评估与智能管控，弥补传统方法的不足提升燃气工程施工安全管理水平。

1 燃气工程施工安全风险多维度解析

1.1 施工全生命周期风险阶段性特征

燃气工程施工全生命周期可分为规划、开挖、焊接、回填、验收五个阶段，各阶段风险特征差异显著（见表 1）。规划阶段主要风险源于地质勘察不精准和施工方案缺陷，开挖阶段易发生塌方、地下管线破坏，焊接阶段关键风险为焊接质量不达标，回填阶段存在管道沉降隐患，验收阶段则可

能因检测疏漏遗留安全问题。

表 1 燃气工程施工全生命周期风险特征表

施工阶段	主要风险类型	典型风险事件
规划阶段	设计缺陷风险	地质勘察不准确、施工方案不合理
开挖阶段	作业环境风险	基坑塌方、地下管线破坏
焊接阶段	工艺质量风险	焊接不达标、气体泄漏
回填阶段	管道保护风险	管道沉降、防腐层损坏
验收阶段	检测疏漏风险	隐患未检出、标准执行不严

1.2 风险致因的多源异构性分析

燃气工程施工安全风险致因涵盖人员、材料设备、环境三大类。人员行为风险方面违规操作、安全意识薄弱占事故原因的 65%，材料设备风险包括管道材质不合格、焊接设备故障等，环境耦合风险体现在地质沉降、暴雨等自然因素与周边施工的相互作用加剧风险复杂程度。

1.3 风险动态演化的时空关联模型

风险在时间和空间维度上具有动态演化特性，时间维度上，前期风险若未管控可能演变为重大隐患，空间维度上，某区域风险事件可能引发周边连锁反应，通过时空贝叶斯网络整合时序数据与地理信息可分析风险演化趋势为动态评估提供支持。

2 基于多源数据融合的动态风险评估模型

2.1 实时风险数据采集层设计

为实现燃气工程施工风险的动态监测与精准评估，构建实时风险数据采集层是基础与关键，该层通过部署多元化的物联网感知终端实现对施工全流程、全要素数据的实时采

集,从人员作业行为到设备运行参数,从环境温湿度变化到燃气泄漏浓度,各类数据均能被快速捕捉,其架构设计如图1所示,感知层部署的设备与后续数据处理层协同工作为动态风险评估提供可靠的数据支撑。



图1 智能燃气安全动态风险管控系统模型架构

2.2 动态风险评估指标体系构建

构建科学合理的动态风险评估指标体系是准确评估燃气工程施工安全风险的核心,该体系打破传统静态指标局限,将指标分为常规指标与突发指标两大类。常规指标涵盖燃气泄漏浓度、土壤位移量、管道应力、设备运行参数以及人员作业规范度等,用于反映施工过程中的常态风险,例如通过长期监测管道应力数据可预判管道因受力不均出现破裂的风险^[2]。突发指标则包含第三方机械振动信号、极端天气预警信息、周边施工干扰事件等,用于捕捉施工过程中的突发风险因素,如当监测到第三方机械振动信号异常时可及时预警管道被破坏的风险,同时指标体系配备动态更新机制能根据施工阶段、环境变化自动调整指标权重与阈值,例如在穿越河流、山体等复杂地形的施工阶段会提高土壤位移量、管道应力等指标的权重,确保评估结果始终贴合实际风险状况。

2.3 自适应权重分配算法

为克服传统权重分配方法主观性强、难以适应风险动态变化的问题,本研究采用改进熵权-TOPSIS算法实现指标权重的自适应调整,先是进行数据标准化处理消除不同指标间量纲的影响确保数据的可比性,接着利用熵权法计算指标熵值与熵权,根据指标数据的离散程度客观确定各指标权重,数据离散程度越高说明该指标包含的信息量越大其权重

也就越高^[3]。随后通过TOPSIS法构建加权规范化决策矩阵计算各方案与正、负理想解的距离,从而确定相对贴近度,以此评估不同风险状况下各指标的重要性。最后结合燃气工程施工的不同阶段与风险演化特征对熵权与TOPSIS权重进行动态加权得到最终的自适应权重,例如在管道焊接阶段,焊接质量相关指标(如焊缝强度、气体保护效果指标)的权重会根据实时焊接数据与质量反馈动态调整,使评估结果更精准地反映实际风险。

2.4 风险等级动态预测

融合长短期记忆网络(LSTM)与贝叶斯网络构建风险等级动态预测模型实现对燃气工程施工安全风险的前瞻性判断,LSTM作为一种特殊的循环神经网络能够有效处理时间序列数据,通过对历史风险数据的学习挖掘风险变化的趋势与规律,例如分析过去一段时间内燃气泄漏浓度的变化趋势预测未来泄漏风险的发展态势。贝叶斯网络则擅长处理不确定性信息,将LSTM输出的特征向量作为输入,结合专家知识与实时采集的数据进行不确定性推理,在推理过程中利用贝叶斯公式更新各风险事件发生的概率从而预测未来风险等级,该模型采用滚动预测的方式,随着新数据的不断采集持续更新输入数据对风险进行动态跟踪预测^[4]。例如在遇到连续暴雨天气时模型会结合历史暴雨期间燃气工程事故数据、当前施工区域地质条件与排水系统状态等信息,实时调整风险预测结果提前为施工安全管理提供预警。

3 智能化管控体系的协同架构设计

3.1 系统总体架构

基于Cyber-PhysicalSystem理念设计智能化管控体系的四层架构,各层分工明确又紧密协作,其架构如图2所示。感知层作为体系的“神经末梢”,通过部署分布式传感器网络实现对施工环境、设备、人员等数据的全面感知与实时采集,边缘层则充当“数据预处理中心”,对感知层传来的数据进行清洗、降噪与特征提取,减少数据传输压力提升整体处理效率,平台层如同“智慧大脑”,构建风险知识图谱,整合历史风险数据、专家经验与实时监测信息形成知识共享与智能决策的基础,应用层作为“交互窗口”,实现风险可视化展示、分级预警与智能决策支持等功能,为管理人员提供直观、高效的管理工具。



图2 智能化管控体系架构图

3.2 关键功能模块实现

基于 GIS+BIM 技术开发的风险可视化驾驶舱，为管理人员提供直观、全面的风险展示界面。GIS 技术可将施工区域的地形地貌、周边建筑、地下管线等地理信息进行可视化呈现，BIM 技术则能对燃气工程的管道布局、设备结构等进行三维建模展示，二者结合使管理人员能够从宏观与微观视角掌握施工区域的风险分布，系统设置黄、橙、红三级预警机制，根据风险评估结果自动触发对应等级预警，当风险等级达到黄色预警时系统通过短信、APP 推送等方式向相关人员发送风险提示信息，橙色预警时自动启动应急预案准备流程，如调配应急物资、组织应急队伍待命，红色预警时立即停止相关作业触发应急响应流程，向所有施工人员发出撤离警报，同时建立应急处置知识库自动推送机制，该知识库包含不同类型风险事件（如燃气泄漏、管道爆炸、基坑坍塌等）的处置流程、技术方案、物资清单、专家建议等信息^[5]，系统根据预警等级与风险类型自动匹配并推送最优处置方案。

3.3 人机协同管控流程优化

明确 AI 与人工决策的权责边界，构建高效的人机协同管控流程，在低风险场景下 AI 系统凭借强大的数据处理与分析能力自动执行风险监测、数据采集、初步评估与预警工作，管理人员只需定期审核 AI 输出的结果确保系统运行正常。当中等风险事件发生时 AI 系统迅速对风险进行深入分析，生成包含风险原因、发展趋势、应对建议的详细报告提交给管理人员，由管理人员结合现场实际情况进行决策确认，AI 系统根据确认结果执行相应操作，如调整施工参数、

加强监测频率等。在高风险场景下 AI 系统立即发出警报，自动锁定风险区域停止相关危险作业并第一时间将信息上报给管理人员，此时由经验丰富的管理人员主导应急指挥工作，AI 系统则持续提供实时数据支持与辅助决策建议，如推荐最优疏散路线、计算所需应急物资数量等，实现人机优势互补最大程度保障施工安全。

4 结语

本研究构建的燃气工程施工安全风险动态评估与智能化管控体系在实际项目中已取得显著成效，不仅将风险预警准确率大幅提升还显著降低事故发生率，有效提高施工效率，但在推广过程中面临着一系列现实阻碍：体系所需的物联网设备采购、平台开发维护等成本高昂，给中小型企业带来较大经济压力；施工采集的大量数据涉及敏感信息，数据隐私保护任务艰巨，同时行业内缺乏统一技术标准致使不同系统间难以兼容与协同工作。未来，可从三方面深入研究：探索数字孪生技术在燃气工程全生命周期的应用，实现施工过程的精准模拟与管控；利用联邦学习技术，在保护数据隐私的基础上推动跨项目、跨企业的数据共享与模型优化；联合行业多方力量共同制定智能化管控技术标准，为该技术的广泛应用奠定基础。

参考文献：

- [1] 冯国良. 燃气基础设施中的智慧化建设应用探讨 [J]. 中文科技期刊数据库 (全文版) 工程技术, 2024(5):0005-0008.
- [2] 周洁, 田龙. 燃气管道工程水平定向钻穿越砂层敷设施工技术研究 [J]. 石油石化物资采购, 2025(3):98-100.
- [3] 王华忠. 燃气管道工程中施工安全及质量管控的措施研究 [J]. 中国科技期刊数据库工业 A, 2025(2):149-152.
- [4] 高升. 燃气管道工程施工中存在问题及其对策 [J]. 上海煤气, 2024(5):13-15.
- [5] 郑飞. 燃气管道工程规划与布局优化研究 [J]. 门窗, 2024(18):130-132.

作者简介：杨杰（1996—），男，汉族，山东省青岛市，助理工程师，本科，研究方向为工程管理，热力或燃气相关。