

燃气输配网络多点泄漏演化过程建模与应急响应路径分析

王 庚 王尧尧 (济宁中石油昆仑能源有限公司, 山东 济宁 272000)

摘要: 燃气输配网络的多点泄漏问题已经成了城市能源安全的主要风险, 泄漏一般具有突发性、隐蔽性、交互性等特征。本文基于典型多点泄漏事故, 系统分析燃气输配网络的动态演化特征, 并构建相应的应急响应策略体系。基于泄漏点平面位置关系、流动影响和系统的关联因素, 构建采用图形学、CFD、人工智能和多数数据耦合等手段实现的完整的模拟管道多处泄漏动态演化趋势和变化趋势。提出了包含分类响应、自动控制、现场阻断和预见性优化等多维度的综合应急响应方案。研究结论可用于帮助城市管道燃气增强自身的抗风险能力和应急响应效率, 保障居民能安全地使用燃气和保障城市运行。

关键词: 燃气输配网络; 多点泄漏; 建模仿真; 应急响应; 路径优化

中图分类号: TU996.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2025) 036-0121-03

Modeling and emergency response path analysis of multi-point leakage evolution process in gas transmission and distribution network

Wang Geng and Wang Yaoyao (Jining CNPC Kunlun Energy Co., LTD., Jining Shandong 272000, China)

Abstract: The issue of multi-point leaks in gas distribution networks has become a major risk to urban energy security. These leaks are typically sudden, hidden, and interactive. This paper analyzes the dynamic evolution characteristics of gas distribution networks based on typical multi-point leak incidents and develops an emergency response strategy system. By considering the spatial relationships of leak points, flow impacts, and system-related factors, a comprehensive simulation is constructed using techniques such as graphics, CFD, artificial intelligence, and multi-data coupling to model the dynamic evolution and changes in multiple pipeline leaks. A multi-dimensional integrated emergency response plan is proposed, including categorized responses, automatic control, on-site blocking, and predictive optimization. The findings can help enhance the risk resistance and emergency response efficiency of urban pipeline gas systems, ensuring residents' safe use of gas and the smooth operation of cities.

Key words: gas transmission and distribution network; multi-point leakage; modeling and simulation; emergency response; path optimization

随着城市化进程的不断加快, 燃气需求量逐渐增加, 燃气输送管网规模及复杂度不断提升, 因此燃气输配网络面临更严重的安全风险问题。无论是在气象灾害情况或设施老化情况还是人为操作失误都可能会出现多种泄漏方式, 导致“多点联发”的风险, 极大地给传统的应急对策方案带来极大的挑战。传统的泄漏应急对策研究主要针对单一泄漏点, 难以有效模拟和预测多点泄漏所引发的系统性风险扩散过程。本文就此构建一种可模拟多点变化模式的系统实时响应模型框架, 匹配相应的针对性应急对策方案。分析探讨了城市燃气管网在多点泄漏情况下的运行干扰特征、建模仿真方法和应急疏散通道设计等研究内容。

1 燃气输配网络多点泄漏的特征

1.1 多点泄漏的空间分布特性

燃气输配网络中的多点泄漏事件往往在空间上呈现非均匀分布特性, 易发于主次干管交汇点或地下结构复杂、管道应力集中区域。该类区域泄漏点之间存在一定的空间关联和诱发机制, 具有显著的联动传播风险。特别是旧城区、管网密集地区及高压供气社区,

泄漏的地域空间容易顺管道系统的“弱点”部位蔓延而导致全区连锁反应。多点泄漏从地域的位置看, 并不是完全随机, 还受到地下埋深、周边含水状况、腐蚀情况、地质活动频繁程度等因素影响, 调查发现遇到连绵的大雨或者地质运动, 常常出现“带状”或“块状”的管道燃气泄漏。对故障检测和紧急应对起到了极负面的影响, 由于空间互动产生的协同作用, 少量的泄漏瞬时转化为全区危险源头。也提高了监控范围和准确性的难度。

1.2 泄漏对管网运行稳定性的复合作用

多点泄漏除了导致局部供气流量损失, 还会引发压力波动、调节失衡等问题, 影响管网运行稳定性。若泄漏点呈片状分布, 且存在压力耦合关系, 容易形成“区域崩溃效应”, 导致支线停输或主干线反压冲击。以某区域管网为例, 模拟两个中等强度泄漏点(每分钟各泄 100m³)时发现, 系统压力非线性快速下降, 部分节点波动持续超过 15min, 调节阀频繁动作, 调压精度明显下降, 部分末端用户短时出现断供现象。泄漏点越多, 监控响应越迟钝, 容易出现误报或调度

延迟,显著削弱系统的实时调控能力与安全保障水平,增加了事故扩散与二次风险的可能。

1.3 多点故障下网络应力的动态响应特性

当燃气输配网络发生多点泄漏情况时,整个系统的应力响应过程会呈现出剧烈的动态和非线性的特点,受燃气分销管网拓扑结构和压力差的影响,每个泄漏点的相互“应力传递路径”清晰可辨,某处泄漏可能诱发远端管段的突发应力聚集。

在动态响应阶段,主干线管由于需要输送较大气量,其压力变化较为明显,易出现类似脉冲的峰值压力波动。而对于次要管网来说,应力变化呈现滞后性且是局域响应,每个节点的响应时间差距和时差较大,当发生多元化故障模式时,部分调节阀、阀门等装置存在相互合作的失效概率较高,导致应抢时间短的不足。大量模型表明,在多元化故障模式下网络的峰值压力波动将比单一泄漏的情况下高30%以上,其恢复时间也被严重拉长,对应急调度系统的快速响应能力提出更高要求。

2 燃气输配网络多点泄漏演化过程的建模方法

2.1 基于图论的网络拓扑建模方法

图论方法在燃气输配网络的建模中具有高度结构抽象与路径分析能力,可将管道节点等效为“点”,将管道片段看作“边”,建立网络拓扑模型,分析气体输送路径、流路转换方案和多种漏气点的影响范围等。例如,某区域性LNG企业已经建成了其所在城市高压燃气管道(总长度达120km)的拓扑体系,共380个拓扑点。采用关联矩阵和最短路搜索法,可在指定漏点预示漏点压力波的扩散路径,并辨识受影响程度最严重的主干线和次环线,优化开关阀门开关位置以提升全系统事故关断范围。该图论模型可对运行过程的管供结构进行动态变化和反应,提升了调度员的认识和分析复杂的结构。在实际应急演练中,该系统还能辅助形成多种应急操作路径推荐,提高操作效率与响应精度。

2.2 基于CFD的流体动态建模方法

借助计算流体动力学(CFD)技术可以准确地进行燃气流速、压力及涡流等的变化解析,体现出泄漏过程中物理过程发展规律,特别在多泄漏点情况下,可以较好地分析流体波动效应。在某个实例研究中,采用CFD技术构建研究了工业区两条高压天然气管线之间有2个泄漏点的情况,基于AnsysFluent平台建立实验模型,分别对不同起压、不同泄漏孔口大小条件进行了实时流场速度分布图和压力衰减曲线变化分析。发现在2个泄漏点距离小于100m情况下,2个泄漏点间会出现“负压波叠加效应”,出现局部地区

压力异常下降以及流场紊乱等情况,有利于指导管道路段部分加固设计工作,以及泄漏源逆向追踪,提高事故溯源准确率。模型结果还被用于培训调度人员识别异常流态,为建立响应决策提供科学支撑。

2.3 基于数据驱动的机器学习建模方法

通过将历史工作状态数据、压力变化系列、报警事件提供给机器学习模型进行训练,构建具有多个特征点泄漏状态的预测和识别模型,增强管道对突发事件的智能化响应能力。在某大城市智能燃气管道试点项目中,团队利用5年时间搜集超过千次泄漏事件的传感器数据和工作日记,运用XGBoost算法建立了判断泄漏点位和影响范围的分类模型,模型所接受的高维特征包括管道流速、阀门开闭状态、节点的压力坡度等等。模型输出结果为泄漏类型的评级评估,实际运用后在数据流中,10s之内识别出多种泄漏场景,同时准确率高达92.3%。如一次突发的2处泄漏模拟过程中,该模型成功辨别了泄漏点和可能受到影响的管线,从而便于调度采取关闭和分流流量的路径。这种基于数据的模型会大幅度提升系统在应急状态下对于诊断和决策的能力。

2.4 基于多源融合的实时仿真建模方法

多源融合建模技术综合了传感器数据、历史运行记录、气象信息与设备运行状态等异构数据源,以提升多点泄漏情况下模型响应的实时性与鲁棒性。某沿海城市智慧燃气管网协同监测平台项目团队通过多源融合建模结合各类异源数据输入,建立了现场实时仿真系统,将SCADA系统、地理信息GIS系统及环境监测数据集成到整条高压天然气管道的动态数字副本上。该平台投入使用后,在3根埋地管道分段泄漏的3地点泄漏事件中,实时接收流动量、地下水流、环境温度差等数据,自动识别出异常模式,并预测事故趋势,在事故发生之前5min发出报警提示,并提供应急疏散边界,提高了应对突发灾难的及时性和自调整能力,实现了模型的自调和自检测特性,是一种在复杂环境背景下对突发高频事件的解决方法。

3 燃气输配网络多点泄漏的应急响应路径

3.1 泄漏分级响应与应急预案匹配路径

当存在多个泄漏点时,单一的应对方案可能难以应对诸多点泄漏情形与事故程度,而采用分级响应模式将显著提升事态应对准确率。某城市从2022年起尝试建立一套管道泄漏应对的多层次预案体系,根据泄漏位置数量、泄漏速率、暴露人口密度指标,将其划分为I级(重大)、II级(较大)、III级(一般)三类事故等级。并自动调用与执行预案且下发相关部门。实际案例中,该城市南部区域突然出现两处管段

的泄漏事故，一处发生在工业区，另一处发生在人口密集居住区。

对比感知器反馈数据、GIS 定位数据后成功识别本次事故为 II 级事件，并将应急响应在平台上推送给有关部门启动“二级应急程序”，包含设置指定区域道路封锁、居民撤离及医疗援助的同步开启，同时还特别监测居民小区区域的支管管线压力情况以确保泄漏事故的泄漏范围不再扩大。可在事故发生的 3min 内成功实现了应急响应，提升应对时效，并具有制度上的保障应对复杂性泄漏情形。

3.2 调压与关断联动的智能响应路径

多点泄漏常伴随着系统性压降风险，若未能及时处置，将会波及区域内的供气平稳运行。某地在智慧燃气系统中应用智能阀门控制与调压站联动响应机制，当监控中心判断两个及以上的泄漏事件出现后，系统根据泄漏点以上和以下的压力变化调节相邻的区域调压设施，按照设定好的目标压力完成切气。在一次城区东南区域的泄漏演练中，模拟了两个瞬时泄漏，导致管道中间压力快速下降。系统识别后，随即采用“大范围调压与非主干线调压”的组合方式进行应对处置，在原有设计的某个调压站的进出口压力由 0.25MPa 降至 0.18MPa，还下达了关闭 4 条支线（含有医疗院所、学校等重要民生负荷）的指令，实现了对医院、学校等重要民生负荷的持续稳定供气。该事件的处置速度、物资分配有效性以及精准度等都说明了其智能化特点，以及为调度系统增加即时调控效能提供了方法。

3.3 分区隔离与压力重构的现场处置路径

对于发生多点泄漏的事故，单点隔离往往不能有效控制局面，此时分区隔离法和压力调整被应用作为处理多点泄漏问题的主要途径。比如，某沿海城市于 2023 年夏季遭遇台风后地面下沉，触发了三处泄漏事件，泄漏点均位于主要干管上以及干管的两个分线上。事故发生后，运营调度中心第一时间从 GIS 中调出相应的区域逻辑分区模式图，针对泄漏点所归属的 Z3、Z4 和 Z5 三个区域实施隔离，然后安排相应的操作小组按照规定的区域逻辑分区关闭顺序展开工作；同时结合泄漏点 Z3、Z4、Z5 和 Z6 区域内 Z5 地区（有一家医院和一个商业街区）的压力降低要求，适当降低 Z2 区域压力，保证重要设施不断电的情况下，重新设定整个区域内气体流动的方向。在实施过程中通过手持设备监测隔离阀的开关状态和降压回升情况，实时对隔离区域的节点和调整系数进行优化。历时 45min，没有出现大范围停气。此处置过程也被纳入城市燃气应急教材进行后续推广使用。可见，划分合

理的区域逻辑分区和搭配合适的调压路径也是多点泄漏问题的策略之一。

3.4 基于模型预测的调度优化与反馈路径

模型预测调度作为提升多点泄漏应急效率的关键技术路径。在“智能管网建设项目”的科研中，研发团队运用图论和计算流体动力学 (CFD) 综合模型开发出了实时可预测泄漏影响范围模拟器，应用于一座城市的管道管理中心。在一场晚间泄漏的应急演练中，模拟器预测了多个泄漏点的燃气压力波动过程，预计 5min 内就有 3 根管道压力降到危险线。根据目前阀门开关状况、居民需求，给出最优应急方案两个，一是尽量小量开关阀门以维护管网均衡。二是迅速关掉可能引发大范围灾害事故的高危片区。工作人员采取第一个选择时，设置了反馈站点了解调整后的效果。在 8min 内，整个管网重新稳定下来，各泄漏点均被精准隔离，仿真结果与实际误差小于 5%。即提前做出决定、提出方案、形成回路闭环，是燃气应急调度智能化的发展方向。系统还实现了与调压设备、远程终端的联动控制，为后续城市级调度平台建设提供了可靠支撑与参考范式。

4 结语

燃气输配网络作为城镇能源安全保障中的重要环节，在多点泄漏事件中，也显现出其扩散速度快、波及面广等特点。通过对多点泄漏特征的深入分析，采用图形理论建模、CFD 仿真、数据驱动技术、多信息融合等形式建立发展模态，大大提高了事故研判和预测能力。结合应急处理方式，设计了分级调度配合、智能关断阀、现场隔离处理、模型反演优化的多策略融合处理方法，实现对突发事件的科学高效应对。从长远角度，结合物联网、智能决策，能够实现自我感知、自我校正、自我响应的应答系统，将是实现燃气网络智能控制和稳定运行的基础。

参考文献：

- [1] 李思洁, 王亚慧, 张子豪. 燃气输配突发事件应急处置的知识图谱构建 [J]. 消防科学与技术, 2022(006): 041-042.
- [2] 牛幼飞. 燃气输配管网智能调度研究 [J]. 中华建设, 2022(18):97-99.
- [3] 李冀, 胡海鹏, 吴晓君. 燃气输配信息物理融合系统的拆分策略研究 [J]. 控制工程, 2022(006):029-031.
- [4] 朱彩霞, 王聪民, 马富芹. 工程认证背景下燃气输配课程改革与探索 [J]. 中国教育技术装备, 2021(6):82-84.
- [5] 杨清. DCS 系统在燃气输配控制中的应用研究进展 [J]. 绿色科技, 2024,26(2):194-199.