

基于 GIS 的燃气管网爆管分析与功能实现

段欣

合肥合燃华润燃气有限公司

DOI:10.12238/jpm.v6i9.8426

[摘要] 城市燃气管网结构复杂且运行环境多变，管道破裂事故时有发生。事故一旦出现，迅速制定高效的阀门关闭策略至关重要。然而，传统的事故分析方法在应对多气源供应、多点破裂、环状结构、冗余设计等复杂场景时，往往存在结论覆盖不足的局限。为突破这一瓶颈，本研究基于 ArcGIS 平台构建了管网几何网络模型。利用其网络分析功能，创新性地提出一种通用方法，可有效处理单/多气源、单/多点破裂、环状/树状拓扑、包含孤立管段或失效阀门等各类复杂情形的燃气泄漏事件。该方法不仅设计了最优事故处理方案，更实现了浏览器端的直接分析功能。其核心优势在于能够准确应对上述所有复杂工况，并具备处理连续发生的二次破裂事件的能力。

[关键词] 燃气管网；爆管分析；多气源；多事故点；阀门故障

Analysis and Function Implementation of Gas Pipeline Explosion Based on GIS

Duan Xin

Hefei HeRan China Resources Gas Co., Ltd.

[Abstract] The structure of urban gas pipeline network is complex and the operating environment is variable, and pipeline rupture accidents occur from time to time. Once an accident occurs, it is crucial to quickly develop an efficient valve closure strategy. However, traditional accident analysis methods often have limitations in covering conclusions when dealing with complex scenarios such as multi gas supply, multi-point rupture, circular structures, and redundant designs. To overcome this bottleneck, this study constructed a geometric network model of the pipeline network based on the ArcGIS platform. By utilizing its network analysis capabilities, an innovative universal method is proposed to effectively handle various complex gas leakage events, including single/multiple gas sources, single/multiple point ruptures, ring/tree topologies, isolated pipe segments, or failed valves. This method not only designs the optimal accident handling plan, but also realizes the direct analysis function on the browser side. Its core advantage lies in its ability to accurately handle all the complex working conditions mentioned above, and its ability to handle consecutive secondary rupture events.

[Key words] gas pipeline network; Explosion tube analysis; Multiple gas sources; Multiple incidents; valve failure

引言

地下管线（涵盖燃气、电力、热力、供水、排水、通信等系统及其附属设施）是城市运行与发展的基础设施命脉。随着城镇化加速，其规模急剧扩大、构成日益复杂。一旦这类复杂系统发生管道破裂事故，能否快速生成最优阀门关停策略，以最大限度缩小影响范围、保障抢修效率并降低损失，仍是亟待解决的关键问题。

当前主流的管道事故处理技术主要有两类：流向依赖法和图论法。前者通常在 ArcGIS Engine（基于 GIS 组件二次开发）平台上实现，通用性不及后者。在管网流向明确的情况下，流向依赖法因其实现简便、效率高而更适用。相比之下，图论法

应用广泛（如公交查询、物流调度^[1]），但存在局限：其通过搜索邻近阀门排除下游节点以定位上游控制点，却无法直接获取下游阀门信息。流向依赖法则能直接识别上游阀门，避免了无效的下游搜索。值得注意的是，针对保气阀门（即下游控制点）的分析，对于事故处理策略的完整性至关重要。然而，目前国内外相关研究普遍缺乏对此类阀门的深入探讨。

1 复杂燃气管网爆管分析数据预处理

要素类（Feature Class）定义了具有相同空间表达方式和通用属性字段的同类型空间实体集合。点、线、面和注记是四种最常用的类型。拓扑、几何网络等高级功能均构建于此基础之上。

进行管道破裂事故分析所需的基础信息可归纳为四类实体: 管段(线)、气源(点)、阀门(点)以及用户(点)。实际燃气网络信息的采集途径主要包括 CAD 图纸、RTK 实地测量和人工绘图三种方式。

本研究采用模拟生成的上述四类矢量实体作为源信息。利用 ArcMap 绘制矢量图, 并采用 ESRI Geodatabase 模型中的要素数据集与要素类进行结构化存储与管理^[3]。具体流程为: 在文件地理数据库内创建要素数据集并定义坐标系, 随后依次导入模拟的管段、气源、阀门及用户实体。图 1 展示了模拟生成的管网结构, 包含 3 个气源、1 个环路和 3 段孤立管段(未连接气源)。

完成信息获取后, 需进行数据质量验证。这包括执行拓扑规则检查与错误修正, 以确保管段、阀门、气源、用户等实体间的空间逻辑关系准确无误。

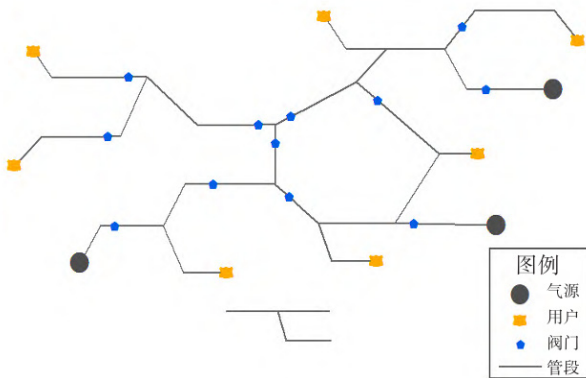


图 1 模拟管网数据

为确保燃气网络破裂事故分析的准确性, 其基础信息的空间逻辑结构必须满足特定要求。利用拓扑建模可有效定义要素间的多种空间关联。当要素共享坐标、边界或节点时, 该模型能优化地理数据管理, 并为查询与导航(例如判定邻接性与连通性)提供系统支持。

基于 ArcGIS 平台执行拓扑检查的流程如下:

- 1) 创建文件地理数据库;
- 2) 在其中建立要素数据集并导入待检信息;
- 3) 为该数据集定义拓扑结构(依向导设置名称、参与要素、等级及规则);
- 4) 执行验证并导出错误记录^[2-4]。

本研究将模拟生成的管段(线)、气源(点)、阀门(点)、用户(点)四类空间实体导入要素数据集并应用新建的拓扑模型。设置的核心约束规则包括:

- 1) 阀门点: 必须被其他要素端点覆盖(确保连接两条不同管段);
- 2) 用户点: 必须被其他要素端点覆盖;
- 3) 气源点: 必须被其他要素端点覆盖(确保气源与用户均位于管段末端)^[5];
- 4) 管段: 禁止重叠、自重叠或存在悬挂点。

完成规则配置与验证^[6]后, 将拓扑添加至工作空间(图 2), 最终在该数据集上构建几何网络。

图层 topo_Topology 面错误线错误点错误 yuanusersfamenline 图 2 管网拓扑关系错误处理 2 爆管分析模型设计与构建

通过爆管分析得到 4 个结果数据集, 即必关阀门、停气用户、保气阀门、停气管段。爆管分析流程如图 3 所示。

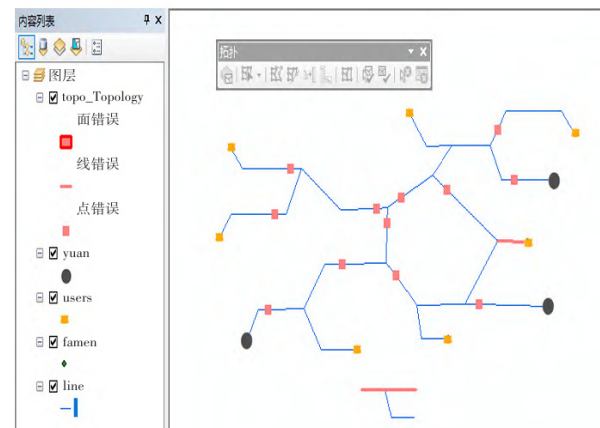


图 2 管网拓扑关系错误处理

2 爆管分析模型设计与构建

通过爆管分析得到 4 个结果数据集, 即必关阀门、停气用户、保气阀门、停气管段。爆管分析流程如图 3 所示。

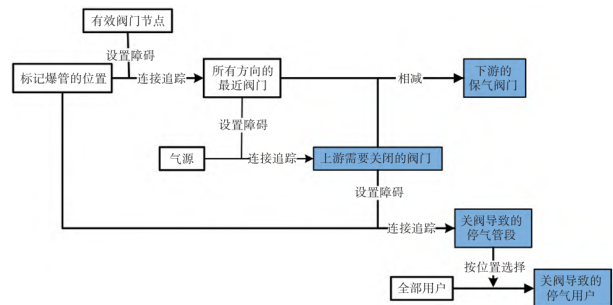


图 3 爆管分析流程

2.1 关阀分析

管网破裂事故应急处置中, 需迅速开展现场抢险, 核心操作是合理切断供气。关阀决策通过拓扑推演生成, 具体流程为:

确定事故原点: 以文献^[7]定义的破裂点位(单点或多点)为起点;

全向拓扑遍历: 沿管线网络各方向进行路径探索;

关键节点捕获: 遇到功能正常的控制装置即记录坐标, 并终止该方向搜索;

生成闭锁集合: 最终获取事故点上下游最近的有效控制点集群。

2.2 筛选必关阀门与保气阀门

关阀决策推演生成事故原点辐射范围内各路径终端控制点集群。最小化闭锁策略要求仅操作关键子集(必关阀门), 即可实现气源与其余控制点(保气阀门)的供电路径切断。具体算法实现:

气源辐射扫描: 从供能原点出发执行全向拓扑遍历;

邻域截停捕获: 检测到邻近控制装置即记录坐标并终止该路径;

上游关键集生成: 输出事故点上游必须闭锁的控制点集群;

下游非关键集判定: 通过空间拓扑关系比对(互斥或完全重叠), 从全域控制点集群中分离出保气阀门集合。

2.3 停气管段与停气用户分析

管网破裂事件触发应急处置时, 执行闭锁操作可阻断下游

燃气输送,此时将形成受影响管段及断供用户群。具体范围判定流程:

停运管段识别:以事故原点为起点进行全向拓扑遍历,探测到关键闭锁装置即终止该路径并记录坐标,最终生成停运管段集合;

断供用户定位:通过空间邻近关联分析(缓冲区阈值:50米或零距离),获取与停运管段存在位置关联的用户点位,即断供用户群^[8]。

2.4 排除失效阀门的二次爆管分析功能实现

事故处置关阀策略需确保控制装置可正常操作,但实际可能存在阀门失效导致无法关闭的风险^[9]。因此在事故推演过程中,必须评估装置有效性。常规做法是将状态属性存储于阀门特征表中,但大型输送网络数据规模庞大时,装置数量众多导致维护困难。

本方案创新点在于:构建要素图层时,直接通过结构化查询语句筛选有效控制装置。当浏览器端调用事故分析服务后,系统从决策闭锁阀门中识别失效装置,提取其唯一标识符,动态生成有效性过滤条件。

3 爆管分析模型测试及应用

3.1 发布地图服务

将空间数据库要素类拖入工作空间,设置好符号样式后,分享为地图服务。勾选 Feature Access 功能,其提供对地图上矢量要素的访问和编辑,可在浏览器客户端生成要素图层,从而捕捉管线爆管点。发布的地图服务如图4所示。

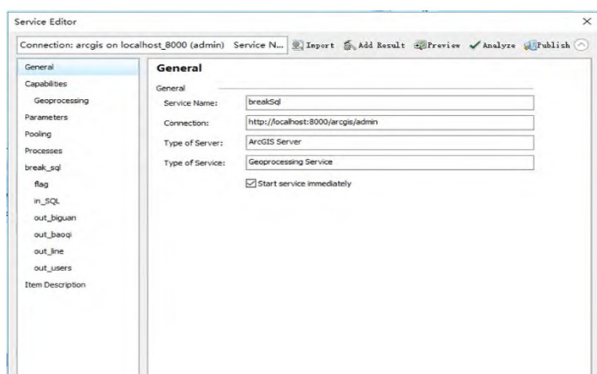


图4 查看发布的地图服务

3.2 发布地理处理服务

模型成功执行后,在输出界面启动服务发布流程,将已完成运算的地理处理任务部署为在线服务。需特别调整服务器响应条目上限参数。鉴于燃气企业空间数据规模庞大,建议将该阈值从默认1000提升至10000量级,以规避数据截断风险^[10]。

3.3 爆管分析模型应用效果

基于上述方案执行事故推演,结果可视化呈现如图5。该场景包含3个气源与1个环状网络破裂点,推演结果通过地图热力渲染及属性标注实现高亮展示。关键输出包括:个紧急闭锁阀门(标签图标标注);户断供用户(三角标识);停运管段(加粗线段显示,已排除预设非连通干扰段)本方案已验证具备解析环状结构、多气源供能及含干扰管段等复杂场景的能力。

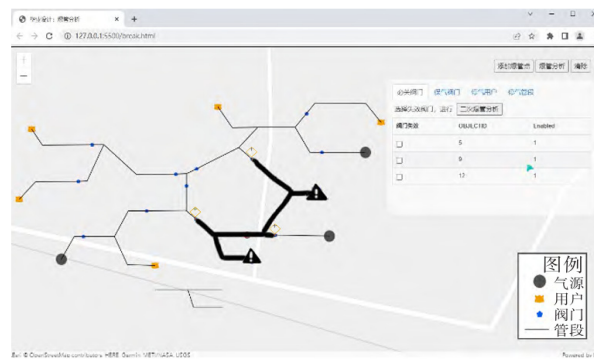


图5 多气源、环路、单爆管点的爆管分析

4 结语

本研究针对结构复杂的燃气网络管道破裂事件展开系统性解析,借助 ArcGIS 几何网络架构实现事故数据的结构化整合。基于多因子耦合分析方法,通过平台工具箱执行操作流程,并利用可视化建模界面构建事故处理决策工具。该方案能准确应对环状布局、多气源供应、多点破裂及含孤立管段等复杂工况,且支持连续二次破裂事件的无限次迭代推演,最终在 Web 客户端实现分析功能调用。当前研究虽覆盖了复杂网络事故解析,但尚未纳入流体动力参数(如压力层级)。后续需将该变量引入决策体系,以提升模拟精度与适应性。

【参考文献】

- [1]李敬唐.基于 GIS 的燃气管网爆管分析算法优化及系统建立[J].现代测绘,2024,47(05):74-80.
- [2]乔帆,杨光,李业强,等.基于仿真计算的城市管网爆管事件关阀策略[J].煤气与热力,2023,43(03):11-15.DOI:10.13608/j.cnki.1000-4416.2023.03.003.
- [3]王重阳,帅艳民. GIS 在燃气管网分析中的应用及发展[J].测绘与空间地理信息,2022,45(06):32-34+38.
- [4]陈杰,徐汶波,陈煊.面向崇明世界级生态岛的智慧燃气建设研究[J].城市燃气,2021,(S1):195-201.
- [5]罗宗铭.基于复杂网络的燃气管网节点重要度分析及风险评价[D].成都理工大学,2021.
- [6]石巍.基于 CIM 平台燃气地下管线项目建设[J].中国建设信息化,2021,(07):40-44.
- [7]李舜,王强,杨彬.四川阆中燃气管网 GIS 平台设计与应用[J].科技创新与应用,2019,(27):93-95.
- [8]关昆.基于服务式 GIS 的燃气管网信息平台设计与实现[J].测绘与空间地理信息,2019,42(05):55-56+60.
- [9]赵欧.燃气管网快速抢修技术的研发与应用[J].低碳世界,2017,(18):274-275.
- [10]赵阳,孟祥印,周瑾,等.基于 GIS 的燃气管网网络分析扩展模块设计开发[J].自动化与仪表,2017,32(03):25-29.
- [11]何婵.基于 GIS 燃气管网爆管分析功能的设计与实现[D].西南石油大学,2014.
- [12]李卓.基于 C/S 模式的城市燃气管网信息系统研发[D].西南交通大学,2014.