

基于 BIM 与 GIS 融合的燃气管道全生命周期管理系统研究

于晓璇 (淄博星辰燃气有限公司, 山东 淄博 255100)

摘要: 本研究提出基于 BIM 与 GIS 融合的燃气管道全生命周期管理系统, 构建精度 $\pm 0.005\text{m}$ 的 BIM-GIS 一体化数据模型与吞吐量 2000+ 实体 /s 的多源数据集成框架, 实现设计阶段 $O(n\log n)$ 效率的 BIM 协同碰撞检测、运维阶段 $\leq 30\text{s}$ 响应的泄漏模拟等核心功能。经 XX 市 42km 管网工程验证, 系统三维交互达 30FPS, 空间定位精度 $\pm 3\text{mm}$, 应急关阀路径优化率提升 8%, 为城市燃气管网数字化管理提供关键技术支撑。

关键词: 燃气管道; BIM-GIS 融合; 全生命周期管理; 应急分析; 空间定位

中图分类号: TU996 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2026) 003-0092-03

Research on Full-Life-Cycle Management System of Gas Pipelines Based on BIM-GIS Integration

Yu Xiaoxuan (Zibo Xingchen Gas Co., Ltd., Zibo Shandong 255100, China)

Abstract: This study proposes a full-life-cycle management system for gas pipelines based on the integration of BIM and GIS. A BIM-GIS integrated data model with an accuracy of $\pm 0.005\text{m}$ and a multi-source data integration framework with a throughput of over 2000 entities per second are constructed. Core functions are realized, including BIM collaborative collision detection with $O(n\log n)$ efficiency in the design phase and leakage simulation with a response time of $\leq 30\text{s}$ in the operation and maintenance phase. Verified by a 42km pipeline network project in XX City, the system achieves 30FPS in 3D interaction, $\pm 3\text{mm}$ in spatial positioning accuracy, and an 8% improvement in emergency valve closing path optimization rate. This research provides key technical support for the digital management of urban gas pipeline networks.

Keywords: Gas Pipelines; BIM-GIS Integration; Full-Life-Cycle Management; Emergency Analysis; Spatial Positioning

城市燃气管网作为关键基础设施, 2022 年我国总长度已突破 85 万 km, 年均泄漏事故超 200 起, 传统管理存在信息孤岛、响应滞后等问题。本研究针对设计阶段多专业协同低效、空间冲突频发, 运维阶段泄漏定位慢、应急决策缺乏数据支撑的核心痛点, 建立 BIM 语义与 GIS 空间参考双向映射机制, 开发涵盖数据集成、空间分析、可视化交互的系统框架, 旨在提升管网管理智能化水平, 筑牢城市公共安全屏障。

1 BIM 与 GIS 融合的燃气管道全生命周期管理系统理论基础与架构设计

BIM 与 GIS 融合的燃气管道全生命周期管理系统, 核心是实现几何形状、专业信息、空间位置三类数据的有效对接, 把 BIM 的详细构件信息和 GIS 的大范围空间定位信息整合起来^[1]。数据互通方面, 借助 IFC4 标准存储管道的规格、材质等属性, 通过 CityGML3UtilityNetworkADE 标准梳理管道节点、管段的连接关系, 再通过 ISO 19109 建模模板统一信息标准, 按 OGC12-019 标准完成坐标转换, 保障数据精度。技术框架采用服务化 + 核心模块化混合架构, 数据层以 PostgreSQL/PostGIS 搭建双数据库并行存储模式,

通过唯一标识建立数据关联。系统需求覆盖设计、施工、运维闭环管理: 设计环节优化管道路线、检查构件碰撞、实现管件参数自动匹配, 施工环节管理开挖许可、焊缝检测、实时上传现场定位数据, 运维环节监测泄漏、评估风险、快速处理应急关阀问题^[2]。基于需求采用“数据层、服务层、应用层”三层结构, 数据层建立数据关联, 服务层封装接口与调用服务、管理权限, 应用层结合 Cesium、Three.js 及 Vue3 搭建可视化场景, 整合 BIM 结构校验与 GIS 空间分析能力, 为燃气管道全生命周期管理提供可拓展技术支撑。

2 BIM-GIS 融合的燃气管道管理系统关键模块实现

2.1 BIM-GIS 一体化数据模型构建与多源数据集成方法

BIM-GIS 一体化数据模型构建的核心是建立跨尺度实体语义映射机制, 基于 ISO12006-3 标准定义管网-支线-构件三级拓扑结构^[3]。其中管网对应 CityGML 的 UtilityNetwork 模块, 构件映射至 IFC4 的流元素基类, 空间属性通过 GML-SFO 规范将 BIM 局部坐标转为 WGS84 椭球面坐标 (精度 $\pm 0.005\text{m}$),

非空间属性通过扩展 CityGML 字段与 IFC 材质属性建立关联；多源数据集成采用分布式 ETL 架构，CAD 图纸通过 AutoCAD API 解析管径、高程等参数生成 GeoJSON，传感器数据用 Apache NiFi 每 5s 采集压力/流量数据并经 Kafka 缓冲，BIM 模型用 IfcOpenShell 解析拓扑信息，GIS 底图用 GDAL 构建瓦片金字塔，再通过 OWL 本体规则库完成语义消歧（如 CAD 的“DN300”映射为标准管径属性），并经 Jena 引擎转换为 RDF 三元组；所有数据在 PostgreSQL 中统一存储，空间数据存入 PostGIS 的 Geometry 字段，属性数据以 JSONB 格式存储，通过 B+ 树索引实现 GlobalId 与 UUID 双向检索，保障每秒 2000+ 实体的事务吞吐量。

2.2 燃气管道设计阶段 BIM 协同与 GIS 空间定位模块开发

燃气管道设计阶段 BIM 协同模块采用分布式版本控制架构支持多专业同步协作，核心基于 Operational Transformation 算法搭建实时协同引擎，当设计师修改管道构件参数时，操作指令会通过 WebSocket 实时同步给所有客户端，结合时间戳机制解决操作冲突，能满足 200 人同时在线操作且延迟控制在 0.5s 内。配套碰撞检测模块采用改进的 BVH 空间索引算法，以管道构件为核心构建八叉树结构，可自动识别管道与建筑构件的硬碰撞（净距不足）、软碰撞（维护空间不够）问题，将检测效率从 $O(n^2)$ 提升至 $O(n \log n)$ ；GIS 空间定位模块重点实现坐标精准转换，建立投影坐标与大地坐标双向映射模型，通过七参数布尔沙变换方程将 BIM 局部坐标转换成 CGCS2000 坐标系：

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{CGCS2000} = \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} + (1+k) \cdot R \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{BIM}$$

其中： $[\Delta X, \Delta Y, \Delta Z]^T$ 为平移参数（单位：m）； k 为尺度因子（无量纲）； R 为旋转矩阵（弧度制）。该模型在 15km 范围内可实现 $\pm 3mm$ 平面精度。同时集成 RTK 差分定位技术，利用载波相位观测值解算管道关键点（如阀门井中心）的 WGS84 坐标：

$$\lambda = \frac{N}{\rho \cos \varphi} + \delta \lambda$$

式中： λ 为经度（单位： $^{\circ}$ ）； φ 为纬度（单位： $^{\circ}$ ）； N 为相位整周模糊度； ρ 为载波波长（单位：m）； $\delta \lambda$ 为大气延迟改正量（单位：rad）。

两大模块通过 Cesium 3DTiles 技术实现三维场景融合，前端用 Three.js 渲染管道、阀门等 BIM 构件，调用 Cesium Camera API 保持视角同步，依托 Turf.js 库

完成安全缓冲区生成、路由优化等空间分析，实时显示高压电缆 20m 安全避让区，后端采用 Flask 框架搭建 RESTful API 提供坐标转换服务，可稳定处理每秒 1500 次转换请求。

2.3 燃气管道运维阶段 BIM 可视化与 GIS 应急分析模块实现

燃气管道运维阶段 BIM 可视化模块采用 WebGL 多引擎协同架构打造三维渲染系统，以 Three.js 为核心搭建渲染管线，通过 GLTF2.0 格式加载 LOD 分级模型，主管道采用三角面片数超 50000 的精细模型，附属设备用面片数少于 5000 的简化模型，搭配视锥体剔除和实例化渲染技术，保障移动端 30FPS 流畅交互。核心亮点是构件级语义查询功能，用户框选阀门等构件时，系统通过 Raycaster 算法拾取模型实例，反向解析 UUID 关联的生产日期、承压等级等 IFC 属性并以悬浮卡片展示；GIS 应急分析模块核心实现燃气泄漏多物理场仿真，基于连续性方程和 Fick 扩散定律构建浓度场模型：

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \nabla^2 C - \vec{v} \cdot \nabla C + S$$

其中： C 为甲烷浓度（单位： kg/m^3 ）； D 为湍流扩散系数（单位： m^2/s ）； \vec{v} 为风速向量（单位： m/s ）； S 为泄漏源强度（单位： $kg/(m^3 \cdot s)$ ）。该模型每 5S 更新一次气象数据驱动的三维浓度云图，并集成 A* 算法实现最优关阀路径规划：

$$f(n) = g(n) + h(n)$$

式中： $g(n)$ 为从起点到节点 n 的实际代价（基于阀门间距和启闭耗时计算）； $h(n)$ 为节点 n 至目标点的启发式距离（采用曼哈顿距离估算）。

两大模块深度融合支撑应急处置，SCADA 系统检测到压力骤降超 0.3MPa 时自动触发泄漏模拟，生成 800m 半径爆炸风险区和疏散路径，移动端 AR 功能可通过扫描阀门二维码，叠加管线埋深、相邻电缆位置等 BIM 信息，后端采用 Spring Cloud 微服务架构，泄漏分析模块部署于 Kubernetes 集群，借助 GPU 加速实现 50km² 区域秒级仿真计算。

3 系统应用案例验证与优化完善

3.1 XX 市城区燃气管道工程的系统应用实践

XX 市城区燃气管道工程全长 42km，覆盖市政道路与老旧小区，核心目标为搭建数字化运维底座。数据准备阶段，将设计院 Autodesk Plant 3D 模型导出为 IFC4 格式，经 IfcOpenShell 解析生成含 12000 个管件的 JSONB 文件，映射至 CityGML Utility Network ADE；整合 1:500 地形图、0.2m 航摄影像，经 GDAL 重投影至 CGCS2000 坐标系制作 GIS 底图，接入 2015—2023

年 SCADA 压力流量数据形成时序库。

系统采用私有云架构部署，Kubernetes3 节点 GPU 集群容器化运行 PostgreSQL、GeoServer 等服务，Nginx 反向代理实现 HTTPS 加密；移动端选用防爆平板，搭载 Flutter 开发的巡检 App，支持 100km 管线离线缓存。关键实施步骤：45min 加载完 BIM-GIS 融合模型、RTK 无人机采集节点坐标（与模型差值均值 0.018m）、压力瞬降超 0.3MPa 触发泄漏模拟（30s 生成 800m 疏散圈）、建立 RBAC 权限体系实现双重鉴权。本次实践有效支撑了设计审查、施工管理与运维决策全流程应用。

3.2 系统应用效果的性能指标评估与问题总结

系统从响应时效、数据完整性、并发承载力三方面开展性能评估，BIM-GIS 融合查询平均响应时间 1.8s，其中 IFC 构件属性检索 0.3s、CityGML 空间拓扑计算 1.5s，满足运维秒级交互需求，RTK 抽检 200 个管点，平面坐标误差 $\leq 0.02\text{m}$ 占比 96%、高程误差 $\leq 0.03\text{m}$ 占比 94%、属性完整率 99.2%，300 个 WebSocket 长连接下，Kubernetes 集群 CPU 利用率 68%、内存 12.4GB、GPU 显存 4.1GB，无帧率下降；核心问题集中在三方面，一是 IFC 与 CityGML 几何语义差异，IFC 的 IfcSweptDiskSolid 转换时因采样间隔不一致，导致 DN500 以上管道出现 0.8% 表面积偏差，二是 ModbusTCP 协议 5s 采集周期下存在 0.3% 丢包率，需新增 MQTToS2 重传机制，三是逆光环境下移动端 AR 二维码识别成功率降至 78%，拟引入 YOLOv5 辅助定位；评估结果既验证了系统核心性能达标，也明确了后续优化的关键方向。

3.3 基于案例反馈的系统功能迭代与优化策略

针对案例问题，系统采用“语义-几何”双轨迭代优化策略，数据层通过 PointNet++ 深度学习网络，以 1000 组 DN500 以上管道校准点云为训练集，输出 CityGML 网格顶点偏移量，将面积偏差从 0.8% 降至 0.2%；接口层新增 MQTToS2 重传机制，丢包率降至 0.05%，引入 Avro 格式缩减数据包 42%；应用层采用 Vue3+Vite 架构缩短首屏渲染 35%，WebCodecs 降低 CPU 占用 20%；算法层面将应急关阀路径规划升级为动态加权 A*，引入实时交通流参数使高峰疏散路径缩短 8%。同时，建立数字孪生快照机制（每 10min 存管网状态至 Redis）支持故障回溯，权限模块升级为 ABAC 模型，通过 OPA 引擎实现细粒度决策，适配临时承包商动态角色，并实施采用灰度发布模式，先更新 20% 测试节点，经 Prometheus 监控无异常后全量推送，预期提升运维效率 25%，为氢气管道场景扩展提供可复用技术框架。

针对逆光环境下移动端 AR 二维码识别率低的问题，应用层集成 YOLOv5n 轻量版目标检测模型与 AR 引擎深度联动，先通过 YOLOv5n 在 0.1s 内定位管道构件特征点（如阀门手柄、法兰边缘），缩小二维码搜索范围，再结合自适应阈值二值化算法增强码图对比度，将识别成功率从 78% 提升至 93%；同时优化 AR 渲染管线，增加 HDR 动态范围调整模块，自动补偿逆光场景下的亮度差异，减少金属表面反光干扰。为支撑氢气管道场景扩展，数据层新增氢气管道专属语义扩展：在 IFC4 模型中扩展 IfcHydrogenPipe 实体，补充氢气渗透率、耐氢腐蚀等级等 12 项专业属性；对接 CityGML3.0 的 HydrogenNetworkADE 扩展模块，建立氢气管道-调压站-储氢罐的拓扑关联模型。算法层升级泄漏扩散仿真引擎，引入氢气密度、爆炸极限等特性参数，结合 CFD 流体力学模拟优化湍流扩散系数计算逻辑，使氢气泄漏浓度场预测误差从 11.6% 降至 4.8%。此外，新增智能预警规则引擎，基于 Apache Flink 流处理框架实时分析 SCADA 时序数据，设置压力波动 $\pm 5\%$ 、流量突变 $\pm 10\%$ 等多维度阈值，自动触发分级预警（蓝色/黄色/红色），并联动 BIM 构件高亮显示异常管段，预警响应时间缩短至 2s；整合数字孪生快照与区块链技术，将关阀操作、泄漏处置记录等关键事件上链存证，通过 Hyperledger Fabric 搭建联盟链节点，确保数据不可篡改，满足安全生产合规审计要求。

综上所述，本研究基于 PostgreSQL+PostGIS 统一数据模型与 SpringCloud 微服务架构，构建 BIM-GIS 融合燃气管道管理系统，实现设计协同优化与运维应急响应的全链条闭环管理。核心创新包括：BVH 八叉树碰撞检测算法（效率达 $O(n\log n)$ ）、泄漏多物理场耦合秒级模拟模型、移动端 AR 辅助定位功能。XX 市工程实践验证了系统在提升运维效率、降低事故损失中的实用价值。未来将拓展至氢气管道等新型能源设施，探索数字孪生驱动的预测性维护模式，助力城市生命线工程智能化升级。

参考文献：

- [1] 焦洋. BIM 技术在燃气管道工程中的应用研究 [D]. 北京: 北京建筑大学, 2017.
- [2] 胡丹. 基于 GIS 的城市燃气管道风险管理研究分析 [J]. 科技与创新, 2017(06):93.
- [3] 兰芳. 基于三维 GIS 的燃气管道线路辅助设计系统研究与实现 [J]. 科技创新导报, 2016, 13(33):42-43.

作者简介：

于晓璇 (1984-)，女，汉族，河北保定人，本科，工程师，研究方向：燃气工程。