

智慧城市框架下智慧燃气管道泄漏报警建设研究

陈玉辉 (山东港华培训学院, 山东 济南 250101)

摘要: 随着智慧城市建设的加速推进, 城市基础设施的智能化转型已成为提升城市治理能力的关键路径。燃气管道安全运行直接关系到公共安全、生态环境和经济发展。传统燃气泄漏监测手段存在响应滞后、覆盖不足等问题, 难以满足现代城市精细化管理的需求。智慧燃气管道泄漏报警系统通过融合新一代信息技术, 构建全天候、多维度的安全防控体系, 为城市燃气安全管理提供技术支撑。本文从系统定义与功能出发, 分析其在智慧城市框架下的建设关键技术, 并提出系统性建设策略, 以期为城市燃气安全数字化转型提供理论依据。

关键词: 智慧城市; 燃气管道; 泄漏报警; 物联网

中图分类号: TU996.7

文献标识码: A

文章编号: 1674-5167 (2025) 015-0126-03

Research on the construction of smart gas pipeline leakage alarm under the framework of smart city

Chen Yuhui (Shandong Ganghua Training College, Jinan Shandong 250101, China)

Abstract: With the acceleration of smart city construction, the intelligent transformation of urban infrastructure has become a key path to enhance urban governance capabilities. The safe operation of gas pipelines is directly related to public safety, ecological environment, and economic development. Traditional gas leak monitoring methods have problems such as delayed response and insufficient coverage, which are difficult to meet the needs of modern urban refined management. The smart gas pipeline leakage alarm system integrates new generation information technology to build an all-weather and multi-dimensional safety prevention and control system, providing technical support for urban gas safety management. This article starts from the definition and functions of the system, analyzes its key technologies in the construction of smart cities, and proposes systematic construction strategies to provide theoretical basis for the digital transformation of urban gas safety.

Keywords: smart city; Gas pipeline; Leakage alarm; Internet of Things

城市化进程的深化与能源需求的持续增长, 使燃气管网覆盖范围与运行复杂度显著提升。燃气泄漏事故不仅威胁居民生命财产安全, 还可能引发火灾、爆炸等次生灾害, 对城市韧性构成严峻挑战。当前, 燃气管道安全管理面临隐蔽性泄漏难察觉、人工巡检效率低、风险处置联动不足等痛点, 亟需借助智能化手段重构监测与应急体系。

智慧城市框架为燃气安全治理提供了底层技术支撑与协同管理平台, 通过数据驱动的动态感知网络与智能决策模型, 能够突破传统监管模式的空间与时效限制, 推动燃气安全管理从被动应对向主动防控转型。

1 智慧燃气管道泄漏报警系统的定义

智慧燃气管道泄漏报警系统是基于物联网感知层、边缘计算层与云端分析层构建的闭环安全防控体系。其核心架构由分布式光纤传感网络、声波传感器阵列、压力波动监测模块及 AI 驱动的泄漏特征解析算法构成, 通过窄带物联网实现多源异构数据的低功耗传输。系统依托数字孪生模型对燃气管网进行三维动态映射, 结合历史泄漏案例库与实时工况数据, 建立泄漏风险的多维度量化评估模型, 实现泄漏点定位精度达米级、响应时间低于 30 秒的技术指标^[1]。

2 智慧城市框架下智慧燃气管道泄漏报警建设关键技术

2.1 传感器技术

高灵敏度传感器是泄漏检测的核心硬件, 需突破传统电化学传感器的检测极限。基于微机电系统的激光光谱传感器通过可调谐二极管激光吸收光谱技术, 可在 0-100%VOL 范围内实现甲烷体积分数的全量程监测, 检测精度达 $\pm 0.5\%FS$, 同时通过温湿度补偿算法消除环境干扰。分布式光纤传感技术利用相位敏感光时域反射仪, 将燃气管线转化为连续振动感知单元, 对第三方施工破坏、微泄漏引发的管道应力波实现 $0.1\mu\epsilon$ 级应变感知。

2.2 数据传输处理技术

基于 NB-IoT 与 LoRa 的混合组网技术构建分层传输体系, NB-IoT 主网负责关键节点每秒级高频数据回传, LoRa 自组网实现边缘传感器簇的千米级覆盖与微瓦级功耗运行。数据压缩采用改进型哈夫曼编码与 LZW 无损压缩算法, 使单节点日均流量控制在 50KB 以内。边缘计算节点搭载轻量化 TensorFlow Lite 模型, 在网端完成噪声滤波、特征提取与初级报警判断, 将云端计算负载大幅降低。针对地下管廊多径衰落问

题,采用 MIMO 分集接收技术与自适应功率控制算法,确保复杂环境下 99.9% 的数据包到达率^[2]。

2.3 报警与定位技术

基于 GIS 与北斗卫星导航的定位系统,通过载波相位差分技术实现泄漏点平面定位精度 $\pm 1\text{m}$,高程定位精度 $\pm 2\text{m}$ 。多源数据融合定位算法整合管道拓扑数据、声波到达时间差与光纤振动信号特征,在卫星拒止环境下仍可通过惯性导航单元维持米级定位能力。智能报警引擎采用三级决策机制,边缘端完成阈值初筛,区域中心通过随机森林模型评估泄漏概率,云端利用数字孪生仿真验证误报排除。系统集成 18 类应急预案知识库,可根据泄漏量、扩散速度与周边人口密度自动生成最优处置方案,通过 5G 切片网络向应急终端推送三维救援路径图,实现从报警触发到阀门关闭的全流程处置时间压缩至 90 秒以内。

3 智慧城市框架下智慧燃气管道泄漏报警建设策略

3.1 多模态感知网络全域覆盖部署技术

多模态感知网络的构建需解决燃气管网空间异构性、环境干扰多样性与监测连续性之间的矛盾。针对埋地、架空、穿跨越等不同敷设场景,采用激光光谱、分布式光纤传感与声波检测的异构传感器协同部署方案。激光甲烷传感器基于 TDLAS 原理,通过波长调制光谱技术实现 $0.1\text{ppm} \cdot \text{m}$ 检测灵敏度,部署间距根据管道压力等级动态调整:中压管道按 200m 间隔布设,高压管道加密至 100m。分布式光纤声波传感系统沿管线敷设 Φ -OTDR 传感光缆,通过相干瑞利散射信号相位解调算法,实现每公里 80 个振动监测点的空间分辨率,满足第三方施工破坏事件的 10cm 级定位需求。声波传感器阵列采用宽带压电陶瓷元件,覆盖 20Hz-20kHz 频段,通过小波包能量熵特征提取技术区分泄漏湍流噪声与环境背景振动^[3]。

网络拓扑优化采用改进型 Voronoi 图与 Delaunay 三角剖分混合模型,定义传感器覆盖度函数:

$$C = \sum_{i=1}^n \frac{A_i \cdot S_i}{R_i^2}$$

其中: A_i 为传感器有效监测面积, S_i 为信号信噪比, R_i 为监测半径。

该模型在约束部署成本的同时,确保管廊弯头、阀门组等高风险区域的监测冗余度不低于 3 层。数据传输采用 NB-IoT 与 LoRa 混合组网架构,通过自适应跳频机制规避 2.4GHz 工业频段干扰,利用改进型 LoraWAN 协议实现单个网关对 5km 半径范围内 2000 个终端节点的并发接入,丢包率控制在 10^{-5} 量级。

多源数据融合层引入卡尔曼滤波与 D-S 证据理论

相结合的决策框架,建立泄漏置信度融合模型。对于第 k 个监测周期内来自 m 个异构传感器的观测值 $\{x_1, x_2, \dots, x_m\}$,其融合权重 w_i 由传感器健康度指标 H_i 和环境干扰系数 η_i 共同决定,满足 $\sum_{i=1}^m w_i = 1$ 。边缘计算节点部署轻量化联邦学习模型,通过本地差分隐私保护机制实现多节点间的泄漏特征参数协同优化,同步更新周期压缩至 30 分钟以内。网络抗干扰设计采用空时编码与自适应波束成形技术,在管廊多径传播环境中维持 -110dBm 的接收灵敏度阈值,确保电磁兼容性符合 GB/T 17626 系列标准。

3.2 云-边-端协同的数据中台架构设计

云-边-端协同架构通过分层计算与动态资源调度机制,实现燃气泄漏监测数据的高效处理与智能决策闭环。边缘计算层部署于管廊现场控制柜,搭载轻量化 TensorRT 推理引擎,对传感器原始数据进行时域降噪、特征提取与初步报警判定。采用自适应滑动窗口算法,以 10 秒为周期对甲烷浓度梯度、声波频谱能量及光纤应变变化率进行联合分析,仅将置信度超过 0.85 的异常事件数据上传至云端,降低网络传输负载。边缘节点支持容器化微服务部署,通过 Kubernetes 边缘集群实现计算任务的弹性扩缩容,单节点支持每秒处理 2000 个传感器数据点。同时,云端数据中台基于 Hadoop 生态构建分布式存储与计算集群,采用 Lambda 架构实现流批一体处理。实时数据流通过 Apache Kafka 接入,利用 Flink 窗口函数进行泄漏事件的时间序列关联分析;批处理层集成 Spark MLlib 训练泄漏预测模型,结合管道材质、服役年限与腐蚀速率等静态参数生成动态风险评估矩阵。数据治理模块采用本体论构建燃气领域知识图谱,实现多源异构数据的语义对齐与实体关系推理,支持 SQL 与 Cypher 双查询引擎。数据服务层通过 RESTful API 与 OPC UA 协议向 SCADA 系统、应急指挥平台输出标准化数据产品。

端侧感知设备采用模块化设计,集成 MEMS 气体传感器、低功耗 STM32 主控芯片与 NB-IoT 通信模组,通过时间同步协议确保多节点数据采集时标一致性。设备固件支持 OTA 远程升级,采用差分更新算法将固件包体积压缩至 50KB 以内,升级失败回滚时间小于 3 秒^[4]。

3.3 基于动态风险模型的智能报警决策引擎开发

智能报警决策引擎的核心在于构建动态风险量化模型,突破传统固定阈值报警的局限性。模型以管道运行状态、环境参数与历史失效数据为输入向量,通过时间序列卷积网络提取泄漏特征的长程依赖关系,结合贝叶斯推理框架实现风险概率的动态更新。

表 1 城市级燃气安全数字孪生平台核心模块技术参数表

模块名称	技术选型	功能描述	性能指标
数据采集层	OPC UA + Apache NiFi	多源异构数据实时采集与格式标准化	吞吐量 ≥ 1.2M 条 / 秒，延迟 <5ms
三维建模引擎	Cesium + OSGB	管网设施高精度三维可视化	模型加载速度 ≤ 3s/100km 管线
实时同步模块	Kafka Streams	时空数据一致性对齐	时钟同步误差 ≤ 1μs
仿真推演模块	OpenFOAM + CUDA 加速	泄漏扩散动态模拟与影响评估	CFD 计算速度 ≥ 5M 网格 / 秒
协同决策接口	RESTful API + WebSocket	多部门应急指挥系统数据交互	并发连接数 ≥ 10,000

定义风险评分函数 $R(t) = \alpha \cdot S(t) + \beta \cdot E(t) + \gamma \cdot H(t)$

其中： $S(t)$ 为实时传感数据归一化矩阵， $E(t)$ 为风速、温湿度等环境干扰因子， $H(t)$ 为管道腐蚀速率、维修记录等历史状态指标，权重系数 α, β, γ 通过粒子群优化算法动态校准。模型输出层采用 Softmax 函数生成蓝、黄、橙、红四级风险概率分布，当红色等级概率超过 0.7 时触发联动应急处置指令。

数据预处理阶段引入滑动窗口机制与异常值鲁棒滤波算法。针对分布式光纤传感数据，采用经验模态分解消除管廊结构振动噪声；声波信号通过梅尔频率倒谱系数提取泄漏湍流特征，构建 128 维声纹向量。特征工程层集成递归特征消除与最大信息系数，筛选出与泄漏相关性高于 0.85 的关键指标集，包括甲烷浓度梯度、声波能量熵变率及光纤应变标准差。模型训练采用迁移学习策略，利用数字孪生平台生成的 10^6 组仿真泄漏场景数据预训练 TCN 主干网络，再通过实际监测数据微调网络参数，验证集 F1-score 达 0.93。

决策引擎的实时推理架构部署于边缘-云端混合计算节点。边缘侧运行轻量化 XGBoost 分类器，以 10 秒为周期执行快速风险初筛；云端通过 PyTorch Serving 加载 TCN-Bayes 联合模型，每 30 秒更新全局风险图谱。多源报警事件通过 D-S 证据理论融合，设置置信度冲突因子 $K < 0.15$ 时触发报警升级。引擎内置 18 类泄漏场景的处置知识库，当红色报警触发时，自动调用 Dijkstra 算法生成最优阀门关断路径，并通过 5G URLLC 通道将指令下发至现场执行机构，实现从风险识别到处置响应的全流程时延压缩至 20 秒以内。

3.4 城市级燃气安全数字孪生平台集成技术

城市级燃气安全数字孪生平台通过多源异构数据融合与高精度三维建模技术，构建物理管网与虚拟空间的实时映射关系。平台底层集成 BIM+GIS 融合引擎，采用 OSGB 格式对地下管廊、调压站等设施进行毫米级精度建模，结合倾斜摄影实景数据生成城市级燃气管网三维底图。数据采集层部署 OPC UA 协议适配器，实现 SCADA 系统压力流量数据、光纤传感振动信号与北斗定位信息的毫秒级同步接入，数据采集频率根

据管网关键节点动态调整至 1Hz-100Hz 区间。模型轻量化处理采用 LOD 技术，在保证管件连接处 0.1mm 建模精度的前提下，将单体城市燃气管网模型数据量压缩至 200GB 以内。

实时数据驱动引擎基于 Kafka 流处理框架构建，支持每秒百万级数据点的并发写入与时空关联分析。通过定义时空一致性约束条件 $\nabla T \cdot \nabla S < \epsilon$ ，确保传感器数据与三维模型坐标系的亚米级对齐精度。仿真推演模块内置计算流体力学求解器，采用有限体积法对泄漏气体扩散路径进行动态模拟，网格划分精度达到 $0.5m \times 0.5m \times 0.2m$ ，单次 10 分钟泄漏场景的仿真计算耗时控制在 30 秒以内。平台集成多智能体协同算法，模拟应急车辆、抢修人员与阀门控制系统的联动响应，生成三维可视化处置预案^[5]。

4 结束语

智慧燃气管道泄漏报警系统的建设，通过多模态感知网络、云-边-端协同架构与动态风险模型的深度耦合，构建起燃气安全管理的主动防控体系。该体系依托数字孪生技术实现物理空间与虚拟空间的实时交互，突破传统监测模式在时效性、精准度与决策智能化方面的瓶颈，为城市燃气安全治理提供全链条技术支撑。未来，需进一步推进多技术融合创新与跨系统协同优化，持续提升城市生命线的本质安全水平。

参考文献：

[1] 郝向南,张浩.城市燃气管道泄漏监测系统设计[J].科技与创新,2025(03):69-71+75.

[2] 张润豪,梁腾飞,黄强,等.城镇燃气管道泄漏扩散规律模型的应用研究[J].上海煤气,2024(06):5-8.

[3] 刘昊,丁文文.城镇燃气管道泄漏带气抢修与安全防护措施研究[J].石化技术,2024,31(11):378-379.

[4] 闻炯明,武立文,张毅.埋地燃气管道泄漏扩散特性分析[J].世界石油工业,2024,31(05):65-72+82.

[5] 王晓兰.城市智慧燃气管网泄漏信号检测及泄漏定位实验[J].价值工程,2022,41(15):135-137.

作者简介：

陈玉辉(1988-)，汉族，山东济南人，本科，工程师，研究方向：燃气。