

基于物联网技术的燃气管网泄漏智能预警系统研究

周秀王铎(西安秦华燃气集团有限公司,陕西西安710075)

摘要: 燃气管网是城市能源输送的核心基础设施,其安全运行直接关系公共安全与环境保护。传统燃气泄漏监测手段受限于数据采集频率低、响应滞后等问题,难以及时发现隐蔽性泄漏或微小泄漏风险。物联网技术的快速发展为燃气管网智能化监测提供了新的技术路径,其泛在感知、数据互通与智能决策能力可显著提升管网安全管控水平。本文分析燃气泄漏特征与监测需求,设计具备自主诊断能力的多层感知网络架构,据此构架燃气管网泄露智能预警系统,希望突破传统监测模式在实时性与准确性方面的局限,为燃气安全管理提供可靠的技术支撑。

关键词: 物联网技术; 燃气管网; 泄漏预警; 智能监测

中图分类号: TU996.7 文献标识码: A 文章编号: 1674-5167(2025)022-0142-03

Research on intelligent warning system of gas pipe network leakage based on Internet of Things technology

Zhou Xiu, Wang Duo (Xi'an Qinhua Gas Group Co., LTD., Xi'an Shaanxi 710075, China)

Abstract: Gas pipeline network is the core infrastructure of urban energy transmission, and its safe operation is directly related to public safety and environmental protection. The traditional gas leakage monitoring methods are limited by low data acquisition frequency, lag response and other problems, and it is difficult to find hidden leakage or small leakage risk in time. The rapid development of Internet of Things technology provides a new technical path for intelligent monitoring of gas pipeline network, and its ubiquitous sensing, data interworking and intelligent decision-making capabilities can significantly improve the security control level of pipeline network. In this paper, the characteristics and monitoring requirements of gas leakage are analyzed, and a multi-layer sensing network architecture with self-diagnosis capability is designed to construct an intelligent early-warning system for gas pipeline network leakage, hoping to break through the limitations of the traditional monitoring mode in real-time and accuracy, and provide reliable technical support for gas safety management.

Key words: Internet of Things technology; Gas pipe network; Leakage warning; Intelligent monitoring

城市燃气管网的安全运维是防范重大安全事故、保障民生经济平稳运行的核心环节。燃气泄漏因其突发性和隐蔽性,易引发爆炸、中毒等次生灾害,对现有监测技术提出了高时效性与高可靠性的双重挑战。当前燃气监测体系在复杂管网拓扑结构下,普遍存在异常信号捕获灵敏度不足、泄漏溯源效率偏低等瓶颈,难以满足动态风险预警的实战要求。物联网技术通过终端感知设备、低延时通信协议与智能分析模型的深度耦合,构建了“端-边-云”联动的立体化监测体系,为破解传统单点式监测的碎片化缺陷提供了系统性解决方案。

1 物联网技术核心特征

物联网技术的核心特征在于其“物联互通”与“智能协同”能力,为燃气管网泄漏预警提供了技术基础。其一,泛在感知能力通过分布式部署气体浓度、压力、流量等传感器节点,实现对管网运行状态的连续动态监测,形成全域覆盖的数据采集网络。其二,异构数据融合能力支持多模态传感器数据的标准化处理与特征提取,有效整合声波、红外、电化学等多源信号,

提升泄漏识别的抗干扰性。其三,低延时传输能力依托窄带物联网、LoRa等通信协议,在复杂地下管网环境中实现长距离、低功耗的数据回传,保障预警信息的高效传递。其四,边缘计算与云端协同机制通过本地化数据预处理与远程深度学习的结合,构建多层级智能分析框架,能够有效网络负载,增强泄漏模型的实时诊断精度^[1]。

2 燃气管网泄漏预警的关键需求

2.1 高灵敏度与多参数协同感知能力

燃气管网泄漏的早期特征通常表现为微弱的气体浓度变化或压力波动,需通过高精度传感器实现微量泄漏的及时捕捉。传感器需具备ppm级气体浓度检测能力,并同步监测管道压力、温度、流量等参数,消除环境温湿度、振动噪声对单一信号源的干扰。同时,需构建多传感器时空关联模型,通过压力-浓度梯度变化、声波信号传播延迟等特征融合,提升泄漏事件与正常工况扰动的区分度。此外,传感器网络需适应复杂埋深、管材差异等场景,确保在腐蚀、潮湿环境下长期稳定运行。

2.2 异构网络拓扑下的实时数据传输鲁棒性

燃气管网常分布于城市地下、建筑夹层等非结构化空间，传统有线通信部署受限，需采用无线自组网技术实现动态拓扑适配。关键需求涵盖，支持 NB-IoT、LoRa 等低功耗广域协议，满足地下环境穿透性与长距离传输需求；建立冗余通信路径与断点续传机制，避免局部节点失效导致数据链路中断；通过时间同步与数据压缩技术，降低多节点并发传输的延时与能耗。此外，需兼容 5G 边缘计算网关，实现关键数据本地化处理与云端协同，确保百毫秒级预警响应时效^[2]。

2.3 多模态数据驱动的智能诊断与决策能力

泄漏预警需突破传统阈值报警的误报率高、定位模糊等缺陷，建立基于机器学习的动态诊断模型。技术需求涵盖构建泄漏声纹、气体扩散模式、压力瞬态响应等多维度特征库，利用 LSTM 时序网络挖掘泄漏信号的时空演化规律；设计轻量化边缘推理算法，在资源受限设备上实现泄漏概率的实时计算；结合 GIS 地理信息与管网拓扑数据，采用反向传播定位算法，精准识别泄漏点坐标（误差≤1m）。同时，需建立风险分级预警规则库，联动应急阀门控制、用户端通知等多系统协同响应，形成闭环管控链条。

3 基于物联网技术的智能预警系统的功能架构

3.1 多层感知网络层

多层感知网络层是系统的前端数据采集核心，由分布式部署的智能传感器节点、通信模块及能源管理单元构成。传感器节点针对燃气管网不同区段的监测需求，集成气体浓度检测、声波振动感知和压力监测三类功能模块。气体传感器采用催化燃烧原理设计，能够灵敏捕捉甲烷浓度的微小变化；声波传感器通过高精度光纤阵列监测管道壁的振动信号，识别由泄漏引发的特定频率声波特征；压力传感器则基于微机电系统技术，实时跟踪管道内部压力波动。所有传感器节点通过低功耗广域通信协议进行数据传输，在地下复杂环境中形成自适应组网能力，支持动态拓扑调整以确保网络稳定性^[3]。

为应对复杂环境干扰，感知网络层内置多维度数据校验与补偿机制。传感器节点配备环境参数补偿模块，自动修正温度、湿度等因素对气体检测精度的影响；声波信号处理单元集成智能滤波算法，根据管道材质差异自动调整信号处理策略，有效抑制机械振动等背景噪声。数据传输过程采用多路径冗余设计，当某一通信链路中断时，节点可自动切换备用路由通道，确保数据连续上传。此外，能源管理单元采用复合供电方案，结合长寿命电池与能量收集技术，保障传感器节点在无人值守环境下持续运行。

3.2 边缘-云端协同计算层

边缘-云端协同计算层是系统的智能分析中枢，通过分层式架构实现数据高效处理与模型协同推理。在边缘侧，区域计算节点搭载轻量化推理引擎，对原始数据进行本地化预处理。数据处理流程分为多阶段：首先对气体浓度数据进行噪声滤除与趋势提取，消除瞬时环境干扰；其次对声波信号进行频谱分析与特征编码，提取与泄漏相关的声纹模式；最后对压力数据实施多尺度分析，识别异常波动特征。预处理后的特征数据经优化压缩后上传至云端，显著降低网络带宽占用。

云端计算层采用分布式计算架构，整合时序分析、空间模式识别与多源数据融合三大功能模块。时序分析模块通过深度神经网络处理气体浓度与压力的动态变化规律，建立泄漏事件的时序关联模型；空间特征模块利用卷积神经网络解析声波信号的频谱图像，识别泄漏特征的空间分布模式；融合决策模块将时序与空间特征进行跨模态关联，结合管网拓扑数据构建泄漏概率预测模型。云端平台同步集成地理信息系统，运用多传感器数据交叉验证与空间几何计算，实现泄漏点的精准三维定位。在此过程中，其模型训练采用增量学习机制，持续吸收新数据优化算法参数，提升系统对新场景的适应能力。

3.3 多端交互可视化平台

多端交互可视化平台是系统的人机协作与决策支持核心，采用模块化架构实现多维度数据融合展示与应急响应。平台基于三维图形引擎构建数字孪生系统，将物理管网结构、实时监测数据与设备状态信息进行立体化呈现。可视化界面设置全域态势、局部详情与历史回溯三大视图：全域视图通过热力图动态展示管网压力分布与气体浓度梯度；详情视图聚焦泄漏点周边环境，叠加显示地下管线交叉位置、应急设施分布与实时扩散模拟；历史视图支持时间轴驱动的数据回放，完整还原泄漏事件的发展过程。所有视图支持多图层叠加与动态参数调节，可直观反映环境因素对泄漏扩散的影响。

业务功能层集成实时监测、预警推送与运维管理三大服务模块。实时监测模块通过流式计算引擎处理海量传感器数据，生成秒级更新的安全状态指标；预警推送模块建立分级响应机制，根据泄漏风险等级自动触发多形式警报，同步生成涵盖定位坐标、影响范围与处置建议的标准预案；运维管理模块内置智能调度算法，结合人员位置、技能资质与物资库存信息，生成最优应急资源配置方案。移动终端应用支持增强现实交互，现场人员可通过设备摄像头识别管道标识，实时叠加显示检测数据与维修指导信息。

4 基于物联网技术的智能预警系统的运行逻辑

4.1 实时数据流采集与预处理

随着燃气管网规模扩展与地下空间复杂度提升，传统数据采集模式已难以满足泄漏监测对时效性与完整性的双重需求。系统通过异构传感器网络实现全时段数据捕获，在管网关键节点部署多类型传感器集群，涵盖基于催化燃烧原理的气体浓度传感器、压电式动态压力传感器及分布式光纤声波传感器。传感器节点采用自适应采样策略，根据管网压力波动特征动态调整采集频率，当压力变化处于稳态区间时，节点以常規频率周期性采集数据；若检测到压力梯度异常或气体浓度基线漂移，则立即切换至高频采样模式，并触发相邻节点启动协同监测机制，形成局部区域的密集数据覆盖^[4]。

原始数据传输过程中，应采用多协议融合通信框架，通过LoRa广域网络实现长距离低功耗传输，结合ZigBee自组网技术构建局部冗余链路。数据包嵌入同步时间戳与设备标识码，边缘网关通过NTP协议对各节点时钟进行微秒级校准，确保跨区域数据的时序一致性。数据预处理阶段引入多级清洗机制，边缘计算单元首先应用滑动窗口离群点检测算法，基于动态阈值筛选剔除瞬时电磁干扰或机械振动产生的异常数据；随后，采用自适应插值算法修复因信号衰减或信道拥堵导致的数据缺失；最后通过标准化转换将多源异构数据统一为结构化时序数据集，按优先级分级存储至边缘数据库，为后续分析提供高质量输入。

4.2 多级智能诊断与泄露定位

在完成实时数据预处理后，系统启动分层诊断机制，实现从快速筛查到精准定位的递进式分析。边缘计算节点执行轻量级集成学习模型，对气体浓度、压力波动与声波信号的关联特征进行初步风险评估。模型基于随机森林算法构建，通过分析气体浓度变化速率与压力衰减曲线的相关性，生成实时泄漏概率指数。当指数超过动态阈值时，系统自动激活云端深度分析模块，触发多维度特征融合诊断流程。同时，云端部署的时空卷积网络模型同步接收边缘节点上传的高分辨率数据集，涵盖声波信号的频谱特征、气体扩散的三维仿真参数及管网拓扑结构数据。模型采用注意力机制动态加权不同特征的重要性，声波信号的频域能量分布用于识别泄漏孔径特征，气体浓度梯度反映扩散方向与速率，管网材质与埋深数据修正物理传播模型。训练过程中引入对抗生成网络扩充样本多样性，提升模型对罕见泄漏场景的识别鲁棒性。诊断结果输出泄漏类型分类（持续渗漏、裂缝泄漏或管道断裂）及置信度评分，形成可追溯的决策依据。

4.3 动态预警响应与闭环控制

在完成泄漏定位与风险评估后，系统启动动态预警响应机制，实现从风险感知到处置闭环的全流程自动化控制。智能决策引擎根据泄漏强度、扩散速率及周边环境敏感度生成四级预警信号：一级预警触发泄漏点上下游智能阀门联动关闭，同步启动应急泄压装置平衡管网压力；二级预警划定动态电子围栏，通过地理围栏技术向受影响区域内的移动终端推送定制化疏散路径；三级预警调度搭载多光谱检测设备的无人机编队，沿预设航线执行泄漏点红外热成像复核与气体浓度立体测绘；四级预警直接接入城市应急指挥平台，激活跨部门协同处置预案并启动资源调度绿色通道。同时，预警指令执行过程采用区块链智能合约技术，确保操作指令的不可篡改性与全链路可追溯。每项控制操作（阀门关闭、泄压装置启动）均生成包含时间戳、操作者数字签名与设备状态快照的存证数据，实时同步至分布式账本。此外，在应急处置阶段，数字孪生平台动态模拟气体扩散路径，结合实时气象数据（风速、风向、大气稳定性）更新影响范围预测模型，为现场救援力量提供动态避险指引^[5]。

综上所述，本研究构建的燃气管网泄漏智能预警系统，通过物联网技术实现了感知、传输、决策的全链条创新。多层次感知网络与边缘-云端协同机制突破了传统监测的时空局限，多模态数据融合算法显著提升了泄漏诊断精度。系统在实时预警、精准定位与闭环管控方面的技术突破，为城市燃气安全管理提供了可落地的解决方案。未来，相关研究人员应进一步优化轻量化模型部署策略，探索数字孪生与5G专网的深度集成，推动燃气安全监管向预测性维护模式演进。

参考文献：

- [1] 王大卫.物联网技术在智慧城市燃气管网监控的应用分析[J].中国高新科技,2023(14):139-141.
- [2] 张轩,郝泽强.以GIS及物联网为依托的地下燃气管网监测系统的构建[J].化学工程与装备,2023(06):96-98.
- [3] 闫玢睿.物联网信息技术在城市燃气管网运维中的应用[J].现代工业经济和信息化,2020,10(06):103-104.
- [4] 李超.基于物联网技术的燃气管网控制系统设计[J].中国石油和化工标准与质量,2019,39(16):255-256.
- [5] 韩君庆,陈建国.城市燃气管网物联网综合监测与应急处置技术研究[J].中国管理信息化,2017,20(19):186-189.

作者简介：

周秀（1993-），女，汉族，陕西榆林人，硕士，助理工程师，研究方向：燃气工程。