

燃气管道泄漏智能监测系统应用及其经济效益研究

李杰 郭利章 (山东一达能源集团有限公司, 山东 日照 276800)

摘要: 本文以某城市燃气管道治理工程为例, 研究了燃气管道泄漏智能监测系统应用及其经济效益的相关问题, 文章分析了基于 NB-IoT 技术的智能监测系统与先进传感技术结合的优势, 提出了通过实时监测、数据分析与预警系统提高泄漏检测和应急响应效率的方案, 并验证了该系统在减少泄漏事故、降低维护成本、节约能源消耗以及提升公共安全方面的显著效果。

关键词: 燃气管道; 泄漏监测; 智能传感器; 经济效益; NB-IoT 技术

中图分类号: TE88

文献标识码: A

文章编号: 1674-5167 (2025) 013-0152-03

Application of Intelligent Monitoring System for Gas Pipeline Leakage and Its Economic Benefits Research

Li Jie, Guo Lizhang (Shandong Yida Energy Group Co., Ltd., Rizhao Shandong 276800, China)

Abstract: This paper takes a city gas pipeline management project as an example to study the application of an intelligent monitoring system for gas pipeline leakage and its economic benefits. The article analyzes the advantages of combining an intelligent monitoring system based on NB-IoT technology with advanced sensing technology. It proposes a solution to improve leakage detection and emergency response efficiency through real-time monitoring, data analysis, and an early warning system. The study verifies the system's significant effects in reducing leakage accidents, lowering maintenance costs, saving energy consumption, and enhancing public safety.

Keywords: Gas pipelines; Leakage monitoring; Intelligent sensors; Economic benefits; NB-IoT technology

城市化进程的加快和天然气使用的普及, 导致我国绝大部分城市燃气管道的安全问题日益成为公众关注的焦点之一。燃气管道泄漏问题的发生不仅会对公共安全构成严重的威胁, 还可能会引发严重的经济损失和环境污染, 给后续的城市治理与恢复造成严重的影响。因此, 开发一个高效的、智能化的燃气管道泄漏监测系统, 对于当前城市燃气管道安全监管工作具有重要意义。郝向南和张浩 (2025) 提出了一种基于 NB-IoT 技术的城市燃气管道泄漏监测系统, 此系统能够实时监测甲烷气体的浓度, 并通过物联网云平台实现数据上传, 为泄漏预警提供了技术保障^[1]。张伟 (2025) 研究了基于智能传感器的燃气管道泄漏监测与预警机制, 并提出了完整的系统架构, 具有重要的参考意义^[2]。饶永超等 (2024) 则研发了一种集成高效检测管、真空泵、PLC 控制系统的天然气管道泄漏检测系统, 实验结果表明该系统能够在不同压力条件下准确检测到甲烷泄漏。付国强 (2024) 对当前多种燃气泄漏检测设备进行了综合评估, 并提出了相应的优化策略建议。王瑞 (2023) 则分析了燃气管道泄漏的原因及其扩散因素, 也同样提出了针对性的管理和预防措施。因此, 本文基于前人的研究成果, 从智能传感技术和物联网平台的角度入手, 分析了燃气管道泄漏智能监测系统的技术原理及应用关键, 并从技术应用的角度评估此类系统的经济效益。

1 燃气管道泄漏智能监测系统设计与应用

在某城市燃气管道治理工程中, 发现存在管道老化、腐蚀、施工缺陷以及维护不及时等一系列问题, 导致了燃气泄漏的风险逐渐增大, 严重威胁到城市居民的生命财产安全。为了解决这些问题, 保障燃气管道的安全运营和及时检测泄漏情况, 研究团队提出了“智能传感器 + 智能监测技术”这一方案, 基于这一架构, 成功搭建了如下燃气管道泄漏智能监测系统。

1.1 智能传感器技术

为了保证传感器的高精度与高可靠性, 本系统采用了多种先进传感技术, 以应对不同的泄漏类型与环境因素。

①气体泄漏检测传感器是系统的关键设备之一。本系统创造性地使用了半导体气体传感器和红外气体传感器, 两者结合使用可有效提高对燃气泄漏的检测灵敏度。②为了提高泄漏检测的准确性和灵敏度, 系统还部署了超声波传感器。超声波传感器通过测量声波传播时间的变化, 能够精确感知管道的压力变化。对于管道老化或腐蚀造成的影响, 超声波传感器可通过检测到管道内气体流动的异常, 及时发现潜在的泄漏点。其测量精度可达到 $\pm 0.1\text{Pa}$, 且能有效应对外界噪声干扰。③为了实现全方位的监测, 系统还配备了温度与湿度传感器, 监测管道周围环境的温湿度变化, 当温度或湿度变化异常时, 可能意味着管道

出现了破损或泄漏，传感器可在第一时间检测到这些变化并发送报警信息。

1.2 无线数据传输技术

为了满足大规模燃气管道监测的需求，本系统采用了基于低功耗广域网（LPWAN）的无线数据传输技术，包括LoRa、NB-IoT和5G等通信协议。这些技术在信号稳定性、传输距离以及功耗控制等方面均表现优异，能够有效应对复杂的城市环境和恶劣气候条件。

① LoRa（Long Range）技术：采用扩频调制方式，具有远距离传输和低功耗的特点，适合大规模的传感器网络部署。② NB-IoT技术：作为一种窄带物联网技术，其具有较强的穿透能力和可靠性，在复杂环境中的表现尤为突出。它的通信覆盖范围较广，且传输速率可达到250 kbps，能够满足大部分传感器数据的实时传输需求。NB-IoT不仅具有低功耗、高稳定性优势，还可以在城市地下或偏远地区有效覆盖，确保整个管网系统的无缝监测。③为了应对未来更高数据需求和更低延迟的要求，系统也支持5G网络技术，提供更高的传输速率和更低的延迟。5G技术的峰值下载速率可达10Gbps，能够满足更加复杂的数据传输需求，尤其是对于需要实时分析和处理的大规模数据流。

1.3 高效数据分析与处理技术

为了解决燃气管道泄漏智能监测过程中监控数据量暴增的问题，本系统采用了基于大数据分析和机器学习的高效数据处理架构（见表1），结合实时数据分析和离线数据分析技术，极大地提高系统的响应速度与数据分析准确性。

1.4 泄漏定位技术

本系统采用了多种先进的定位技术（见表2），以实现对泄漏源的精确定位，提升了事故响应的效率和准确性。

1.5 预警系统设计

本系统设计了多级预警机制（见表3），结合气体浓度、压力波动、温湿度变化等多种监测指标，通过智能分析和实时监测，能够高效、精准地识别出泄漏问题。

①系统通过实时检测传感器数据，设定了多个阈值，分别针对气体浓度、压力、温度等关键参数。一旦监测数据超过设定的安全阈值，系统将立即触发报警，且报警等级分为多个级别。轻微泄漏触发黄色预警，系统会自动发送通知并进行详细记录；严重泄漏则触发红色预警，立即启动应急响应程序，关闭相关阀门，防止泄漏进一步扩大。②预警系统通过集成模糊逻辑和机器学习算法，可以有效识别复杂的泄漏模式，减少误报和漏报。例如，机器学习算法通过对历史数据的训练，能够识别出不同类型泄漏的特征模式，对管道状态变化进行预判，并提前发出警告。系统通过对各监测点的数据进行联动分析，可以提前捕捉到潜在泄漏的风险，极大缩短事故发生后的响应时间。③预警系统还具备自动化联动功能。当泄漏发生时，系统不仅发出报警信号，还能自动调控相关设施，如关闭泄漏点附近的阀门，启用备用管道，避免更大范围的泄漏和扩展。

1.6 系统集成与自动化控制技术

本系统的集成与自动化控制技术（见表4）集成了各个监测模块、数据分析模块及应急响应模块，能

表1 系统中数据分析与处理模块的核心参数

技术 / 算法	功能描述	性能参数
数据预处理	数据去噪、填补缺失值、异常值检测	去噪率：>99%；缺失值补充准确率：>98%
决策树 (DT)	对传感器数据进行分类和决策	分类精度：>95%
支持向量机 (SVM)	高维数据的分类与异常检测	准确度：>92%，处理速度：<50ms
神经网络 (NN)	对非线性模式进行建模	准确率：>90%，训练时间：<1h
流式数据处理 (Flink)	实时数据处理与流分析	延迟：<50ms，吞吐量：>1000 条 / s

表2 系统中不同泄漏定位技术的核心参数

技术 / 方法	功能描述	定位精度	优势
时间差定位法 (TDOA)	基于多个传感器之间的信号传播时间差进行定位	±5m	高精度，适用于广泛布设的传感器网络
压力波动法	通过管道压力变化来定位泄漏点	±3m	适应不同气体流动，能够快速反应
声波传输法	通过泄漏点产生的声波传播差异进行定位	±2m	高精度定位，适合局部精准检测
融合算法	综合各技术结果，优化定位精度	±2m	提高系统定位精度，减少误差，提升可靠性

表 3 系统中预警模块的核心参数

功能 / 模块	描述	性能参数
多级报警机制	基于气体浓度、压力、温度变化触发不同级别预警	精度: >99%，反应时间: <10 秒
模糊逻辑预警	通过模糊逻辑算法进行多变量分析，减少误报漏报	误报率: <1%，漏报率: <2%
机器学习预测	结合历史数据和机器学习模型预测潜在泄漏风险	精度: >95%，处理速度: <100ms
自动化联动控制	当泄漏发生时，自动执行应急响应操作，如关闭阀门	响应时间: <5 秒，自动化响应比率: >98%

表 4 系统集成与自动化控制模块的核心参数:

功能 / 模块	描述	性能参数
SCADA 系统集成	实现集中监控、数据采集和控制操作	响应时间: <2 秒，监控精度: >98%
自动化应急响应	自动关闭阀门、启用备用管道等紧急控制措施	响应时间: <5 秒，自动化响应比率: >99%
自诊断与故障恢复	自动检测系统故障并切换到备用设备或传感器	故障检测率: >99%，自动切换时间: <10 秒
远程控制与管理	通过物联网技术进行远程监控和控制	网络延迟: <50ms，远程控制响应时间: <1 秒

够无缝协作，全面提高了系统的效率和可靠性。

2 系统应用的经济效益分析

在本工程项目的实际应用中，本研究在城市的燃气管道主要区域部署了约 1970 个智能传感器，开发了基于 NB-IoT 技术的燃气管道泄漏智能监测系统。并针对本项目改造后的经济效益进行了为期 6 个月的深度观察，具体数据如下：①燃气泄漏事故减少：在系统部署前，城市燃气管道每年发生的泄漏事故约为 50 起，造成的直接经济损失高达 500 万元人民币。这些事故主要包括管道老化、腐蚀导致的小规模泄漏以及因施工缺陷造成的泄漏。系统部署后，经过 6 个月的运行，泄漏事故的发生次数减少至 10 起，减少幅度达到 80%。直接经济损失减少了约 400 万元人民币。主要原因在于智能传感器能够早期发现泄漏并触发预警，避免了大规模的事故发生。②维护成本的显著降低：传统的人工巡检和定期检查方式，依赖于人工监测与管道定期检测，维护成本较高。原本每年约需投入 300 万元人民币用于管道检测与维护工作，而采用智能监测系统后，维护成本减少至 150 万元人民币。智能传感器可以实时监测管道状况，并自动发出预警，极大减少了人工巡检的频率和维修频次。此外，系统的自动化与数据分析功能提升了管道的管理效率，使得日常管理和维护的工作量显著减少。③能源损失的降低：管道泄漏不仅威胁公共安全，还可能导致天然气的浪费。在传统管理模式下，泄漏通常无法及时发现，能源损失较为严重。根据估算，城市燃气管道每年因为泄漏造成的能源损失为 2000 万立方米天然气。自智能监测系统部署以来，天然气的泄漏量减少了 75%，每年减少约 1500 万立方米的天然气损失。按

照天然气市场价格 2 元 /m³ 计算，系统的应用每年节省的能源成本约为 3000 万元人民币。④应急响应时间的缩短：在没有智能监测系统之前，燃气泄漏事故发生时，人工报警和反应时间较长，平均处理时间为 30 分钟，这导致事故的损失和蔓延。引入智能监测系统后，事故的响应时间大大缩短。系统能够实时监测到泄漏并在 10s 内发出报警信号，相关设施可以立即自动关闭阀门或启用备用管道。事故处理时间缩短至 5min 以内，不仅避免了更大的损失，还能够及时保证公众安全。

3 结论

本研究针对某城市燃气管道治理工程开发并实施了一套燃气管道泄漏智能监测系统，该系统以 NB-IoT 技术为基础，集成了多种先进的智能传感器和大数据分析技术，给该治理工程带来了显著的经济效益增长，包括减少了燃气泄漏事故的发生频率、降低了管道维护成本、减少了能源损失，并提升了应急响应效率。系统的成功应用不仅保障了公众的生命财产安全，还有效地节约了能源消耗，具有很高的社会价值和经济价值。因此，未来需要我们进一步优化监测系统的稳定性与精准度，解决在复杂环境中数据传输和处理的挑战，从而不断提高系统的智能化水平和安全保障能力，为更广泛的应用提供支持。

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] 张伟. 基于智能传感器的燃气管道监测与泄漏预警机制研究 [J]. 化工设计通讯, 2025,51(01):32-33+43.