

基于老旧小区天然气管道管理数字化转型技术研究

郭绍敏 黄方果 成国栋 王敏
重庆经贸职业学院 重庆 409000

摘要:我国城市化推进中,大量20世纪80至90年代建成的老旧小区问题突出,天然气作为居民重要能源,在老旧小区存在管网锈蚀、设备陈旧、监测与应急响应落后等问题,威胁居民和城市公共安全。推动老旧小区天然气管道管理数字化、智能化转型,是提升城市韧性、保障民生安全的迫切需求。本文聚焦其现实困境,分析安全监管、运维服务、用户交互等方面的短板,提出以新一代信息技术为核心的数字化转型路径,构建“感知—传输—分析—决策—执行”一体化智能燃气管理系统架构,实现全生命周期监控、风险预警与处置、精准服务。最后从政策、标准、资金、数据治理等维度提出保障措施,为全国老旧小区天然气管道管理数字化转型提供参考。

关键词:老旧小区;天然气管道管理;数字化转型;物联网;智能预警;数字孪生;智慧燃气

引言

截至2023年底,我国城镇住宅中建成20年以上的老旧小区超过21万个,涉及居民近4000万户。这些小区普遍缺乏现代化基础设施,尤其在燃气系统方面,存在管道材质落后(多为镀锌钢管或铸铁管)、阀门老化、调压设施陈旧、缺乏泄漏监测装置等问题。传统管理模式难应对安全风险与服务需求。与此同时,国家重视城市安全与数字化治理,相关规划与意见强调推进城市生命线监测系统建设及老旧小区管线设施智能化改造。在此背景下,利用数字技术赋能老旧小区天然气管道管理,是技术升级与落实国家战略的关键。本研究探索老旧小区天然气管道管理数字化转型路径,理论意义在于丰富智慧城市“微单元”治理理论体系,实践意义在于降低事故率、提升管理效率、增强居民获得感与安全感,为政府、企业、社区提供可复制推广的方案。

1 老旧小区天然气管道管理现状与问题分析

1.1 设施老化严重,安全隐患突出

老旧小区的燃气系统大多建设于上世纪八九十年代,受限于当时的技术条件与材料标准,其基础设施先天不足且长期超期服役。例如,广泛使用的镀锌钢管设计寿命通常为15至20年,而如今许多小区的燃气管道已运行超过30年,管壁因腐蚀而显著减薄,局部甚至出现穿孔现象。此外,法兰连接、丝扣接口等部位在长期温差变化与机械振动作用下,密封性能逐渐退化,极易形成微小但持续的泄漏点。调压箱内部的核心元件如膜片、弹簧等也因材料老化而失去原有弹性,导致出口

课题题目:基于老旧小区天然气管道管理数字化转型技术研究

课题号: KJQN202406102

压力波动,不仅影响用户正常用气,还可能诱发安全隐患。更为严峻的是,绝大多数老旧小区用户端未安装自闭阀或燃气泄漏报警器,一旦发生泄漏,无法在第一时间自动切断气源,往往等到浓度积累到危险水平才被察觉,错失最佳处置时机^[1]。这种“带病运行”的状态使得老旧小区成为城市燃气安全网络中最薄弱的环节。

1.2 管理模式粗放,响应效率低下

当前老旧小区的天然气管道管理仍高度依赖传统的人工巡检与被动报修机制,整体呈现出“重事后处置、轻事前预防”的特征。一方面,受限于人力成本与管理半径,燃气公司对老旧小区的巡检频次普遍偏低,部分地区每年仅能覆盖1至2次,难以及时发现隐藏于墙体、地板下的潜在隐患。另一方面,各类管理信息如用户档案、管网图纸、维修记录等分散存储于不同业务系统甚至纸质台账中,缺乏统一的数据平台支撑,导致信息割裂、查询困难,严重影响决策效率。当发生泄漏等紧急情况时,从用户拨打电话报修到维修人员抵达现场,平均耗时往往超过两小时,远超燃气泄漏黄金处置窗口期。更值得警惕的是,现有运维体系普遍缺乏基于设备状态的预测性维护能力,多数情况下只能采取“坏了才修”的被动策略,不仅增加了突发故障的概率,也推高了整体运维成本。这种粗放式的管理模式在面对日益复杂的城市安全挑战时已显力不从心。

1.3 用户参与度低,安全意识薄弱

除了硬件与管理层面的问题,用户侧的安全素养不足同样是制约老旧小区燃气安全的重要因素。许多居民对燃气使用的规范要求了解甚少,存在私自改装灶具、使用非标软管、长期不更换老化胶管等高风险行为。部分住户家中虽装有报警器,但因误报频发或缺乏维护而

对其提示音置若罔闻,甚至直接断电弃用。更有甚者,不清楚户内紧急切断阀的位置与操作方法,在突发泄漏时手足无措。值得注意的是,老旧小区中老年居民占比较高,他们对智能手机、APP等数字化服务工具接受度较低,既难以主动获取安全信息,也不易参与到新型的互动式安全管理中来。这种“用户缺位”的局面使得再先进的技术系统也难以发挥最大效能,凸显出在推进数字化转型过程中同步加强用户教育与服务适老化的必要性。

2 数字化转型的技术框架与核心系统构建

2.1 感知层:构建全域物联感知网络

针对老旧小区空间结构复杂、施工条件受限的特点,数字化改造需优先采用轻量化、非侵入式的感知方案。在不破坏既有建筑结构的前提下,可在关键位置部署一系列低成本、低功耗、易安装的智能终端设备。例如,在每户厨房及公共管道井内安装高灵敏度激光甲烷传感器,其检测精度可达ppm级别,响应时间控制在10秒以内,能够有效捕捉早期微泄漏信号;同步更换具备远程通信功能的智能燃气表,不仅能实现自动抄表,还可通过分析用气流量的异常波动(如持续低流量)辅助判断潜在泄漏;在调压箱、立管等节点加装压力与温度变送器,实时监控管网运行状态^[2]。所有感知设备统一采用NB-IoT或LoRaWAN等低功耗广域网通信协议,确保在钢筋混凝土密集的楼宇环境中仍能稳定回传数据,从而构建起覆盖户内、楼道、地下管网的立体化物联感知网络。

2.2 网络层:安全可靠的通信保障

感知数据的有效传输依赖于稳定、安全的通信基础设施。为保障业务连续性与数据隐私,应建立专用的物联网通信通道。具体而言,所有传感数据在上传前需采用国密SM4算法进行端到端加密,防止在传输过程中被窃取或篡改;网络接入层面可借助运营商APN专网或5G网络切片技术,将燃气业务流量与其他公共网络隔离,有效抵御外部网络攻击。同时,在小区机房部署边缘计算节点,实现数据的本地预处理与紧急指令的快速下发。例如,当某户甲烷浓度突增至危险阈值时,边缘节点可在毫秒级时间内触发户内电磁阀关闭指令,无需等待云端响应,极大缩短应急处置延迟。这种“云边协同”的架构既提升了系统可靠性,又降低了对中心平台的依赖,特别适合网络条件不稳定的老旧小区环境。

2.3 平台层:打造燃气数字孪生底座

平台层是整个数字化系统的中枢神经,其核心任务是将物理世界的燃气设施精准映射到数字空间,并赋予其动态感知与智能决策能力。为此,可构建基于BIM(建筑信息模型)与GIS(地理信息系统)融合的燃气数字

孪生平台。该平台首先对小区内的地下管网、调压站、入户立管等设施进行三维建模,实现1:1可视化还原;随后,将来自感知层的实时数据、历史维修记录、用户档案、气象环境等多源异构信息动态融合至模型中,形成“活”的数字资产。在此基础上,平台内置风险画像引擎,综合设备服役年限、材质类型、腐蚀历史、周边土壤酸碱度等多维因子,为每个风险点生成动态评分;同时集成流体仿真模块,可模拟不同风速、温度条件下燃气泄漏的扩散路径与爆炸影响范围,为应急预案制定提供科学依据。这一数字孪生底座不仅提升了管理的直观性,更实现了从静态台账向动态推演的根本转变。

2.4 应用层:智能业务场景落地

在平台能力支撑下,可衍生出多个智能化应用场景,切实解决管理痛点。首先是智能预警与闭环处置机制。系统设定多级告警阈值:当甲烷浓度超过1%LEL时,自动向用户手机APP及绑定家属微信推送提醒,引导其自查;若浓度升至5%LEL以上,则立即远程关闭户内电磁阀,并同步通知物业值班人员与燃气公司调度中心;达到10%LEL时,进一步联动消防广播系统启动应急疏散。所有告警事件均自动生成电子工单,根据位置、类型与紧急程度智能派发给最近的维修人员,并全程跟踪处理进度直至隐患消除,形成完整闭环。其次是预测性维护能力。平台利用LSTM等深度学习模型,对历史压力、流量数据进行时序分析,识别异常波动模式,提前预测调压器失效或管道堵塞风险,并结合设备寿命模型生成年度更换计划,变“被动抢修”为“主动预防”^[3]。最后是用户服务优化。通过开发轻量级微信小程序,居民可一键报修、实时查看维修进度、在线缴费,并接收个性化的用气安全建议(如“您的软管已使用5年,建议更换”)。系统还为每户生成安全画像,定期推送评分与改进建议,增强用户参与感与安全意识。

3 推进策略与保障措施

3.1 强化顶层设计与政策协同

推动老旧小区天然气管理数字化转型,亟需强化顶层设计与跨部门政策协同。建议将智能燃气设施建设纳入国家及地方老旧小区改造的强制性内容清单,明确财政资金支持比例,例如由中央与地方财政共同承担70%的改造费用,减轻居民与企业负担。同时,应加快制定《老旧小区智能燃气设施建设导则》,统一设备选型、通信协议、数据接口等技术标准,避免各地各自为政导致的系统碎片化与后期整合困难。此外,住建、应急管理、市场监管等部门应建立联合工作机制,在项目审批、验收、运维等环节形成合力,确保政策红利精准直

达基层。

3.2 创新投融资模式

鉴于改造初期投入较大,需探索多元可持续的投融资机制。除财政补贴外,可鼓励燃气企业通过发行绿色债券、申请专项再贷款等方式筹集资金;同时,探索“使用者付费”模式,对享受智能服务的用户收取适度月租费,用于系统运维。长远来看,还可挖掘碳减排潜力,将因减少泄漏而降低的甲烷排放量纳入碳交易市场,形成额外收益反哺项目运营。通过构建“政府引导、企业主体、市场运作、社会参与”的多元投入格局,破解资金瓶颈。

3.3 完善数据治理体系

数据是数字化转型的核心资产,必须建立健全治理体系。一方面,应制定燃气数据分级分类管理制度,明确哪些数据可采集、如何使用、谁有权访问,尤其要加强对用户隐私信息的保护,防止数据滥用;另一方面,需打破部门壁垒,推动燃气管理平台与住建、应急、消防、公安等系统的数据共享,实现风险信息互通、应急资源联动^[4]。例如,在发生重大泄漏时,可自动向消防指挥中心推送现场三维模型与人员分布信息,提升协同处置效率。

3.4 构建长效运维机制

数字化系统建成后,长效运维是确保其持续发挥作用的关键。建议在社区层面培训专职或兼职的“燃气安全员”,负责日常设备巡检、简单故障初判及用户咨询,形成“最后一公里”服务触点。同时,引入第三方专业机构定期对系统运行效能、预警准确率、用户满意度等指标进行独立评估,并将结果作为后续优化与资金拨付的依据。通过制度化、专业化的运维保障,避免“重建

轻管”现象,真正实现“建得好、用得久、管得住”。

4 结语

本文系统论证了老旧小区天然气管道管理数字化转型的必要性、技术路径与实施策略。研究表明,通过构建“端—边—云”一体化的智能燃气系统,可有效破解设施老化、管理粗放、响应滞后等核心难题,实现从“被动应对”向“主动防控”、从“经验驱动”向“数据驱动”的根本转变。未来研究可进一步探索:AI大模型在风险预测中的深度应用,通过融合文本报修记录、图像、传感器流等多模态数据提升预警准确率;区块链技术在保障多方参与下数据可信共享中的作用;以及将燃气系统深度融入城市信息模型(CIM)平台,实现水、电、气、热多网协同调度,构建更韧性的城市生命线体系。老旧小区天然气管道的数字化转型,不仅是技术革新,更是一场深刻的治理变革。唯有坚持“人民至上、安全第一”理念,统筹推进技术、制度、文化协同演进,方能筑牢城市安全底线,让千家万户安心用气、幸福安居。

参考文献

- [1]武慧婧.老旧小区管道天然气设施改造项目风险管理研究[D].西南石油大学,2023.
- [2]汪文祥.数字化筑牢“能源动脉”安全防线PCM系统为天然气管道装上“智慧芯”[J].中国石油和化工,2025,(08):70-72.
- [3]徐霞.石油天然气管道安全管理存在的问题及解决方法[J].中国石油和化工标准与质量,2025,45(13):55-57.
- [4]张利华.数字化技术在天然气输差管理中的应用与效能评估[J].天然气技术与经济,2025,19(03):23-28.