

老旧燃气管道更新改造的经济性与安全性权衡分析

杨玉虎 杨珊珊 郑立兵 (山东港华燃气集团有限公司, 山东 济南 250101)

摘要: 为破解老旧燃气管道更新改造中安全需求与成本约束的矛盾, 本文基于全生命周期理论, 构建“成本-风险”双维度评价体系。通过解析 2020-2024 年全国 876 起燃气事故数据, 识别腐蚀、第三方破坏等核心风险因子; 结合工程实例量化建设、运维、故障等全周期成本构成。提出引入边际效益分析的权衡模型, 通过安全投入边际成本与风险损失边际减少量的均衡点确定最优改造方案。研究表明: 智能化监测技术虽增加 15%-20% 初期投入, 却能使全周期风险成本降低 40% 以上。该模型为改造决策提供量化依据, 实现安全保障与经济高效的协同优化。

关键词: 老旧燃气管道; 更新改造; 经济性评价; 安全性评估; 权衡模型; 全生命周期成本

中图分类号: TU996.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2026) 007-0154-03

Analysis of Balancing Economic Efficiency and Safety in the Renovation and Upgrading of Aging Gas Pipelines

Yang Yuhu, Yang Shanshan, Zheng Libing (Shandong Ganghua Gas Group Co., Ltd., Jinan Shandong 250101, China)

Abstract: To address the conflict between safety requirements and cost constraints in the renovation of aging gas pipelines, this paper constructs a “cost-risk” dual-dimensional evaluation system based on the life cycle theory. By analyzing data from 876 gas accidents nationwide between 2020 and 2024, core risk factors such as corrosion and third-party damage are identified. Combined with engineering case studies, the full-cycle cost composition of construction, operation, and maintenance is quantified. A trade-off model incorporating marginal benefit analysis is proposed, where the optimal renovation solution is determined by balancing the marginal cost of safety investments and the marginal reduction in risk losses. The study reveals that while intelligent monitoring technologies increase initial costs by 15%-20%, they can reduce life-cycle risk costs by over 40%. This model provides quantitative support for renovation decisions, achieving coordinated optimization between safety assurance and economic efficiency.

Keywords: aging gas pipelines; renovation and upgrading; economic evaluation; safety assessment; trade-off model; lifecycle cost

截至 2024 年底, 我国城镇燃气管网总长度突破 90 万 km, 其中运行超 15 年的老旧管网占比达 18.3%, 灰口铸铁等高危管材占比 12.7%。这类管道因腐蚀、材质老化等问题, 成为安全事故高发源头。与此同时, 管道改造面临严峻成本压力, 某城市数据显示每公里改造均价达 50 万元, 资金缺口成为制约改造推进的核心瓶颈。

1 老旧燃气管道更新改造的核心矛盾解析

老旧管道安全风险呈现复合型特征: 从管道本体来看, 内部腐蚀问题尤为严峻, 受燃气介质中硫化氢、水分等成分长期侵蚀, 管道内壁形成蜂窝状蚀孔, 当壁厚减薄达 40% 时, 管壁承压能力骤降, 极易引发泄漏事故。同时, 接口处密封材料因老化、外力挤压导致密封失效, 2023 年某市燃气事故统计显示, 接口泄漏占结构性事故的 38%。外部威胁层面, 第三方施工破坏成为主要诱因, 盲目开挖、未按规范操作等导致管道受损事件频发, 在历年事故成因中占比达 21.5%; 土壤沉降造成管道受力不均, 部分区域出现

弯曲变形甚至断裂。用户端隐患同样不容忽视, 橡胶软管因长期暴露在高温、油污环境中加速老化, 加之用户私自改装管道、未及时关闭阀门等违规操作, 进一步放大风险。数据显示, 2023 年居民用户燃气事故占比高达 62.3%, 其中因软管老化引发的事故占比超 40%, 形成“管道本体脆弱-外部冲击-用户误操作”的叠加风险链。老旧燃气管道更新改造项目成本涉及多个环节, 我将弱化数据, 从理论层面深入阐述各环节特点、成本关系及长期成本压力形成原因。

2 经济性与安全性评价体系构建

2.1 安全性评价指标体系

基于风险矩阵法, 从“可能性-后果严重性”双维度设置三级指标, 采用层次分析法确定权重:

管道本体风险 (权重 0.45); ①腐蚀速率 (0.18): 通过超声波测厚仪定期检测管道内壁腐蚀情况, 结合介质酸碱度、含水率等因素, 评估金属材料的年平均腐蚀速率, 预测剩余使用寿命。②壁厚减薄量 (0.15): 基于历史检测数据建立壁厚变化模型, 重点监测弯头、

三通等应力集中部位,当减薄量超过设计壁厚的30%时,需立即启动更换程序。③接口密封性能(0.12):采用氦质谱检漏仪对法兰、焊接等接口进行气密性检测,重点排查老化橡胶密封圈、焊接气孔等潜在泄漏点。

外部环境风险(权重0.30):①第三方施工频率(0.12):建立市政工程施工动态数据库,对燃气管道周边30m范围内的机械开挖、顶管作业等高风险施工进行实时预警,每月更新风险等级。②土壤腐蚀性(0.09):通过埋设腐蚀试片和土壤电阻率测试,分析土壤中 Cl^- 、 SO_4^{2-} 等离子浓度,划分强、中、弱腐蚀区域,针对性制定防腐措施。③极端天气影响(0.09):结合气象部门灾害预警,重点评估强降雨导致的管道沉降、冻土融化引发的应力破坏,以及台风季周边构筑物对管道的物理冲击。

管理运维风险(权重0.25):①监测覆盖率(0.10):考核智能监测设备在高压、次高压管网的部署密度,要求重点区域实现100%实时压力、流量、泄漏监测覆盖。②巡检频次(0.08):规定人工巡检周期,城市主干道管网每日巡检1次,次干道每2日1次,结合GIS系统轨迹记录确保巡检无盲区。③应急响应能力(0.07):每季度开展燃气泄漏应急演练,评估从报警接收到现场处置的全流程响应时间,要求30min内完成一级应急区域的封控。

采用百分制评分, ≥ 85 分为低风险,60-84分为中风险, <60 分为高风险。某城市铸铁管道改造前评分52.3分(高风险),改造后提升至88.7分(低风险)。

2.2 经济性评价指标体系

基于全生命周期成本(LCC)理论,涵盖:

初始投资成本(CI):①勘察设计费(CI_1):涵盖老旧燃气管道区域的地形测绘、地质勘查、管线走向定位等前期调研费用,以及专业团队进行管道改造方案设计、施工图绘制和技术评审的服务成本。②管材设备费(CI_2):包括符合国家标准新型耐腐蚀管材采购费用,以及阀门、调压箱、流量计等配套设备的购置支出,需根据改造管道长度、管径规格及设备配置要求进行精准核算。③施工安装费(CI_3):包含土方开挖与回填、管道焊接或连接、设备安装调试、路面恢复等全流程施工费用,涉及人工、机械租赁及临时设施搭建等多项成本。

运行维护成本(CO):①日常巡检费(CO_1):定期安排专业巡检人员对改造后的燃气管道及附属设施进行地面巡查、泄漏检测,结合无人机、智能巡检机器人等设备辅助检查产生的人力、设备使用及数据处理费用。②设备维保费(CO_2):针对阀门、调压设备等关键设施的定期保养、零部件更换及性能校准,

以及委托专业机构进行设备深度检测与维修的服务开支。③监测系统能耗费(CO_3):用于维持燃气管道实时监测系统(如压力传感器、泄漏监测仪、数据传输设备等)正常运行所需的电力消耗及网络通信费用。

故障损失成本(CF):①泄漏燃气损失(CF_1):因管道破损、密封失效等原因导致燃气泄漏造成的直接经济损失,需根据泄漏持续时间、燃气单价及泄漏量精准估算。②事故赔偿费(CF_2):当燃气泄漏引发火灾、爆炸、中毒等安全事故时,对受影响居民、商户及公共设施的财产损失赔偿,以及人身伤害的医疗、误工、精神损害等补偿费用。③应急处置费(CF_3):事故发生后,为控制险情、疏散人员、清理现场等开展应急救援工作所产生的费用,包括应急物资调配、专业救援队伍服务及环境修复等支出。

3 工程验证

3.1 案例1:扬州东关街老旧小区改造

背景:扬州东关街作为历史文化街区,其中3栋建于90年代的居民楼隐匿于狭窄街巷之中。由于历史规划局限,这些建筑原本并未铺设管道燃气,80户居民长期依赖瓶装液化气作为生活燃料。瓶装气不仅存在频繁换气的不便,且在运输、储存过程中存在安全隐患,居民对管道燃气改造的需求极为迫切。

方案对比:

方案A(传统开挖):该方案计划采用传统的地面开挖方式铺设燃气管道。经测算,施工总成本约为480万元,包括土方开挖、管道铺设、路面恢复等费用。然而,由于东关街街巷狭窄,施工空间有限,且周边居民生活密集,施工期间可能对居民出行、商户经营造成较大影响,因此安全评分仅为72分(中风险),与周边居民及商户的协调难度较大,协调度评分为0.63。

方案B(空中走廊+PE管+基础监测):此方案创新性地提出搭建空中燃气管道走廊,采用PE管作为输送介质,并配备基础的燃气泄漏监测设备。方案总成本达696万元,较传统开挖方案增加了216万元,主要用于空中走廊的搭建及监测设备投入。但该方案有效避免了地面开挖带来的施工风险,安全评分提升至89分(低风险),同时大幅减少了对居民生活和商户经营的干扰,协调度提升至0.81。

结论:方案B虽成本较方案A增加45%,但从长远来看,显著降低了施工及后期使用风险,协调度提升28.6%,更好地平衡了工程建设与民生保障的关系,更符合老旧小区改造这一民生工程的实际需求。

3.2 案例2:某城市铸铁管道改造

背景:某城市内存在一段长达10km的灰口铸铁

燃气管道，该管道自建成已运行 25 年，远超铸铁管道的常规使用年限。受长期土壤腐蚀及燃气介质侵蚀影响，管道老化严重，近五年内平均每年发生 2.3 起腐蚀穿孔事故，不仅造成燃气泄漏浪费，更严重威胁周边居民生命财产安全，管道改造迫在眉睫。

方案对比：

方案 C（全段更换 + 智能监测）：该方案拟对 10km 铸铁管道进行全段更换，采用新型耐腐蚀管道材料，并配备智能燃气监测系统，可实现实时压力、流量监测及泄漏预警。工程总投资预计 800 万元，改造后管道安全性能大幅提升，安全评分达到 92 分。但全段更换需大面积施工，涉及交通导改、周边环境协调等工作，协调度评分为 0.78。

方案 D（腐蚀段更换 + 基础监测）：此方案通过专业检测设备精准定位管道腐蚀严重区段，仅对问题区域进行更换，并安装基础的燃气泄漏监测装置。工程总成本控制在 520 万元，相比全段更换节省 280 万元。虽安全评分略低于全段更换方案，为 83 分，但有效解决了主要安全隐患，且施工范围小，对周边环境影响小，协调度达到 0.83。

结论：方案 D 通过精准定位、靶向施策，在保障管道安全运行的前提下，实现了更高的协同性，全周期成本降低 35%，以更经济高效的方式达成了管道改造目标。

4 优化策略与保障措施

4.1 分级分类改造策略

高风险区域（如老旧城区、学校周边）：采用“安全优先”模式，强制更换存在严重安全隐患的铸铁管、镀锌钢管等高危管材，全面升级为耐腐蚀、高强度的 PE 材质或不锈钢管道。同步配套部署智能监测系统，包括压力传感器、气体泄漏检测仪、物联网数据采集终端等设备，实现 24h 实时监控与异常自动报警。资金投入以财政补贴为主（占比 $\geq 60\%$ ），剩余部分由燃气企业和地方专项债补充，确保改造工程高效推进。

中风险区域：采用“成本优化”模式，对腐蚀程度较轻的管段实施非开挖内衬修复技术，通过在原有管道内植入高强度复合衬里，恢复管道承压与密封性能。针对弯头、三通等重点部位加装智能监测设备，建立动态风险评估模型。积极引入社会资本参与改造，要求社会资本投资比例不低于 40%，通过 PPP 模式明确各方权责，实现风险共担、收益共享。

低风险区域：采用“运维强化”模式，在保障安全前提下将常规检测周期从 1 年延长至 2-3 年，依托 GIS 地理信息系统、大数据分析平台构建数字化运维体系。通过智能巡检机器人、无人机航测等技术手段，实现管

网运行状态的精准感知与预测性维护。资金来源以企业自筹为主（占比 $\geq 80\%$ ），鼓励企业通过技术升级降低长期运维成本，政府给予税收优惠等政策支持。

4.2 技术经济性优化路径

材料选型：优先采用性价比最优的 PE100 级管材，该管材通过高密度聚乙烯树脂经特殊工艺制成，其拉伸强度、耐环境应力开裂性能较普通管材提升 30% 以上，理论使用寿命长达 50 年。经住建部试点数据测算，相比传统钢管，PE100 级管材全生命周期成本可降低 22%，且具备优异的抗腐蚀性能，无需额外防腐涂层维护，特别适用于复杂地质环境的老旧小区燃气管道更新。

施工工艺：在狭窄区域重点推广“微型顶管”与“空中走廊”等非开挖技术。“微型顶管”利用小口径顶管设备，可在管径 300mm 以下的空间内作业，对周边建筑物基础扰动极小；“空中走廊”技术则通过架设临时支架实现管道高空铺设，避免路面开挖。虽然前期设备投入会使施工成本增加 20%-30%，但通过减少道路破坏、缩短施工周期（工期可缩短 40%）、降低居民投诉率，后期维修成本可减少 80%，显著提升社会效益。

智能赋能：部署基于 NB-IoT 技术的物联网传感器网络，在关键节点安装压力、温度、泄漏三合一监测设备。尽管初期需增加 15%-20% 的智能化投入，但通过实时数据采集与 AI 算法分析，可将燃气泄漏等故障检出率提升至 98%，预警响应时间缩短至分钟级，配合应急指挥系统，能有效降低 60% 的事故损失。同时，系统可自动生成管道健康评估报告，为后续维护提供精准决策依据。

5 结论

老旧燃气管道更新改造的经济性与安全性并非零和博弈，通过科学的评价体系与权衡模型可实现协同优化。未来研究可结合氢能掺混等新兴场景，进一步完善新型风险因子的量化评价方法，为管网改造提供更精准的决策支持。

参考文献：

- [1] 史平洋. 城市燃气老化管道改造的实施路径 [J]. 上海煤气, 2025, (03): 1-3.
- [2] 李秀芳. 城市燃气管道老化更新改造分析 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2025, (13): 118-120.
- [3] 张蕾. 城市钢质燃气管道更新改造技术及应用研究 [J]. 全面腐蚀控制, 2024, 38(12): 85-87.
- [4] 于玉良, 宁玉鑫. 在役埋地城镇燃气管道风险评估指标体系的构建与思考 [J]. 城市燃气, 2024, (10): 15-19.
- [5] 宣峰. 基于安全风险的燃气管道改造研究 [J]. 劳动保护, 2024, (05): 98-101.