

城市燃气管道老化评估与更新改造决策模型探索

何波 (山东港华燃气集团有限公司, 山东 济南 250000)

摘要: 在城市化快速推进的背景下, 城市燃气管道老化引发的公共安全问题愈发突出。针对当前管道老化评估主观性强、更新改造决策缺乏系统支撑的问题, 本文整合多维度检测手段与分层风险评估思路, 搭建全新的老化评估体系, 并创新提出融合改进层次分析法 (AHP) 与模糊综合评价的决策模型, 可实现管道老化程度的精准衡量与更新优先级的动态排列。结合实际城市案例验证, 该模型能有效优化资源分配、提升决策科学性, 为城市燃气管道全生命周期管理提供理论与实践参考。

关键词: 城市燃气管道; 老化评估; 更新改造; 决策模型; 安全管理

中图分类号: TU996.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2026) 004-0103-03

Exploration of Aging Assessment and Renovation Decision-Making Models for Urban Gas Pipelines

He Bo (Shandong Portgas Group Co., Ltd., Jinan Shandong 250000, China)

Abstract: Against the backdrop of rapid urbanization, the public safety issues arising from aging urban gas pipelines have become increasingly prominent. Addressing the current challenges of highly subjective pipeline aging assessments and the lack of systematic support for renewal and renovation decisions, this study integrates multi-dimensional inspection methods and hierarchical risk assessment approaches to establish a novel aging evaluation system. Additionally, it innovatively proposes a decision-making model that combines an improved Analytic Hierarchy Process (AHP) with fuzzy comprehensive evaluation, enabling precise measurement of pipeline aging and dynamic prioritization of renewal efforts. Validation through real-world urban case studies demonstrates that this model effectively optimizes resource allocation, enhances decision-making scientificity, and provides theoretical and practical references for the entire lifecycle management of urban gas pipelines.

Keywords: Urban gas pipelines; Aging assessment; Renovation and upgrading; Decision-making model; Safety management

传统的燃气管道老化评估多依赖人工巡检与简单检测设备, 评估过程主观因素干扰大、效率低, 难以全面排查安全隐患。因此, 构建科学高效的老化评估与更新改造决策模型, 对及时掌握管道老化状况、合理制定改造策略、保障管道安全运行具有重要现实意义, 既能降低事故发生率、保护群众生命财产安全, 也能提升城市基础设施运行效率, 助力城市可持续发展。

国内现有研究多聚焦于检测技术应用与风险评估指标构建。在检测技术方面, 漏磁检测、超声导波等无损检测手段已广泛用于管道腐蚀、裂纹等缺陷排查, 其中漏磁检测适用于金属管道表面及近表面缺陷检测, 超声导波可实现长距离管道检测, 大幅提升检测覆盖范围; 在风险评估指标领域, 研究人员从结构安全、功能可靠性、环境适应性等维度搭建指标体系, 并借助层次分析法、模糊综合评价法确定指标权重, 实现风险量化。但当前研究在评估与决策的系统性整合上仍存在不足, 尤其在多目标约束下的更新策略优化方面, 缺乏深入研究与实践——多数研究仅停留在单一指标(如安全风险)的评估, 未充分考虑成本预算、施工周期、社会影响等多因素协同, 导致评估结果难

以直接指导实际决策。如何将老化评估结果与更新决策有机结合, 实现资源最优配置与安全风险有效控制, 成为当前国内研究的核心难点。

1 城市燃气管道老化评估体系构建

1.1 多维度检测技术集成

在结构性检测方面, 采用相控阵超声检测 (PAUT) 技术, 通过调控多个超声换能器的激发时间与相位, 实现管道内部结构的多角度、多方位检测, 可精准识别壁厚腐蚀缺陷的大小、形状与位置, 检测精度较传统超声检测显著提升, 尤其适用于管道弯头、焊缝等易发生应力集中的关键部位检测。同时搭配磁粉检测 (MT), 利用磁粉在磁场中对表面裂纹的吸附特性, 清晰呈现管道表面及近表面的微小裂纹, 解决了传统目视检测难以发现细微缺陷的问题, 为结构安全评估提供准确数据支撑。

功能性检测环节, 运用激光甲烷遥测技术 (LDAR), 基于激光与甲烷分子的相互作用原理, 实现远距离、快速的燃气泄漏浓度检测, 检测距离可达数十米, 且无需接触管道, 可在不影响管道正常运行的前提下完成泄漏监测, 满足城市核心区域、交通

繁忙路段等不便开挖检测场景的需求。在管道关键部位（如阀门、接头）部署应力应变传感器网络，实时采集压力、温度数据，结合泄漏监测信息构建管道健康状态实时监测矩阵——当管道压力异常波动或温度超出正常范围时，系统可立即触发预警，帮助管理人员及时掌握管道功能运行异常，避免因功能失效引发安全事故。

环境适应性检测中，依托地理信息系统（GIS）的空间分析功能，将土壤腐蚀性、杂散电流干扰等外部环境因素进行数字化处理与可视化呈现。例如，通过采集管道沿线土壤样本，分析土壤 pH 值、含水率、氯离子含量等参数，划分土壤腐蚀等级；结合城市电网分布数据，识别杂散电流易干扰区域，建立管道服役环境脆弱性评估模型。该模型可直观呈现不同路段管道的环境风险分布，为管道防护与维护提供精准决策依据——对高腐蚀区域管道优先采取防腐涂层修复措施，对杂散电流干扰区域加装排流装置，降低外部环境对管道老化的加速作用。

1.2 多层次风险评估指标体系

一级指标从结构安全、功能可靠性、环境适应性三个核心维度构建，分别赋予 40%、35%、25% 的权重。此权重分配既突出结构安全在管道安全运行中的首要地位——管道结构失效（如管壁破裂）是引发爆炸、大规模泄漏的直接原因，也兼顾功能与环境因素对管道安全的长期影响：功能可靠性不足（如阀门失灵）会导致管道运行调控失效，环境适应性差则会加速管道老化进程，三者协同构成管道风险评估的核心框架。

二级指标进一步细化为 12 项量化指标，涵盖壁厚减薄率、裂纹扩展速率、泄漏率、应力水平、土壤腐蚀性、杂散电流强度、压力稳定性、温度波动范围等。这些指标从不同角度反映管道的老化程度与安全风险，例如，壁厚减薄率直接体现管道结构承载能力下降程度，泄漏率反映管道密封功能失效风险，土壤腐蚀性则反映外部环境对管道老化的影响速度，为评估提供具体、可量化的评价维度。

三级指标将二级指标细化至具体检测参数，如超声检测回波幅值（对应壁厚减薄率）、应力传感器异常数据频次（对应应力水平）、激光遥测泄漏浓度峰值（对应泄漏率）等。采用熵权法确定各级指标权重，通过计算指标数据的信息熵，客观反映指标的变异程度——变异程度越大的指标（如泄漏率，不同管道间差异显著），信息熵越小，权重越高，反之则权重越低。这种赋权方式避免了传统主观赋权（如专家打分）受个人经验偏差影响的问题，使评估结果更具客观性与说服力，为后续决策提供可靠的风险量化依据。

2 老化更新改造决策模型构建

2.1 决策模型框架设计

构建“评估-决策-优化”三层架构决策模型：

评估层：运用模糊综合评价法（FCE），对多维度检测获取的数据进行综合处理。首先将检测参数转化为模糊评价矩阵，结合熵权法确定的指标权重，通过模糊运算得出各管道的老化综合评分，再根据评分区间将老化等级划分为 I 级安全（评分 ≥ 80 分）、II 级预警（ $60 \leq \text{评分} < 80$ 分）、III 级危险（评分 < 60 分），直观呈现管道安全状态，帮助管理人员快速识别高风险管道。

决策层：以更新成本最小化、安全风险降低率最大化、社会影响最小化为目标，建立多目标优化模型。其中，更新成本需符合地方财政预算要求，避免过度投入导致资金浪费；安全风险降低率需达到 60% 以上，确保改造后管道安全水平显著提升；社会影响最小化则要求施工周期控制在合理范围（如避开居民用气高峰、交通高峰期），减少对居民生活、城市交通的干扰。引入粒子群算法（PSO）求解模型，模拟鸟群觅食时的群体协作行为，在解空间中快速搜索最优更新序列——通过迭代计算，找到同时满足成本、安全、社会影响目标的最优改造方案，避免单一目标决策的局限性。

反馈层：借助物联网（IoT）技术，在更新改造后的管道上安装智能监测终端，实时采集压力、温度、泄漏浓度等运行数据，通过 5G 网络传输至云端管理平台。平台对数据进行实时分析，若发现管道运行参数超出正常范围，一方面及时推送预警信息至管理人员，另一方面将异常数据反馈至决策模型，动态调整模型参数（如修正风险评估权重、优化成本预算分配），形成“检测-评估-决策-反馈-优化”的闭环管理机制，确保模型始终适应管道运行状态变化，提升决策的动态性与精准性。

2.2 优先级排序算法改进

针对传统层次分析法（AHP）处理复杂指标关联时的局限性——传统 AHP 假设指标间相互独立，而实际管道风险评估中，环境因素（如土壤腐蚀）会影响结构安全（如壁厚减薄），指标间存在明显依赖关系，提出改进层次分析法（IAHP）。

引入三角模糊数处理专家评分，考虑到专家在评估指标重要性时可能存在判断不确定性，采用“最低值-最可能值-最高值”的三角模糊数形式表达评分，如将“指标 A 比指标 B 重要”表述为 (1,3,5)，更精准地反映专家意见的模糊性与不确定性，提升评分可靠性。

构建超矩阵描述指标间相互依存关系，通过分析指标间的影响程度（如土壤腐蚀性对壁厚减薄率的影响权重为 0.3），建立超矩阵模型，全面呈现指标体系的内在联系，避免传统 AHP 忽略指标关联性导致的权重计算偏差。

结合逼近理想解排序法（TOPSIS），根据各管道的综合评价指标与理想解（各指标最优值）、负理想解（各指标最劣值）的距离，计算相对贴近度，按贴近度从大到小对管道更新优先级进行排序——贴近度越大，说明管道越接近理想状态，更新优先级越低；反之则优先级越高。输出的决策方案包含改造时序（如优先改造贴近度 < 0.3 的Ⅲ级危险管道）、技术选型（如腐蚀严重管道采用管道替换技术，裂纹管道采用内衬修复技术）、资金分配（如 70% 改造资金用于Ⅲ级危险管道）等详细信息，为管道更新改造提供全面、可落地的决策依据。

3 实证分析与应用

3.1 案例概况

选取某省会城市服役超 15 年的钢质燃气管道作为研究对象，总长度 200km。该区域管道主要分布于老城区，30% 的管道位于人口密集区（如居民小区、学校周边），周边环境复杂——部分路段土壤为强腐蚀性土壤，且临近城市电网线路，杂散电流干扰明显；同时，该区域交通流量大、地下管线密集，管道改造施工受场地限制大，面临腐蚀减薄与第三方破坏（如其他管线施工误碰）的双重风险。由于服役时间较长，管道早期采用的防腐涂层已部分老化脱落，近年来泄漏预警频次逐年上升，对城市燃气供应安全构成潜在威胁，亟需通过科学评估与决策制定合理的更新改造方案。

3.2 评估与决策过程

通过多维度检测技术集成应用，对管道进行全面检测，发现部分管道存在明显老化缺陷——壁厚减薄、表面裂纹、局部泄漏等问题集中在土壤强腐蚀区域与杂散电流干扰路段。依据多层次风险评估指标体系与模糊综合评价法，对管道进行风险评估，确定Ⅲ级危险管道占比 17.5%、Ⅱ级预警管道占比 34%、Ⅰ级安全管道占比 48.5%，清晰掌握管道安全状况分布，为后续改造方案制定提供明确靶向。

基于评估结果制定针对性更新改造方案：对Ⅲ级危险管道优先改造，采用高强度聚乙烯（PE100）管替换原有钢质管道——PE100 管具有优异的耐腐蚀性与柔韧性，可有效抵抗土壤腐蚀与外力冲击，使用寿命较传统钢质管道延长 15–20 年；同时搭配定向钻、顶管等非开挖修复技术，避免大规模开挖路面，减少

对周边居民生活与城市交通的影响，经测算，该方案可降低改造成本 25%、缩短施工周期 40%，兼顾安全与效益。对Ⅱ级预警管道实施阴极保护强化措施，如增加牺牲阳极数量或提升阴极保护电流强度，增强管道防腐能力；同时加装智能监测终端，实时采集管道运行数据，实现异常情况及时预警，通过这些措施，管道年度维护成本下降 18%，且未再发生因防腐失效引发的泄漏事故。

建立动态监控平台，利用物联网与大数据技术实时采集分析管道运行数据，设定泄漏浓度超 500ppm 自动报警阈值——当检测到泄漏浓度超过阈值时，平台立即通过短信、APP 推送等方式向管理人员发送报警信息，同时自动调取泄漏位置周边的监控画面，辅助管理人员快速判断泄漏情况；优化应急响应流程，建立“监控中心–应急队伍–属地社区”联动机制，应急队伍接到报警后可快速抵达现场处置，将应急响应时间缩短至 15min 以内，有效降低事故扩散风险，保障居民生命财产安全。

4 结论与展望

本文构建的城市燃气管道老化评估与更新改造决策模型，实现了管道老化状态的精准评估与更新决策的科学制定。通过集成多维度检测技术（结构性、功能性、环境适应性检测协同）与搭建多层次风险评估指标体系（三级指标层层细化），解决了传统评估主观性强、维度单一的问题，提升了老化评估的准确性与全面性；基于改进层次分析法与多目标优化模型的决策框架，兼顾成本、安全、社会影响多因素，实现了更新改造决策的量化分析与多目标优化，显著提升决策科学性与合理性，避免了单一目标决策的局限性。实际案例验证表明，该模型可有效识别高风险管道，制定针对性改造方案，降低改造成本与施工周期，具备良好的有效性与可行性，为燃气管道安全管理提供了有力技术支撑与决策依据。

参考文献：

- [1] 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.
- [2] 本刊通讯员. 住房城乡建设部召开全国城市燃气管道安全专项治理行动部署推进视频会议 [J]. 城市燃气, 2025, (03): 21.
- [3] 广西城市燃气等市政管道老化更新改造实施方案 (2023—2025 年) [J]. 广西城镇建设, 2023, (12): 19-29.
- [4] 王辉, 张德久, 葛楠. 城市燃气管道老化更新改造分析 [J]. 煤气与热力, 2023, 43(08): 27-29.
- [5] 谭臣. 关于城市燃气管道老化更新改造的思考与建议 [J]. 城市燃气, 2023, (06): 41-44.