

# 市政给水管网老化评估及基于寿命周期的更新改造优化模型

文 / 段 乔 中国市政工程西北设计研究院有限公司

**摘要：**市政给水管网是城市基础设施的重要组成部分，其老化问题直接影响到供水的安全性和效率。本文旨在探讨市政给水管网的老化评估方法，并提出基于寿命周期的更新改造优化模型。通过对现有老化评估技术和更新改造策略的研究，结合最新的数据分析和优化算法，提出了一个综合性的优化框架。研究表明，该模型不仅能有效识别老化管网的风险点，还能在有限资源条件下制定最优的更新改造方案，提高供水系统的可靠性和经济性。本文为市政管理者提供了科学决策的依据，有助于提升城市供水系统的整体管理水平。

**关键词：**市政给水管网；老化评估；寿命周期；更新改造；优化模型

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.15.040

## 引言

市政给水管网作为城市基础设施的重要组成部分，承担着保障居民用水安全和满足城市发展需求的重任。然而，随着使用年限的增加，许多城市的给水管网逐渐老化，导致漏水、爆管等问题频发，严重影响了供水系统的稳定性和安全性。传统的管网维护和更新方法往往依赖于经验判断，缺乏科学依据，难以实现高效管理和资源优化配置。因此，如何通过科学的方法对给水管网进行老化评估，并在此基础上制定合理的更新改造计划，成为当前亟待解决的问题。本文将从老化评估方法入手，结合寿命周期成本分析，提出一种综合性的优化模型，以期能为市政管理者提供科学决策支持，提升城市供水系统的运行效率和服务质量。

### 一、市政给水管网老化评估方法

#### （一）数据采集与预处理

市政给水管网老化评估的基础是高质量的数据，数据采集与预处理是确保评估结果准确性的关键步骤。数据来源包括管网设计图纸、施工记录、运行维护日志、物理检测报告以及地理信息系统（GIS）数据等。设计图纸和施工记录提供了管网的初始信息，如管材类型、铺设年代、埋深等；运行维护日志记录了管网的维修历史、故障频率等动态信息；物理检测报告则通过闭路电视检测（CCTV）、声纳检测等技术手段，获取管道的内部状况数据，如腐蚀程度、裂缝分布等。GIS数据为管网的空间分布和拓扑关系提供了可视化支持。数据预处理是确保数据可用性的重要环节，包括数据清洗、格式转换、缺失值填补和异常值处理等。例如，对于历史记录中的缺失数据，可采用插值法或基于相似管段的类比法进行填补；对于检测数据中的异常值，需结合实际情况进行修正或删除。数据预处理的目的是消除噪声、提高数据质量，为后续的老化评估提供可靠的数据基础。

#### （二）老化指标体系构建

老化指标体系的构建是市政给水管网老化评估的核

心环节，其科学性和全面性直接影响评估结果的准确性。老化指标需涵盖管网的物理性能、水力性能和结构性能等多个维度。物理性能指标包括管材类型、铺设年代、腐蚀程度、裂缝长度等，反映管道的实际状况；水力性能指标包括压力、流量、漏损率等，体现管网的运行效率；结构性能指标包括管道变形、接头松动等，评估管网的稳定性。指标权重的确定是构建老化指标体系的关键，可采用层次分析法（AHP）或熵值法等方法，结合专家意见和历史数据进行综合评估。例如，对于腐蚀程度和漏损率等直接影响管网寿命的指标，可赋予较高权重；对于铺设年代等间接影响指标，权重可适当降低。老化指标体系的构建需根据具体管网的特点进行调整，确保指标的适用性和可操作性<sup>[1]</sup>。

#### （三）老化预测模型

老化预测模型是市政给水管网老化评估的重要工具，其目标是通过分析历史数据和现状信息，预测管网的剩余寿命和未来老化趋势。常用的预测模型包括基于物理机制的模型和基于数据驱动模型。基于物理机制的模型通过模拟管道的腐蚀、疲劳等物理过程，预测管道的剩余寿命。例如，腐蚀预测模型可通过分析土壤特性、水质参数和管材属性，计算管道的腐蚀速率和剩余壁厚。基于数据驱动模型则利用机器学习算法，如随机森林、支持向量机等，从历史数据中学习老化规律，预测管网的未来状态。例如，通过输入管材类型、铺设年代、漏损率等指标，模型可输出管道的剩余寿命和故障概率。老化预测模型的精度受数据质量和算法选择的影响较大，需通过交叉验证和参数优化等方法提高预测准确性。此外，模型的适用性也需结合具体管网的特点进行评估，确保预测结果的可靠性和实用性。

### 二、基于寿命周期的更新改造优化模型

#### （一）寿命周期成本分析（LCCA）

寿命周期成本分析（LCCA）是管网更新改造优化模型的核心组成部分，旨在全面评估管网从设计、施工、

运行到报废的全生命周期经济性。LCCA 的核心理念是将短期投入与长期收益相结合，避免因片面追求初期成本最低而导致的后期运维费用过高，如图 1 寿命周期成本分析（LCCA）流程图所示。成本构成包括初始投资、运维费用、故障修复成本及报废处理费用。初始投资涵盖材料采购、设备安装及施工费用，运维费用涉及日常检查、维护及能耗支出，故障修复成本则包括突发事件的应急处理与损失补偿。报废处理费用需考虑管网拆除、材料回收及环境影响。LCCA 的实施依赖于详实的数据支持，包括管网历史运行数据、材料性能参数及市场成本信息。分析方法包括净现值法、内部收益率法及成本效益分析法，通过折现率将未来成本与收益折算至当前价值，便于横向比较不同改造方案的优劣。LCCA 的优势在于其全面性与前瞻性，能够揭示潜在的经济风险与优化空间。例如，高初始投资但低运维成本的方案可能在长期更具经济性。LCCA 的应用还需考虑不确定性因素，如材料价格波动、技术进步及政策变化，通过敏感性分析评估这些因素对成本的影响。LCCA 不仅为决策者提供了科学依据，还为后续的多目标优化模型奠定了数据基础。通过 LCCA，能够实现管网更新改造的经济性、可靠性与可持续性的平衡。

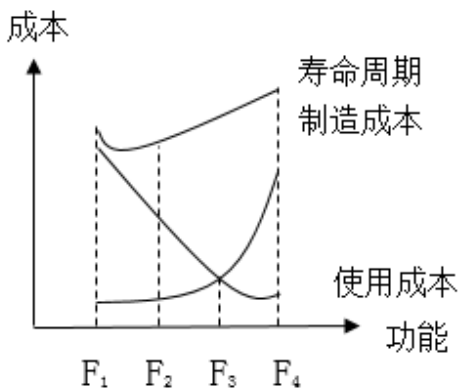


图 1: 寿命周期成本分析 (LCCA) 流程图

### (二) 多目标优化模型

多目标优化模型在管网更新改造中扮演着重要角色，旨在平衡经济性、可靠性及环境效益等多重目标。经济性目标通常以寿命周期成本最小化为核心，可靠性目标则关注管网运行的安全性与稳定性，环境效益目标强调减少资源消耗与生态影响。多目标优化的难点在于目标间的冲突与权衡，例如，提高可靠性可能需要增加初期投资，而降低环境影响可能限制某些材料或工艺的使用。优化模型的构建需基于数学规划方法，如线性规划、整数规划或动态规划，结合管网系统的物理特性与运行约束。目标函数的设计需反映决策者的偏好，通过权重分配或约束条件调整，实现不同目标的协调。求解方法包括传统算法与智能优化算法，传统算法如单纯形法适用于小规模问题，智能算法如遗传算法、粒子群优化则更

适合复杂非线性问题。多目标优化的结果通常以帕累托前沿的形式呈现，展示不同目标间的权衡关系，为决策者提供多种可选方案。模型的应用还需考虑实际工程中的不确定性，如管网负荷波动、材料老化速率及外部环境变化，通过鲁棒优化或随机规划增强模型的适应性。多目标优化模型的成功实施，不仅依赖于模型的精确性与求解效率，更离不开决策者的经验与判断。如图 2 多目标优化示意图所示。

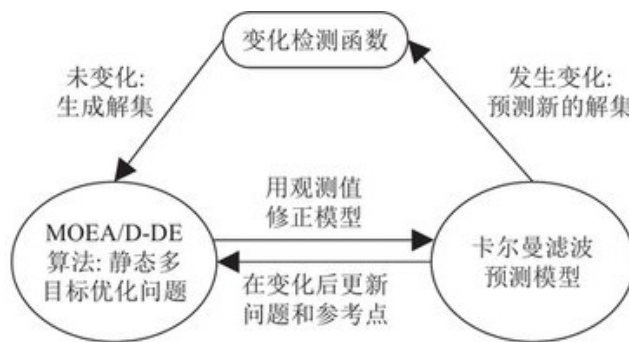


图 2 多目标优化示意图

### (三) 动态规划与滚动优化

动态规划与滚动优化是管网更新改造中应对不确定性与复杂性的有效工具。动态规划通过将问题分解为多个阶段，逐步求解最优决策，适用于具有时序特征的管网更新问题。每个阶段的决策不仅影响当前状态，还影响后续阶段的可行性与成本。动态规划的优势在于其全局优化能力，能够避免局部最优解，但其计算复杂度随问题规模增大而显著增加。滚动优化则是一种在线优化方法，通过不断更新模型参数与约束条件，适应管网运行状态的变化。滚动优化的核心思想是将长期优化问题分解为多个短期问题，在每个时间窗口内基于最新数据进行优化决策。这种方法能够有效应对管网负荷波动、材料性能退化及外部环境变化等不确定性因素。动态规划与滚动优化的结合，能够实现长期规划与短期调整的协调。例如，在长期规划中确定管网更新的总体框架，在短期调整中根据实时监测数据优化施工顺序与资源配置。模型的应用还需考虑计算效率与实时性要求，通过简化模型或并行计算提高求解速度。动态规划与滚动优化的成功实施，不仅依赖于模型的精确性与适应性，更离不开高效的数据采集与处理能力。通过动态规划与滚动优化，能够实现管网更新改造的全局最优与实时调整，提升工程的经济性与可靠性 [2]。

### 三、管网更新改造的实施策略

#### (一) 分区管理与优先级排序

管网更新改造的分区管理与优先级排序是确保工程高效推进的关键环节。分区管理基于管网的空间分布、功能属性及运行状态，将整个管网系统划分为若干独立单元，便于针对性施策。分区依据包括管网材质、使用年限、故障频率及服务区域的重要性。老旧管网区域因

腐蚀、渗漏等问题突出，通常被列为优先改造对象。优先级排序则需综合考虑多维度因素，如管网失效风险、环境影响、经济效益及社会需求。高风险区域，尤其是人口密集区或关键基础设施周边，往往被赋予更高优先级。经济性分析在排序中占据重要地位，需评估改造投入与长期收益的平衡。技术可行性也是不可忽视的因素，涉及施工难度、技术成熟度及资源调配能力。分区管理与优先级排序的实施，需依托详实的数据支撑，包括管网GIS系统、历史运维记录及实时监测数据。通过科学划分与合理排序，能够有效优化资源配置，降低改造过程中的不确定性与风险，提升整体工程效率。此外，分区管理还为后续施工组织提供了清晰的框架，避免了资源浪费与重复建设。优先级排序的动态调整机制也需纳入考虑，以适应管网运行状态的变化及外部环境的波动。

**(二) 施工组织与协调**

管网更新改造的施工组织与协调是确保工程顺利实施的核心环节，施工组织需从技术、资源及时间三个维度进行统筹规划。技术层面，需根据管网类型、地质条件及周边环境选择适宜的施工工艺，如非开挖技术在城市密集区的应用，能够最大限度减少对交通与居民生活的影响。资源调配涉及人力、设备及材料的合理配置，需结合工程规模与进度要求，制定详细的资源需求计划。时间管理则强调施工进度的科学安排，避免因工期延误导致的成本增加与社会影响。施工协调的重点在于多方利益相关者的沟通与合作，包括政府部门、施工单位、监理机构及社区居民。政府部门需提供政策支持与审批便利，施工单位需严格按照技术规范操作，监理机构则负责质量与安全的全程监督。社区居民的诉求也需得到充分重视，通过信息公开与意见征集，减少施工引发的社会矛盾。施工过程中，突发事件的处理能力至关重要，需建立应急预案，确保在管线破裂、设备故障等情况下能够迅速响应。施工组织与协调的成功，不仅依赖于完善的计划与制度，更离不开现场管理人员的经验与应变能力<sup>[3]</sup>。

**(三) 监测与反馈机制**

管网更新改造的监测与反馈机制是确保工程质量与长期运行效果的重要保障，监测工作贯穿于改造全过程，涵盖施工阶段的质量控制与运行阶段的性能评估。施工监测重点包括管道铺设精度、接口密封性及材料耐久性，通过无损检测技术与实时数据采集，确保施工质量符合设计标准。运行监测则侧重于管网的水力性能、结构稳定性及环境适应性，利用传感器网络与远程监控系统，实现对管网状态的实时掌握。反馈机制是监测工作的延伸，旨在将监测数据转化为改进措施。数据分析是反馈机制的核心，需借助大数据与人工智能技术，识别管网运行中的异常模式与潜在风险。如图3管网的监测与反馈示意图所示。反馈结果需及时传达至设计、施工及运

维部门，形成闭环管理。设计部门可根据反馈优化管网布局与材料选择，施工部门可调整工艺参数与施工流程，运维部门则能提前制定维护计划，避免突发故障。监测与反馈机制的有效性，依赖于数据采集的全面性与分析的准确性，需建立统一的数据标准与共享平台。此外，反馈机制的动态调整能力也至关重要，能够适应管网运行环境的变化与技术发展的需求。



图3 管网的监测与反馈示意图

**结语**

综上所述，通过科学的老化评估方法和基于寿命周期的更新改造优化模型，可以有效识别老化管网的风险点，并制定合理的更新改造方案，提高供水系统的可靠性和经济性。本文提出的综合优化框架，不仅为市政管理者提供了科学决策的依据，还有助于推动城市供水系统的现代化建设和可持续发展。未来，随着新技术的不断发展和应用，市政给水管网的管理将更加智能化和精细化，进一步提升城市供水服务的质量和水平。

**参考文献**

[1] 刘英夫. 市政管网计量分区漏损控制实践研究 [J]. 水上安全, 2024, (05): 70-72.  
 [2] 肖君健, 吴海涛, 高艳, 等. 城市核心区市政供水管网老化现状及更新对策 [J]. 给水排水, 2023, 59(S2): 798-802.  
 [3] 宋朝阳, 刘威, 姚天野. 市政管网运行风险发生机理及评价指标体系 [J]. 油气储运, 2019, 38(06): 629-634+641.