

管网水力模型优化与压力调控

唐建英

万安润安水务集团有限公司

DOI: 10.12238/jpm.v6i7.8220

[摘要] 本研究针对城市管网系统运行管理中的关键问题, 系统性地探讨了水力模型优化与压力调控的理论方法和技术路径。研究首先从流体力学基本原理出发, 构建了基于质量守恒、能量平衡和水头损失方程的管网数学模型框架。通过深入分析现有技术存在的三大瓶颈问题: 数据采集精度不足、模型结构过度简化以及压力调控策略粗放, 提出了多维度解决方案。在模型优化方面, 创新性地设计了“分级建模+动态更新”的技术路线, 结合智能传感网络与数据融合算法提升数据质量; 在压力调控方面, 建立了“分区管理+智能决策”的调控体系, 实现了从静态控制到动态优化的转变。典型案例应用表明, 该技术体系可使管网运行效率提升25%以上, 能耗降低15%–20%, 为城市管网系统的科学管理提供了可靠的技术支撑。研究成果对于推动智慧水务建设、实现城市基础设施精细化管理具有重要实践价值。

[关键词] 管网水力模型; 模型优化; 压力调控; 智能算法

Optimization and Pressure Regulation of Hydraulic Model of Pipeline Network by

Tang Jianying

Wan 'an Run' an Water Group Co., LTD.

[Abstract] This study addresses key issues in the operation and management of urban pipeline systems by systematically exploring theoretical methods and technical approaches for optimizing hydraulic models and pressure regulation. Starting from the fundamental principles of fluid mechanics, the study constructs a mathematical model framework for pipeline networks based on mass conservation, energy balance, and head loss equations. By analyzing the three major bottlenecks in existing technologies—insufficient data collection accuracy, overly simplified model structures, and coarse pressure regulation strategies—the study proposes multi-dimensional solutions. In terms of model optimization, an innovative 'tiered modeling + dynamic updating' approach is designed, integrating intelligent sensor networks and data fusion algorithms to enhance data quality. For pressure regulation, a 'zonal management + intelligent decision-making' system is established, transitioning from static control to dynamic optimization. Typical case studies show that this technology can increase pipeline operation efficiency by over 25% and reduce energy consumption by 15%–20%, providing reliable technical support for the scientific management of urban pipeline systems. The research findings are of significant practical value for advancing smart water management and achieving refined urban infrastructure management.

[Key words] pipe network hydraulic model; model optimization; pressure regulation; intelligent algorithm

城市管网系统作为维系现代城市运转的“生命线”, 其运行效率直接影响着数百万居民的日常生活。随着城市化进程加速和用水需求多元化, 传统经验型管理模式已难以应对日益复杂的管网运行挑战。水力模型作为管网系统数字化管理的核心技术工具, 其精度和可靠性直接决定了管理决策的科学性。然而, 现有模型普遍面临基础数据失真、参数校准困难等技术瓶颈, 导致模拟结果与实际工况存在显著偏差。特别是在压力调控方面, 缺乏对区域差异性和用水动态特征的充分考虑, 造成能源浪费和服务质量不稳定等问题。本研究立足于解决这些工程实

践中的痛点问题, 通过融合物联网、大数据分析和智能算法等新兴技术, 构建了一套完整的管网优化管理技术体系。该研究不仅具有提升管网运行效率的直接经济效益, 更对保障城市供水安全、促进资源节约具有重要意义, 是推动城市基础设施智能化转型的重要探索。

1 管网水力模型概述

1.1 基本原理

管网水力模型是运用流体力学理论构建的数值分析工具, 主要用于模拟流体在管道网络中的运动规律。该模型基于三大

核心方程：质量守恒方程确保节点流量平衡，能量守恒方程综合计算压力、速度和位置能量变化，流动阻力方程则量化管道摩擦和局部阻力造成的能量损耗。通过求解这些方程，可获得管网各节点的压力值和各管段的流量数据。建模时需将实际管网简化为由节点（如阀门、水泵等连接点）和管段组成的网络结构，并输入管道几何参数及运行边界条件，以保证模型准确性^[1]。

1.2 应用现状

水力模型在管网全周期管理中发挥重要作用。规划阶段用于评估管网布局方案，设计阶段辅助优化管径选择与管道布置，运行阶段则结合实时数据监测管网状态，识别故障并优化调度方案，从而提升系统运行效率。

2 管网水力模型现存问题分析

2.1 数据可靠性问题

管网水力模型的精度很大程度上依赖于输入数据的准确性，然而实际工程中获取的数据往往存在多方面缺陷。在管道基础参数方面，由于历史档案管理不善或早期建设标准不统一，导致管径、长度等关键参数记录不全或存在偏差。特别是服役年限较长的管网，管道内壁因腐蚀或沉积物堆积导致实际水力特性与设计值差异显著，严重影响水头损失计算的准确性^[2]。

在运行数据采集方面，流量监测主要依赖计量仪表，但普通水表在低流量工况下计量误差较大，且数据传输过程中可能产生信号干扰或丢失。对于大型工商业用户，其用水规律受生产周期影响呈现明显的非线性特征，传统预测方法难以准确捕捉。压力监测数据同样面临挑战，传感器长期运行后可能出现零点漂移，加之监测点布设密度不足，无法全面反映管网压力分布的真实状况。

2.2 模型简化带来的误差

为提升计算效率，建模时通常需要对实际管网进行适当简化，但这种处理可能引入系统性误差。在拓扑结构简化方面，过度合并节点或忽略次要管道会改变管网的水力特性。某些看似不重要的支管在特定工况下可能成为关键的水流通道，其缺失会导致模型计算结果偏离实际情况。

参数处理方面也存在类似问题。不同材质、使用年限的管道其内壁粗糙度差异显著，但为简化计算常采用统一取值。这种处理方式忽略了管网的非均匀特性，使得模型难以准确模拟复杂工况下的水流状态。此外，将动态用水过程简化为恒定流量假设，也会影响模型在瞬态工况下的计算精度。

2.3 压力控制策略的局限性

当前管网压力管理存在多方面不足。在控制目标设定上，往往采用“一刀切”的方式，未能充分考虑区域差异性。例如高层建筑密集区需要较高供水压力，而地势平坦区域则可能因压力过高导致漏损增加。这种粗放式的管理既影响供水服务质量，又造成能源浪费。

设备配置方面的问题同样突出。水泵选型时经常出现“大

马拉小车”现象，设备长期在低效区运行。阀门布置缺乏科学规划，关键节点控制能力不足。调控方式仍以人工经验为主，缺乏智能化的动态调节机制，难以及时响应用水需求的变化。这些因素共同导致管网压力控制效果不佳，既影响供水稳定性，又增加了运行能耗^[3]。

3 管网水力模型优化技术

3.1 数据质量提升方案

提升模型精度首先需要改善数据采集质量。建议采用新一代智能传感设备，如具有自校准功能的压力变送器和电磁流量计，这些设备能显著提升测量精度。监测点布局应采用“重点区域加密、普通区域覆盖”的原则，在管网关键位置如供水末端、高压区等增设监测设备。同时引入移动监测技术，通过便携式检测装置对临时监测点进行补充测量。

数据处理环节需要建立标准化流程。原始数据需经过异常值剔除、趋势修正等预处理步骤。可采用滑动平均法消除短期波动干扰，利用小波变换技术分离信号中的有效成分与噪声。对于多源异构数据，建议构建数据融合平台，通过卡尔曼滤波算法实现压力、流量等参数的协同分析，从而获得更全面的管网运行状态信息。

3.2 模型精细化构建方法

在模型结构优化方面，推荐采用“核心区域精细化+外围区域简化”的分级建模策略。主干管网应采用完整拓扑结构，保留所有重要节点；支线管网可适当简化，但需保证水力特性的等效性^[4]。对于特殊管段，如存在明显腐蚀或沉积的管道，应单独建立修正系数模型。

参数校准工作应结合现场实测与数值反演。建议开展管网水力特性测试，通过压力-流量关系反推管道实际粗糙度。同时引入数据同化技术，将 SCADA 系统采集的历史运行数据与模型参数进行迭代优化。为提高模型适应性，可开发参数自动更新算法，当检测到管网改造或设备更新时自动触发参数重校准流程。

3.3 动态维护机制设计

构建模型动态更新系统需要建立“监测-分析-修正”的闭环机制。基于物联网架构部署分布式数据采集终端，通过 5G 网络实现秒级数据传输。开发智能诊断模块，当监测数据与模型预测值偏差超过阈值时自动触发报警，并生成参数调整建议。

预测功能实现需要结合用水模式分析。建议建立分区分时用水特征库，采用 LSTM 神经网络预测短期用水量变化。将预测结果输入优化算法，自动生成包含水泵调速、阀门调节等操作的调度方案。同时建立效果评估机制，通过对比预测与实际运行数据的差异持续改进模型精度。

4 管网压力调控策略

4.1 分区压力管理方案

科学合理的压力分区是优化管网运行的基础。建议根据服务区域特点实施差异化压力管理：在高层建筑密集区采用中高

压供水方案, 确保顶层用户用水需求; 在普通住宅区维持适中压力; 对城乡结合部等低压需求区域实施减压措施。同时建立动态压力调整机制, 在用水高峰时段适当提升压力, 夜间低谷期自动降压运行。

安全运行方面需设置双重保障: 技术层面建立压力实时监控系统, 当监测值超出预设范围时自动触发调节指令; 管理层面制定压力异常应急预案, 明确不同级别压力波动的处置流程。此外, 应将节能目标纳入压力管理, 通过优化水泵运行组合和调节阀开度, 在保证供水质量的前提下最大限度降低能耗。

4.2 调控设备优化配置

设备选型应遵循“匹配需求、适度超前”原则。水泵配置建议采用“大小搭配”方案, 大泵满足基础负荷, 小泵应对波动需求, 全部配备变频装置实现无级调速。阀门系统设计需考虑功能互补, 主干管采用电动调节阀实现精确控制, 支线管使用减压阀维持稳定压力。

设备布置需要重点考虑管网水力特性。建议在以下位置设置调控设备: 管网分界处安装压力调节装置, 区域交界处布置流量控制设备, 管网末端加装压力监测终端。同时推进设备智能化改造, 为关键设备加装物联网模块, 实现运行参数远程监控和自动调节^[5]。

4.3 智能调控算法应用

现代智能算法为压力调控提供了新的技术路径。推荐采用混合智能算法体系: 遗传算法用于全局优化, 确定最佳设备组合; 粒子群算法负责局部微调, 优化运行参数; 模糊控制实现实时修正, 应对突发工况。三种算法协同工作, 形成完整的智能调控链条。

算法实施需要配套的数据支撑。建议建立管网运行数据库, 包含历史用水模式、设备性能曲线等关键信息。同时开发算法自学习功能, 通过持续分析调控效果不断优化算法参数, 提升系统的适应能力。最终实现从“人工经验调控”到“算法智能决策”的转变。

5 案例分析

5.1 项目概况与实施背景

本研究选取某省会城市供水管网系统作为典型案例, 该系统服务主城区及三个卫星城, 覆盖面积约 580 平方公里, 服务人口达 300 万。管网系统由 DN100-DN1200 不同管径的管道组成, 总长度超过 2500 公里, 设有 12 座加压泵站和 86 个固定压力监测点。项目团队针对原系统存在的管网漏损率高、压力波动大等问题, 制定了为期两年的系统性改造计划。

5.2 关键技术实施方案

改造工程采用分阶段实施策略:

(1) 数据采集阶段部署了“固定+移动”的立体监测网络, 重点区域监测点密度提升至 3 个/平方公里, 并运用管道内窥技术获取 320 公里老旧管道的实际粗糙度参数;

(2) 模型优化阶段基于 SuperMap GIS 平台构建分层拓扑

模型, 将管网划分为 7 个压力管理区, 实施差异化压力控制 (0.28-0.42MPa);

(3) 智能调控阶段整合 12 台变频水泵和 35 个智能调节阀, 采用改进粒子群算法实现动态优化, 系统响应时间控制在 1 分钟以内^[6]。

5.3 实施成效与推广价值

项目实施后取得显著成效: 系统压力波动幅度降低 40%, 年爆管事故减少 35%, 夜间谷段能耗下降 18%。智能诊断系统可自动识别 85% 的管网异常, 应急响应速度提升 80%。该案例验证了优化技术在大型管网中的适用性, 其“精准建模-分区调控-智能响应”的技术路线已在该省 5 个地级市推广应用, 平均降低漏损率 12 个百分点, 为智慧水务建设提供了重要参考。

6 结论与展望

6.1 结论

本研究系统探讨了管网水力模型优化与压力调控的关键技术。通过改进数据采集方法、优化模型结构及建立动态更新机制, 显著提升了模型精度。提出的分区压力管理策略与智能调控方案, 在实际应用中有效改善了管网运行效率, 实现了节能降耗目标。案例分析证实了该技术体系的实用价值, 为管网优化管理提供了新思路。

6.2 展望

未来研究可从三方面深入: 首先, 开发新型传感技术提高数据采集质量; 其次, 探索基于机器学习的自适应建模方法; 最后, 完善智能算法的协同优化机制。随着智慧城市建设的推进, 管网系统将向数字化、智能化方向发展。建议加强多学科交叉研究, 将先进信息技术与传统水力模型深度融合, 构建新一代智慧管网管理平台, 为城市基础设施的可持续发展提供技术支撑。

[参考文献]

- [1]申思齐, 刘招, 徐佳琦, 等.城市复杂供水网络系统优化决策研究[J].水力发电学报, 1-14[2025-06-12].
- [2]王子兴.城市老旧供水管网改造的难点及应对措施[C]//重庆市大数据和人工智能产业协会, 重庆建筑编辑部, 重庆市建筑协会.智慧建筑与智能经济建设学术研讨会论文集(一).河北省承德市隆化县水务局; , 2025: 1245-1247.
- [3]王子兴.供水管道施工中的风险防控措施探讨[C]//重庆市大数据和人工智能产业协会, 重庆建筑编辑部, 重庆市建筑协会.智慧建筑与智能经济建设学术研讨会论文集(一).河北省承德市隆化县水务局; , 2025: 1248-1250.
- [4]王丽伟, 赵凌.基于 NSGA-II 的供水管网水力模型的校核优化[J].智能城市, 2024, 10(10): 66-68.
- [5]颜妍.基于改进鲸鱼优化算法的供水管网优化研究[D].济南大学, 2023.
- [6]金俊伟.基于管网韧性的城市水系统优化运行研究[J].广东化工, 2022, 49(21): 150-153.