

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.11.010

基于多源厂网联调的供水管网寻优调度研究

张坤林^{1,2}, 蒋之凡^{1,2}, 刘正彪^{1,2}

(1. 上海勘测设计研究院有限公司, 上海 200335; 2. 三峡智慧水务科技有限公司, 上海 200335)

摘要: 为了在保障供水压力的前提下实现节能降耗的目标,探讨了改进增量动态规划法在供水管网优化调度中的应用。使用EPANET构建了供水厂网水力模型,采用K-Means聚类算法优化边界数据,并通过粒子种群(PSO)算法对模型进行率定。基于现状经验调度方案,构建了多目标调度函数及约束条件,通过改进增量动态规划法,对出厂压力步长进行动态优化并寻找到更优的调度方案。结果表明,改进增量动态规划法在供水管网优化调度中具有较好的实用性,不仅使LA市城区用户端供水压力全部达标,还降低了漏损率,相比现状经验调度显著提高了供水效益。

关键词: 供水管网; 厂网联调; 增量动态规划法; 优化调度

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)11-0070-07

Optimization of Water Supply Network Scheduling Based on Multi-source Waterworks and Pipe Network Integration

ZHANG Kun-lin^{1,2}, JIANG Zhi-fan^{1,2}, LIU Zheng-biao^{1,2}

(1. Shanghai Investigation, Design & Research Institute Co. Ltd., Shanghai 200335, China;

2. Three Gorges Smart Water Technology Co. Ltd., Shanghai 200335, China)

Abstract: This study investigated the application of improved incremental dynamic programming method in the optimization of water supply network scheduling, to achieve the goal of energy saving and consumption reduction while ensuring water supply pressure. The hydraulic model of waterworks and pipe network was constructed using EPANET. The boundary data were optimized through the K-Means clustering algorithm, and the model was subsequently calibrated using the particle swarm optimization (PSO) algorithm. The multi-objective scheduling function and constraint conditions were systematically formulated based on the current empirical scheduling approach. Through the improved incremental dynamic programming method, the pressure step of waterworks was dynamically optimized, leading to the identification of an improved scheduling strategy. Improved incremental dynamic programming method demonstrated excellent practicability in optimizing water supply network scheduling. It not only ensured that the water supply pressure throughout the LA city fully complied with the standard but also effectively reduced the leakage rate. Compared to the current empirical scheduling methods, improved incremental dynamic programming method achieved a significant improvement in water supply benefits.

Key words: water supply network; waterworks and pipe network integration; incremental

基金项目: 上海勘测设计研究院有限公司项目(2022QT<83>-068)

通信作者: 张坤林 E-mail: zyjzkl@163.com

dynamic programming method; optimized scheduling

近年来,城市化率和居民生活水平的提高对城市供水运营管理水平提出了更高要求。LA市城区地势高处或距离水厂较远的地区在用水高峰期经常出现供水水压不足的情况,而水厂盲目提高供水压力又会导致管网漏损量或爆管事件增加。目前LA市水厂调度主要依赖人工经验进行恒压供水,但这种方法一方面灵活性不足且存在能耗浪费的问题,另一方面也难以解决地形起伏导致的部分区域压力不足而部分区域压力偏高的矛盾^[1]。因此,亟须能够生成厂网多目标调度方案的优化算法,以实现用户满意度及供水企业效益双赢的目标。

目前,相关学者已将多种传统或智能算法应用于城市供水优化调度研究。李唯特^[2]基于宏观水力模型采用ABC-ELM算法及人工蜂群算法对水厂供水量和出口压力进行寻优,降低了漏损率。林峰等^[3]利用朴素贝叶斯机器学习模型,在深圳市5座水厂实现“控压好、次数少、能耗低、空间大”的供水调度目标。戴雄奇等^[4]通过遗传退火模拟算法快速生成方案,对某水司供水厂站进行自动化调度控制,降低了厂站能耗。胡诗苑等^[5]利用近端策略优化(PPO)改进了马尔可夫决策过程(MDP),有效提高了加压泵运行效率。Du等^[6]基于遗传算法对水厂加压泵进行节能降耗调度,并在苏州某水厂开展应用。上述研究主要采用智能算法与大数据学习实现了提质增效的目的,但在实际应用中也存在模型算法需要大量数据支撑、模型自学习耗时较长、寻优过程中存在一定随机性的问题。

笔者以LA市中心城区为研究对象,该区域的两座自来水厂日常处于满负荷甚至超负荷供水状态,现状可优化调度空间较小,并且历史数据量相对较少,采用智能算法可行性较低。增量动态规划法已经在传统水库优化调度中取得了广泛且良好的应用^[7],因此采用增量动态规划法对LA市中心城区供水厂网进行优化调度,并结合PID逻辑改进算法,一方面以现状调度过程为初始调度线进行寻优,降低优化结果的随机性,确保结果不会脱离实际;另一方面通过PID逻辑优化动态寻优的压力步长,降低压力步长的随意性,通过调整压力步长使调度曲线能快速、准确地达到设定目标^[8]。本算法

相比传统动态规划算法不仅寻优速度更快,且降低了算法本身参数对计算结果随机性的影响。

1 研究区域概况

LA市中心城区主要由一水厂和二水厂进行供水,两座水厂常处于超负荷运行状态。一水厂当前设计供水量为 $10\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,2023年日均供水量为 $10.28\times 10^4\text{ m}^3$,高程为49.98 m,位于城区最南端,有DN800、DN1 200两根出厂管。二水厂设计供水量为 $10\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,2023年日均供水量为 $9.59\times 10^4\text{ m}^3$,高程为53.43 m,位于城区中心的核心位置。中心城区用户节点最高高程为83.65 m,最低高程为30.46 m,落差为53.19 m。根据当地供水要求,为了保障用户用水充足且平稳,各用户节点压力应全天不小于14 m。

2 技术方法

2.1 水力模型构建

对水厂泵房进行概化,对管网数据进行拓扑关系合理性检查、管网连通性检查和重复性检查。采用EPANET软件建立LA市中心城区供水厂网模型,如图1所示。其中,水厂两座,管网共4 126段、总长为235.25 km,管网节点为4 066个,平均高程为47.63 m。



图1 模型及研究范围示意

Fig.1 Schematic diagram of model and research scope

2.2 模型校准

选择2023年7月21日—28日的供水厂网运行

工况进行模型模拟,设定计算时间间隔为1 h。输入水厂当日水泵运行功率及水压进行模拟,以各监测点压力及用户用水量作为边界条件,采用K-Means聚类算法将用水户数据分为充足、不足和无数据三类,并对用水户水量边界数据进行插值补充。通过粒子种群(PSO)算法对喷射系数、摩阻系数、局部损失等进行率定。模型率定后对比42个压力监测点的实测值与模拟值,其中佛子岭路和三里桥压力监测点模拟结果见图2。有40个点位的平均误差为1.86 m,符合《城镇供水管网模型构建与应用技术规程》中的供水模型率定要求:管网节点压力模拟计算结果与压力监测点数据误差应符合90%压力监测点,平均误差应小于20 kPa(相当于2.04 m水柱产生的压力)。

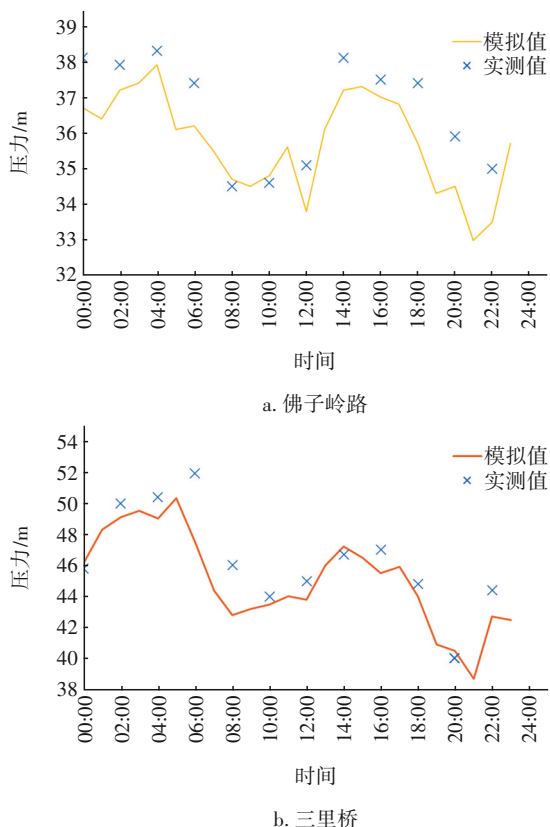


图2 佛子岭路和三里桥压力监测点模拟结果

Fig.2 Simulation results of Foziling Road and Sanliqiao pressure monitoring points

2.3 优化调度算法

2.3.1 调度目标分析

目前LA市中心城区供水主要存在部分区域水压不足的情况,而单方面增加出厂水压力又会导致漏损水量增大或爆管事件增加。现状供水范围见

图3,中心城区居民集中的老城区主要由二水厂供水(黄色部分),一水厂DN1 200管道主要供水范围为城区外围(红色部分),二水厂西北侧小部分(蓝色部分)由一水厂DN800管道和二水厂同时供给,城区东南侧(紫色部分)由一水厂DN800管道供给。

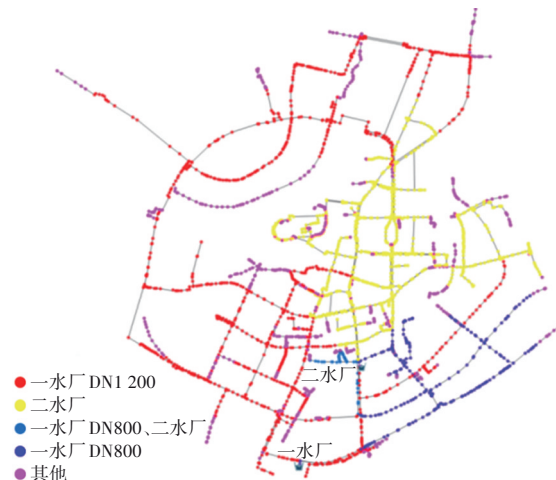


图3 水厂供水范围

Fig.3 Water supply scope of waterworks

LA市供水管网整体压力主要呈现西高东低趋势,这与LA市地形西低东高有关,与节点高程分布相匹配,如图4所示。LA市中心城区西侧、北侧、西北侧高程(蓝色和绿色部分)均低于一水厂、二水厂高程,不存在水压力不足的问题。中心城区东南侧高程(红色和橙色部分)均大于一水厂、二水厂高程,在距离水厂较远区域出现高峰期供水压力不足的情况。

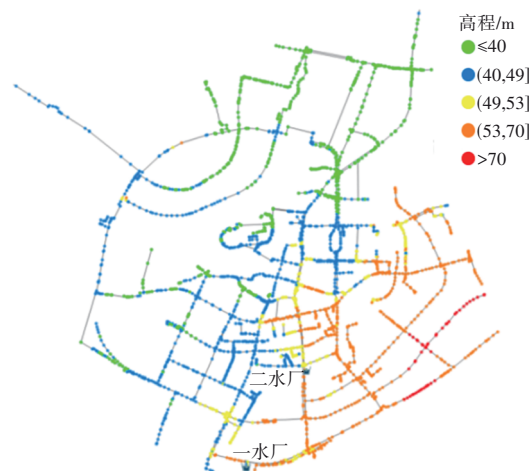


图4 用户节点高程分布

Fig.4 Elevation distribution of user nodes

用水高峰期主要存在2处供水不利区域,如图5所示。区域1主要由二水厂进行供水,该区域平均高程为70 m,大于二水厂高程(53.43 m),高程差相对较小,但位于中心城区最东部,距离水厂较远,且水厂供水经过居民集中区后流至此处,导致其中最不利压力点在用水高峰期压力不达标。区域2由二水厂及一水厂DN800进行供水,位于主城区东南角,用水户数量相对较少,但距离水厂相对较远,沿途经过密集的新建小区,且多为高层住宅,人口较多,此外该区域高程均大于70 m,最大高程为83.65 m,与一水厂高程差达到33.67 m,高程差较大,导致该区域整体供水压力保证情况相对较差。

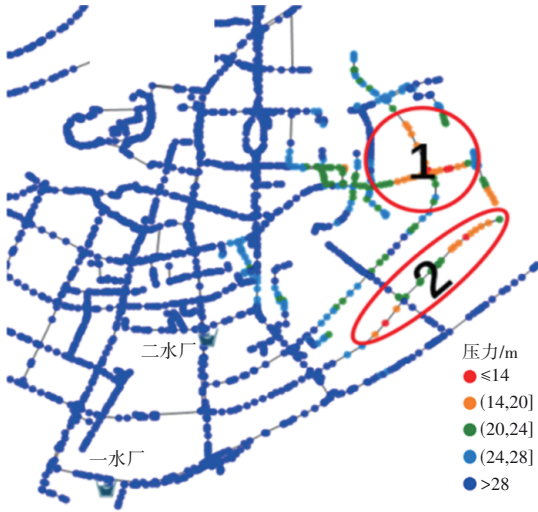


图5 供水不利点区域

Fig.5 Area of unfavorable water supply points

2.3.2 目标函数构建

根据LA市中心城区供水用户压力保证要求与压力现状情况,并基于DMA分区漏损水量的评估,收集管网漏损指标,以保障用户全天压力稳定达标和降低片区内管网漏损量为决策目标,融汇形成决策目标函数。对EPANET进行二次开发,通过设置不同水厂的出厂压力、出厂流量和管网压力等构建多种调度方案,并进行批量运行模拟,计算目标函数,以确定最优方案。目标函数见式(1)~(3)。

$$f_{\text{sum1}} = \sum_{t=1}^T \omega (l_t - l'_t) \quad (1)$$

$$f_{\text{sum2}} = \sum_{i=1}^T \theta (H'_i - H_i) \quad (2)$$

$$\max f_{\text{sum}} = f_{\text{sum1}} + f_{\text{sum2}} \quad (3)$$

式中: f_{sum1} 为漏损控制带来的经济效益; f_{sum2} 为

用户压力保证带来的满意度效益; l_t 为调度前的漏损量; l'_t 为调度后的漏损量; ω 为漏损量带来的经济损失系数; θ 为用户压力保证率带来的满意度系数; H_i 为调度前的用户压力保证率; H'_i 为调度后的用户压力保证率。

2.3.3 约束条件构建

在实际调度过程中存在众多限制,如水厂供水能力和水泵运行能力限制等。因此在进行算法寻优时,也需要相应的约束条件对方案进行约束,并利用PID逻辑确保控制闭环和相应的阈值安全^[9]。通过评估现状供水运行情况,拟设定4个约束函数,包括单时段供水量约束、24 h供水量约束、变速泵扬程约束和节点压力约束,分别见式(4)~(7)。

$$k_{\min} Q_{mt} \leq Q'_{mt} \leq k_{\max} Q_{mt} \quad (4)$$

$$l_{\min} \sum_{t=1}^T Q_{mt} \leq \sum_{t=1}^T Q'_{mt} \leq l_{\max} \sum_{t=1}^T Q_{mt} \quad (5)$$

$$h_{\min} \leq h_{mn} \leq h_{\max} \quad (6)$$

$$H_i > H_{i,\min} \quad (7)$$

式中: $k_{\min}$ 、 $k_{\max}$ 分别为单时段供水量最小和最大变化系数; Q_{mt} 为调度前第 m 个泵站 t 时刻的供水量; Q'_{mt} 为调度后第 m 个泵站 t 时刻的供水量; $l_{\min}$ 、 $l_{\max}$ 分别为24 h供水量最小和最大变化系数; $h_{\min}$ 、 $h_{\max}$ 分别为变速泵运行最小和最大转速; h_{mn} 为第 m 个泵站第 n 号水泵的转速; H_i 为第 i 个节点压力保证率; $H_{i,\min}$ 为第 i 个节点最小压力保证率。

2.3.4 优化调度算法

① 优化调度算法原理

厂网调度多目标优化算法采用的核心原理为增量动态规划法,本研究在该算法基础上进行改进创新:一是优化了压力步长迭代计算方案;二是根据实际情况与优化函数构建了多个迭代过程。技术路线如图6所示。

增量动态规划法优化步骤如下:①以现状调度方案为初始调度线;②在初始调度线附近上下各取一个增量形成“廊道”;③在廊道区域范围内用常规动态规划方法寻优,压力步长为 a ,在迭代计算过程中优化压力步长;④反复计算直至收敛。以新的调度线作为初始调度线,按步骤②和③继续迭代寻优,直至满足收敛条件得到最优结果^[10]。

优化调度算法开发采用python语言调用EPANET开源模型引擎进行模拟,主要计算内容分为水力模型模拟、根据学习压力步长优化水厂供水和边界条

件判断三部分。算法流程如图7所示。

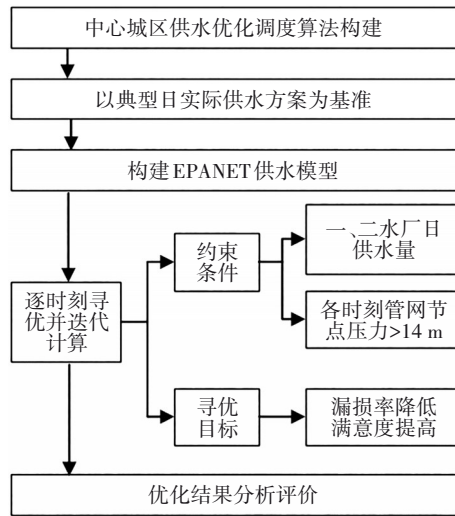


图6 优化调度算法开发流程

Fig.6 Development flow of optimization scheduling algorithm

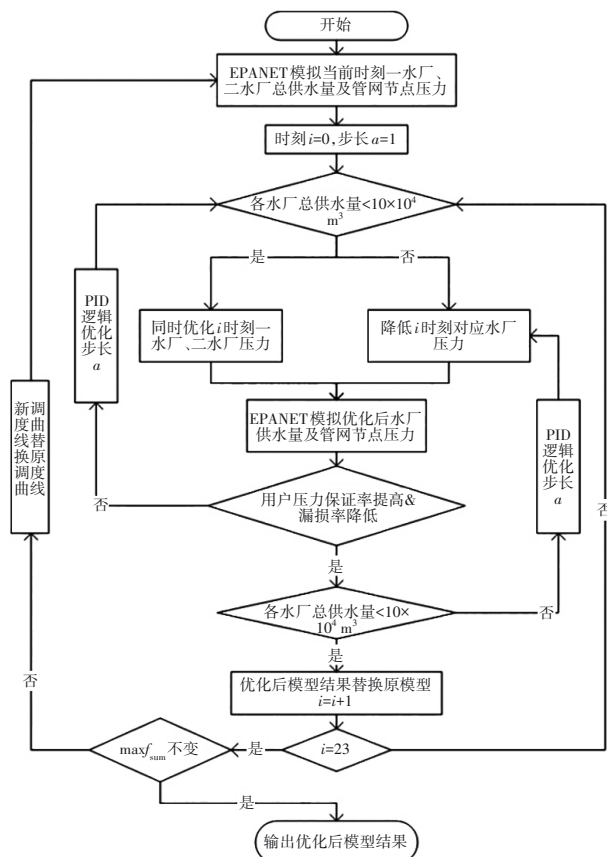


图7 算法逻辑流程

Fig.7 Chart of algorithm logic flow

算法包含三重循环迭代:①单时刻迭代,根据初始调度曲线和压力步长 a ,对第 i 时刻各水厂供水进行优化计算,并判断该时刻是否既满足漏损量减

小又能使各管网节点最小供水压力达到标准;若“是”则进入下一步,若“否”则根据现有压力与预期压力差距调整压力步长 a ,并重新优化第 i 时刻各水厂供水。重复上述过程直至满足判断条件或相应目标函数没有变化,则终止循环。②全天迭代,从00:00—23:00逐时刻重复①中迭代,从而寻找到全天优化后的调度方案。③最优迭代,以全天迭代计算结果作为下一次迭代计算的初始调度线,重复上述两个迭代,直至目标函数收敛则停止循环,从而寻找到最优调度方案。

算法核心逻辑为优化不同时刻各水厂的出厂压力组合,寻找模型模拟后当前时刻各管网节点中最小压力点 P_{2min} 及其对应的水厂供水压力 P_{sc} ,根据最小压力与限定压力14 m的差值及压力步长 a 调整对应水厂供水压力,见式(8)。

$$P_{sc} = P_{sc} + a \times (14 - P_{2min}) \quad (8)$$

结合PID逻辑调整压力步长 a ,主要影响因素为最小压力点优化前压力 P_{1min} 与优化后压力 P_{2min} 的差值,以及 P_{2min} 与限定压力14 m的差值,优化后步长 a' 见式(9)。

$$a' = a \times (|14 - P_{2min}| / |P_{1min} - P_{2min}|) \quad (9)$$

② 优化调度算法应用

以2023年7月21日供水运行工况作为初始方案进行优化调度,为更直观比较,设置了两种方案:方案一,不改变初始调度模式,仅增加各厂供水压力,保证各管网节点全天最小压力不低于14 m;方案二,采用优化调度算法对初始调度模式进行优化,既保证用户端满足最小压力标准,又减少漏损。

供水量方面,现状初始方案的日总供水量为198 835.76 m³,其中一水厂DN1 200的日供水量为84 098.50 m³、一水厂DN800日供水量为32 685.64 m³、二水厂日供水量为82 051.62 m³;经模拟计算,方案一日总供水量为202 157.38 m³,相较初始方案总供水量增加3 321.62 m³,增长率为1.67%,其中一水厂DN1 200日供水量为82 669.03 m³、一水厂DN800日供水量为29 623.55 m³、二水厂日供水量为89 864.81 m³;经优化调度以后,方案二日总供水量为196 593.10 m³,相较于初始方案总供水量减少2 242.66 m³,漏损率减少1.13%,其中一水厂DN1 200日供水量为67 319.40 m³、一水厂DN800日供水量为33 020.77 m³、二水厂日供水量为96 252.93 m³。

水厂出厂水头方面,初始方案一水厂DN1 200日平均水头为95.31 m、一水厂DN800日平均水头为109.10 m、二水厂日平均水头为93.24 m;方案一中一水厂DN1 200日平均水头为99.00 m、一水厂DN800日平均水头为109.54 m、二水厂日平均水头为97.50 m;方案二优化后一水厂DN1 200日平均水头为91.71 m、一水厂DN800日平均水头为108.08 m、二水厂日平均水头为92.08 m。

3 优化结果分析

城区用户端日最小压力变化如图8所示。由图8和方案一日供水量变化可知,方案一中水厂通过直接加压的方式使各管网节点全天压力均不低于14 m,各管网节点中,全天最小压力为21:00的J01023,节点压力为14 m,因此管网节点压力保证率为100%。方案一与初始情况相比,管道压力变大,当日总供水量增加了3 321.62 m³,在用户用水量不变的前提下,这部分水量全部漏损,漏损率升高了1.67%,同时也加大了爆管事件发生的风险。

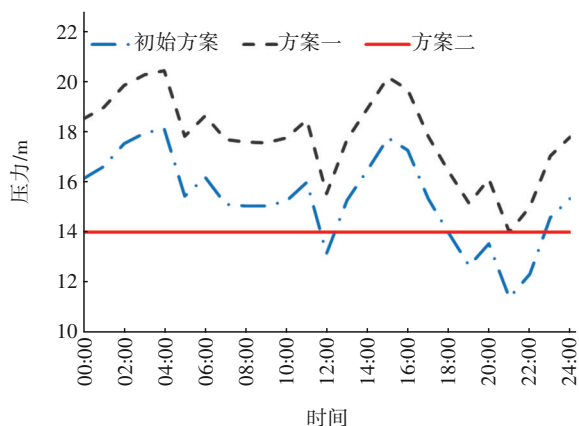


图8 各时刻用户最小压力变化

Fig.8 Minimum pressure change of users at each moment

由图8和方案二日供水量变化可以看出,方案二采用优化算法后,使各时刻管网节点最小压力收敛至13.99~14.01 m,管网节点压力保证率可视为100%。与初始方案相比,方案二日总供水量减少2 242.66 m³,漏损率降低1.13%,与方案一相比,其日总供水量减少5 564.28 m³,漏损率降低2.8%。

供水不利区域在早晚用水高峰时段的压力分布如图9所示(红色为压力小于14 m区域)。可以看出,采用优化调度方案二后,之前供水压力不足的区域压力现已达标。通过分析各方案水厂出厂压力发现,方案二优化调度算法中各水厂供水压力

比初始方案及方案一均有所降低,在整体供水压力降低的情况下有助于降低漏损量。二水厂供水量显著增加且供水压力全天相对平稳,该工况与二水厂处于中心城区核心位置和供水范围分布的情况相匹配,能够就近供水,并起到稳定中心城区压力的作用,尤其是在用水高峰期保障了用户端最小压力达标。一水厂两根不同口径出水管压力呈现显著的用水高峰期压力增大和用水低峰期压力减小的结果,起到了削峰填谷的作用,且通过算法优化,将一水厂日供水量从超负荷降低到设计值以下。

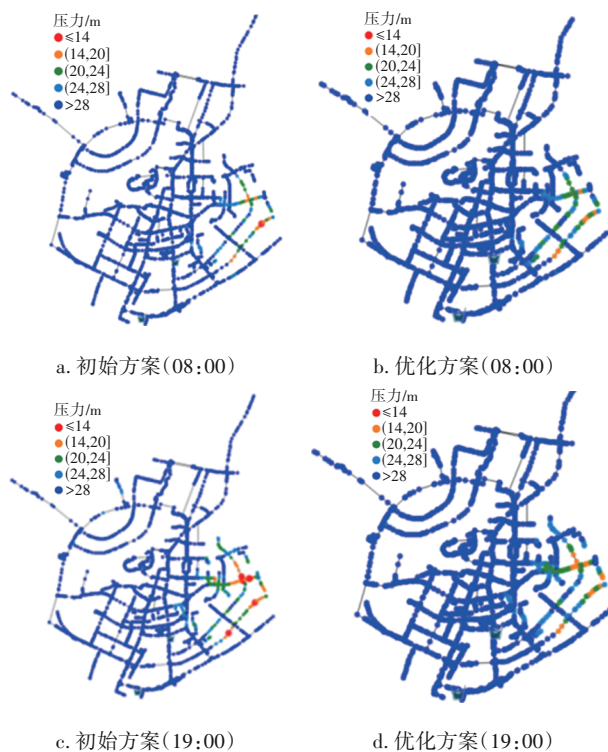


图9 优化前后的压力分布

Fig.9 Pressure distribution before and after optimization

以上结果说明,采用本研究的优化调度算法,通过动态调整各水厂出厂水压降低管网负荷,有助于减少漏损,同时能够满足全天各用户节点最小压力均不小于14 m的目标,各时刻压力也相对平稳。受限于中心城区两座水厂的设计能力、地理位置、高程分布和现状用水情况,该优化调度算法在LA市的主要贡献在于保障用户用水压力全天都相对稳定地达到最低标准,能够有效提升用户满意度,但是无法大幅降低管网漏损率。

4 结论

基于EPANET构建了LA市中心城区高精度供

水厂网水力模型,以保障供水压力达标和降低管网漏损率为核心目标,构建了供水厂网优化调度算法。该算法将传统增量动态规划法作为理论基础,对寻优过程中压力步长进行动态优化,从而形成改进的增量动态规划法,可保障寻优结果切合实际且收敛更快,具备创新性。利用上述算法对LA市中心城区现状调度方案进行优化,优化后的调度方案能充分发挥多厂联合调度优势,在用户端实现了供水压力100%达标,提高了供水压力的稳定性,同时使管网漏损率降低了1.13%,提高了经济效益。对于具有多水厂联合调度场景的供水公司来说,本研究的调度优化算法在提高企业智慧化运营调度能力和实现提质增效方面具有积极的指导作用。

参考文献:

- [1] 赵美玲,张巧珍,朱俊,等. 基于在线模型的供水管网优化调度系统设计[J]. 中国给水排水,2022,38(16): 35-39.
ZHAO Meiling, ZHANG Qiaozhen, ZHU Jun, *et al.* Design of optimal dispatching system of water supply network based on online model [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(16): 35-39 (in Chinese).
- [2] 李唯特. 基于人工智能的城市供水两级优化调度应用研究[D]. 青岛:青岛大学,2022.
LI Weite. Application Research on Urban Water Supply Two-level Optimization Scheduling Based on Artificial Intelligence [D]. Qingdao: Qingdao University, 2022 (in Chinese).
- [3] 林峰,李旭,曾翰,等. 某大型城市智能供水调度优化算法研究与模拟实践[J]. 中国给水排水,2023,39(9):109-115.
LIN Feng, LI Xu, ZENG Han, *et al.* Optimized algorithm of intelligent water supply scheduling and its simulation practice in a large city [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(9): 109-115(in Chinese).
- [4] 戴雄奇,徐维发,华兵,等. 基于模型驱动的供水自适应调度应用研究[J]. 给水排水,2024,50(5): 141-146.
DAI Xiongqi, XU Weifa, HUA Bing, *et al.* Application research of model-driven based adaptive scheduling in water distribution systems [J]. Water & Wastewater Engineering, 2024, 50(5): 141-146(in Chinese).
- [5] 胡诗苑,高金良,钟丹,等. 供水管网实时优化调度深度自注意力强化学习框架[J]. 给水排水,2023,49(7):135-139.
HU Shiyuan, GAO Jinliang, ZHONG Dan, *et al.* Deep self-attention reinforcement learning framework for real-time optimal scheduling of water distribution network [J]. Water & Wastewater Engineering, 2023, 49(7): 135-139 (in Chinese).
- [6] DU B G, ZHA D H, GUO J. Optimization of pump scheduling in waterworks considering load balancing using improved genetic algorithm [J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems: Applications in Engineering and Technology, 2023, 44(6):9651-9669.
- [7] 李芳芳. 大型梯级水电站调度运行的优化算法[D]. 北京:清华大学,2011.
LI Fangfang. Optimization Research of Large Scale Multiple Reservoirs [D]. Beijing: Tsinghua University, 2011(in Chinese).
- [8] 李宏光,刘骥鹏,黄静雯. 自适应变步长迭代动态规划方法及其在间歇过程优化中的应用[J]. 控制与决策,2015,30(11):2048-2054.
LI Hongguang, LIU Jipeng, HUANG Jingwen. Self-adaptive variable-step approach for iterative dynamic programming with applications in batch process optimization [J]. Control and Decision, 2015, 30(11): 2048-2054 (in Chinese).
- [9] 李钢. 基于模糊PID控制的恒压供水系统的研究[J]. 电子设计工程,2024,32(13):83-87.
LI Gang. Research on constant pressure water supply system based on fuzzy PID control [J]. Electronic Design Engineering, 2024, 32(13): 83-87 (in Chinese).
- [10] 冯雁敏,陈守峰,张雪源. 基于变基增量动态规划梯级水电站短期优化调度研究[J]. 水电能源科学,2011,29(11):55-59.
FENG Yanmin, CHEN Shoufeng, ZHANG Xueyuan. Research on short-term optimal scheduling of cascade hydropower stations based on mutative increment dynamic programming[J]. Water Resources and Power, 2011, 29(11): 55-59(in Chinese).

作者简介:张坤林(1995-),男,江苏睢宁人,硕士,工程师,主要从事供水模型优化调度与系统开发工作。

E-mail:zyjzkl@163.com

收稿日期:2024-09-30

修回日期:2024-12-27

(编辑:任莹莹)