

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.09.009

改进粒子群算法耦合水力模型的供水优化调度分析

刘祥祥^{1,2}, 朱一松^{1,2}, 高越飞¹, 邓 轲¹, 刘炳义^{1,2}, 陈 华²

(1. 武汉大水云科技有限公司, 湖北 武汉 430000; 2. 武汉大学水利水电学院 智慧水业研究所, 湖北 武汉 430000)

摘 要: 城市供水管网中由于供水距离过长或水量调节的需要,往往要增设二级、三级加压泵站,然而目前大多依靠操作人员的相关经验调控水厂及各级泵站的运行,这使得城市的供水安全保障大大降低。基于此,提出了一种基于改进粒子群算法耦合水力模型的供水优化调度方法,以片区内水厂及各级泵站运行的总能耗最小为目标,以控制点水压为主要约束条件,对片区内水厂和各级泵站的运行情况进行求解,给出最优化的调度方案。结果表明,经优化调度后,片区内水厂和各级泵站24 h运行的总能耗降低了约15%,各控制点的压力均值及压力波动明显减小,且均满足最小压力需求,这对降低管网的爆管可能及漏损率均有重要意义,也提高了供水安全保障能力,可见所建立的优化调度方法具有明显的经济效益和社会效益。

关键词: 改进粒子群算法; 供水管网; 水力模型; 优化调度; 节能降耗

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)09-0059-07

Optimization of Water Supply Scheduling Using Modified Particle Swarm Algorithm Integrated with Hydraulic Model

LIU Xiang-xiang^{1,2}, ZHU Yi-song^{1,2}, GAO Yue-fei¹, DENG Ke¹, LIU Bing-yi^{1,2}, CHEN Hua²

(1. Wuhan Dashuiyun Technology Co. Ltd., Wuhan 430000, China; 2. The Institute of Smart Water, School of Water Resources and Hydropower Engineering, Wuhan University, Wuhan 430000, China)

Abstract: Due to the extensive water supply distance or the necessity of flow regulation in urban water supply networks, it is often required to establish secondary and tertiary pressurized pumping stations. However, currently, most operations rely heavily on the subjective experience of operators for regulating the functioning of water plants and pumping stations at various levels, which significantly compromises the reliability and security of urban water supply systems. In this paper, a water supply optimization scheduling method was proposed, which integrates an enhanced particle swarm optimization algorithm with a hydraulic model. This method aims to minimize the total energy consumption of water plants and pumping stations in the region, using the water pressure at control points as the primary constraint, and provide an optimal scheduling scheme by solving the operational conditions of water plants and pumping stations. After the implementation of the optimized scheduling, the total energy consumption of water plants and pumping stations at all levels within a 24-hour operational cycle in the region was reduced by approximately 15%. Additionally, the average pressure and pressure fluctuations at each control point were significantly decreased, while still meeting the minimum pressure requirements. This

plays a crucial role in reducing the likelihood of pipe bursts and the leakage rate of the pipeline network, thereby enhancing the safety and reliability of water supply. The findings indicate that the optimized scheduling approach yields substantial economic and social benefits.

Key words: modified particle swarm algorithm; water supply networks; hydraulic model; optimized scheduling; energy saving and consumption reduction

供水管网作为保障城市安全平稳运行的基础设施之一,是居民日常生活和城市工业生产的重要基础。一个片区的城市供水管网往往由水厂、各级泵站和管道系统及其附件组成。而在整个供水管网中,能源消耗最大的部分便是水厂和各级泵站的水泵泵水过程,大约占供水系统总能耗的70%^[1]。目前,多数水厂及泵站的水泵运行还是采用基于经验的人工调度方式,并没有进行智能精准的调控,这种方式不仅造成了大量的能量浪费和水量漏损,往往也会导致供水系统供需不平衡、用水高峰时水压不足等问题,同时由于管网压力波动较大,也使得管网的爆管几率增大。因此,针对供水管网实际运行情况,根据24 h内不同时刻的用水量,提供一种精确的水厂及各级泵站的调度方案便显得十分必要。

人工智能算法耦合水力模型是常用的一种提供优化调度方案的方法。工程中经常采用的人工智能算法有人工神经网络、粒子群优化算法、遗传算法、模拟退火算法等,本研究采用改进的粒子群算法作为寻优方法^[2-3]。目前使用较多的供水管网水力模型软件有EPANET、WaterGEMS、InfoWorks WS、MIKE NET,以及上海慧水科技有限公司基于EPANET开发的WaterDesk^[4-5]。由于本研究需要对模型软件相关代码进行二次开发,因此采用开源软件EPANET2.1作为模型计算引擎与改进粒子群算法耦合,它是一个可以执行有压管网水力和水质特性延时模拟的计算机程序,通常包括管道、节点、水泵、阀门、水库和水池等组件。但是在进行模型构建时采用WaterDesk3.1.0作为建模软件,由于WaterDesk是基于EPANET进行开发的,其运行模拟结果与EPANET一致,且可以将模型导出成inp文件直接输入EPANET,而其在模型构建时的便携性要远优于EPANET。

目前,已经有许多研究使用了人工智能算法耦合水力模型来进行供水优化调度,如使用遗传算法

或粒子群算法等来耦合管网宏观模型或微观模型^[1,3,6-7]。但大多关注于模型构建及人工智能算法的使用上,对人工智能算法进行改进的研究还较少,对模型耦合与寻优过程的阐述大多不够清晰。基于此,笔者使用水力建模软件建立了管网微观模型,同时对粒子群算法进行了较大改进,包括对惯性权重进行了改进,增加了惩罚函数,并且首次提出了一种自适应的惩罚函数设置公式,其非常有利于提高寻优效率及避免寻优陷入局部最优解,使改进后的粒子群算法具有较高的寻优效率及较广泛的适应性,同时较为完善地阐述了供水优化调度模型耦合与寻优的过程,旨在为后续相关研究提供参考。

1 水力模型构建与校核

1.1 项目概况及供水系统模型构建

本研究依托项目位于西南部某地区,水厂有2条主管道分别向该片区北部的北组团及片区中部的中组团供水,将整个水厂供水管网划分成北组团和中组团两个一级分区,各分区主管上均设有电磁流量计。北组团内含有3#、4#两个加压泵站,中组团内含有1#泵站一个加压泵站。水厂还有第3条主管向南组团供水,但是不在本研究范围内,模型构建时使用管段及节点J228进行概化,并选取J228作为压力控制点。

供水系统WaterDesk模型及分区如图1所示。对于北组团的二级分区,由水厂直供部分区域为B03,3#泵站在B03分区管网末端蓄水加压后向B02分区及4#泵站供水,4#泵站在B02分区管网末端直接加压后向B01分区供水,各分区边界由阀门控制。对于中组团的二级分区,由水厂直供部分区域为Z02,1#泵站在Z02分区管网末端蓄水加压后向Z01分区供水。实际管网中还包括B01分区末端的另一个小分区,但是不在本研究范围内,模型构建时使用管段及节点J230进行概化,并选取J230作为B01分区压力控制点。同时,选取其他各个二级分区内

1~2个最高和最远点作为压力控制点,Z01分区选J125,Z02分区选J98,B02分区选J229,B03分区选J201、J51。

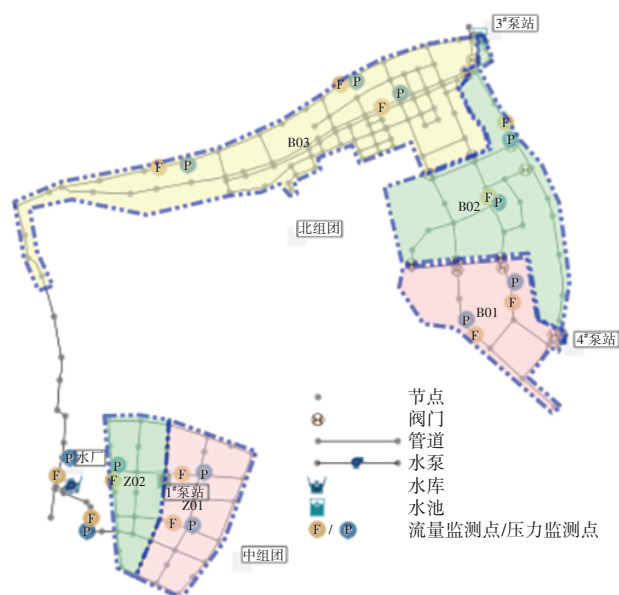


图1 供水系统WaterDesk模型及分区示意

Fig.1 Schematic diagram of water supply system
WaterDesk model and partition

首先根据管网GIS属性数据构建供水系统基本拓扑结构,然后利用各用户点抄表信息按照就近原则将用户水量分配给最近的节点,同时各独立分区分别设置不同的需水量模式,需水量模式用于表示各个节点24 h内的用水量变化^[8]。水厂采用水库+水泵的方式模拟,包括4台并联的同型号水泵;1#和3#泵站采用“水池+水泵”的模拟方式表示蓄水加压,1#泵站包括2台同型号并联的水泵,3#泵站包括3台同型号并联的水泵;4#泵站采用水泵模拟表示直接加压,包括2台同型号并联的水泵。设置水厂及各级泵站内水泵的特性曲线及效率曲线。设置各个水泵的模式,水泵模式用以调控水泵24 h内各时刻的转数比,每个时刻默认值均设置为1,同时研究区域所有的水泵均设置为调速泵。构建模型时,南组团及B01分区末端的一个小片区不在研究范围内,因此使用管段及节点概化,片区需水量概化为末端节点需水量。整个管网片区的日均供水量约为 $13.1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,研究区域管网节点约为233个,管段约为273条。

1.2 模型校核与验证

供水管网水力模型初步构建完成以后需要进

行模型校核与验证,达到预期精度后才可以使使用。模型的校核主要包括以下三个方面:基础数据的检查与修正、模型拓扑结构的检查与修正、供水模型关键参数的校核。前两个方面大多在模型构建时同步进行,最后一个方面则大多在模型初步建立以后进行。

针对一些影响模型精度的关键性参数还需要进一步校核和调整。由于供水系统中流量和压力是两个重要的状态量,因此常被用来进行参数校核。根据《城镇供水管网模型构建与应用技术规程》和《城镇供水管网运行、维护及安全技术规程》,本模型采用如下标准校核:90%的节点压力模拟计算结果与压力监测点数据平均误差应小于20 kPa,90%的管段流量模拟计算结果与管段流量监测点数据平均误差应小于10%。

采用WaterDesk软件的SCADA系统来评价模型的精度,通过该系统导入监测数据,并与模拟数据进行比较,从而计算出当前模型的精度。本次模型精度校核使用流量和压力两个指标作为评价标准,分别评价了12个压力点位和12个流量点位的模型精度,主要校核了管网节点需水量和管道摩阻系数两个参数。经校核后,模型的精度和流量精度均满足标准要求,100%的监测点达标,水平优秀,模型精度高。

2 改进粒子群算法及模型耦合

2.1 标准粒子群算法

对于标准粒子群算法,在一个 D 维空间里,分布有诸多粒子,每个粒子可以看作是 D 维空间中的一点,每个粒子可以用位置与速度两个指标来描述。针对任意一个粒子,有式(1)、(2):

$$v_{id}^{j+1} = wv_{id}^j + c_1 \cdot \text{rand}() \cdot (p_{id}^j - x_{id}^j) + c_2 \cdot \text{rand}() \cdot (p_{gd}^j - x_{id}^j) \quad (1)$$

$$x_{id}^{j+1} = x_{id}^j + v_{id}^{j+1} \quad (2)$$

式中: $d=1,2,\dots,D$,表示空间维度; j 为种群迭代次数; w 为惯性权重,非负值,决定粒子保持上一次迭代速度的占比大小, $\text{rand}()$ 用于生成两个独立的随机数,取值范围为 $[0,1]$; c_1 、 c_2 为学习因子,通常取值在0~2之间, c_1 决定粒子向其历史找到的最优位置搜索的趋势,代表粒子的记忆认知, c_2 决定粒子向当前种群最优位置搜索的趋势,代表粒子的社会认知; x_{id}^j 为第 i 个粒子经过 j 次迭代后在第 d 维上的

位置; p_{id}^j 为第*i*个粒子经过*j*次迭代后在第*d*维上的历史最优位置; v_{id}^j 为第*i*个粒子经过*j*次迭代后在第*d*维上的速度分量; p_{id}^j 为种群在经过*j*次迭代后在第*d*维上的种群最优位置。

粒子在搜索飞行的过程中,其运动的轨迹是随机的,因此必须限制粒子的位置和速度范围,即 $x_{\min} \leq x \leq x_{\max}$ 、 $v_{\min} \leq v \leq v_{\max}$,迭代中若粒子的位置和速度越过了该范围,可取其边界值^[7,9]。

对于优化计算进程,所有粒子模拟鸟群飞行寻食的过程,粒子位置 x_i 代表优化问题的一组可行解,粒子速度 v_i 代表粒子搜索时飞行的方向和距离,每个粒子更新位置后通过适应度值来评价当前位置的优劣,适应度值一定程度上代表了目标函数值。对于优化进程的*t*时刻,通过评价粒子当前位置、粒子历史最优位置、种群最优位置等来判断*t+1*的飞行方向和距离,解空间中的粒子群体按照位置更新式(1)进行位置更新,整个优化过程即完成了1次迭代。通过不断迭代,粒子个体的历史最优适应度、整个种群最优适应度得到不断更新,空间里的粒子群体就是不断追捕这两个最优适应度,不断调整前进方向,直到搜寻到空间全局最优适应度,完成寻优进程。

2.2 改进粒子群算法

2.2.1 对惯性权重的改进

改进的惯性权重 w 不只是固定的值,而是随迭代步骤逐步递减的值,见式(3)。

$$w = w_{\max} - (w_{\max} - w_{\min}) \cdot (t/t_{\max}) \quad (3)$$

w 值越大表示对上一步速度继承的越大,粒子飞行速度越快。优化进程前期,粒子的 w 较大,有利于粒子在整个搜索空间内进行寻优,快速接近全局最优位置,避免陷入局部最优解;优化进程后期,粒子的 w 较小,有利于粒子集中在全局最优位置附近寻优,方便找到全局最优解。通常 w_{\max} 取0.9、 w_{\min} 取0.4可以取得较优异的优化性能,具体取值根据实际研究情况进行调试^[9]。

2.2.2 增加惩罚函数

实际工程实践中面临的优化问题往往带有约束条件,一般称之为约束优化问题,目前引入惩罚函数是处理约束优化问题的常用方法。通过在目标函数中引入惩罚项来构造适应度函数,将约束优化问题转换为无约束的优化问题,这是惩罚函数的

核心思想。惩罚函数法易于执行和使用,故而其应用广泛,但是如何合理地设置惩罚系数是个难题,在实际求解过程中往往需要多次尝试来调整惩罚系数^[10]。

一般约束优化问题可以表现为如下形式^[11]:

$$\min f(x) \quad x = (x_1, x_2, \dots, x_D) \in R^D \quad (4)$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} u_i(x) = 0 & i = 1, 2, \dots, m \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} v_j(x) \geq 0 & j = m+1, m+2, \dots, n \end{cases} \quad (6)$$

式中: $f(x)$ 为目标函数; $u(x)$ 与 $v(x)$ 为约束条件。

通过增加惩罚函数,可以把上述问题转换为如下形式:

$$\text{minfitness}(x) = f(x) \pm \left\{ \sum_{i=1}^m A_i \cdot |u_i(x)|^\alpha + \sum_{j=m+1}^n A_j \cdot \max[0, -v_j(x)]^\beta \right\} \quad (7)$$

式中: $\text{fitness}(x)$ 为适应度函数或适应度值;式(7)右侧第2项称为惩罚函数或惩罚项,其中 A 为惩罚系数或惩罚因子, α 、 β 为不小于1的值。当 x 的取值在可行域时,惩罚函数值为0,此时适应度函数 $\text{fitness}(x)$ 值等于目标函数值 $f(x)$,适应度函数即为目标函数。

2.2.3 对惩罚系数进行改进

惩罚系数的合理设置是惩罚函数法应用过程的一大难题,设置不合理很有可能导致寻优结果超出约束条件范围或不是全局最优解。常用的惩罚系数设置方法包括静态惩罚系数法、动态惩罚系数法、自适应惩罚系数法。本研究首次提出了一种自适应的惩罚系数设置公式,不仅使惩罚系数 A 可以随着粒子群中可行解的个数发生变化,且仅有两个需要调整的参数,使用方便,见式(8)。

$$A(\sigma) = 2^{\mu \left(\frac{1}{\sigma + \gamma} - \frac{1}{1 + \gamma} \right) + 1} \quad (8)$$

式中: σ 为粒子群中可行解的密度; μ 、 γ 为需要调试的非负参数, γ 一般取很小的值, μ 可取较大值。

在优化进程初期,粒子群中可行解的密度较低, A 值较大,有利于促使粒子飞往可行域搜寻,随着优化进程的迭代,粒子群中可行解的密度逐渐增大, A 值逐渐减小,有利于促使粒子在可行域范围内搜索目标函数的最优值,这非常有利于提高寻优效率及避免寻优陷入局部最优解。

2.3 模型耦合与寻优

2.3.1 目标函数与约束条件

本研究以城市供水系统节能降耗、稳压减漏为目标,对水厂、供水管网、各级泵站等进行统一调度和一体化管理,以求实现各涉水要素的信息化、自动化和智慧化运行,从而保证城市供水系统安全、高效、稳定运行,在满足供水压力需求的同时,降低水泵运行能耗,减小管网内部压力波动,降低管网漏损率。本研究的目标函数与约束条件也是所面临的约束优化问题,可以按式(9)表示。

$$\min \text{Energy}(n) = \sum_{i=1}^{23} \sum_{j=1}^D \frac{\rho g Q_i H_i}{1000 \eta_i} \quad (9)$$

$$\text{s. t.} \begin{cases} 0 \leq n_i \leq n_{i\max} \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} P_{j\min} \leq P_j \leq P_{j\max} \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} Q_{i\min} \leq Q_i \leq Q_{i\max} \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} H_{i\min} \leq H_i \leq H_{i\max} \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} V_{k\min} \leq V_k \leq V_{k\max} \end{cases} \quad (14)$$

式中:Energy(n)表示研究区域内水厂及各级泵站所有水泵24 h运行的总能耗; ρ 为水的密度; g 为重力加速度常数; $n = (n_1, n_2, \dots, n_D)$,表示各个水泵的转数比; η_i 表示水泵 i 的效率; P_j 表示控制点 j 的压力; Q_i 表示水泵 i 的流量; H_i 表示水泵 i 的扬程; V_k 表示水池 k 内的水量体积。各参数的上、下界表示其允许的最小值与最大值^[12]。

2.3.2 模型耦合与寻优过程

使用上述所列的目标函数与约束条件通过python3.11.6、Epyt1.0.8等开源包建立改进粒子群算法。本次寻优的时间步长为1 h,即24 h内每个整点时刻均完成一次寻优迭代。在任意 t 时刻,将粒子群算法寻优进程中 n_i 的值通过Epyt包调用来完成模拟计算,然后再读取模拟结果中的 P_j 、 Q_i 、 H_i 、 V_k ,以构建目标函数与适应度函数,实现更新后粒子群的评价与寻优,并不断迭代,以此完成改进粒子群算法与水力模型的耦合及寻优过程,最终得出最优化目标,然后再进行 $t+1$ 时刻的寻优,以此循环,完成24 h内各时刻的寻优,最终给出24 h内每个时刻、每台水泵的转数比,即水泵调度方案,模型耦合与寻优过程如图2所示。各时刻寻优过程中适应度值的变化表明,本研究在24 h内,对于任意时刻的适应度值随着寻优过程的迭代快速下降,并最终趋于稳定,这表明建立的改进粒子群算法能够很好地

解决问题。

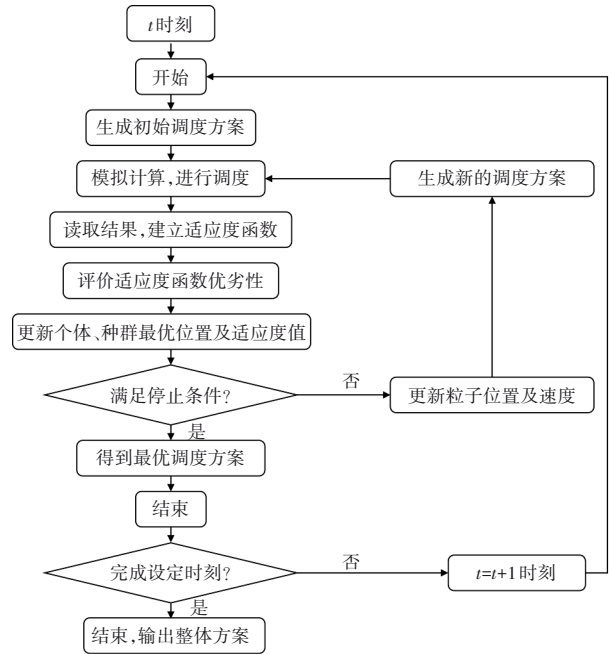


图2 模型耦合与寻优过程

Fig.2 Model coupling and excellent process

3 寻优结果与讨论

在本研究中,各控制点及其约束条件为J125、J98、J201、J51、J229的压力不小于14 m水柱(1 m水柱产生的压强约为9.8 kPa),控制点J230压力不小于30 m水柱,控制点J228压力不小于50 m水柱,所有节点压力不大于70 m水柱,由于J230和J228为末端概化的管网节点,其实际代表了一个片区,故其压力约束条件与其他控制点不同,由实际管网数据计算而来。为对比优化调度节能降耗的成效,建立优化调度前后两种工况进行模拟。

3.1 优化调度前

各水泵在默认转数比下定速运行,各控制点的压力变化如图3所示。控制点J228、J98、J125、J201、J51、J229、J230的压力均值分别为61.5、33.7、31.3、35.4、35.9、32.4和44.7 m水柱,标准差分别为5.9、17.5、8.8、15.7、14.2、13.4和17.5 m水柱。可以看出,不进行优化调度时,各控制点的压力标准差均较大,J98、J201、J51、J229、J230在13.4~17.5 m水柱之间,J228和J125在5.9~8.8 m水柱之间,这表明控制点在24 h内的压力波动较大。控制点J125、J98、J201、J51、J229的压力大部分时刻都远超14 m水柱,部分时刻甚至达到60 m水柱以上,如J98的

07:00、09:00、22:00,但是又同时存在部分时刻压力低于14 m水柱,如J201、J51的12:00,不满足供水需求;同样地,J230的压力在大部分时刻均远大于30 m水柱,部分时刻甚至达到70 m水柱以上,如04:00、05:00,但在08:00、09:00、19:00、21:00压力又低于30 m水柱,不满足供水需求;而J228虽然每个时刻均满足50 m水柱的供水压力,但各时刻平均压力为61.5 m水柱,部分时刻高达70 m水柱,造成了较大的能耗浪费。经计算,24 h内整个片区的水泵总能耗为40 554.5 kW·h。

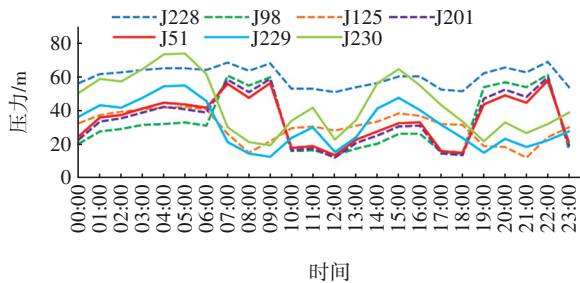


图3 优化调度前各控制点的压力变化

Fig.3 Change in pressure of each control point before optimizing scheduling

综合来看,各控制点压力变化幅度大、不稳定,部分时刻压力很高,造成能量浪费;部分时刻压力又很低,甚至不能满足供水需求。因此,针对水厂及各泵站水泵进行优化调度是十分必要的,以此来降低管网的压力变化幅度,减少能耗损失,提高供水系统的稳定性。

3.2 优化调度后

各水泵经优化调度算法调用后调速运行,由于每个时刻的需水量不同,因此水泵运行转数比也不同,优化调度后各控制点的压力变化如图4所示。控制点J228、J98、J125、J201、J51、J229、J230的压力均值分别为53.3、25.4、15.3、27.2、27.7、16.5和33.6 m水柱,标准差分别为1.2、12.2、0.3、9.3、7.5、0.5和0.6 m水柱。可以看出,控制点J125、J98、J201、J51、J229的压力在所有时刻均大于14 m水柱,满足供水压力需求,且各控制点压力平均值均较优化调度前大幅下降,各控制点压力标准差即压力波动也明显变小,尤其是J125和J229,其压力标准差仅为0.3~0.5 m水柱,压力基本维持在14.9~17.4 m水柱之间波动。同样地,控制点J230的压力在所有时刻均大于30 m水柱,满足供水需求,平均值由44.7 m水柱降至33.6 m水柱,压力标准差由

17.5 m水柱降至0.6 m水柱,压力波动也较小,稳定性明显增强。而J228在所有时刻均大于50 m水柱,且各时刻平均压力降至53.3 m水柱,压力标准差即压力波动性也明显降低。优化调度后,24 h内整个片区的水泵总能耗为34 513.3 kW·h,较优化调度前的40 554.5 kW·h降低了15%,效果明显。

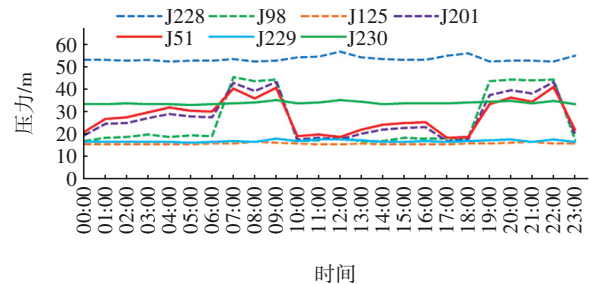


图4 优化调度后各控制点压力的变化

Fig.4 Change in pressure of each control point after optimizing scheduling

经过优化调度后所有控制点的任意时刻均满足供水压力需求,各控制点24 h的压力值均比优化调度前明显降低,总能耗浪费明显降低。由于漏损速率与压力呈正相关,故其对降低漏损率也会有明显效果,同时各控制点压力标准差即压力波动也明显减小,部分压力点24 h压力波动控制在3 m水柱以内,明显增强了供水系统的稳定性,降低爆管事故发生的可能性。

4 结论

① 通过建立供水管网微观模型并与改进的粒子群算法相耦合,以片区内水厂、各级泵站运行总能耗最小为目标函数,以控制点水压、水泵转数比、水泵流量及扬程、水池调蓄容积等为约束条件,对片区内水厂、各级泵站的运行情况进行求解,并给出最优化的调度方案。结果表明,该调度方法具有良好的应用效果,通过优化调度,不仅可以使各控制点所有时刻均满足最小供水压力需求,还能大大降低供水压力均值,从而降低整个片区管网的漏损率与供水能耗,供水能耗可以降低15%,同时可以降低各控制点压力的标准差即压力波动,这可以降低管网爆管事故发生的可能性,提高供水系统的稳定性。

② 对粒子群算法进行了较为系统的改进,使改进后的粒子群算法具有较高的寻优效率及广泛的适应性,包括对惯性权重的改进和增加了惩罚函

数,同时首次提出了一种自适应的惩罚函数设置公式,非常有利于提高寻优效率及避免寻优陷入局部最优解,且需要调整的参数仅有两个,使用起来较为方便。

③ 基于改进粒子群算法耦合水力模型进行供水优化调度,在利用原有流量、压力监测点与变频水泵等基础设施或新增少量基础设施的条件下,可为实现供水系统节能降耗、稳压减漏、优化调度提供参考。

参考文献:

- [1] 吴仪. 城市供水系统多水厂联合优化调度研究[D]. 大连:大连理工大学, 2022.
WU Yi. Study on Joint Optimal Scheduling of Multi-waterworks in Urban Water Supply System [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2022(in Chinese).
- [2] 尹轶凤. 人工神经网络在供水优化调度中的应用研究[D]. 上海:华东理工大学, 2014.
YIN Yisu. The Research of an Artificial Neural Networks' Application in Optimal Scheduling of Water Supply [D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2014(in Chinese).
- [3] 李成林. 基于遗传算法城市供水管网模型校核与优化调度研究[D]. 合肥:安徽建筑大学, 2017.
LI Chenglin. Research on Calibrating and Optimizing Dispatching of Urban Water Supply Network Model Based on Genetic Algorithm [D]. Hefei: Anhui Jianzhu University, 2017(in Chinese).
- [4] 杨开峰. 中小城市供水管网EPANET水力模型的建立和应用研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2016.
YANG Kaifeng. The Research of Small City Water Supply Network EPANET Hydraulic Model Establishment and Application [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016 (in Chinese).
- [5] 冯阳. 基于水力模型的供水管网爆管辅助定位方法的研究[D]. 西安:长安大学, 2017.
FENG Yang. Burst Detection and Location in Water Distribution Systems Based on Hydraulic Model [D]. Xi'an: Chang'an University, 2017(in Chinese).
- [6] 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. Research on the Optimization Scheduling Application of Urban Water Supply Based on Artificial Intelligence [D]. Qingdao: Qingdao University, 2022(in Chinese).
- [7] 魏科宇. 基于改进粒子群算法的城市供水系统优化研究[D]. 重庆:重庆大学, 2020.
WEI Keyu. A Research on the Optimization of Municipal Water Distribution Systems Based on Improve Particle Swarm Method [D]. Chongqing: Chongqing University, 2020(in Chinese).
- [8] 梁希桐. 华东M市供水管网水力模型的建立与运用研究[D]. 沈阳:沈阳建筑大学, 2016.
LIANG Xitong. Establishment and Application for Hydraulic Model of Water Supply Network in M City [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2016(in Chinese).
- [9] 汪华. 粒子群算法的研究及其在供水优化调度中的应用[D]. 合肥:合肥工业大学, 2011.
WANG Hua. Study of Particle Swarm Optimization and Its Applications in Urban Water Supply Scheduling [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2011 (in Chinese).
- [10] 齐燕. 带约束多目标粒子群算法的研究和应用[D]. 成都:电子科技大学, 2022.
QI Yan. Research and Application of Constrained Multi-objective Particle Swarm Optimization [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2022(in Chinese).
- [11] 王慧. 求解约束性多目标优化问题的粒子群算法及应用研究[D]. 广州:华南农业大学, 2020.
WANG Hui. Research of Particle Swarm Optimization and Its Application for Solving Constrained Multi-objective Optimization Problems [D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2020(in Chinese).
- [12] 李树平, 赵子威, 周艳春, 等. 多厂协同供水优化调度分析[J]. 给水排水, 2021, 47(6): 148-154.
LI Shuping, ZHAO Ziwei, ZHOU Yanchun, et al. Optimal operation analysis on multi-plant water system [J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 47(6): 148-154(in Chinese).

作者简介:刘祥祥(1994—),男,安徽宿州人,硕士,工程师,主要研究方向为给排水管网模型、智慧水务与数字孪生。

E-mail:1213579829@qq.com

收稿日期:2024-07-10

修回日期:2024-09-19

(编辑:任莹莹)