

一级、二级泵站与清水池联合优化调度研究

徐得潜¹, 李俊¹, 曹辉²

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 芜湖华衍水务有限公司, 安徽 芜湖 241000)

摘要: 针对一级、二级泵站的工作特性,综合考虑峰谷分时电价和清水池的调节作用对一级、二级泵站日运行总电费的影响,以一级、二级泵站日运行总电费最小和水泵机组启停次数最少为双目标,以日供水流量、一级泵站供水能力、清水池水位等为约束条件,建立一级、二级泵站与清水池分级优化调度模型,并分别采用动态规划方法、遗传算法求解模型,制定了一级、二级泵站的优化调度运行方案。实例计算结果表明,模型设计合理、有效,求解方法简单、便捷,优化后运行方案较原方案的经济效益显著提升。

关键词: 一级、二级泵站; 清水池; 分级优化调度模型; 动态规划; 遗传算法; 峰谷分时电价

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)21-0062-07

Optimal Scheduling of Primary and Secondary Pumping Stations and Water Tanks

XU De-qian¹, LI Jun¹, CAO Hui²

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Wuhu Hong Kong & China Water Co. Ltd., Wuhu 241000, China)

Abstract: Based on the operational characteristics of the pumping stations, the peak-valley time-of-use electricity prices, as well as the storage function of the water tanks, a hierarchical optimal scheduling model was applied to optimize the scheduling of primary and secondary pumping stations and water tanks. The model was established with the objective of minimizing the daily total operational electricity cost and the start/stop frequency of pumping units. The constraints included the daily water supply target, the water supply capacity of primary pumping station and the water levels of water tanks. The model was solved using both the dynamic programming method and the genetic algorithm method. The optimal operation scheme of the pumping stations was determined. The calculation results of a practical example showed that the model was reasonable and effective, the solution method was simple and convenient, and the economic benefit was significantly improved compared with the original operation scheme.

Key words: primary and secondary pumping station; water tank; hierarchical optimal scheduling model; dynamic programming; genetic algorithm; peak-valley time-of-use electricity price

供水系统是城市的用电大户,而泵站耗电量占供水系统总用电量的95%~98%。以一般的城镇

水厂而言,泵站运行电费通常占制水成本的40%~70%,甚至更多^[1]。在我国,泵站往往是按照最不

利条件下的最大流量和扬程进行规划设计的,但在运行过程中,泵站的实际流量和扬程通常低于设计工况,这时就需要对已建成的泵站进行优化调度,根据供水条件的变化随时调整水泵运行方式。然而,我国许多泵站主要依据主观经验进行调度,缺乏科学的理论指导,这就导致许多水泵机组在实际运行时处在高效范围之外,造成了大量的电能损失,或是因为泵站运行调度不合理,造成弃水量过多等。因此,对泵站进行优化调度、降低能耗、节约资源、提高泵站的经济效益和社会效益已经成为一个亟待解决的关键问题。

目前国内学者对一级泵站、二级泵站的优化调度进行了大量研究,汪建华^[2]、李黎武^[3]、田一梅^[4]等人分别利用不同方法对一级泵站、二级泵站进行了单独的优化调度,均取得不错的优化结果。但对于我国大部分水厂而言,设计供水规模通常大于实际供水规模,水厂的优化空间很大,仅仅单独优化一级泵站和二级泵站是远远不够的,特别是在实行峰谷分时电价以后,不同时段电价差异较大,若水厂能够充分利用清水池的调蓄作用,从整体上优化运行方式,则可以进一步降低水厂的运行费用。

与此同时,已有的研究大多仅仅以泵站运行电费最小为优化目标,这种优化方法虽然可以明显降低运行电费,但是往往会造成水泵机组的频繁启停,而水泵机组的启停频率与维护费用和运行寿命紧密相关,据估算,机组每启停1次,降低运行寿命10~15 h,每年启动超过150次的机组,运行寿命甚至会降低20%^[5];机组维修费用与机组启动次数呈线性关系^[6]。因此,对泵站进行优化调度时,水泵机组的启停也应着重考虑,本研究以调度周期内运行电费最小和水泵机组启停次数最少为双目标,建立双目标优化调度模型。

一级、二级泵站与清水池的联合优化调度是将一级泵站、二级泵站、水处理构筑物与清水池作为一个整体考虑,利用峰谷电价差,调整一级泵站运行方案,达到错峰运行,以“高峰补水、低峰蓄水”为原则充分发挥清水池的调蓄作用,并在此基础上尽量提高清水池水位,以降低二级泵站的水泵扬程,同时还要兼顾水泵机组启停带来的额外影响。在满足二级泵站供水需求和确保水处理构筑物运行稳定等约束的前提下,制定出未来一段时间内一级、二级泵站最适合的水泵机组运行方案,以实现运行电费和启停

次数之间最小化的平衡。由于一级、二级泵站与清水池的联合优化调度模型涉及清水池水位、峰谷分时电价、水泵性能等多个因素,既包含连续变量,又包含离散变量,求解难度较大。因此,本研究借鉴二级泵站优化调度中的两级优化调度模型的思想,将水厂分成两个系统,一级、二级泵站和清水池组成主系统,一级、二级泵站内水泵机组组成子系统,分级对这两个系统进行优化调度。

1 一级优化调度模型的建立与求解

1.1 一级优化调度模型

一级、二级泵站全天的运行电费取决于不同时间段的供水流量、水泵扬程、电价制度以及水泵效率。由于二级泵站水泵机组的运行主要由供水指标决定,因此一级优化调度模型只考虑一级泵站水泵机组的启停次数。对于模型的两个目标函数,采用线性加权的方法转化为单目标。

$$TF = a \sum_{t=1}^{24} \frac{F_t}{F} + b \sum_{t=1}^{24} \frac{E_t}{E} \quad (1)$$

$$F_t = \frac{C_t \times COE \times H_{1,t} \times QS_{1,t}}{\eta_1} + \frac{C_t \times COE \times H_{2,t} \times QS_{2,t}}{\eta_2} \quad (2)$$

$$H_{1,t} = HS_{1,t} - 0.5 \times (Z_{1,t-1} + Z_{1,t}) = H_T + \Delta h_1(QS_{1,t}) - 0.5 \times (Z_{1,t-1} + Z_{1,t}) \quad (3)$$

$$H_{2,t} = HS_{2,t} - 0.5 \times (Z_{2,t-1} + Z_{2,t}) + \Delta h_2(QS_{2,t}) \quad (4)$$

式中:TF为目标函数; F_t 为第 t 小时的时段运行电费; F 为某日实际运行总电费; E_t 为第 t 小时与第 $t-1$ 小时相比水泵机组启停次数; E 为某日实际运行总启停次数; a 为运行电费权重; b 为水泵机组启停次数权重; C_t 为第 t 小时的水价,如不实行峰谷分时电价,则 $C_1 = C_2 = \dots = C_{24}$;COE为计算系数, $COE = \rho g / 3\ 600$, ρ 为水的密度(1 kg/L), g 为重力加速度(9.8 m/s^2); $H_{1,t}$ 为一级泵站第 t 小时的水泵扬程; $QS_{1,t}$ 为一级泵站第 t 小时的供水流量; η_1 为一级泵站水泵综合效率; $H_{2,t}$ 为二级泵站第 t 小时的水泵扬程; $QS_{2,t}$ 为二级泵站第 t 小时的供水流量; η_2 为二级泵站水泵综合效率; $HS_{1,t}$ 为一级泵站第 t 小时的供水压力; $Z_{1,t-1}$ 、 $Z_{1,t}$ 分别为第 $t-1$ 小时末、第 t 小时末的一级泵站吸水井水位; H_T 为水处理构筑物进水水位; $\Delta h_1(QS_{1,t})$ 为一级泵站至水处理构筑物

第 t 小时的水头损失; $HS_{2,t}$ 为二级泵站第 t 小时的供水压力; $Z_{2,t-1}$ 、 $Z_{2,t}$ 分别为第 $t-1$ 小时末、第 t 小时末的清水池水位; $\Delta h_2(QS_{2,t})$ 为清水池至二级泵站吸水井第 t 小时的水头损失。

约束条件有:

① 日供水流量平衡约束

$$\sum_{t=1}^{24} QS_{1,t} \times (1 - \alpha) = \sum_{t=1}^{24} QS_{2,t} \quad (5)$$

式中: α 为水厂自用水量系数。

② 一级泵站供水能力约束

$$QS_{1\min} \leq QS_{1,t} \leq QS_{1\max} \quad (6)$$

式中: $QS_{1\min}$ 、 $QS_{1\max}$ 分别为一级泵站每小时的最低供水流量和最高供水流量。

③ 水处理构筑物净水能力约束

$$QS_{T\min} \leq QS_{1,t} \leq QS_{T\max} \quad (7)$$

式中: $QS_{T\min}$ 、 $QS_{T\max}$ 分别为各级水处理构筑物稳定运行所允许的最小流量和最大流量。

④ 清水池水位约束

$$Z_{2\min} \leq Z_{2,t} \leq Z_{2\max} \quad (8)$$

式中: $Z_{2\min}$ 、 $Z_{2\max}$ 分别为清水池安全生产最低水位和最高警戒水位。

1.2 一级优化调度模型的求解

一级优化调度模型的目标是将一级泵站全天的供水流量进行各运行时段的最优分配,以实现一级、二级泵站运行电费和水泵机组启停次数之间最小化的平衡,这是一个典型的多阶段决策问题,可以采用动态规划方法进行求解。先给定调度周期开始时清水池的起始水位,然后逐时进行一级泵站供水流量的分配优化,到调度周期结束时清水池的终止水位应与起始水位相同。同时,可以根据实际应用,设定不同的清水池起始水位,分别计算相应的目标函数值,选择目标函数值最小的清水池起始水位作为最优起始水位。

以日为调度周期,分为 24 个运行时段,并将其作为阶段变量。将清水池水位离散化,在清水池的最高水位 $Z_{2\max}$ 与最低水位 $Z_{2\min}$ 之间等分 n 份,即每一等份的水深为 $(Z_{2\max} - Z_{2\min})/n$ 。设各阶段末的清水池水位为状态变量,则任一阶段末的清水池水位可能为 $Z_{2\min} + (Z_{2\max} - Z_{2\min})i/n$ ($i=0,1,\dots,n$),共 $n+1$ 种情况。状态转移方程为:

$$Z_{2,t} = Z_{2,t-1} + \frac{QS_{1,t} \times (1 - \alpha) - QS_{2,t}}{A} \quad (9)$$

为避免出现直接取一级泵站供水流量作为决策变量导致各阶段状态数的非固定,将式(9)中右边第二部分作为决策变量,以保持各阶段状态数不变,并根据 $QS_{2,t}$ 预测值、 A (清水池底面积) 和 α 求出相应的一级泵站供水流量 $QS_{1,t}$ 。

按顺序法求解,动态规划模型的递推方程为:

$$TF'_t(Z_{2,t}) = \min \{ TF'_{t-1}(Z_{2,t-1}) + TF_t(Z_{2,t-1}, QS_{1,t}) \} \quad (10)$$

$$TF'_0(Z_{2,0}) = 0 \quad (11)$$

式中: $TF'_t(Z_{2,t})$ 为从清水池起始水位 $Z_{2,0}$ 至 t 阶段末的清水池水位 $Z_{2,t}$ 的累计最小目标函数值; $TF'_{t-1}(Z_{2,t-1})$ 为从清水池起始水位 $Z_{2,0}$ 至 $t-1$ 阶段末的清水池水位 $Z_{2,t-1}$ 的累计最小目标函数值; $TF_t(Z_{2,t-1}, QS_{1,t})$ 为 t 阶段在 $t-1$ 阶段末的清水池水位为 $Z_{2,t-1}$ 、一级泵站供水流量为 $QS_{1,t}$ 时的阶段目标函数值。

式(11)为动态规划模型的边界条件。

通过求解,可得一级泵站全天各运行时段的最优流量分配方案,进而可以求得一级泵站各运行时段的供水压力和清水池最优水位过程线,为二级优化调度模型提供数据支持。

2 二级优化调度模型的建立与求解

泵站二级优化调度是在其一级优化调度的基础上进行的。此时,已知一级、二级泵站各运行时段的供水流量和水泵扬程,通过优化确定各运行时段水泵机组启停状态及负荷分配,使总费用最小。本研究建立的一级泵站和二级泵站优化调度模型原理相似,下面仅简单介绍二级泵站优化调度模型。

2.1 二级泵站优化调度模型

对二级泵站进行优化调度时,同样需要考虑水泵机组启停频率的影响,因此二级泵站优化调度模型为:

$$\min F_1 = \sum_{t=1}^{24} \sum_{i=1}^n (w_{2,i,t} N_{2,i,t} + C_{2,i} |w_{2,i,t} - w_{2,i,t-1}|) \quad (12)$$

$$\text{s. t.} \begin{cases} S_{2,i,t} \in [S_{2,\min}, 1] \\ H_{2,1,t} = H_{2,2,t} = \dots = H_{2,n,t} = HS_{2,t} - 0.5 \times (Z_{2,t-1} + Z_{2,t}) + \Delta h_2(QS_{2,t}) \\ \sum_{i=1}^n w_{2,i,t} Q_{2,i,t} = QS_{2,t} \\ Q_{2,\min} \leq Q_{2,i,t} \leq Q_{2,\max} \end{cases} \quad (13)$$

式中: $w_{2,i,t}$ 为二级泵站水泵状态因子, 为 0-1 决策变量, $w_{2,i,t}=1$ 表示二级泵站第 i 台水泵第 t 小时投入运行, $w_{2,i,t}=0$ 表示二级泵站第 i 台水泵第 t 小时未投入运行; $N_{2,i,t}$ 为二级泵站第 i 台水泵第 t 小时的轴功率; $C_{2,i}$ 为二级泵站第 i 台水泵的启停耗量转化系数; n 为二级泵站定速泵和调速泵总台数; $S_{2,i,t}$ 为二级泵站第 i 台调速泵第 t 小时的调速比; $S_{2,i,\min}$ 为二级泵站第 i 台调速泵所允许的最小调速比; $H_{2,i,t}$ 为二级泵站第 i 台水泵第 t 小时的扬程; $Q_{2,i,t}$ 为二级泵站第 i 台水泵第 t 小时的流量; $Q_{2,i,\min}$ 、 $Q_{2,i,\max}$ 分别为二级泵站第 i 台水泵高效运行区间的上、下界。

对式(12)进行求解时, 需要对各运行时段、各台水泵机组的启停状态和转速比同时进行求解, 求解难度较大。而且对于我国许多二级泵站, 例如本研究优化调度的芜湖市三山水厂, 泵站内水泵组合方式较少, 各水泵运行的高效区间差距较大, 对于某种供水指标, 通常只对应 1 种开停机方案。因此, 在求解时可以将上述模型进行适当简化, 对于只存在 1 种开停机方案的运行时段, 可以转为对该运行时段单独进行寻优。这样, 在应用遗传算法求解时, 可以减少染色体基因串的串长, 降低解的复杂度, 不仅缩小了搜索空间, 加快了算法的收敛速度, 而且可以提高解的准确性。对于任意运行时段 t , 时段内优化调度模型的目标函数为:

$$\min F_1 = \sum_{i=1}^n w_{2,i,t} N_{2,i,t} \quad (14)$$

2.2 约束条件的处理

对于约束条件, 本研究采用罚函数法, 将约束函数归并到目标函数上。经过处理后, 原问题已经转化为有 3 个目标函数的无约束多目标优化问题, 采用线性加权的方式合并为一个总目标, 则处理后的优化调度模型为:

$$\min F = F_1 + \beta F_2 + \gamma F_3 \quad (15)$$

$$F_2 = \sum_{t=1}^{24} \left| \sum_{i=1}^n w_{2,i,t} Q_{2,i,t} - Q S_{2,t} \right| \quad (16)$$

$$F_3 = \sum_{t=1}^{24} \sum_{i=1}^n w_{2,i,t} f_{i,t} \quad (17)$$

$$f_{i,t} = \begin{cases} Q_{2,i,\min} - Q_{2,i,t} & (Q_{2,i,t} < Q_{2,i,\min}) \\ 0 & (Q_{2,i,\min} \leq Q_{2,i,t} \leq Q_{2,i,\max}) \\ Q_{2,i,t} - Q_{2,i,\max} & (Q_{2,i,t} > Q_{2,i,\max}) \end{cases} \quad (18)$$

式中: β 、 γ 为约束条件的惩罚系数。

2.3 二级泵站优化调度模型的求解

遗传算法以自然选择与遗传机理为基础, 以某种群体的全部个体为对象, 实现了生物进化过程中适者生存规则与染色体信息交换机制的有效结合, 利用随机化技术对一个被编码的参数空间进行高效搜索, 能自动获得和累积搜索过程中的空间知识, 是一种高效并行全局寻优方法。本研究选择使用遗传算法求解二级泵站优化调度模型, 遗传算法通过 Matlab 软件编程实现。

① 编码

优化调度模型中决策变量有水泵状态因子 w_i 和调速泵的调速比 S_i , 编码形式为二进制, 对于每个运行时段, 基因串形式为 $w_1 w_2 \cdots w_n S_1 S_2 \cdots S_m$ 。其中, n 台水泵的状态因子 w_i 分别用 1 位二进制表示, 用 0、1 分别表示水泵的停、开; m 台调速泵的调速比则通过 $2^{l-1} \leq (b-a) \times 10^{n'} \leq 2^l - 1$ 计算获得, 其中 l 表示某个调速比所需要的二进制位数, b 、 a 分别为某个调速比取值的上、下界, n' 为求解精度。

② 适应度函数

由于目标函数 F 为最小化问题, 需要将目标函数映射为求最大值且非负的适应度函数, 具体的映射形式为: $\text{Fit} = T/F$, 其中 T 为一常数。

③ 遗传操作

经过多次试验, 并结合文献[7]的研究成果, 最终采用锦标赛选择算子。交叉算子采用随机配对的双点交叉算子。对于交叉概率, 则采用文献[8]提出的改进的自适应交叉概率, 具体形式为:

$$P_c = \begin{cases} P_{c1} - \frac{(P_{c1} - P_{c2})(\text{Fit}_c - \text{Fit}_{\text{avg}})}{\text{Fit}_{\text{max}} - \text{Fit}_{\text{avg}}} & (\text{Fit}_c \geq \text{Fit}_{\text{avg}}) \\ P_{c1} & (\text{Fit}_c < \text{Fit}_{\text{avg}}) \end{cases} \quad (19)$$

式中: P_{c1} 、 P_{c2} 为小于 1 的常数, 且 $P_{c1} > P_{c2}$; Fit_c 为配对个体中适应度较大的一个; Fit_{avg} 为群体的平均适应度; Fit_{max} 为群体的最大适应度。

变异算子采用文献[9]提出的自适应多位变异算子。对于变异概率, 则采用文献[8]提出的改进的自适应变异概率, 具体形式为:

$$P_m = \begin{cases} P_{m1} - \frac{(P_{m1} - P_{m2})(\text{Fit}_m - \text{Fit}_{\text{avg}})}{\text{Fit}_{\text{max}} - \text{Fit}_{\text{avg}}} & (\text{Fit}_m \geq \text{Fit}_{\text{avg}}) \\ P_{m1} & (\text{Fit}_m < \text{Fit}_{\text{avg}}) \end{cases} \quad (20)$$

式中: P_{m1} 、 P_{m2} 为小于 1 的常数, 且 $P_{m1} > P_{m2}$;

Fit_m 为进行变异操作个体的适应度。

3 三山水厂应用实例

3.1 基础数据

芜湖市三山水厂的水源水取自长江,取水口位于长江干流段,水量充沛,一级泵站设计取水规模为 $15 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,原水输水管采用 2 根 DN1 600 钢卷管,单管长约 1 143.3 m。一级泵站内共设置 3 台斜流泵,其中 2 台为 800VZNM 型变频水泵、1 台为 700VZNM 型工频水泵。二级泵站内共安装 4 台离心泵,其中 2 台为 ASP500-620ACD 型水泵(1 台变频、1 台工频),2 台为 ASP700-860ACD 型水泵(1 台变频、1 台工频)。水处理构筑物进水口水位为 11.15 m,水厂共有 2 座清水池,每座容积为 $11\,250 \text{ m}^3$,每座清水池的底面积 $A = 2\,812.5 \text{ m}^2$,清水池安全生产最低水位 $Z_{2\min} = 4.05 \text{ m}$,清水池最高警戒水位 $Z_{2\max} = 6.55 \text{ m}$,每座清水池调蓄容积为 $7\,031.25 \text{ m}^3$ 。峰谷分时电价按照当地标准执行,即高峰时段(9:00—12:00、17:00—22:00)电价为 1.238 5 元/(kW·h)、平段(8:00—9:00、12:00—17:00、22:00—23:00)的电价为 0.823 4 元/(kW·h)、低谷时段(23:00—次日 8:00)的电价为 0.514 0 元/(kW·h)。

3.2 优化结果

以 2016 年 1 月 27 日的生产数据作为模型检测数据进行仿真试验。为了与实际调度方案进行对比,各时段一级泵站吸水井水位、二级泵站供水流量和供水压力以及峰谷分时电价均与实际调度方案一致。为研究水泵机组运行电费和启停次数之间的关系,经过多次试算后,选取 $a:b=1:0$ 和 $a:b=1:0.01$ 两组权重比进行分析比较,两组权重比分别表示水泵机组启停次数对于目标函数 TF 无影响和起一定的抑制作用;而对于清水池起始水位则分为实际起始水位和最优起始水位分别进行讨论。优化运行结果与实际运行结果的对比见表 1,清水池优化水位过程线与实际水位过程线的对比见图 1,一级泵站优化供水流量与实际供水流量的对比见图 2。对于未实行峰谷分时电价的地区,应用本研究设计的联合优化调度方法也可以节省一定的运行电费。仍采用 2016 年 1 月 27 日的生产数据作为模型检测数据,假设全天各时段电价均为 0.823 4 元/(kW·h),除电价外,其余数据均与实际调度方案相同,则优化运行结果与实际运行结果的对比如表

2 所示。

表 1 优化运行结果与实际运行结果对比(峰谷分时电价)

Tab. 1 Comparison of optimal operation results and actual operation results with peak-valley time-of-use electricity price

权重比 $a:b$	清水池起始水位/m	一级、二级 泵站总运行 电费/元	水泵机组 总启停 次数	节省电 费/元	电费节 省率/ %
—	5.425	8 262.23	1	—	—
1:0	5.425	7 408.72	3	853.51	10.330
	6.225	7 388.39	1	873.84	10.576
1:0.01	5.425	7 415.15	1	847.08	10.252
	6.225	7 388.39	1	873.84	10.576

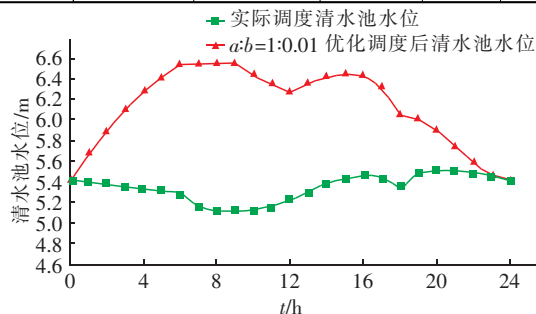


图 1 清水池水位过程线

Fig. 1 Graph of hourly water-level of water tank

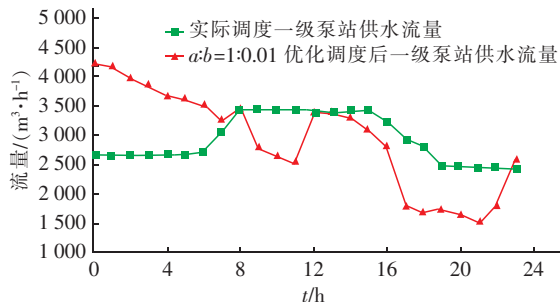


图 2 一级泵站时供水流量曲线

Fig. 2 Graph of hourly water supply of the primary pumping station

表 2 优化运行结果与实际运行结果对比(未实行峰谷分时电价)

Tab. 2 Comparison of optimal operation results and actual operation results without peak-valley time-of-use electricity price

权重比 $a:b$	清水池起始 水位/m	一级、二级 泵站总运行 电费/元	水泵机组 总启停 次数	节省电 费/元	电费节 省率/ %
—	5.425	7 961.99	1	—	—
1:0	5.425	7 302.61	3	659.38	8.282
	6.550	7 194.64	1	767.35	9.638
1:0.01	5.425	7 312.90	1	649.09	8.152
	6.550	7 194.64	1	767.35	9.638

由于现阶段三山水厂供水流量较小,不足设计供水规模的一半,为验证所设计的联合优化调度方法是否适用于水厂后期运行,对水厂进行满负荷运行模拟。将2016年1月27日的供水流量扩大2倍,除供水流量外,其余数据均与实际调度方案相同,则优化运行结果与模拟运行结果的对比见表3。

表3 优化运行结果与模拟运行结果对比(满负荷运行)

Tab.3 Comparison of optimal operation results and simulated operation results with full load operation

权重比 $a:b$	清水池起始水位/m	一级、二级 泵站总运行 电费/元	水泵机组 总启停 次数	节省电 费/元	电费节 省率/ %
—	5.425	15 494.52	3	—	—
1:0	5.425	14 665.14	8	829.38	5.353
	4.825	14 653.16	6	841.36	5.430
1:0.01	5.425	14 747.46	3	747.06	4.821
	4.500	14 725.77	3	768.75	4.961

3.3 结果分析

① 优化运行方案与实际运行方案相比,无论清水池的起始水位是实际起始水位还是最优起始水位,运行电费都显著降低。这是因为,在实行峰谷分时电价时,优化运行方案充分利用了清水池的调节容积和峰谷分时电价,在低谷电价时段尽量多储水,在高峰电价时段尽量减少一级泵站的运行,利用清水池部分储水满足二级泵站供水要求,实现了一级泵站的错峰运行;在未实行峰谷分时电价时,优化运行方案通过提高清水池的水位,降低了二级泵站的水泵扬程,因此也可以降低运行电费。

② 对优化结果中 $a:b=1:0$ 和 $a:b=1:0.01$ 两组优化运行方案进行比较,发现随着水泵机组启停次数权重的减小,运行电费节省率上升,但同时水泵机组启停次数增多,这有可能导致机组维护成本增加,水泵的运行寿命减少。因此,其运行经济性实际低于理论研究结果。对于不同情况的水泵机组,需要在减少运行电费与减少启停次数之间进行相应的权衡。对于三山水厂,推荐使用 $a:b=1:0.01$ 所对应的优化运行方案。

③ 将表3的优化结果与表1进行对比,发现表3中优化运行方案的电费节省率明显降低。这是因为,当水厂接近满负荷运行时,现有清水池的调蓄容积以及水处理构筑物稳定运行所允许的最大流量将成为优化调度的瓶颈,使得优化效果降低。因此,在水厂后期运行时,可考虑进行适当扩建。

4 结论

针对当前泵站优化调度研究的片面性,将一级泵站、二级泵站、水处理构筑物和清水池作为一个整体考虑,同时兼顾水泵机组的运行电费和启停频率,建立了一级、二级泵站与清水池分级优化调度模型,采用动态规划方法获得一级泵站全天各运行时段的最优流量分配方案,并在此基础上利用遗传算法,获得水泵机组的最优运行方式,制定了一级、二级泵站的优化调度运行方案。经过实例验证,该模型设计合理、有效,所设计的求解方法无论是求解速度还是求解精度均符合泵站优化调度的要求。优化后的运行方案充分利用了峰谷分时电价和清水池的调节容积,不仅节省大量电费,还有效降低了水泵机组的启停频率。本研究所介绍的优化调度方法可在泵站现有基础上通过合理安排运行方案,有效降低运行成本,对我国大多数水厂一级、二级泵站的优化调度具有推广价值。

参考文献:

- [1] 姜乃昌. 水泵及水泵站[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1998.
Jiang Naichang. Pumps and Pumping Stations [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1998 (in Chinese).
- [2] 汪建华,王本德. 基于遗传算法的取水泵站优化运行[J]. 长江大学学报:自然科学版,2005,2(10):326-328.
Wang Jianhua, Wang Bende. Optimal operation of intake pump station based on genetic algorithms [J]. Journal of Yangtze University: Natural Science Edition, 2005, 2(10):326-328 (in Chinese).
- [3] 李黎武,施周. 取水泵站优化调度的分解—协调模型研究[J]. 中国给水排水,2006,22(21):14-17.
Li Liwu, Shi Zhou. Decomposition-coordination model for optimal operation of intake water pumping station [J]. China Water & Wastewater, 2006, 22(21):14-17 (in Chinese).
- [4] 田一梅,李江涛,戴雄奇,等. 遗传算法在供水系统优化调度中的应用[J]. 中国给水排水,2001,17(12):63-65.
Tian Yimei, Li Jiangtao, Dai Xiongqi, et al. Application of genetic algorithm in the optimization dispatch of water supply system [J]. China Water & Wastewater, 2001, 17(12):63-65 (in Chinese).

- [5] Arce A S, Ohishi T, Soares S. Optimal dispatch of generating units of the Itaipu Hydroelectric Plant [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2002, 17 (1): 154 - 158.
- [6] Zhuan X T, Xia X H. Optimal operation scheduling of a pumping station with multiple pumps [J]. Applied Energy, 2013, 104 (4): 250 - 257.
- [7] 张琛, 詹志辉. 遗传算法选择策略比较 [J]. 计算机工程与设计, 2009, 30 (23): 5471 - 5474, 5478.
Zhang Chen, Zhan Zhihui. Comparisons of selection strategy in genetic algorithm [J]. Computer Engineering and Design, 2009, 30 (23): 5471 - 5474, 5478 (in Chinese).
- [8] 俞亭超. 城市供水系统优化调度研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
Yu Tingchao. Optimal Operation of Water Distribution Systems [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004 (in Chinese).
- [9] 王基一, 吴燕仙. 自适应多位变异遗传算法的实现 [J]. 计算机科学, 2003, 30 (8): 141 - 143.
Wang Jiyi, Wu Yanxian. Implementation of adaptive

multiple bit mutation genetic algorithm [J]. Computer Science, 2003, 30 (8): 141 - 143 (in Chinese).



作者简介: 徐得潜 (1960 -), 男, 安徽青阳人, 博士, 教授, 住建部绿色建筑评价标识专家, 注册公用设备工程师 (给水排水), 研究方向包括水资源利用与水环境保护、建筑给水排水工程、给水排水工程优化规划与经济运行。

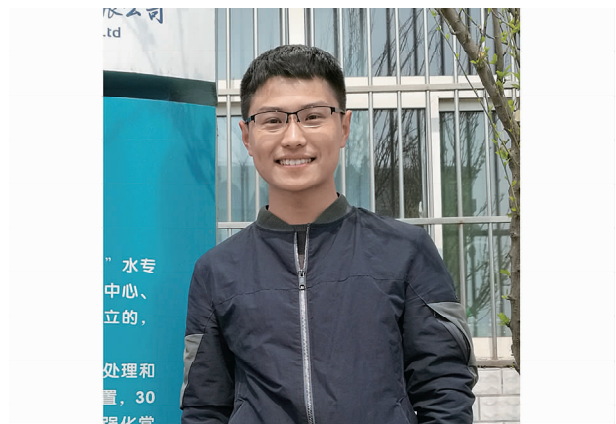
E-mail: xudeqian60@163.com

收稿日期: 2019-03-12

(上接第 61 页)

- [9] 李福珍, 刘崎峰, 赵旌晶, 等. 响应曲面法优化 A²O/MBR 工艺处理煤气化废水 [J]. 中国给水排水, 2017, 33 (17): 107 - 112.
Li Fuzhen, Liu Qifeng, Zhao Jingjing, et al. Optimization of A²O/MBR combined process for treating coal gasification wastewater by response surface methodology [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33 (17): 107 - 112 (in Chinese).
- [10] 王金霞, 罗固源, 许晓毅, 等. 响应曲面法研究溶藻细菌溶藻效应的环境因子 [J]. 中国给水排水, 2012, 28 (9): 82 - 85.
Wang Jinxia, Luo Guyuan, Xu Xiaoyi, et al. Research on environmental factors for algae-lytic effect of algicidal bacteria by response surface methodology [J]. China Water & Wastewater, 2012, 28 (9): 82 - 85 (in Chinese).
- [11] Abdullahi M E, Hassan M A A, Noor Z Z, et al. Integrated air stripping and non-thermal plasma system for the treatment of volatile organic compounds from

wastewater; statistical optimization [J]. Desalination and Water Treatment, 2015 (10): 16066 - 16077.



作者简介: 薛舜 (1992 -), 男, 山东菏泽人, 硕士研究生, 主要研究方向为水处理技术。

E-mail: 346473614@qq.com

收稿日期: 2019-04-12