

梯级泵站叶片全调节日优化运行研究

张宇虹¹, 方国华¹, 闻昕^{1,2}, 田雨²

(1. 河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

摘要: 梯级泵站群优化运行是具有非线性、多阶段、多维度特征的复杂科学问题,为解决梯级泵站运行效率较低、耗能较高等问题,开展梯级泵站叶片全调节日优化运行研究,运用动态规划逐次渐近法对单级泵站多机组叶片全调节进行优化计算,采用逆序查表法对梯级泵站日优化运行问题进行求解,最后对南水北调来水调入密云水库梯级泵站工程优化展开实例研究,考虑峰谷电价的影响,梯级泵站日提水总量为 $176.36 \times 10^4 \text{ m}^3$, 泵站效率为 43.27%,优化后梯级泵站日运行费用减少 23.77%,优化效果明显。

关键词: 梯级泵站; 日优化运行; 动态规划逐次渐近法; 逆序查表法; 叶片全调节

中图分类号: TV675

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2017)06-0123-06

Study on daily optimizing operation of the blade – adjusting of cascade pumping station

ZHANG Yuhong¹, FANG Guohua¹, WEN Xin^{1,2}, TIAN Yu²

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: Optimal operation of cascade pumping station group is a nonlinear, multi-stage, and multi-dimensional complex scientific problem. In order to solve the problem of low operation efficiency and high energy consumption of cascade pumping station, the study on daily optimizing operation of the blade – adjusting of cascade pumping station is carried out. The dynamic programming successive approximation was used to conduct optimized calculation on the blade – adjusting operation of multi-set of single-stage pump station, then the reverse look-up table method was adopted to solve daily optimal operation problem of cascade pumping stations, at last, the study on the south – north water transfer into cascade pumping station project of Miyun reservoir was conducted. Considering the influence of the peak and valley electricity price, the total daily water withdrawal of cascade pumping stations is $176.36 \times 10^4 \text{ m}^3$, the efficiency of pumping station is 43.27%, the operation cost of cascade pumping stations is reduced by 23.77% after optimization, and the optimization effect is obvious.

Key words: cascade pumping station; daily optimal operation; dynamic programming successive approximation; reverse look-up table method; blade – adjusting operation

1 研究背景

泵站是缓解地区水资源分布不均和解决水资源短缺问题的重要水利工程,在我国已有较为广泛的探索与实践,对保障区域供水安全、促进经济社会的稳定与发展具有重要意义。由泵站群及渠道、闸坝等其它工程共同组成的梯级泵站系统是一个复杂的

巨系统,其运行调度具有多阶段、非线性、高维度的特点。随着南水北调东线等一批大型梯级泵站群工程通水运行,科学调度与高效运行已成为工程综合效益能否充分发挥的关键。

国内外学者对梯级泵站优化运行问题已开展了较为广泛的研究,常用的方法包括动态规划法、大系统分解协调法、智能算法等。朱劲木等^[1]、贾仁甫

收稿日期:2017-07-13; 修回日期:2017-08-24

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0405900); 国家自然科学基金项目(51609061); 江苏高校优势学科建设工程项目

作者简介:张宇虹(1994-),女,江苏昆山人,硕士研究生,主要研究方向为水资源规划及利用与工程经济。

通讯作者:方国华(1964-),女,安徽定远人,博士,教授,博士生导师,主要从事水资源规划及利用、水利水电系统规划与优化调度、水利经济、工程管理等方面的教学与科研工作。

等^[2]等采用大系统分解协调法优化求解梯级泵站联合运行模型; Mohile^[3]、周龙才等^[4]、郑和震等^[5]、Coulbeck 等^[6]运用动态规划模型求解各泵站的最优化方案; 徐嘉等^[7]、侍翰生等^[8]为避免常规动态规划法的“维数灾”问题, 运用离散微分动态规划法建立梯级泵站优化调度模型; Bene 等^[9]、Ostfeld 等^[10]、袁尧等^[11]、方国华等^[12]采用遗传算法和蚁群算法等优化算法对梯级泵站方案进行优化计算; Vieira 等^[13]、Theocharis 等^[14]为实现梯级泵站的优化与节能, 分别采用线性规划法和非线性规划法求解泵站优化模型。

综上, 国内外大多学者采用优化算法直接对梯级泵站优化调度模型进行求解, 这在求解高维梯级泵站的复杂问题时运算效率较低。为此, 本文研究建立梯级泵站叶片全调节日优化模型, 首先建立单级泵站多机组叶片全调节模型, 采用动态规划逐次渐近法对其进行求解, 在此基础上运用逆序查表法对梯级泵站叶片全调节进行日优化运行计算, 通过两个模型的嵌套耦合, 提高模型的运算效率, 实现梯级泵站的日优化运行。

2 泵站叶片全调节日优化模型

考虑到叶片安放角、开机台数、泵站扬程及峰谷电价等对梯级泵站优化运行产生的影响, 为使梯级泵站日耗电费用最小, 提高梯级泵站的整体效率, 本章建立泵站叶片全调节日优化模型, 由单级泵站多机组叶片全调节日优化模型和梯级泵站叶片全调节日优化模型组成, 通过两个模型的耦合, 减小求解梯级泵站优化模型的难度, 实现梯级泵站的日优化运行。

首先, 以单级泵站日运行费用最小为目标函数, 采用动态规划逐次渐近法确定各级泵站在不同扬程不同时段的最优运行方案。然后, 以梯级泵站日运行费用最小为目标函数, 基于单级泵站的优化运行结果, 生成不同离散取值情况下, 决策变量最优值对应的电子表格系列, 而后采用逆序查表法求出梯级泵站日优化模型的最优解。

2.1 单级泵站多机组叶片全调节日优化模型

以各时段机组的叶片安放角和开机台数为决策变量, 机组运行日耗电费用最小为目标函数, 泵站提水总量和机组运行功率等为约束条件, 构建单级泵站多机组日优化运行模型, 采用动态规划逐次渐近法求解, 由此得到单级泵站的日优化运行方案。

2.1.1 目标函数 考虑工程实际调度情况及峰谷电价等因素, 将1 d划分为 T 个时段, 以泵站多机组

日运行费用最小, 即单级泵站的日耗电费用最小为目标函数, 详见式(1):

$$\min f = \sum_{i=1}^T \left[m_i \frac{\gamma Q_i(\theta_i) H_i}{\eta_i(\theta_i)} \Delta T_i \cdot c_i \right] \quad (1)$$

式中: f 为单级泵站日耗电费用, 元; m_i 为第 i 时段泵站的开机台数; γ 为水的重度, $\gamma = 9.81 \text{ N/m}^3$; H_i 为第 i 时段泵站的平均扬程, m ; θ_i 为第 i 时段机组的叶片安放角, ($^\circ$); $Q_i(\theta_i)$ 为第 i 时段叶片安放角为 θ_i 时的流量, m^3/s ; $\eta_i(\theta_i)$ 为第 i 时段叶片安放角为 θ_i 时的效率; ΔT_i 为第 i 时段的开机时长, h ; c_i 为第 i 时段的电价, 元/($\text{kW} \cdot \text{h}$)。

2.1.2 约束条件 单级泵站多机组优化运行的约束条件包括泵站提水总量约束、机组的功率约束、叶片安放角约束和开机台数约束等。

(1) 提水总量约束:

$$\sum_{i=1}^T [m_i \cdot Q_i(\theta_i) \cdot \Delta T_i] \geq W_d \quad (2)$$

式中: W_d 为单级泵站日运行提水总量, 10^4 m^3 。

(2) 机组功率约束:

$$N_i(\theta_i) \leq N_e \quad (3)$$

式中: $N_i(\theta_i)$ 为第 i 时段叶片安放角为 θ_i 时的机组实际运行功率, kW ; N_e 为机组的额定运行功率, kW 。

(3) 叶片安放角约束:

$$\theta_{\min} \leq \theta_i \leq \theta_{\max} \quad (4)$$

式中: θ_{\min} 、 θ_{\max} 分别为泵站内机组允许调整的最小和最大叶片安放角度。

(4) 开机台数约束

$$m_i \leq N \quad (5)$$

式中: N 为该泵站内的实际机组台数。

2.1.3 求解方法 动态规划逐次渐近法是一种降维的方法, 其基本思想是在两个变量中先控制一个变量, 实现另一个变量的最优, 再交替固定变量, 反复迭代操作, 直到达到某一要求。本节以机组的叶片安放角和开机台数为决策变量, 采用动态规划逐次渐近法求解^[15]。

(1) 递推方程与状态转移方程。模型对应的状态变量为不同阶段的提水量 λ_i , 递推方程见公式(6)、(7):

阶段 $i = 1$:

$$g_1(\lambda_1) = \min [m_1 \frac{\gamma Q_1(\theta_1) H_1}{\eta_1(\theta_1)} \Delta T_1 \cdot c_1] \quad (6)$$

阶段 i :

$$g_i(\lambda_i) = \min [m_i \frac{\gamma Q_i(\theta_i) H_i}{\eta_i(\theta_i)} \Delta T_i \cdot c_i +$$

$$g_{i-1}(\lambda_{i-1})] \quad (7)$$

状态转移方程见式(8):

$$\lambda_{i-1} = \lambda_i - m_i \cdot Q_i(\theta_i) \Delta T_i \quad (8)$$

(2) 求解步骤。先假设各阶段机组开机台数已知,优化计算叶片安放角,求得该情况下的优化方案,再以各阶段优选的叶片安放角为已知条件,优化计算开机台数,得到相应的优化方案,如此循环往复,直至目标值差值满足相应的要求,得出最终的优化方案,动态规划逐次渐近法的流程如图 1 所示。

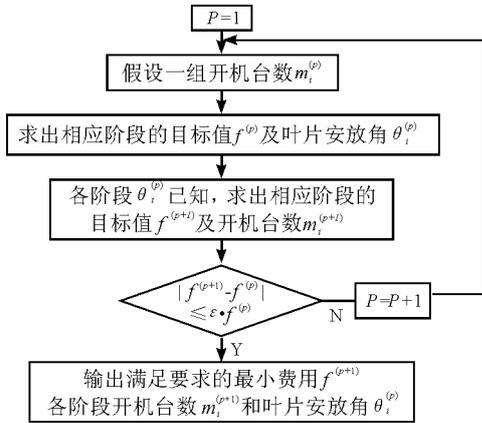


图 1 动态规划逐次渐近法流程图

2.2 梯级泵站叶片全调节日优化模型

由于梯级泵站是一个复杂大系统,除了考虑泵站内部的优化问题,还需综合考虑各级泵站间的水位等优化问题。因此,本节在建立单级泵站叶片全调节日优化模型得到优化方案的基础上,构建梯级泵站日优化运行模型。

2.2.1 目标函数 考虑峰谷电价和工程实际运行情况等因素,以叶片安放角、各泵站机组开机台数和泵站扬程为决策变量,以梯级泵站的日运行费用最小为目标函数,构建梯级泵站叶片全调节日优化模型,详见式(9)。

$$\min f = \sum_{j=1}^{TJ} \sum_{i=1}^T \left[m_{ij} \frac{\gamma Q_{ij}(\theta_{ij}) H_{ij} \Delta T_i \cdot c_i}{\eta_{ij}(\theta_{ij})} \right] \quad (9)$$

式中: TJ 为泵站的级数;其余符号含义同前。

2.2.2 约束条件 梯级泵站日优化运行的约束条件包括提水总量约束、各泵站机组功率约束、扬程约束、开机台数约束、叶片安放角约束等。

(1) 梯级泵站提水总量约束:

$$\sum_{j=1}^{TJ} \sum_{i=1}^T [m_{ij} \cdot Q_{ij}(\theta_{ij}) \cdot \Delta T_i] = W_{d,j} \quad (10)$$

(2) 各泵站机组运行功率约束:

$$N_{ij}(\theta_{ij}) \leq N_{j0} \quad (11)$$

式中: $N_{ij}(\theta_{ij})$ 为第 j 级泵站在第 i 时段的实际运行功

率, kW; N_{j0} 为第 j 级泵站的额定功率, kW。

(3) 扬程约束:

$$\sum_{j=1}^{TJ} H_{ij} = H_{\text{梯级}} + \sum_{i=1}^{n-1} h_i \quad (12)$$

$$H_{\min j} \leq H_{ij} \leq H_{\max} \quad (13)$$

式中: $H_{\text{梯级}}$ 为梯级净扬程, m; h_i 为第 i 个与第 $i+1$ 个泵站之间的渠段水力损失值, m; $H_{\min j}$ 、 $H_{\max j}$ 分别为第 j 级泵站机组允许的最小和最大扬程, m。

(4) 开机台数约束:

$$m_{ij} \leq JZ \quad (14)$$

式中: JZ 为第 j 级泵站内实际机组台数。

(5) 叶片角度约束:

$$\theta_{\min j} \leq \theta_{ij} \leq \theta_{\max j} \quad (15)$$

式中: $\theta_{\min j}$ 、 $\theta_{\max j}$ 分别表示第 j 级泵站机组允许调整的最小和最大叶片安放角度。

2.2.3 求解方法 求解梯级泵站优化调度模型的常用方法主要有动态规划法、模拟技术法、蚁群算法、遗传算法等。本节所建立的模型包括不同时段的开机台数、叶片角度和各级泵站扬程等多个决策变量,为此选择采用逆序查表法对模型进行求解^[15]。首先,根据单级泵站多机组日优化运行方法,确定各级泵站在不同日均扬程条件下的最优方案,生成不同扬程取值对应决策变量最优解的电子表格;其次,从末级泵站出发,通过逆序查表在已知其上游水位及调水规模的条件下得到该级泵站的下游水位,再求解得到上一级泵站的下游水位,以此类推,可以求得第一级泵站的下游水位;最后判断求得的第一级泵站的水位能否满足进水要求。逆序查表法的求解流程见图 2。

3 实例研究

3.1 南水北调来水调入密云水库梯级泵站工程概况

南水北调来水调入密云水库调蓄工程位于北京市,输水线路总长约 103 km,总扬程 132.85 m。工程中共有 9 级泵站,团城湖至怀柔水库的前 6 级泵站为串联提水,中间无调蓄工程,是由泵站和渠道等组成的复杂输水系统。前 6 级泵站由团城湖取水,通过京密引水渠反向输水,依次于屯佃闸、柳林倒虹吸、捻头倒虹吸、兴寿倒虹吸、史山节制闸和西台上跌水节制闸附近新建 6 座泵站提水输水至怀柔水库。各级泵站平面布置如图 3 所示。

各级泵站的基本信息见表 1,屯佃泵站(前 5 个泵站类型一样,以屯佃泵站为例)和西台上泵站的抽水装置综合特性曲线见图 4^[16]:

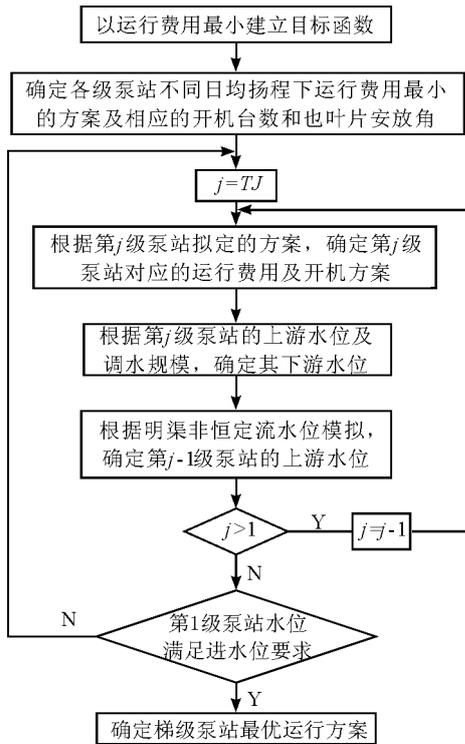


图2 梯级泵站逆序查表法计算流程图

3.2 梯级泵站群优化结果分析

考虑北京市分时电价(表2)和实际运行调度情况等因素,将1 d划分为3个时段,即7:00-15:00(时段1)、15:00-23:00(时段2)、23:00-次日7:00(时段3)。

表1 南水北调来水调入密云水库梯级工程基本参数(引自《梯级泵站输水系统日优化调度及经济运行研究》)

泵站名称	净扬程/m			进水侧水位/m			出水侧水位/m			水泵		
	最大扬程	设计扬程	最小扬程	低水位	设计水位	高水位	低水位	设计水位	高水位	单机流量/(m ³ ·s ⁻¹)	叶轮调节方式	泵型
屯佃	1.50	1.08	0.11	48.38	48.60	49.26	49.37	49.68	49.88	6.67	全调节	立式轴流
前柳林	2.20	1.60	1.27	48.60	49.16	49.39	50.66	50.76	50.80	6.67	全调节	立式轴流
埝头	2.45	2.21	2.06	49.42	49.62	49.72	51.78	51.83	51.87	6.67	全调节	立式轴流
兴寿	2.21	1.97	1.82	50.53	50.73	50.83	52.65	52.70	52.74	6.67	全调节	立式轴流
李史山	2.04	1.59	1.29	51.30	51.50	51.60	52.89	53.09	53.34	6.67	全调节	立式轴流
西台上	8.18	6.18	4.31	51.92	52.63	52.92	57.23	58.81	60.10	6.67	全调节	立式混流

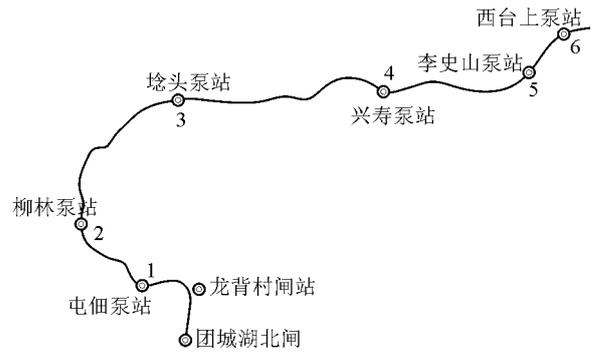
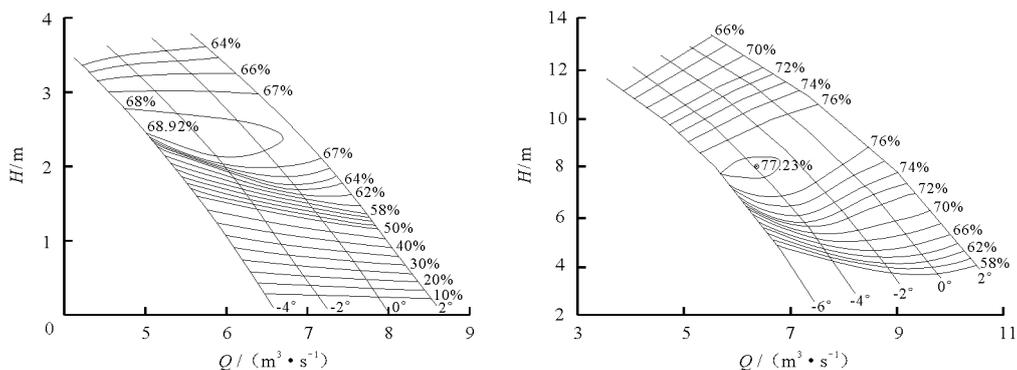


图3 泵站平面布置图

密云水库泵站共6级,按日计算密云水库梯级泵站的运行费用,各级泵站水泵皆为3用1备,叶片安放角范围为-4°~4°,密云水库梯级泵站的抽水流量范围为5.8~20 m³/s,假定日抽水流量为20 m³/s,故该日泵站的输水总量约束为172.8×10⁴ m³。而屯佃泵站站前设计水位为48.6 m,西台上泵站站后设计水位为58.81 m,且假设这两者在一天内为定值。

因此,在考虑泵站同一时段各机组叶片安放角相同的情况下,先由单级泵站日优化模型求出在不同扬程变幅下对应的最优方案组合,再采用逆序查表法对梯级泵站日优化运行模型进行求解,其优化结果见表3~7。



(a) 屯佃泵站 (n=248 r/min, D=1.46 m) (b) 西台上泵站 (n=297 r/min, D=1.46 m)

(引自《梯级泵站输水系统日优化调度及经济运行研究》)

图4 屯佃泵站和西台上泵站抽水装置综合特性曲线

表 2 北京市分时电价

元/(kW·h)

峰段电价		平段电价			谷段电价
10:00 - 15:00	18:00 - 21:00	7:00 - 10:00	15:00 - 18:00	21:00 - 23:00	23:00 - 次日 7:00
1.3222		0.8395			0.3818

表 3 优化分配结果

泵站名称	日均扬程/m	泵站费用/元	梯级泵站费用/元	现状方案费用/元	节能比例/%
屯佃泵站	1.1	9935.2			
前柳林泵站	1.6	8284.3			
埝头泵站	2.2	10745.3	75241.3	98707.1	23.77
兴寿泵站	1.9	9437.9			
李史山泵站	1.6	8284.3			
西台上泵站	6.1	28554.3			

表 4 时段 1 各泵站优化运行方案

表 7 泵站效率对比结果 %

泵站名称	扬程/m	泵站效率/%	开机台数	叶片角度/(°)	泵站运行费用/元
屯佃泵站	1.2	47.13	2	0	3846.4
前柳林泵站	1.5	59.89	2	0	3616.1
埝头泵站	2.1	68.96	2	2	4588.2
兴寿泵站	2.0	65.33	2	0	4211.6
李史山泵站	1.5	59.89	2	0	3616.1
西台上泵站	6.0	72.97	2	-4	12273

泵站名称	现状单级泵站效率	优化后单级泵站效率	现状梯级泵站效率	优化后梯级泵站效率
屯佃泵站	39.71	37.52		
前柳林泵站	52.80	57.10		
埝头泵站	64.03	68.80	43.07	43.27
兴寿泵站	67.30	66.65		
李史山泵站	52.46	57.10		
西台上泵站	72.33	70.18		

表 5 时段 2 各泵站优化运行方案

泵站名称	扬程/m	泵站效率/%	开机台数	叶片角度/(°)	泵站运行费用/元
屯佃泵站	1.1	36.12	3	-2	4013.1
前柳林泵站	1.7	57.19	3	-4	3199.2
埝头泵站	2.2	68.88	3	2	4125.9
兴寿泵站	1.9	67.92	3	0	3614.9
李史山泵站	1.7	57.19	3	-4	3199.2
西台上泵站	6.2	69.15	3	-6	11191

表 6 时段 3 各泵站优化运行方案

泵站名称	扬程/m	泵站效率/%	开机台数	叶片角度/(°)	泵站运行费用/元
屯佃泵站	1.0	29.32	3	-2	2075.7
前柳林泵站	1.6	54.23	3	-4	1469.0
埝头泵站	2.3	68.55	3	2	2031.2
兴寿泵站	1.8	66.69	3	0	1611.4
李史山泵站	1.6	54.23	3	-4	1469.0
西台上泵站	6.1	68.43	3	-6	5090.3

由表 3 ~ 7 可以看出,梯级泵站优化运行后的总费用为 75 241.3 元,与现状方案费用 98 707.1 元相比,耗能减少了 23.77%,优化效果明显。该情况下,梯级泵站总提水量为 $176.36 \times 10^4 \text{ m}^3$,优化后梯级泵站的效率为 43.27%,其中,前柳林泵站、埝头泵站和李史山泵站的效率有所提高,而其余 3 个泵站的效率有略微的降低,但总体效率有所提高,与现状方案效率相比提高了 0.2%。

为达到尽可能减少耗电费用的目的,在低扬程、低电价情况下应尽量多提水,叶片安放角的选择也通常较大,多采用多机组运行的方案,由时段 2 和时段 3 的耗电费用可见,这两个时段电价相对较低,所以各泵站的机组开机台数均为 3 台,叶片安放角大多较大,如前柳林泵站、李史山泵站的叶片安放角为 -4° ,西台上泵站的叶片安放角为 -6° ;而在高电价、高扬程的情况下,叶片安放角一般较小,投入运行的机组台数也相应减少,如在时段 1 的电价较高,各泵站的机组开机台数减少为 2 台,叶片安放角大多为额定叶片安放角(0°),仅埝头泵站的叶片安放角为 2° ,西台上泵站的叶片安放角为 -4° 。

当日均流量和进出水位控制为上述假定值时,日输水总量在3个时段内可3台机组或两台机组运行分配,日运行费用优化效果明显,耗能大大减少;而当日输水总量较多或较少时,由于泵站最大、最小扬程的限制,各机组在各时段内只能保持机组台数不变的运行模式,优化运行的选择方案受到限制,故对日运行费用的优化效果不显著。

4 结 论

梯级泵站群优化运行是具有非线性、多阶段、多维度特征的复杂科学问题,为解决梯级泵站运行效率较低、耗能较高等问题,本文针对梯级泵站叶片全调节日优化运行问题开展研究。主要结论如下:

(1)以单级泵站日耗电费用最小为目标函数,叶片安放角和开机台数为决策变量,建立单级泵站多机组叶片全调节模型,采用动态规划逐次渐近法进行日优化计算;

(2)以叶片安放角、各泵站机组开机台数和泵站扬程为决策变量,整个梯级泵站日耗电费用最小为目标函数,运用逆序查表法求解梯级泵站日优化模型,通过两个模型的耦合,实现梯级泵站的日优化运行;

(3)以密云水库梯级泵站为例,考虑分时电价及实际工程情况,对该梯级泵站进行叶片全调节日优化运行分析,由优化结果可知,梯级泵站日提水总量为 $176.36 \times 10^4 \text{ m}^3$,泵站效率为43.27%,与现状方案相比,优化方案的费用减少了23.77%,优化效果明显。

参考文献:

- [1] 朱劲木,龙新平,刘梅清. 东深供水工程梯级泵站的优化调度[J]. 水力发电学报,2005,24(3):123-127.
- [2] 贾仁甫,王红,金明宇. 调水工程中梯级泵站的优化调度研究[J]. 扬州大学学报(自然科学版),2006,9(2):69-73.
- [3] Mohile D G. Planning long distance water transfers - need for a compatible set of policies[C]//. Proceedings of IWRA Seminar on Inter-basin Water Transfer. 1986: 67-75.
- [4] 周龙才,程千,李娜. 灌区长渠道梯级泵站运行优化及仿真[J]. 灌溉排水学报,2014,33(Z1):390-393.
- [5] 郑和震,张召,吴辉明,等. 梯级泵站输水系统日优化调度及经济运行研究[J]. 水利学报,2016,47(12):1558-1565.
- [6] Coulbeck B, Brdys M, Orr C H. Exact incorporation of maximum demand charges in optimal scheduling of water distribution systems[J], IFAC 10th triennial World Congress, Munich, Federal Republic of Germany, 1987,20(5):359-364.
- [7] 徐嘉,胡彩虹,吴泽宁. 离散微分动态规划在水库优化调度中的应用研究[J]. 气象与环境科学,2011,34(4):79-83.
- [8] 侍翰生,程吉林,方红远,等. 南水北调东线工程江苏段水资源优化配置[J]. 农业工程学报,2012,28(22):76-81.
- [9] Bene J G, Selek I, Hos C. Neutral search technique for short-term pump schedule optimization[J]. Water Resources Planning and Management, 2010, 136(1):133-137.
- [10] Ostfeld A, Asce M, Tubaltzev A. Ant colony optimization for least-cost design and operation of pumping water distribution systems[J]. Journal of Water Resources Planning and Management,2008,134(2):107-118.
- [11] 袁尧,刘超. 蚁群算法在泵站单机组优化运行中的应用[J]. 水力发电学报,2013,32(1):263-268.
- [12] 方国华,曹蓉,刘芹,等. 改进遗传算法及其在泵站优化运行中的应用[J]. 南水北调与水利科技,2016,14(2):142-147.
- [13] Vieira F, Ramos H M. Optimization of operational planning for wind/hydro hybrid water supply systems[J]. Renewable Energy,2009,34(3):928-936.
- [14] Theocharis M E, Tzimopoulos C D, Sakellariou M M A, et al. Comparative calculation of irrigation networks using Labye's method, the linear programming method and a simplified nonlinear method[J]. Mathematical and Computer Modeling,2010,51(3):286-299.
- [15] 仇锦先. 南水北调东线水源泵站优化运行理论及其应用研究[D]. 武汉:武汉大学,2010.
- [16] 吴辉明,田雨,廖卫红,等. 基于密云调蓄工程梯级泵站的抽水装置性能分析[J]. 中国农村水利水电,2016(11):178-182.