

基于峰谷电价的 感潮河段泵站日优化运行研究

赵方玲¹, 张 谨², 王 津², 仇宝云³, 曹海桦²

(1. 扬州大学 水利科学与工程学院, 江苏 扬州 225009; 2. 江苏省太湖地区水利工程管理处, 江苏 苏州 215128;
3. 扬州大学 电气与能源动力工程学院, 江苏 扬州 225127)

摘要:为节约感潮河段泵站运行费用,综合考虑长江侧水位变化和峰谷电价,在满足需要水量的前提下,以泵站日运行费用最小为目标,建立感潮河段泵站日运行优化模型。结果表明,优化方案在电价低谷时段增加抽水负荷,而在电价高峰时段降低泵站抽水负荷;电价相同时,泵站开机方案与水位相关,其中平价时段开机方案受水位影响更大;与设计方案相比,优化方案节约泵站运行费用11.40%~50.79%。因此,峰谷电价的引入不仅能有效减少感潮河段泵站的运行费用,同时也能降低用电高峰时段电网供电压力。

关键词:感潮河段;峰谷电价;优化运行

中图分类号:TV675

文献标识码:B

文章编号:1007-7839(2023)11-0021-0005

Research on daily optimal operation of tidal reach pump station based on peak-valley electricity price

ZHAO Fangling¹, ZHANG Jin², WANG Jin², QIU Baoyun^{3*}, CAO Haihua²

(1. College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China;
2. Water Conservancy Engineering Management Office of Taihu Region of Jiangsu Province, Suzhou 215128, China;
3. College of Electrical, Energy and Power Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China)

Abstract: In order to save the operation cost of the pump station in the tidal reach, the daily operation optimization model of the pump station in the tidal river section is established by considering the change of the water level on the Yangtze River side and the peak-valley electricity price, and on the premise of meeting the required water quantity, with the goal of minimizing the daily operation cost of the pump station. The results show that the optimal scheme increases the pumping load in the low price period, and reduces the pumping load in the peak price period. When the electricity price is the same, the operation scheme of the pump station is related to the water level, and the operation scheme in the parity period is more affected by the water level. Compared with the design scheme, the operating cost of the optimal scheme saves about 11.40%~50.79%. Therefore, the introduction of peak-valley electricity price can not only effectively reduce the operation cost of the pumping station in the tidal reach, but also reduce the pressure of mains power supply during peak hours.

Key words: tidal reach; peak-valley electricity price; optimal operation

收稿日期:2023-06-06

基金项目:国家自然科学基金项目(52179091);江苏省水利科技项目(2021023)

作者简介:赵方玲(1993—),女,博士研究生,研究方向为水力系统优化运行。E-mail:zfl1019196878@163.com

通信作者:仇宝云(1962—),男,教授,博士生导师,博士,主要从事水泵与泵站研究和教学工作。E-mail:byqiu@yzu.edu.cn

大型泵站由于长时间大量抽水,对环境及能源造成了一定影响^[1-2]。其中,沿海、沿江地区泵站运行期间存在能源浪费问题^[3-4]。感潮河段受长江潮位涨落影响,水位在1个潮汐周期内剧烈变化^[5-7],感潮河段泵站运行期间耗费大量能源。因此,研究感潮河段泵站节能技术至关重要。

近年来,国内外学者对不同系统中泵机组运行方案进行优化,节能效果显著。肖若富等^[8]以泵站运行能耗最小为目标,以机组运行种类及台数为变量,结果表明单位时间内泵站运行能耗可节约18.6%;Manuel等^[9]采用蚁群优化算法对供水系统泵机组开机方案进行优化,研究发现,通过合理安排泵的运行时间可以降低系统运行能耗,从而获得最大的节能效果;朱博文等^[10]根据峰谷电价划分泵站运行时段优化泵站运行方案,结果表明较常规运行方案提水费用有所节约;Hyung等^[11]提出了应用遗传算法求解考虑季节性和时差电价的最优供水抽水系统模型,冬季、夏季7 d分别可节约费用4.5%和5.1%。以上研究均表明,模型中引入峰谷电价后,低电价期间运行泵站增多,高电价期间减少泵站运行,引入峰谷电价是有效降低泵站系统运行费用的重要措施之一。

同时,泵站运行能耗还受水位变化等因素的影响,赵晓东^[12]发现当扬程发生变化时,合理调整叶片角度,可以降低系统运行成本约5.64%~12.13%。而感潮河段水位受潮汐的影响极大且变化剧烈,若泵站长时间按固定方案运行,将浪费大量能源。因此,感潮河段泵站运行不能忽视水头的变化,本文提出根据长江水位及峰谷电价调节泵站运行方案。以系统运行能耗最小为目标,以系统全天的开机方案为变量,在泵机组安全运行的前提下,建立满足引水水量要求的感潮河段泵站日运行优化模型。

1 工程概况

当太湖缺水或突发水污染事件时,需从长江应急引水入太湖^[13]。新沟河是连接长江与太湖重要河道之一,受潮汐运动影响,在1 d中水位变幅大且呈规律性变化,出现2次高潮位、2次低潮位。新沟河泵站位于新沟河入江口处,装配有3座型号为3150ZLKQ30-3.23的立式轴流泵机组。

泵站信息资料如表1所示,泵装置性能曲线如图1所示。

由于新沟河泵站位于新沟河入江处,长江侧水

表1 泵站信息资料

立式轴流泵 3150ZLKQ30-3.23	引水装 机台数	单机流量/ (m ³ /s)	单机容量/ kW	设计装置 扬程/m
	3	30	1 800	3.23

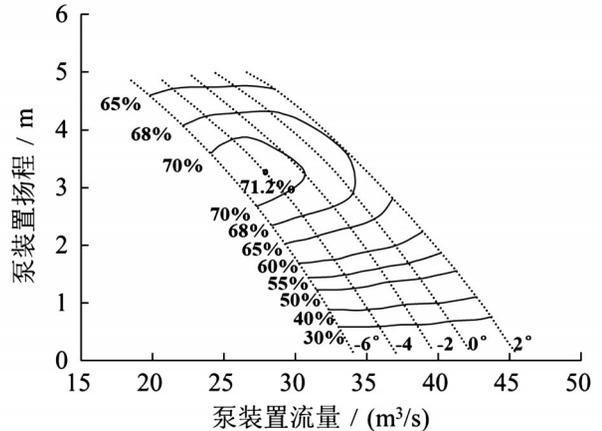


图1 引泵装置性能曲线(引水机组)

位变化剧烈,1个潮水周期内出现1次高潮位、1次低潮位。当内河水位低于长江侧水位时,泵站停止运行;当内河水位高于长江水位时,泵站开始运行,且泵站运行期间耗费大量电力资源。

2 泵站日优化模型建立

在满足泵站安全及引水要求的前提下,根据水位变化规律调节泵站运行方案,使泵站运行费用最少。

泵站日引水量计算式为

$$V_p = \sum_{i=1}^m \left[N_i \times \int_{\Delta t_{pi}} q(\alpha_i, H_{zi}(t)) dt \right] \quad (1)$$

式中: V_p 为泵站实际日引水量, m³; q 为单台水泵流量, m³/s, 是叶轮叶片安装角 α 和泵装置扬程 H_z 的函数; α_i 为叶片角度(°); N_i 为开机台数; Δt_{pi} 为泵站运行时间, h; m 为泵站运行的时段数; 下标 i 为第 i 个时段, $i=1, 2, 3, \dots, m$ 。

泵装置叶片安装角调节范围为

$$\alpha_{\min} \leq \alpha \leq \alpha_{\max} \quad (2)$$

式中, α_{\min} 和 α_{\max} 分别为水泵的允许最小、最大叶片角度。

水泵机组安全运行,则水位限制为

$$H_{z\min} \leq H_z \leq H_{z\max} \quad (3)$$

式中, $H_{z\min}$ 和 $H_{z\max}$ 分别为水泵的允许最小、最大运行扬程, m。

泵站日运行能耗计算式为

$$P = \sum_{i=1}^m N_i \times \int_{\Delta t_i} \frac{\rho g q [\alpha_i, H_{zi}(t)] H_{zi}(t)}{\eta_{zi}(t) \eta_{dr} \eta_{moti}} dt \quad (4)$$

式中: P 为泵机组能耗, kW; ρ 为水体密度, kg/m^3 ; g 为重力加速度, m^2/s ; η_z 为泵装置效率, %; η_{dr} 为传动效率, %; η_{mot} 为电机效率, %; 下标 i 为第 i 个时段, $i=1, 2, 3, \dots, m$ 。

由电网资料可知, 泵站运行耗费大量电力资源, 同时也增加了电网的负担。因此, 引入峰谷电价后泵站日运行优化模型为

$$\min F = \sum_{i=1}^m P_i \times f_i$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} V_p \geq V_x \\ \alpha_{\min} \leq \alpha \leq \alpha_{\max} \\ 0 \leq N \leq N_{\max} \\ H_{z \min} \leq H_z \leq H_{z \max} \end{cases} \quad (5)$$

式中: F 为基于分时电价的泵机组运行费用, 元; P_i 为第 i 时段泵机组能耗, kW; f_i 为第 i 时段单位电价, 元/ $\text{kW} \cdot \text{h}$; η_z 为泵装置效率; η_{dr} 为传动效率; η_{mot} 为电机效率; 下标 i 为第 i 个时段; α_{\min} 和 α_{\max} 分别为水泵的允许最小、最大叶片角度($^\circ$); N 为泵机组的运行台数; N_{\max} 为泵机组装台数; 根据峰谷电价与水位变化将 1 d 划分为若干个子周期, 则 m 为泵站运行子周期数量。

江阴地区峰谷电价信息如表 2 所示。

表 2 江阴地区峰谷电价

序号	峰谷	时段	电价/(元/ $\text{kW} \cdot \text{h}$)
1	谷	0:00~8:00	0.2439
2	峰	8:00~12:00	0.9997
3	平	12:00~17:00	0.5818
4	峰	17:00~21:00	0.9997
5	平	21:00~24:00	0.5818

3 鲸鱼优化算法原理

鲸鱼优化算法 (whale optimization algorithm, WOA) 是一种新型群体智能优化算法。模拟鲸鱼的泡泡网捕食行为, 通过鲸鱼群体的包围、追捕、攻击猎物等过程实现优化搜索。WOA 算法开始在搜索空间中随机产生 N 个鲸鱼个体组成初始种群, 然后在进化过程中, 根据当前最优鲸鱼个体或随机选取 1 个鲸鱼个体更新各自的位置, 最后根据随机产生的数 r 决定鲸鱼个体进行螺旋或包围运动, 概率均为 0.5, 通过循环迭代直至 WOA 算法满足终

止条件。

4 计算结果与分析

4.1 水位资料及泵站运行时段划分方案

当太湖水位呈持续下降趋势并逼近太湖旱警水位, 或太湖突发污染事件时, 需要向太湖应急引水。以某典型日为例, 内河水位为 3.1 m, 长江侧水位、内河侧水位如图 2 所示。由图 2 看出, 根据长江侧与内河侧水位差可将 1 d 划分泵站运行时段和非泵站运行时段, 分别以 “on” 和 “off” 表示泵站运行状态。其中泵站运行时段又可以根据峰谷电价划分为 6 个时段, 分别标记为 I ~ VI。

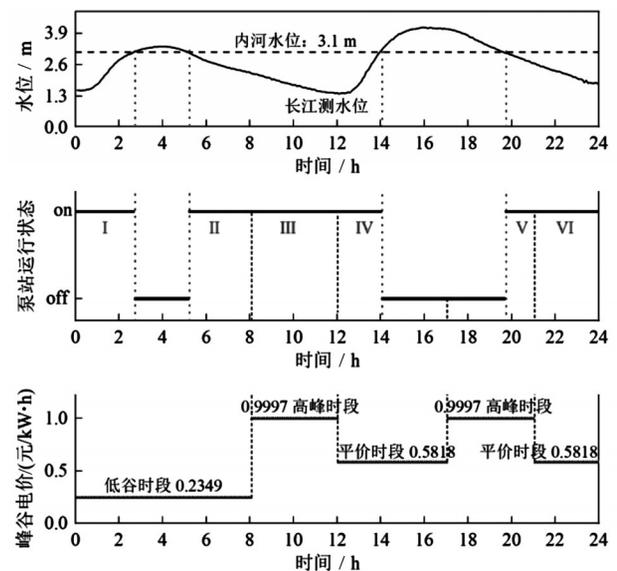


图 2 长江侧水位、内河侧水位及泵站运行时间分区

4.2 感潮河段站优化方案计算结果

满足需要日均流量 $30 \sim 80 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 对应水量为 $2\ 592 \times 10^3 \text{ m}^3 \sim 6\ 912 \times 10^3 \text{ m}^3$ 。求解基于峰谷电价的泵站日运行优化模型, 确定泵站最优运行方案的费用及最优开机方案。将鲸鱼算法用于本文基于峰谷电价的日优化模型的求解, 其中鲸群数量设置为 200, 迭代次数设置为 150, 程序独立运行 5 次, 优化结果如表 3、表 4 所示。

4.3 结果分析

由表 4 (优化运行方案) 可以看出, 优化方案在电价低谷时段 (0:00~2:40 和 5:10~8:00) 站内机组全部运行, 且随着日均需要流量 Q 的增大, 机组叶片角度随之增大 (最小 0.2° 、最大 2°), 即泵站偏向电价低谷期增加运行负荷, 增加抽水量。在电价高峰时段减少泵站抽水负荷, 当日均需要流量增

表3 泵站日运行费用及水量

序号	需要日均流量/(m³/s)	需要水量/(×10³m³)	实际水量/(×10³m³)	费用/元
1	30	2 592	2 592.001	4 393
2	40	3 456	3 456.007	7 656
3	50	4 320	4 320.379	10 984
4	60	5 184	5 184.141	14 486
5	70	6 048	6 048.322	21 420
6	80	6 912	6 912.249	28 211

表4 泵站日优化运行方案

时间分区	不同日均流量开机台数/台					
	30 m³/s	40 m³/s	50 m³/s	60 m³/s	70 m³/s	80 m³/s
on I 0:00~2:40	0.3° 3	0° 3	0.4° 3	1.9° 3	1.9° 3	1.9° 3
off 停机 2:40~5:10						
on II 5:10~8:00	0.4° 3	0.2° 3	1° 3	1.9° 3	2° 3	2° 3
on III 8:00~12:00					-6° 2	-2.5° 3
on IV 12:00~14:00			-4.3° 2	-1.6° 3	0.8° 3	0.9° 3
off 停机 14:00~19:40						
on V 19:40~21:00	-0.2° 1	-6° 2	-3° 3	-5° 3	-1.4° 3	
on VI 21:00~24:00		-6° 3	-6° 3	-1.1° 3	-2.7° 3	0.4° 3

大到 70 m³/s 后,泵站仍能满足抽水量要求,但机组在电价高峰时段需要加入运行,运行费用增加。图3为优化运行方案不同日均需要流量时各时段运行费用,可以看出,泵站在电价高峰时段运行费用远远高于电价低谷时段和平价时段。电价相同时(低谷时段 0:00~2:40、5:10~8:00,平价时段 12:00~14:00、17:40~21:00、21:00~24:00),泵站开机方案与水位相关,其中平价时段开机方案受水位影响更大。

当泵机组全天以设计角度(0°)运行时,泵站运行费用及运行方案如表5、表6所示。其中,表6为设计角度运行方案,与优化方案相同的是机组在电价高峰

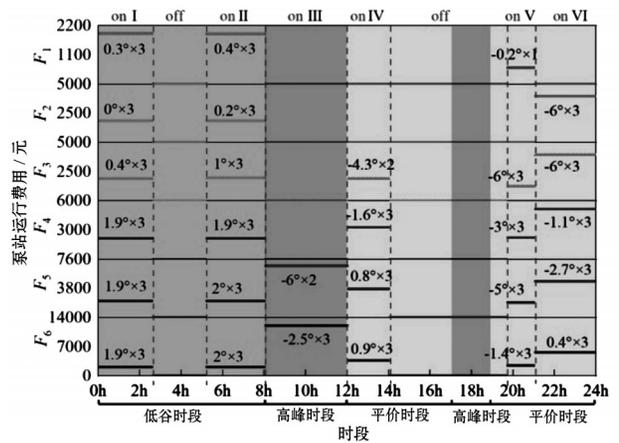


图3 优化运行方案不同日均需要流量时各时段运行费用

表5 泵站设计角度(0°)运行费用及水量

序号	日均需要流量/(m³/s)	需要水量/(×10³m³)	实际水量/(×10³m³)	费用/元
1	30	2 592	2 632.908	8 927
2	40	3 456	3 497.577	12 471
3	50	4 320	4 322.735	15 892
4	60	5 184	5 187.404	19 436
5	70	6 048	6 076.330	24 175
6	80	6 912	无法满足水量要求	

表6 泵站设计角度(0°)运行方案

时间分区	不同日均流量开机台数/台					
	30 m³/s	40 m³/s	50 m³/s	60 m³/s	70 m³/s	80 m³/s
on I 0:00~2:40	2	2	3	3	2	
off 停机 2:40~5:10						
on II 5:10~8:00	3	3	3	3	3	
on III 8:00~12:00						3
on IV 12:00~14:00			3		3	3
off 停机 14:00~19:40						
on V 19:40~21:00	3	3	3	3	3	
on VI 21:00~24:00				3	3	2

无法满足要求

表7 优化方案与设计方案对比

序号	日均流量/ (m ³ /s)	优化方案 费用/元	设计方案 费用/元	费用节省 比例/%
1	30	4 393	8 927	50.79
2	40	7 565	12 471	38.61
3	50	10 894	15 892	30.88
4	60	14 486	19 436	25.47
5	70	21 420	24 175	11.40
6	80	28 211		

时段也减少运行,但不同日均需要流量时泵站开机台数均大于或等于2台,设计方案在电价低谷时段和平价时段的差异较小。优化方案与设计方案见表7。

可以看出,与设计方案相比,优化方案运行费用大幅减少,优化方案节约泵站运行费用11.40%~50.79%。结果表明,根据峰谷电价调节泵站运行方案可以大幅降低泵站运行费用,峰谷电价的引入使泵站在电价低谷时段增大抽水负荷,在电价高峰时段减小抽水负荷。基于峰谷电价优化泵站运行方案不仅能有效节约泵站运行费用,同时也降低了电网的供电压力。

5 结 语

感潮河段泵站由于长时间大量抽水,对环境和电网供电压力造成一定影响。考虑感潮河段受潮汐运动影响,在1 d中水位变幅大且呈规律性变化,出现2次高潮位、2次低潮位,本文提出根据长江水位及峰谷电价优化泵站运行方案。

优化方案在电价低谷时段增加抽水负荷,而在电价高峰时段降低泵站抽水负荷。当日均需要流量增大到70 m³/s后,机组需要在电价高峰时段增加抽水负荷来满足抽水要求,导致运行费用增加。电价相同时,泵站开机方案与水位相关,其中平价时段开机方案受水位影响更大。

与设计方案相比,优化方案节约泵站运行费用11.40%~50.79%。峰谷电价的引入不仅能有效减少泵站运行费用,同时也能降低用电高峰时段电网供

电压力。

参考文献:

- [1] 何彬浩,傅志敏,吴巍,等. 基于改进遗传算法与动态规划的输水泵站日优化调度[J]. 水电能源科学,2023,41(2):128-132.
- [2] 晏毅,赖喜德,陈小明,等. 基于改进粒子群算法的泵站优化运行研究[J]. 中国农村水利水电,2022(8):150-155.
- [3] 张晓波,郑雄伟,王灵敏. 浅析接力泵站在沿海平原排涝中的应用[J]. 长江科学院院报,2018,35(12):46-51.
- [4] 张礼华,程吉林,张仁田,等. 江都四站站内多机组变角优化运行方式研究[J]. 扬州大学学报(自然科学版),2010,13(2):75-78.
- [5] 黄春华,江星耀,王斌,等. 基于闸泵调控引水的感潮河网水质改善研究[J]. 水利规划与设计,2023(1):32-35,133.
- [6] 徐欧官,张仁贡,郑重,等. 感潮河网区洪水水位预报:以温州龙湾区为例[J]. 浙江水利水电学院学报,2022,34(3):44-49.
- [7] 刘曾美,王尚伟,蔡玉婷,等. 感潮地区涝区暴雨与承泄区上游洪水的遭遇规律[J]. 水资源保护,2021,37(2):89-94.
- [8] 肖若富,龚诗雯,周玉国,等. 泵站站内机组运行组合的优化研究[J]. 中国农村水利水电,2020,458(12):164-166,171.
- [9] Manuel Lopez-Ibanez, T. Devi Prasad, Ben Paechter. Ant Colony Optimization for Optimal Control of Pumps in Water Distribution Networks [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2008, 134(4):4.
- [10] 朱博文,龚懿,陈再扬,等. 基于Pareto最优解的跨流域调水泵站多目标优化运行研究[J]. 灌溉排水学报,2022,41(2):131-139.
- [11] HYUNG J, KIM K, SEO J, et al. Development of the method for optimal water supply pump operation considering disinfection performance[J]. Journal of the Korean Society of Water and Wastewater, 2018, 32(5):5.
- [12] 赵晓东. 大型泵站系统叶片角调整频率与优化运行研究[J]. 水利科学与寒区工程,2022,5(3):38-41.
- [13] 龚李莉,蔡梅,王元元,等. 新沟河工程应急调水效果评估[J]. 水资源保护,2023,39(1):166-173.