

doi: 10.3724/SP.J.1201.2014.01135

受潮汐影响的沿江中小型提水泵站优化规划

张礼华¹, 秦 灏²

(1. 扬州大学 水利与能源动力工程学院, 江苏 扬州 225009; 2. 江苏省太湖水利规划设计研究院有限公司, 江苏 苏州 215128)

摘要: 以泵站开机机组耗电费用最少为目标函数, 各时段机组开机流量为决策变量, 提水水量为约束条件, 建立了受潮汐影响的长江沿岸中小型提水泵站优化运行模型, 并采用大系统试验选优方法进行求解。研究表明: 在特定的潮汐和分时电价条件下, 沿江工况不可调泵站开机方式主要受分时电价影响, 在高电价时应适当减少开机流量, 低电价时应适当加大开机流量, 以减少机组运行费用。研究结果可以为受潮汐影响的提水泵站优化管理运行提供参考。

关键词: 提水泵站; 试验选优; 动态规划; 优化运行

中图分类号: TV 675 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2014)01-0135-03

Optimization Planning of Small or Medium Pumping Stations along the Yangtze River Affected by Tides

ZHANG Li hua¹, QIN Hao²

(1. College of Hydraulic science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China;

2. Jiangsu Taihu Planning and Design Institute of Resources Co., Ltd., Suzhou 215128, China)

Abstract: An optimal operation model of small or medium pumping stations along the Yangtze River affected by tides was developed on the basis of the objective function of least power consumption expense of the pumping stations, the decision variable of flow rate at each pumping station, and the constraint condition of pumped water quantity. The model was solved using the large scale system of experimental optimization method. The results showed that under certain tidal and time of use power price conditions, the start up mode of the pump station with nonadjustable working condition along the Yangtze River is mainly affected by the time of use power price. In order to decrease the operational cost of pumping stations, the flow rate should be reduced with high power price, and be increased with lower power price. The results can provide reference for the optimal management and operation of pumping stations affected by tides.

Key words: pumping station; experimental optimization method; dynamic programming; optimal operation

我国长江下游沿岸有着数量众多的中小型提水泵站, 从运行管理的角度出发, 这些泵站大都采用半调节或无调节水泵, 可视为工况不可调机组, 其基本运行特点是在一定的扬程条件下, 出流量为定值, 且长江潮汐的变化对泵站运行流量、效率有着直接的影响。近年来, 不少专家和学者对泵站选型、优化运行方式进行了大量的研究, 取得了丰硕的成果^[1-5], 但结合分时电价, 针对长江沿岸工况不可调机组的优化运行方式开展研究尚不多见。

目前, 试验选优方法已在大型泵站选型与优化调节^[7-9]、灌区输配水控制方式^[10-11]、地面水与地下水联合调度^[12]、水闸规划设计^[13]、草叶产量的预估^[14]等方面得到了广泛应用。但较少见到该方法应用于中小型提水泵站的优化。本文拟

根据中小型提水泵站工况不可调的特点, 结合长江潮汐变化, 考虑分时电价, 采用大系统试验选优方法对这些泵站运行方式进行优化, 为受潮汐影响的长江沿岸中小型泵站运行管理提供参考。

1 提水泵站群优化模型与求解方法

1.1 模型建立

根据特定区域水资源条件, 一定时间内提水区域所需要的提水总量可以确定, 因此以泵站群提取该水量时的运行费用最少为目标函数, 机组提水水量和功率作为约束条件, 建立如下数学模型^[14]:

收稿日期: 2013-07-21 修回日期: 2013-11-18 网络出版时间: 2013-12-17

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.3724/SP.J.1201.2014.01135.html>

基金项目: 江苏省属高校自然科学基金项目“复杂并联泵站组合优化算法理论研究与应用”(11KJB57002); 江苏省重点实验室开放课题“受潮汐影响的大型泵站站内优化运行若干问题的研究”(057387003k11020)

作者简介: 张礼华(1971-), 男, 江苏江都人, 讲师, 博士, 主要从事农业水土工程优化规划与管理方面研究。E-mail: lh Zhang@yzu.edu.cn

$$f_{\min} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k \frac{Y Q_{ij} H_i}{1000 \eta_{ij}} \cdot \Delta t_i \cdot \Delta C_i \quad (1)$$

流量约束: 扬程确定条件下, 开机时, Q_{ij} 为定值, 不开机时 Q_{ij} 为 0。总水量约束:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k Q_{ij} \Delta t_i \geq W_0 \quad (2)$$

$$功率约束: P_{ij} \leq [P_0] \quad (3)$$

式中: f 为提水泵站运行费用(万元); Q_{ij} 为第 i 时段第 j 号机组的提水流量 (m^3/s); η_{ij} 为第 i 时段第 j 号机组的效率 (%); Δt_i 为第 i 时段的时间长度(h); ΔC_i 为第 i 时段的分时电价(元/($kW \cdot h$)); W_0 为需要提水量(m^3); P_{ij} 、 $[P_0]$ 分别为机组实际运行功率、允许运行功率(kW)。

1.2 求解方法

公式(1)为一非线性规划模型, 可采用大系统试验选优方法进行求解。

(1) 以时段为试验因素, 各时段机组开机流量为试验水平, 构造正交表。

(2) 对于正交表中各时段组合(正交表中每一行)对应的目标值(日运行耗电费用), 可采用动态规划方法, 以总水量和功率为约束、开机流量为决策变量, 进行求解, 过程如下。

a. 变量确定。将每阶段中所确定的机组(或机组组合)作为一个决策阶段, 按顺序编号, 可采用逆向推行法计算。

阶段变量: 根据动态规划对变量的要求, 确定机组(或机组组合)编号为 $j, j = 1, 2, \dots, k$ 。

状态变量: 选择按照机组(或机组组合)累加的抽水水量 λ_j 为状态变量。

决策变量: 各机组(或机组组合)的流量为 Q_{ij} 为决策变量, 开机时 Q_{ij} 为定值, 否则为 0。

b. 动态规划的求解^[15]。根据动态最优化原理, 在第 i 时段, 将所需抽水量 W_i 在各个机组(或机组组合)间进行分配, 以此寻求该阶段最小费用。

(3) 正交表各时段组合最小提水费用确定后, 采用正交分析, 确定满足水量要求的各时段最优开机方式与最小运行费用。

2 应用实例

2.1 基本状况

研究实例为江苏江都某长江沿岸灌区, 中等干旱年($P=75\%$)年型时, 根据该灌区水资源平衡分析, 确定在一定时期内, 每日需从长江补水 $22.8 \text{ 万 } m^3$ 。

(1) 分时电价及时段划分^[14]。根据江苏省现行农业低谷电价, 可将 1 d 分为 3 个时段: 时段 \tilde{N} (08:00~18:00), 10 h, 分时电价 0.974 元/($kW \cdot h$); 时段 \hat{O} (18:00~24:00), 6 h, 分时电价 0.649 元/($kW \cdot h$); 时段 \acute{O} (0:00~08:00), 8 h, 分时电价 0.326 元/($kW \cdot h$)。

(2) 提水泵站。该灌区位于长江边的提水泵站水泵主要型号为 900ZLB-100 和 32ZLB-125 型, 二者均为半调节水泵, 实际运行中对转速、叶片安装角进行调节比较困难, 可认为上述机组为工况不可调机组。提水泵站机组的特征见表 1。

(3) 提水扬程。长江沿岸提水泵站扬程的变化主要受长江潮汐变化的影响, 内河水位变化较小, 可基本定为一恒定

表 1 泵站性能表

Table 1 Performance of pumping stations

泵站名称	机组型号	扬程 / m	流量 / ($m^3 \cdot s^{-1}$)	效率 η (%)
1 站 (编号: 1 号)	1 台 900ZLB 100,	2.0	2.8	80.5
	$n=485 \text{ r/min}$,	2.5	2.7	83.1
	$D=850 \text{ mm}$, 配套功率 155 kW	3.0	2.6	85.6
2 站 (编号: 2 号)	1 台 32ZLB 125,	2.0	2.0	76.0
	$n=580 \text{ r/min}$,	2.5	1.9	79.0
	$D=700 \text{ mm}$, 配套功率 95 kW	3.0	1.8	82.0

值。根据长江潮汐变化, 各时段平均扬程为: 时段 \tilde{N} 为 2.0 m, 时段 \hat{O} 为 2.5 m, 时段 \acute{O} 为 3.0 m。

2.2 求解

(1) 试验选优。

a. 试验因素。以时段为试验因素, 根据分时电价划分为 3 个时段。

b. 试验水平。以各阶段开机台数为试验水平。根据该片区实际情况, 各阶段开机方式可分为 A(1 号机组), B(2 号机组), C(1 号机组+2 号机组) 3 种方式。

c. 正交表确定试验选优方案。根据试验因素与试验水平, 构造 $L_9(3^4)$ 正交表^[16]。见表 2。

(2) 试验处理。

对于正交表选择的 3 时段不同开机台数的 9 个组合, 由于每一组合中第 i 时段($i=1, 2, 3$)平均扬程和相应的各机组流量已经确定(开机时即为定值 Q_{ij} , 不开机即为 0), 所以非线性规划模型公式(1)即转化为各时段开机流量为决策变量的动态规划模型, 因此可采用动态规划求解^[15], 计算结果见表 2。

表 2 $L_9(3^4)$ 正交表构造及计算结果

Table 2 $L_9(3^4)$ orthogonal table structure and calculated results

试验号	阶段 1	阶段 2	阶段 3	提水水量 / $10^4 m^3$	费用 / 万元
1	A(1 号)	A(1 号)	A(1 号)	23.4	0.43
2	A(1 号)	B(2 号)	B(2 号)	-	-
3	A(1 号)	C(1 号+2 号)	C(1 号+2 号)	32.69	0.58
4	B(2 号)	A(1 号)	B(2 号)	-	-
5	B(2 号)	B(2 号)	C(1 号+2 号)	23.98	0.41
6	B(2 号)	C(1 号+2 号)	A(1 号)	24.62	0.46
7	C(1 号+2 号)	A(1 号)	C(1 号+2 号)	35.78	0.70
8	C(1 号+2 号)	B(2 号)	A(1 号)	24.77	0.52
9	C(1 号+2 号)	C(1 号+2 号)	B(2 号)	27.22	0.61
K_1	0.51	0.57	0.63		
K_2	0.44	0.47	0.61		
K_3	0.61	0.55	0.56		

(3) 结果分析。

表 2 中 K_1, K_2, K_3 的最小数值表示经正交分析后确定的、符合提水量要求的各阶段最小开机费用。可以看出, 第 1、2 阶段最小费用为 K_2 , 第 3 阶段最小费用为 K_3 , 表明第 1、2 阶段如开机, 则应采用 2 号机组; 第三阶段如开机, 则应采用最优开机组合——1 号机组+2 号机组。

针对上述最优开机组合, 再次采用动态规划的方法, 以

总提水水量和功率为约束, 开机流量为决策变量, 求解获得各阶段最优开机方式与最小日运行耗电费用, 优化运行结果见表 3。

表 3 最优开机方式及最小提水费用

Table 3 The optimal start up mode and the minimum cost

时段	\bar{N}	\bar{Q}	\bar{Q}	提水水量 / 万 m^3	最小提水费用 / 万元
开机机组	2 号	2 号	1 号+ 2 号	24.1	0.4

由表 3 可知, 在满足提水水量要求的前提下, 由于分时电价较高, 在第 1、2 阶段, 均以较低的流量(2 号机组)运行, 而在分时电价较低的第 3 阶段, 机组以最大流量(1 号+ 2 号机组)运行以减少运行费用。

3 结语

本文针对长江沿岸中小型提水泵站工况不可调的特点, 在满足一定提水水量要求的条件下, 采用大系统试验选优方法, 对工况不可调提水泵站群进行了开机方式的优化, 寻求最小的开机费用。根据优化结果, 在设定的潮汐和分时电价条件下, 长江沿岸工况不可调泵站群开机方式受电价影响较大, 受潮汐影响较小; 在满足水量要求的前提下, 高电价时, 应选择小流量开机方式, 低电价时, 应充分调动提水动力以降低运行费用。

我国长江沿岸提水泵站数量众多, 且大多为工况不可调机组, 本文对这些地区提水泵站机组的优化运行, 具有一定的借鉴意义。

参考文献(References):

[1] ZHANG Li hua, CHENG Ji lin. Research on Optimal Operation by Adjusting Blade Angle in Jiangdu No. 4 Pumping Station[C]. The 10th Asian International Conference on Fluid Machinery, Kuala Lumpur Malaysia, 2009.

[2] 冯旭松, 关醒凡, 井书光, 等. 南水北调东线灯泡贯流泵水力模型及装置研究开发与应用[J]. 南水北调与水利科技, 2009, 7(6): 32-35. (FENG Xu song, GUAN Xing fan, JING Shu guang, et al. Development and Application on Hydraulic Model and Equipment of Bulb Tubular Pumps in the Eastern Route of the South to North Water Transfer Project [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2009, 7(6): 32-35. (in Chinese))

[3] Y Tatebayashi, K Tanaka, T Kobayashi. Screw-Type Centrifugal Pump Performance Improvement by Restraining Back Flow in Screw-Type Centrifugal Pump[J]. Journal of Turbomachinery, 2005, 127: 755-762.

[4] 程芳, 陈守伦. 泵站优化调度的分解协调模型[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2003, 31(2): 136-139. (CHENG Fang, CHEN Shou lun. Decomposition coordination Model for Optimal Operation of Pumping Stations[J]. Journal of Hehai University (Natural Sciences), 2003, 31(2): 136-139. (in Chinese))

[5] MAHDI Moradi Jalal. Optimal Design and Operation of Irrigation Pumping Stations[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2003, 129(3): 149-154.

[6] 鄢碧鹏, 纪晓华. 灌溉泵站优化规划设计的多因素模拟试验选优[J]. 灌溉排水, 1999, 18(3): 21-25. (YAN Bi peng, JI Xiao

hua. Optimal Experimental Simulating Methods For The Planning of Pumping Station System[J]. Irrigation and Drainage, 1999, 18(3): 21-25. (in Chinese))

[7] 张礼华, 程吉林, 张仁田. 基于试验-整数规划方法的泵站多机组变速优化[J]. 农业工程学报, 2011, 27(5): 156-159. (ZHANG Li hua, CHENG Ji lin, ZHANG Ren tian. Research on Optimal Operation for Multiple Units with Variable Speed in One Pumping Station Based on the Theory of Experimental and Integer Programming Method[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(5): 156-159. (in Chinese))

[8] 龚懿, 程吉林, 张仁田. 基于试验选优方法的多机组叶片全调节优化运行研究[J]. 灌溉排水学报, 2010, 29(4): 42-46. (GONG Yi, CHENG Ji lin, ZHANG Ren tian. Optimal Operation Method on Multiple Pump Units with Adjustable blade Based on Experimental Optimization Method[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2010, 29(4): 42-46. (in Chinese))

[9] 许夕保, 陈斌, 程吉林. 试验选优方法在自流灌区续灌分级控制上的应用[J]. 灌溉排水学报, 2004, 23(2): 52-54. (XU Xi bao, CHEN Bin, CHENG Ji lin. The Application of the Experimental Optimization Method by Stage Control of Continuous Flow Irrigation in Gravity Irrigation District[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2004, 23(2): 52-54. (in Chinese))

[10] 程吉林, 金兆森, 沈洁. 高维动态规划试验选优及其在大型渠道工程系统设计中的应用[J]. 水利学报, 1993, (2): 40-47. (CHENG Ji lin, JIN Zhao sen, SHEN Jie. An Experimental Method of Multidimensional Dynamic Programming and Its Application in Canal Engineering System [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1993, (2): 40-47. (in Chinese))

[11] 程吉林, 刘胜松, 周振红. 地面水与地下水联合调度非线性模型的求解方法[J]. 水利学报, 1997, (10): 53-56. (CHENG Ji lin, LIU Sheng song, ZHOU Zheng hong. A Solution of Nonlinear Model in Conjunctive Use of Ground and Surface Water [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1997, (10): 53-56. (in Chinese))

[12] 杨鼎久, 程吉林. 水闸规划设计的计算机模拟试验选优[J]. 江苏农学院学报, 1996, 17(3): 83-86. (YANG Ding jiu, CHENG Ji lin. Optimization of Computer Simulation in the Planning of Sluice [J]. Journal of Jiangsu Agricultural College, 1996, 17(3): 83-86. (in Chinese))

[13] 徐向宏. 农业科学研究中正交试验选优分析的新方法[J]. 草业科学, 2011, 28(4): 679-682. (XU Xiang hong. Improving the selection method of repeated orthogonal test in the agricultural science research [J]. Pratacultural Science, 2011, 28(4): 679-682. (in Chinese))

[14] 张礼华, 龚懿. 基于大系统分解协调技术的中小型圩区除涝排水规划探讨[J]. 中国农村水利水电, 2010, (10): 142-144. (ZHANG Li hua, GONG Yi. Study of Draining Scheme on Middle and Minitype Polder Area Based on Large System Decomposing and Harmonization Technique [J]. China Rural Water and Hydropower, 2010, (10): 142-144. (in Chinese))

[15] L Cooper, Mary W Cooper. Introduction to Dynamic Programming [M]. Pergamon Press. 1981.

[16] 高允彦. 正交及回归试验设计方法[M]. 冶金工业出版社, 1988. (GAO Yun yan. Methods of Orthogonal and Regression [M]. Metallurgical Industry Press. 1988). (in Chinese))