

DOI :10.3880/j.issn.1006-7647.2010.06.017

动态规划逐次渐近法在江都三站叶片全调节优化中的应用

仇锦先¹ 程吉林¹ 张仁田² 张礼华¹ 龚 懿¹

(1.扬州大学水利科学与工程学院,江苏 扬州 225009;2.江苏省水利勘测设计研究院有限公司,江苏 扬州 225009)

摘要 :以南水北调东线江都三站为例,建立站内多机组叶片全调节优化数学模型,采用动态规划逐次渐近法寻找目标值最优时的各阶段开机台数及叶片安放角度最优组合方案,并运用基于整数线性规划的试验选优法对计算结果进行验证,验证结果表明计算结果可靠,所采用方法可行。

关键词 :多机组运行;叶片全调节优化;数学模型;动态规划逐次渐近法;江都三站

中图分类号 :TV736;TV734.1 文献标识码 :A 文章编号 :1006-7647(2010)06-0071-03

Application of dynamic programming successive approximation in blade-adjusting optimization of Jiangdu No. 3 Pumping Station/QIU Jin-xian¹, CHENG Ji-lin¹, ZHANG Ren-tian², ZHANG Li-hua¹, GONG Yi¹(1. College of Water Conservancy Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China; 2. Jiangsu Surveying & Design Institute of Water Resources Co., Ltd., Yangzhou 225009, China)

Abstract :Jiangdu No. 3 Pumping Station of the Eastern Route Project of South-to-North Water Diversion was taken as a study case. A mathematical model for the blade-adjusting optimization of multi-unit operation in a pumping station was established. The optimal combination schemes of the operating units and the blade angles at various stages were searched according to the minimum electricity consumption cost by use of the dynamic programming successive approximation method. The calculated results were validated by the experimental optimization method based on integral linear programming. A conclusion is drawn that the optimization results are reliable and the proposed method is feasible.

Key words : multi-unit operation; blade-adjusting optimization; mathematical model; dynamic programming successive approximation; Jiangdu No. 3 Pumping Station

江都三站是我国南水北调东线源头泵站江都站之一,进行站内多机组优化是研究站群优化运行的前提。目前,国内已有学者对江都站的优化运行进行了研究,如马文正等^[1]、陈守伦等^[2]采用动态规划法求解了抽水流量一定及日抽水量一定的情况下江都站的最优运行方式;陆一忠^[3]采用逆序增量动态规划法求解了总抽水流量一定、抽水功率最小时江都站的联合优化调度过程;冯晓莉等^[4]应用遗传算法求解了日抽水量一定的情况下水泵变角和定角时的江都站最优运行方案等,但均未涉及单站多机组变工况优化运行计算方法的比较研究。笔者在江都站已有优化运行理论的基础上,结合江都三站叶片全调节优化的实例,着重对双决策变量非线性优化问题的求解方法进行分析探讨,即采用动态规划逐次渐近法^[5-8]实现了优化运行过程,同时采用基于整数线性规划的试验选优法对计算结果进行验证,为

站内多机组变工况优化计算提供了新的求解方法。

1 数学模型的建立

考虑长江潮位、峰谷电价等影响因素,以江都三站运行机组耗电费用最小为目标函数,以提水总量、额定功率等为约束条件,建立站内多机组叶片全调节优化运行数学模型。

a. 目标函数

$$F = \min \sum_{i=1}^{S_N} m_i \frac{\rho g Q_i H_i}{\eta_{zi} \eta_{mot} \eta_{int}} \Delta T_i P_i \quad (1)$$

式中: F 为站内运行机组耗电费用,元; S_N 为时段总数,根据分时电价划分; m_i 为第*i*时段开机台数,台; $0 \leq m_i \leq J_z$, J_z 为站内机组台数(机组型号相同),台; ρ 为水的密度, kg/m^3 ; g 为重力加速度, m/s^2 ; θ_i 为机组第*i*时段叶片安放角度($^\circ$); Q_i 为机组第*i*时段的提水流量, m^3/s ,当扬程、转速一定时,

基金项目:“十一五”国家科技支撑计划(2006BAB04A03)、国家自然科学基金(60974099)、江苏省属高校自然科学重大项目(09KJA570001)
作者简介:仇锦先(1971—),男,江苏盐城人,副教授,从事灌排理论及水利规划优化教学与研究工作。E-mail:qiuqx@yzu.edu.cn

Q_i 为 θ_i 的函数 ; H_i 为第 i 时段的平均扬程 ,m ; ΔT_i 为第 i 时段的开机时间 ,h ; P_i 为第 i 时段的分时电价 (元 / (kW · h)) ; η_{zi} 为机组第 i 时段的装置效率 ; η_{mot} , η_{int} 分别为机组的电动机效率和传动效率。

b. 约束条件

提水总量约束 :

$$\sum_{i=1}^{S_N} m_i Q_i \Delta T_i \geqslant W_d \tag{2}$$

机组运行功率约束 :

$$N_i \leqslant N_e \tag{3}$$

式中 : W_d 为机组 24 h 运行的提水总量 ,m³ ; N_i 为机组第 i 时段实际运行功率 ,kW ; N_e 为电机额定功率 ,kW。

2 模型的求解

根据前述建立的数学模型 ,站内多机组优化属于多机组、多阶段、双决策变量非线性系统优化问题。这里采用动态规划逐次渐近法确定各时段的最优开机台数及叶片安放角度。

2.1 动态规划递推方程与状态转移方程

阶段变量为 i ,决策变量为开机台数 m_i 、叶片安放角度 θ_i ,状态变量为阶段提水量 λ_i ,则对应的递推方程和状态转移方程如下 :

$i = 1$ 时递推方程为

$$g_1(\lambda_1) = \min \left\{ m_1 \frac{\rho g Q_1(\theta_1^{l_\theta}) H_1}{\eta_{z,1}(\theta_1^{l_\theta}) \eta_{mot} \eta_{int}} \Delta T_1 P_1 \right\} \tag{4}$$

λ_1 在其对应可行域内离散 : $\lambda_1 = 0, W_1, W_2, \dots, W_d$; 决策变量满足 : $0 \leqslant m_1 Q_1(\theta_1^{l_\theta}) \Delta T_1 \leqslant \lambda_1$, $\theta_1^{l_\theta}$ 在其可行域内第 l_θ 种离散取值。

$1 < i < S_N$ 时递推方程为

$$g_i(\lambda_i) = \min \left\{ m_i \frac{\rho g Q_i(\theta_i^{l_\theta}) H_i}{\eta_{z,i}(\theta_i^{l_\theta}) \eta_{mot} \eta_{int}} \Delta T_i P_i + g_{i-1}(\lambda_{i-1}) \right\} \tag{5}$$

λ_i 在其对应可行域内离散 : $\lambda_i = 0, W_1, W_2, \dots, W_d$; 决策变量满足 : $0 \leqslant m_i Q_i(\theta_i^{l_\theta}) \Delta T_i \leqslant \lambda_i$, $\theta_i^{l_\theta}$ 在其可行域内第 l_θ 种离散取值。

状态转移方程为

$$\lambda_{i-1} = \lambda_i - m_i Q_i(\theta_i^{l_\theta}) \Delta T_i \tag{6}$$

$i = S_N$ 时递推方程为

$$g_{S_N}(\lambda_{S_N}) = \min \left\{ m_{S_N} \frac{\rho g Q_{S_N}(\theta_{S_N}^{l_\theta}) H_{S_N}}{\eta_{z,S_N}(\theta_{S_N}^{l_\theta}) \eta_{mot} \eta_{int}} \Delta T_{S_N} P_{S_N} + g_{S_N-1}(\lambda_{S_N-1}) \right\} \tag{7}$$

$\lambda_{S_N} = W_d, W_d + \Delta W$ (ΔW 为某一大于零的水量) ;

$\theta_{S_N}^{l_\theta}$)在其可行域内第 l_θ 种离散取值。

状态转移方程为

$$\lambda_{S_N-1} = \lambda_{S_N} - m_{S_N} Q_{S_N}(\theta_{S_N}^{l_\theta}) \Delta T_{S_N} \tag{8}$$

2.2 动态规划逐次渐近法的基本步骤

动态规划逐次渐近法由 Bellman^[7-8]提出 ,简称为 DPSA 法 ,其在多机组叶片全调节优化中的基本步骤为 :先假设各阶段叶片安放角度已知 ,进行变台数优化计算 ,确定目标优化值及相应各阶段开机台数组合方案 ,再以各阶段优选的开机台数为已知量 ,进行叶片全调节优化计算 ,确定本次目标值及相应各时段叶片安放角度组合方案 ,完成 1 次循环 ,然后以迭代形式重复执行以上过程 ,直到程序获得某种程度的收敛为止。

3 计算结果与分析

3.1 基本资料

江都三站有 10 台 2000ZLQ13.7-7.8 型泵 ,额定转速 $n_e = 214.3$ r/min ,设计叶片安放角度为 $+2^\circ$,水泵的性能曲线见文献 [9] ,考虑分时电价和大型泵站不宜频繁开停机的要求 ,将全天分为 9 个时段 ,考虑江都站长江典型潮位的影响 ,选取日平均扬程 5.8 m 进行计算 ,分时电价根据江苏省物价局现行规定确定 ,各时段平均扬程及分时电价见表 1。机组叶片安放角度在其可行域内离散 : $\theta_i = -6^\circ, -4^\circ, -2^\circ, -1^\circ, 0, +1^\circ, +2^\circ, +4^\circ$ 。

表 1 各时段平均扬程及分时电价

时段序号	时段	时段平均扬程/m	分时电价 / (元 · (kW · h) ⁻¹)
1	17 00—19 00	6.06	0.978
2	19 00—21 00	5.46	0.978
3	21 00—23 00	5.40	0.587
4	23 00 至次日 03 00	5.82	0.276
5	03 00—07 00	6.13	0.276
6	07 00—09 00	5.50	0.978
7	09 00—11 00	5.36	0.978
8	11 00—14 00	5.69	0.587
9	14 00—17 00	6.09	0.587

3.2 计算结果

在日均扬程 5.8 m、不同提水负荷情况下 ,采用动态规划逐次渐近法求解江都三站多机组叶片全调节优化模型 ,计算结果见表 2。同时采用基于线性规划的试验选优法对该优化模型进行求解 ,即以时段为因素 ,叶片安放角度为水平 ,构建 9 因素 8 水平 $L_{64}(8^9)$ 型正交表 ,将模型的求解转化为求解单决策变量线性规划问题 ,求出 64 次试验水平组合方案的目标值及相应 9 时段开机台数组合方案 ,再通过正交分析 ,得到各时段叶片安放角度最优组合方案 ,在

表 2 江都三站多机组叶片全调节优化计算结果

运行 负荷/%	时段 序号	扬程/ m	动态规划逐次渐近法						基于线性规划的试验选优法					
			$\theta_i/$ ($^{\circ}$)	η_{zi}	$m_i/$ 台	流量/ ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	提水量/ 万 m^3	费用/ 万元	$\theta_i/$ ($^{\circ}$)	η_{zi}	$m_i/$ 台	流量/ ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	提水量/ 万 m^3	费用/ 万元
100	1	6.06	-6	0.741	10	123.50	88.92	2.06	+4	0.742	2	34.78	25.04	0.58
100	2	5.46	-2	0.734	10	148.50	106.92	2.25	+4	0.719	10	180.00	129.60	2.79
100	3	5.40	+4	0.716	10	180.60	130.03	1.67	+4	0.716	10	180.60	130.03	1.67
100	4	5.82	+4	0.734	10	176.40	254.02	1.61	+4	0.734	10	176.40	254.02	1.61
100	5	6.13	+4	0.744	10	173.10	249.26	1.64	+4	0.744	10	173.10	249.26	1.64
100	6	5.50	-1	0.731	10	153.10	110.23	2.35	+4	0.721	10	179.60	129.31	2.79
100	7	5.36	-2	0.729	10	149.30	107.50	2.24	+4	0.714	10	181.00	130.32	2.77
100	8	5.69	+4	0.729	10	177.70	191.92	2.55	+4	0.729	10	177.70	191.92	2.55
100	9	6.09	+4	0.743	10	173.50	187.38	2.61	+4	0.743	10	173.50	187.38	2.61
80	1	6.06			0	0	0	0	+4	0.740	2	34.78	25.04	0.58
80	2	5.46	-2	0.734	4	59.40	42.77	0.90	-4	0.721	1	12.89	9.28	0.20
80	3	5.40	+4	0.716	10	180.60	130.03	1.67	+4	0.716	10	180.60	130.03	1.67
80	4	5.82	+4	0.734	10	176.40	254.02	1.61	+4	0.734	10	176.40	254.02	1.61
80	5	6.13	+4	0.744	10	173.10	249.26	1.64	+4	0.744	10	173.10	249.26	1.64
80	6	5.50	+1	0.724	3	48.87	35.19	0.76				0	0	0
80	7	5.36	+2	0.718	4	67.52	48.61	1.03	-4	0.716	10	129.80	93.46	1.98
80	8	5.69	+4	0.729	10	177.70	191.92	2.55	+4	0.729	10	177.70	191.92	2.55
80	9	6.09	+4	0.743	10	173.50	187.38	2.61	+4	0.743	10	173.50	187.38	2.61
60	1	6.06			0	0	0	0			0	0	0	0
60	2	5.46			0	0	0	0			0	0	0	0
60	3	5.40	+2	0.720	10	168.40	121.25	1.55	+4	0.716	10	180.60	130.03	1.67
60	4	5.82	+4	0.734	10	176.40	254.02	1.61	+4	0.734	10	176.40	254.02	1.61
60	5	6.13	+4	0.744	10	173.10	249.26	1.64	+4	0.744	10	173.10	249.26	1.64
60	6	5.50			0	0	0	0			0	0	0	0
60	7	5.36			0	0	0	0			0	0	0	0
60	8	5.69	+4	0.729	8	142.16	153.53	2.04	+4	0.729	8	142.16	153.53	2.04
60	9	6.09	-2	0.755	5	71.50	77.22	1.06	+3	0.747	4	64.60	69.77	0.97

注 若机组在已知日均扬程下以其额定转速、设计叶片安放角度工况下连续运行 24 h ,产生的提水总量为 W ,则机组在已知日均扬程下采用变工况优化运行 :当 $W_d\geq W$ 时 ,机组满负荷运行 ;当 $W_d\geq 80\%W$ 时 ,机组 80% 负荷运行 ;当 $W_d\geq 60\%W$ 时 ,机组 60% 负荷运行。

此基础上 ,利用线性规划求解方法求出系统最优目标值及相应各时段开机台数最优组合方案 ,计算结果见表 2。

上述 2 种求解方法计算所得的单位提水费用比较见表 3。

3.3 结果分析

a. 根据表 2 ,在不同运行负荷情况下 ,动态规划逐次渐近法与基于线性规划的试验选优法计算所得的优化调度过程总体保持一致。为使运行机组耗电费用最小 ,在低电价、低扬程时尽可能多提水 ,即叶片安放角度一般在可行域内调至较大值 ,并使多机组投入运行 ;而在高电价、高扬程时尽可能少提水 ,即叶片安放角度在可行域内调至较小值 ,并使少机组投入运行 ,甚至不开机。根据表 3 ,以单位提水费用作为评价

指标 ,在不同运行负荷情况下 ,2 种计算方法所得的单位提水费用非常接近 ,偏差率均小于 0.5%。

b. 采用动态规划逐次渐近法可以将多决策变量动态规划问题转化为一系列单决策变量问题 ,从而大幅度节省了计算机存储量和计算时间 ,实例应用表明 ,该方法计算收敛速度较快。

4 结 论

a. 针对站内多机组叶片全调节双决策变量动态规划问题 ,以江都三站为例 ,采用动态规划逐次渐近法进行求解 ,确定各阶段最优开机台数及叶片安放角度 ,实现了站内叶片全调节优化调度过程 ,同时采用基于线性规划的试验选优法对其优化结果进行验证 ,结果表明计算结果可靠 ,所采用的方法可行。

表 3 2 种方法单位提水费用比较

运行 负荷/%	基于线性规划的试验选优法			动态规划逐次渐近法			单位提水费用 偏差率/%
	提水量/ 万 m^3	费用/ 万元	单位提水费用/ ($10^{-4}\text{元}\cdot\text{m}^{-3}$)	提水量/ 万 m^3	费用/ 万元	单位提水费用/ ($10^{-4}\text{元}\cdot\text{m}^{-3}$)	
100	1426.88	19.01	133.21	1426.18	18.98	133.05	0.12
80	1140.39	12.84	112.56	1139.18	12.76	112.03	0.47
60	856.61	7.92	92.49	855.28	7.89	92.29	0.22

(下转第 83 页)

Journal of Hydrology ,1994 ,163 :271-288.

[31] ABDEL-SALAM A , CHRYSIKOPOULOS C V. Analytical solutions for one-dimensional colloid transport in saturated fractures [J]. Advances in Water Resources ,1994 ,17(5) :283-296.

[32] PACKMAN A I , BROOKS N H , MORGAN J J. Kaolinite exchange between a stream and streambed : laboratory experiments and validation of a colloid transport model [J]. Water Resources Research ,2000 ,36(8) :2363-2372.

[33] REIDY C A. Variability of hyporheic zones in puget sound lowland streams [D]. Washington D. C. : University of Washington ,2004.

[34] ZARAMELLA M , MARION A , PACKMAN A I. Applicability of the transient storage model to the hyporheic exchange of metals [J]. Journal of Contaminant Hydrology ,2006 ,84(1/ 2) :21-35.

[35] BRADFORD S A , YATES S R , BETTAHAR M , et al. Physical factors affecting the transport and fate of colloids in saturated porous media [J]. Water Resources Research ,2002 ,38(12) :1329-1340.

[36] MARION A , BELLINELLO M , GUYMER I , et al. Effect of bedform geometry on the penetration of nonreactive solutes into a streambed [J]. Water Resources Research ,2002 ,38(10) :1-12.

[37] RACHID A A , JAMMAA D , MOHAMED H. Transport of kaolinite colloids through quartz sand :influence of humic acid , Ca^{2+} , and trace metals [J]. Colloid and Interface Science ,2002 ,253 :1-8.

[38] REN J , PACKMAN A I. Effects of background water composition on stream-subsurface exchange of submicron exchange of submicron colloids [J]. Journal of Environmental Engineering ,2002 ,128(7) :624-634.

[39] REN J. Exchange of adsorbing contaminants between streams and streambeds in the presence of colloidal particle [D]. Illionis : Northwestern University ,2003.

[40] REN J , PACKMAN A I. Coupled stream-subsurface exchange of colloidal hematite and dissolved zinc , copper , and phosphate [J]. Environmental Science and Technology ,2005 ,39(17) :6387-6394.

[41] REN J , PACKMAN A I. Stream-subsurface exchange of zinc in the presence of silica and kaolinite [J]. Environmental Science and Technology ,2004 ,38(24) :6571-6581.

[42] CORAPCIOGLU M Y , CHOI H. Modeling colloid transport in unsaturated porous media and validation with laboratory column data [J]. Water Resources Research ,1996 ,32(12) :3437-3449.

[43] JOHNSON P R , SUN N , ELIMELECH M. Colloid transport in geochemically heterogeneous porous media : modeling and measurements [J]. Environmental Science and Technology ,1996 ,30(11) :3284-3293.

[44] SUN N , ELIMELECH M , SUN N Z. A novel two dimensional model for colloid transport in physically and geochemically heterogeneous porous media [J]. Journal of Contaminant Hydrology ,2001 ,49(3/4) :173-199.

(收稿日期 2009-12-23 编辑 骆超)

(上接第 73 页)

b. 为了验证动态规划逐次渐近法所得解的最优性 ,选取不同的起始廊道 ,观察程序目标值是否收敛到同一值。采用了 2 种途径改善初始轨迹 ,一是直接改变某一决策变量的初始赋值 ;二是改变叶片安放角度和开机台数的决策次序。

c. 动态规划逐次渐近法同样适用于站内多机组变频变速优化运行、叶片全调节变频变速组合优化运行问题的求解 ,丰富了站内多机组变工况优化运行理论 ,同时为并联泵站、梯级泵站子系统优化模型计算方法的选择提供了参考。

参考文献 :

[1] 马文正 ,丘传忻 ,贺贵明.泵站运行的优化调度 [J].水利学报 ,1993(3) :35-41.

[2] 陈守伦 ,芮钧 ,徐青 ,等.泵站日优化运行调度研究 [J].

水电能源科学 ,2003 ,21(3) :82-83.

[3] 陆一忠.大型泵站优化调度及其经济问题探讨 [D].南京 :河海大学 ,2003.

[4] 冯晓莉 ,仇宝云 ,黄海田 ,等.南水北调东线江都排灌站优化运行研究 [J].水力发电学报 ,2008 ,27(4) :130-134.

[5] 程吉林.大系统试验选优理论和应用 [M].上海 :上海科学技术出版社 ,2002.

[6] COOPER L , COOPER M W. Introduction to dynamic programming [M]. 张有为 ,译.北京 :国防工业出版社 ,1985.

[7] BELLMAN R E. Introduction to the mathematical theory of control processes [M]. New York :Academic Press ,1967.

[8] BELLMAN R E , DREYFUS S E. Applied dynamic programming [M]. Princeton :Princeton University Press ,1962.

[9] 仇锦先 ,程吉林 ,张仁田 ,等.江都站不同型号机组叶片全调节优化运行效果分析 [J].南水北调与水利科技 ,2009(6) :85-89.

(收稿日期 2010-03-02 编辑 骆超)