

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2012.02.016

水电站厂内经济运行模型精度研究

周冉¹,杨侃¹,李大亮²,郑姣¹,刘国帅¹

(1.河海大学水文水资源学院,江苏南京 210098;2.南京市水利规划设计院有限责任公司,江苏南京 210006)

摘要:由于机组流量特性曲线以离散形式表达,使得以此为基础的厂内经济运行模型的精度受到了不利影响,而模型求解方法的收敛性能和求解精度也影响着最优决策结果的精度.针对这一问题,提出插值法对模型精度进行改进,并采用动态规划算法求得改进精度后的经济运行总表,在实际运行水头和负荷已知的情况下,运用四点法查询满足一定计算精度要求的最佳负荷分配.以葛洲坝水电站为例进行验证,结果表明该方法具有实用性.

关键词:厂内经济运行;计算精度;动态规划;葛洲坝水电站

中图分类号:TV697.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2012)02-0211-04

Accuracy of economical operation model of hydropower plant

ZHOU Ran¹, YANG Kan¹, LI Da-liang², ZHENG Jiao¹, LIU Guo-shuai¹

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Nanjing Water Planning and Designing Institute, Ltd., Nanjing 210006, China)

Abstract: As the flow characteristic curves of the unit correspond to the discrete output and the discrete water head, the accuracy of the economical operation model of the hydropower plant can be affected. The convergence performance of the solution method and the accuracy of the solution also affect the decision-making accuracy. To solve these problems, this paper presents an interpolation method, which can be used to improve the accuracy of the model. The total economical operation table was obtained by solving the model using the dynamic programming (DP) algorithm. When the load and the operating water head were known, the four-point method was used to obtain the best load distribution. A case study at the Gezhouba Hydropower Station verified the practicability of the method.

Key words: economical operation of hydropower plant; calculation accuracy; dynamic programming; Gezhouba Hydropower Station

实行水电站厂内经济运行可提高经济效益 1% ~ 3%^[1],因而该课题一直是国内外的研究热点.邓先礼^[2]探索了时滞对梯级水电站经济运行的影响,向凌等^[3]在确定最优负荷分配策略时考虑了发电机组启停转化导致的损水情况,徐洪泉等^[4]考虑了稳定性及抗空蚀磨损性能,从功能、精度和优化时间等方面介绍了动态规划算法的优越性.目前一些进化算法^[5-10]已在负荷分配计算中有了广泛应用,但因为一般存在早熟问题或不能满足实时性要求,使得求解精度往往达不到要求.动态规划算法具有全局收敛性,能满足实时性要求^[11].但从可获文献来看,在动态规划厂内经济运行模型精度问题方面研究较少.为了更好地解决厂内经济运行模型计算结果与实际存在偏差的问题,本文采用插值法和四点法相结合的方法,以改进和提高水电站经济运行最佳负荷分配方案的精度.

收稿日期:2011-01-07

基金项目:国家科技支撑计划(2009BAC56B03);江苏高校优势学科建设工程资金(PAPD)

作者简介:周冉(1987—),女,山东泰安人,硕士研究生,主要从事水资源规划与管理研究. E-mail:zhou0114@163.com

通讯作者:杨侃(1965—),男,江苏苏州人,教授,主要从事水资源规划与管理研究. E-mail:kyang@hhu.edu.cn

1 水电站经济运行模型及计算精度改进方法

1.1 动态规划模型及求解方法

当系统要求的负荷确定时,以整个水电站所耗发电流量最少为目标,本文建立了‘以电定水’模型:

a. 阶段和阶段变量 将投入运行的机组依次编号,以新投入运行的机组编号 i 为阶段变量 ($i = 1, 2, \dots, m$),则第 i 阶段共有 i 台机组在运行.

b. 决策变量 以新投入运行的第 i 台机组所承担的负荷 P_i 作为决策变量,第 i 台机组的可行出力范围组成允许决策集合 G_i ,那么 $P_i \in G_i$,若记子策略为 $u_i = \{P_1, P_2, \dots, P_i\}$,则 u_m 为全过程的一个策略.

c. 状态变量 以第 i 阶段所有运行机组的负荷总和 P_{zi} 作为状态变量.

d. 状态转移方程: $P_{zi} = P_{zi-1} + P_i$

e. 指标函数: $Q_{zi}(P_{zi}) = \min \left\{ \sum_{j=1}^i Q_j(P_j) \right\}$

f. 递推方程:

$$\begin{cases} Q_{zi}(P_{zi}) = \min \{Q_{zi-1}(P_{zi-1}) + Q_i(P_i)\} \\ Q_{z0}(0) = 0 \end{cases}$$

g. 约束条件:

$$\begin{cases} P_{\min}^i \leq P_i \leq P_{\max}^i \\ P_{\min}^i \leq P_{zi} \leq P_{\max}^i \\ P_s = \sum_{i=1}^m P_i \end{cases}$$

式中: P_{zi-1} ——第 $i-1$ 阶段所有运行机组的总负荷; $Q_i(P_i)$ ——第 i 台机组承担的负荷为 P_i 时所消耗的水量; $Q_{zi}(P_{zi})$ ——第 i 阶段总负荷为 P_{zi} 时消耗的最小水量; P_s ——系统给定的负荷; m ——电厂内所有机组总台数.

用动态规划模型求解最佳负荷分配有两大步骤:(a)根据递推关系式进行逐段计算,顺序求出各阶段的最佳函数;(b)逆序回代最佳函数,求得各机组所承担的负荷以及相应的耗水量,机组台数和组合方式,即最佳运行方式.

1.2 动态规划模型精度改进原理

机组流量特性曲线是在某些离散水头下的离散出力和流量之间的关系^[12].当离散度较高时,基于原始流量特性曲线的经济运行模型精度较低.本文采用插值法使离散水头和离散出力尽可能连续,以达到提高模型精度的目的.对于给定发电水头和负荷条件下机组运行工况,采用四点法查询获得一定精度要求下的最佳负荷分配.

1.3 动态规划模型精度改进方法

1.3.1 对发电水头进行插值

$$\begin{cases} H_k^j = H_k + j\lambda \\ Q(N_i, H_k^j) = Q(N_i, H_k) + \frac{(H_k^j - H_k)(Q(N_i, H_{k+1}) - Q(N_i, H_k))}{H_{k+1} - H_k} \end{cases}$$

式中: H_k^j ——插值水头; λ ——精度(步长); H_k, H_{k+1} ——相邻水头; $Q(N_i, H_k), Q(N_i, H_{k+1})$ ——已知水头下的动力特性曲线; $Q(N_i, H_k^j)$ ——对水头插值后的动力特性曲线; N_i ——动力特性曲线上的离散负荷.

1.3.2 对负荷进行插值

$$\begin{cases} N_k^j = N_k + j\mu \\ Q(N_k^j, H_i) = Q(N_k, H_i) + \frac{(N_k^j - N_k)(Q(N_{k+1}, H_i) - Q(N_k, H_i))}{N_{k+1} - N_k} \end{cases}$$

式中: N_k^j ——插值负荷; μ ——精度(步长); N_k, N_{k+1} ——相邻离散负荷; $Q(N_k, H_i), Q(N_{k+1}, H_i)$ ——已知负荷下的动力特性曲线; $Q(N_k^j, H_i)$ ——对水头插值后的动力特性曲线; H_i ——水头.

1.3.3 四点法

给定负荷 N_O 和发电水头 H_O 可在图中确定 O 点. 与 O 点相邻的离散点有 4 个: A, B, C, D . 第 1 步: 确定近似负荷. 在与水头 $H(k)$ 、 $H(k+1)$ 相应的优化特性曲线上各选一点, 使其与目标点 O 的负荷相差最小, 如图 B 点到 O 点的水平距离比 A 点到 O 点的距离小, 选择 B 点, 同样可选出 C 点. 第 2 步, 确定近似发电水头, 选取与目标点 O 的发电水头相差最小的点, 如图 1 所示, $L(k) < L(k+1)$, 因此近似水头为 $H(k)$, 选定 B 点为目标点 O 的近似点, 以 B 点的机组台数、机组组合以及负荷分配作为给定负荷和发电水头的最优负荷分配. 四点法取得的是与实际要求误差最小的近似点, 对于精度提高具有正面影响.

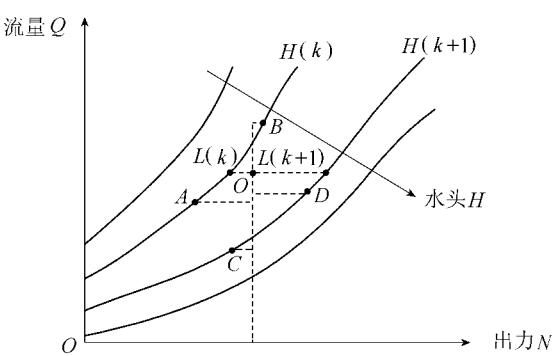


图 1 四点法示意图

Fig. 1 Sketch map of four-point method

2 应用实例

葛洲坝水电站共有发电机组 21 台, 装机容量为 12.5 万 kW 的小机组 19 台, 编号为 1~19, 装机容量为 17 万 kW 的大机组 2 台, 编号为 20, 21. 厂家提供的动力特性曲线以 1 m, 0.1 万 kW 为精度. 负荷以 0.1 万 kW 为步长, 水头精度采用 0.1 m, 0.01 m 建立“以电定水”模型, 采用上述方法得到结果如表 1 所示. R 为耗水量减少百分率.

表 1 不同精度下的最优工况

Table 1 Optimal conditions with different accuracies

日期	0.1 m 精度				0.01 m 精度			
	H/m	$N/\text{万 kW}$	Q/m^3	$R/\%$	H/m	$N/\text{万 kW}$	Q/m^3	$R/\%$
2009-01-05	26.01	120.5	5 258.0	1.351	26.01	120.5	5 256.14	1.386
2009-01-12	26.03	117.1	5 136.0	2.911	26.03	117.1	5 130.57	3.014
2009-01-03	26.06	114.5	4 979.2	4.613	26.06	114.5	4 986.32	4.477
2009-01-04	26.09	115.2	5 010.0	2.907	26.09	115.2	5 011.80	2.872
2009-01-01	26.13	108.8	4 730.3	6.516	26.13	108.8	4 725.29	6.615

精度为 0.01 m 时, 求得 2009 年 1 月 1 日、3—5 日、12 日的最优机组组合、负荷分配结果, 见表 2.

表 2 基于 DP 算法的最优负荷、流量分配

Table 2 Distributions of optimal load and flow based on DP algorithm

机组台号	2009-01-05 水头为 26.01 m		2009-01-12 水头为 26.03 m		2009-01-03 水头为 26.06 m		2009-01-04 水头为 26.09 m		2009-01-01 水头为 26.13 m	
	各机组负荷/ 万 kW	各机组 流量/ m^3	各机组 负荷/万 kW	各机组 流量/ m^3	各机组 负荷/万 kW	各机组 流量/ m^3	各机组 负荷/万 kW	各机组 流量/ m^3	各机组 负荷/万 kW	各机组 流量/ m^3
19	0	0	0	0	12.5	544.8	0	0	0	0
13	9.1	396.86	8.5	371.61	0	0	0	0	0	0
12	9.1	396.86	9.1	396.58	0	0	9	391.74	8.7	378.31
11	9.1	396.86	9.1	396.58	9	392.16	9.6	417.65	9.1	395.18
10	9.1	396.86	9.1	396.58	9.1	396.16	9.1	395.74	9.1	395.18
9	9.1	396.86	9.1	396.58	9.1	396.16	9.6	417.65	9.1	395.18
8	9.1	396.86	9.1	396.58	9.1	396.16	9.6	417.65	9.1	395.18
7	9.1	396.86	9.1	396.58	9.1	396.16	9.6	417.65	9.1	395.18
6	9.1	396.86	9.1	396.58	9.1	396.16	9.6	417.65	9.1	395.18
5	9.1	396.86	9.1	396.58	9.1	396.16	9.1	395.74	9.1	395.18
4	9.1	396.86	9.1	396.58	9.1	396.16	9.1	395.74	9.1	395.18
3	9.6	418.85	9.1	396.58	9.1	396.16	9.1	395.74	9.1	395.18
2	9.1	396.86	9.1	396.58	9.1	396.16	9.6	417.65	9.1	395.18
1	10.8	471.83	9.1	396.58	11.1	483.92	12.2	531.20	9.1	395.18
总和	120.5	5 256.14	117.7	5 130.57	114.5	4 986.32	115.2	5 011.80	108.8	4 725.29

注: 台号为 14~18 以及 20~21 的机组不承担负荷.

3 结 论

a. 通过‘插值法’对流量特性曲线进行插值拟合降低其离散度,应用于建立厂内经济运行模型中,可以提高模型精度,获得的最佳负荷分配方式与实际运行工况偏差较小.

b. 随着精度的提高,计算机的储存量和计算量不断加大,计算时间变长,这与满足实时性要求相悖.因此规模不同的水电站,模型精度要根据具体情况确定.模型的精度问题还有待进一步研究.

参考文献:

- [1] 韩桂芳,陈启华,张仁贡.动态规划法在水电站厂内经济运行中的应用[J].水电能源科学,2005,23(1):48-51. (HAN Gui-fang, CHEN Qi-hua, ZHANG Reng-gong. Application of dynamic programming in inner-plant economical operation of hydropower station [J]. Water Resources and Power, 2005, 23(1): 48-51. (in Chinese))
- [2] 邓先礼.时滞对梯级水电站经济运行的影响[J].重庆大学学报,1982(2):91-102. (DENG Xian-li. On the effect lag upon the economical operation of cascade hydroelectric power stations [J]. Journal of Chongqing University, 1982(2): 91-102. (in Chinese))
- [3] 向凌,贺胜辉,周建中,等.机组后停导致损水的最优策略研究[J].继电器,2004,32(12):29-31. (XIANG Ling, HE Sheng-hui, ZHOU Jian-zhong, et al. Study of optimization strategy in the water-loss condition caused by starting and stopping of generator [J]. Relay, 2004, 32(12): 29-31. (in Chinese))
- [4] 徐洪泉,王万鹏.考虑稳定性和空蚀磨损性能的水电站优化调度系统[J].水利水电技术,2010,41(9):76-79. (XU Hong-quan, WANG Wang-peng. Optimized operation system of hydropower station under consideration of operation stability and cavitation erosion resistance [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2010, 41(9): 76-79. (in Chinese))
- [5] 申建建,程春田,张俊,等.蜜蜂进化算法在水电站厂内经济运行中的应用[J].水电能源科学,2008,26(3):137-140. (SHENG Jian-jian, CHENG Chun-tian, ZHANG Jun, et al. Application of honey-bee evolutionary algorithm for optimal operation of hydropower units [J]. Water Resources and Power, 2008, 26(3): 137-140. (in Chinese))
- [6] 赵雪花,黄强,吴建华.蚁群算法在水电站厂内经济运行中的应用[J].水力发电学报,2009,28(2):139-142. (ZHAO Xue-hua, HUANG Qiang, WU Jian-hua. Application of ant colony algorithm for economic operation of hydropower station [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2009, 28(2): 139-142. (in Chinese))
- [7] 李刚,程春田,唐子田,等.结合禁忌搜索思想的粒子群算法在乌江渡水电站厂内经济运行中的应用研究[J].水力发电学报,2009,28(2):128-132. (LI Gang, CHENG Chun-tian, TANG Zi-tian, et al. An improved PSO algorithm embedded TS for economic operation of Wujiangdu Hydroelectric Plant [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2009, 28(2): 128-132. (in Chinese))
- [8] 杨鸿锋,张志刚,黄伟军.差分进化算法及其在水电站厂内经济运行中的应用[J].中国农村水利水电,2009(7):113-118. (YANG Hong-feng, ZHANG Zhi-gang, HUANG Wei-jun. Differential evolution algorithm and its application in economic operation of hydropower [J]. China Rural Water and Hydropower, 2009(7): 113-118. (in Chinese))
- [9] 常黎,周建中,李琼,等.抽水蓄能电站优化运行方式的混合遗传算法[J].华中科技大学学报,2002,30(6):99-101. (CHANG Li, ZHOU Jian-zhong, LI Qiong, et al. The mixed genetic algorithm for optimal operation pattern of pumped storage plant [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2002, 30(6): 99-101. (in Chinese))
- [10] 袁晓辉,袁艳斌,张勇传.电力系统中机组组合的现代智能优化方法综述[J].电力自动化设备,2003,23(2):73-78. (YUAN Xiao-hui, YUAN Yan-bin, ZHANG Yong-chuan. A survey of modern intelligence optimization for unit commitment in electric power systems [J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(2): 73-78. (in Chinese))
- [11] 权先璋.动态规划原理在水电站厂内经济运行中的应用[J].水电能源科学,1983,1(1):95-104. (QUAN Xian-zhang. Application of the dynamic programming principle to economic operation in a hydroelectric plant [J]. Water Resources and Power, 1983, 1(1): 95-104. (in Chinese))
- [12] 贺胜辉,张学涛,陶学军,等.水电厂厂内经济运行的实现[J].继电器,2005,33(5):72-74. (HE Sheng-hui, ZHANG Xue-tao, TAO Xue-jun, et al. Realization of economical operation of hydroelectric plant [J]. Relay, 2005, 33(5): 72-74. (in Chinese))