

考虑水头影响的梯级水电站群短期优化调度

贾江涛, 管晓宏, 翟桥柱

(西安交通大学机械制造系统国家重点实验室和智能网络与网络安全教育部重点实验室, 陕西省西安市 710049)

摘要:在梯级水电站群调度模型中恰当表述离散运行区间约束以及水头影响并在求解算法中有效处理这些因素是梯级水电站群调度中面临的挑战。文中通过将水头离散化, 设定多维 0-1 状态变量及相关约束, 建立了一个梯级水电系统短期调度的线性混合整数规划模型, 能够综合考虑水头影响、不连续运行区间等约束。模型采用 CPLEX 软件包求解, 对一个包含 3 个梯级水库、12 台机组的梯级水电系统进行了测试, 结果表明所提出的建模方法是有效的, 能灵活处理受水头影响的水库群水电站短期调度中的多种复杂因素。

关键词:短期调度; 梯级水电系统; 水头; 不连续运行区间; 线性混合整数规划

中图分类号: TM732

0 引言

梯级水电短期调度涉及的因素非常复杂, 考虑的约束主要包括机组的各种物理约束、库容平衡、河道流量、非线性水电转换关系、水流延时、水库间水力耦合等, 在数学上短期水电调度属于大规模、离散、非线性、非凸数学规划, 常见的短期水电调度方法有网络流、动态规划、遗传算法、Lagrange 松弛法等^[1-4]。为降低求解的困难性, 文献中采用的各种模型均在水头影响、水电转换关系等方面对实际问题有较大简化, 如文献[1]未考虑水头影响和不连续运行区间, 文献[2-4]中为了处理方便, 将电站中的多台机组聚合为一台大机组来处理, 因此难以处理水电机组最小开关机时间约束, 文献[2, 4]将水电转换关系简化为二次函数关系, 导致模型误差可能较大, 文献[3-4]未考虑机组不连续运行区间等。

在比较精确地考虑各种复杂因素时, 短期水电调度的数学模型一般是一个复杂的大规模非线性混合整数规划问题, 直接求解十分困难。目前一种普遍接受的处理方式是针对具体的水电站的特点, 基于一些假设将模型转换为线性混合整数规划问题并采用标准算法求解, 特别是采用结合目前线性混合整数规划的最新求解技术的软件包来求解^[5-11]。这种求解方法的主要困难之一是如何在模型中较精确地表述复杂的水电转换关系, 同时又不显著增加求解的复杂性。对水头影响可以忽略的水库, 文献[6]

做了深入研究, 但对于一般水库, 水头影响必须考虑。首先, 目前已有的一些方法为简化问题忽略了水头影响^[5-8, 11], 因而模型精度有待提高; 其次, 水轮机存在振动区, 在调度模型中具体表现为机组存在不连续运行区间, 目前大多数文献并未考虑该因素^[5-8, 10, 12], 导致调度结果可能无法执行; 再次, 现有模型通常不考虑水电机组的启动成本, 因为水电机组的启动成本相对于火电机组来说可以忽略, 而在水电所占比重较大的电力系统中, 忽略水电机组的启动成本对发电成本的计算将产生较大误差; 最后, 有些文献(如文献[1, 10-14])未考虑机组最小开关机时间约束, 因而在某些特殊情况下可能造成机组频繁启动而对机组相关部件造成严重磨损。

针对以上问题, 本文建立了一个考虑因素较全面的梯级水电短期调度线性混合整数规划模型, 综合考虑了水头影响、不连续运行区间、最小开关机时间约束、启动成本等因素, 然后采用通用混合整数规划方法来求解。本文针对复杂水电出力曲线^[13]所带来的求解困难, 提出的解决方案是离散库容(等价于离散前池水位), 然后将发电量与水头、过水流量间的二元函数转换为一系列在不同水头下发电量与过水流量间的一元非线性函数, 进而在模型中用分段线性函数逼近相应的一元非线性函数以表述水电转换关系。这种处理方式的优点是明确考虑了水头影响, 且随着调度基本时间单位的缩短和相关部分的加密, 模型误差可以灵活控制。

对于不连续运行区间问题, 本文引入了与之相关的 0-1 变量来指示机组实际所处的运行区间, 同时对由此引出的相关约束进行了线性化处理, 这些处理在模型精度方面未产生损失。此外, 本文还引

收稿日期: 2008-11-19; 修回日期: 2009-04-29。

国家自然科学基金重点项目(60736027); 国家自然科学基金资助项目(60704033); 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2007AA04Z154)。

入了最小开关机时间约束,用以防止机组频繁启停。

本文建立的模型以整个系统发电利润最大化为目标,适用于水火电联合调度的分解-协调框架下独立水系统问题及电力市场中水电厂的自调度问题。

1 模型建立

受水头影响的水电转换关系非常复杂,本文采用文献[12]的方法,将水电机组出力简化为水库库容 v 和发电用水流量 q 的二元非线性函数:

$$P = \Psi(v, q)$$

水电转换关系通常用 Hill 图(见图 1)表示。本文用离散库容的方法处理水电转换关系,其主要思想是:将最低允许水位对应的最小库容和最高允许蓄水位对应的库容离散为多段(通常为 3 段:高、中、低水位对应的库容),在每段内将变化的库容用该段的平均库容代替,从而将机组出力 P 表示为水流量 q 的一元非线性函数,对此函数通过内插法进行分段线性逼近,最终实现非线性水电转换关系的线性化表述。以上方式的优点是可以通过增减库容分段数及内插剖分点个数调整模型精度。

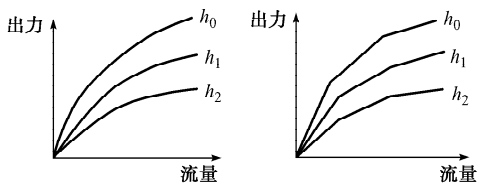


图 1 机组在不同水头 ($h_2 < h_1 < h_0$) 下水电转换关系
Fig. 1 Generation curves of hydro unit under different water head ($h_2 < h_1 < h_0$)

1.1 目标函数

梯级水电系统短期优化调度的目的是在满足所有水电机组运行约束的前提下,使有限的水资源发挥最大的经济效益,其目标函数为:

$$\max \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{J_i} (\lambda_t p_{i,j,t} \Delta - S_{i,j,t}) \quad (1)$$

式中: λ_t 为 t 时段电价; $p_{i,j,t}$ 为 i 水库 j 机组在 t 时段的发电功率; $S_{i,j,t}$ 为相应的机组启动费用; Δ 为调度时段长度; T, I, J_i 分别为时段总数、水库数和 i 水库上的机组总数。

1.2 水电转换关系

1.2.1 离散库容

将 i 水库的库容离散为 M_i 个区间,对应 M_i 个固定水头, t 时段的平均库容对应某一固定水头。

$$\sum_{m=1}^{M_i} r_{i,t}^m = 1 \quad (2)$$

$$\sum_{m=1}^{M_i} r_{i,t}^m \underline{V}_i^m \leq \frac{1}{2} (V_{i,t-1} + V_{i,t}) \leq \sum_{m=1}^{M_i} r_{i,t}^m \bar{V}_i^m \quad (3)$$

式中: $V_{i,t}$ 为 i 水库在 t 时段末的库容; $\underline{V}_i^m$ 和 $\bar{V}_i^m$ 分别为 m 离散区间上的最小、最大库容; $r_{i,t}^m$ 为 0-1 离散变量,值为 1 表示水头处于 m 状态下,简记 m 水头下,值为 0 时表示水头不在状态下。

由式(3)知,当 $r_{i,t}^m$ 为 1 时,此时段平均库容指向某一库容离散区间。由式(2)知,时段平均库容只能指向某一离散区间,即水头在任一调度时段只能处于一个水头状态。

1.2.2 水电转换关系线性化

设 i 水库上 j 机组存在 $K_{i,j}$ 个不连续运行区间,在 m 水头下将 i 水库上 j 机组处于 k 运行区间的水电转换关系曲线分为 $L_{i,j,k}^m$ 段,每段的长度和斜率分别记为 $\delta_{i,j,k,l}^m$ 和 $\alpha_{i,j,k,l}^m$ 。

$$\underline{g}_{i,j,k,l}^m z_{i,j,k,l,t}^m \leq g_{i,j,k,l,t}^m \leq \underline{g}_{i,j,k,l}^m z_{i,j,k,l,t}^m + \delta_{i,j,k,l}^m z_{i,j,k,l,t}^m \quad (4)$$

$$q_{i,j,k,l,t}^m = \underline{q}_{i,j,k,l}^m z_{i,j,k,l,t}^m + \alpha_{i,j,k,l}^m (g_{i,j,k,l,t}^m - \underline{g}_{i,j,k,l}^m z_{i,j,k,l,t}^m) \quad (5)$$

式中: $g_{i,j,k,l,t}^m$ 和 $q_{i,j,k,l,t}^m$ 分别为在 m 水头下 i 水库 j 机组在 t 时段处于 k 运行区间 l 段上的发电功率和发电用水流量; $\underline{g}_{i,j,k,l}^m$ 和 $\underline{q}_{i,j,k,l}^m$ 分别为相应的最小值; $z_{i,j,k,l,t}^m$ 为相应的 0-1 状态变量,值为 1 表示在 m 水头下 i 水库 j 机组在 t 时段运行于 k 运行区间 l 段上,否则为 0。

1.2.3 状态变量约束

机组的运行状态受到水位状态的控制:

$$\sum_k \sum_l z_{i,j,k,l,t}^m \leq r_{i,t}^m \quad (6)$$

$r_{i,t}^m = 1$, 表示在 m 水头下,此时机组在此水头状态下可能运行也可能不运行; $r_{i,t}^m = 0$, 表示不在 m 水头下,此时机组在此水头状态下一定不运行。

此状态约束隐含 2 个关系:

1) i 水库上 j 机组在 m 水头下 t 时段 k 运行区间上的运行状态至多只能处于分段线性函数的某一段上:

$$\sum_l z_{i,j,k,l,t}^m \leq 1 \quad (7)$$

2) i 水库 j 机组在 m 水头下 t 时段的运行状态至多只能处于某一个运行区间上:

$$\sum_k \sum_l z_{i,j,k,l,t}^m \leq 1 \quad (8)$$

设 i 水库 j 机组在 t 时段的 0-1 状态变量为 $u_{i,j,t}$, 值为 1 表示该机组在 t 时段处于运行状态,否则为 0。

$$u_{i,j,t} = \sum_m \sum_k \sum_l z_{i,j,k,l,t}^m \quad (9)$$

设 i 水库 j 机组在 t 时段的发电量和发电用水量分别 $p_{i,j,t}$ 和 $w_{i,j,t}$:

$$p_{i,j,t} = \sum_m \sum_k \sum_l g_{i,j,k,l,t}^m \quad (10)$$

$$w_{i,j,t} = \sum_m \sum_k \sum_l q_{i,j,k,l,t}^m \quad (11)$$

1.3 机组约束

1.3.1 状态转移约束

$$u_{i,j,t} - u_{i,j,t-1} \leq x_{i,j,t-1} - y_{i,j,t-1} \quad (12)$$

$$x_{i,j,t} + y_{i,j,t} \leq 1 \quad (13)$$

式中: $x_{i,j,t}$ 和 $y_{i,j,t}$ 为 0-1 变量, 分别为 i 水库 j 机组在 t 时段的开、关机操作, 值为 1 时, 表示该机组在本时段末进行了一次开、关机操作, 否则为 0。

式(12)表示本时段如果是开机状态, 在本时段末进行一次关机操作则下一时段为关机状态, 否则下一时段继续维持开机状态; 同理, 如果本时段为关机状态, 在时段末进行一次开机操作, 则下一时段为开机状态, 否则, 下一时段继续维持关机状态。式(13)表示在同一时段末开、关机操作不能同时进行。

1.3.2 最小开、关机时间约束^[9]

用最小开、关机时间约束来限制机组频繁启停, 降低机组的运行和维护费用, 延长机组使用寿命。

$$\begin{cases} x_{i,j,t} + \sum_{\gamma=t+1}^{\min(T, t+\bar{\tau}_{i,j}-1)} y_{i,j,\gamma} \leq 1 \\ y_{i,j,t} + \sum_{\gamma=t+1}^{\min(T, t+\underline{\tau}_{i,j}-1)} x_{i,j,\gamma} \leq 1 \end{cases} \quad (14)$$

式中: $\bar{\tau}_{i,j}$ 和 $\underline{\tau}_{i,j}$ 分别为 i 水库 j 机组的最小开、关机时间。

1.3.3 初始状态约束

当初始时刻机组处于关机状态, 且没有关够最小关机时间, 即 $-\underline{\tau}_{i,j} < \zeta_{i,j}^0 < 0$ 时,

$$\sum_{t=1}^{\bar{\tau}_{i,j}+\zeta_{i,j}^0} x_{i,j,t} = 0 \quad (15)$$

式中: $\zeta_{i,j}^0$ 为 i 水库 j 机组在调度周期开始时已开机或关机的时段数。

当初始时刻机组处于开机状态, 且没有开够最小开机时间, 即 $0 < \zeta_{i,j}^0 < \bar{\tau}_{i,j}$ 时,

$$\sum_{t=1}^{\bar{\tau}_{i,j}-\zeta_{i,j}^0} y_{i,j,t} = 0 \quad (16)$$

1.3.4 启动费用

$$S_{i,j,t} = \alpha_{i,j} x_{i,j,t} + \beta_{i,j} y_{i,j,t} \quad (17)$$

式中: $\alpha_{i,j}$ 和 $\beta_{i,j}$ 分别为 i 水库 j 机组的开、关机费用。

1.4 梯级水约束

1.4.1 调度初、末时刻库容限制约束

$$\begin{cases} V_{i,0} = V_i^0 \\ V_{i,T} = V_i^T \end{cases} \quad (18)$$

式中: V_i^0 和 V_i^T 分别为 i 水库在调度初始(在 0 时刻)、末时刻(在 T 时刻)的库容量。

1.4.2 库容平衡方程

$$V_{i,t+1} = V_{i,t} + 3\,600\Delta(Q_{i-1,t-\sigma_n} + f_{i,t} - Q_{i,t}) \quad (19)$$

$$\text{式中: } Q_{i,t} = s_{i,t} + \sum_j^{J_i} w_{i,j,t} \quad (20)$$

$s_{i,t} \geq 0$; $s_{i,t}$ 和 $f_{i,t}$ 分别为 i 水库 t 时段的弃水、自然来水量; σ_n 为直接上游水库到该水库的水流延时。

2 数据测试分析

本文采用 CPLEX 整数规划软件包求解建立的短期水电调度模型。算例测试环境为 CPU P4 3 GHz, 内存 1 GB, Microsoft Visual C++ 6.0 开发平台, 通过 ILOG Concert 技术调用 ILOG CPLEX 9.0 优化软件包。基于本文提出的模型, 应用西北电网提供的部分数据, 对一个包含 3 个水库、12 台机组、调度周期为 24 时段的水库群水电站短期调度问题进行了测试。

附录 A 给出水库间的网络连接关系(见图 A1)、各机组的物理参数(见表 A1)、各水库参数(见表 A2), 以及相应的调度结果数据。

研究了在不同库容离散分段(3 段~4 段)及不同水电转换关系剖分(4 段~8 段)逼近下, 模型求解时间与总发电效益的变化趋势(见表 1、表 2)。由表 1 可以看出, 求解时间随离散区间的增加而增加, 由表 2 可以看出发电总效益随离散区间的增加而趋于稳定值。由于离散区间的增加提高了精度, 而相应的运算时间变长了, 因此, 调度时通常在运算时间和精度上采取折中的策略。

表 1 计算运行时间
Table 1 CPU time

M_i	不同 $L_{i,j,k}$ 值时的计算运行时间/s				
	4	5	6	7	8
3	8.6	9.3	11.9	14.6	19.2
4	12.7	14.7	20.6	26.6	32.3

表 2 总效益
Table 2 Total value

M_i	不同 $L_{i,j,k}$ 值时的运行总效益/万元				
	4	5	6	7	8
3	172.353	172.359	172.368	172.376	172.376
4	172.369	172.371	172.379	172.379	172.379

3 结语

本文在考虑水头影响、离散运行区间、最小开关机时间约束、启动费用、水流延时等复杂因素的前提下, 建立了梯级水库群水电站短期调度问题的线性

混合整数规划模型,其特点是能灵活协调精度与规模的两难问题。针对所建模型,采用通用整数规划方法求解,其显著优点是可以得到模型全局最优解。仿真测试结果表明本文提出的模型性能良好,能较好地解决短期水电调度中一些目前不易处理的复杂因素。需要指出,本文中对水头影响的考虑方式仍有不完善之处,具体表现在模型中未准确考虑尾水位及引水损失,因此其精度有待进一步提高。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

- [1] LI C, JAP P J, STREIFFERT D L. Implementation of network flow programming to the hydrothermal coordination in an energy management system. *IEEE Trans on Power Systems*, 1993, 8(3): 1045-1053.
- [2] RUZIC S, RAJAKOVIC N. A flexible approach to short-term hydrothermal coordination: Part I & II. *IEEE Trans on Power Systems*, 1996, 11(3): 1564-1578.
- [3] ZOUMAS C E, BAKIRTZIS A G, THEOCHARIS J B, et al. A genetic algorithm solution approach to the hydrothermal coordination problem. *IEEE Trans on Power Systems*, 2004, 19(3): 1356-1364.
- [4] NI E, GUAN X, LI R. Scheduling hydrothermal power systems with cascaded and head-dependent reservoirs. *IEEE Trans on Power Systems*, 1999, 14(3): 1127-1132.
- [5] CHANG G W, AGANAGIC M, WRIGHT J G. Experiences with mixed integer linear programming based approaches on short-term hydro scheduling. *IEEE Trans on Power Systems*, 2001, 16(4): 743-749.
- [6] 贾江涛,翟桥柱,管晓宏,等. 水库群水电站短期调度的整数规划方法. *西安交通大学学报*, 2008, 42(8): 1006-1009.
- JIA Jiangtao, ZHAI Qiaozhu, GUAN Xiaohong, et al. Mixed integer programming based method for short-term scheduling of hydroelectric plants. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2008, 42(8): 1006-1009.
- [7] LI T, SHAHIDEPOUR M. Price-based unit commitment: a case of lagrangian relaxation versus mixed integer programming. *IEEE Trans on Power Systems*, 2005, 20(4): 2015-2025.
- [8] BISANOVIC S, HAJRO M, DLAKIC M. Hydrothermal self-scheduling problem in a day-ahead electricity market. *Electric Power Systems Research*, 2008, 78(9): 1579-1596.
- [9] 翟桥柱. 电力系统优化调度模型与算法研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2005.
- [10] CONEJO A J, ARROYO J M, CONTRERAS J, et al. Self-scheduling of a hydro producer in a pool-based electricity market. *IEEE Trans on Power Systems*, 2002, 17(4): 1265-1272.
- [11] ERNESTO P, JAVIER G G. Improving the B&B search for large-scale hydrothermal weekly scheduling problems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2006, 28(5): 339-348.
- [12] BORGHETTI A, D'AMBROSIO C, LODI A, et al. An MILP approach for short-term hydro scheduling and unit commitment with head-dependent reservoir. *IEEE Trans on Power Systems*, 2008, 23(3): 1115-1124.
- [13] FINARDI E C, DA SILVA E L. Unit commitment of single hydroelectric plant. *Electric Power System Research*, 2005, 75(2/3): 116-123.
- [14] CATALÃO J P S, MARIANO S J P S, MENDES V M F, et al. Parameterisation effect on the behaviour of a head-dependent hydro chain using a nonlinear model. *Electric Power Systems Research*, 2006, 76(6/7): 404-412.

贾江涛(1967—),男,通信作者,博士研究生,主要研究方向:电力系统优化调度。E-mail: jtjia@sei.xjtu.edu.cn

管晓宏(1955—),男,教授,博士生导师,IEEE Fellow,主要研究方向:电力系统、机械制造系统优化调度及系统优化理论。E-mail: xhguan@sei.xjtu.edu.cn

翟桥柱(1972—),男,博士,副教授,主要研究方向:电力系统调度及优化理论。E-mail: qzzhai@sei.xjtu.edu.cn

Short-term Optimal Scheduling of Head-dependent Cascaded Hydropower Stations

JIA Jiangtao, GUAN Xiaohong, ZHAI Qiaozhu

(SKLMS Laboratory and MOE KLINNS Laboratory, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: It is a challenge to appropriate formulation and solution to short-term scheduling of cascaded hydropower stations with discrete operating zones and water-head effects. A mixed integer linear programming model for short-term scheduling of the cascaded hydropower generation system is established that can efficiently handle discrete operating zones and water-head effects. The basic idea is the discretization of the storage level of the reservoir while setting some relevant binary variables and constraints. The model is then solved with a CPLEX package. Numerical test results concerning a testing system with 3 reservoirs and 12 hydropower generating units show that the model presented is effective and flexible, while capable of handling many complex factors in short-term scheduling of cascaded hydropower systems.

This work is jointly supported by the Key Project of National Natural Science Foundation of China (No. 60736027), National Natural Science Foundation of China (No. 60704033) and the National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (No. 2007AA04Z154).

Key words: short-term scheduling; cascaded hydropower systems; water-head; discrete operating zone; mixed integer linear programming

附录 A 算例参数及相应的调度结果分析

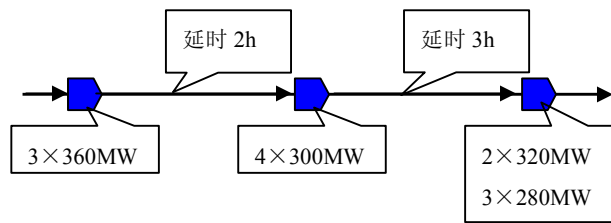


图 A1 水系拓扑图
Fig.A1 Hydraulic topology of the river basin

表 A1 各机组物理参数
Table A1 Characteristics of hydro unit

机组	运行区间(MW)	$\delta_{i,j,k,l}^m$	$\alpha_{i,j,k,l}^1$	$\alpha_{i,j,k,l}^2$	$\alpha_{i,j,k,l}^3$	$\tau_{i,j}$	$\bar{\tau}_{i,j}$	$\zeta_{i,j}^0$
360MW	[60,155]; [185,360]	30; 65; 75; 100	5; 4; 3; 6	3; 4; 4; 6	4; 5; 4; 6	1	2	-3
300MW	[30,140]; [160,300]	40; 70; 50; 90	3; 5; 4; 6	3; 4; 5; 6	4; 5; 5; 6	2	3	-4
320MW	[40,150]; [170,320]	40; 70; 60; 90	4; 6; 4; 6	3; 6; 5; 7	3; 6; 4; 6	1	1	1
280MW	[20,130]; [150,280]	40; 70; 80; 50	4; 3; 5; 6	3; 5; 4; 7	4; 5; 3; 6	3	4	5

表 A2 各水库参数
Table A2 Parameters of reservoir

		(hm ³)			
水库	库容离散区间	V_i^0	V_i^T		
1	163~181; 181~199; 199~208	180	180		
2	172~199; 199~217; 217~235	210	210		
3	154~190; 190~226; 226~262	220	220		

图 A2 给出了调度时段系统电价和系统总发电量变化关系。可以看出，电价是影响系统发电量的主要因素，在第 9、第 16 时段电价较高，此时发电量达到峰值，在第 1、第 24 时段电价较低，此时发电量进入谷底，与系统效益最大化的目标相吻合。

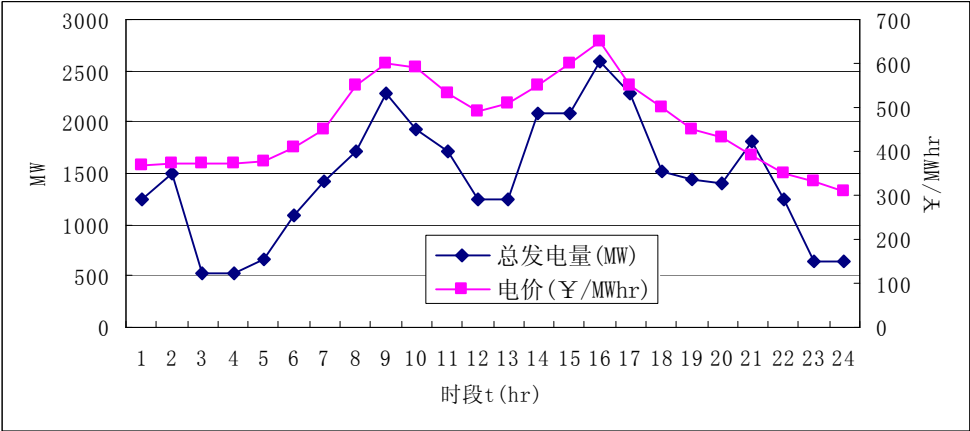


图 A2 电价和调度电量关系图
Fig.A2 Energy price profile and production schedule

为说明水库蓄水与价格、发电效率等的前后耦合关系，图 A3 给出各调度时段三个水库的库容变化。结合图 A2 可以看出，第一个水库库容除最后三个时段在低水位段外，其他时段都在中水位段，库容变化平稳，在发电高峰(9~10 时段、16~17 时段)后有一个小谷底(13 时段、19 时段)，这是因为用水量较大形成的。第二个水库水位始终在中水位段变化，随着总发电量的增大，发电用水量也在增大，水位降低，在第 10 和第 18 时段形成谷底，在第 22 到第 24 时段，随着总发电量的减小水库处于蓄水时段，保证在调度时段末使得水库库容达到目标库容。对第三个水库来说，由于其水位在中、高水位段变化，库容变化曲线和第一、二水库截然不同，在第 7~18 发电量较大时段水库处于高水位段，发电机效率高，有效地节约了水资源。

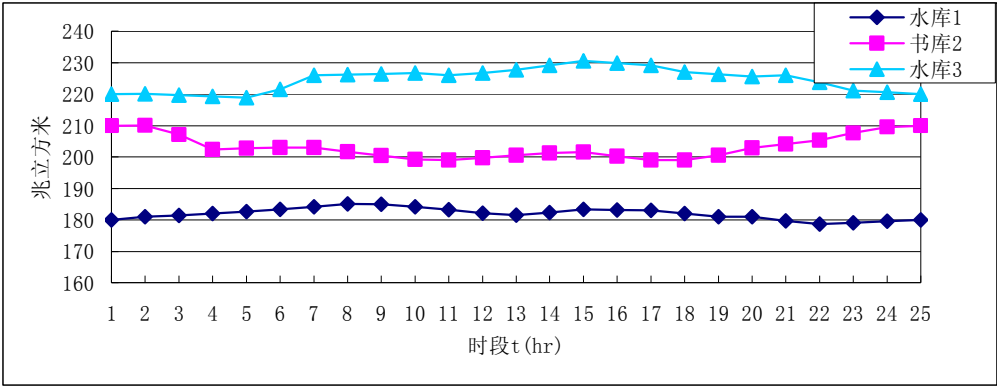


图 A3 库容变化图
Fig.A3 Water content of reservoirs

水位高低决定发电机发电效率，限于篇幅这里只给出第三个水库第 5 台机组的发电量 (MW) 及发电水流量 (m^3/s) 直方图(图 A4)，可以看出，在不同水位下发电机效率是不同的，比较第 13 和第 20 时段，第 21 时段和第 22 时段虽然发电量相同，但发电水流量明显不同，即发电效率不同，发电机发相同的电，如果在高水位，发电机发电用水流量小，效率高，如果处于低水位，需要的水流量就大，发电机效率低。

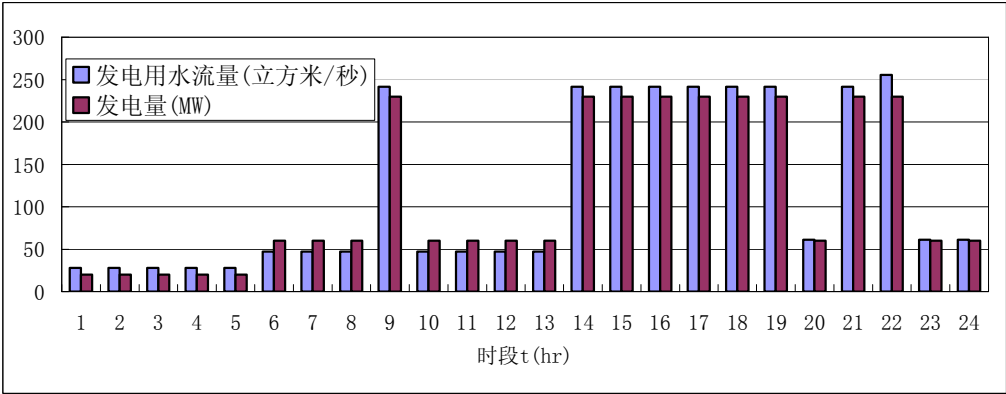


图 A4 第三个水库第 5 机组各个时段发电量及用水流量
Fig.A4 Power output and discharge of the 5th hydro unit of the third reservoir