

金沙江下游梯级水库消落期精细化调度研究

王李东¹, 毛玉鑫¹, 肖婉², 王祥¹, 袁晓辉², 王何予¹

(1. 中国长江电力股份有限公司, 湖北 宜昌 443002; 2. 华中科技大学土木与水利工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 针对金沙江下游梯级水电站在消落期的优化调度问题, 结合实际调度需求, 在分析水库水量平衡、水位、下泄流量及机组出力等多种约束条件的基础上, 选取消落期内梯级水库群的发电量总和最大为优化目标, 构建了金沙江下游梯级水电站的日尺度精细化调度模型, 并采用 DPSA-POA 算法对模型进行优化求解, 通过实际算例验证了模型及求解方法的有效性。研究表明, 该调度模型能够在保证各梯级水库安全运行的前提下, 充分利用水资源, 最大化消落期的总发电量, 为梯级水库群的精细化调度管理提供了理论基础和技术支持。

关键词: 梯级水库; 金沙江下游; 消落期; 日尺度精细化调度

中图分类号: TV697.1⁺1

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2025)09-0208-04

1 引言

金沙江下游 A、B、C、D 四座巨型水电站总防洪库容达 $154.93 \times 10^8 \text{ m}^3$, 是长江中下游防洪体系的重要组成部分, 在汛期能够有效调节上游洪水, 削减洪峰, 减轻川渝地区和长江中下游的洪水压力。四库的总装机容量高达 46 460 MW, 是“西电东送”战略中的核心电源点^[1], 在能源结构优化中发挥着重要作用。除了发电和防洪, 这些水电站还在农业灌溉、航运发展、生态环境保护等方面发挥了多重功能, 是国家水利工程中的重要节点。对于梯级水库优化调度问题, 针对防洪、兴利、生态、航运等不同的调度目标, 已有许多经典的模型和优化方法, WINDSOR JS^[2] 最早使用线性规划算法(LP)对水库调度问题进行求解; 张明等^[3] 考虑最大削峰和保障防洪安全准则对水电站优化调度进行建模, 并选用动态规划(DP)对所构建模型加以求解, 同时采用动态水位约束及变动离散机制对 DP 进行有效降维, 以提升算法求解性能; 蔡望等^[4] 将改进遗传算法(GA)应用于某梯级电站日优化调度模型, 克服了智能算法早收敛的缺点; 此外, 也有关于粒子群优化及其变形改进类方法的研究并将其应用于水库发电优化调度问题中^[5], 取得了良好的应用效果。水库中长期确

定性优化调度虽然能够提供整体的规划和方向, 但在实际调度中, 水库的入库流量和下泄流量会因天气条件、流域降水、径流变化等短期因素发生波动, 而中长期调度难以充分应对这些日常变化, 日尺度的精细化调度则可根据最新水文气象数据动态调整水库运行策略。因此, 制定梯级水库的日尺度精细化调度计划十分必要。本文结合金沙江下游梯级水库实际情况, 通过构建精细化日尺度调度模型, 考虑实际调度中的各种复杂约束条件, 采用 DPSA-POA 方法进行日尺度优化调度模型求解, 探索如何在满足多种约束的情况下, 提升消落期梯级水库的整体运行效益, 为金沙江下游梯级水库的科学管理提供理论依据和技术支持。

2 梯级水库优化调度模型建立

2.1 目标函数

以金沙江下游 A、B、C、D 四座水库组成的梯级水库群为研究对象, 重点研究其在消落期内的精细化优化调度计划制定问题。以消落期内梯级水库总发电量最大为目标函数, 可表示为:

$$E = \max \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T N_t^i \Delta t = \max \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T K_i^i q_i^i H_i^i \Delta t \quad (1)$$

式中, E 为 N 座水库在消落期 T 内的梯级总发电

收稿日期: 2024-10-22, 修回日期: 2024-12-05

基金项目: 长江电力股份有限公司项目(Z242302026)

作者简介: 王李东(1979-), 男, 硕士、高级工程师, 研究方向为水库调度管理, E-mail: tgdc2324@163.com

通讯作者: 袁晓辉(1971-), 男, 博士、教授, 研究方向为水库优化调度, E-mail: yxh71@163.com

量; N 为梯级水库总数; i 为水库序号; T 为消落期内调度时段总数; t 为消落期时段步长编号; N_t^i 为水库 i 在时段步长 t 内的发电出力; Δt 为消落期调度时段步长; K_t^i 为水库 i 在时段步长 t 发电出力系数; q_t^i 为水库 i 在时段步长 t 的出库发电流量; H_t^i 为水库 i 在时段步长 t 的水头。

2.2 约束限制条件

(1) 水库流量出入库水量平衡关系。关系式为:

$$V_t^i = V_{t-1}^i + (I_t^i - Q_t^i) \Delta t \quad (2)$$

式中, V_{t-1}^i 、 V_t^i 分别为水库 i 在时段步长 t 开始时刻、末时刻的库容; I_t^i 为水库 i 在时段步长 t 内的入库流量; Q_t^i 为水库 i 在时段步长 t 内的出库流量。

对梯级水库优化调度模型进行求解时, 需考虑梯级水库间的水力关系:

$$I_t^i = Q_t^{i-1} + \Delta q_t^i \quad (3)$$

式中, Q_t^{i-1} 为水库 i 的紧邻直接上游水库 $i-1$ 库在时段步长 t 出库流量; Δq_t^i 为水库 i 在时段步长 t 的区间入流。

同时还需要考虑弃水情况:

$$Q_t^i = q_t^i + W_t^i \quad (4)$$

$$q_t^i = (V_{t-1}^i - V_t^i) / \Delta t + \Delta q_t^i + Q_t^{i-1} - W_t^i \quad (5)$$

式中, q_t^i 为第 i 个水库在第 t 时段的发电流量; W_t^i 为第 i 个水库在第 t 时段的弃水流量。

(2) 水位上、下限制。关系式为:

$$Z_t^{i,\min} \leq Z_t^i \leq Z_t^{i,\max} \quad (6)$$

式中, Z_t^i 为水库 i 在时段步长 t 的水位; $Z_t^{i,\min}$ 、 $Z_t^{i,\max}$ 分别为水库 i 在时段 t 的最小、最大水位限制。

(3) 出库下泄流量上、下限制。关系式为:

$$Q_t^{i,\min} \leq Q_t^i \leq Q_t^{i,\max} \quad (7)$$

式中, Q_t^i 为水库 i 在时段步长 t 出库下泄流量; $Q_t^{i,\min}$ 为水库 i 在时段步长 t 的非负出库下泄流量下限(考虑到水库综合利用需求, 可按航运和生态流量要求设置); $Q_t^{i,\max}$ 为水库 i 在时段步长 t 允许的最大出库流量。

(4) 水电站发电出力上、下限制。关系式为:

$$N_t^{i,\min} \leq N_t^i \leq N_t^{i,\max} \quad (8)$$

式中, $N_t^{i,\min}$ 为水库 i 在时段步长 t 的水电站发电出力最小值; $N_t^{i,\max}$ 为水库 i 在时段步长 t 的水电站发电出力允许最大值。

(5) 水力联系约束。关系式为:

$$Z_{i,t}^{\text{down}} = \begin{cases} Z_1^{\text{down}}(Q_t^i) & \text{无顶托} \\ Z_2^{\text{down}}(Q_t^i, Z_t^{i+1}) & \text{有顶托} \end{cases} \quad (9)$$

式中, $Z_{i,t}^{\text{down}}$ 为当前电站第 t 时段的尾水位; Z_1^{down} 、 Z_2^{down} 分别为无顶托、有顶托时的尾水位曲线; Z_t^{i+1} 为下游电站第 t 时段的坝前水位。

根据电站之间是否存在顶托效应和计算时能否获得下游电站的坝前水位, 选择是否采用顶托尾水位曲线。

(6) 边界限制约束。关系式为:

$$\begin{cases} Z_1^i = Z_{\text{begin}}^i \\ Z_T^i = Z_{\text{end}}^i \end{cases} \quad (10)$$

式中, Z_{begin}^i 为第 i 座水库在调度期的起调水位; Z_{end}^i 为第 i 座水库在调度期末的控制水位。

(7) 水位变幅约束。关系式为:

$$-\Delta Z_t^{i,\text{fallMax}} \leq Z_t^i - Z_{t-1}^i \leq \Delta Z_t^{i,\text{riseMax}} \quad (11)$$

其中, $\Delta Z_t^{i,\text{fallMax}}$ 为第 i 座水库在第 t 时段水位允许的最大降幅; $\Delta Z_t^{i,\text{riseMax}}$ 为第 i 座水库在第 t 时段水位允许的最大升幅。

3 梯级水库优化调度模型求解方法

DPSA-POA 是求解水库群优化调度模型的有效方法之一。DPSA 是一种有效的 DP 降维方法, 它基于逐次迭代逼近最优解的思想, 将一个多阶段高维梯级水库优化调度问题划分为由多个两阶段构成的子问题加以迭代求解。各两阶段水库优化调度子问题通过选定的状态变量加以耦联, 优化过程中每次先将其他阶段的待求变量保持不变的固定取值, 然后只对当前待求解的水库优化两阶段子问题的决策变量(如水位等)在其预先规定的离散范围区间内进行搜索改变其取值, 从而寻优搜索比较以得到此阶段水库调度最优目标函数取值; 同时, 将此阶段搜寻得到的变量最优取值作为下一阶段水库调度变量寻优的初始取值, 进行下一个两阶段水库优化调度子问题的离散寻优过程。进而对水库所有调度时段对应的划分子阶段往复循环离散寻优过程, 直至调度时段对应的每个两阶段水库调度问题前后两次寻优结果差值小于事先设定的精度为止。

采用 DPSA-POA 方法求解梯级水库优化调度模型的步骤如下。

步骤 1 输入各水库的基本参数和特征曲线及径流序列资料, 水库数量用 i 表示, 时刻用 t 表示, 迭代次数用 j 表示, 并令初始值 $i=1, t=1, j=1$ 。

步骤 2 开始第 j 次迭代计算, 对第 i 个水库 t 时刻的水位进行优化, 优化时固定其余时刻的水位和运行状态不变。令 $t=t+1$, 按同样的步骤进行水位更新, 直至遍历完调度期内所有时段。

步骤 3 令 $i=i+1$, 重复步骤 2, 直至遍历所有水库。

步骤 4 令 $j = j + 1$, 重复步骤 2、3, 直至满足迭代条件或达到最大迭代次数为止。

步骤 5 停止优化, 输出最终优化结果。

4 金沙江下游梯级水库消落期日尺度调度算例分析

日尺度调度计算模型能够考虑中长期优化调度模型难以充分涵盖水库短期运行中的某些约束条件。对于金沙江下游梯级, 由于消落期电网侧直流检修对各电站出力有较大限制, 此时如果只考虑机组最大出力约束和预想出力曲线的限制难以满足实际调度需求。故金沙江下游梯级水库消落期精细化日尺度调度模型在构建过程中除考虑水位限制、流量限制和机组发电出力等约束条件后, 还需进一步考虑梯级水库在消落期的机组和电网联络线检修约束, 以使得发电运行计划尽可能贴近实际。该约束可表示为:

$$N_t^{i, \min} \leq N_t^i \leq N_{t, jx}^{i, \max} \quad (12)$$

式中, $N_{t, jx}^{i, \max}$ 为第 i 座水库在考虑机组和电网联络线检修后 t 时段允许的出力上限。

选取某年 1 月 1 日至 6 月 30 日为梯级水库运行的消落期, 综合考虑四座电站机组出力特性、机组检修计划、电网侧直流检修计划。

现给定四座水电站日入库径流和区间径流过程。同时, 各水库对应消落期起始时刻和结束时刻的水位控制边界条件按表 1 进行设置。

表 1 金沙江下游梯级电站消落期初末水位设置

Tab. 1 The setting of water level at the beginning and end of the drawdown period of cascade reservoirs

水库	消落期起调水位/m	消落期末控制水位/m
A	972.06	953.19
B	807.28	782.01
C	595.75	562.91
D	375.17	372.33

金沙江下游梯级水库消落期日尺度调度结果分析现以四座水电站 A、B、C、D 组成的金沙江下游梯级水库为例, 开展计划模拟仿真计算。在给定的初始边界条件和约束条件对应的过程数据, 应用 DPSA-POA 算法求解本文所构建的梯级水库消落期精细化日尺度优化调度模型, 得到在消落期内四座水库的出力变化过程、水位变化过程和出库流量变化过程分别见图 1、2。

根据图 1、2 可知, 对金沙江下游梯级四座水电站开展消落期联合日尺度调度, 所得调度策略不仅满足考虑电站机组检修和电网直流联络线检修计划后各水电站的出力上限约束, 还兼顾了各

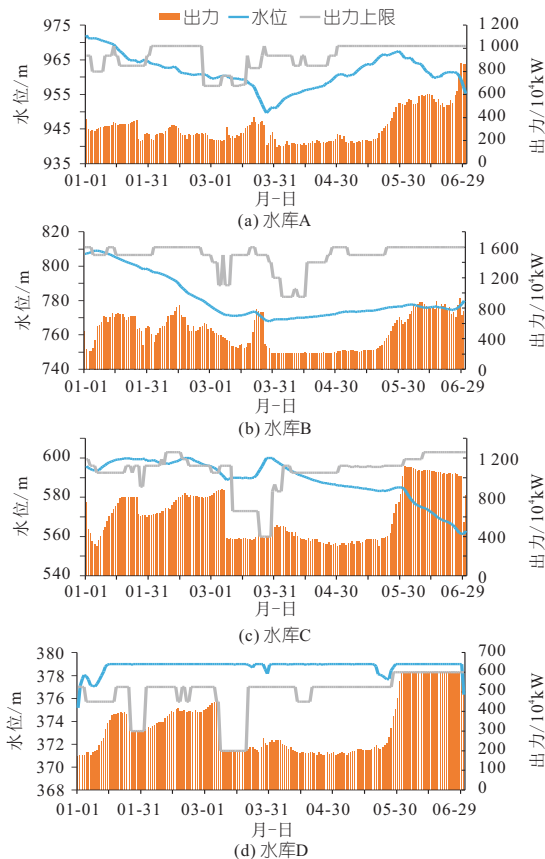


图 1 电站水位和出力以及出力上限随时间的变化过程
Fig. 1 The variation of water level, output and upper limit of output for each power station over time

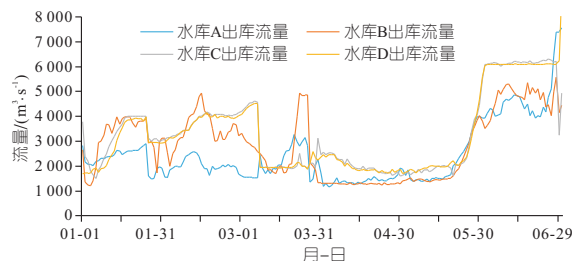


图 2 水库出库流量随时间的变化过程
Fig. 2 The variation of outflow of each reservoir over time

水库在消落期不同时段出力和水位变化, 确保了在满足各水电站机组检修和电网直流联络线检修计划前提下, 实现了梯级水库消落期内的发电量最大化。

从梯级各水库的水位变化过程来看, 水库 A 在消落期的水位波动较大, 其先在 1 月至 3 月中旬运行期间逐步消落, 并在 3 月下旬至 5 月底回蓄了部分水量, 而后在 6 月加大出库流量, 逐步完成消落。水库 B 的水位在 1 月上旬略有抬升, 升高了约 1.87 m, 再逐步开始消落, 直至 3 月下旬, 并在之后保持相对稳定的水位运行。水库 C 的水位在 1~5 月期间整体较高, 基本处在 585~600 m 之间, 6 月开始以每天 0.06~1.75 m 的速

度消落,并在 6 月底回蓄少部分水量直至消落期末控制水位。水库 D 在 1 月上旬蓄水至 378 m 左右,之后为了满足最小出库流量 $1\ 700\ \text{m}^3/\text{s}$ 的要求,水库的出库流量大于入库流量,水位开始下降。在 1 月下旬至 6 月下旬,水库 D 基本维持高水位运行,在接近 6 月底时以较快的速度消落。

从梯级各水库的出力变化过程来看,水库 A 在 1 月至 3 月上旬牺牲了部分发电量,确保下游水库 B、C、D 的发电出力维持在较高水平,这与水库 A 作为上游龙头水电站的调节作用密切相关,在消落期初期,水库 A 通过减少了自身的发电出力,为下游水库提供更多的水量支持,保障了下游梯级电站的发电能力。随着 3 月中旬至 5 月下旬检修期来临,梯级各水库的发电出力受到了较大限制,电站机组的出力上限降低较为明显。在此调度运行期间,尽管各水库的出力有所下降,但依然最大限度地利用了水库的兴利调节水量,确保了在检修期内机组的稳定运行。在 6 月来水较多的时段,各电站此时不受集中检修出力的限制,可以充分利用来水加大电站发电出力。

通过分析图 2 梯级各水库出库流量变化过程,发现金沙江下游梯级水库在消落期的调度过程中,部分调度时段会出现弃水现象,主要集中在水库 C、D。在水库运行过程中,由于发电出力限制,尤其是在丰水期来临时,部分入库流量无法通过发电完全消耗,导致出现了弃水现象。水库 C 在 3 月 27~28 日出现了弃水,水库 D 的弃水主要出现在 6 月中下旬,在消落期后期,为消落到预先指定水位,水库 D 产生的弃水相对较多。

值得注意的是,调度过程中的出力上限约束对于优化调度结果起到了关键作用。首先,在检修期内,由于出力上限受到限制,各水库的出力均有所下降,尤其是水库 C、D 的出力受到明显影响。水库 A 作为龙头水库,在此运行期间继续发挥水库的调节作用,在合理控制自身发电出力的同时,确保了下游水库的稳定运行,这种调度安排不仅符合消落期检修约束的要求,还有效避免了水资源的浪费。其次,在消落期的后期,各水库的出力上限逐渐解除,尤其是在 6 月,各水库的机组发电得以恢复正常运行,充分利用了入库来水,使水库发电出力水平得到较大提升。这种灵活的调度安排确保了水库在不同的运行时期最大限度地提高发电量,同时避免了在检修期内因超出出力上限而引发的不必要风险。

最后,水库 B 在 1 月初略微提高了水位,这一调度安排是为了确保在后续消落期中能够有充

足的水量储备。随着消落期的推进,水库 B 的水位逐步下降,虽然在检修期出力上限受到限制,但仍然能够通过合理调度运行维持较高的发电出力水平。同样,水库 C 在消落期内保持较高的水位运行,这使得其在检修期内的发电出力得以维持在合理水平。到 6 月时,随着水量增多,水库 C 逐步完成了消落任务,并在短时间内迅速恢复出力,最大限度地利用了入库来水。

综上所述,金沙江下游梯级水库在消落期的优化调度结果不仅遵循了出力上限的约束要求,还灵活应对了消落期内检修计划的特殊需求,确保了整个梯级水库群在消落期内的总发电量最大化,这一调度结果为水库消落期的精细化日尺度优化调度提供了理论支持。

5 结论

a. 对金沙江下游梯级水电站消落期的日尺度精细化联合优化调度研究,展示了在多重约束条件下进行梯级水电站群联合调度的可行性与有效性。梯级水库在消落期的日优化调度合理安排各水库的水位消落、发电出力,并协调各水电站机组和电网直流联络线的检修计划,确保了各水电站的高效运行。

b. 在考虑消落期机组检修及梯级水库间复杂水力联系条件下,精细化的日尺度调度策略能够平衡各水电站的运行需求,实现发电量的最大化。因此,研究结果为梯级水库消落期精细化调度管理提供了一种切实可行且可操作的技术,为进一步研究梯级水电站联合优化调度奠定了基础。

参考文献:

- [1] 刘亚新,姚华明,徐杨,等. 白鹤滩蓄水对金沙江下游梯级水库消落期调度影响分析[J]. 水电能源科学, 2021, 39(12): 84-88.
- [2] WINDSOR J S. Optimization model for the operation of flood control systems[J]. Water resources research, 1973, 9(5): 1219-1226.
- [3] 张明,王随玲,蒋志强,等. 基于动态规划算法的额勒赛下游水电站防洪优化调度研究[J]. 水电能源科学, 2021, 39(11): 127-131.
- [4] 蔡望,陈仁义,彭辉. 基于改进遗传算法的梯级电站日经济优化调度研究[J]. 科技创新与生产力, 2024(5): 85-90.
- [5] 刘宇,许新宇,李晓澜,等. 水库发电优化调度改进粒子群算法应用[J]. 水力发电, 2024, 50(1): 53-57.

ures of water controlling radial gates of hydro-power plants: Advancements and future perspectives[J]. Engineering failure analysis, 2023, 148: 107168.

[3] TIELEMAN O C, HOFLAND B, TSOUVALAS A, et al. A fluid-structure interaction model for assessing the safety of flood gate vibrations due to wave impacts[J]. Coastal engineering, 2021, 170: 104007.

[4] YE F, HU Z J. Robust load frequency control of interconnected power systems with back propagation neural network-proportional-integral-derivative-controlled wind power integration[J]. Sustainability, 2024, 16(18): 8062.

[5] CHEN Y. Application of the BP neural network algorithm to the ultimate bearing capacity test of building structures [J]. Journal of computational methods in sciences and engineering, 2024, 24(3): 1759-1770.

[6] WAN X Y, TANG Y J, LIU S. Application and research of mine safety management strategy based on the BP network model[J]. International journal of high speed electronics and systems, 2024: 2540038.

[7] 周良, 王华伟, 许珊珊, 等. 基于 GA 优化 BP 算法的滑油状态监测[J]. 航空发动机, 2022, 48(5): 137-142.

[8] WANG Y S, XIN B, LI J T, et al. Surface roughness prediction model and surface topography analysis of 2. 5D-Cf/SiC in two-dimensional ultrasonic assisted grinding based on GA-BP neural network [J]. Tribology international, 2025, 201: 110272.

[9] KIRANKUMAR K R, KUMAR G N, KAMATH N, et al. Experimental investigation and optimization of performance, emission, and vibro-acoustic parameters of SI engine fueled with n-propanol and gasoline blends using ANN-GA coupled with NS-GA3-modified TOPSIS hybrid approach[J]. Energy, 2024, 306: 132521.

[10] LI Y P, JIA M, CHANG Y C, et al. Parametric study and optimization of a RCCI (reactivity controlled compression ignition) engine fueled with methanol and diesel[J]. Energy, 2014, 65: 319-332.

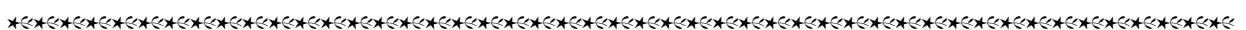
Research on Identification Technology of Hydrodynamic Excitation Disease of Gate

GAO Jian-wei¹, ZHU Jia¹, LI Jun-jie², SHEN Wen-jie¹, HE Qiu¹, CHEN Yong¹,
JIANG Qing-lin², GUO Jian-bin²

(1. East China Tongbai Pumped Storage Power Generation Corporation Limited, Hangzhou 310000, China;
2. School of Electrical and Power Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: Affected by hydrodynamic excitation and other factors, the opening-closing operation of hydraulic gates exhibits multi-field coupling effects and complex nonlinear dynamic characteristics, leading to difficulties in identifying equipment safety states. Test data of gate operation demonstrate that artificial neural network algorithms can identify hydrodynamic excitation disease features and accurately predict its development trends. To address this, BP and GA-BP neural networks were employed to construct identification and prediction models for hydrodynamic excitation disease. These models were applied to identify and forecast the effective values of reel vibration, with model performance evaluated using metrics including Relative Error (R_{RE}), Mean Absolute Percentage Error (M_{MAPE}), and Root Mean Square Error (R_{RMSE}). Compared to the BP model, the results indicate that the GA-BP model achieves reductions of 20.77% in R_{RE} , 4.74% in M_{MAPE} , and 6.27% in R_{RMSE} , demonstrating superior fitting to measured samples and enhanced stability with extended prediction durations, thus providing critical technical support for engineering risk mitigation and hazard prevention.

Key words: hydraulic gate; GA-BP neural network; engineering safety; winch opening and closing operation; hydrodynamic excitation disease



(上接第 211 页)

Research on Refined Scheduling of Cascade Reservoirs in Drawdown Period in the Lower Reaches of Jinshajiang River

WANG Li-dong¹, MAO Yu-xin¹, XIAO Wan², WANG Xiang¹, YUAN Xiao-hui², WANG He-yu¹
(1. China Yangtze Power Co., Ltd., Yichang 443002, China;

2. School of Civil and Hydraulic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Aiming at the optimal dispatching problem of cascade hydropower stations in the lower reaches of the Jinshajiang River during the drawdown period, based on the analysis of the reservoir water balance, water level, discharge flow rate, and unit output, a daily-scale refined scheduling model was established by maximizing the total power generation of cascaded reservoirs and considering the actual scheduling requirements. The model was solved using the DPSA-POA algorithm. The effectiveness of the model and solution method was verified by the actual case. The results show that the proposed scheduling model can make full use of water resources and maximize the power generation in the drawdown period under the premise of ensuring the safe operation of each reservoir. Thus, it provides theoretical basis and technical support for the refined scheduling management of the cascaded reservoirs.

Key words: cascaded reservoirs; lower reaches of the Jinshajiang River; drawdown period; day-scale refined scheduling