

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2025.04.001

基于分段迭代法的抽水蓄能电站上下水库联合洪水调节计算模型

方国华¹,姬新洋¹,吴勇拓²,李超²,郁捷皓¹,于赛玉²,鄢军军¹

(1. 河海大学水利水电学院,江苏 南京 210098; 2. 山东电力工程咨询院有限公司,山东 济南 250100)

摘要: 针对现有抽水蓄能电站洪水调节计算方法大多忽略上下水库水力联动关系,且常简化考虑满发流量与天然洪水叠加情景的问题,提出了一种基于分段迭代法的抽水蓄能电站上下水库联合洪水调节计算模型。该模型构建了能够反映上下水库完整水量交换与水力耦合关系的数学模型,并采用分段迭代算法对上下水库水位及流量的动态变化过程进行精细化求解;在此基础上,模型结合滑动组合方法构建了洪水遭遇情景矩阵,模拟不同工况和洪水遭遇情景对上下水库运行的影响,并提出了动态预留库容控制策略,以保障电站的安全运行以及后续发电需求。实例验证结果表明:所提出的模型能够准确、稳定地模拟上下水库在复杂洪水情景下的动态响应过程,并有效揭示洪水遭遇时机、电站运行状态以及预留库容控制策略对水库水情变化的关键影响;模型所识别的最不利洪水遭遇情景符合抽水蓄能电站的运行规律,可为抽水蓄能电站的工程设计与安全运行提供科学的参考依据。

关键词: 抽水蓄能电站;洪水调节;水力联动;预留库容动态控制;分段迭代法

中图分类号: TV743;TV122+.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2025)04-0001-09

Flood regulation calculation model for joint operation of upper and lower reservoirs in pumped storage power stations based on segmented iterative method

FANG Guohua¹, JI Xinyang¹, WU Yongtuo², LI Chao², YU Jiehao¹, YU Saiyu², YAN Junjun¹

(1. College of Water Conservancy & Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute Corp., Ltd., Jinan 250100, China)

Abstract: The existing flood regulation calculation methods for pumped storage power stations mostly neglect the hydraulic linkage between upper and lower reservoirs and tend to oversimplify scenarios involving the superposition of full-generation flow and natural floods. To address these issues, a flood regulation calculation method for the joint operation of upper and lower reservoirs in pumped storage power stations based on a segmented iterative method was proposed. This model established a mathematical framework that captured the complete water exchange and hydraulic coupling relationship between the upper and lower reservoirs and applied a segmented iterative algorithm to finely resolve the dynamic variations in water level and flow of the upper and lower reservoirs. On this basis, the model integrated a sliding combination approach to construct a flood encounter scenario matrix, simulating the impacts of various operating conditions and flood encounter scenarios on reservoir operations. A dynamic reserved reservoir capacity control strategy was proposed to ensure the safe operation of the power station and meet subsequent power generation needs. Case study results indicate that the proposed model can accurately and reliably simulate the dynamic response of upper and lower reservoirs under complex flood scenarios and effectively reveal the critical influences of flood encounter timing, operational status of the power station, and reserved reservoir capacity control strategies on hydrological conditions of the reservoirs. The most unfavorable flood encounter scenario identified by the model aligns with the operational characteristics of pumped storage power stations, offering a scientific reference for their engineering design and safe operation.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFE0105200);山东电力工程咨询院有限公司科技项目(37-K2022-087)

作者简介: 方国华(1964—),女,教授,博士,主要从事水利水电系统规划与优化调度研究。E-mail:hhufgh@163.com

引用本文: 方国华,姬新洋,吴勇拓,等.基于分段迭代法的抽水蓄能电站上下水库联合洪水调节计算模型[J].河海大学学报(自然科学版),2025,53(4):1-9.

FANG Guohua, JI Xinyang, WU Yongtuo, et al. Flood regulation calculation model for joint operation of upper and lower reservoirs in pumped storage power stations based on segmented iterative method[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2025, 53(4): 1-9.

Key words: pumped storage power station; flood regulation; hydraulic linkage; dynamic reserved reservoir capacity control; segmented iterative method

抽水蓄能电站作为高效灵活的调节电源,在保障电力系统安全^[1]、促进新能源消纳和提升能源效率^[2-3]方面发挥着关键作用。与传统火电站相比,抽水蓄能电站具有高效灵活的调节能力^[4]、清洁环保的运行特性,在可再生能源并网中发挥着重要支撑作用^[5-7]。为实现“双碳”目标,我国积极推进能源结构转型^[8-11],风电、光伏等清洁能源的大规模接入,导致电力系统对灵活调节电源的需求激增^[12-13],抽水蓄能电站因此迎来了快速发展的契机^[14]。然而,抽水蓄能电站的选址多位于地形复杂的山区^[15-16],设计与运行受限于复杂水力联系和地形地质条件^[17]。上下水库之间显著的水力联系增加了洪水调节计算的复杂性,如何准确模拟其特有的水力联动关系,并分析计算多种复杂洪水遭遇状况下的水库洪水调节过程,成为研究的重点。

与常规水电站不同,抽水蓄能电站运行涉及抽水 and 发电两种模式,且机组流量在两种模式下存在显著差异^[18],多数电站的日内流量过程波动较大^[19],增加了洪水调节的复杂性。因此,洪水调节计算需充分考虑机组流量变化与入库洪水过程对上下水库产生的叠加影响。现有研究多集中于下水库的洪水调节计算,例如王娜^[20]和陈颖杰^[21]分别通过叠加天然洪水和不同发电流量,确定了抽水蓄能电站下水库的最不利工况,为下水库设计和校核洪水位的确定提供了依据。与此同时,库容控制在洪水调节过程中也至关重要,需要预留充足库容以应对洪水和机组流量入库,同时还需保留一定的调节库容,保障后续运行的用水需求,避免出现超泄。相关研究如鄢建军等^[22]探讨了保持“一库水”与闸门控泄两种调度方式对抽水蓄能电站防洪效果的影响,而赵江艳等^[23]和李大成等^[24]分别采用发电流量与时长的乘积和分层计算发电流量的方法进行预留库容的控制,确保了发电与防洪的双重效益。

上述研究大多采用满发流量与天然洪水流量进行滑动叠加,以模拟最不利情况下的洪水调节过程。然而,在一般洪水情况下,抽水蓄能电站仍需按计划完成电网的出力和入力任务,其流量变化过程不能简单地以满发流量代替。此外,上下水库之间存在密切的水力联系,构成一个水力联动的整体,在面对区域暴雨洪水时不可将其割裂视为两个独立的水库进行分析。尽管以往研究关注特定状态下的机组流量过程^[25],但上下水库库容的动态变化会显著影响机组流量。因此,上下水库联合洪水调节计算需要在满足出力和入力要求的基础上,模拟水库对洪水的调节过程,并充分反映上下水库间的动态水力联系。

基于此,本文提出了一种抽水蓄能电站上下水库联合洪水调节计算模型(以下简称“联合洪水调节模型”),并基于本文提出的分段迭代方法进行模型求解,通过构建不同工况、不同洪水遭遇时刻下的情景组合来模拟计算上下水库的洪水调节过程。实际工程案例验证结果表明了模型的有效性,可为抽水蓄能电站上下水库洪水调节计算提供参考。

1 计算原理与框架

水库洪水调节计算主要是依据水库的水量平衡方程,在给定的入库流量条件下,对出库流量和水库水位变化过程进行演算。传统的抽水蓄能电站洪水调节计算方法往往将上下水库视为独立单元,忽略了水库之间的联动效应,将其视作两个独立水库进行水位变化过程演算。为精确刻画上下水库之间存在的水力联系,本文构建了联合洪水调节模型,通过上下水库水量平衡方程(式(1)(2))、电站出力与入力流量关系方程(式(3))、上下水库水位-库容关系方程(式(4)(5))和出库流量-库容关系方程(式(6)(7))对系统进行描述:

$$V_{u,i} = V_{u,i-1} + (Q_{u,i} + Q_{d,i-1})\Delta t/2 - (q_{u,i} + q_{d,i-1})\Delta t/2 + \alpha Q_{e,i}\Delta t \quad (1)$$

$$V_{d,i} = V_{d,i-1} + (Q_{d,i} + Q_{d,i-1})\Delta t/2 - (q_{d,i} + q_{d,i-1})\Delta t/2 + \beta Q_{e,i}\Delta t \quad (2)$$

$$N_i = A Q_{e,i} [(Z_{u,i} + Z_{u,i-1})/2 - (Z_{d,i} + Z_{d,i-1})/2 - \beta \Delta H] \quad (3)$$

$$Z_{u,i} = f(V_{u,i}) \quad (4)$$

$$Z_{d,i} = f(V_{d,i}) \quad (5)$$

$$q_{u,i} = f'(V_{u,i}) \quad (6)$$

$$q_{d,i} = f'(V_{d,i}) \quad (7)$$

式中: $V_{u,i}$ 、 $V_{d,i}$ 分别为抽水蓄能电站上下水库在第 i 时段末的库容, m^3 ; $Q_{u,i}$ 、 $Q_{d,i}$ 分别为抽水蓄能电站上下水库在第 i 时段末的入库洪水量, m^3/s ; $q_{u,i}$ 、 $q_{d,i}$ 分别为抽水蓄能电站上下水库在第 i 时段末的出库流量, m^3/s ;

$Z_{u,i}$ 、 $Z_{d,i}$ 分别为抽水蓄能电站上下水库在第 i 时段末的水库水位, m ; N_i 为第 i 时段抽水蓄能电站的计划发电出力(或抽水入力), kW ; $Q_{e,i}$ 为第 i 时段抽水蓄能电站机组流量, m^3/s ; ΔH 为抽水蓄能电站发电工况水头损失(或抽水工况扬程损失), m ; α 、 β 为抽水蓄能电站机组流量系数,发电工况下 α 取 -1 、 β 取 1 ,抽水工况下 α 取 1 、 β 取 -1 ; A 为抽水蓄能电站机组出力(或入力)系数,发电工况下取 $9.81\eta_t$,抽水工况下取 $9.81\eta_p$ (η_t 、 η_p 分别为抽水蓄能电站发电出力、抽水入力效率系数)。

针对上述数学模型,为便于计算求解,将方程进行变形分组,分为两组独立方程(上水库独立方程组式(8)和下水库独立方程组式(9))和一个出力和入力流量关系方程(式(10))。

$$\begin{cases} Q_{ue,i} = [(V_{u,i} - V_{u,i-1})/\Delta t - \bar{Q}_{u,i} + \bar{q}_{u,i}]/\alpha \\ Z_{u,i} = f(V_{u,i}) \\ q_{u,i} = f'(V_{u,i}) \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} Q_{de,i} = [(V_{d,i} - V_{d,i-1})/\Delta t - \bar{Q}_{d,i} + \bar{q}_{d,i}]/\beta \\ Z_{d,i} = f(V_{d,i}) \\ q_{d,i} = f'(V_{d,i}) \end{cases} \quad (9)$$

$$Q_{ne,i} = N_i/A[(Z_{u,i} + Z_{u,i-1})/2 - (Z_{d,i} + Z_{d,i-1})/2 - \beta\Delta H] \quad (10)$$

式中: $Q_{ue,i}$ 、 $Q_{de,i}$ 分别为抽水蓄能电站上下水库在第 i 时段内的机组流量, m^3/s ; $Q_{ne,i}$ 为抽水蓄能电站在第 i 时段内满足出力和入力要求的机组流量, m^3/s ; $\bar{Q}_{u,i}$ 、 $\bar{Q}_{d,i}$ 分别为抽水蓄能电站上下水库在第 i 时段内的平均入库洪水流量, m^3/s ; $\bar{q}_{u,i}$ 、 $\bar{q}_{d,i}$ 分别为抽水蓄能电站上下水库在第 i 时段内的平均出库流量, m^3/s 。

针对式(8)~(10),本文提出分段迭代法进行优化求解,该方法通过同时假定上下水库在给定时段末的库容,计算该时段内水库的水位、入库和出库流量,并根据电站出力和入力流量关系方程(式(10))计算机组流量,基于上下水库与机组之间的水力关系条件,分段迭代更新上下水库时段末库容假定值,直至水量平衡方程收敛,然后进入下一时段计算。该方法将抽水蓄能电站分为上下水库两段,在模拟上下水库水量交换过程的同时,分别进行水位变化过程的迭代求解,有效模拟了上下水库在洪水遭遇过程中水力联动的影响,精确反映不同时刻下的水库状态。分段迭代法计算步骤如下:

步骤 1 初始化:在当前计算时段内,分别为上下水库独立方程组随机选取时段末库容初始假定值 $V'_{u,i}$ 、 $V'_{d,i}$,并通过水位-库容关系转化为上下水库时段末水位假定值 $Z'_{u,i}$ 、 $Z'_{d,i}$,由于单个时段内上下水库库容变化幅度较小,初始假定值可选择上下水库当前时段初库容,从而加速收敛。

步骤 2 计算上下水库对应机组流量:基于式(8)与式(9),分别计算当前假定下上下水库对应的机组流量 $Q_{ue,i}$ 、 $Q_{de,i}$ 。

步骤 3 改进假定值:根据式(10)计算当前假定下满足出力和入力要求的机组流量 $Q_{ne,i}$,并通过以下公式改进库容假定值:

$$\Delta Q_{ue,i} = Q_{ne,i} - Q_{ue,i} \quad (11)$$

$$\Delta Q_{de,i} = Q_{ne,i} - Q_{de,i} \quad (12)$$

$$V''_{u,i} = V'_{u,i} + \alpha\varphi_1\Delta Q_{ue,i}[\varphi_2(V_{us} - V_{ud})] \quad (13)$$

$$V''_{d,i} = V'_{d,i} + \beta\varphi_1\Delta Q_{de,i}[\varphi_2(V_{ds} - V_{dd})] \quad (14)$$

式中: $\Delta Q_{ue,i}$ 、 $\Delta Q_{de,i}$ 分别为上下水库在当前假定下机组流量值的偏差, m^3/s ; $V''_{u,i}$ 、 $V''_{d,i}$ 分别为改进后的上下水库时段末库容假定值, m^3 ; V_{us} 、 V_{ds} 分别为上下水库正常蓄水位对应的库容, m^3 ; V_{ud} 、 V_{dd} 分别为上下水库死库容, m^3 ; φ_1 、 φ_2 分别为改进过程中的流量和库容相关系数,建议取值范围均为 $0.001 \sim 0.005$ 。

步骤 4 迭代计算:基于改进后的上下水库时段末库容假定值 $V''_{u,i}$ 、 $V''_{d,i}$,重复步骤 2 和步骤 3,直至满足迭代终止条件:

$$\begin{cases} |\Delta Q_{ue,i}| \leq \varepsilon \text{ 且 } |\Delta Q_{de,i}| \leq \varepsilon & Q_{ne,i} = 0 \\ |\Delta Q_{ue,i}/Q_{ne,i}| \leq \varepsilon \text{ 且 } |\Delta Q_{de,i}/Q_{ne,i}| \leq \varepsilon & Q_{ne,i} \neq 0 \end{cases} \quad (15)$$

式中 ε 为预设的允许误差。

步骤 5 进入下一计算时段:在当前计算时段满足迭代终止条件后,按照上述步骤开始下一时段的计算。

基于分段迭代法的联合洪水调节模型计算框架如图1所示。

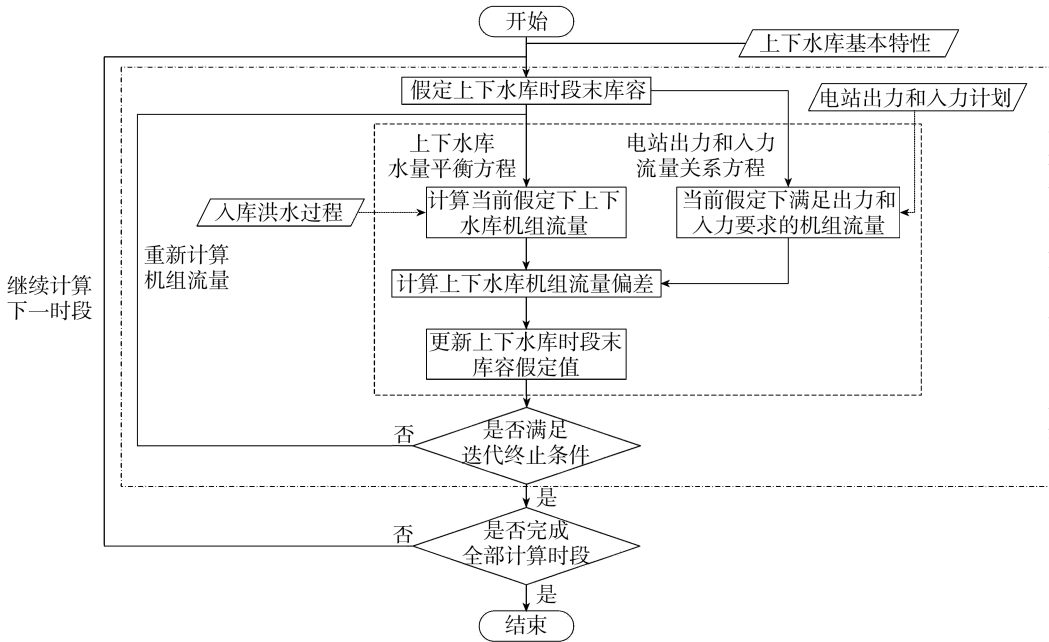


图1 基于分段迭代法的联合洪水调节模型计算框架

Fig.1 Flood regulation calculation framework based on segmented iterative method

2 模型构建

2.1 目标函数

抽水蓄能电站上下水库联合洪水调节计算与普通水库的洪水调节计算存在显著差异。上下水库同时进行洪水调节时,各自需遵循独立的水量平衡方程,并满足电站的出力和入力要求。同时,上下水库作为整体,还需满足内部水量交换平衡,即上水库经过机组的放水量与下水库通过机组获得的进水量相等,且这一交换流量必须等于电站的发电流量,从而实现系统内部的水量平衡,具体的表达式如下:

$$\min[(Q_{ue,i} - Q_{de,i})^2 + (Q_{de,i} - Q_{ne,i})^2 + (Q_{ne,i} - Q_{ue,i})^2] \quad (16)$$

2.2 约束条件

约束条件包括预留库容动态控制约束、出入流量约束、水库库容约束和其他约束。

a. 预留库容动态控制约束。在抽水蓄能电站上下水库联合洪水调节计算中,为了避免超泄并保障电站后续运行,动态控制预留库容至关重要。与传统方法中单一水库的静态预留库容控制不同,上下水库的联合洪水调节需要在整个过程中动态调控上下两库的库容。具体而言,这一调节过程遵循“一库水”原则,即实时确保上下水库的总可用库容满足后续抽水蓄能电站运行的水量需求,数学表达式如下:

$$(V_{u,i} - V_{ud}) + (V_{d,i} - V_{dd}) \geq V_{ds} - V_{dd} \quad (17)$$

可进一步简化为

$$V_{u,i} + V_{d,i} \geq V_{ud} + V_{ds} \quad (18)$$

这一约束条件表明,在上下水库联合洪水调节计算过程中,上下水库在每个计算时段的库容总和必须满足特定限制条件,这一限制条件在整个调节过程中将作为约束条件参与联合洪水调节模型的求解。

b. 出入流量约束:

$$Q_{ue,i} \leq Q_{unit,max} \quad Q_{de,i} \leq Q_{unit,max} \quad (19)$$

式中 $Q_{unit,max}$ 为抽水蓄能电站机组限制流量, m^3/s , 发电工况下取机组最大发电流量 $Q_{out,max}$, 抽水工况下取机组最大抽水流量 $Q_{in,max}$ 。

c. 水库库容约束。需满足不低于水库死库容且不高于水库正常蓄水位对应的库容:

$$V_{ud} \leq V_{u,i} \leq V_{us} \quad V_{dd} \leq V_{d,i} \leq V_{ds} \quad (20)$$

d. 其他约束。对于存在生态环境约束、蓄能周期约束的抽水蓄能电站,还应满足河道生态需水量约束

以及电网的蓄能周期和发电周期约束。

2.3 洪水遭遇情景生成

洪水发生时,抽水蓄能电站上下水库的联合洪水调节计算需考虑上下水库的同步洪水调节过程。传统方法将入库洪水流量与发电流量叠加生成组合方案,但无法准确刻画上下水库间复杂的动态响应,难以适用于联合洪水调节。为解决这一问题,本文提出基于滑动组合的洪水情景构建方法,通过将抽水蓄能电站的出力和入力计划与上下水库可能遭遇的不同概率洪水过程进行滑动叠加,系统生成多种可能的洪水情景,并逐一计算,以实现对联合洪水调节的精细化模拟。

具体来说,该方法通过将抽水蓄能电站的出力和入力计划与上下水库可能遭遇的不同概率洪水过程进行时间上的滑动叠加,构建洪水遭遇情景矩阵:

$$\mathbf{S}_j = \begin{bmatrix} N_1 & \cdots & N_i & \cdots & N_{I_1} & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 & \bar{Q}_{u,1} & \cdots & \bar{Q}_{u,i} & \cdots & \bar{Q}_{u,I_2} \\ 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 & \bar{Q}_{d,1} & \cdots & \bar{Q}_{d,i} & \cdots & \bar{Q}_{d,I_2} \end{bmatrix}_{3 \times (I_1 + I_2)}$$

(21)

式中: $\mathbf{S}_j$ 为抽水蓄能电站第 j 个洪水遭遇情景矩阵; I_1 为抽水蓄能电站出力和入力计划的总计算时段数; I_2 为抽水蓄能电站上下水库入库洪水流量的总计算时段数。

调整洪水过程的起始时间,可模拟不同时段洪水对抽水蓄能电站调节过程的影响。基于此,将上下水库的洪水过程按固定时间间隔滑动叠加,生成涵盖多种洪水遭遇情景的矩阵。每个矩阵包含上下水库的入库洪水过程及电站的实时运行状态,能更真实反映洪水遭遇情景下的联合运行情况。

3 实例验证

为验证本文提出的联合洪水调节模型的正确性和有效性,选取河南省某规划抽水蓄能电站(S 抽水蓄能电站)作为研究实例,通过对该电站不同工况及洪水遭遇情景下的模拟计算,并对计算结果合理性、收敛性和对水力联动效应的表征能力进行分析,以证明模型的可靠性和实用性。

3.1 洪水调节计算基本参数

S 抽水蓄能电站装机容量 1 800 MW,上水库正常蓄水位 1 326 m,死水位 1 298 m,正常蓄水位库容 1 444 万 m^3 ,死库容 261 万 m^3 ,调节库容 1 183 万 m^3 ;下水库正常蓄水位 902 m,死水位 865 m,正常蓄水位库容 1 436 万 m^3 ,死库容 247 万 m^3 ,调节库容 1 189 万 m^3 。工程初定为一等大(1)型工程,上下水库挡水建筑物和泄水建筑物设计洪水重现期为 200 a,校核洪水重现期为 2 000 a,输水系统和地下厂房设计洪水重现期为 200 a,校核洪水重现期为 1 000 a。

上水库泄水建筑物为竖井式泄洪洞,采用自由溢流,无闸门控制,下水库泄水建筑物包括侧槽式溢洪道和泄洪放空洞,具备一定的预泄能力。上下水库设计洪水的基本特征如下:上水库洪峰流量为 187 m^3/s ,24 h 时洪水总量为 152.2 万 m^3 ;下水库洪峰流量为 968 m^3/s ,24 h 洪水总量为 896 万 m^3 。模型计算环境为 Python3.8,硬件配置为:13thGen Intel(R) Core(TM) i9-13980HX,32GB RAM,Win11 操作系统。洪水调节计算步长取 10 min。

为验证模型在不同运行状态下的适应性,选取“发电后抽水”(工况 1)和“抽水后发电”(工况 2)两种工况,并通过设置洪水遭遇时刻的滑动变化,模拟不同遭遇时刻对上下水库的影响。两种工况下,电网负荷指令在电站正常工作条件下选取尽可能极端的负荷条件。在工况 1 中,发电阶段选用装机容量作为机组出力指令,抽水阶段选用 65%装机容量作为机组入力指令;在工况 2 中,抽水阶段选用装机容量作为入力指令,发电阶段选用 80%装机容量作为出力指令。具体电网指令过程如表 1 所示。

表 1 不同工况下机组出力或入力过程

Table 1 Output or input processes of unit under different operating conditions

时段编号	机组出力或入力/MW	
	工况 1	工况 2
1	1 800	1 800
2	1 800	1 800
3	1 800	1 800
4	1 800	1 800
5	1 800	1 800
6	1 800	1 800
7	1 170	1 440
8	1 170	1 440
9	1 170	1 440
10	1 170	1 440
11	1 170	1 440
12	1 170	1 440

注:两种工况共持续 12 h,每一时段为 1 h。

3.2 模型验证结果与分析

3.2.1 水力联动效应模拟准确性

两种工况持续时间为 12 h,按照 10 min 间隔共生成洪水遭遇情景 72 个,采用联合洪水调节模型模拟各情景下上下水库洪水调节过程,部分洪水遭遇情景下的上下水库水位变化过程如图 2 和图 3 所示,可以看出模型准确地模拟了机组运行(抽水或发电)引起的水库水位变化:抽水时上水库水位上升、下水库水位下降(或因洪水汇入而上升减缓);发电时则相反。当洪水过程叠加时,水库水位在原有运行趋势基础上进一步抬高,其变化过程符合水量平衡原理。例如,在工况 1 下(图 2(a)),洪水提前遭遇(如情景 1)导致抽水工况启动时上水库初始水位已受洪水影响,后续抽水过程水位抬升更为显著。

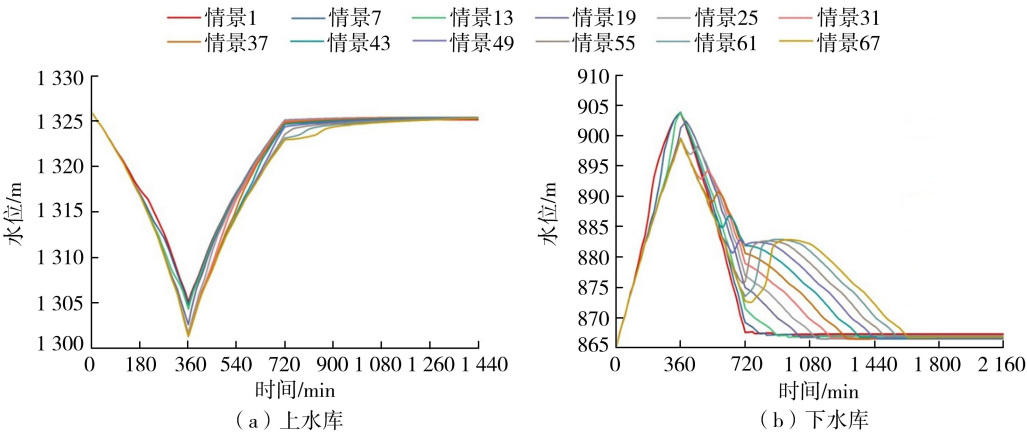


图 2 工况 1 部分洪水遭遇情景下的上下水库水位变化曲线

Fig. 2 Water level variation curves of upper and lower reservoirs under partial flood encounter scenarios for Condition 1

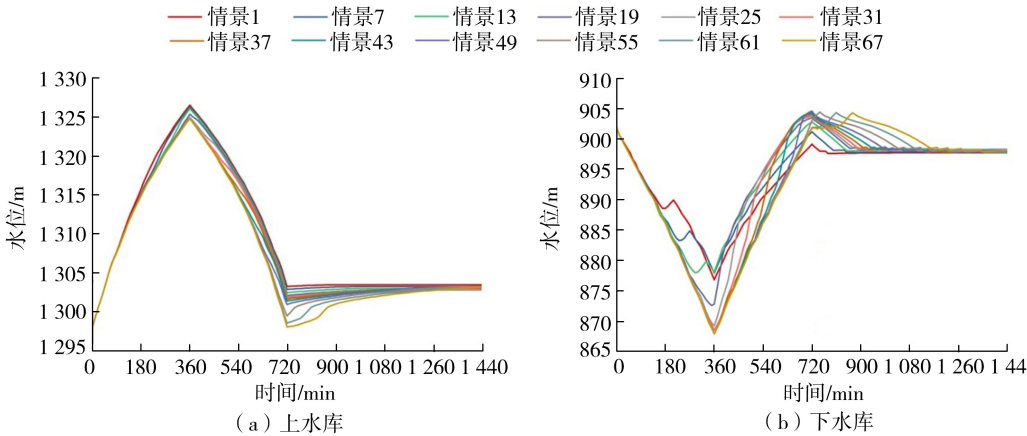


图 3 工况 2 部分洪水遭遇情景下的上下水库水位变化曲线

Fig. 3 Water level variation curves of upper and lower reservoirs under partial flood encounter scenarios for Condition 2

图 4 和图 5 为两种工况部分洪水遭遇情景下的下水库入库流量(包括洪水流量与机组发电/抽水流量的叠加)变化。模型模拟结果清晰地反映了发电流量作为下水库的“正”入流,而抽水流量则相当于下水库的“负”入流(即出流)。总入库流量曲线的变化形态是洪水过程线与机组流量过程线代数叠加的结果,验证了模型对上下水库水量交换过程模拟的准确性。

上述模拟结果表明,联合洪水调节模型能够有效地捕捉上下水库之间的动态水力耦合关系,并准确反映洪水和机组运行对水库水情变化的综合影响。

3.2.2 关键情景合理性

通过对所有洪水遭遇情景的模拟计算,模型识别出的最不利洪水遭遇情景及其响应特征符合抽水蓄能电站的运行规律:①上水库的最高水位主要出现在抽水工况末期遭遇洪水的情景(图 6)。这是因为在抽水工况下,上水库持续进水,若此时遭遇洪水,则入库水量进一步增大,导致水位快速抬高。模型准确地捕捉到洪水遭遇时机(洪水发生在抽水过程的哪个阶段)对上水库洪峰水位的影响,这符合物理预期。②下水库的

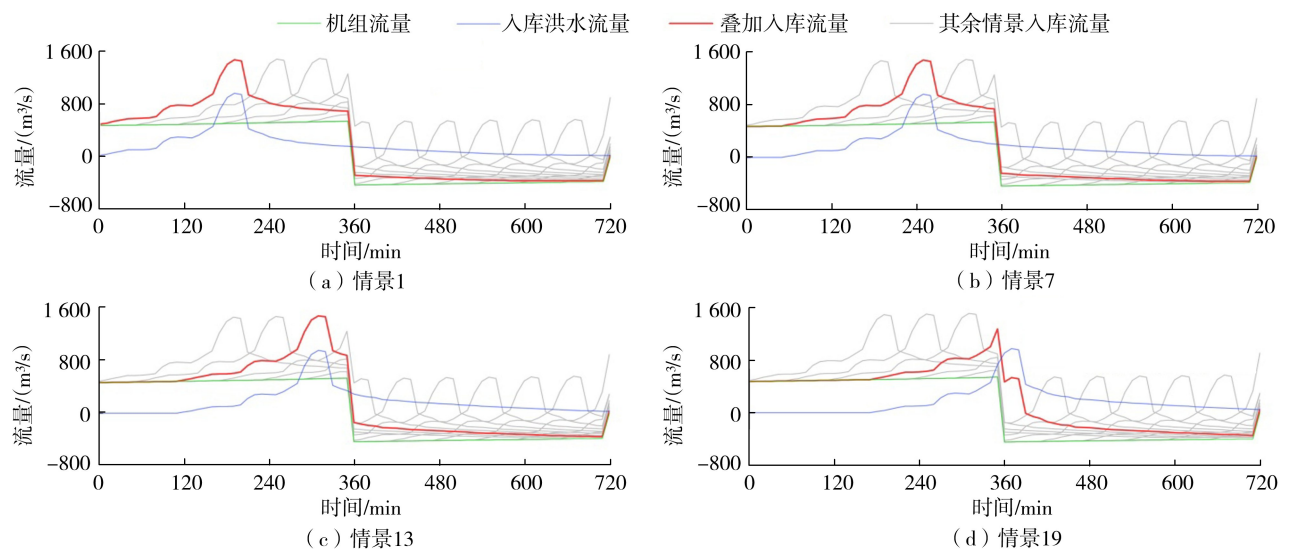


图 4 工况 1 部分洪水遭遇情景下的下水库入库流量变化曲线

Fig. 4 Inflow variation curve of lower reservoir under partial flood encounter scenarios for Condition 1

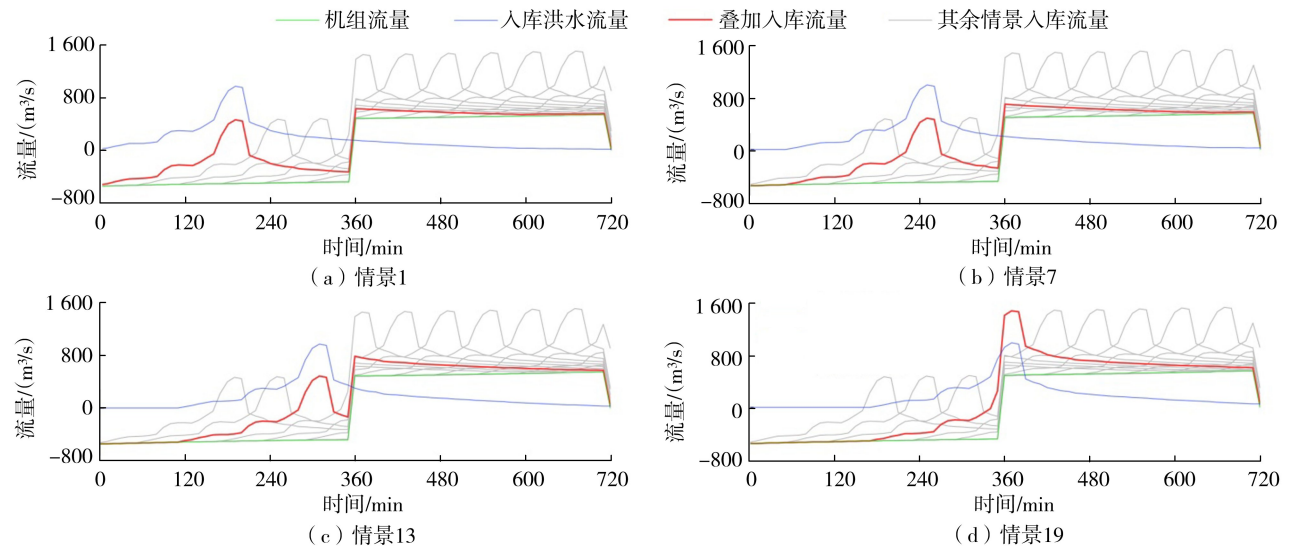


图 5 工况 2 部分洪水遭遇情景下的下水库入库流量变化曲线

Fig. 5 Inflow variation curve of lower reservoir under partial flood encounter scenarios for Condition 2

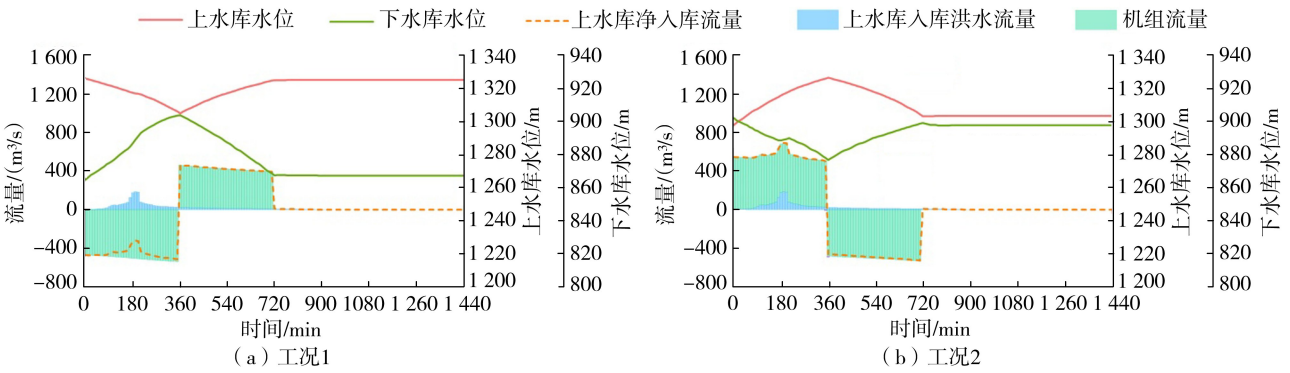


图 6 上水库最不利洪水遭遇情景下的上下水库水位与入库流量变化过程

Fig. 6 Variations of water level and inflow in upper and lower reservoirs under the most unfavorable flood encounter scenario of upper reservoir

最高水位主要出现在发电工况末期遭遇洪水的情景(图7),此时下水库本身因发电尾水汇入而处于较高水位,若再遭遇洪水洪峰,则总入库流量达到峰值,导致水位急剧上升,防洪压力增大;图4中情景7以及图5中情景1也得到了相同的结论,模型模拟结果清晰展示了上下水库水位的变化过程,验证了模型对下水库防洪关键期判断的准确性。

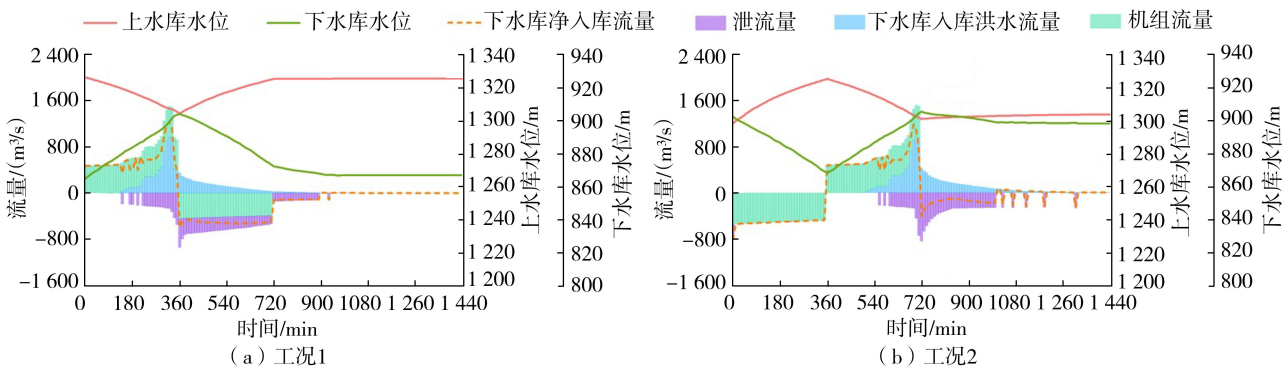


图7 下水库最不利洪水遭遇情景下的上下水库水位与入库流量变化过程

Fig.7 Variations of water level and inflow in upper and lower reservoirs under the most unfavorable flood encounter scenario of lower reservoir

此外,模型模拟结果显示,上下水库的最不利洪水遭遇情景在时间上存在差异,这正是由于上下水库在不同运行阶段(抽水/发电)功能不同所致。模型能够区分并准确模拟这种差异,进一步证明了其对复杂运行条件下洪水调节过程进行精细化模拟的能力。

4 结 语

本文通过构建考虑水力联动的动态水量平衡模型,并结合分段迭代求解策略,为抽水蓄能电站上下水库联合洪水调节提供了一种精细化的动态模拟与分析手段。针对抽水蓄能电站上下水库洪水调节计算中存在的上下水库水力联系刻画不足、洪水遭遇情景模拟单一以及预留库容控制方式简单等问题,提出了一种基于分段迭代法的抽水蓄能电站上下水库联合洪水调节计算模型。S抽水蓄能电站的实例验证以及多情景模拟结果表明,模型能够准确模拟抽水蓄能电站上下水库在洪水期间的动态水力联动响应,以及机组运行与洪水遭遇的复杂叠加效应;模型对不同工况和洪水遭遇时刻下的关键水情指标(如最高水位、最大入库流量)的响应合理,识别出的最不利情景符合抽水蓄能电站运行特性和水力学原理。S抽水蓄能电站实例验证结果充分证明了联合洪水调节模型的正确性、有效性和实用性,可为抽水蓄能电站的工程设计与安全运行提供可靠的洪水调节计算工具和决策支持。

参考文献:

[1] 张静,赵树鑫,宋小洪.我国抽水蓄能现代化的发展历程、挑战与展望[J].中国农村水利水电,2024(6):239-43. (ZHANG Jing,ZHAO Fuxin,SONG Xiaohong. The development process, challenges and prospects of China's pump storage modernization [J]. China Rural Water and Hydropower, 2024(6): 239-243. (in Chinese))

[2] 宋豪,宋曙光,王超,等.抽水蓄能电站对山东电网风电接纳能力的影响[J].山东大学学报(工学版),2011,41(5):138-142. (SONG Hao, SONG Shuguang, WANG Chao, et al. Impacts of the pumped storage power station on the wind generation integration capability of the Shandong Power Grid[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2011, 41(5): 138-142. (in Chinese))

[3] 于佰建,陈卓尔,宋长城,等.基于改进萤火虫算法的含多种新能源地区电网的无功电压优化[J].河海大学学报(自然科学版),2024,52(5):93-100. (YU Baijian, CHEN Zhuoer, SONG Changcheng, et al. Reactive power and voltage optimization based on improved firefly algorithm in regional power grids with a variety of new energies[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52(5): 93-100. (in Chinese))

[4] 郭志忠,叶瑞丽,刘瑞叶,等.含抽水蓄能电站的可再生能源电网优化调度策略[J].电力自动化设备,2018,38(3):7-15. (GUO Zhizhong, YE Ruili, LIU Ruiye, et al. Optimal scheduling strategy for renewable energy system with pumped storage station [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(3): 7-15. (in Chinese))

[5] 罗仕华,胡维昊,黄琦,等. 市场机制下光伏/小水电/抽水蓄能电站系统容量优化配置[J]. 电工技术学报,2020,35(13): 2792-2804. (LUO Shihua,HU Weihao,HUANG Qi,et al. Optimization of photovoltaic/small hydropower/pumped storage power station system sizing under the market mechanism[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2020,35(13):2792-2804. (in Chinese))

[6] 卢开放,侯正猛,孙伟,等. 云南省矿井抽水蓄能电站潜力评估与建设关键技术[J]. 工程科学与技术,2022,54(1):136-144. (LU Kaifang,HOU Zhengmeng,SUN Wei,et al. Potential evaluation and construction key technologies of pumped-storage power stations in mines of Yunnan Province[J]. Advanced Engineering Sciences,2022,54(1):136-144. (in Chinese))

[7] 闻昕,秦济森,谭乔凤,等. 基于余留期效益函数的水光互补随机优化调度方法[J]. 水资源保护,2023,39(6):23-31. (WEN Xin,QIN Jisen,TAN Qiaofeng,et al. Research on stochastic optimal operation of hydro-photovoltaic complementary based on utility function of carryover stage[J]. Water Resources Protection,2023,39(6):23-31. (in Chinese))

[8] 郑琼,江丽霞,徐玉杰,等. 碳达峰、碳中和背景下储能技术研究进展与发展建议[J]. 中国科学院院刊,2022,37(4):529-540. (ZHENG Qiong,JIANG Lixia,XU Yujie,et al. Research progress and development suggestions of energy storage technology under background of carbon peak and carbon neutrality[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences,2022,37(4):529-540. (in Chinese))

[9] 苏健,梁英波,丁麟,等. 碳中和目标下我国能源发展战略探讨[J]. 中国科学院院刊,2021,36(9):1001-1009. (SU Jian,LIANG Yingbo,DING Lin,et al. Research on China's energy development strategy under carbon neutrality[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences,2021,36(9):1001-1009. (in Chinese))

[10] 贡力,董洲全,贾治元,等. 水利行业低碳技术研究热点与前沿趋势[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(4):1-9. (GONG Li,DONG Zhouquan,JIA Zhiyuan,et al. Low carbon technology research hotspots and frontier trends in the water conservancy industry[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2023,51(4):1-9. (in Chinese))

[11] 陈述,陈琼,任康,等. 考虑新能源消纳的黄河上游水电站群生态优化调度研究[J]. 水资源保护,2024,40(3):20-27. (CHEN Shu,CHEN Qiong,REN Kang,et al. Ecological optimal scheduling of hydropower stations on the upper Yellow River considering renewable energy accommodation[J]. Water Resources Protection,2024,40(3):20-27. (in Chinese))

[12] 胡泽春,丁华杰,孔涛. 风电-抽水蓄能联合日运行优化调度模型[J]. 电力系统自动化,2012,36(2):36-41. (HU Zechun,DING Huajie,KONG Tao. A joint daily operational optimization model for wind power and pumped-storage plant[J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(2):36-41. (in Chinese))

[13] 高英,苏华英,于洁,等. 乌江流域水光互补梯级蓄能调度图绘制[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(5):56-64. (GAO Ying,SU Huaying,YU Jie,et al. Drawing of Hydro-PV complementary cascade energy storage dispatching diagram in Wujiang River Basin[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2023,51(5):56-64. (in Chinese))

[14] 华光辉,赫卫国,赵大伟. 储能技术在坚强智能电网建设中的作用[J]. 供用电,2010,27(4):22-25. (HUA Guanghui,HE Weiguo,ZHAO Dawei. Role of energy storage technologies in the construction of strong smart grid[J]. Distribution & Utilization,2010,27(4):22-25. (in Chinese))

[15] 王兵,刘朋帅,邓凯磊. 基于模糊多准则决策模型的废弃矿井抽水蓄能电站选址研究[J]. 矿业科学学报,2021,6(6):667-677. (WANG Bing,LIU Pengshuai,DENG Kailei. Site selection of pumped storage power station in abandoned mines:results from fuzzy-based multi criteria decision model[J]. Journal of Mining Science and Technology,2021,6(6):667-677. (in Chinese))

[16] 张德强. 浅析抽水蓄能电站 GIS 选址与设备安装[J]. 储能科学与技术,2022,11(12):4100-4101. (ZHANG Deqiang. Analysis of GIS site selection and equipment installation of pumped storage power station[J]. Energy Storage Science and Technology,2022,11(12):4100-4101. (in Chinese))

[17] 谢和平,侯正猛,高峰,等. 煤矿井下抽水蓄能发电新技术:原理、现状及展望[J]. 煤炭学报,2015,40(5):965-972. (XIE Heping,HOU Zhengmeng,GAO Feng,et al. A new technology of pumped-storage power in underground coal mine:principles, present situation and future[J]. Journal of China Coal Society,2015,40(5):965-972. (in Chinese))

[18] 姚泽,毕慧丽,庄小慧,等. 广州抽水蓄能电站 A 厂过渡过程仿真计算分析[J]. 水力发电学报,2015,34(3):176-181. (YAO Ze,BI Huili,ZHUANG Xiaohui,et al. Simulation and analysis of transient process for Guangzhou Pumped Storage Power Plant A[J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2015,34(3):176-181. (in Chinese))

[19] 俞焰,杨正健,张佳磊,等. 天荒坪抽水蓄能电站水位变化对水体营养状态的影响[J]. 水生态学杂志,2016,37(6):68-75. (YU Yan,YANG Zhengjian,ZHANG Jialei,et al. Effect of water level fluctuation on eutrophication in Tianhuangping Pumped Storage Reservoir[J]. Journal of Hydroecology,2016,37(6):68-75. (in Chinese))

[9] NI Xuan, XUE Leiping, AN Chao. Experimental investigation of scour around circular arrangement pile groups [J]. Ocean Engineering, 2021, 219: 108096.

[10] 王栋,杜波,宋木清,等. 不同水深条件下海上风机群桩基础局部冲刷特性[J]. 港口航道与近海工程 2023, 60(4): 1-7. (WANG Dong, DU Bo, SONG Muqing, et al. Characteristics of local scour surrounding a multi-pile foundation of offshore wind turbine at different water depths[J]. Port, Waterway and Offshore Engineering, 2023, 60(4): 1-7. (in Chinese))

[11] ASUMADU R, ZHANG Jisheng, OSEI-WUSUANS A H. 3-D numerical study of offshore tripod wind turbine pile foundation on wave-induced seabed response[J]. Ocean Engineering, 2022, 255: 111421.

[12] WANG Shunyi, QI Wengang, LI Biao, et al. Extrapolating time development curves of clear-water scour around piles: from empirical fitting to physics-based approach[J]. Ocean Engineering, 2024, 305: 117963.

[13] LIN Xiangfeng, ZHANG Jisheng, GUAN Dawei, et al. Scour processes around a horizontal axial tidal stream turbine supported by the tripod foundation[J]. Ocean Engineering, 2024, 296: 116891.

[14] 宋木清,及春宁,许栋. 单向流作用下多桩承台式基础局部冲刷数值模拟研究[J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 2023, 38(1): 1-9. (SONG Muqing, JI Chunng, XU Dong. Numerical investigation on local scour of offshore multi-pile foundation under unidirectional flow[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2023, 38(1): 1-9. (in Chinese))

[15] LIU Mingming, ZHAO Ming. Study of local scour around rectangular and square subsea caissons under steady current condition [J]. Coastal Engineering, 2024, 190: 104513.

[16] BAHAJ A S, MOLLAND A F, CHAPLIN J R, et al. Power and thrust measurements of marine current turbines under various hydrodynamic flow conditions in a cavitation tunnel and a towing tank[J]. Renewable Energy, 2007, 32(3): 407-426.

[17] MELVILLE B W. Pier and abutment scour: integrated approach[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1997, 123(2): 125-136.

[18] VOGEL C R, WILLDEN R H J, HOULSBY G T. Blade element momentum theory for a tidal turbine[J]. Ocean Engineering, 2018, 169: 215-226.

[19] 陈存福. 潮流能水平轴水轮机叶片优化及水动力性能研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.

[20] YUAN Chunguang, MELVILLE B W, ADAMS K N. Scour at wind turbine tripod foundation under steady flow [J]. Ocean Engineering, 2017, 141: 277-282.

[21] NI Xuan, XUE Leiping. Experimental investigation of scour prediction methods for offshore tripod and hexapod foundations[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2020, 8(11): 856.

[22] 林祥峰. 潮流能水轮机三脚桩基础局部冲刷特性研究[D]. 南京: 河海大学, 2021.

[23] HILL C, MUSA M, CHAMORRO L P, et al. Local scour around a model hydrokinetic turbine in an erodible channel[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 140(8): 04014037.

(收稿日期: 2024 - 06 - 24 编辑: 熊水斌)

(上接第 9 页)

[20] 王娜. 抽水蓄能电站的洪水调节计算[J]. 东北水利水电, 2020, 38(2): 10-11. (WANG Na. Flood regulation calculation of pumped storage power station[J]. Water Resources & Hydropower of Northeast China, 2020, 38(2): 10-11. (in Chinese))

[21] 陈颖杰. 仙游木兰抽水蓄能电站下水库洪水调节分析[J]. 水利科技, 2023(4): 14-17. (CHEN Yingjie. Analysis of flood regulation in the lower reservoir of Xianyou Mulan Pumped Storage Power Station[J]. Hydraulic Science and Technology, 2023(4): 14-17. (in Chinese))

[22] 鄢军军, 罗茜, 周铁柱. 五岳抽水蓄能电站下水库洪水调度规则研究[J]. 水力发电, 2020, 46(3): 91-93. (YAN Junjun, LUO Xi, ZHOU Tiezhu. Study on flood regulation rules for the lower reservoir of Wuyue Pumped-Storage Power Station[J]. Water Power, 2020, 46(3): 91-93. (in Chinese))

[23] 赵江艳, 周清平, 李思宇, 等. 抽水蓄能电站洪水调节探索[J]. 红水河, 2022, 41(2): 15-20. (ZHAO Jiangyan, ZHOU Qingping, LI Siyu, et al. Exploration on flood regulation of pumped storage power station[J]. Hongshui River, 2022, 41(2): 15-20. (in Chinese))

[24] 李大成, 朱天生, 吴迪, 等. 基于滑动叠加组合的抽水蓄能电站洪水调节计算模型及应用[J]. 中国农村水利水电, 2024(1): 244-250. (LI Dacheng, ZHU Tiansheng, WU Di, et al. Application of flood regulation model for pumped storage power station based on sliding superposition combination[J]. China Rural Water and Hydropower, 2024(1): 244-250. (in Chinese))

[25] 王宏飏. 抽水蓄能电站上、下库联合调洪计算[J]. 水力发电, 1997(4): 5-9. (WANG Hongbiao. Combined storage routing for the upper and the lower reservoirs of pumped storage power plant [J]. Water Power, 1997(4): 5-9. (in Chinese))

(收稿日期: 2024 - 09 - 23 编辑: 熊水斌)