DOI:10.14188/j.1671-8844.2025.0192 文章编号:1671-8844(XXXX)XX-0001-08

抽蓄电站运行对弯曲型下库水沙动力输移特性影响研究

邵堉滢[1],余明辉[1*],何鑫[1],邱嘉琦[1],徐秋蒙[2]

(1. 武汉大学 水资源工程与调度全国重点实验室,湖北 武汉 430072; 2. 中国电力工程顾问集团中南电力设计院有限公司,湖北 武汉 430071)

摘要:抽水蓄能电站运行时上、下水库水位频繁变动,进出水口附近区域水流具有非恒定双向流动特性。采用平面二维嵌套三维非恒定流水动力数学模型,对某抽水蓄能电站抽放水过程中弯曲河道型下水库水动力及泥沙输移特性展开研究。结果表明:放水过程中,水流由进出水口向四周分散,随着下水库水位的不断升高,进出水口附近区域水流流速不断降低,水流挟沙能力在进出水口下游侧较大;抽水过程中,水流向进出水口汇聚,进出水口下游水流形成逆流,随着下水库水位的不断降低,进出水口附近区域水流流速不断增大,水流挟沙能力在进出水口上游侧较大。因下库进出水口位于凹岸弯顶,电站运行扰动了弯道环流的发展,环流相对强度降低。相较于无抽放水时完整的环流,放水时弯道环流范围减小,在凸岸边滩侧出现较小尺度环流;抽水时弯顶断面无明显环流。研究成果为预测进出水口附近流态及水沙输移特性,优化进出水口口门型式及水沙调度方式,确保电站安全运行提供技术支撑。

关键词:水利工程;抽水蓄能;数值模拟;进出水口;动力输移特性

中图分类号:TV142 **文献标志码:**A

Research on the Influence of Pumped Storage Power Station Operation on Hydrodynamic and Sediment Transport Characteristics in a Curved River Channel-Type Lower Reservoir

SHAO Yuying[1], YU Minghui[1*], HE Xin[1], QIU Jiaqi[1], XU Qiumeng[2]

(1. State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Central Southern China Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group, Wuhan 430071, China)

Abstract: During the operation of pumped storage power stations, frequent water level fluctuations occur in both upper and lower reservoirs, resulting in unsteady bidirectional flow characteristics near the intake/outlet structures. A planar two-dimensional nested three-dimensional unsteady hydrodynamic mathematical model was employed to investigate the hydrodynamic behavior and sediment transport characteristics in a curved river channel-type lower reservoir during pumping and discharging processes. The results indicate that during water

收稿日期:XXXX-XX-XX

作者简介:邵堉滢(2001—),女,硕士研究生,主要从事水力学及河流动力学方面研究,E-mail:shaoyyds@whu.edu.cn。

通信作者:余明辉(1969—),女,教授,博士,主要从事水力学及河流动力学方面研究,E-mail:mhyu@whu.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金项目(编号:12372385)。

本文引用格式:邵堉滢,余明辉,何鑫,等.抽蓄电站运行对弯曲型下库水沙动力输移特性影响研究[J].武汉大学学报(工学版),XXXX,XX(XX):1-8.

Citation: SHAO Yuying, YU Minghui, HE Xin, et al. Research on the Influence of Pumped Storage Power Station Operation on Hydrodynamic and Sediment Transport Characteristics in a Curved River Channel-Type Lower Reservoir[J]. Engineering Journal of Wuhan University, XXXX, XX(XX):1-8.

discharge, flow diverges radially from the intake/outlet structures with decreasing flow velocity near these structures as the reservoir level rises, while sediment-carrying capacity remained higher on the downstream side. During pumping operations, flow converges toward the intake/outlet structures forming reverse flow downstream, with increasing flow velocity near these structures as the reservoir level drops, accompanied by greater sediment transport capacity on the upstream side. The location of intake/outlet structures at the concave bank of the bend apex was found to disrupt the development of bend circulation, reducing its relative intensity. Compared with natural bend circulation without pumping operations, the discharge process reduced circulation range while generating smaller-scale circulation near the convex bank point bar. No significant circulation was observed at the bend apex during pumping operations. This study supports predicting hydraulic patterns and sediment dynamics near water structures, optimizing designs and management strategies to ensure operational safety.

Key words: hydraulic engineering; pumped storage power station; numerical simulation; inlet and outlet; hydraulic transport characteristics

常规抽水蓄能电站下水库通常为河道型水库,受电站抽放水影响,其库水位变化频繁且变幅较大,进出水口水流具有显著非恒定双向流动的特点,泥沙输移规律复杂[1-2]。针对抽水蓄能电站水库水沙动力特性,国内外学者开展了相关研究工作。在进出水口型式及内部设计方面,杨小亭等[3]通过分析国内几座抽水蓄能电站设计和模型试验成果资料,总结了抽水蓄能电站进出水口模型设计、流速分布与流量分配、拦污栅模拟和水头损失规律;张兰丁等[4]基于物理模型试验提出通过调整分流墩的间距可以获得流态良好、水头损失较少的进出水口体型布置,并揭示了上弯段弯道效应对流速分布和压力分布的影响;高学平、朱洪涛等[5-7]通过建立物理模型,探讨了拦污栅断面的脉动流速变化规律及产生原因,总结了有无拦污栅情况下进出水口水动力特性,揭示了拦污栅断面脉动流速变化规律,为拦污栅振动破坏提供了理论依据。电站进出水口在循环抽放水过程中同时交换了上下库的泥沙,产生过机泥沙、水库淤积演变等一系列问题[8-10]。Michael Müller等[11]对瑞士的一个抽水蓄能电站上下水库之间悬移质泥沙输运进行了8个月的监测,提出上下库过机泥沙与抽蓄电站调度运行有很高的相关性;魏红艳等[12]建立了抽水蓄能电站非均匀全沙数值调控模型研究抽水蓄能电站河道型水库泥沙淤积规律及过机含沙量变化情况;刘创等[13]针对多沙河流抽蓄电站提出了拦排沙和停机避沙两种取水防沙方案,建立优化方案数学模型,定量评估了两种方案的减沙效果。

现阶段针对抽水蓄能电站进出水口的研究主要可分为物理模型研究、数值模拟研究两部分。研究多基于局部模型,主要聚焦于进出水口内部水力特性,如进出水口水流漩涡、水流均衡过渡、水流水头损失等[14],未考虑整体河势对水力输移能力的影响,特别是当进出水口位于下库弯顶时,电站运行对下库水沙动力特性影响研究较少。本文以某抽水蓄能电站为例,采用平面二维嵌套三维非恒定流水动力数学模型,对下水库进出水口区域开展数值模拟研究,研究电站运行对弯曲河道型下水库水沙输移特性影响。研究成果有助于电站选址规划、水库管理运行等,可为保障电站取水防沙以及安全运行提供理论及技术支撑。

1 数学模型建立

下水库河道边界曲折、平面形态复杂且天然弯道内水流具有很强的三维性,本文运用MIKE21[15]对整个下水库库区建立平面二维数学模型,并在进出水口附近弯顶区域基于Delft3D平台[16]建立三维数学模型。其中,二维计算范围包含了电站调节库容范围,三维计算范围考虑了电站抽放水影响的范围。

1.1 研究区域及网格划分

选取福建省某抽水蓄能电站作为研究对象,该电站下水库为90°弯曲河道型。计算范围涉及干流古田溪和支流曹洋溪,多年平均流量分别为46.2m^3/s、5.53m^3/s。下水库死水位242.79m(国家85高程,下同),正常蓄水位251.79m。电站下水库进出水口设置在干流弯顶处,位于古田溪右岸凹岸一侧,距坝约3.5km,拟建为水工涵洞结构型式,口门底板高程为229m。

下水库二维计算范围为坝址到库尾共4665m长河段,采用非结构网格划分。干流入口、进出水

口区域设置网格尺寸为5m,其余区域网格尺寸为5~10m。进出水口口门区域网格适当加密。三维计算范围为进出水口上游340m至下游570m河段,采用贴体结构化网格。沿主流、河宽及垂向网格尺寸分别约为1.6m、1.6m、0.8m。

1.2 边界条件及参数设置

针对该电站一日抽放水调度过程进行数值模拟。下水库起调水位为死水位(242.79m),放水流量60.2m³/s,持续10h;下水库水位为正常蓄水位(251.79m),抽水流量75.25m³/s,持续8h。

在二维计算模型中,上游干、支流进口给定为干流、支流多年平均流量46.2m³/s、5.53m³/s,下游坝前断面出口设置为闭边界。在三维计算模型中,上游进口流量给定为干流多年平均流量,下游出口断面设置为压力边界,出口水位变化根据二维模型计算结果给定。在二维、三维计算模型中进出水口处均设源汇项模拟实际抽放水过程。该河段糙率系数根据实测水面线资料率定验证后取为0.035。

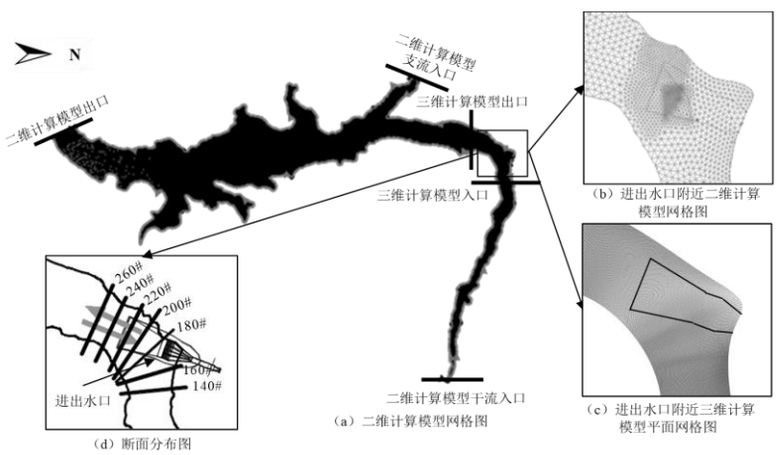


图1 二维、三维计算范围及网格划分

Fig.1 Scope of two-dimensional and three dimensional computations and grid division

2 抽放水水动力特性分析

2.1 下水库流态变化特性分析

如图2所示,死水位下无抽放水时,下水库水流主流线居中,进出水口附近区域流速在0.12-0.2m/s之间。放水时,进出水口附近水流从口门流出向四周分散。当放水0.5h时,进出水口下游受到上游径流来流和进出水口放水两股水流汇聚的影响,该区域水流流速最大,最大流速达0.32m/s,水流在口门上游侧出现竖轴环流。随着放水时段的继续,最大流速区仍在进出水口偏下游侧,但下水库水流流速逐渐下降,最大流速在放水时段末(放水10h)下降到0.16m/s。

正常蓄水位下无抽放水时,下水库水流流速较死水位时小,流速在0.06-0.13m/s之间。抽水时,四周水流向口门汇聚,在口门附近及下游形成大小不一的竖轴环流,越靠近进出水口,抽水引起的水流流速越大。当抽水0.5h时,水流最大流速为0.09m/s,集中在口门附近。此后最大流速在抽水过程中呈上升趋势,在抽水时段末(抽水8h)达0.12m/s,分布在口门附近及口门上游区域。抽水平面水流流态较放水复杂,主要表现在抽水改变了进出水口下游区域水流流向,下游水流逆向,在口门处与上游径流来流发生交汇,使得口门区域水流流态更加复杂。

2.2 进出水口附近环流分析

为研究抽放水对弯曲河道型下水库弯顶区域环流发展过程和环流强度的影响,在弯顶区域自上游往下选择140#、200#、260#断面(如图1所示)作为典型断面,分析环流、纵向流速及环流相对强度的沿程发展。

2.2.1 纵向流速、环流沿程发展

如图3所示,死水位下无抽放水时,在弯道离心力的作用下,纵向流速大流速区从略靠近凸岸侧(140#断面)转移至靠近凹岸侧(260#断面)。此时在弯顶200#断面存在表层流速指向凹岸、底部流速指向凸岸的顺时针环流。放水0.5h时,随着水位的升高,140#断面纵向流速降低。而200#、260#断面由于位于进出水口下游侧,在放水时受到上游径流来流和电站放水两股水流的汇聚影响,两断面纵向流速增大,其中260#断面纵向流速增大更加明显。在弯顶200#断面,靠近进出水口附近的凹岸侧水流

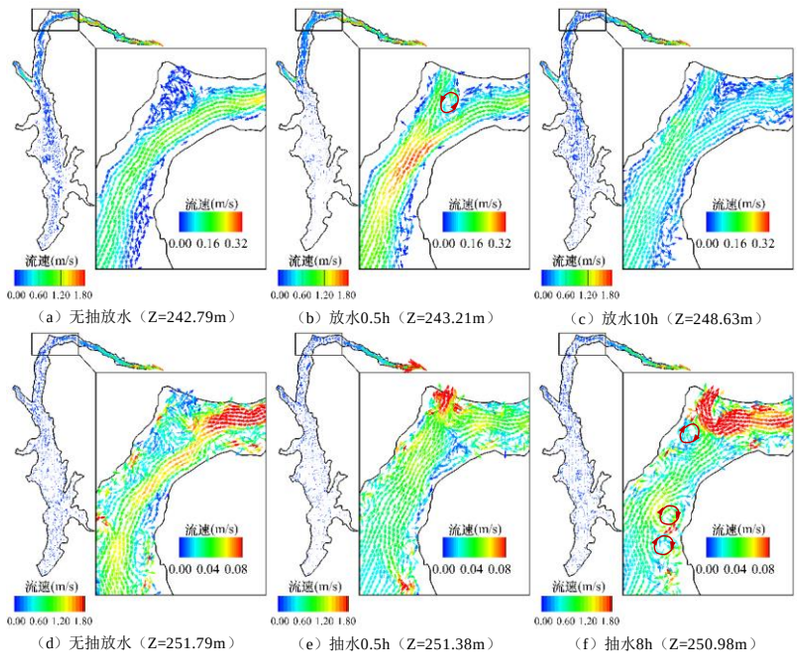


图2 抽、放水过程中流态变化图

Fig.2 The flow regime of 2D model during pumping and generating process

横向流速顺着电站放水的方向指向凸岸侧,而凸岸侧仍有顺时针环流残留。放水10h时,随着水位的继续升高,140#、200#、260#断面纵向流速大小降低。260#断面在弯道离心力、电站放水的双重影响下,纵向流速大流速区较无抽放水时更加靠近凹岸侧。200#断面受放水影响指向凸岸侧的横向流速进一步发展,此时只有在凸岸边滩侧小部分横向流速指向凹岸侧。

如图4所示,正常蓄水位下无抽放水时,140#、200#、260#断面纵向流速较死水位无抽放水时小。纵向流速大流速区分布与死水位时相似,在260#断面大流速区从靠近凸岸侧转移至靠近凹岸侧。在200#断面,水流形成表层流向凹岸、底部流向凸岸的顺时针环流。抽水0.5h时,140#断面纵向流速略有下降。200#、260#断面受抽水影响水流转变为朝上游逆流,只有260#断面在边滩侧存在流向下游的纵向流速。此时200#断面顺时针环流已被完全破坏,断面横向流速指向凹岸侧。抽水8h时,140#断面纵向流速较无抽放水时有所增大,200#、260#两断面整个断面纵向流速逆流向上。

2.2.2 环流强度变化分析

采用Blanckaert[17-18]提出的方法,将弯道环流的横向流速v分解为对流项v_i与环流项v_i^*,环流相对强度(I)可由下式表示:

$$I=\left|\frac{v-v_i}{u}\right| \tag{2}$$

$$\left\langle v_i^*\right\rangle=0 \tag{3}$$

式中,v为横向流速、v_i为对流项横向流速、u为纵向流速,单位为m/s;〈 〉为对垂线求平均值。

图5为抽放水时弯顶区域环流相对强度沿程变化图。环流相对强度最大值均出现在180#—200#断面附近。无抽放水时,两种水位条件(死水位、正常蓄水位)下,环流强度峰值分别为0.70和0.34,都出现在200#断面。放水过程中,180#—220#进出水口区域断面较无抽放水时(死水位下)环流相对强度显著降低,其中200#断面在放水10h时环流相对强度降低至0.03。其余断面较无抽放水时(死水位下)环流相对强度变化不大。抽水过程中,对比无抽放水时(正常蓄水位下),180#—220#断面环流相对强度也表现为降低,但环流相对强度峰值在180#、200#断面变动。

3 讨论

3.1 电站建设对进出水口附近水流结构的影响

由于电站的建立,进出水口弯顶区域地形在原有河槽地形基础上进行了开挖至电站底板高程(229m)的工程处理。本节对比分析了弯顶200#断面在不同地形、水位情况下无抽放水时的断面流速分布,以及环流相对强度的变化。

如图6所示,从纵向流速的分布上来看,原地形情况下纵向流速略大于开挖后纵向流速且原地形下大流速区分布更为集中。从弯道环流情况上看,

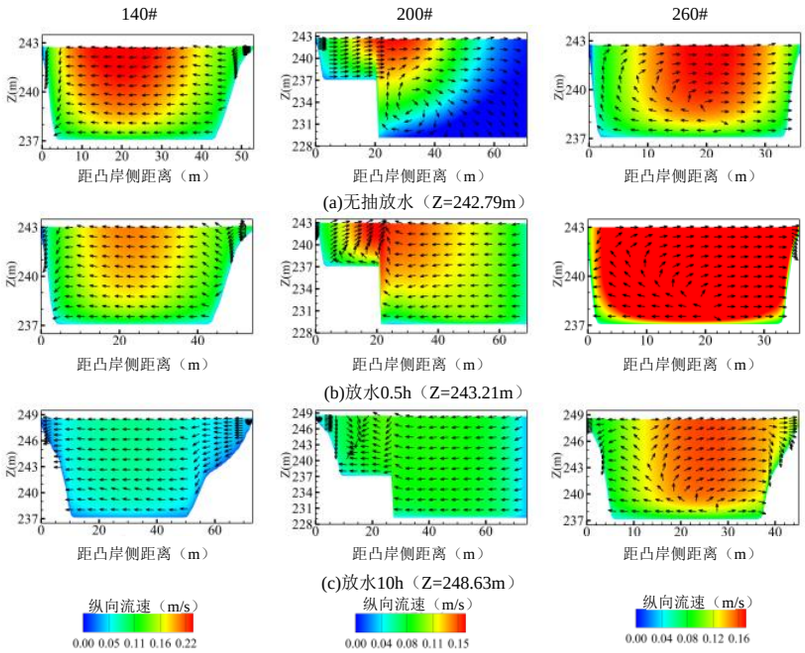


图 3　放水过程中 140#、200#、260#断面流速分布图

Fig.3　The velocity distribution of 140#, 200# and 260# cross sections during generating process

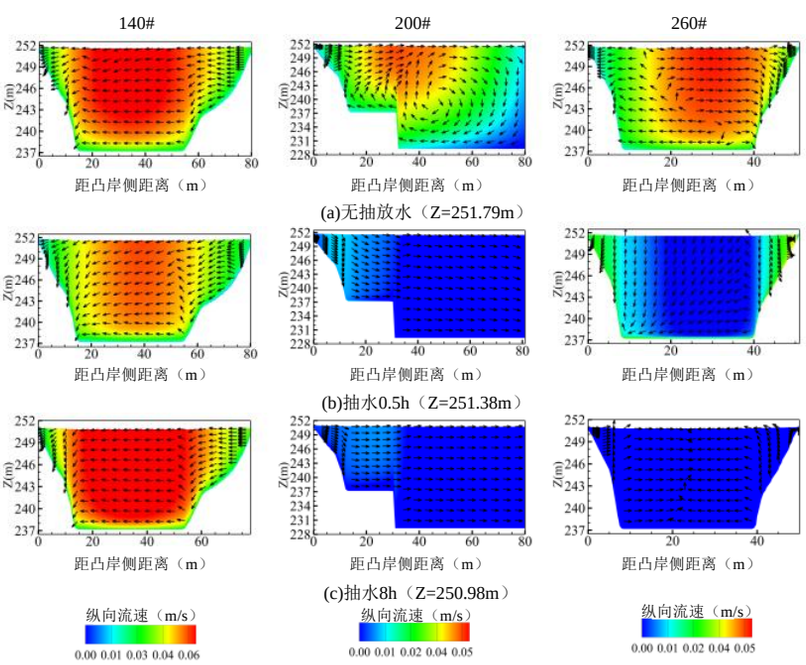


图 4　抽水过程中 140#、200#、260#断面流速分布图

Fig.4　The velocity distribution of 140#, 200# and 260# cross sections during pumping process

不同地形条件下,弯道环流都呈表层横向流速指向凹岸、底部横向流速指向凸岸的顺时针方向,但开挖后地形下环流位置较原地形更下沉接近于河底且更靠近凹岸侧。

如图 7 所示,原地形条件下,环流沿程相对强度在两种水位条件下变化不大,峰值出现在 200#断面。地形开挖后,横向流速在地形突变处变大且在断面垂向分布上表现不均匀,同时断面过水面积增大使得纵向流速减小,因此 180#—220#弯顶区域断面环流相对强度增强。

3.2　电站运行对进出水口附近挟沙能力影响

挟沙力是一个重要的描述水沙输移的指标。对于中、低含沙量的牛顿式紊流,根据张瑞瑾提出的水流挟沙力(S_*)公式[19]:

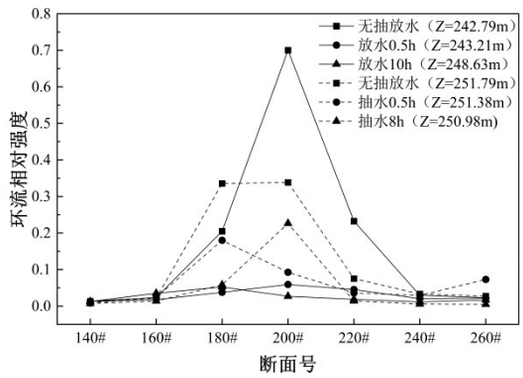


图5 抽、放水过程中环流相对强度沿程分布图

Fig.5 The circulation relative strength along the bend apex during pumping and generating process

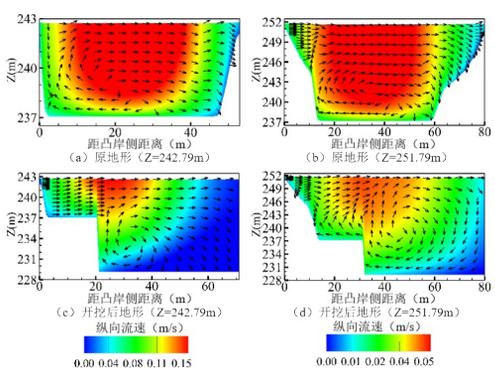


图6 电站建设前后前后无抽放水时200#断面流速分布图

Fig.6 The velocity distribution of 200# cross section in different terrains and water levels

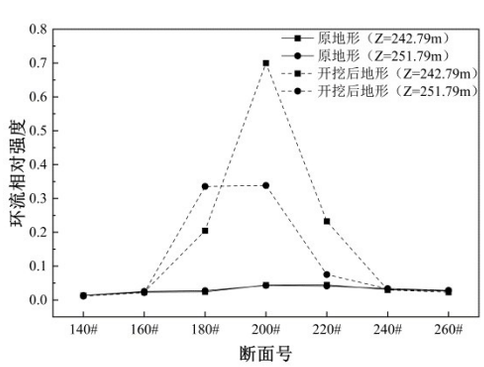


图7 电站建设前后无抽放水时环流相对强度沿程分布图

Fig.7 The circulation relative strength along the bend apex in different terrains and water levels

$$S_* = k\left(\frac{U^3}{gh\omega}\right)^m \tag{4}$$

式中，k和m为参数，可由实测资料率定；ω为泥沙的沉速，单位为m/s。

选取挟沙力判数U^3/h，表征单位水深内水流动力对泥沙的悬浮能力，定性分析进出水口区域水流输沙特征。如图8所示，无抽放水时(死水位下)，在进出水口附近平均挟沙力判数为6.37×10^{-4}m^2/s^3，在主河槽部分水流挟沙能力明显较大。放水0.5h时，平均挟沙力判数达16.18×10^{-4}m^2/s^3，较死水位时明显上升。进出水口下游区域受上游径流来水与电站放水两股水流汇聚影响，水流流速变大，挟沙力判数相较于水深对流速变化更敏感，因此此时水流挟沙能力变大。放水10h时，随着水位的上升，进出水口区域平均挟沙力判数下降至0.91×10^{-4} m^2/s^3。无抽放水时(正常蓄水位下)，进出水口区域平均挟沙力判数大小为0.14×10^{-4}m^2/s^3，较死水位无抽放水时有显著下降，表明随着水位的抬升水库泥沙更易落淤至河床上。抽水0.5h时，进出水口区域平均挟沙力判数为0.16×10^{-4} m^2/s^3，略高于无抽放水时。抽水8h时，进出水口区域平均挟沙力判数进一步增大至0.30×10^{-4}m^2/s^3。在整个抽水过程中，水流朝进出水口区域汇聚，进出水口上游侧水流挟沙能力较强区域范围逐步扩大。

3.3 计算成果合理性分析

由于三维计算边界条件为二维计算成果给出，对二维计算结果进行水量平衡分析。基于封闭水文系统假设(忽略降雨、蒸散发及渗漏等次要因素)，研究区域的水量平衡方程可表述为：

$$\triangle S = Q_{in} - Q_{out} + Q_p \tag{1}$$

其中，$\triangle S$为蓄水量变化，单位为m^3；Q_{in}为入流水量，包含干流、支流等自然径流来流，单位为m^3；Q_{out}为出流水量，指自然径流出流，单位为m^3；Q_p为电站抽放水水量，$Q_p>0$，表示电站放水，$Q_p<0$，表示电站抽水，单位为m^3。

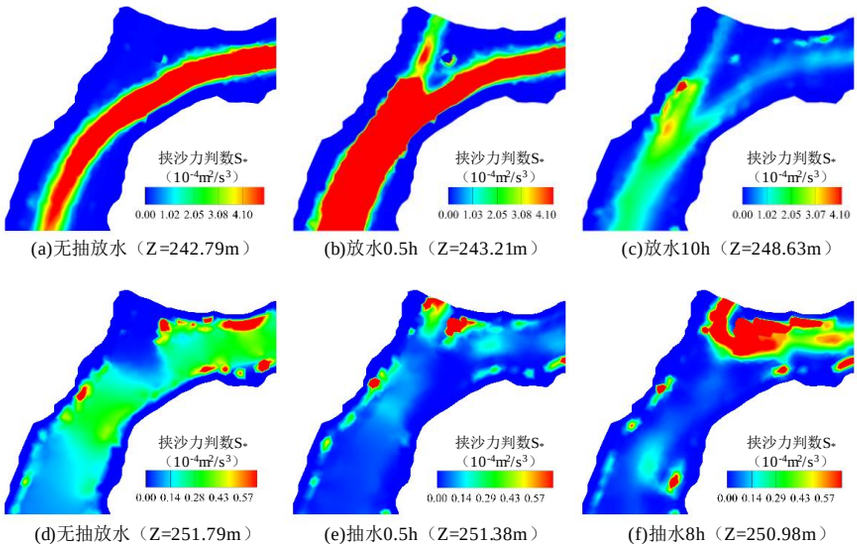
由表1可知，抽放水工况下二维计算水量平衡分别为3.30%、3.20%，满足计算精度要求。

4 结论

本文采用平面二维嵌套三维非恒定流水动力数学模型，对某抽水蓄能电站抽放水过程中下水库动力输移特性变化展开数值模拟研究，可得以下结论：

1)随着抽水蓄能和放水发电，下水库水位和进出水口附近流态改变。放水过程中，最大流速出现在进出水口稍下游位置；抽水时水流最大流速出现在进出水口稍上游处。在抽放水过程中，进出水口区域在上游来流、进出水口抽放水的影响下，形成竖轴环流，在放水时主要集中在进出水口偏上游区域，抽水时集中在进出水口下游位置。

2)电站运行改变了弯道环流的发展，弯顶段断面环流相对强度大大降低。放水时仅在凸岸侧存



(a)无抽放水（Z=242.79m） (b)放水0.5h（Z=243.21m） (c)放水10h（Z=248.63m）

(d)无抽放水（Z=251.79m） (e)抽水0.5h（Z=251.38m） (f)抽水8h（Z=250.98m）

图8 抽、放水过程中进出水口附近挟沙能力示意图

Fig.8 The sediment transport capacity near the inlet/outlet area during pumping and generating process

表 1 水量平衡分析表

Table1 Water Conservation Analysis Table

工况	Q_{in} ($\times10^4$ m^3)	Q_{out} ($\times10^4$ m^3)	Q_p ($\times10^4m^3$)	$\triangle S_{计算}$ ($\times10^4m^3$)	$\triangle S_{理论}$ ($\times10^4m^3$)	误差(%)
放水发电	186.23	0	+216.72	+390.06	402.95	3.20
抽水蓄能	148.98	0	−216.72	−65.50	−67.74	3.30

在弯道环流,出弯段断面大流速区更加转移至凹岸侧;抽水时,弯道环流被完全破坏,进出水口下游出现逆向流动。

3)对电站建设中的地形开挖如何影响弯曲河道型下水库环流特性进行了探讨。开挖后地形条件下弯顶段环流方向不变,但环流的位置更加靠近凹岸侧并略有下沉。同时,地形开挖增强了弯顶区域环流相对强度的大小。

4)用水流挟沙力判数U^3/h变化探究进出水口区域水流挟沙能力时空分布。总体上,水流挟沙能力时空分布与水流平面流态相印证,在大流速区域水流挟沙能力较强。放水过程中,挟沙力判数最大处出现在进出水口下游区域。抽水时,挟沙力判数最大处出现在进出水口上游,挟沙能力较强区域范围随着抽水的持续逐渐扩大。

不同运行方案下,电站进出水口区域水流流态存在较大变化,影响进出水口附近的泥沙运动,并将进一步影响过机含沙量。

参考文献:

[1] 梅祖彦.抽水蓄能技术[M].北京:清华大学出版社,1988.
MEI Zuyan. Pumped storage technology[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1988.

[2] 陆佑楣,潘家铮.抽水蓄能电站[M].北京:水利电力出版社,1992.
LU Youmei, PAN Jiazheng. Pumped storage power stations[M]. Beijing: Water Conservancy and Electric Power Press, 1992.

[3] 杨小亭,张强,邓朝晖.抽水蓄能电站进出水口模型试验[J].武汉大学学报(工学版),2007,(01):66-68+119.
YANG Xiaoting, ZHANG Qiang, DENG Zhaohui. Inlet/outlet model test of pumped storage power stations [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2007, (01):66-68+119.

[4] 张兰丁.响水涧抽水蓄能电站引、尾水道上弯段弯道效应分析[J].水利水电科技进展,2011,31(01):45-49.
ZHANG Landing. Bend effect of upper bend sections of headrace and tailrace conduits of Xiangshuijian Pumped Storage Power Stationp[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2011, 31(01):45-49.

[5] 高学平,朱洪涛,刘殷竹,等.进出水口双向流动结构流速分布与脉动规律研究[J].水利学报,2022,53(06):722-732.
GAO Xueping, ZHU Hongtao, LIU Yinzhu, et al. Research on Velocity distribution and fluctuation law of bi-directional flow structure of inlet/outlet[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53(06):722-732.

[6] 朱洪涛,高学平,刘殷竹.进/出水口出流扩散脉动流速规律试验研究[J].水力发电学报,2022,41(07):129-139.

ZHU Hongtao, GAO Xueping, LIU Yinzhu. Experimental study of velocity fluctuations in inlet/outlet under outflow diffusion[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2022, 41(07):129-139.

[7] 高学平,袁野,刘殷竹,等.拦污栅结构对进出水口水力特性影响试验研究[J].水力发电学报,2023,42(02):74-86.
GAO Xueping, YUAN Ye, LIU Yinzhu, et al. Experimental study on effect of trash rack structure on hydraulic characteristics of inlet and outlet[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2023, 42(02):74-86.

[8] 韩其为.水库淤积[M].北京:科学出版社,2003.
HAN Qiwei. Siltation of reservoirs[M], Beijing: Science Press, 2003.

[9] 向波,宋刚福,周婷,等.抽水蓄能电站水沙调度研究[J].水力发电学报,2012,31(04):89-93.
XIANG Bo, SONG Gangfu, ZHOU Ting, et al. Study on reservoir optimal operation of pumped storage power station[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012,31(04):89-93.

[10] 刘书宝.丰宁水蓄能电站泥沙淤积及防沙措施研究[J].东北水利水电,2010,28(12):21-22+38+72.
LIU Shubao. Study on sediment deposition and sand prevention measure for Fengning pumped storage power station[J]. Water Resources & Hydropower of Northeast, 2010, 28(12):21-22+38+72.

[11] Michael Müller , Giovanni De Cesare, Anton J. Schleiss . Continuous long-term observation of suspended sediment transport between two pumped-storage reservoirs[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 140(5):05014003.

[12] 魏红艳,徐秋蒙,余明辉.抽水蓄能电站水沙调控数值模拟研究[J].水力发电学报,2015,34(02):91-97+117.
WEI Hongyan, XU Qiumeng, YU Minghui. Numerical simulation of sediment management for pumped storage power station[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2015, 34(02):91-97+117.

[13] 刘创,余明辉,何鑫,等.多沙河流典型抽蓄电站取水防沙优化方案数模研究[J].泥沙研究,2024,49(06):15-21.
LIU Chuang, YU Minghui, HE Xin, et al. Numerical model study on optimal scheme of water intake and sediment control for typical pumped storage power station in sandy rivers[J]. Journal of Sediment Research,2024, 49(06):15-21.

[14] 高昂,吴时强.抽水蓄能电站侧式进出水口体型及水力特性研究进展[J].南水北调与水利科技,2018,16(02):132-139.
GAO Ang, WU Shiqiang. Progress of research on structure and flow characteristics of lateral inlet/outlet of pumped storage power station[J]. South-to-North Water Transfer and Water Science & Technology, 2018, 16(02):132-139.

[15] Tasri, Adek. Accuracy of cell centres to vertices interpolation for unstructured mesh finite volume solver [J]. Journal of The Institution of Engineers (India): Series C, 2021, 102(3):577-584.

[16] P. Parsapour-Moghaddam, C. D. Rennie . Hydrostatic versus nonhydrostatic hydrodynamic modelling of secondary flow in a tortuously meandering river: Application of Delft3D[J]. River research and applications, 2017, 33(9):1400-1410.

[17] Blanckaert K.. Topographic steering, flow recirculation, velocity redistribution, and bed topography in sharp meander bends[J]. Water Resources Research, 2010, 46(9).

[18] Termini, Donatella. Momentum transport and bed shear stress distribution in a meandering bend: Experimental analysis in a laboratory flume. Advances in Water Resources, 2015, 81: 128-141.

[19] 张瑞瑾.河流泥沙动力学[M].北京:中国水利水电出版社,1998.
ZHANG Ruijin. Sediment dynamics of rivers[M]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 1998.