

贺新娟, 李润伟, 孙万光, 等. 水电站坝下尾水渠集鱼流场模拟研究[J]. 水利水电技术, 2020, 51(12): 133-140.
 HE Xinjuan, LI Runwei, SUN Wanguang, et al. Simulative study on fish-collecting flow field of tailrace channel under dam for hydropower station[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2020, 51(12): 133-140.

水电站坝下尾水渠集鱼流场模拟研究

贺新娟^{1,2}, 李润伟¹, 孙万光^{1,2}, 李广一^{1,2}

- (1. 中水东北勘测设计研究有限责任公司, 吉林 长春 130021;
 2. 水利部寒区工程技术研究中心, 吉林 长春 130061)

摘要: 为减缓大坝阻隔对鱼类洄游的不利影响, 水电工程需要建设有效的过鱼设施疏通其洄游通道。高寒区高坝大库工程过鱼设施建设是一个极其复杂的技术问题, 目前国内类似工程尚无成功运用经验。实际过鱼设施内流场条件十分复杂, 会产生不利于鱼类上溯的水流形态。基于此原因, 对某水电站工程坝下尾水流场进行了数值模拟。研究表明, 在机组运行时, 电站尾水渠左右两侧发电尾水主流的边缘是明显具有流速梯度分布的区域, 符合鱼类聚集的水流特征, 具备布置鱼道进口条件。这样可根据尾水位的变化开启两侧不同进口诱鱼, 且在机组停运时, 可开启左侧进口诱鱼。

关键词: 水电站; 过鱼设施; 坝下尾水渠; 数值模拟; 集鱼流场

doi: 10.13928/j.cnki.wrahe.2020.12.017

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

中图分类号: TV697.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-0860(2020)12-0133-08



Simulative study on fish-collecting flow field of tailrace channel under dam for hydropower station

HE Xinjuan^{1,2}, LI Runwei¹, SUN Wanguang^{1,2}, LI Guangyi^{1,2}

- (1. China Water Northeastern Investigation Design and Research Co. Ltd., Changchun 130021, Jilin, China; 2. Research Center on Cold Region Engineering Technology, Ministry of Water Resources, Changchun 130061, Jilin, China)

Abstract: In order to alleviate the adverse impact from the blockage of dam on fish migration, effective fish-passing facility is necessary to be built up for hydropower project to unlock fish migration passage. It is a very complicated technical matter to construct the fish-passing facility for the project of high dam and huge reservoir in high-cold area, while no successful application experiences are there for the similar projects at present in China. The flow field condition inside the actual fish-passing facility is quite complicated, under which the flow pattern that is unfavorable for the upstream migration of fish is to be formed. For this reason, a numerical simulation is carried out on the flow field of the tailrace channel under the dam of a hydropower station. The study result shows that both the right and left sides of the tailrace channel for the hydropower plant are the edges of the main stream of the tail water from power generation and the obvious areas of velocity gradient distribution during the operation of the hydropower plant, which are consistent with the characteristics of the flow conditions for fish aggregation, thus have the conditions for arranging fish-way. In this way, different inlets on the both sides can be opened to lure fish in accordance with the change of the tailrace water level, while the inlets on the left side can be opened for fish luring when the power generating units are shut down.

收稿日期: 2019-12-17

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0407303)

作者简介: 贺新娟(1990—), 女, 工程师, 硕士, 主要从事水动力学和防洪减灾方面的研究。E-mail: 1138245110@qq.com

Keywords: hydropower station; fish-passing facility; tailrace channel under dam; numerical simulation; fish-collecting flow field

0 引言

水利水电工程对生态最显著的负面影响是阻隔作用,大坝等工程建设导致水生生态系统破碎化^[1],直接影响、改变鱼类生存所必需的生境和水文情势^[2-3]。水电站的建设不仅阻隔了洄游性鱼类的通道,对半洄游性鱼类和非洄游性鱼类也有很强的阻隔效应^[4]。为缓解种群间遗传交流受阻的不利影响,保护鱼类种群的遗传多样性,恢复和改善大坝上下游鱼类种群交流,新建的水利水电工程需要采取有效的过鱼设施疏通洄游通道减缓大坝的阻隔对鱼类的影响^[2,5]。对于高坝水电站过鱼设施,通常采用集诱鱼设施进行诱鱼和集鱼,通过升鱼机或其他方法将鱼运输过坝^[6],此类工程过鱼设施建设需解决极其复杂的技术问题,目前国内类似工程尚无成功运用经验。

目前国内外主要采用模型试验、数值模拟和原型观测等技术手段对过鱼设施进行研究^[7],发达国家采用适宜性管理理念不断地加强鱼道及过鱼设施的修建^[1],由于我国过鱼设施还处于二次发展阶段,其建设数量和运行效果都与要求相差甚远^[3],对鱼类的行为趋向性及过鱼设施进口布置的了解还不深入,目前可供借鉴的相关经验还很欠缺。鱼类如何寻找进口、进口的效率以及吸引水流的信息很少,国际上还没有明确的鱼类对微水流条件响应的研究成果。ANDERSSON等^[7]采用Ansys软件对不同位置下的鱼道进口进行了数值模拟,发现鱼道进口的水流受电站尾水影响较小时能产生良好的诱鱼水流。过鱼设施相对于河流而言流量很小,进口位置以及进口附近是否存在满足特定水力学条件的集诱鱼水流便成为成功的关键。

在水电站运行时,尾水流量和尾水水位变化幅度很大;机组水头较高,机组运行时,尾水管出口流速较大,可能导致尾水渠一定范围河段的流速大于鱼类上溯的上限流速,或在发电机组不同的运行工况下,进鱼口附近产生洄流等不利于诱导鱼类进入集鱼池的水流形态,影响集鱼效果。本文以国内某水电站工程为研究对象,采取三维数值模拟的方法开展本工程特别关注的坝下尾水区域集鱼流场分布研究,为过鱼设施的设计以及电站不同机组的调度运行提供依据,以获得适合鱼类上溯的流场分布和机组运行工况。

1 某电站过鱼设施集鱼系统概况

1.1 集鱼系统布置

某电站过鱼设施采用“集鱼系统+升鱼机+放流系统”方案,整体布置于枢纽右岸,主要组成部分为:环绕尾水渠鱼道集鱼系统、升鱼机系统、放流系统、鱼道观察室和辅助设施。集鱼系统环绕厂房尾水渠布置鱼道,鱼道起始点在尾水左侧导墙(消力池右导墙)端部,沿尾水左导墙向上游延伸至尾1[#]机组左边墩,横跨厂房尾水至6[#]机组右边墩,沿尾水右边墙向下游延伸94.25 m后向上游转折,再延伸32.72 m至鱼道末端结束。鱼道全长400.97 m,宽度2.50 m。鱼道在4个高程共设置6个进口,进口之间相互补充运用,并可结合工程实际运行调整开启方式。

1[#]进鱼口位于厂房尾水渠左岸的消力池右导流墙末端,高程189.30 m,该进口由3个分支进口组成,1-1[#]进口朝向下游,1-2[#]进口与鱼道中心线夹角45°,1-3[#]进口在消力池内朝向垂直水流方向;2[#]进鱼口位于尾水渠左岸的消力池右边墙上,接近尾水出口,高程190.25 m;3[#]进鱼口位于尾水渠右岸挡墙上,接近尾水出口,高程192.30 m;4[#]进鱼口位于尾水渠右岸挡墙上,高程193.00 m。2[#]、3[#]、4[#]进口朝向均为垂直水流方向,进口宽度均为1.00 m。过鱼设施集鱼系统平面布置如图1所示。

1.2 集鱼时间选择

该电站发电以调峰为主,停机时段通过下游水库的反调节对下游进行供水。春季灌溉期典型日电站发电23 h,只有13:00—14:00时不发电,发电期间最小下泄流量为160 m³/s,最大下泄流量为1 713 m³/s;夏季典型日电站发电9 h,22:00—9:00、13:00—16:00不发电,发电期间最小下泄流量为266 m³/s,最大下泄流量为2 137 m³/s。

根据该电站运行方式,主要考虑该工程发电时下游河道产生的流场进行诱鱼。因夏季典型日机组停机时间长达15 h,在机组不运行的情况下,对电站尾水附近的鱼类要兼顾考虑诱鱼条件。

1.3 过鱼设施进口流速要求

过鱼设施内的水流形态会对鱼类的上溯产生较大影响。鱼类对特定的水流速度和形态具有明显的趋向性,不同鱼类有着不同的喜好水流^[8]。过鱼设施进口一般采用一股流速相对较大的水流进行诱鱼,诱

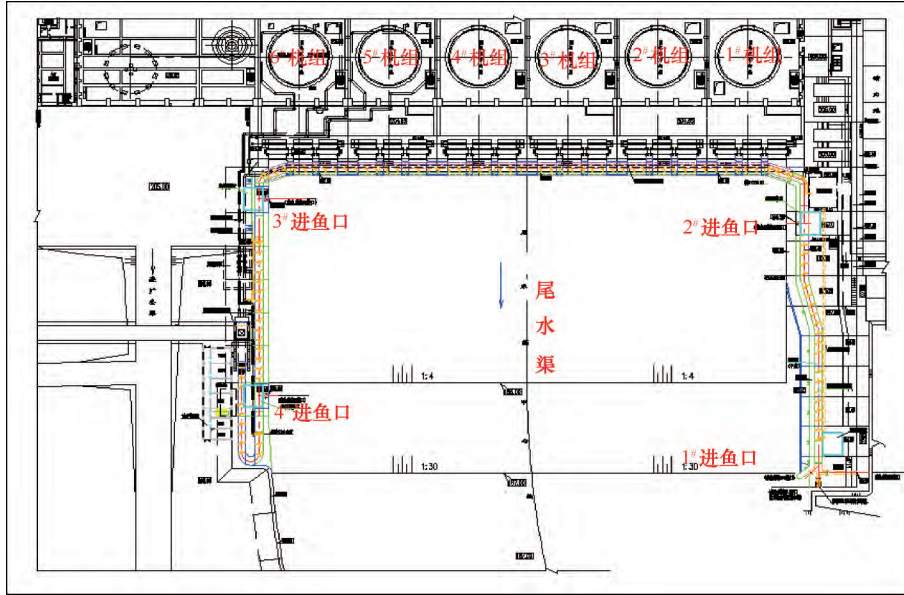


图 1 过鱼设施集鱼系统平面布置示意

鱼流速主要与鱼类游泳能力相关，一般过鱼设施诱鱼流速在鱼类临界流速和突进流速之间取值，这样在保证足够的吸引力与影响范围的同时，也不会形成对鱼类的流速屏障及使鱼类产生疲劳效应。依据该工程过鱼设施原位观测研究报告^[9]，过鱼的 8 种鱼类(青鱼、草鱼、鲢、鳙、鳊、怀头鲂、翘嘴鲌、花江鲢)的临界流速为 0.83~0.99 m/s，突进流速为 0.88~1.25 m/s，一般最佳诱鱼流速范围在临界流速和突进流速之间，其中流速越大水流影响范围越大。综合考虑，本次数值计算时进口流速范围选取为 0.7~1.3 m/s。

2 计算模型及验证

2.1 基本方程

为了全方位捕捉到坝下集鱼流场内丰富的水流信息，通过三维数学模型计算坝下尾水渠水流流动情况。紊流模型采用 $k-\varepsilon$ 双方程模型。连续方程、动量方程和 k 、 ε 方程分别如下。

连续方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

动量方程

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

k 方程

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \left(\frac{\partial k}{\partial x_i} \right) \right] + G + \rho \varepsilon \quad (3)$$

$$G = \mu_t \left(\frac{\partial \mu_i}{\partial \mu_j} + \frac{\partial \mu_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \mu_i}{\partial x_j}$$

ε 方程

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \varepsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

式中， ρ 和 μ 分别为体积分数的平均的密度和分子黏性系数； p 为压力； μ_t 为紊动黏度，它可由紊动能 k 和紊动耗散率 ε 求出； C_μ 为经验常数，取 $C_\mu = 0.09$ ； σ_k 和 σ_ε 分别为 k 和 ε 的紊动普朗特数， $\sigma_k = 1.0$ ， $\sigma_\varepsilon = 1.3$ ； $C_{1\varepsilon}$ 和 $C_{2\varepsilon}$ 为 ε 方程经验常数， $C_{1\varepsilon} = 1.44$ ， $C_{2\varepsilon} = 1.92$ ； G 为由平均速度梯度引起的紊动能产生项。

自由表面采用 VOF (The Volume of Fluid) 方法，在空间上定义函数 F ，全含水为 1，不含水为 0，当为自由表面时， $0 < F < 1$ 。函数 F 是空间和时间的函数，即 $F = F(x, y, z, t)$ ，可以理解为固结在流体质点上并随流体一起运动的没有质量和黏性的染色点的运动，其输运方程为

$$dF/dt = 0 \quad (5)$$

2.2 数值计算方法

对于前面所建立的方程组，要想求解出全部计算域的未知变量还必须采用一定的数值求解算法，采用

有限差分方法进行离散, 将上式写成如下的通用形式

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \nabla \cdot (u_j \varphi) = \nabla \cdot (\Gamma_\varphi \text{grad} \varphi) + S_\varphi \quad (6)$$

式中, t 和 u_j 分别为时间和速度矢量; φ 为通用变量, 如速度、紊动能等; Γ_φ 为变量 φ 的扩散系数; S_φ 为方程的源项。

2.3 三维模型建立及验证

2.3.1 三维模型

根据某水电站坝址河段的地形及水流特征, 基于 Flow-3D 软件建立三维水力数学模型, 对该电站下游水流运动情况进行模拟, 主要对 3 台及以上机组运行进行流场分析, 同时对半台机组进行复核分析。数值模拟试验区域选自电站至坝下 1.0 km 处, 三维数值模拟计算区域如图 2 所示, 三维模型进鱼口位置如图 3 所示。



图 2 数值模拟计算区域

2.3.2 模型验证

运用该水电站坝下 330 m 处河道天然的水位-流量关系以及水工模型试验成果对该数学模型进行验证。水工模型试验成果、河道天然成果与数值模拟成果对比如表 1 所列, 分析可知三者相差不大, 模型试验成果偏高一点, 表明该模型可靠性高可用于后续计算。

表 1 模型验证成果对比

序号	机组运行	流量 $Q/m^3 \cdot s^{-1}$	水位 H/m			误差 $/m$	
			天然成果	物模成果	数模成果	数模-物模	数模-天然
1	0.5 台机发电	198.43	192.36	192.64	192.62	-0.02	0.26
2	3 台机发电	1 190.55	194.04	194.11	193.81	-0.30	-0.23
3	4.3 台机发电	1 707.00	194.55	194.61	194.52	-0.09	-0.03
4	5.5 台机发电	2 137.00	194.89	195.02	195.00	-0.02	0.11

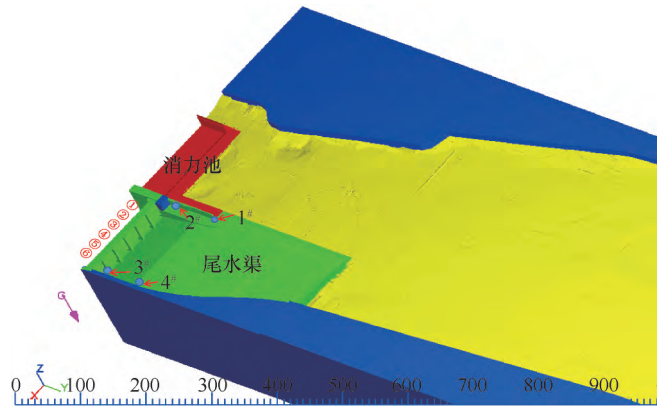


图 3 三维模型进鱼口位置示意

3 坝下尾水渠集鱼流场数值模拟研究

3.1 数值模拟工况设计

某水电站不同机组运行工况下, 坝下尾水渠集鱼流场数值模拟研究方案如表 2 所列。

3.2 尾水流场三维数值分析

3.2.1 不同机组发电集鱼流场对比分析

3.2.1.1 新厂 5.5 台机组发电尾水流场分析

电站约 5.5 台机发电为夏季灌溉期典型日最大发电容量, 本次主要模拟了电站 6[#]/1[#]/3[#]半发、其余机组满发三种工况, 不同水深集鱼流场分布对比如图 4 所示。

表 2 不同机组运行下数值仿真计算工况

方案	工况编号	方案描述	机组开启方式	上边界流量 $Q/m^3 \cdot s^{-1}$	下边界 水位 H/m
A	A-1	夏季典型日调峰运行, 约为 5.5 台机发电	6 [#] 半发, 1 [#] —5 [#] 机组满发	2 137.00	194.79
	A-2		1 [#] 半发, 2 [#] —6 [#] 机组满发		
	A-3		3 [#] 半发, 其余机组满发		
B	B-1	春季灌溉期调峰运行, 约为 4.3 台机发电	6 [#] 机停机、5 [#] 机 30% 出流, 1 [#] —4 [#] 机组满发	1 707.00	194.36
	B-2		1 [#] 机停机、2 [#] 机 30% 出流, 3 [#] —6 [#] 机组满发		
	B-3		3 [#] 机停机、4 [#] 机 30% 出流, 1 [#] 、2 [#] 、5 [#] 、6 [#] 机组满发		
C	C-1	3 台机发电	4 [#] —6 [#] 机组满发, 1 [#] 、2 [#] 、3 [#] 关机	1 190.55	193.81
	C-2		1 [#] —3 [#] 机组满发, 4 [#] 、5 [#] 、6 [#] 关机		
	C-3		2 [#] 、4 [#] 、6 [#] 满发, 1 [#] 、3 [#] 、5 [#] 关机		
D	D-1	半台机发电	1 [#] 半发, 其余关机	198.43	192.25
	D-2		3 [#] 半发, 其余关机		
	D-3		6 [#] 半发, 其余关机		

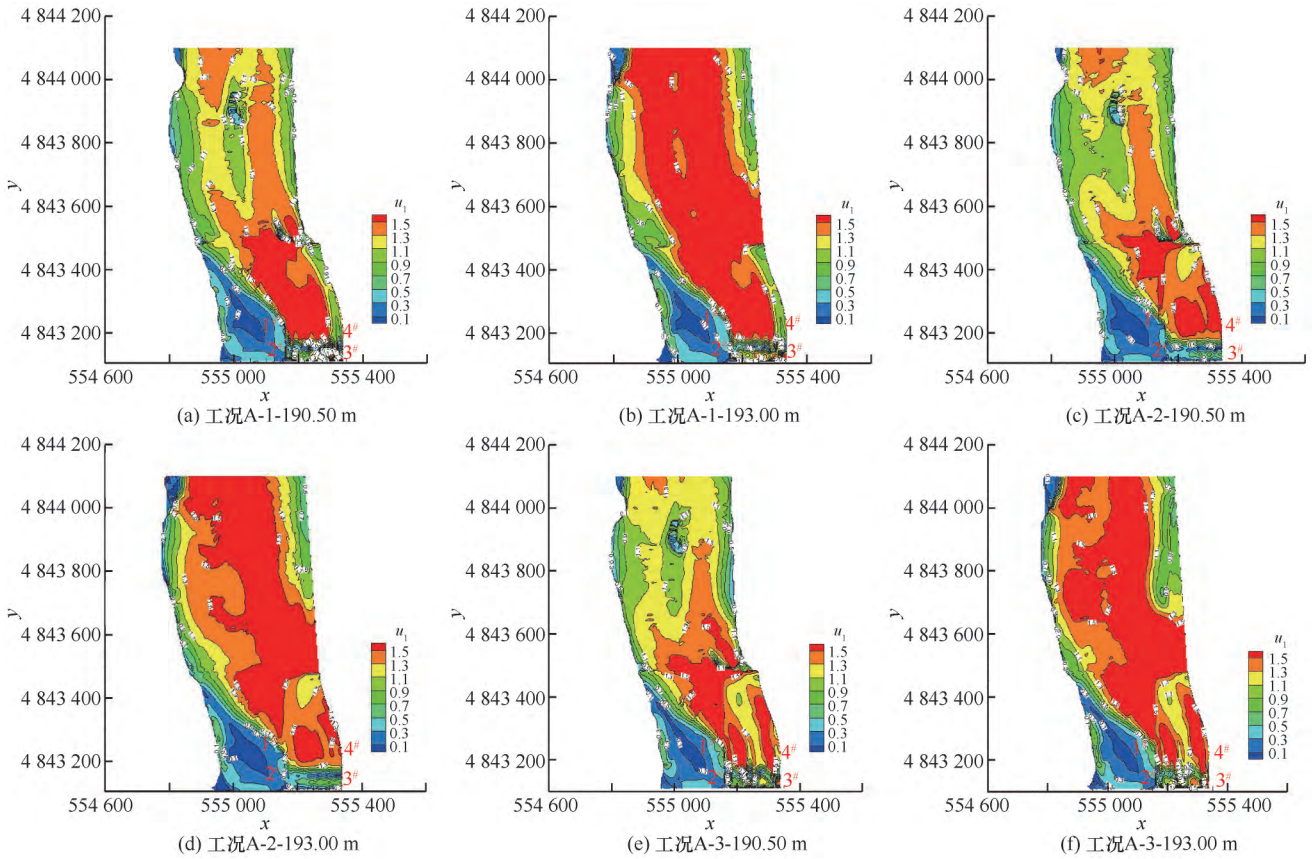


图4 电站5.5台机发电不同工况集鱼流场对比

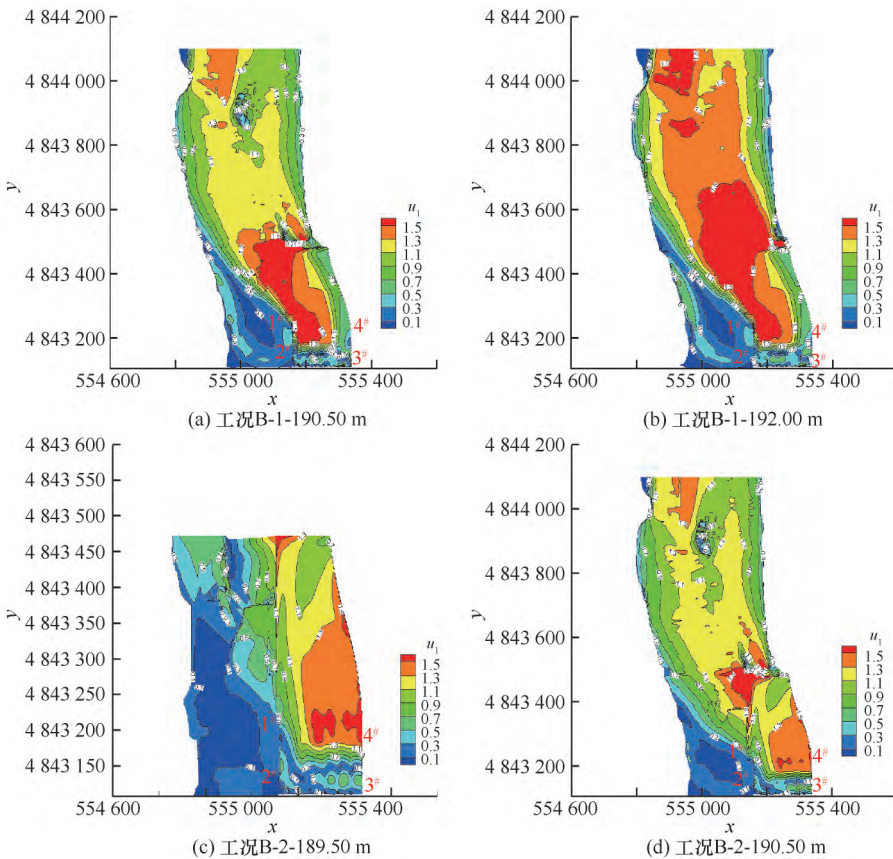


图5 电站4.3台机发电不同工况集鱼流场对比

分析可知: 无论6[#]机半发还是1[#]机半发其他机组满发工况, 半发机组对应的一侧, 在189.50~193.00 m高程之间, 尾水下游流速均能满足鱼类上溯至尾水渠上游端部的条件, 相反, 另一侧尾水及中部流速大于1.3 m/s, 鱼类很难由此进入尾水渠。

3[#]机半发其他机组满发, 在189.50~193.00 m高程之间, 尾水渠中间部位流速小于1.3 m/s, 但两侧流速大于1.3 m/s, 鱼类由右岸进入尾水渠较为困难。在各种水深情况下, 尾水下游左侧流速均能满足鱼类上溯至左侧导墙端部的条件, 端部有狭窄区可满足鱼类上溯到尾水渠的上游端部的条件。

3.2.1.2 电站4.3台机组发电尾水流场分析

电站约4.3台机发电为春

季灌溉期典型日最大发电容量, 本次主要模拟了 B-1 (6#机停机、5#机 30% 出力, 其他机组满发)、B-2 (1#机停机、2#机 30% 出力, 其他机组满发)、B-3 (3#机停机、4#机 30% 出力, 其他机组满发) 三种工况, 不同水深流场分布对比如图 5 所示。

分析可知, 电站约 4.3 台机发电, 不同工况下尾水流场分布一致, 在 189.50~190.50 m 高程之间右侧下游岸边流速小于 1.3 m/s, 均满足鱼类上溯要求。在 192.00 m、193.00 m 高程时在尾水下游 400 m 处, 右岸局部范围超过了 1.3 m/s, 鱼类可通过深水部位通过坝下 400 m 局部区域, 进入尾水渠内。在各种水深情况下, 尾水下游左侧流速均能满足鱼类上溯至尾水渠上游端部的条件。

3.2.1.3 电站 3 台机组发电尾水流场分析

电站 3 台机发电, 本次主要模拟了 C-1(4#—6# 机组满发, 1#、2#、3# 关机)、C-2(1#—3# 机组满发, 4#、5#、6# 关机)、C-3(2#、4#、6# 满发, 1#、3#、5# 关机) 三种工况, 不同水深流速分布如图 6 所示。

分析可知, 电站 3 台机发电时坝下集鱼流场分布同方案 B 基本一致, 电站相邻或间隔三台机满发其余停机时(C-1、C-2、C-3), 在 189.50~190.50 m

高程之间右侧下游岸边流速小于 1.3 m/s, 满足鱼类上溯要求。在 192.00 m、193.00 m 高程时在尾水下游 400 m 处, 右岸局部范围超过了 1.3 m/s, 鱼类可通过深水部位通过坝下 400 m 局部区域, 进入尾水渠内。在各种水深情况下, 尾水下游左侧流速均能满足鱼类上溯至尾水渠上游端部的条件。

3.2.1.4 电站半台机组发电尾水流场分析

电站半台机发电不同水深流速分布如图 7 所示, 由图 7 分析可知, 厂房尾水在地形约束下, 主体流速在 0.5~1.3 m/s 之间, 整体诱鱼条件较好, 主流在靠近半发机组对应的下游侧。

三维数值分析成果表明, 在不超过 5.5 台机组运行时, 尾水下游流场能够满足鱼类上溯的要求。

3.2.2 鱼道进口组合运用分析

根据尾水流场数值计算结果, 尾水渠左岸消力池右导流墙末端、消力池一侧及尾水渠内两岸具备鱼类上溯条件, 可形成鱼类聚集区域, 鱼类可顺利进入尾水渠。不同进口与机组调度组合关系如表 3 所列。

(1) 在机组发电时, 尾水渠及下游流场满足鱼类上溯要求, 鱼类可顺利进入尾水渠, 根据尾水位的变化开启不同进口。结合流场及进口高程, 集鱼进口运用如下: ① 当发电机组大于 2 台机组(包含)发电情

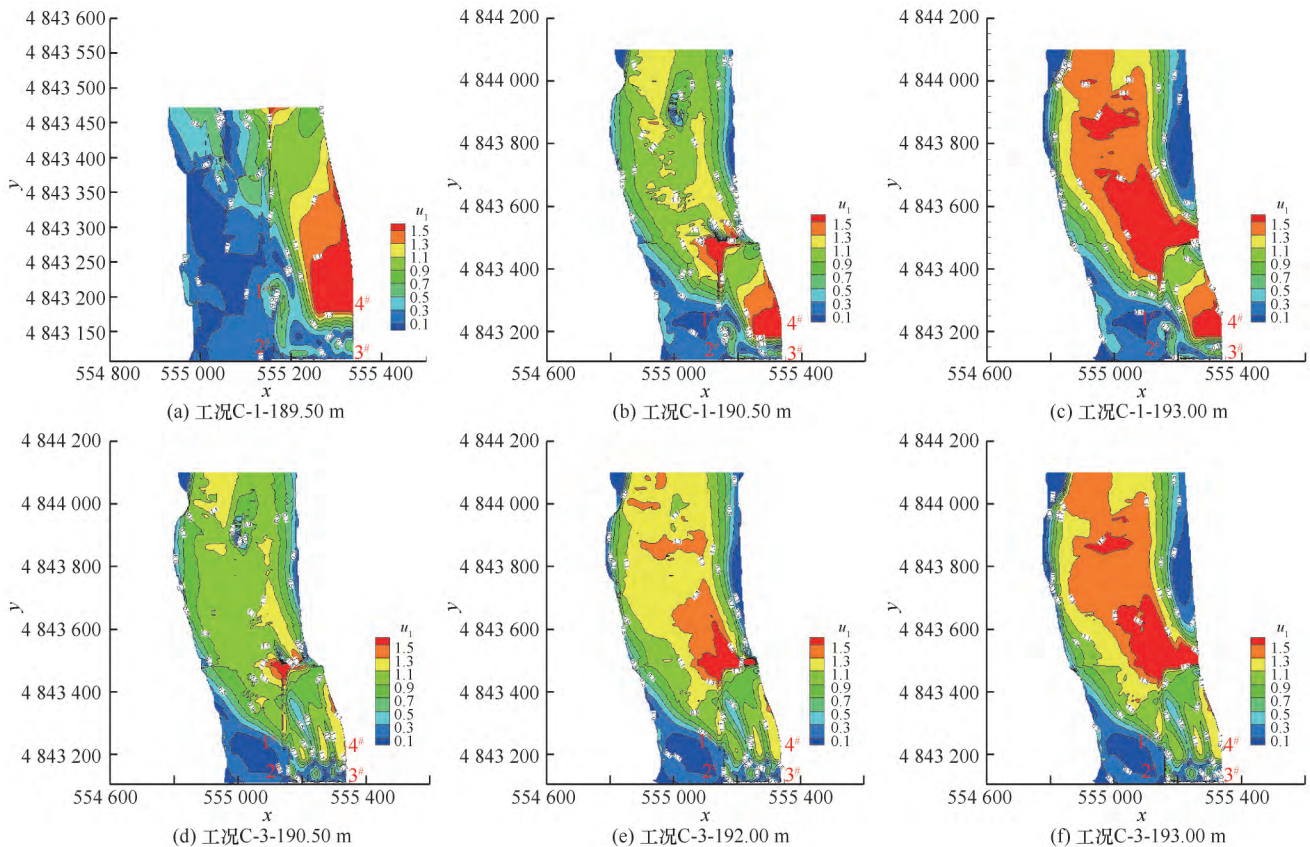


图 6 电站 3 台机发电不同工况集鱼流场对比

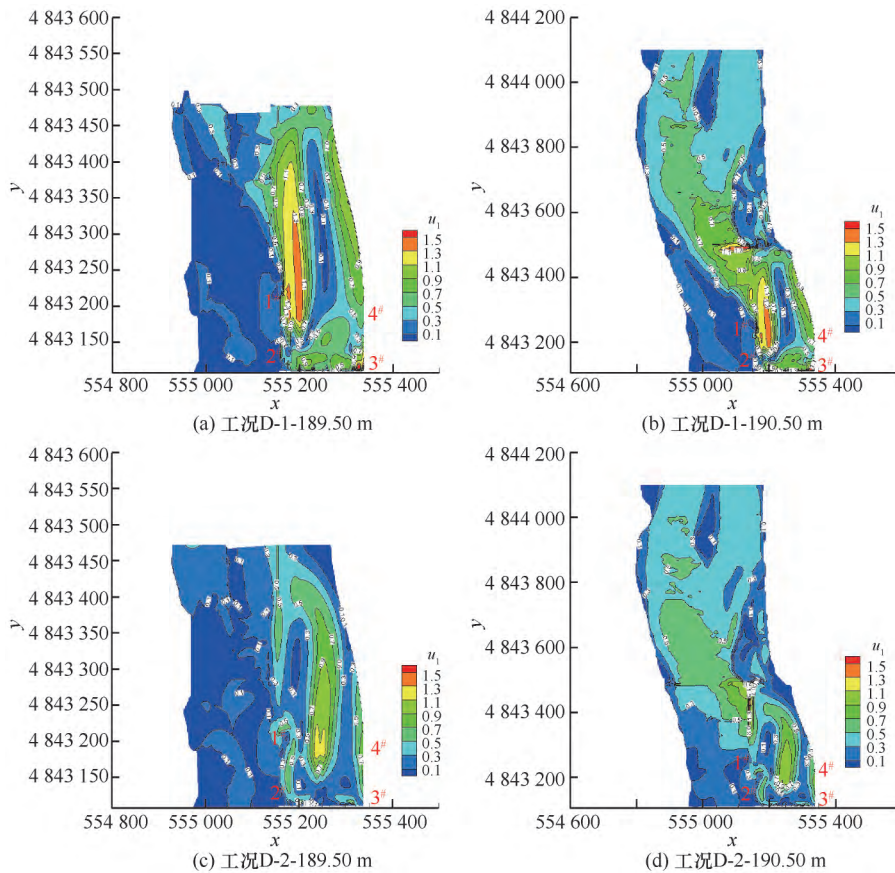


图7 电站半台机发电不同工况集鱼流场对比

表3 进口与机组调度组合关系

机组发电台数	启用进口编号	机组编号						推荐组合次序
		1#	2#	3#	4#	5#	6#	
0.5台	2#	√	-	-	-	-	-	1
	2#	-	-	√	-	-	-	2
	2#	-	-	-	-	-	√	3
3台	3#	-	-	-	√	√	√	1
	3#、4#	-	√	-	√	-	√	2
	3#、4#	√	-	√	-	√	-	3
	3#、4#	√	√	√	-	-	-	4
4.3台	3#、4#	√	√	√	√	0.3台	-	1
	3#	-	0.3台	√	√	√	√	2
	3#	√	√	-	0.3台	√	√	3
5.5台	3#、4#	√	√	√	√	√	0.5台	1
	3#	0.5台	√	√	√	√	√	2
	-	√	√	0.5台	√	√	√	3

况下,可采用4#、3#进口集鱼;②1.5台机组发电情况下,可采用3#进口集鱼;③1台机组发电情况下,可采用2#、3#进口集鱼;④0.5台机组发电情况下,可采用2#进口集鱼。

(2)在机组停发时,坝下水位在190.85~192.20m时,可采用1#、2#进口集鱼;坝下水位在190.09~190.85m时,可采用1#进口集鱼。

4 结论与展望

水电站工程的建设对洄游性鱼类、半洄游性鱼类和非洄游性鱼类均有很强的阻隔效应,为缓解种群间遗传交流受阻的不利影响,工程建设采取有效的过鱼设施是十分必要的。对于我国寒冷地区高坝大库型水电站,此类工程过鱼设施建设是一个极其复杂的技术问题,目前国内类似工程尚无成功运用经验,本次计算可为此类工程过鱼设施建设提供科学理论依据,为解决此类工程过鱼设施进口的布置及鱼类对水流条件响应问题具有一定的参考意义。

对某电站坝下尾水流场进行数值模拟研究表明,在电站运行时,电站尾水渠左右两侧为发电尾水主流的边缘,具有明显的流速梯度分布区域,符合鱼类聚集水流特征,具备布置进口条件。在机组发电时,尾水渠及下游流场满足鱼类上溯要求,鱼类可顺利进入尾水渠,可根据尾水位的变化开启两侧2#~4#进口诱鱼;在机组停发时,可开启左侧1#~2#进口诱鱼。后续将进一步通过原型观测进行实证研究,对本文数值模拟提出的鱼道进口组合运用方式进行验证。

目前高水头水电工程的过鱼设施工程实例较少,还需要结合工程运用和参考同类型工程经验不断同步分析和研究。在过鱼设施实际运行过程中,需根据区域水生态监测数据及过鱼效果观测数据等不断调整运行方式,以期取得更好的过鱼效果。

参考文献:

[1] 陈凯麒,葛怀凤,郭军,等. 我国过鱼设施现状分析及鱼道适宜性管理的关键问题[J]. 水生态学杂志, 2013, 34(4): 1-6.
[2] 谭民强,梁学功. 水利水电建设中鱼类保护的有效措施: 适宜生境的人工再造[J]. 环境保护, 2007(24): 73-74.
[3] 曹庆磊,杨文俊,周良景. 国内外过鱼设施研究综述[J]. 长江科学院院报, 2010, 27(5): 39-43.
[4] 刘昕. 丰满水电站大坝全面治理工程对鱼类资源的影响研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2013.
[5] 刘志国,邱兴春,赵再兴. 丰满水电站运行与区域渔业资源保

护利用协调发展的总结与思考[J]. 水利发展研究, 2016, 16(7): 45-49.
[6] 廖伯文,安瑞冬,李嘉,等. 高坝过鱼设施集诱鱼进口水力学条件数值模拟与模型试验研究[J]. 工程科学与技术, 2018, 50(5): 87-93.
[7] ANDERSSON A G, LINDBERG D E, LINDMARK E, et al. A numerical study of the location and function of the entrance of a fishway in a regulated river[J]. International Symposium on Ecohydraulics, 2016: 277-284.
[8] 蔡露,金瑶,潘磊,等. 过鱼设施设计中的鱼类行为研究问题[J]. 生态学杂志, 2018, 37(11): 3458-3466.
[9] 水利部 中国科学院水工程生态研究所. 丰满大坝重建工程过鱼设施原位观测研究报告[R]. 武汉: 水利部 中国科学院水工程生态研究所, 2015.

(责任编辑 韩丽宇)