

平原河网地区泵闸枢纽流态精细化数值模拟

陆 倩^{1,2}

(1. 上海市水利工程设计研究院有限公司, 上海 200061; 2. 上海市水务局防汛减灾工程技术研究中心, 上海 200061)

摘要:以典型平原河网地区上海市浦东新区拟建的赵家沟东泵闸工程为研究对象,分别采用准三维 MIKE3 和仿真三维 FLOW-3D 两种三维数值模拟软件对枢纽下泄水流流态进行模拟,并根据已有的平面二维 MIKE21 模拟结果和物理模型试验结果,对两种软件三维水动力数值模拟结果的合理性进行分析。结果表明:准三维 MIKE3 无法满足泵闸流态精细化模拟的需求,其模拟结果与物理模型试验结果存在差别,而仍与平面二维 MIKE21 模拟结果类似;仿真三维 FLOW-3D 模拟结果与物理模型试验结果接近,更加精细合理,可应用于类似水利工程设计研究中流态的精细化数值模拟。

关键词:泵闸枢纽;平原河网;流态模拟;三维模型;MIKE3;FLOW-3D;赵家沟东泵闸工程

中图分类号:TV61 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2022)03-0070-05

Refined numerical simulation on flow patterns of sluice-pump hubs in plain river network region//LU Qian^{1,2}
(1. Shanghai Water Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200061, China; 2. Engineering Research Center of Flood Control and Disaster Reduction, Shanghai Water Authority, Shanghai 200061, China)

Abstract: Taking the Zhaojiagou East Sluice-Pump Project proposed to be built in the Pudong New District of Shanghai in a typical plain river network area as the research object, a quasi-3D numerical simulation software, MIKE3 and a real 3D software, FLOW-3D, were used to simulate the flow patterns of the discharge flow. The rationality of the simulation results of the two models were analyzed and compared based on the existing results of the horizontal 2D model MIKE21 and physical model test. The results show that, the quasi-3D MIKE3 cannot meet the requirements of the refined simulation of the flow pattern of the sluice-pump project, and its simulation results are different from those of the physical model test, but still similar to those of the horizontal 2D model MIKE21. The results of the FLOW-3D are close to the results of the physical model test, which are more refined and reasonable, and can be applied to the refined numerical simulation of flow patterns in the design and research of similar water conservancy projects.

Key words: sluice-pump hub; plain river network; flow pattern simulation; 3D model; MIKE3; FLOW-3D; Zhaojiagou East Sluice-Pump Project

数值模拟、理论分析和模型试验是推进水力学发展和解决各种工程实际问题的 3 种主要研究方法^[1-2]。随着计算机技术的不断进步,数值模拟计算在工程设计中具有较大的优势和发展空间,然而要使其能够为工程设计提供短周期、高质量的分析设计依据,则需要数值模拟成果具有实用性、可靠性和准确性。

泵闸下泄水流具有明显的三维特性,常规的一维和平面二维模型无法精确模拟其复杂的三维流态,随着工程技术要求的提升,使用三维数值模拟技术研究泵闸流态已逐渐成为主流^[3-6],目前水利工程中常用的三维数值模拟软件有 MIKE3、Delft3D、Fluent 和 FLOW-3D 等,其中 MIKE3 和 Delft3D 为准

三维模拟软件,Fluent 和 FLOW-3D 为仿真三维模拟软件^[7]。

平原河网地区河湖密布,交织成网,通常采取分片控制的治水方针,泵闸作为水利分片治理工程的重要组成部分,主要承担排涝功能,兼顾引水和水资源调度等综合功能^[8-9]。上海市浦东新区是典型的感潮平原河网地区,本文以浦东新区拟建的赵家沟东泵闸工程为研究对象,分别采用准三维 MIKE3 和仿真三维 FLOW-3D 两种三维数值模拟软件,对枢纽下泄水流流态进行数值模拟,并根据已有的平面二维 MIKE21 模拟结果和物理模型试验结果,对两种软件三维水动力数值模拟结果的合理性进行分析比较,以期类似水利工程的设计提供参考。

1 工程概况

拟建的赵家沟东泵闸工程位于上海市浦东新区赵家沟入长江口处,是浦东新区防洪排涝、水资源调度和调节改善内河水质的一个重要口门之一。泵闸主体结构采用“闸+泵+闸”对称布置形式,如图 1 所示,4 台斜式轴流泵设在河道中间,单机设计流量 22.50 m³/s,泵站设计流量 90.00 m³/s;站身长 35.0 m,宽 35.4 m;水闸对称布置在泵站两侧,闸首长 35.0 m,两侧为单孔闸门,净宽 15.0 m,闸门总净宽 30.0 m,闸底板高程-1.0 m(吴淞基面,下同)。泵闸工程主体结构总长 360.0 m,纵向从内到外分别由内河防冲槽、内河海漫段、进水前池及进水池、站身闸首、消力池、外河海漫段及外河防冲槽等组成,内外河海漫段河道底宽分别为 130.0 m 和 80.0 m。

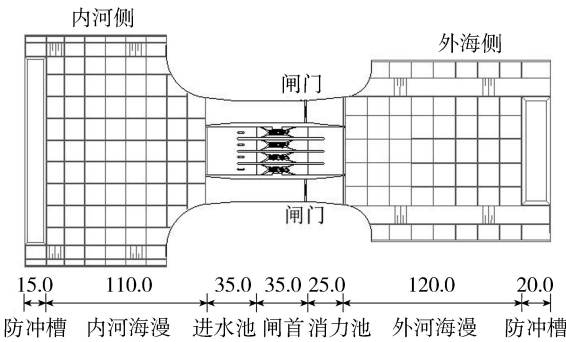


图 1 赵家沟东泵闸工程示意图(单位:m)

2 研究方法

2.1 基本控制方程

MIKE3 和 FLOW-3D 的数学基础都是 Navier-Stokes 方程,不同的是在连续方程和动量守恒方程中,MIKE3 考虑了紊流影响和密度变化,FLOW-3D 加入了面积分数和体积分数参数。

a. MIKE3 Navier-Stokes 方程表达式^[10]为

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = S \tag{1}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial wu}{\partial z} = &fv - g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \\ &\frac{g}{\rho_0 h} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial x} dz - \frac{1}{\rho_0 h} \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) + \\ &F_u + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_t \frac{\partial u}{\partial z} \right) + u_s S \end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial wv}{\partial z} = &-fu - g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \\ &\frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial y} dz - \frac{1}{\rho_0 h} \left(\frac{\partial S_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right) + \\ &F_v + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_t \frac{\partial v}{\partial z} \right) + v_s S \end{aligned} \tag{3}$$

式中: $u、v、w$ 分别为 $x、y、z$ 方向的流速; S 为源(汇)流量; t 为时间; f 为科氏力系数; η 为水位; h 为总水深; $\rho_0、\rho$ 分别为空气和水的密度; p_a 为大气压; g 为重力加速度; $S_{xx}、S_{xy}、S_{yx}、S_{yy}$ 为分散应力张量的分量; $F_u、F_v$ 为水平应力分量; v_t 为垂向涡黏系数; $u_s、v_s$ 分别为 $x、y$ 方向的源(汇)流速分量。

b. FLOW-3D Navier-Stokes 方程表达式^[11]为

$$\frac{\partial}{\partial x}(uS_x) + \frac{\partial}{\partial y}(vS_y) + \frac{\partial}{\partial z}(wS_z) = 0 \tag{4}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_i} \left(uS_x \frac{\partial u}{\partial x} + vS_y \frac{\partial u}{\partial y} + wS_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \\ - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + g_x + f_x \end{aligned} \tag{5}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_i} \left(uS_x \frac{\partial v}{\partial x} + vS_y \frac{\partial v}{\partial y} + wS_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \\ - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + g_y + f_y \end{aligned} \tag{6}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_i} \left(uS_x \frac{\partial w}{\partial x} + vS_y \frac{\partial w}{\partial y} + wS_z \frac{\partial w}{\partial z} \right) = \\ - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + g_z + f_z \end{aligned} \tag{7}$$

式中: $S_x、S_y、S_z$ 分别为 $x、y、z$ 方向的可流动面积分数; V_i 为可流动体积分数; p 为压强; $g_x、g_y、g_z$ 分别为 $x、y、z$ 方向的重力加速度; $f_x、f_y、f_z$ 分别为 $x、y、z$ 方向的黏滞力。

2.2 模型建立

a. MIKE3。采用 MIKE3 Flow Model 建模计算,模型总长约 600 m,宽约 160 m。三维模型在平面上采用三角形与四边形混合网格对泵闸枢纽进行详细刻画,单元格最小边长约 0.5 m;在垂向上采用结构网格,应用 Sigma/ z 值混合网格类型进行设置,在自由表面至-0.6 m 水位之间采用 Sigma 坐标的均匀分层模式分为 5 层,各层沿水深均匀分布,-0.6 m 水位以下采用 z 值绝对坐标的等距分层模式,层距设为 0.4 m。模型平面网格及地形如图 2(a) 所示,泵闸枢纽局部垂向网格划分如图 2(b) 所示。

b. FLOW-3D。采用 BIM 建模方法,应用 Bentley 公司的 MicroStation 软件进行三维建模,模型范围与 MIKE3 相同,导出中间格式文件(.stl),用于仿真数值模拟的前处理阶段,建立的泵闸仿真三维模型如图 3 所示。FLOW-3D 采用结构化正交网格,单元尺寸为 1.0 m×0.5 m×0.4 m。

2.3 计算工况

赵家沟东泵闸工程的主要功能为排涝和引水,最大设计流量分为 285.00 m³/s 和 184.00 m³/s,因此在水闸排涝工况下的流量和流速最大,本文计算工况取水闸排涝工况:过闸流量取最大排涝流量

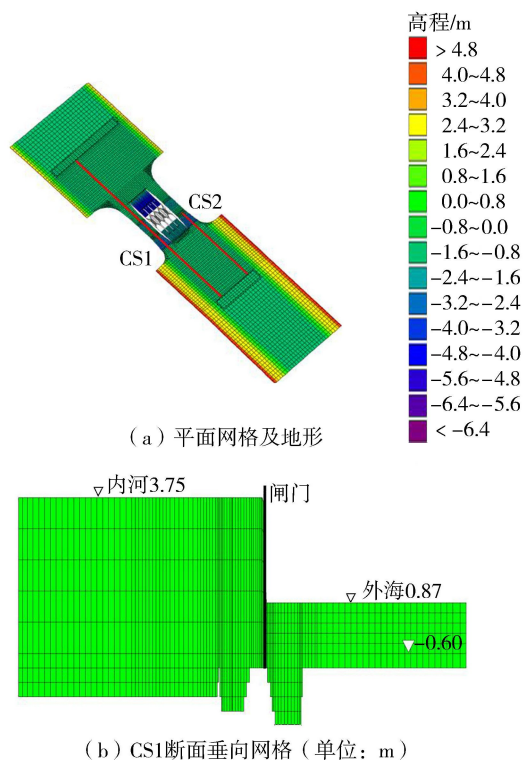


图2 泵闸准三维模型

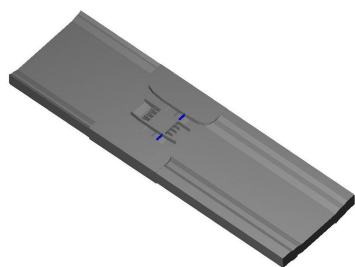


图3 泵闸仿真三维模型

285.00 m³/s,内河水位为最高控制水位 3.75 m,外海潮位为平均低潮位 0.87 m。

3 模拟结果与分析

在赵家沟东泵闸新建工程可行性研究阶段,上海市水利工程设计研究院有限公司采用 MIKE21 对泵闸不同平面布置方案、内河通航水流条件及工程建设影响等进行了模拟论证^[12],同时,上海河口海岸科学研究中心为验证赵家沟东泵闸工程总体布置的合理性进行了水工整体模型试验^[13]。下文根据已有的平面二维 MIKE21 模拟结果和物理模型试验结果,对 MIKE3 和 FLOW-3D 两种软件三维水动力数值模拟结果的合理性进行分析比较。

3.1 总体流态比较

MIKE3 模拟的泵闸枢纽附近流场和流速等值线分布如图 4 所示,两侧闸下水流沿水闸中心线逐渐扩散至整个河道,泵站下游局部范围出现回流区,其流场与 MIKE21 模拟得到的流场^[12]相似。

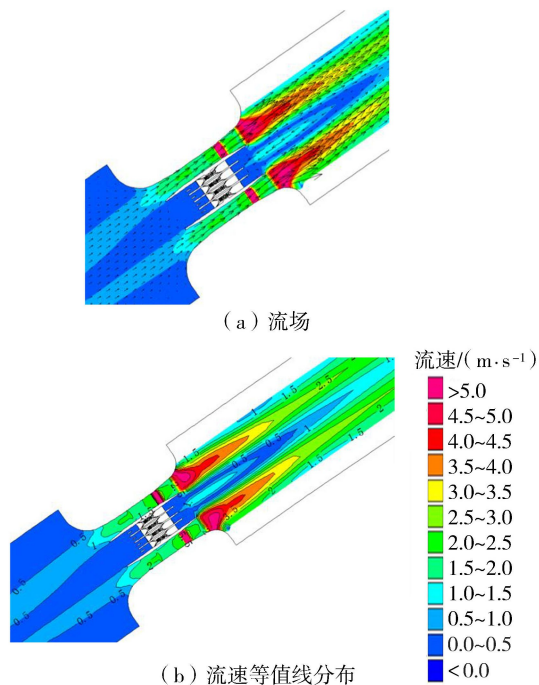


图4 MIKE3 模拟的流场和流速等值线分布

FLOW-3D 模拟的流场如图 5 所示,可以直观地看到水面向下游推进的过程及过程中产生的波纹、沿程水跌水跃、水面的高低变化、回流区的漩涡和涡流场等。当流场达到稳定状态时,两侧闸下水流左右交替,出现涡流场(图 6(a)),这与物理模型试验得到的流场(图 6(b),通过模型中布置的 24 条测流断面,共计 114 个测点取得)相似,在枢纽下游出现一串流速等值线闭合圈,而 MIKE3 未能模拟出这种涡流现象(图 4(b))。

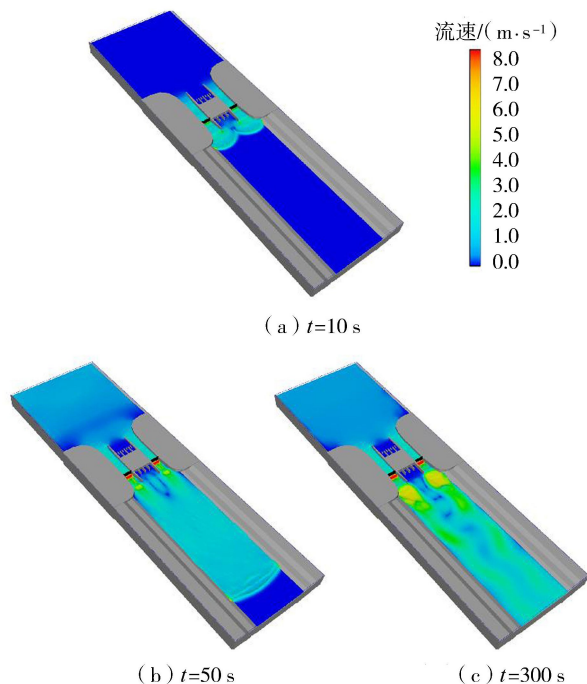


图5 FLOW-3D 模拟的流场

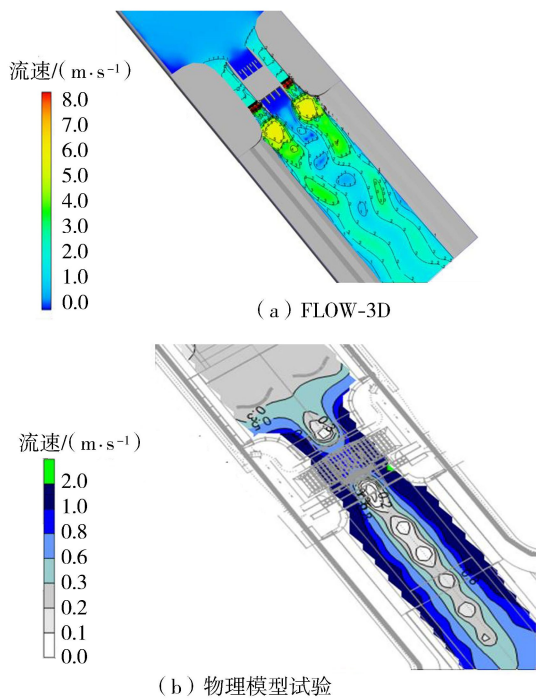


图6 流速等值线分布

3.2 垂线平均流速比较

在闸下布置一条 150 m 长的参考断面(图 2(a) 中 CS2),在参考断面沿程每隔 1 m 取垂线平均流速值,MIKE21、MIKE3 和 FLOW-3D 参考断面沿程垂线平均流速模拟结果如图 7 所示。

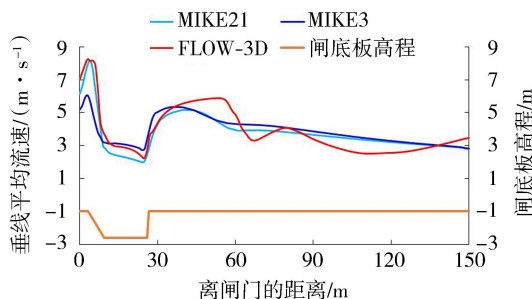


图7 参考断面沿程垂线平均流速比较

从垂线二维平均流速沿程分布形态上看,MIKE21 与 MIKE3 模拟结果分布形态比较接近, FLOW-3D 与 MIKE21、MIKE3 模拟结果在近闸 10 m 内及闸下 40 m 以外差异较明显,距闸 10 ~ 40 m 段分布形态较接近。从流速大小上看,在闸下(距闸约 5 m)出现最大流速,MIKE21、MIKE3、FLOW-3D 模拟得到的最大流速分别约为 8.2 m/s、7.2 m/s 和 8.3 m/s,MIKE21 模拟得到的最大流速与 FLOW-3D 模拟结果接近,MIKE3 模拟结果最小;闸下 10 ~ 40 m, MIKE3 模拟流速最大,MIKE21 模拟流速最小, FLOW-3D 模拟流速介于两者之间;闸下 40 m 以外, MIKE3 模拟流速与 MIKE21 模拟流速逐渐接近, FLOW-3D 模拟流速在 MIKE21 和 MIKE3 模拟流速线上下波动。

3.3 近底流速和断面三维流速比较

图 8 为 MIKE3、FLOW-3D 和物理模型试验参考断面沿程近底流速模拟结果的比较(距底部 20 cm, 物理模型试验仅给出了闸下 0 ~ 70 m 的近底流速值)。

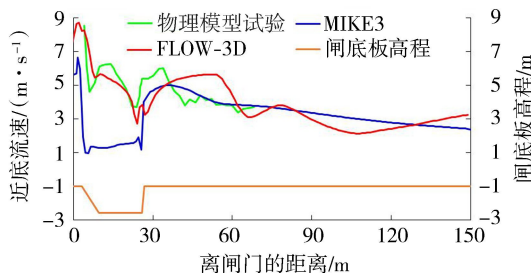


图8 参考断面沿程近底流速比较

MIKE3 模拟的近底流速分布在闸下 0 ~ 30 m 范围,与物理模型试验和 FLOW-3D 模拟结果差别较大,其流速线形态仍与垂线平均流速线分布形态(图 7)相似,闸下 40 ~ 70 m 模拟的流速与物理模型试验结果在数值上较接近,闸下 70 ~ 150 m 模拟的流速与 FLOW-3D 模拟结果在数值上较接近。

FLOW-3D 模拟的近底流速分布在闸下 0 ~ 30 m 范围,流速大小和流速线分布形态与物理模型试验结果较接近。由于数学模型模拟范围和水动力边界条件等与物理模型存在差异,因此闸下 30 ~ 70 m 流速线形态与物理模型试验结果存在差异,需后期进一步率定验证。闸下 70 ~ 150 m FLOW-3D 近底流速模拟结果在 MIKE3 模拟结果线上下波动。

MIKE3 和 FLOW-3D 参考断面三维流速分布模拟结果如图 9 所示,可以直观地看到两者在三维流态模拟上的差异,尤其在闸下 0 ~ 30 m 的消力池内, FLOW-3D 三维流速模拟结果更加精细合理,可以清楚地看到下泄水流在进出消力池时的水跌和水跃过程,而 MIKE3 模拟的流态有些失真。

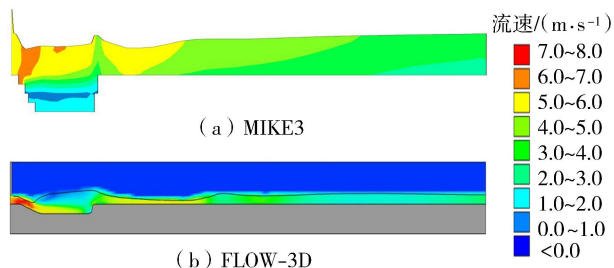


图9 参考断面三维流速分布

4 结 论

a. 从总体流态来看,MIKE3 与 MIKE21 模拟的流态相似,均未能模拟出闸下的涡流场。FLOW-3D 模拟结果更加逼真精细,可以直观地看到水流向下游推进过程中产生的波纹、沿程水跌水跃、水面的高

低变化、回流区的漩涡和涡流场等,模拟的流态与物理模型试验流态接近。

b. 从参考断面垂线平均流速沿程分布来看, MIKE3 与 MIKE21 模拟的沿程分布形态较接近, FLOW-3D 与 MIKE21、MIKE3 在近闸 40 m 以内较接近,距闸 40 m 以外差异较明显。MIKE21 模拟的出闸最大流速与 FLOW-3D 模拟结果接近,MIKE3 模拟结果最小;闸下 10 ~ 40 m, FLOW-3D 模拟流速介于 MIKE3 与 MIKE21 模拟流速之间;闸下 40 m 以外 MIKE3 模拟流速与 MIKE21 模拟流速逐渐接近, FLOW-3D 模拟流速在 MIKE21 和 MIKE3 模拟流速线上下波动。

c. 从参考断面近底流速来看,闸下 0 ~ 30 m 消力池内,MIKE3 模拟的近底流速分布与物理模型试验和 FLOW-3D 模拟结果差别较大,其流速线形态仍与垂线平均流速线分布形态相似。FLOW-3D 模拟的近底流速分布和大小与物理模型试验结果接近。

d. 从参考断面三维流速分布来看,可以直观地看到 MIKE3 和 FLOW-3D 在三维流态模拟上的差异,尤其在闸下 0 ~ 30 m 的消力池内, FLOW-3D 模拟结果更加精细合理,可以直观地看到下泄水流在进出消力池时的水跌和水跃过程,而 MIKE3 模拟的流态有些失真。

e. 在具有明显三维水流特性的泵闸流态模拟中,准三维 MIKE3 无法满足流态精细化模拟的需求,其模拟结果与物理模型试验结果存在差别,而仍与平面二维 MIKE21 模拟结果类似。仿真三维 FLOW-3D 模拟结果与物理模型试验结果接近,更加精细合理,可应用于类似水利工程设计中流态的精细化数值模拟。

参考文献:

[1] 艾海峰. 三维水流数值模拟及其在水利工程中的应用 [D]. 天津:天津大学建筑工程学院,2005.

[2] 丁贤臣. 水闸水力特性三维数值模拟研究及结构优化 [D]. 合肥:合肥工业大学,2015.

[3] 包中进,刘云,王月华. 泄水建筑物三维水流数值模拟技术及应用 [J]. 浙江水利科技,2015,197(1):18-22. (BAO Zhongjin, LIU Yun, WANG Yuehua. Discharge structures three-dimensional flow numerical simulation technology and application [J]. Zhejiang Hyrotechnics, 2015,197(1):18-22. (in Chinese))

[4] 李松阳,尹亚敏,彭尔瑞. 河道水流三维数值模拟研究与发展 [J]. 农业工程,2020,10(5):70-74. (LI Songyang, YIN Yamin, PENG Errui. Research and development of 3D numerical simulation of river flow [J].

Agricultural Engineering, 2020, 10 (5): 70-74. (in Chinese))

[5] 朱浩岩. 基于 BIM 技术的水闸三维建模及消能工设计研究 [D]. 郑州:华北水利水电大学,2020.

[6] 李静,李丹,姜伯乐. 带闸墩溢流坝控泄工况二维与三维数值模拟 [J]. 水利水电科技进展,2011,31(6):10-13. (LI Jing, LI Dan, JIANG Bole. 2D and 3D numerical simulations of controlled discharging conditions of overflow dam with frusta [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2011,31(6):10-13. (in Chinese))

[7] 段亚飞,赵懿珺,纪平,等. 温排水水槽试验与平面二维、准三维及三维数值模拟的比较 [J]. 水力发电学报,2017,36(9):100-110. (DUAN Yafei, ZHAO Yijun, JI Ping, et al. Tank experiment of cooling water discharge and its numerical simulations using 2D, quasi-3D and 3D models [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2017,36(9):100-110. (in Chinese))

[8] 阮仁良. 平原河网地区水资源调度改善水质的机理和实践研究:以上海市水资源引清调度为例 [D]. 上海:华东师范大学,2003.

[9] 陈庆江,丁瑞,赵海. 平原河网区活水畅流对水动力和水质的改善效果 [J]. 水利水电科技进展,2020,40(3):8-13. (CHEN Qingjiang, DING Rui, ZHAO Hai. Improvement effect of hydrodynamics and water quality by flowing water in plain river network area [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(3):8-13. (in Chinese))

[10] 吴新宇,李志威,胡旭跃,等. 弯曲河流颈口裁弯不同阶段水流运动特性 [J]. 水利水电科技进展,2019,39(1):21-27. (WU Xinyu, LI Zhiwei, HU Xuyue, et al. Hydrodynamic characteristics of neck cutoff process of different stages in a meandering river [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39(1):21-27. (in Chinese))

[11] 王文森,程永舟,王小明,等. 梯形透水潜坝附近水面线及透水率 [J]. 水利水电科技进展,2019,39(2):66-71. (WANG Wensen, CHENG Yongzhou, WANG Xiaoming, et al. Water surface profile and permeable rate near a trapezoidal permeable submerged dam [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39(2):66-71. (in Chinese))

[12] 陆倩,崔冬,田利勇,等. 平原河网地区泵闸合建枢纽布置形式 [J]. 水利水电科技进展,2019,39(3):62-67. (LU Qian, CUI Dong, TIAN Liyong, et al. Arrangement types of a combined sluice-pump hub in plain river network region [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019,39(3):62-67. (in Chinese))

[13] 郭文华,刘猛. 赵家沟东泵闸工程水工整体模型试验研究报告 [R]. 上海:上海河口海岸科学研究中心,2019.

(收稿日期:2021 - 03 - 04 编辑:熊水斌)