

刘老涧新闻闸流动特性分析

高 健¹, 施 翔², 杜 亮², 陈晓峰¹, 蔡 建¹, 王 波³, 臧 伟⁴

(1. 宿迁市水务勘测设计研究有限公司, 江苏 宿迁 223800;

2. 江苏省骆运水利工程管理处, 江苏 宿迁 223800;

3. 河南省水利勘测设计研究有限公司四川分公司, 四川 成都 610091;

4. 河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要:以刘老涧新闻为研究对象, 基于 Navier-Stokes 方程和 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型对多孔闸室及上下游连接段内的三维湍流流动进行了数值模拟分析, 对比了不同工况下各典型截面的速度矢量及流线分布, 引入漩涡面积比对不同典型截面的流态分布进行了定量分析。结果表明: 校核工况下多孔闸门及上下游连接段内水流的整体流速均大于设计工况, 最大流速位于校核工况下闸门的底部截面, 为 9.3 m/s; 校核工况下不同截面位置的漩涡面积比均大于设计工况, 设计工况下漩涡面积比最大为 18.85%, 位于顶部截面, 校核工况下漩涡面积比最大为 21.18%, 位于底部截面。

关键词:多孔闸门; 三维流场; 流态; 数值模拟

中图分类号: TV663

文献标识码: B

文章编号: 1007-7839(2024)02-0033-0005

Analysis of flow characteristics of Liu Laojian New Gate

GAO Jian¹, SHI Xiang², DU Liang², CHEN Xiaofeng¹, CAI Jian¹,
WANG Bo³, ZANG Wei⁴

(1. Suqian Water Affairs Survey, Design and Research Co., Ltd., Suqian 223800, China;

2. Luoyun Hydraulic Project Management Division of Jiangsu Province, Suqian 223800, China;

3. Sichuan Branch of Henan Water and Power Engineering Consulting Co., Ltd., Chengdu 610091, China;

4. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: This article takes the Liu Laojian New Gate as the research object, based on the Navier-Stokes equation and RNG $k-\varepsilon$ turbulence model, the numerical simulation analysis of three-dimensional turbulent flow in a porous gate chamber and upstream and downstream connecting sections was carried out. The velocity vector and streamline distribution of each typical section were compared under different operating conditions, and the flow pattern distribution of different typical sections was quantitatively analyzed by introducing vortex area ratio. The results show that the overall flow velocity of the porous gate and the upstream and downstream connection sections under the verification condition is greater than the design condition, and the maximum flow velocity is located at the

收稿日期: 2023-10-25

作者简介: 高健(1979—), 男, 高级工程师, 主要从事水利工程设计。E-mail: 320113328@qq.com

通信作者: 臧伟(1993—), 男, 博士, 主要从事流体机械及工程方向研究工作。E-mail: zw_nj@hotmail.com

bottom section of the gate under the verification condition, which is 9.3 m/s. The vortex area ratio at different cross-sectional positions under the verification condition is greater than the design condition. The maximum vortex area ratio under the design condition is 18.85%, located at the top section. While the maximum vortex area ratio under the verification condition is 21.18%, located at the bottom section.

Key words: porous gate; three-dimensional flow field; flow pattern; numerical simulation

闸门主要布置于水工建筑物的进出口位置,通过控制闸门的开启度可对流量和水位进行有效的调节,因此闸门在泄水、防洪、灌溉、排水、航运及发电等方面起到了重要的作用^[1-2]。可以打开全部闸门或部分闸门孔来调节上下游水位和流量,合理选择闸门开启方式不仅可以提供更好的水流流态,同时也是保障水工结构安全运行的关键所在。

针对闸门附近水流三维流态的研究主要分为数值模拟及模型试验,模型试验需花费较高的时间成本及资金成本,同时试验条件及测量精度等客观因素也会对试验结果造成一定的影响。得益于现代技术的飞速发展,CFD数值模拟成为国内外学者常用的研究手段。邵园园等^[3]基于VOF方法对某水利枢纽多道闸门进行数值模拟,揭示了闸门附近的水流与压力分布规律。刘昉等^[4]采用RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型结合VOF方法探究了不同底缘形式下闸门的水动力特性,发现后倾角呈45°时闸底的水流脉动最小。管光华等^[5]通过建立数学模型探讨了闸门在非恒定流工况下适配的过闸流量关系,并和传统公式平均率定误差进行对比,发现该数学模型能有效降低误差。邱春等^[6]采用三维动态数值模拟方法探究了弧形闸门开启过程中的非恒定流流量系数特点,给出了弧形闸门不同开启速度下过渡式及非恒定式水流的流量系数之间的经验公式。

目前针对闸门的三维流态研究大多集中于弧形闸门及平板闸门^[7-8],然而对多孔闸门的研究却略显不足。由于大中型水利枢纽常采用多孔闸门进行流量调节,因此针对多孔闸门的三维流态进行研究显得尤为必要。本文以刘老涧新闸为研究对象,采用ANSYS Fluent软件对多孔闸门三维流态进行数值模拟以揭示不同工况下的流态分布特性。

1 几何模型及网格划分

本文以刘老涧新闸为研究对象,为充分研究流经闸门的水流流态,将闸门上游连接段、闸室段及下游连接段作为整体进行研究,采用Solidworks建立1:1物理模型,如图1所示,计算区域上下游长度

分别为55 m和105 m,宽度分别为38 m和44 m,中间闸室段共计3道闸门。

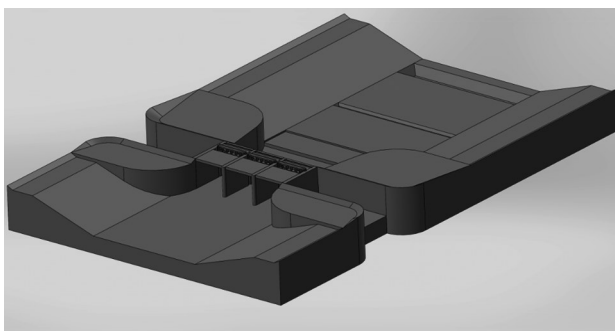


图1 刘老涧新闸三维几何模型

2 湍流模型及边界条件设置

采用基于有限体积法的商业软件ANSYS Fluent来模拟流体域内的三维不可压缩的湍流运动,采用雷诺时均N-S方程求解湍流流场,采用RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型对方程进行封闭。

流体域内部的流动可近似认为是不可压缩的三维黏性湍流,其流动遵循质量守恒定律、动量守恒定律及能量守恒定律,由于流体为常温液态水,因此并不需要考虑流体之间的热量交换,流体的流动可以通过连续性方程和动量方程来进行描述:

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

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

式中: ρ 为流体密度; t 为时间; u 为速度; x 为空间坐标; p 为压强; μ 为流体运动黏性系数; S 为外部源项; i, j 为坐标轴方向。

入口采用速度入口边界条件;出口采用压力出口边界条件;自由液面基于刚盖假定,采用对称面代替滑移边界条件;壁面边界条件设置为无滑移边界条件。为分析不同工况下水闸闸室及上下游连接段的流态分布,选取设计工况和校核工况两种典

型工况进行对比分析,其中设计工况和校核工况的具体参数如表1所示。

网格质量对计算结果的准确性具有较大的影响,如图2所示,采用ANSYS ICEM对计算区域进行

表1 计算工况

工况	上游水位/m	下游水位/m	上下游水位差/m	闸门相对开度	闸门开启高度/m	入口流量/(m ³ /s)
设计工况	19.5	16.0	3.5	0.58	3.5	400
校核工况	20.0	14.8	5.2	0.38	2.3	500

以六面体为主,三棱柱为辅的网格划分,流体域部分的网格数为674 422,最低网格正交质量为0.263,满足RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型对网格质量的要求^[9]。

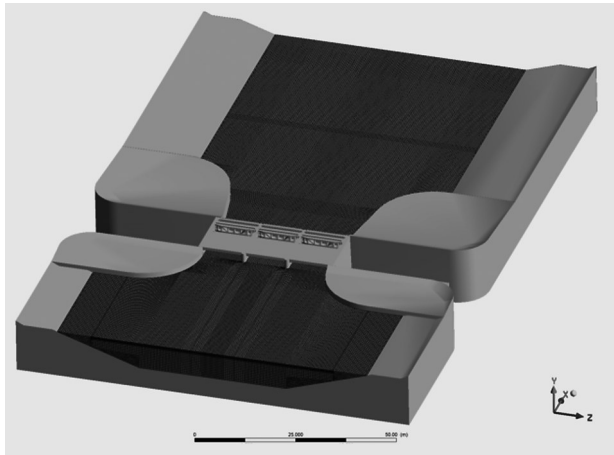
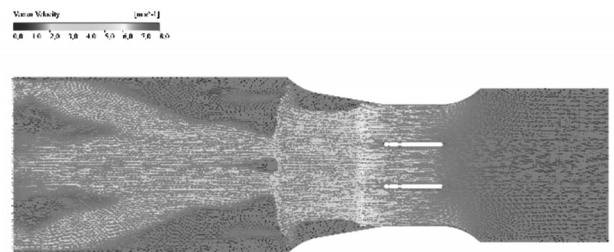


图2 流体域网格及固体结构

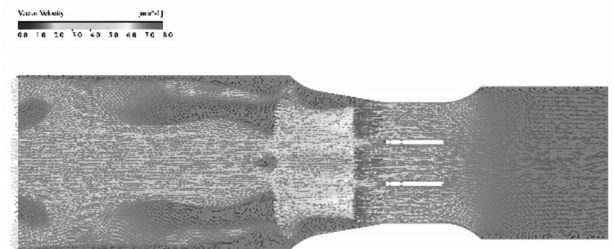
3 结果与讨论

为分析不同工况下流体域在不同位置处的速度矢量分布,分别选取底部截面、中部截面及顶部截面进行分析(以闸门底板高程为0点,底部截面、中部截面、顶部截面高程分别为0 m、1.25 m及2.5 m),分别如图3~5所示。

由图3~5可知,水流整体的流速由入口至出口呈现先增大后减小、随后再增大再减小的趋势,最大流速位于校核工况下闸门出口的底部截面。水流通过闸室继续向下游流动的过程中,由于通过闸室流道段后水道变宽,导致水流流速减小。因校核工况下的来流流量明显大于设计工况,水流在流经闸门进入下游消力池的过程中,受闸门开度的影响,水流在闸门下方流速相较于设计工况明显增大,底层的高速水流在流动过程中与中上部水流之间的相互作用使得校核工况下水流的整体流速均大于设计工况。

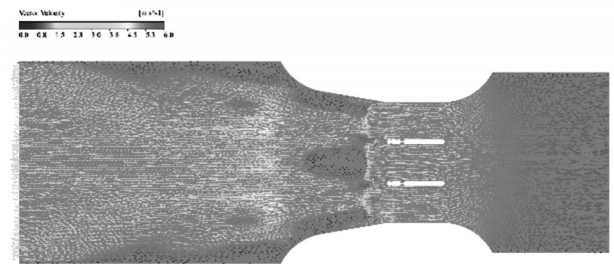


(a) 设计工况

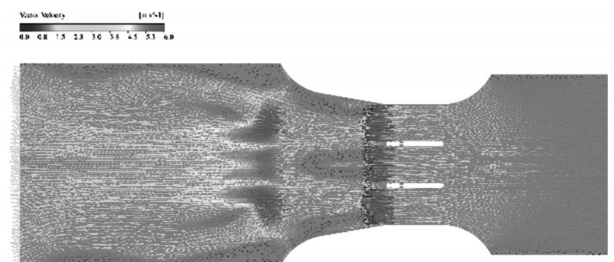


(b) 校核工况

图3 不同工况下底部截面速度矢量分布



(a) 设计工况



(b) 校核工况

图4 不同工况下中部截面速度矢量分布

图6为设计工况下不同截面的水流流态分布。由图6可知闸门底部流速最大,为6.77 m/s,底部截

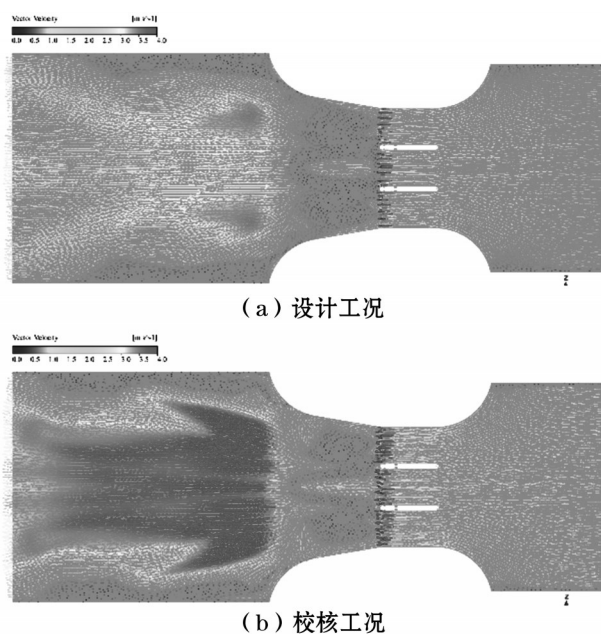


图5 不同工况下底部截面速度矢量分布

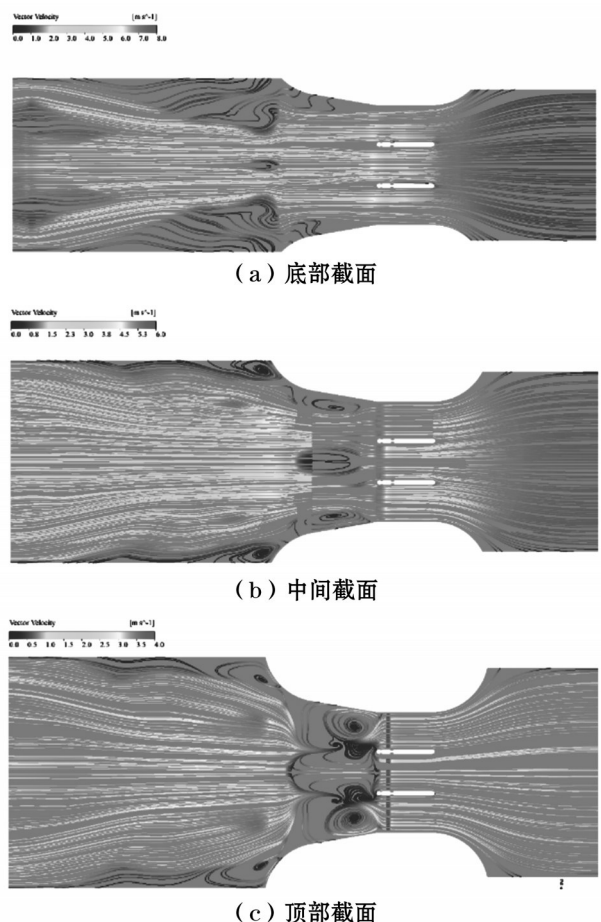


图6 设计工况下各截面流线分布

面在闸门下游外侧存在少量漩涡,中间截面的漩涡主要分布于闸室及下游靠边墙侧,顶部截面的漩涡

主要分布于闸室及下游边墙外侧护坡处。

图7为校核工况下个截面的三维流线分布,通过对比图6可知,校核工况下闸门前后区域的流速明显高于设计工况,最大流线速度位于底部截面,最大值为9.3 m/s。相较于设计工况,校核工况下底部截面仅在闸门下游的外侧边墙处存在少量漩涡,中部截面及顶部截面的漩涡明显增多。

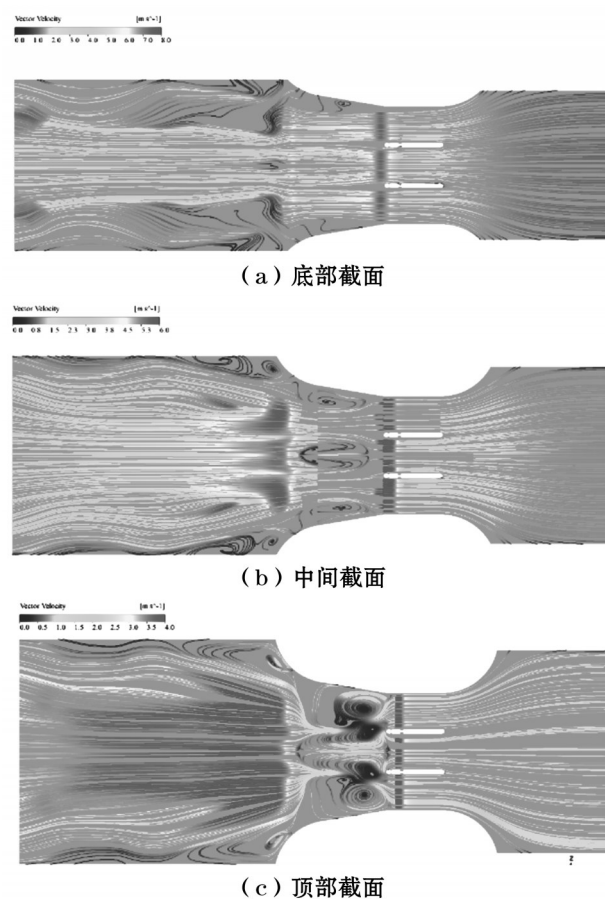


图7 校核工况下各截面流线分布

为定量分析不同工况下的漩涡面积,引入漩涡面积比 w 对不同工况下各截面的漩涡进行对比分析,其计算式如下所示:

$$w = \frac{S_w}{S_f} \times 100\% \quad (3)$$

式中: S_w 为漩涡面积, m^2 ; S_f 为流体域不同截面的面积, m^2 。

表2为不同流量工况下的漩涡面积比。由表2可知,校核工况下不同截面位置的漩涡面积比均大于设计工况,不同工况下底部截面和顶部截面的漩涡面积比最大,设计工况下顶部截面的漩涡面积比最大,为18.85%,校核工况下底部截面的漩涡面积比最大,为21.18%,表明校核工况下水闸及上下游

表2 不同工况下的漩涡面积比

截面位置	工况	漩涡面积比/%
底部截面	设计工况	18.31
	校核工况	21.18
中部截面	设计工况	9.90
	校核工况	10.42
顶部截面	设计工况	18.85
	校核工况	20.11

的流态相较于设计工况更加混乱。

4 结 语

闸门开度对水流的流态具有重要影响,本文以刘老涧新闸为研究对象,采用数值模拟方法对不同工况下闸室及上下游连接段的流动特性进行分析,得到的主要结论如下:

(1)针对设计工况和校核工况下闸室及上下游连接段的水流流态进行了分析,对比了不同流量工况下不同典型截面上的速度矢量及流线分布,发现校核工况下的整体流速均大于设计工况,最大流速位于校核工况下的底部截面,为9.3 m/s。

(2)校核工况下闸室及上下游连接段内的流态相较于设计工况更加混乱,校核工况下不同截面位置的漩涡面积比均大于设计工况,设计工况下顶部截面的漩涡面积比最大,为18.85%,校核工况下底部截面的漩涡面积比最大,为21.18%。

参考文献:

[1] 袁尧,李忠斌,许旭东,等. 基于流固耦合的立轴旋转钢

闸门的应力应变分析[J]. 江苏水利,2021(7):5-9.

[2] 熊涛,杨雄,刘泽,等. 抽水蓄能机组不锈钢过流表面无氟疏水改性及其阻垢性能[J]. 排灌机械工程学报,2022,40(1):43-48.

[3] 邵园园,薛海朋,薛铮,等. 平板闸门闭门过程水流流态数值模拟研究[J]. 水电与抽水蓄能,2023,9(1):14-18.

[4] 刘昉,赵梦丽,冷东升,等. 不同底缘形式的平板闸门水力特性数值模拟[J]. 水利水电科技进展,2017,37(5):46-50,77.

[5] 管光华,殷心盼,陈刚,等. 隧洞明满流边界下滇中引水工程闸门过流特性[J]. 农业工程学报,2022,38(7):91-99.

[6] 邱春,刘承兰. 弧形闸门开启过程非恒定流流量系数研究[J]. 人民黄河,2015,37(6):82-85,90.

[7] 张亮,徐强,严根华,等. 大型液压启闭下卧式弧形闸门的流激振动及抗振优化研究[J]. 水利与建筑工程学报,2023,21(2):13-19,67.

[8] 胡明宇,王文娥,胡笑涛,等. U形渠道平板闸门过流能力试验研究[J]. 灌溉排水学报,2023,42(4):116-122.

[9] 王福军,唐学林,陈鑫,等. 泵站内部流动分析方法研究进展[J]. 水利学报,2018,49(1):47-61,71.