



枢纽船闸引航道口门区 三维水流结构和减淤措施*

刘俊涛, 吕彪, 邢岩, 李少希

(交通运输部天津水运工程科学研究所, 港口水工建筑技术国家工程实验室,
工程泥沙交通行业重点实验室, 天津, 300456)

摘要: 由于枢纽船闸引航道口门区特殊的水流结构, 口门区泥沙淤积问题是影响河流船闸正常运行的一个重要问题。针对枢纽船闸引航道口门区三维水流的结构特点, 开发了可高效高精度模拟该区域水流结构的完全三维非静压数学模型, 对其水流结构特征进行了分析和研究, 从消除回流和归顺口门区航行水流的角度, 提出了可有效减缓引航道口门区泥沙淤积问题的工程措施, 为枢纽通航运能提升和船舶安全高效运营提供技术支撑。

关键词: 三维模型; 船闸; 口门区; 水流结构; 泥沙淤积

中图分类号: U 612.32

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)07-0126-06

3D flow structure in entrance area of ship lock approach channel and sediment reduction measures

LIU Jun-tao, LYU Biao, XING Yan, LI Shao-xi

(National Engineering Laboratory for Port Hydraulic Construction Technology, Key Laboratory of Engineering Sediment,
Ministry of Transport, Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, Tianjin 300456, China)

Abstract: Because of the special flow structure in the entrance area of the approach channel of the hub ship lock, the sediment deposition in the entrance area is still an important problem affecting the normal operation of the river ship lock. According to the structural characteristics of the three-dimensional flow in the entrance area of the approach channel of the hub ship lock, a complete three-dimensional non hydrostatic mathematical model which can simulate the flow structure in this area with high efficiency and high precision is developed. The characteristics of its flow structure are analyzed and studied. From the perspective of eliminating the backflow and the navigation flow in the return gate area, the engineering measures that can effectively slow down the sediment deposition in the gate area of the approach channel are put forward, so as to provide technical support for the improvement of the navigation energy of the hub and the safe and efficient operation of ships.

Keywords: 3D numerical model; ship lock; entrance; flow structure; sediment accumulation

2005 年底, 沙颍河周口以下复航工程完成后, 标志着中断 30 a 的沙颍河航道正式恢复通航, 船舶可以由周口直达华东地区, 成为河南省第一条通江达海的水上通道, 尤其 2009 年安徽耿楼枢纽建成后, 沙颍河较高等级航道可全年通航。沙颍河多年平均含沙量为 1.57 kg/m^3 , 为中等含沙量

的平原冲积性河流, 郑埠口船闸口门区处于回流和缓流区。郑埠口枢纽运用期间, 引航道、口门区都发生了大量的泥沙淤积, 泥沙淤积以后, 即便采取疏挖措施, 也还会发生回淤, 既浪费了大量的人力物力, 也影响了沙颍河全线复航工程后航道效益的发挥。

收稿日期: 2021-11-29

*基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFE0121000); 贵州省科技重大专项(黔科合重大专项字[2018]3010)

作者简介: 刘俊涛(1976—), 男, 硕士, 副研究员, 从事枢纽通航、航道整治等研究工作。

研究通航建筑物引航道口门区水流和泥沙运动的主要工程技术手段为物理模型试验^[1-6]和数值模拟试验研究^[7-8]。物理模型具有合理、可靠、直观和安全等特点, 该手段目前已被广泛应用于具体工程的研究之中。与物理模型相比较, 数学模型有着周期短、运转快、消耗低等系列优点, 因此在实际工程问题中得到越来越广泛的应用。按照水流物理量运动变化的维数可将数学模型分为一维、二维和三维, 其中一、二维数学模型无法反映出速度、流态沿水深的变化。早期由于计算机计算能力的限制, 应用于工程的三维模型是基于 Navier-Stokes 方程开发的三维静压数学模型, 通航建筑物引航道口门区经常需要布设特殊的导流整治结构, 静水压强假设往往会带来一定的误差, 需要三维精细化数学模型开展此类问题研究。

本文基于 Navier-Stokes 方程, 建立了完全三维非静水压力水波流动数学模型, 并采用非恒定明渠流动算例对所建立的模型进行了验证。基于此开展郑埠口航运枢纽下游引航道口门区三维水流结构研究, 揭示了船闸口门区的三维流态, 从削弱口门区回流、归顺口门区航行水流条件以实现减淤目的出发, 研究并提出了减缓沙颍河郑埠口枢纽船闸下游引航道口门区泥沙淤积的工程措施。

1 三维完全非静压数学模型的建立与验证

1.1 模型建立

在笛卡尔坐标系下, 三维不可压缩 Navier-Stokes 方程可以表示为:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \nabla \cdot (uu) = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\gamma^H \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\gamma^H \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\gamma^V \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \nabla \cdot (uv) = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{\partial q}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\gamma^H \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\gamma^H \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\gamma^V \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \nabla \cdot (uw) = -\frac{\partial q}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\gamma^H \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\gamma^H \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\gamma^V \frac{\partial w}{\partial z} \right) \quad (3)$$

式中: η 为水位; \mathbf{u} 为速度矢量, 沿 x 、 y 、 z 方向的流速分量为 u 、 v 、 w ; g 为重力加速度; q 为非静水压力; γ^H 、 γ^V 为水平和垂直方向的涡黏系数。

沿水深方向积分连续方程(1), 并利用自由表面和河底运动学边界条件 $w = \frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} + v \frac{\partial \eta}{\partial y}$ 和 $w = -u \frac{\partial(h)}{\partial x} - v \frac{\partial(h)}{\partial y}$, 可得水位演化方程:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{\eta} u dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{-h}^{\eta} v dz = 0 \quad (4)$$

标准 $k-\varepsilon$ 两方程紊流模型可以表示为

$$\frac{Dk}{Dt} - \nabla \cdot \left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} \nabla k \right) = c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} G - \varepsilon \quad (5)$$

$$\frac{D\varepsilon}{Dt} - \nabla \cdot \left(\frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \nabla \varepsilon \right) = c_1 \frac{\varepsilon}{k} G - c_2 \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (6)$$

式中: k 为紊动动能; ε 为紊动耗散率; $c_1 = 1.44$; $c_2 = 1.92$; $c_\mu = 0.09$; $\sigma_k = 1.0$; $\sigma_\varepsilon = 1.3$; G 为湍动能的产生项。

在开边界采用 Dirichlet 边界条件或 Neumann 边界条件, 在固壁边界采用有滑移无穿透边界条件, 具体边界条件见文献[9]。

三维计算域平面上采用 Delaunay 三角化网格剖分技术, 平面采用正交的三角形或凸多边形或三角形和凸多边形联合离散, 水深方向采用分层离散, 因此, 实际三维计算域剖分为棱柱形单元, 模型的矢量(流速)定义在棱柱形单元表面“中心”、标量(非静压、紊动动能和紊动耗散率)定义在棱柱形单元表面的“中心”, 见文献[9]。

首先在垂直层上对控制方程(1)~(3)进行积分, 得到基于垂直边界拟合坐标系的半离散化方程, 然后采用半隐式分步法分两个主要步骤求解方程。第一步, 通过求解包含前一时间水平的非静水压力的动量方程来获得中间速度场; 第二步, 压力校正由离散泊松方程计算, 该方程由离散连续性和离散动量方程组合而成。然后, 通过压力校正, 产生无发散速度场, 对中间速度进行校正。动量方程和水位演化方程的具体离散求解见文献[9-10]。

此外, 采用有限体积法离散标准 $k-\varepsilon$ 方程, 紊动动能方程离散有:

$$\frac{\Delta Z_{i,k}^{n+1} k_{i,k}^{n+1} - \Delta Z_{i,k}^n k_{i,k}^n}{\Delta t} = I(k_{i,k}^n) - \frac{1}{P_i} \sum_j^{N_s} [\theta u_{j,k}^{n+1} + (1 - \theta) u_{j,k}^n] k_{j,k}^n \Delta Z_{j,k}^{nw} N_j l_j - \theta (w_{i,k+1}^{n+1} k_{i,k+1/2}^{n+1} - w_{i,k}^{n+1} k_{i,k-1/2}^{n+1}) -$$
$$(1 - \theta) (w_{i,k+1}^n k_{i,k+1/2}^n - w_{i,k}^n k_{i,k-1/2}^n) + \theta D_k k_{i,k}^{n+1} + (1 - \theta) D_k k_{i,k}^n + \Delta Z_{i,k}^n \left[c_\mu \frac{(k_{i,k}^n)^2}{\varepsilon_{i,k}^n} G_{i,k}^n - \varepsilon_{i,k}^n \frac{k_{i,k}^{n+1}}{k_{i,k}^n} \right] \tag{7}$$

紊动能耗散率方程离散有：

$$\frac{\Delta \varepsilon_{i,k}^{n+1} \varepsilon_{i,k}^{n+1} - \Delta \varepsilon_{i,k}^n \varepsilon_{i,k}^n}{\Delta t} = J(\varepsilon_{i,k}^n) - \frac{1}{P_i} \sum_j^{N_s} [\theta u_{j,k}^{n+1} + (1 - \theta) u_{j,k}^n] \varepsilon_{j,k}^n \Delta Z_{j,k}^{nw} N_j l_j - \theta (w_{i,k+1}^{n+1} \varepsilon_{i,k+1/2}^{n+1} - w_{i,k}^{n+1} \varepsilon_{i,k-1/2}^{n+1}) -$$
$$(1 - \theta) (w_{i,k+1}^n \varepsilon_{i,k+1/2}^n - w_{i,k}^n \varepsilon_{i,k-1/2}^n) + \theta D_\varepsilon \varepsilon_{i,k}^{n+1} + (1 - \theta) D_\varepsilon \varepsilon_{i,k}^n + \Delta Z_{i,k}^n \left(c_1 \frac{\varepsilon_{i,k}^n}{k_{i,k}^n} G_{i,k}^n - c_2 \frac{\varepsilon_{i,k}^n}{k_{i,k}^n} \varepsilon_{i,k}^{n+1} \right) \tag{8}$$

式中： D_k 、 D_ε 为垂向紊动动能和紊动耗散率扩散项离散算子； $I(k_{i,k})$ 、 $J(\varepsilon_{i,k})$ 为紊动动能和紊动耗散率水平扩散项离散算子，本文采用 Adams-Bashforth 离散算子求解，见文献[9-10]。

1.2 模型验证

本文采用非恒定明渠流动算例验证所建立的三维模型。渠道的尺寸见图 1，渠道长度为 18 m、宽为 0.6 m。渠底当量粗糙度为 $k_s=0.0058\text{ m}$ 。右侧 outlets 控制水深为 0.13 m。水平面由 23 368 个单元覆盖，垂向共分 5 层。时间步长取为 0.01 s。左侧入口流量按下式取值：

$$Q = \begin{cases} 0.04 & (t \leq 300\text{ s}) \\ 0.000\ 8(t - 300) & (300\text{ s} < t \leq 450\text{ s}) \\ 0.000\ 8(600 - t) & (450\text{ s} < t \leq 600\text{ s}) \\ 0.04 & (t > 600\text{ s}) \end{cases} \tag{9}$$

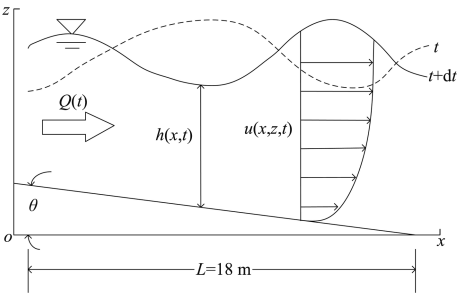
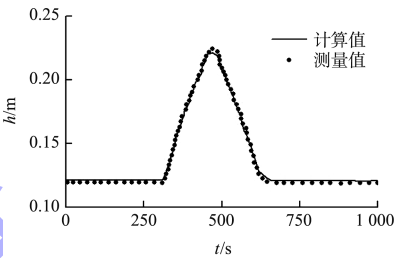
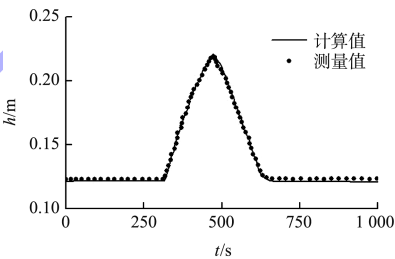


图 1 非恒定明渠的尺寸

图 2 为水深在测点 $x=10.78\text{ m}$ 和 $x=14.08\text{ m}$ 处随时间变化的计算值与测量值的比较，图 3~6 分别为 $x=10.78\text{ m}$ 和 $x=14.08\text{ m}$ 处 $t=700\text{ s}$ 时的 x 方向的流速、紊动动能、紊动耗散率及涡黏系数数学模型计算值与测量值的比较。从图中可以看出计算结果均与测量值吻合得较好，总的来说，非静压的计算结果比静压计算结果与测量值吻合得好。

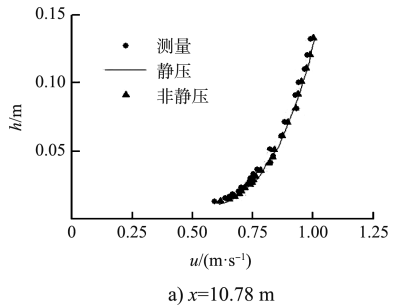


a) $x=10.78\text{ m}$

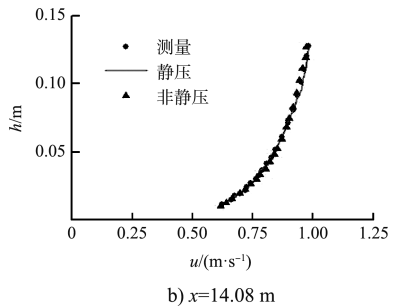


b) $x=14.08\text{ m}$

图 2 计算水深与测量值的比较



a) $x=10.78\text{ m}$



b) $x=14.08\text{ m}$

图 3 x 方向的计算流速与测量值的比较

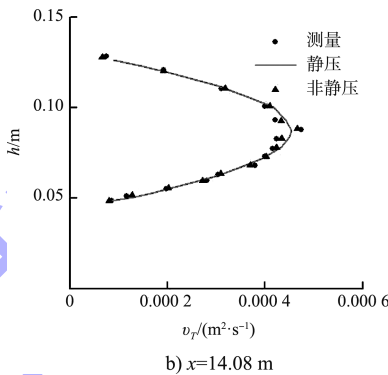
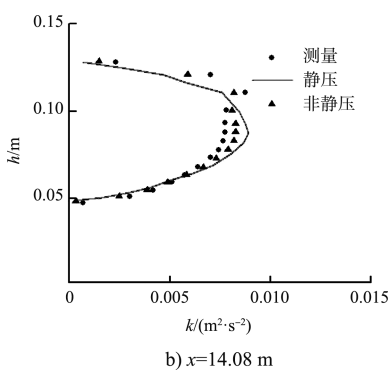
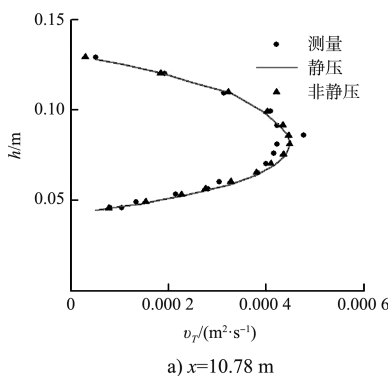
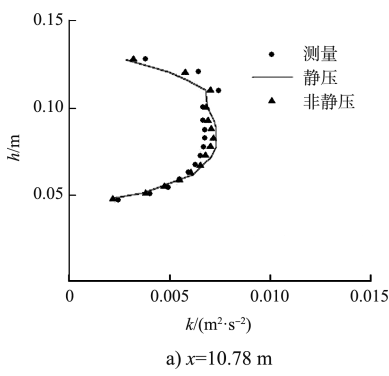


图 4 紊动动能计算值与测量值的比较

图 6 涡黏系数计算值与测量值的比较

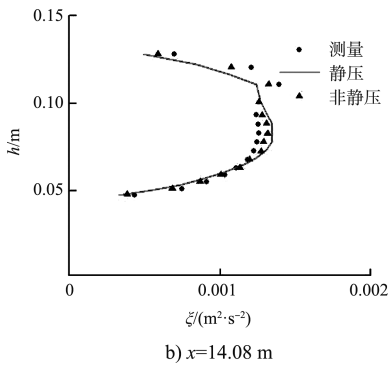
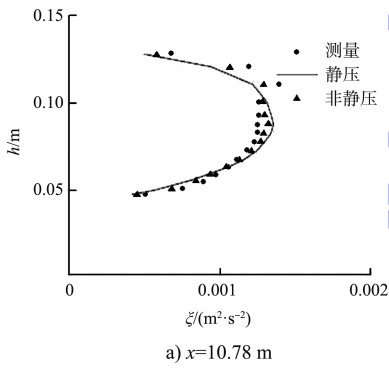


图 5 紊动耗散率计算值与测量值的比较

2 郑埠口船闸下游引航道口门区水流结构和减淤措施

2.1 模型参数选择

模型上起闸门处、下至导航墙堤头下游 1.5 km 处, 模拟河段全长约 2 km, 模型范围见图 7。模型平面采用四边形网格、垂向采用分层网格, 为保证研究区域计算精度, 网格最小尺度为 2 m, 其它区域通过逐渐过渡方式加大网格尺寸, 最大网格尺寸 10 m。整个平面范围内网格节点 39 690 个、单元 39 160 个、垂向分为 5 层。模型的糙率参考沙颍河郑埠口水利枢纽水工模型试验研究, 取为 0.022 5。

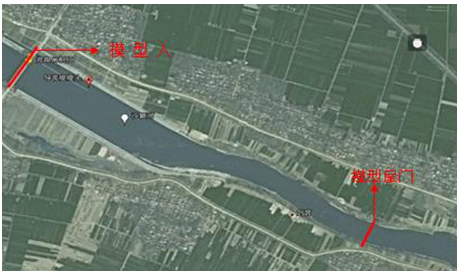


图 7 数学模型范围

2.2 回流尺度特征分析

口门区河段受枢纽泄水建筑物和导流分水建筑物影响,过流断面突扩,随枢纽泄流变化,水流流线弯曲程度有所不同,常伴回流这一特殊水流结构产生,回流长度与强度也随枢纽下泄流量不同而有所不同。为充分认识不同枢纽下泄流量下船闸下游引航道及口门区的水流结构,分别开展了 465、627、1 193、1 567、2 000 m³/s 流量下引航道及口门区的水流结构计算分析。

为了分析回流长度和强度沿水深方向的变化特征,给出不同流量下底面、0.6 层、表面回流长度和最大流速计算结果,见表 1。结果表明:1)不同流量下,枢纽下游引航道及口门区均有回流产生,回流结构随枢纽下泄流量和沿水深方向呈现不同的特征。2)回流长度和回流流速沿水深方向变化特征:在某一流量下,回流长度和回流流速沿水深增大而减小,底面回流长度和回流流速最小,表面回流长度和回流流速最大,回流长度在 146.6~194.3 m,最大回流流速在 0.54~1.30 m/s。3)回流长度和回流流速随流量变化特征:随着枢纽下泄流量增大,回流长度和流速呈现明显增大趋势,表面回流长度在 164.7~194.3 m,最大回流流速在 0.65~1.30 m/s。4)相关研究结果表明:枢纽船闸的引航道口门区回流长度与压缩比、水深、流速、糙率、佛氏数及断面形态等因素有关,通过统计有关枢纽工程的引航道口门宽 B 和回流长度 L ,得到 $L=4.6B$ 和 $L=12B-300$ 的关系式,从本枢纽船闸工程计算中,得出引航道口门区的回流长度和引航道口门宽 $L=(4.5\sim 5.5)B$ 的关系式,与前期相关研究结论是一致的。

表 1 回流长度、最大流速计算

位置	流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	回流区 长度/m	最大流速/ (m·s ⁻¹)
口门区底面	465	146.6	0.54
	627	156.9	0.62
	1 193	172.2	0.91
	1 567	182.1	1.04
	2 000	185.1	1.20

续表 1

位置	流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	回流区 长度/m	最大流速/ (m·s ⁻¹)
口门区 0.6 层	465	156.7	0.62
	627	167.1	0.68
	1 193	176.6	0.97
	1 567	185.7	1.10
	2 000	189.7	1.26
口门区表面	465	164.7	0.65
	627	170.1	0.71
	1 193	180.3	1.01
	1 567	189.9	1.13
	2 000	194.3	1.30

2.3 船闸下游引航道口门区及连接段减淤措施研究

郑埠口枢纽运行后现场踏勘及地形观测表明:郑埠口船闸下游口门区及连接段航道内出现累积性泥沙淤积,泥沙淤积范围位于下引航道导航墙末端上游 50 m 至导航墙末端下游 150 m 区间内,其中 2006—2010 年泥沙淤积高度达 1 m 左右,即使进行清淤后,仍会发生恢复性淤积。通过分析上述船闸下游引航道及口门区回流特征可知,船闸下游口门区及连接段航道内出现累积性泥沙淤积范围与回流区位置较为一致,可知回流是产生累积性泥沙淤积的主要动力因素。为了消弱回流、进一步减少或防止船闸下游口门区及连接段航道内的泥沙淤积,本文在导墙尾部布置 3 种导流方案归顺口门区水流和控制口门区回流,以期改善船闸导堤出口处水流条件和减少泥沙淤积,导流方案平面布置见图 8。

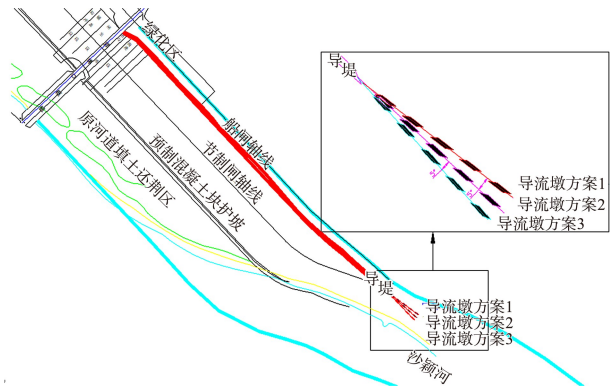


图 8 导流墩方案平面布置

表 2 为不同方案下表面和 0.6 层流速特征, 图 9 为 465、2 000 m³/s 流量下方案 1 表面流场。由图 9、表 2 可知: 1) 本文提出的 3 种导流方案均能有效消除引航道及口门区的回流, 进而减少泥沙淤积。2) 受导流墩导流影响, 各方案下船闸下游引航道及口门区的纵向流速均有所减小, 随河段主流过流断面增大, 引航道及口门区的纵向流速呈减小趋势。导流方案 1 (主流过流断面最大) 减小幅度最大, 最大纵向流速达 1.38 m/s, 较工程前减小了 1.01 m/s; 导流方案 3 (主流过流断面最小) 减小幅度最小, 最大纵向流速为 1.77 m/s, 较工程前减小了 0.62 m/s。3) 综合上述水流计算分析, 各方案均能有效归顺口门区航行水流并消除回流, 从而达到减淤冲淤的效果。结合各方案对口门区通航水流条件的改善情况, 方案 1 为推荐方案。

表 2 流速特征					
位置	流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	工程 前后	回流区 长度	最大回流流 速/(m·s ⁻¹)	最大纵向流 速/(m·s ⁻¹)
口门区 表面	465	工程前	164.7	0.65	1.49
		方案 1	—	—	0.82
		方案 2	—	—	0.95
		方案 3	—	—	1.08
	1 193	工程前	180.3	1.01	2.03
		方案 1	—	—	1.11
		方案 2	—	—	1.23
		方案 3	—	—	1.51
	2 000	工程前	194.3	1.30	2.39
		方案 1	—	—	1.38
		方案 2	—	—	1.44
		方案 3	—	—	1.77
口门区 0.6 层	465	工程前	156.7	0.62	1.39
		方案 1	—	—	0.74
		方案 2	—	—	0.86
		方案 3	—	—	0.97
	1 193	工程前	176.6	0.97	1.88
		方案 1	—	—	0.97
		方案 2	—	—	1.10
		方案 3	—	—	1.35
	2 000	工程前	189.7	1.26	2.20
		方案 1	—	—	1.21
		方案 2	—	—	1.32
		方案 3	—	—	1.58

注: 表中纵向流速是平行于航向方向, 下同。

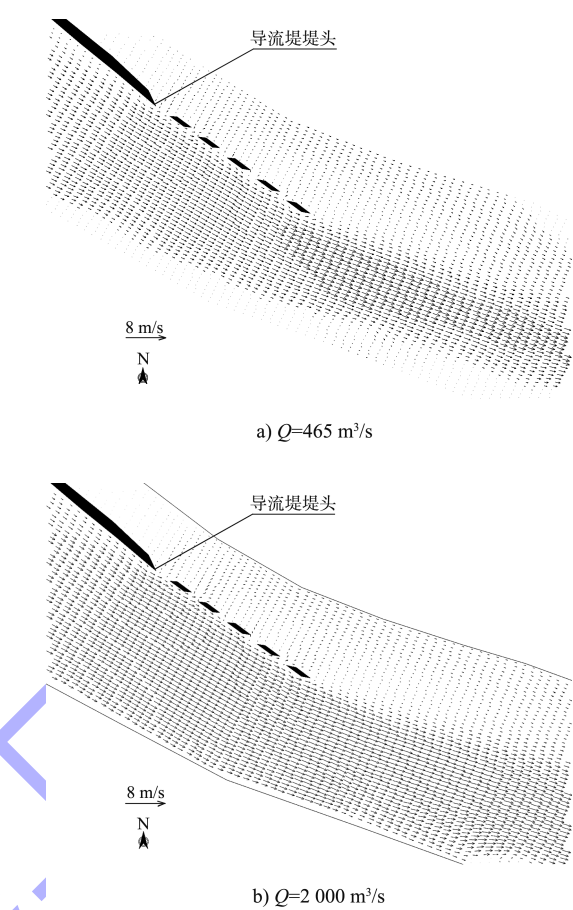


图 9 方案 1 口门区表面流场

3 结论

1) 采用有限体积法建立了基于交错的、坐标网格下完全三维非静水压力数学模型, 通过非恒定明渠流动算例开展数学模型验证, 验证结果表明: 非静压模型比静压模型具有更高的计算精度, 该模型在模拟具有强三维水流运动特性问题上具有较高的精度和效率。

2) 沙颍河郑埠口枢纽船闸引航道及口门区水流特性计算分析表明, 枢纽下泄流量下船闸下游引航道及口门区均有回流产生, 回流范围和强度随枢纽下泄流量和沿水深方向呈现不同的特征, 下泄流量越大回流范围和强度越大, 回流强度沿水深方向逐渐减弱, 总体看回流范围与船闸下游口门区及连接段航道内出现累积性泥沙淤积范围一致, 回流是导致船闸下游口门区及连接段航道泥沙淤积的主要原因。