

· 施 工 ·



耙吸式挖泥船作业过程中耙头 周围泥沙遗漏特性

张红升¹, 江 攀^{2,3}, 缪袁泉¹

- (1. 中交疏浚技术装备国家工程研究中心有限公司, 上海 200082;
2. 武汉理工大学 交通与物流工程学院, 湖北 武汉 430063;
3. 武汉理工大学, 国家水运安全工程技术研究中心, 湖北 武汉 430063)

摘要: 针对耙吸式挖泥船工作过程中外流场泥沙遗漏问题, 进行耙头工作过程中周围泥沙流动特性研究。采用数值模拟研究方法, 分析耙头外部流场前端与后端泥沙遗漏情况, 不同工况条件下的外流场泥沙浓度分布, 得到真空度与航速变化对外流场泥沙分布的影响。结果表明, 在外流场中耙头后部流场的泥沙遗漏更为严重, 在流场的竖直与水平方向的遗漏分别表现为紊流与层流的形式, 泥泵真空度、航速均与泥泵遗漏量呈正相关的分布趋势。

关键词: 耙吸挖泥船; 流场分析; 多相流; 泥沙遗漏

中图分类号: U615

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)07-0218-07

Characteristics of sediment leakage around rake head in construction of trailing suction dredger

ZHANG Hongsheng¹, JIANG Pan^{2,3}, MIAO Yuanquan¹

- (1. CCCC National Engineering Research Center of Dredging Technology and Equipment, Shanghai 200082, China;
2. School of Transportation and Logistics Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China;
3. National Engineering Research Center for Water Transport Safety, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China)

Abstract: In response to the problem of sediment leakage from the outflow field during the operation of the trailing suction dredger, we study the outer sediment flow characteristics of the rake head work process. By the numerical simulation method, we analyze the sediment leakage between the front and rear ends of the external flow field of the rake head, and the sediment concentration distribution in the external flow field under different working conditions, and obtain the effect of vacuum and velocity changes on the sediment distribution in the external flow field. The results show that the sediment leakage in the flow field behind the rake head is more serious in the external flow field. The leakages in the vertical and horizontal directions of the flow field are in the form of turbulent flow and laminar flow respectively. The vacuum degree and sailing speed are positively correlated with the leakage amount of the dredge pump.

Keywords: trailing suction dredger; flow field analysis; multiphase flow; sediment leakage

耙吸式挖泥船在工作过程中, 对工作流域扰动较大, 耙头与周围水、泥沙间形成复杂流场, 对外流场泥沙分布预测较为困难。梳理国内外挖

泥船的发展与成就可知, 已有许多相关的研究, 如郑金龙等^[1]对耙头内部流场进行分析, 梳理耙头内部泥沙容易淤积的区域, 进行优化达到降低

收稿日期: 2022-09-28

作者简介: 张红升 (1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事疏浚技术装备自动化、智能化监控技术研究。

流动阻力、提升工作效率的目的; 刘昊阳等^[2]研究耙头喷嘴的分布方式对于泥沙破碎的影响, 发现喷嘴不同方式排列时对水下形貌造成不同影响; 陈芊屹^[3]通过不同模型分析泥沙溢流的扩散范围及浓度分布, 为解决疏浚施工中带来的生态污染问题提供新的思路; Chen 等^[4]介绍一种可用于实时预测耙吸式挖泥船运动对拖头造成影响的数值模拟方法, 该方法对提高耙吸式挖泥船运行效率具有重要意义。

上述研究大多关注于改进耙头结构参数以提高疏浚效率, 随着研究人员关注于多学科领域交叉研究, 发现算法改进可提高疏浚船舶工作效率。Li 等^[5]采用模式搜索、遗传算法等智能控制算法求解疏浚过程动态模型的最优控制参数, 构建耙吸式挖泥船装载料斗的优化体系; Bai 等^[6]提出并验证一种利用堆叠策略估算耙吸式挖泥船生产率的智能方法, 这对耙吸式挖泥船高效平稳运行非常重要; Su 等^[7]提出一种遗传算法改进用于预测挖泥船产量的反向传播(back propagation, BP)神经网络模型, 结果表明遗传 BP 神经网络能够准确预测其产量; Bai 等^[8]提出一种基于荷载曲线的溢流损失预测和荷载循环优化方法, 并以天津港某航道疏浚工程为例, 验证了所提优化方法的适用性, 优化了施工效率。

上述研究大多集中于工作效率优化, 对于挖泥船外部流场的分析研究较少。耙吸船在实际工作过程中, 对水底扰动导致泥沙逸散至周围水域, 造成二次污染。因此, 研究耙吸式挖泥船在工作过程中, 避免溢流二次污染, 对水下环境保护至关重要。

1 模型建立

1.1 边界条件及网格划分

耙头及其流场区域的边界条件设置如图 1 所示。左侧壁面设置为速度入口, 流场出口设置自由出流, 流场除进出口外的四周均设置为壁面, 以模拟耙吸船工作时的流场。在流场内耙头处设置泥沙进口, 其进口速度根据耙头出口处真空度

换算得到, 其数值由实船数据给出, 整个模型用于研究耙吸船在工作中的外流场中泥沙逸散情况; 外流场区域的长度设置为 22 m、宽度为 5.25 m、高度为 9.18 m。考虑到三维流场情况较为复杂, 为保证计算精度, 本文主要采用精度较高的六面体网格对整个流体区域进行网格划分。其中, 在耙头与外流场交界处需要进行网格加密, 以保证流场计算所显现出的特征, 计算区域网格划分如图 2 所示。整个流体区域划分网格的总数量约 93 万个。

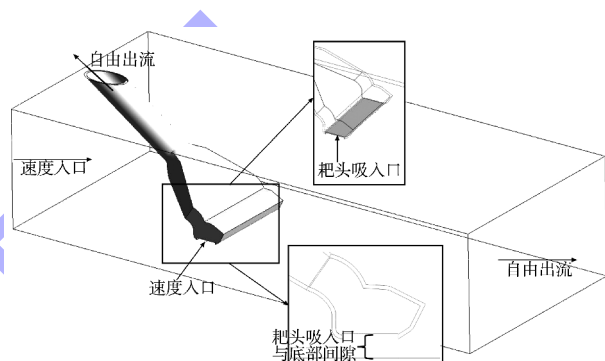


图 1 几何模型与边界条件设置

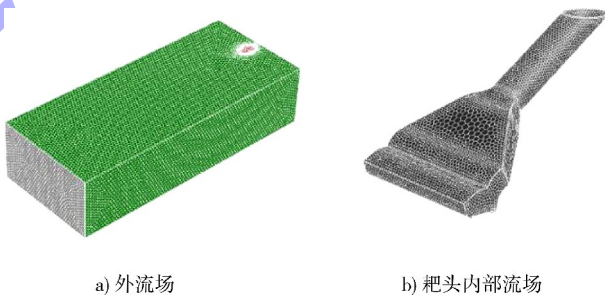


图 2 外流场与耙头内部流场网格划分

1.2 数学模型

两相流数值模拟因其突出的适用性、经济性和准确性, 被广泛用于泥沙两相流的研究中。本文选用基于欧拉-欧拉方法的双流体模型, 对模型做出如下简化: 忽略颗粒间的相互碰撞作用, 连续相和离散相均为不可压缩流体; 忽略颗粒之间的碰撞和破碎, 不存在相变现象; 不考虑温度变化对流场的影响。

1.2.1 欧拉模型

欧拉模型假设泥浆流由固相和液相组成, 固

相与液相同被视为连续相, 占据一定空间, 即 $\alpha_s + \alpha_l = 1$, 其中 α_l 、 α_s 分别为液相、固相的体积浓度。两相均满足质量守恒与能量守恒, 相间通过压强和交互系数耦合:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_i \alpha_i) + \nabla^2(\alpha_i \rho_i \mathbf{v}_i) = 0 \quad (1)$$

式中: t 为时间; α_i 为各相浓度; ∇^2 为拉普拉斯算子; ρ_i 为各相的密度; \mathbf{v}_i 为各相速度矢量。

液相动量方程为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_l \rho_l \mathbf{v}_l) + \nabla^2(\alpha_l \rho_l \mathbf{v}_l) = \\ -\alpha_l \nabla^2 p + \nabla^2 \boldsymbol{\tau}_l + \alpha_l \rho_l \mathbf{g} + K_{sl}(\mathbf{v}_l - \mathbf{v}_s) \end{aligned} \quad (2)$$

固相动量方程为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_s \rho_s \mathbf{v}_s) + \nabla^2(\alpha_s \rho_s \mathbf{v}_s) = \\ -\alpha_s \nabla^2 p + \nabla^2 \boldsymbol{\tau}_s + \alpha_s \rho_s \mathbf{g} + K_{sl}(\mathbf{v}_l - \mathbf{v}_s) \end{aligned} \quad (3)$$

式中: \mathbf{v}_l 、 \mathbf{v}_s 分别为液相、固相的速度矢量; $\boldsymbol{\tau}_l$ 、 $\boldsymbol{\tau}_s$ 分别为液相、固相的剪切应力张量; p 为流体局部压力; K_{sl} 为固液两相间动量交换系数。

1.2.2 湍流方程

本文使用基于雷诺时均 (Reynolds-averaged Navier-Stokes equation, RANS) 方法的 $k-\varepsilon$ (k 、 ε 分别为湍流动能、湍流耗散率) 混合物湍流模型求解液固两相流动的湍流特征:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{S_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{S_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} G_k \frac{\varepsilon}{k} - C_{2\varepsilon} \rho \cdot \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5)$$

式中: ρ 为水的密度; \mathbf{u}_i 为速度矢量; μ 为黏度; μ_t 为湍流黏度; G_k 为平均速度梯度引起的湍流 k 的生产项; G_b 为浮力产生的湍流动能; S_k 、 S_ε 分别为 k 、 ε 的湍流普朗特数, 分别取 1.0、1.3; x_i 、 x_j 分别为 x 方向位移在 i 、 j 方向上的分量; $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 为相关参数, 分别取 1.44、1.92。

在利用计算流体力学 (computational fluid dynamics, CFD) 方法求解上述方程时, 采用基于压

力的分离算法, 数值方法采用 Coupled 算法实现压力场与速度场的耦合。为保证计算的精度并兼顾求解的稳定性和经济性, 体积分数采用二阶迎风格式, 其他控制方程均采用一阶迎风格式动量方程并采用 Quick 离散格式。在对控制方程求解时, 收敛结果标准为前后两次迭代间的误差小于 10^{-5} 。

2 耙头外流场流动特性研究

本文对外流场特性的研究主要专注于真空度与航速对外流场特性的影响, 在真空度与航速不变的情况下, 首先进行流场截面上不同位置的泥沙速度、体积分数等参数分析, 在流场中设置如图 3 所示的监测点, 定量分析在外流场中不同位置对于泥沙参数的影响。

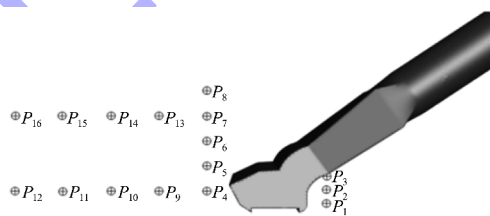
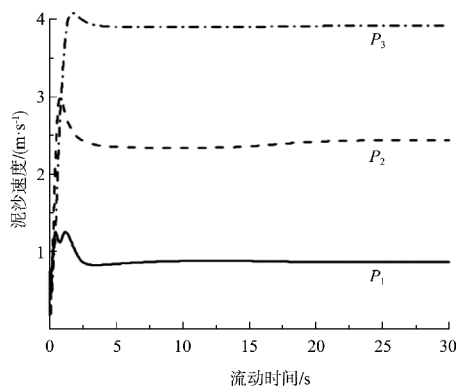
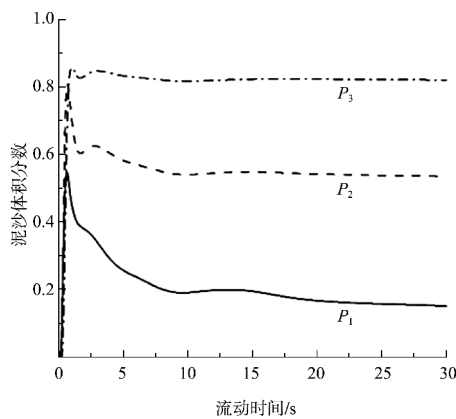


图 3 监测点设置

对工况为真空度 0.1 MPa、航速 1.2 m/s 时位于耙头前端垂直平均分布的 $P_1 \sim P_3$ 点的泥沙速度与泥沙体积分数随时间变化见图 4。可以看出, 初始时刻, 3 个点的泥沙体积分数及速度随着耙吸工作开始而迅速提升, 随施工进行, 3 个点的泥沙速度与体积分数同时达到峰值, 且距底部越远, 泥沙体积分数越高; 各点速度与泥沙体积分数达到峰值后开始降低, 随后达到平衡状态, 而 P_1 点泥沙体积分数较其他两点下降剧烈, 说明该水平位置上逸散泥沙受航速及水流影响, 再次被耙头收集。工作过程中, 在耙头前部贴近河床底部位置泥沙在耙吸工作开始后剧烈逸散, 但随着耙吸工作进行, 该位置泥沙能较好地被耙头收集, 说明耙头前进方向上平行于耙吸口的水平方位上泥沙逸散能得到较好遏制。



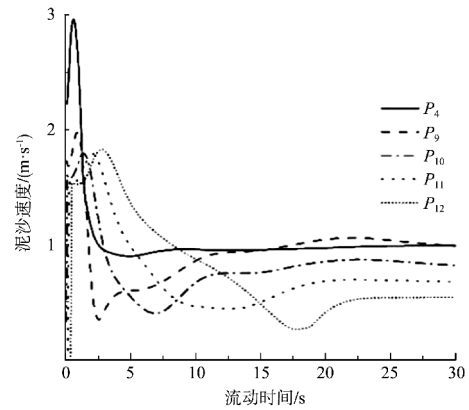
a) 泥沙速度随时间变化曲线



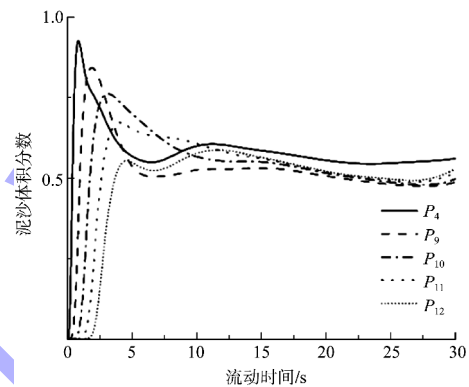
b) 泥沙体积分分数随时间变化曲线

图4 真空度 0.1 MPa、航速 1.2 m/s 时耙头前部不同位置泥沙速度与体积分分数随时间变化曲线

真空度 0.1 MPa、航速 1.2 m/s 时位于耙头后方流域平均分布的 P_4 、 $P_9 \sim P_{12}$ 点的泥沙体积分分数与速度随时间变化见图 5。可以看出,在后部流场区域各点的泥沙体积分分数变化,均显示出先升后降然后趋于平缓的趋势且各点升降变化率也大致相同,流场远离耙头时,泥沙体积分分数所能达到的峰值也越小且达到峰值的时间也较晚; P_4 点距离耙头最近,耙吸工作开始时,该处流场扰动最为剧烈,表现在该点处速度与泥沙浓度的剧烈波动;最终流场稳定时,各点处泥沙体积分分数近似相等,说明在仿真过程中,贴近流场底部处两相流近似于层流流动。



a) 泥沙速度随时间变化曲线



b) 泥沙体积分分数随时间变化曲线

图5 真空度 0.1 MPa、航速 1.2 m/s 时耙头后部水平方向不同位置泥沙速度与体积分分数随时间变化曲线

研究真空度 0.1 MPa、航速 1.2 m/s 时位于耙头后方竖直分布的 $P_4 \sim P_8$ 点的泥沙体积分分数与速度随时间变化,用于探究耙头下游流场,距底部不同深度处泥沙逸散情况,结果见图 6。可以看出, P_4 、 P_5 点因距离耙头较近,受流场影响较为严重,因此体积分分数变化较为剧烈,呈现先增后减再增的趋势, $P_6 \sim P_8$ 位于耙头上方,在流场的靠上位置,受流场影响较小,因此随着时间变化,各点的泥沙体积分分数先增加后趋于平缓。发现在同一水平方向上,耙吸工作开始阶段,流场受外界扰动较大,所以在 0~10 s 阶段流速呈现紊乱状态,在 15 s 以后,各点的流速趋于稳定。在流场下游竖直方向上,泥沙体积分分数随深度变化呈现出先增加后减小的趋势,说明耙头后部流场竖直方向上的泥沙流动较为混乱。

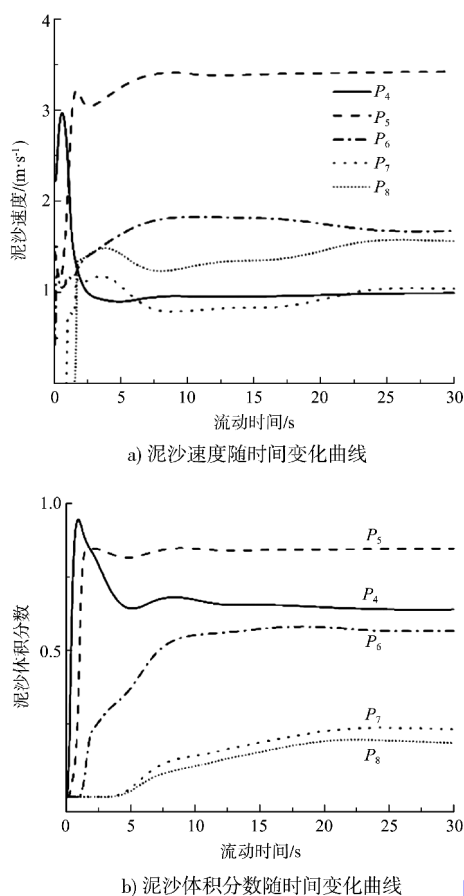


图6 真空度 0.1 MPa、航速 1.2 m/s 时耙头后部
竖直方向不同位置泥沙速度与体积分随时间变化曲线

3 真空度对外流场特性影响研究

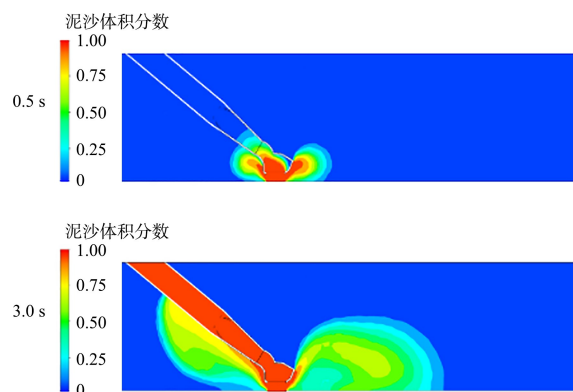
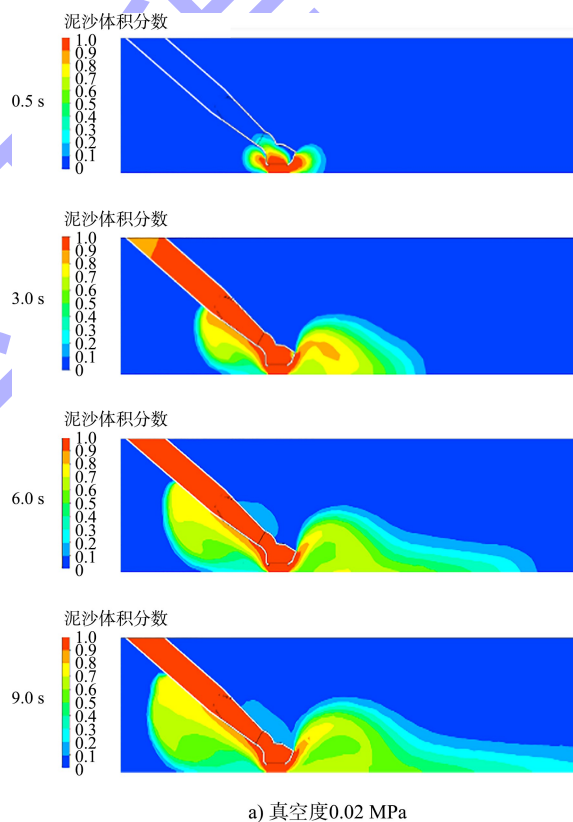
为探究真空度对外流场特性的影响,保持耙头的对地角度以及航速不变,通过数值计算分析不同真空度对耙头外流场的影响。以简化后的耙头模型作为实际耙头模型,通过该模型计算不同真空度下耙头外流场的情况。计算工况见表 1。

表 1 不同真空度下耙头计算边界条件设置

编号	对地 角度/(°)	真空度/ MPa	泥沙密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	航速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
1		0.02		
2	35	0.06	1 200	1
3		0.10		

不同真空度下泥沙分布随时间变化云图如图 7 所示。可以看出,在 0.5 s 时刻,耙吸船刚开始工作,对流域底部扰动较小,泥沙的逸散程度较低,泥沙的扩散面积较小;随时间变化,受耙吸船航行速度影响,耙头后部遗漏的泥沙向下游移动,耙头前部的泥沙在航速作用下,逸散受到抑制,

扩散程度远不如耙头后部的逸散剧烈。在 9.0 s 时刻,受耙吸工作所扰动的泥沙扩散至沿横向的全部流场区域,但因重力作用,泥沙在垂直方向上的逸散较小。同时发现受工作扰动的泥沙逸散在不同区域体积分数也各不相同,在耙头附近,逸散的泥沙浓度较高,远离耙头位置,泥沙的体积分数较低,同时发现因模拟较为理想情况下的耙吸工作,明显看出泥沙相在运动过程中具有层流的特性。在真空度较高的工况条件下工作时,泥沙在外流场中的扩散速度加快,相较于 0.02 与 0.06 MPa 工况,0.10 MPa 工况下 9.0 s 时刻,泥沙几乎扩散到全部下游流场。



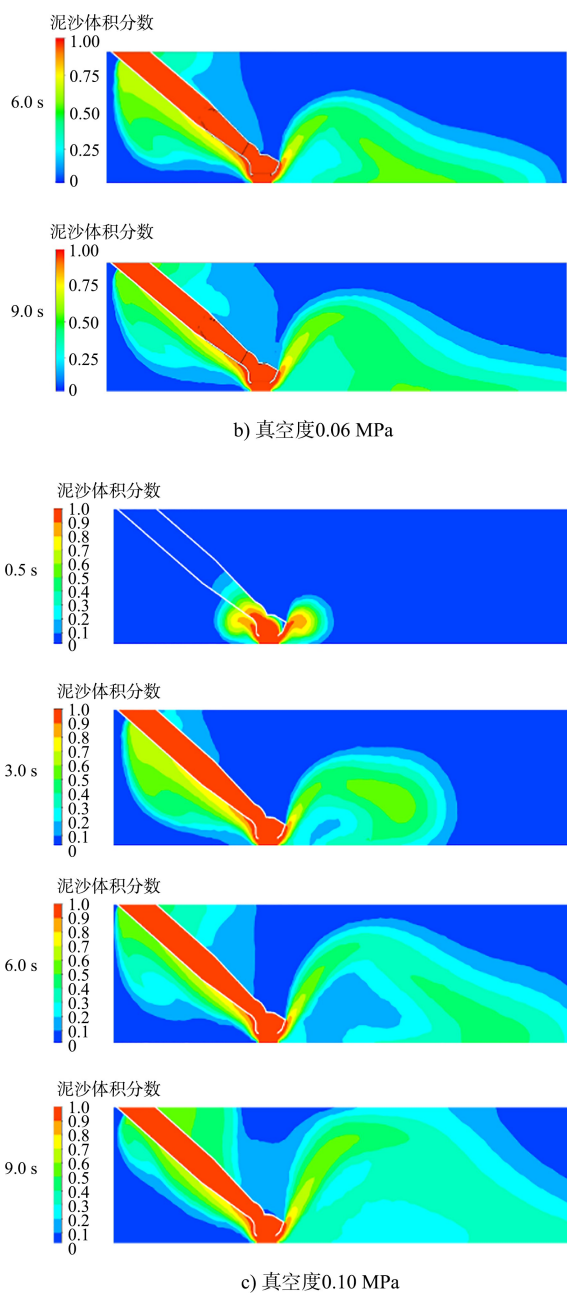


图7 不同真空度下泥沙分布随时间变化云图

4 实船数据分析

为验证仿真结果准确性,实地调研“新海虎8”耙吸船在南通吕四港施工的实船数据。将该耙吸船 2018-09-23 实船数据中的航速参数与泥泵浓度的关系绘于图 8,泥泵浓度是反映耙吸船泥沙遗漏量的重要指标,也是船体航行维护的关键参数。可以看出,施工时航速与泥泵浓度呈正相关。耙头吸入口截面泥沙挖掘量随时间变化如图 9 所示。可以看出,航速增加时泥沙挖掘质量流量增加,与实船数据具有相同的变化趋势。

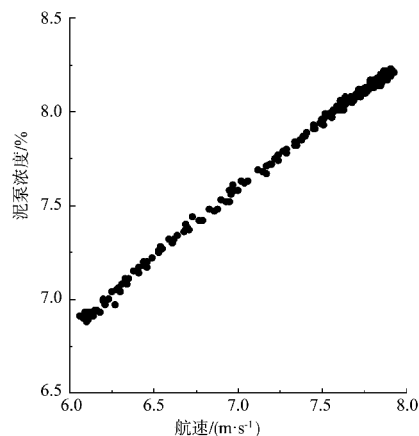


图8 实船数据航速与泥泵浓度关系散点图

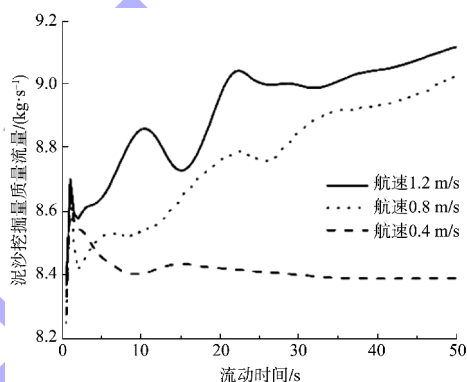


图9 不同航速泥沙挖掘量随时间变化

5 结语

1) 根据耙头外流场的 CFD 分析结果,发现外部流场中耙头后部流场的泥沙遗漏较为严重,而且模拟过程中揭示了外部流场中泥沙遗漏的机理,即流场竖直方向上泥沙流动较为紊乱,水平方向泥沙浓度受耙头前行速度影响,表现出层流的遗漏形式。结合分析,在施工过程中若能有效控制耙头后部泥沙遗漏,即可提升工作效率。

2) 泥沙吸入量只占耙吸式挖泥船泥沙挖掘量的一部分,另一部分泥沙会扩散至周围水域。发现工作真空度和航速均会对泥沙遗漏量产生影响,可通过控制各项影响泥沙遗漏量的参数,进而降低耙吸过程中对水域的扰动,减少工作过程中的二次污染。

3) 通过实船参数对泥泵浓度进行预测分析,发现泥泵真空度、航速与泥泵浓度呈正相关。泥泵吸入泥浆浓度增加与仿真过程中,增大航速时的耙头吸入口泥沙质量流量变大具有相同变化趋势,符合实际施工情况。

参考文献:

- [1] 郑金龙,倪崇本,何炎平.耙吸挖泥船耙头内流场分析与优化[J].水运工程,2017(5):168-172.
- [2] 刘昊阳,伍骏,孟治金,等.耙吸式挖泥船耙头冲水系统喷嘴布局的优化研究[J].船舶工程,2019,41(3):76-81,86.
- [3] 陈芊屹.耙吸式挖泥船溢流扩散特性研究[D].武汉:武汉理工大学,2020.
- [4] CHEN Z L, YE J W, WANG D J, et al. The numerical prediction of draghead motion of trailing suction hopper dredger in time domain [J]. Ocean engineering, 2014, 91: 146-151.
- [5] LI W, SU Z, HONG G J, et al. Optimal design and applied research of a trailing suction hopper dredger loading system[C]// IEEE. Proceedings of the 6th International Conference on Computer Science and Network Technology (ICCSNT). New York: IEEE, 2017: 59-62.
- [6] BAI S, LI M C, SONG L G, et al. Productivity analysis of trailing suction hopper dredgers using stacking strategy [J]. Automation in construction, 2021, 122: 1-11.
- [7] SU Z, FU J Q, SUN J. A genetic neural network approach for production prediction of trailing suction dredger[C]// IEEE. Proceedings of the International Conference on Life System Modeling and Simulation (LSMS). New York: IEEE, 2017: 44-52.
- [8] BAI S, LI M C, LU Q R, et al. Global time optimization method for dredging construction cycles of trailing suction hopper dredger based on grey system model[J]. Journal of construction engineering and management, 2022, 148(2): 5-18.
- (本文编辑 王璁)
- ~~~~~
- (上接第 163 页)
- [13] 祁永升,许光祥,许锡宾,等.湘江近尾洲二线船闸下游引航道口门区通航水流条件改善措施[J].水运工程,2021(3):126-131.
- [14] 潘雅真,罗序先,李穗清,等.改变溢流闸孔开启方式来改善船闸引航道口门区的水流条件[J].水运工程,1998(7):36-41.
- [15] 李茜希,韩昌海,汪罗.泄水闸泄流方式对引航道口门区水流的影响[J].水电能源科学,2018,36(2):128-131.
- [16] 张声鸣.万安水利枢纽泄洪建筑物调度运用[J].人民长江,1996(11):38-40.
- [17] 交通运输部天津水运工程科学研究所.水运工程模拟试验技术规范:JTS/T 231—2021[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2021.
- (本文编辑 王璁)
- ~~~~~
- (上接第 211 页)
- [7] 易顺,林伟宁,陈健,等.基于随机场理论的基坑开挖地表及围护墙变形分析[J].岩石力学与工程学报,2021,40(S2):3389-3398.
- [8] 张培森,施建勇.参数空间变异性对基坑周围土体变形影响分析[J].地下空间与工程学报,2008,4(1):111-115,137.
- [9] 郑俊杰,乔雅晴,章荣军.被动加固区参数变异性对软土深基坑变形行为的影响[J].土木与环境工程学报(中英文),2019,41(6):1-8.
- [10] SUCHOMEL R, MASIN D. Comparison of different probabilistic methods for predicting stability of a slope in spatially variable $c-\phi$ soil[J]. Computers and geotechnics, 2010, 37(1/2): 132-140.
- [11] 吴振君,葛修润,王水林.考虑地质成因的土坡可靠度分析[J].岩石力学与工程学报,2011,30(9):1904-1911.
- [12] 高大钊.岩土工程设计安全度指标及其应用[J].工程勘察,1996(1):1-6.
- [13] 闫澍旺,朱红霞,刘润.天津港土性相关距离的计算研究和统计分析[J].岩土力学,2009,30(7):2179-2185.
- [14] 姬建,姜振,殷鑫,等.边坡随机场数字图像特征 CNN 深度学习及可靠度分析[J].岩土工程学报,2022,44(8):1463-1473.
- (本文编辑 王传瑜)