



绞吸式清淤机器人不同绞吸参数下 绞刀流场特性研究

王李俊^{1,2}, 顾 磊^{1,2}, 刘增辉^{1,2}, 魏长赟^{1,2}

(1. 河海大学, 疏浚技术教育部工程研究中心, 江苏常州 213022;

2. 河海大学 机电工程学院, 江苏常州 213022)

摘要: 基于绞吸式清淤机器人绞吸工况, 运用 Fluent 软件建立绞吸模型, 数值模拟不同绞吸参数下绞刀正刀与反刀切割过程。对比分析绞刀鸭嘴管入口处与关键截面处的泥沙浓度分布特征, 开展正刀与反刀切割下绞刀流场特性研究, 为水下清淤机器人绞刀切割转速的合理选择提供理论依据。结果表明: 在清淤机器人绞吸过程中, 正刀切割时泥沙回填现象较为明显, 反刀切割时泥沙挤压现象较为显著; 绞刀切割时不宜转速过高, 高转速段切割会造成泵吸泥沙浓度不稳定的现象; 对于低水平泵吸流速, 绞刀转速控制在 15~25 r/min, 高水平泵吸流速, 绞刀控制在 25~35 r/min, 有助于提高产量。此外, 建议鸭嘴管不要对称布置, 而是沿着绞刀自转方向偏转一定角度安装, 以提高泥沙吸送效率。

关键词: 绞吸式清淤机器人; 流固耦合; 数值模拟; 流场特性

中图分类号: U655.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)12-0171-07

Flow field characteristics of cutter under different cutter suction parameters for cutter suction dredging robot

WANG Lijun^{1,2}, GU Lei^{1,2}, LIU Zenghui^{1,2}, WEI Changyun^{1,2}

(1. Engineering Research Center of Dredging Technology, Hohai University, Changzhou 213022, China;

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Hohai University, Changzhou 213022, China)

Abstract: Based on the working conditions of a cutter suction dredging robot, this paper uses Fluent software to create a cutter suction model, so as to numerically simulate the over and under cutting processes of the cutter under different cutter suction parameters. The paper analyzes the sediment concentration distribution at the entrance of the duckbill tube and the key section of the cutter and studies the flow field characteristics of the cutter during the over and under cutting processes, providing a theoretical basis for the reasonable selection of cutting speed of the cutter for the underwater dredging robot. The findings suggest that during the cutter suction process of the dredging robot, the phenomenon of sediment backfilling is more pronounced during over cutting, while the phenomenon of sediment squeezing is more pronounced during under cutting. It is not advisable to operate the cutter at a high speed during the cutting process, as high-speed cutting can cause unstable sediment concentration during pumping. For low-level pumping flow rates, the cutter speed should be controlled at 15-25 r/min, while for high-level pumping flow rates, the cutter should be controlled at 25-35 r/min to improve productivity. Furthermore, the paper recommends not to arrange the duckbill tube symmetrically but to install it at a certain angle along the rotation direction of the cutter, so as to improve the efficiency of sediment suction.

Keywords: cutter suction dredging robot; fluid-solid coupling; numerical simulation; flow field characteristics

收稿日期: 2023-03-09

作者简介: 王李俊 (1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为清淤机器人结构设计与分析。

通讯作者: 刘增辉 (1988—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为智能疏浚装备、深海采矿装备。E-mail: 20181988@hhu.edu.cn

针对疏浚工程中大型水上清淤设备受吃水深度及自身活动范围限制而无法有效施工, 以及水底有较多障碍物却无法大规模清淤等特殊复杂工况。绞吸式清淤机器人致力于解决此问题, 并具有无需人工、安全高效、灵活智能等优点。

清淤原理与绞吸式挖泥船类似, 即利用绞刀臂前端的绞刀切削所需清理的泥沙, 配合潜水渣浆泵对切削的泥沙进行收集运输^[1]。鉴于绞刀结构的特殊性, 其转动切削剥落泥沙的同时, 对泥沙有聚拢与运输的能力^[2]。因此绞刀的工作参数对绞吸式清淤机构的清理效率影响显著。

本文对绞吸式清淤机器人的绞吸过程进行仿真分析, 重点对比在不同切削转速下正刀与反刀切削的浓度分布特征, 以帮助绞吸式清淤机器人选择合理的绞吸参数, 提高产量。

1 绞吸式清淤机器人绞吸模型

1.1 绞吸式清淤机器人绞刀切削过程

绞吸式清淤机器人的清淤机构整体见图 1, 主要包括: 绞刀臂、绞刀臂支撑架、泥沙运输管路以及潜水渣浆泵。

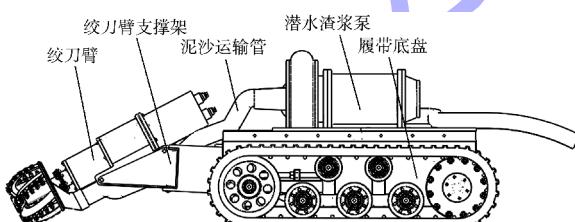


图 1 绞吸式清淤机器人结构

如图 2 所示, 机器人在清淤过程中, 由正刀与反刀切削间歇性发生。为提高绞吸式清淤机器人的清淤效率, 将对绞吸式清淤机器人的正刀切削与反刀切削过程分别进行仿真分析, 为清淤机器人选择合理的切削参数。

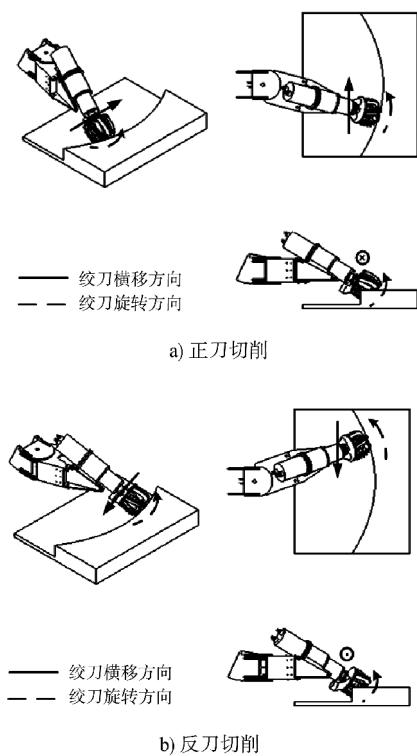


图 2 绞吸式清淤机器人正刀与反刀切削

1.2 绞吸机构仿真模型建立

为降低数值模型的计算成本, 本模型删除了对整体流场影响不大的刀齿^[3], 同时参考绞吸式挖泥船中的切削-输送系统的匹配特征^[4], 结合清淤机器人的运动参数, 对仿真中的运动参数做出简化。结果得出横移速度为 0.2 m/s, 绞刀转速为 0~50 r/min, 泵吸速度为 1 m/s。

2 Fluent 参数设置

考虑到实际的清淤工况, 对于清淤过程的模拟, 采用 Euler-Euler 模型, 即把各相分别看成连续介质, 用各相的体积分数描述其分布, 导出各相的守恒方程并引入本构关系使方程组封闭^[5]。

在 Fluent 软件中有 3 种 Euler-Euler 模型: VOF 模型、Mixture 模型和 Euler 模型。绞吸过程中, 由于固相颗粒与流体之间的相互作用力未知, 且固相颗粒需广泛分布于液相之中^[6], 而 Mixture 模型只要内部力矩达到平衡, 便可应用到不同速

度、不同粒径、不同密度的场合^[7], 因此在绞吸流程的数值模拟计算中采用 Mixture 模型可大幅减小计算量。

综合实际中对泥沙物理参数测量与研究^[8-9], 在软件中对各项物理性质进行定义: 主项水的密度为 $1\,000\text{ kg/m}^3$, 黏度为 $0.001\text{ kg/(m\cdot s)}$, 次项泥沙密度为 $1\,700\text{ kg/m}^3$, 孔隙率为 0.37。

曳力模型采用 Gidspow 模型, 此模型运用于固相浓度较高以及有固相颗粒长时间悬浮的情况^[10], 例如密集流化床、沉降床、泥浆流管路输送等^[11-12]。

当液相体积分数 $\alpha_f > 0.8$ 时, 固液两相相间交换系数 K_{fs} 如下式:

$$K_{fs} = \frac{3}{4} C_D \frac{\alpha_s \alpha_f \rho_f |\mathbf{v}_s - \mathbf{v}_f|}{d_s} \alpha_f^{-2.65} \quad (1)$$

$$C_D = \frac{24}{\alpha_f Re_s} [1 + 0.15 (\alpha_f Re_s)^{0.687}] \quad (2)$$

当 $\alpha_f < 0.8$ 时,

$$K_{fs} = 150 \frac{\alpha_s (1 - \alpha_f) \mu_f}{\alpha_f d_s^2} + 1.75 \frac{\rho_f \alpha_s |\mathbf{v}_s - \mathbf{v}_f|}{d_s} \quad (3)$$

式中: K_{fs} 为相间交换系数, C_D 为拖曳力函数, α_f 、 α_s 分别为液相和固相的体积分数, ρ_f 为液相的密度, \mathbf{v}_f 、 \mathbf{v}_s 分别为液相和固相的流速, d_s 为固

相颗粒粒径, Re_s 为相间相对雷诺数, μ_f 为液相的剪切黏性系数。

绞吸过程中当绞刀切割后, 剥落的泥沙由管道运输, 颗粒在水中悬浮过程较长, 因此 Gidspow 模型更符合绞吸工况。

3 结果分析

为探究绞刀转速对绞吸过程的影响, 结合绞刀电机的运行特性, 选取绞刀转速为 5、15、25、35、50 r/min, 分别对绞刀正刀与反刀切削进行仿真。选取鸭嘴管入口处的截面 a 以及距离截面 a 60 mm 的切削截面 b 作为分析的关键截面, 见图 3。

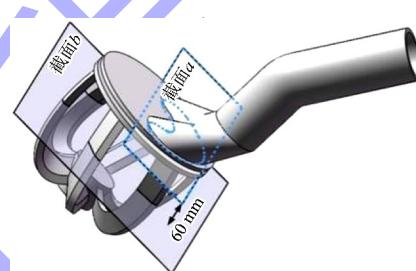


图 3 绞吸流场关键截面位置

3.1 切削过程仿真分析

仿真研究正刀与反刀的切削过程, 以泵吸流速 1 m/s 、转速 25 r/min 为例, 如图 4 所示, 采用体积分数表示各区域的成分。

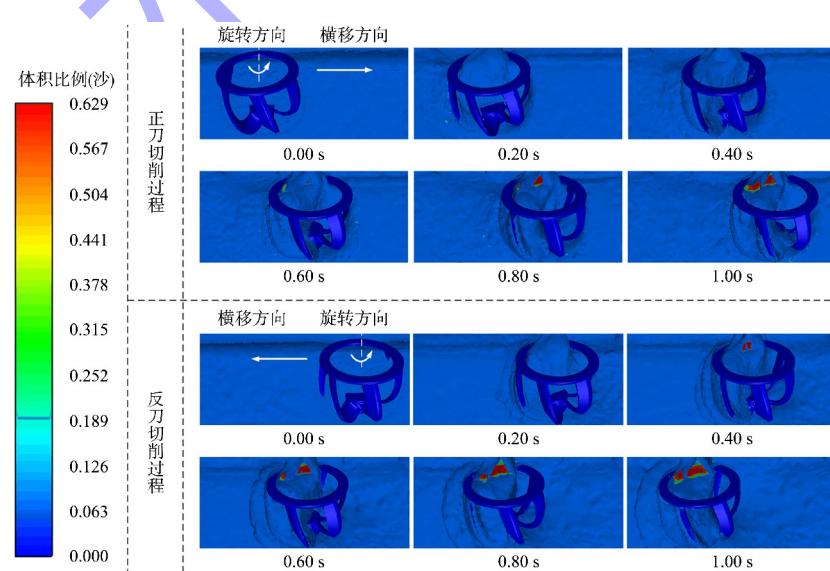


图 4 切削过程仿真

1) 绞刀正刀切削时, 由于绞刀旋转切削方向与横移方向一致, 绞刀将对横移方向的一侧泥沙起到切削的作用。随时间稳定后, 受绞刀离心力的作用, 已切削泥沙顺着绞刀自转方向聚集, 一部分被鸭嘴管吸附, 另一部分在旋转轴左侧区域重新回填。

2) 绞刀反刀切削时, 由于绞刀旋转切削方向与横移方向相反, 切削时绞刀将对横移方向的泥沙起到额外挤压作用。随时间稳定后, 与正刀切削类似的是已切削泥沙顺着绞刀自转方向聚集, 一部分被鸭嘴管吸附; 不同的是另一部分由于挤压作用, 逐渐聚集在旋转轴左侧区域, 形成月牙状土堆, 并且在旋转轴右侧区域出现明显凹坑。

综上, 正刀切削时出现泥沙回填现象, 反刀切削时出现挤压泥沙现象; 此外, 正刀和反刀切削受绞刀离心力的作用, 已切削泥沙均顺着绞刀自转方向聚集, 并非对称聚集在鸭嘴管入口, 因此建议鸭嘴管不要对称布置, 而是沿着绞刀自转方向偏转一定角度安装。

3.2 不同转速下切削过程绞吸浓度分析

为进一步研究正刀与反刀切削对绞吸过程中泥沙浓度的影响, 仿真对比泵吸流速 1 m/s 时不同转速下正刀与反刀切削鸭嘴管入口处截面 a 的泥沙平均浓度, 见图 5。

根据图 5 中泥沙平均浓度随时间变化的特点, 将 35 r/min 及以下转速定义为低转速段, 50 r/min 定义为高转速段。由图可知: 对于低转速段, 正刀切削与反刀切削并无较大差异, 同转速下的泥

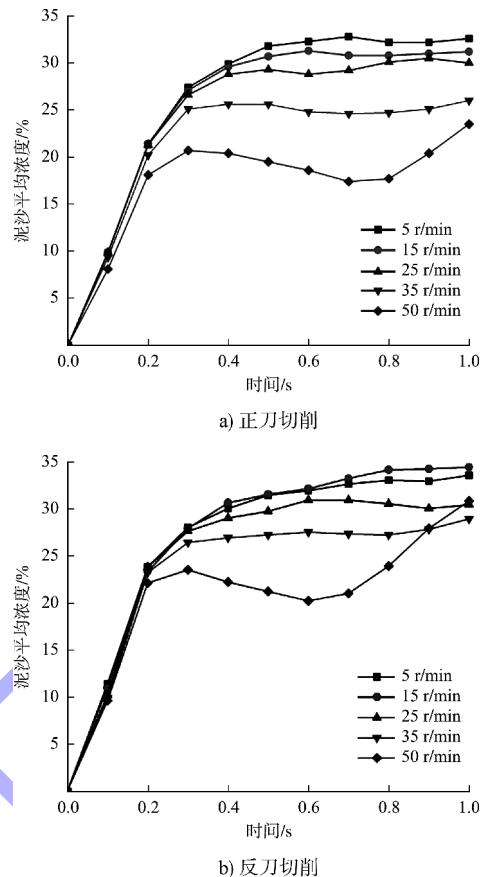


图 5 不同转速下鸭嘴管入口处截面 a 泥沙平均浓度对比

沙平均浓度各区间范围较为接近, 且随转速增加, 截面 a 处稳定后的泥沙平均浓度有下降趋势; 当绞刀在高转速段时, 截面 a 处泥沙平均浓度不稳定, 且反刀切削不稳定现象更明显。为进一步分析高转速段时差异产生的原因, 对比转速 50 r/min 在 0.25、0.50、0.75、1.00 s 时正刀与反刀切削截面 a、b 的浓度分布, 见图 6。

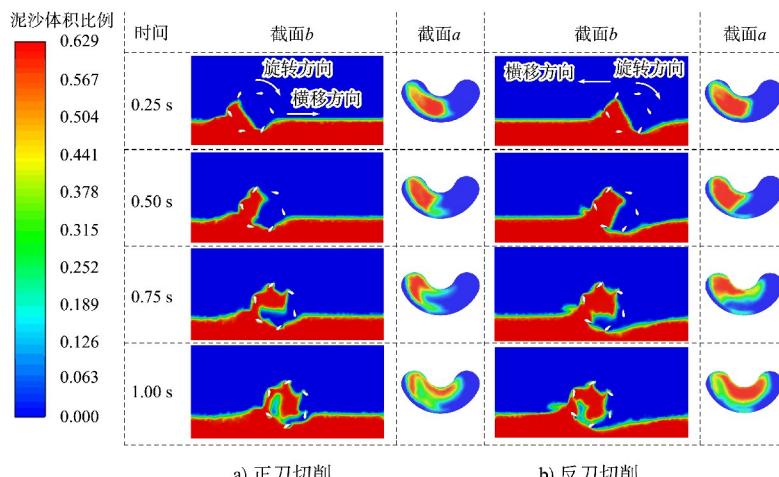


图 6 不同时刻转速 50 r/min 时截面 b、a 的泥沙体积浓度分布

当绞刀转速为 50 r/min 时, 在切削过程中, 由于转速过快, 大量的泥沙被绞刀臂带动, 并且由于反刀切削的挤压作用, 对比正刀切削, 绞刀区域内富集高浓度泥沙更容易随绞刀运动, 也更容易被鸭嘴管吸附, 加剧鸭嘴管入口处的浓度分布变化, 因此反刀切削截面 a 处泥沙平均浓度的不稳定现象更加严重。

通过分析可知, 正刀与反刀切削在低转速段内同转速对比绞吸泥沙平均浓度差异不大; 高转速段时正刀与反刀切削均出现泥沙平均浓度不稳定现象, 且反刀切削时更明显, 在绞刀转速选取中应避免高转速切削。

3.3 不同泵吸流速下绞刀转速匹配分析

主要对不同泵吸流速下正刀切削转速为 5、15、25、35 r/min 的绞吸流场进行分析。仿真对比不同转速下截面 a 处稳定段泥沙平均浓度随泵吸流速变化趋势, 见图 7。

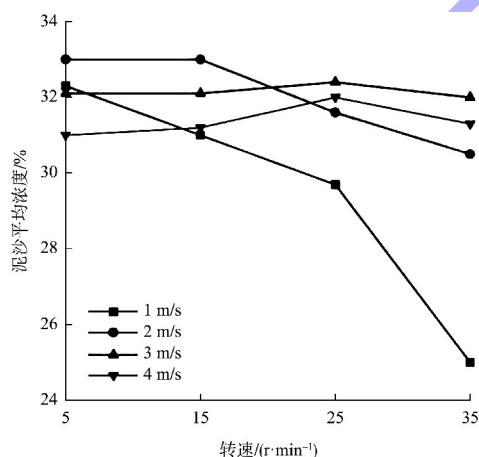


图 7 不同转速下截面 a 处稳定段泥沙平均浓度随泵吸流速的变化趋势

其中泵吸流速 1 m/s 时, 不同转速下泥沙平均浓度差距较大, 随着泵吸流速的提升差距逐渐缩小; 当绞刀转速为 5 和 15 r/min 时, 泵吸流速达到 2 m/s 后, 随着流速的增加, 平均浓度不再增加; 当绞刀转速为 25 和 35 r/min 时, 泵吸流速达到 3 m/s 后, 随着流速的增加, 平均浓度也不再增加。

综上选取泵吸流速 1 m/s 时的绞吸流场作为低

水平泵吸流速分析对象, 3 m/s 时的绞吸流场作为高水平泵吸流速分析对象。

3.3.1 不同转速下低水平泵吸流速分析

对于低水平泵吸流速时不同转速下的分析, 仿真对比转速 5、15、25、35 r/min 之间的泥沙产量, 见图 8。

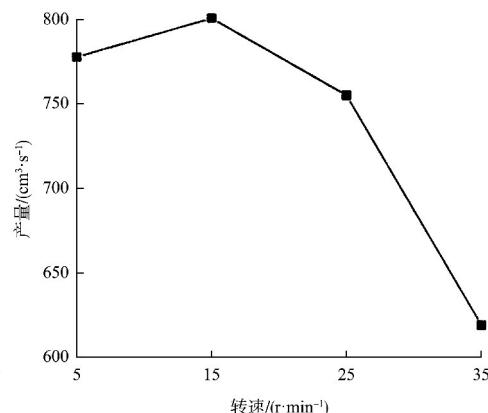


图 8 泵吸流速 1 m/s 时不同转速下产量对比

其中转速 15 r/min 时产量最高, 转速 5 和 25 r/min 之间产量较为接近, 相差不超过 2.6%。考虑到低转速下, 泥沙容易存在因流速过低, 残留堆积在鸭嘴管入口处的现象。因此, 通过查阅起动流速与粒径关系^[13], 结合泥沙的实际物理性质, 选取 200 mm/s 作为该仿真泥沙的起动流速, 见图 9, 定义截面 a 浓度大于 0.5 的部分面积为 A , 其中流速小于 200 mm/s 的部分面积为 B , 通过软件对比泵吸流速 1 m/s 时转速 5 和 25 r/min 下, 截面 a 处高浓度区间内低速段面积占比 B/A 见图 10。

转速 5 r/min 稳定后的面积占比大于转速 25 r/min 时, 因此转速 5 r/min 时更易出现泥沙在鸭嘴管入口处残留堆积的现象。综合考虑上述产量及泥沙残留分析, 对于低水平泵吸流速, 转速尽量控制在 15~25 r/min 内较为合适。

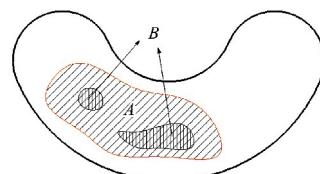
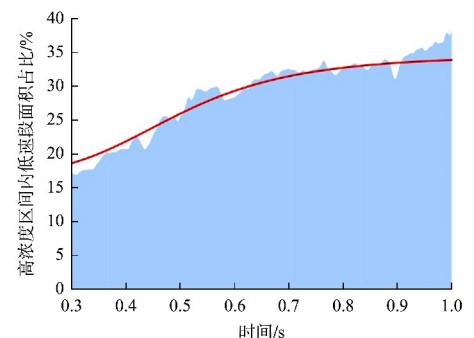
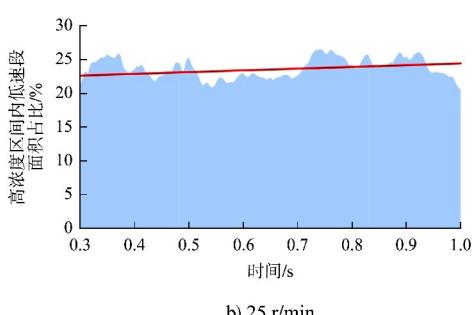


图 9 截面 a 处高浓度区间内低速段面积占比

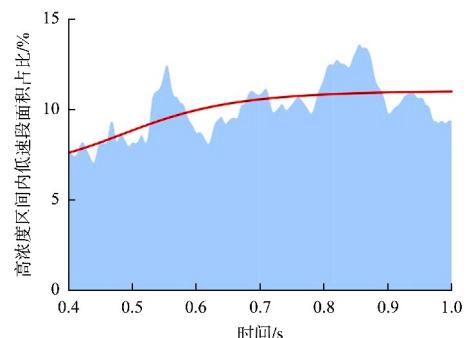


a) 5 r/min

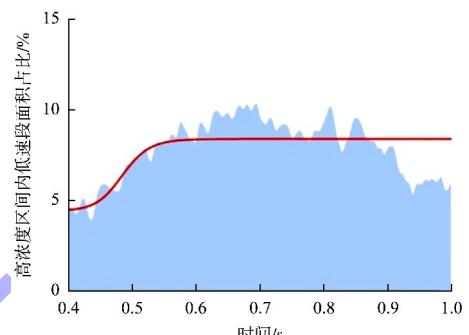


b) 25 r/min

图 10 泵吸流速 1 m/s 时转速 5、25 r/min 下高浓度区间内低速段面积占比



a) 15 r/min



b) 35 r/min

图 12 泵吸流速 3 m/s 时转速 15 与 35 r/min 下高浓度区间内低速段面积占比

3.3.2 不同转速下高水平泵吸流速分析

对于高水平泵吸流速时不同转速下的分析，仿真同样对比转速 5、15、25、35 r/min 之间的泥沙产量，见图 11。

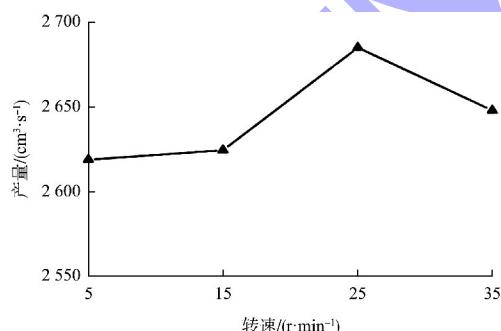


图 11 泵吸流速 3 m/s 时不同转速下产量对比

其中转速 25 r/min 时产量最高，5 和 35 r/min 之间产量较为接近，相差不超过 0.95%。因此，对比泵吸流速 3 m/s 时，转速 15 与 35 r/min 截面 a 处高浓度区间内低速段面积占比，见图 12。

当转速为 15 r/min 时，其稳定后的面积占比大于转速 35 r/min，因此转速 15 r/min 时更易出现泥沙在鸭嘴管入口处残留堆积的现象。综合考虑上述产量及泥沙残留分析，对于高水平泵吸流速，转速尽量控制在 25~35 r/min 内较为合适。

4 结论

1) 在绞吸数值模拟中，鉴于其工况的复杂性，采用 Mixture 模型可大幅减小计算量。此外，在泥沙输送过程中，颗粒在水中有较长的悬浮过程，曳力模型采用 Gidspow 模型更符合绞吸工况。

2) 在清淤机器人绞吸过程中，正刀切削时泥沙回填现象较明显，反刀切削时泥沙挤压现象较明显。绞刀切削时不宜转速过高，高转速段切削时会造成泵吸泥沙浓度不稳定的现像。对于低水平泵吸流速，绞刀转速控制在 15~25 r/min；高水平泵吸流速，绞刀控制在 25~35 r/min，有助于提高产量。

3) 在清淤机器人绞吸过程中, 无论是正刀还是反刀切削, 受绞刀离心力的作用, 已切削泥沙均顺着绞刀自转方向聚集, 并非对称聚集在鸭嘴管入口, 建议鸭嘴管不要对称布置安装, 而是沿着绞刀自转方向偏转一定角度安装。此外, 对于鸭嘴管安装时偏转角度对绞吸过程中泥沙吸送效率的具体影响, 数值模拟时简化了工况, 未来可以对鸭嘴管安装时的偏转角度进一步分析, 以期提高泥沙吸送效率。

参考文献:

- [1] 李军. 绞吸挖泥船疏浚优化研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2021.
- [2] 杨啸轶. 大型绞吸挖泥船绞刀三维建模及有限元分析[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
- [3] 徐海良, 陈旺, 吴波, 等. 海底天然气水合物绞吸式开采切削头绞吸特性[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2016, 48(6): 126-131.
- [4] 栾景亮. 绞吸挖泥船管路输送优化与功率分配策略研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2021.
- [5] 高猛, 槐文信, 曾玉红. 横流中垂直出流式多孔射流稀释特性研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2018, 46(6): 94-98.
- [6] 谭欢, 郑维师, 王正金. 基于 Fluent 的搅拌器固液两相流数值模拟[J]. 机电工程技术, 2022, 51(9): 191-193.
- [7] 张正阳, 张国鹏. 基于 Mixture 模型的磷酸萃取搅拌器固液两相流研究[J]. 机械工程师, 2022 (9): 96-98.
- [8] ZHANG M, FAN S D, ZHUA H H, et al. Numerical simulation of solid-fluid 2-phase-flow of cutting system for cutter suction dredgers [J]. Polish maritime research, 2018, 25(S2): 117-124.
- [9] GUPTA K L, PANDEY M, RAJ P A, et al. Fine sediment Intrusion and its consequences for river ecosystems: A review[J]. Journal of hazardous, toxic and radioactive waste, 2023, 27(1): 1-12.
- [10] 李庚鸿. 下沉颗粒固-液搅拌槽内流体力学特性的实验研究和直接数值模拟[D]. 北京: 北京化工大学, 2019.
- [11] LU H L, HE Y R, GIDASPOW D, et al. Size segregation of binary mixture of solids in bubbling fluidized beds[J]. Powder technology, 2003, 134(1/2): 86-97.
- [12] MATONIS D, GIDASPOW D, BAHARY M. CFD simulation of flow and turbulence in a slurry bubble column[J]. AIChE Journal, 2002, 48(7): 1413-1429.
- [13] 钱宁, 万兆慧. 泥沙运动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [14] YU X B, YU X. Assessment of an automation algorithm for TDR bridge sour monitoring system under various conditions [C]. Transportation research board 88th annual meeting, Washington: Transportation Research Board, 2009.
- [15] YANKIELUN N E, ZABILANSKY L. Laboratory investigation of time-domain reflectometry system for monitoring bridge scour [J]. Journal of hydraulic engineering, 1999, 125(12): 1279-1284.
- [16] MANOUSOS V, PANAYIOTIS D, CLINT L, et al. Role of instantaneous force magnitude and duration on particle entrainment [J]. Journal of geophysical research, 2010, 115(F2): F02006: 1-F02006: 18.
- [17] LEE H, HA M Y, BALACHANDAR S. Work-based criterion for particle motion and implication for turbulent bed-load transport[J]. Physics of fluids, 2012, 24(11): 116604-1-116604-23.
- [18] MANIATIS G, HOEY T B, Hassan M A, et al. Calculation of explicit probability of entrainment based on inertial acceleration measurements [J]. Journal of hydraulic engineering, 2016, 143 (4): 04016097. 1-04016097. 12.
- [19] 王协康, 敖汝庄, 方锋. 泥沙起动条件及机理的非线性研究[J]. 长江科学院院报, 1999, 16(4): 39-41.

(本文编辑 赵娟)

(上接第 99 页)

- [12] YU X B, YU X. Assessment of an automation algorithm for TDR bridge sour monitoring system under various conditions [C]. Transportation research board 88th annual meeting, Washington: Transportation Research Board, 2009.
- [13] YANKIELUN N E, ZABILANSKY L. Laboratory investigation of time-domain reflectometry system for monitoring bridge scour [J]. Journal of hydraulic engineering, 1999, 125(12): 1279-1284.
- [14] 蔡德所. 光纤传感技术在大坝工程中的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002.
- [15] MELDRUM M A. Application of vibrating beam technology to digital acceleration measurement [J]. Sensors & Actuators a physical, 1990, 21 (1/3): 377-380.
- [16] MANOUSOS V, PANAYIOTIS D, CLINT L, et al. Role of instantaneous force magnitude and duration on particle entrainment [J]. Journal of geophysical research, 2010, 115(F2): F02006: 1-F02006: 18.
- [17] LEE H, HA M Y, BALACHANDAR S. Work-based criterion for particle motion and implication for turbulent bed-load transport[J]. Physics of fluids, 2012, 24(11): 116604-1-116604-23.
- [18] MANIATIS G, HOEY T B, Hassan M A, et al. Calculation of explicit probability of entrainment based on inertial acceleration measurements [J]. Journal of hydraulic engineering, 2016, 143 (4): 04016097. 1-04016097. 12.
- [19] 王协康, 敖汝庄, 方锋. 泥沙起动条件及机理的非线性研究[J]. 长江科学院院报, 1999, 16(4): 39-41.

(本文编辑 王传瑜)