



螺旋式机具疏浚性能 及水动力特点研究

刘国瑞^{1,2}, 杨正军^{1,3}, 陈九肖^{1,3}, 郑选斌^{1,3}, 刘荣振³, 马丽³

(1. 中交天津航道局有限公司, 天津 300461; 2. 上海交通大学 上海 200240;

3. 天津市疏浚工程技术企业重点实验室, 天津 300457)

摘要: 底泥生态清淤是削减内源污染物、治理黑臭水体、提升水质的重要措施, 但传统清淤刀具会造成底泥污染源的扩散和二次污染, 影响清淤效果。天航局研发出一款新型的螺旋式机具, 通过分析该机具的工作原理及生产能力、横移速度、泥浆吸入浓度等疏浚参数, 使用 CFD 仿真技术对不同工况下机具的水动力特点进行研究, 发现采用螺旋切削和输送能够获得较高浓度的泥浆, 较小的螺距参数有助于吸入更多泥浆, 并能减少底泥扰动, 从而证实该机具有良好的疏浚性能。

关键词: 生态清淤; 螺旋式机具; 泥浆浓度; 有限元法; CFD 仿真

中图分类号: U 616; TV 53

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)S2-0039-04

Dredging performance and hydrodynamic characteristics of screw-type cutter

LIU Guo-rui^{1,2}, YANG Zheng-jun^{1,3}, CHEN Jiu-xiao^{1,3}, ZHENG Xuan-bin^{1,3}, LIU Rong-zhen³, MA Li³

(1.CCCC Tianjin Dredging Co., Ltd., Tianjin 300461, China; 2.Shanghai Jiao Tong University. Shanghai, 200240, China;

3.Tianjin Key Laboratory for Dredging Engineering Enterprises, Tianjin 300457, China)

Abstract: Sediment ecological dredging is an important measure to reduce endogenous pollutants, control black and odorous water bodies, and improve water quality. However, traditional dredging tools will cause the spread of sediment pollution sources and secondary pollution, which will affect the dredging effect. The CCCC Tianjin Dredging Co., Ltd. has developed a new type of ecological dredging equipment, the working principle of the machine and the dredging capacity such as production capacity, traverse speed and mud suction concentration are theoretically analyzed. Using CFD simulation technology to analyze the hydrodynamic characteristics of the tool under different working conditions, it is found that the use of screw cutting and conveying can obtain a higher concentration of mud, and a smaller pitch parameter helps to achieve more mud suction. thus confirming that the designed machine has good dredging performance.

Keywords: ecological dredging; screw-type cutter; mud concentration; finite element method; CFD simulation

国内现有清淤机具对底泥土质较复杂、存在较多杂物等工况的应对能力不高。从工程需求出发, 以提高环保疏浚质量、降低扰动、提高疏浚泥浆浓度为目标, 中交天航局开发出一款螺旋式新型生态清淤机具, 以期能够很好地适应不同河

湖的施工条件和土质, 同时减少疏浚过程中污染物的扩散。该机具由延桥座、调向液压缸、深度液压缸、马达、固定罩、活动罩、骨架体、螺旋刀组等构件组成, 其中螺旋刀组由呈对称布置的左旋和右旋螺旋形刀组成。机具的结构组成见图 1。

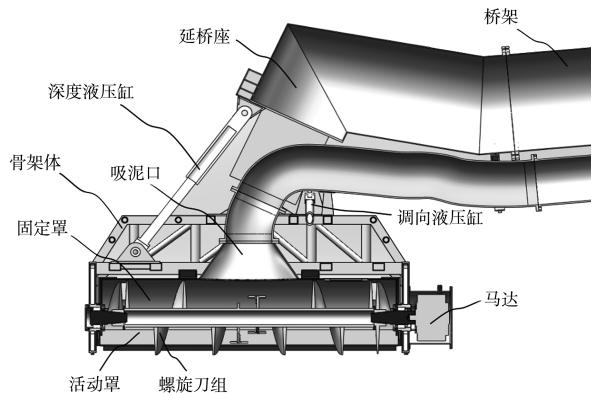


图 1 螺旋式生态清淤机具的结构组成

1 工作原理

1) 取土及汇集动作。作业时,螺旋刀组不断切割泥土,并产生轴向推力,将泥土汇集到吸泥口位置,由泥泵吸入泥管^[1]。

2) 疏浚位置调整。螺旋式机具组装在挖泥船桥架端部,桥架在横移锚的作用下可以左右摆动,实现较大范围的疏挖作业。

3) 疏浚深度调整。调节深度液压缸的伸长量可以实现机具在不同挖泥深度下均具有较高的挖泥效率和较少的疏浚物泄漏。

4) 疏浚方向调整。调向液压缸可以实现机具作业方向的调整,保证其疏挖作业左右摆动时均能形成相对封闭的工作腔体,减少进水量,提高泥浆浓度。

5) 环保作业。固定罩壳和活动罩壳共同组成的腔体能够防止泥土的扩散,避免整个疏挖过程引起水体二次污染,有助于实现生态清淤。

2 疏浚性能

螺旋式机具利用摩擦原理增加了作业幅宽,表征机具疏浚性能的主要参数包括轴向输送能力、螺旋轴转速、机具横移速度等,固有参数有螺旋节距、螺旋刀片直径等。

2.1 螺旋轴转速

允许的最大螺旋轴转速 n_{\max} 根据式(1)计算^[2]:

$$n_{\max} = \frac{A}{\sqrt{D}} \quad (1)$$

式中: A 为物料综合特性系数; D 为螺旋外径。

2.2 轴向输送能力

螺旋式机具的轴向输送能力 I_v 可按式(2)计算^[3]:

$$I_v = 47D^2 n S \phi C \quad (2)$$

式中: D 为螺旋外径; C 为机具倾角系数; S 为螺距; n 为转速; ϕ 为物料在槽体内的填充系数。

2.3 机具横移速度

设机具横移速度为 v , 则机具单位时间内扫过的体积 I'_v 可按式(3)计算, 其应略小于机具的额定产量, 有助于实现较小的污染物外泄:

$$I'_v = 60Lhv \quad (3)$$

式中: L 为疏浚宽度; h 为螺旋刀片额定入土深度; v 为桥架横移速度。

综合以上计算,螺旋式机具的主要性能参数为:最大切削厚度 500 mm;作业宽度 3 000 mm;机具横移速度 6.7 m/min;螺旋刀片直径 800 mm;螺旋节距 590 mm;螺旋轴额定转速 60 r/min;体积产量 603 m³/h;泥浆体积浓度 36.3%。

3 仿真模型分析

3.1 构建仿真模型

螺旋式机具疏浚作业时,固定罩和活动罩可形成泥土和水混合的流场。为减少计算量,将其余结构略去,仅构建固定罩和活动罩之间的腔体内部结构。使用自动网格划分法划出 44 668 个壳单元^[4-5],仿真模型见图 2。螺旋刀组的固定罩和活动罩的表面定义为 wall,吸泥口定义为 outlet;进水口定义为 inlet1,相流为 water;进泥口定义为 inlet,相流为 mud。

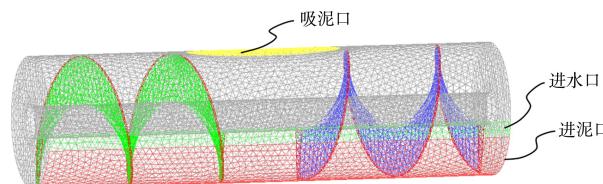


图 2 划分网格后的螺旋式绞刀模型

3.2 确定仿真边界条件

3.2.1 CFD 求解方法

螺旋式机具腔体内的流体属于不可压缩流体,满足质量和动量守恒方程^[6]。质量守恒方程表征

了流体流动的连续性, 见式(4)。动量守恒方程见式(5)。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho v_i) = 0 \quad (4)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial(\rho\gamma)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho\gamma\mu) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial\tau_{zx}}{\partial z} + F_x \\ \frac{\partial(\rho\nu)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho\nu\mu) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial\tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial\tau_{zy}}{\partial z} + F_y \\ \frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho\omega\mu) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial\tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial\tau_{zz}}{\partial z} + F_z \end{cases} \quad (5)$$

式中: ρ 为流体的密度; v_i 为速度矢量, 代表 i 方向的流体速度; p 为流体质点压力; τ_{ij} 为流体质点表面上的黏性力 τ 在相应方向上的分量; F_x 、 F_y 、 F_z 为质点受到的外力; μ 为流体速度矢量; γ 、 ν 、 ω 分别表示速度矢量在 x 、 y 、 z 轴的分量。

将流体视为定常流, 采用多相流模型, 湍流模型选用 $k-\epsilon$ 模型计算理论进行求解, 选用 SIMPLE 方法耦合压力和速度, 动量离散采用二阶迎风差分格式, 参差精度设为 10^{-4} , 求解步长 0.001, 共计算 1 000 步。

3.2.2 仿真工况

仿真研究中设置了无螺旋刀组的工况, 用以研究机具是否可以设计成直接吸泥作业。参考螺旋式输送机设计手册, 螺旋外径的机具可在 550~700 mm 选取螺旋刀的螺距。为此, 仿真设计了 3 种工况, 分别为无螺旋刀、螺距 700 mm、螺距 590 mm; 流速均为 3 m/s。

3.3 仿真结果及分析

3.3.1 各工况下的仿真结果

3.3.1.1 工况 1

在工况 1 条件下, 机具工作腔内流场速度具有如下分布规律: 以吸泥口为中心向周边递减, 且横向递减的速度快于纵向递减的速度; 进水口流体的速度快于进泥口的速度; 进泥口下部位置的流速最低, 接近 0 m/s。

工作腔内流场速度矢量分布见图 3a), 提取工作腔吸口中面上的流场速度及其矢量分布分别见图 3b)、c)。吸口中面上的流场速度具有同图 3a)一致的流场速度分布规律。由图 3b) 可以看出,

进水口以下位置的流速迅速减小, 接近 0 m/s。由图 3c) 可以看出, 进泥口区域存在较多紊流, 分布在中部和两端, 见图中椭圆位置。在正对进水口位置, 吸口中面前方的流速较大, 后方流速较小。

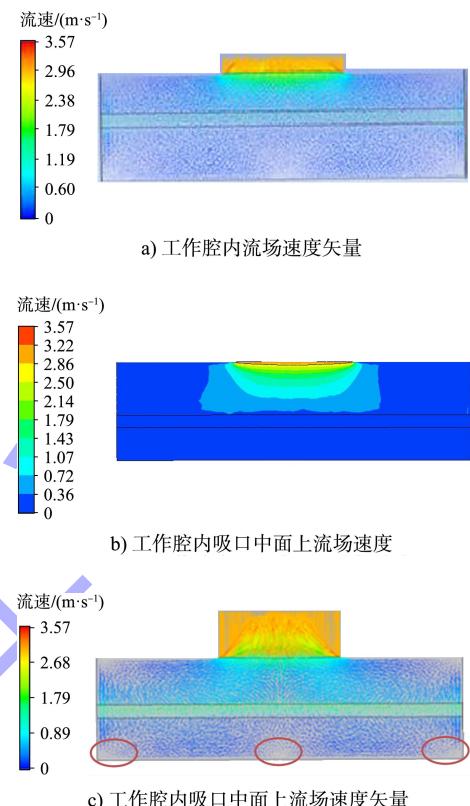


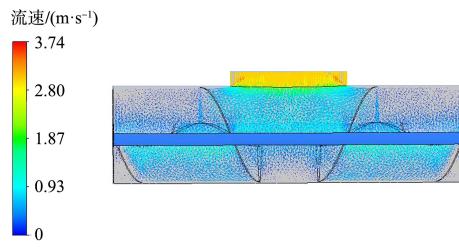
图 3 工况 1 流场速度及其矢量分布

3.3.1.2 工况 2

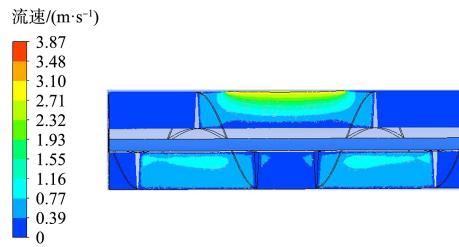
在工况 2 条件下, 机具工作腔内流场速度具有如下分布规律: 吸泥口和两侧螺旋刀形成的空间区域以及螺旋刀之间的空腔流速均较高, 且前一个区域的流速主要集中在进水口位置的上部, 后一个区域的流速主要集中在进水口位置的下部。

工作腔内流场速度矢量分布见图 4a), 提取工作腔内吸口中面上的流场速度及其矢量分布分别见图 4b)、c)。吸口中面上的流场速度具有同图 4a) 一致的流场速度分布规律。由图 4b) 可以看出, 在吸泥口和两侧螺旋刀形成的空间区域, 进水口以上位置的流速较大, 大部分在 0.7 m/s 以上; 进水口以下位置的流速较小, 大部分接近 0 m/s。由图 4c) 可以看出, 螺旋刀之间的空腔区域中, 较高流速主要集中在进水口的下部。进水口以上位置的流速较小, 大部分接近 0 m/s; 进水

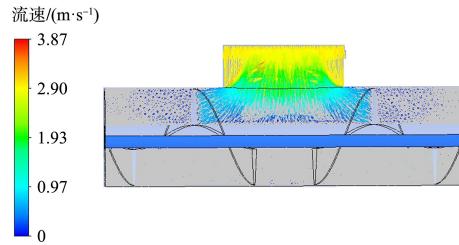
口以下位置的流速较大，大部分在 0.4 m/s 以上。在正对进水口位置，吸口中面后方流速较大，前方流速较小。



a) 工作腔内流场速度矢量



b) 工作腔内吸口中面上流场速度



c) 工作腔内吸口中面上流场速度矢量

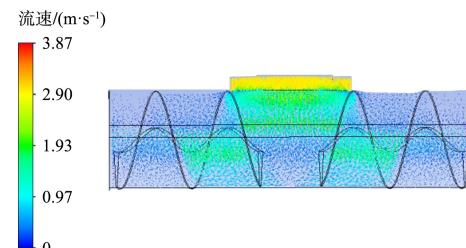
图 4 工况 2 流场速度及其矢量分布

3.3.1.3 工况 3

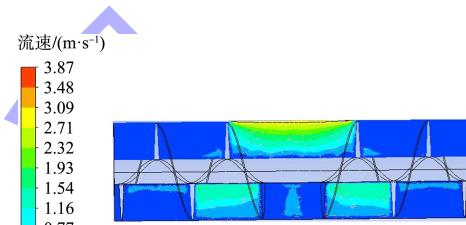
在工况 3 条件下，机具工作腔内流场速度具有如下分布规律：吸泥口和两侧螺旋刀形成的空间区域以及螺旋刀之间的空腔流速均较高，且前一个区域较高的流速主要集中在进水口位置的上部，后一个区域较高的流速主要集中在进水口位置的下部，且在靠近机具中部的一个螺距范围内流速较高。

工作腔内流场速度矢量分布见图 5a)，提取工作腔内吸口中面上的流场速度及其矢量分布见图 5b)、c)。吸口中面上的流场速度具有同图 5a)一致的流场速度分布规律。由图 5b) 可以看出，在吸泥口和两侧螺旋刀形成的空间区域，进水口以上位置的流速较大，大部分在 0.7 m/s 以上；进水口以下位置的流速较小，约有 $1/4$ 区域的流速为 0.5 m/s ，大部分流速接近 0 m/s 。由图 5c) 可以看

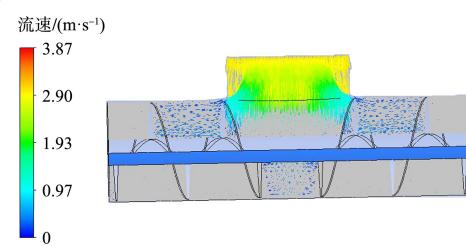
出，螺旋刀之间的空腔区域中，在靠近机具中部一个螺距范围内的进水口下部的流速较高，大部分在 0.7 m/s 以上；进水口以上位置的流速小，大部分接近 0 m/s ；在靠近机具端部一个螺距范围内的位置流速均很小。



a) 工作腔内流场速度矢量



b) 工作腔内吸口中面上流场速度



c) 工作腔内吸口中面上流场速度矢量

图 5 工况 3 流场速度及其矢量分布

3.3.2 仿真结果分析

1) 对于工况 1，无螺旋刀组时，仅靠泥泵负压的吸力，只能吸入吸泥口附近一定深度的泥浆，无法吸入整个机具跨距的泥浆。

2) 对于工况 2，由于吸入负压的流动性，在泥泵吸力作用下，吸泥口和两侧螺旋刀形成的空间区域的上部以及螺旋刀之间的空腔下部均有较高的吸入负压，表明这些位置的泥浆能够比较好地吸入。

3) 对于工况 3，在泥泵吸力作用下，吸泥口和两侧螺旋刀形成空间区域的上部以及靠近机具中部的一个螺距范围内均有较高的吸入负压，表明这些位置的泥浆能够比较好地吸入。