

· 航道及通航建筑物 ·



# 射流水平移动速度对冲刷粉沙特性影响的 数值模拟\*

倪 雁<sup>1</sup>, 夏保琴<sup>2</sup>, 顾 磊<sup>2</sup>

(1. 中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 上海 200120;

2. 河海大学, 疏浚技术教育部工程研究中心, 江苏 常州 213022)

**摘要:** 针对在疏浚工程中射流冲刷如何提高产能和降低能耗的问题, 进行了数值模拟研究。以中值粒径为 0.048 mm 的粉沙沙床作为研究对象, 基于泥沙冲刷模型建立了移动射流冲刷模型, 并结合物理模型试验结果验证数值模拟参数选取的可靠性。该模型成功模拟了垂向淹没射流冲刷沙床现象, 并分析了移动速度对射流冲刷深度、产能与比能的影响。结果表明: 随着移动速度的增大, 冲刷深度及冲沟截面积不断减小; 存在最经济射流移动速度范围, 使得冲刷产能保持良好的基础上尽可能减少能耗量。研究成果为射流冲刷提高产能和降低能耗提供了理论支撑, 最经济射流移动速度范围可用于指导疏浚工程实践。

**关键词:** 移动射流; 冲刷; 粉沙; 数值模拟

中图分类号: U616

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)01-0071-05

## Numerical simulation of influence of moving jet horizontal velocity on silt bed scouring

NI Yan<sup>1</sup>, XIA Baoqin<sup>2</sup>, GU Lei<sup>2</sup>

(1. Shanghai Waterway Engineering Design and Consulting Co., Ltd., Shanghai 200120, China;

2. Engineering Research Center of Dredging Technology of Ministry of Education, Hohai University, Changzhou 213022, China)

**Abstract:** Numerical simulation study is carried out to increase jet scour productivity and reduce energy consumption in dredging engineering. Based on the sediment scouring model, a moving jet scouring model is established for a silt bed with a median particle size of 0.048 mm, and the reliability of the numerical simulation parameters are verified combined with the physical model test results. The model successfully simulates the phenomenon of vertical submerged jet scouring the sand bed, and analyzes the influence of moving speed on the jet scouring depth, productivity and specific energy. The results show that the scour depth and cross-sectional area of gully decrease with the increase of moving speed. There is a range of the most economical jet moving speeds, so that the scour production is maintained on a good basis with as little energy consumption as possible. The research results provide theoretical support for jet scour to increase production and reduce energy consumption. The range of the most economical jet velocity can be used to guide dredging engineering practice.

**Keywords:** moving jet; scouring; silt; numerical simulation

泥沙淤积会引起江河湖库的容积减少、洪涝加重、工程效益降低等, 科学有效地治理河道和

水库泥沙淤积是一个经久不衰的话题。射流清淤方式在现阶段得到广泛使用, 其原理是利用水射

收稿日期: 2023-04-12

\*基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0407404); 江苏省科技成果转化专项资金项目(BA2016143); 国家自然科学基金项目(51709094)

作者简介: 倪雁(1987—), 男, 硕士, 工程师, 从事航道工程设计与研究。

流增强水流局部紊动,进而增加局部水流挟沙能力,达到疏浚清淤的工程目的。

国内外学者开展了大量的射流冲刷沙床研究工作。Westrich 和 Kobus<sup>[1]</sup>、Beltaos 和 Rajaratnam<sup>[2-3]</sup>、Aderibigbe 和 Rajaratnam<sup>[4-5]</sup>等的试验结果表明:影响定点冲沙的主要因素有射流速度  $U_0$ 、射流直径  $d$ 、冲刷靶距  $S$  和泥沙颗粒尺寸  $D_s$ 。移动射流冲刷中,除前文所提的影响因素外,射流移动速度  $v$  对冲刷结果的影响也十分显著。Yeh 等<sup>[6]</sup>开展了大比尺移动射流冲刷试验,结果表明,喷嘴移动时冲坑深度受移动速度影响较大,无量纲冲沟深度与射流/移动速度呈双曲线关系。高亚平等<sup>[7]</sup>进行了移动射流试验,结果表明,在  $0.02 \sim 0.05$  m/s 移动速度范围内,泥沙输移量随射流移动速度的增大而减小。数值模拟方面,孙成宇<sup>[8]</sup>基于 FLOW-3D 的泥沙冲刷模型建立了移动冲刷模型,开展水下射流冲刷模拟,结果表明,随着移动速度的增大,冲沟尺寸不断减小。张芝永等<sup>[9]</sup>分别采用动网格法和移动质量源项法模拟移动射流,结果表明,在  $0.02 \sim 0.04$  m/s 射流移动速度范围内,沙丘高度和冲刷深度会随着移动速度的增加而逐渐减小。关于射流移动速度,现有研究仅就移动速度对冲沟尺寸的影响做出总结,尚未有研究结合实际工程中产量、能耗的影响做出综合分析,且研究范围较小,难以用于指导实际工程。

本文选取黄河花园口粉沙沙床作为研究对象,

以静水环境作为起步,用数值模拟方法研究移动射流冲刷沙床的冲刷情况,探究移动速度为  $0 \sim 0.3$  m/s 时射流移动速度对冲刷粉沙特性的影响。

## 1 物理模型

流体模型计算方程为连续性方程与动量方程,湍流模型采用 RNG  $k-\varepsilon$  模型。RNG  $k-\varepsilon$  模型修正了标准  $k-\varepsilon$  模型对于低雷诺数的解析式,有效提高了边壁效应的精度,因此更适用于一般流态,能更好地计算流体的剪切力,适用于水流对泥沙局部冲刷的模拟运算。

泥沙冲刷模型是数值模拟中的关键模型。在泥沙冲刷模型中可以自行设置的参数有泥沙性质类参数和经验值类参数。泥沙性质类参数有泥沙粒径、泥沙密度、休止角、河床粗糙度、最大体积分数。经验值类参数有临界希尔兹数、推移质系数、挟带系数、Richardson-Zaki 系数乘子、分子扩散系数、湍流扩散乘子。其中,河床粗糙度、Richardson-Zaki 系数乘子、湍流扩散乘子均有默认推荐值,分别为 2.5、1 和 1。最大体积分数、泥沙粒径及休止角可通过试验测量获得,临界希尔兹数及推移质系数可通过公式推导获得,挟带系数则是通过试参法获得。

本文泥沙模型参数设置如表 1 所示,泥沙中值粒径为  $0.048$  mm,根据疏浚岩土分类标准<sup>[10]</sup>中的粒径分级指标,认定该泥沙主要成分属于砂质粉土。

表 1 泥沙模型参数

最大体积分数 $C_v$	泥沙中值粒径 $D_{50}/\text{mm}$	泥沙密度 $\rho_s/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	临界希尔兹数 $\theta_{cr}$	挟带系数 $\alpha$	推移质系数 $B$	休止角 $\varphi/(\circ)$
0.595	0.048	2 650	0.05	0.01	5	45

## 2 数值模型

### 2.1 模型建立

为验证数值模型有效性,进行对照试验,试验台见图 1。通过控制水泵转速控制进口流量和射流流速,流量值可通过流量计读出;台车在导轨上可水平移动;同时通过在竖直方向调整台车的位置,可控制靶距。

建立数值几何模型时,对试验台适当简化,几何模型如图 2 所示。水槽尺寸为  $0.20\text{ m}\times 0.14\text{ m}\times 0.15\text{ m}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高);水深  $0.06\text{ m}$ (沙床表面以上);喷嘴内径为  $0.002\text{ m}$ ;射流速度  $10\text{ m/s}$ ;靶距  $0.03\text{ m}$ ;射流移动速度随工况变化,分别为  $0$ 、 $0.04$ 、 $0.06$ 、 $0.08$ 、 $0.10$ 、 $0.12$ 、 $0.20$ 、 $0.30\text{ m/s}$ 。

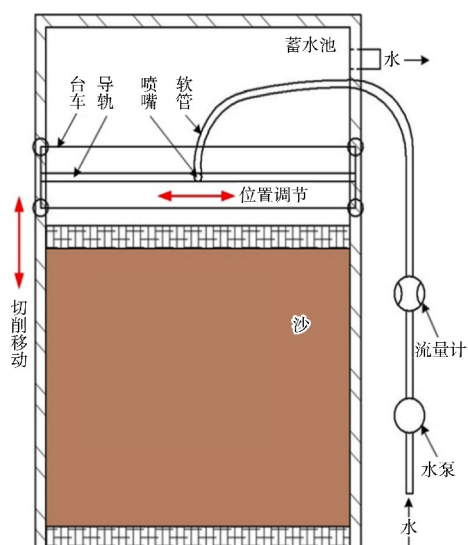


图 1 试验台

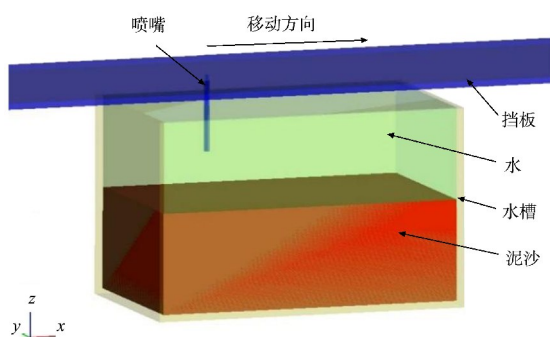


图 2 几何模型

## 2.2 网格划分

移动冲刷模型与定点冲刷模型的区别在于其移动的特点。由于喷嘴为移动部件，其尺寸相对整体模型尺寸较小，但出于对整体网格经济性的考虑，需对喷嘴经过的区域进行加密。经研究发现，嵌套网格法可有效减少网格数量，且网格不易变形，相邻网格块的网格尺寸合理比例为 2:1。采用 3 层嵌套，最内层网格块覆盖喷嘴移动所经过区域。为验证网格无关性，最内层网格块的单一网格尺寸分别对应将喷嘴内孔三等分、四等分及五等分，提取不同网格尺寸下的冲刷深度发展，网格无关性验证见图 3。由图可知，四等分与五等分 2 条曲线非常接近，随着冲刷时间  $t$  的增加，网格等分份数对冲刷深度  $\varepsilon_m$  的影响可以忽略。同时考虑网格经济性，选取四等分进行喷嘴内孔网格划分。因此，最内层网格块的单一网格尺寸对应

将喷嘴内孔四等分，即  $0.5 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ ，中层网格块的单一网格尺寸为  $1.0 \text{ mm} \times 1.0 \text{ mm} \times 1.0 \text{ mm}$ ，外层网格块的单一网格尺寸为  $2.0 \text{ mm} \times 2.0 \text{ mm} \times 2.0 \text{ mm}$ 。

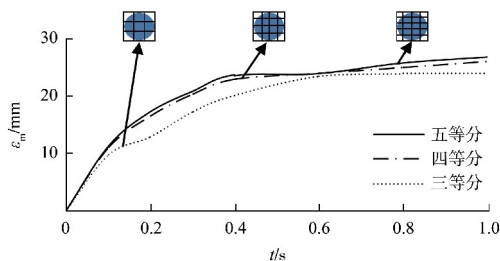
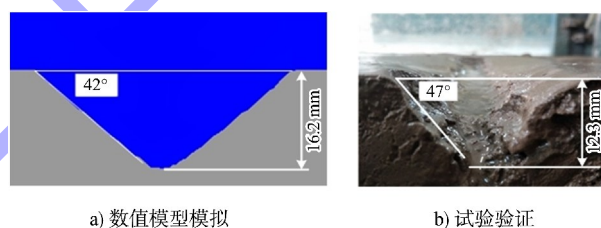


图 3 网格无关性验证

## 2.3 有效性验证

从冲沟形貌及深度两方面进行数值模型有效性验证，提取不同射流速度下的冲沟深度，以及射流速度为  $10 \text{ m/s}$  下的冲沟形貌进行对比，如图 4、5 所示。



a) 数值模型模拟

b) 试验验证

图 4 数值模型模拟和试验验证

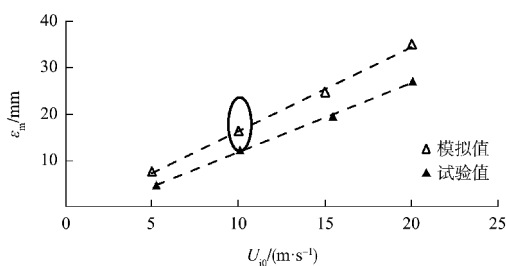


图 5 数值模型有效性验证

由图 5 可知，随着射流速度的增大，数值模型模拟与试验的冲沟深度均线性增大，且斜率近似；在相同射流速度下，两者的冲沟剖面均呈 V 形，冲沟剖面坡角及冲刷深度数值相似。总体来看，数值模型模拟结果可信。

需要说明的是，数值模型模拟与试验结果并不完全吻合。模拟的冲沟坡角较试验偏小，冲刷深度则偏大。这是由于黄河花园口泥沙的粒径较

小,在水下堆积密实,实际颗粒间存在的作用力不利于泥沙起动;而模拟中泥沙颗粒之间无法预加这部分作用力,泥沙表现出松散的特点,即泥沙更易被冲起、悬浮和输移,表现出冲刷范围更广、冲刷深度更大的模拟结果。

### 3 结果与分析

#### 3.1 冲刷深度

为分析射流移动速度对冲刷深度的影响,提取不同移动速度下冲刷沟的悬沙浓度对比,如图6所示。

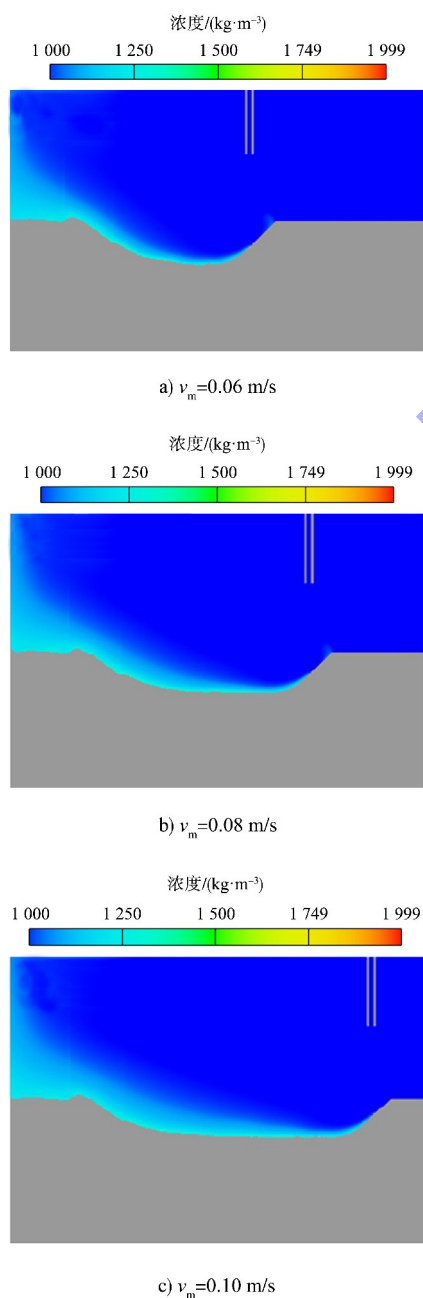


图6 不同移动速度下悬沙浓度对比

容易理解的是,移动速度不同,冲刷深度到达冲刷平衡的耗时不同。移动速度越大,到达冲刷平衡状态越快,耗时越短。实际工程中冲刷时间虽然较之长得多,但冲刷总会到达平衡状态。提取冲刷平衡段的冲刷深度,绘制冲刷深度随移动速度的变化曲线,如图7所示。由图可知,移动速度在0~0.3 m/s范围内变化时,随着移动速度的增大,冲刷深度逐渐下降。分析其原因为,移动速度越大,喷嘴停留越短暂,射流对同一位置泥沙的冲刷时间越少,水流与泥沙的动量交换越不充分,冲刷效果越差,冲刷深度就越小。

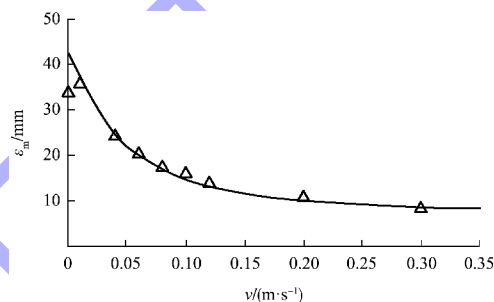


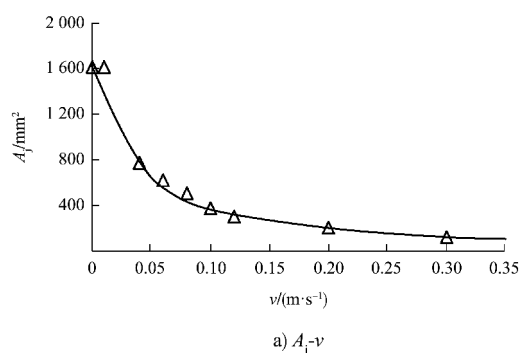
图7 冲刷深度随移动速度的变化

#### 3.2 冲刷产能

冲刷产能  $Q_s$  是单位时间内冲刷的泥沙体积,对应数值模拟中的冲沟截面积  $A_j$  与移动速度  $v$  的乘积:

$$Q_s = A_j v \quad (1)$$

冲刷平衡段的冲沟截面积和冲刷产量随移动速度的变化见图8。从图中可以看出,随着射流移动速度的增大,冲沟截面积先迅速减小后缓慢减小,冲刷产能先快速增大后缓慢增大,最终保持稳定。可以看到,射流移动速度约在0.033 m/s时,冲刷产能达到最大冲刷产量的70%。将最大产能的70%定义为最优冲刷产能,超过该移动速度,冲刷产能增长缓慢。



a)  $A_j-v$



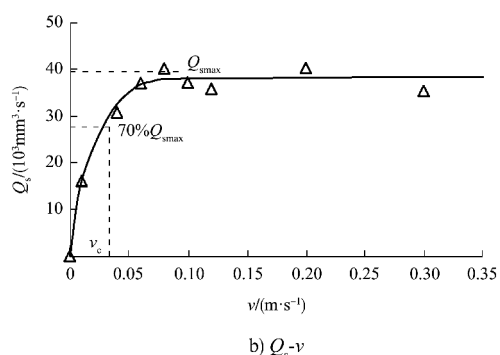


图8 冲沟截面积和冲刷产量随移动速度的变化

### 3.3 冲刷比能

射流移动速度不同,单位时间内施工能耗量也不同,因此还需分析移动速度对冲刷能耗的影响。冲刷比能是指冲刷单位体积泥沙所需要的射流能耗,用  $E_{sp}$  表示,其单位为  $J/m^3$  或  $Pa$ 。冲刷比能的计算式如下:

$$E_{sp} = \frac{E_k}{Q_s} = \frac{\pi \rho_w U_{j0}^3 d^2}{8 Q_s} \quad (2)$$

式中:  $E_k$  为射流能耗,  $\rho_w$  为流体密度,  $d$  为喷嘴内径。

在射流移动速度  $0 \sim 0.3$  m/s 范围内,  $E_{sp}$  随之的变化如图9所示。从图中可以看出,随着移动速度的增大,冲刷比能先减小后稳定,在移动速度达到  $0.05$  m/s 时,获得最小比能。这说明实际工程中,射流移动速度过小是不经济的。当射流移动速度超过一定范围后,结合前文分析可知,进一步增大射流移动速度对冲沙产量的帮助不大,同时工程中提高船舶移动速度意味着需克服更大的航行阻力,即拖曳耗能越高。结合前文冲刷产量的分析可知,在研究工况下,移动速度在  $0.03 \sim 0.05$  m/s 范围内,冲刷最为经济。

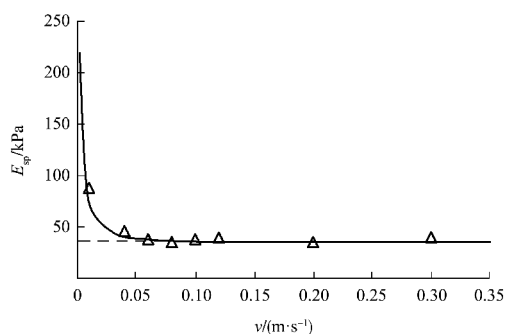


图9 冲刷比能随移动速度的变化

## 4 结论

1) 结合物理模型试验结果,对建立的移动射流冲刷模型进行了参数选取的可靠性验证。该模型可成功模拟垂向淹没射流冲刷粉沙沙床的过程。

2) 数值模拟研究发现,随着移动射流水平移动速度的增大,冲刷深度不断减小,冲沟截面积随之不断减小。冲刷产能先增大后不变,冲刷比能先减小后不变。

3) 在本文研究的移动速度与泥沙粒径范围内,存在最经济的射流移动速度区间,可使冲刷产能保持在良好的基础上尽量减少能耗量,对疏浚射流节能减排具有参考价值。

## 参考文献:

- [1] WESTRICH B, KOBUS H. Erosion of a uniform sand bed by continuous and pulsating jets [J]. Uni Stuttgart - Universitätsbibliothek, 1973(1): 91-98.
- [2] BELTAO S, RAJARATNAM N. Impinging circular turbulent jets [J]. American society of civil engineers, 1974, 100(10): 1313-1328.
- [3] BELTAO S, RAJARATNAM N. Impingement of axisymmetric developing jets [J]. Journal of hydraulic research, 1977, 15(4): 311-326.
- [4] ADERIBIGBE O, RAJARATNAM N. Erosion of loose beds by submerged circular impinging vertical turbulent jets [J]. Journal of hydraulic research, 1996, 34(1): 19-33.
- [5] ADERIBIGBE O, RAJARATNAM N. Effect of sediment gradation on erosion by plane turbulent wall jets [J]. Journal of hydraulic engineering, 1998, 124(10): 1034-1042.
- [6] YEH P H, CHANG K A, HENRIKSEN J, et al. Large-scale laboratory experiment on erosion of sand beds by moving circular vertical jets [J]. Ocean engineering, 2009, 36(3/4): 248-255.
- [7] 高亚平, 王玉川, 杨建国, 等. 水下移动射流冲刷沙床的实验研究 [J]. 泥沙研究, 2019, 44(5): 27-34.
- [8] 孙成宇. 水下射流冲刷的数值模拟 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2018.
- [9] 张芝永, 员鹏, 吴修广, 等. 移动射流冲刷数值模拟研究 [C] // 第十三届全国水动力学学术会议暨第二十六届全国水动力学研讨会文集. 北京: 海洋出版社, 2014: 580-585.
- [10] 交通部上海航道局. 疏浚岩土分类标准: JTJ/T 320—1996 [S]. 北京: 人民交通出版社, 1997.

(本文编辑 王传瑜)