·施　工·

悬河治理清淤装备高压冲水系统数值优化研究*

洪国军[1,2,3]，舒敏骅[2,3]，李铁键[1]，尹纪富[2,3]，陆寅松[2,3]

（1. 清华大学，水圈科学与水利工程全国重点实验室，北京 100084；
2. 中交疏浚技术装备国家工程研究中心有限公司，上海 201208；3. 航道疏浚技术交通行业重点实验室，上海 201208）

摘要：清淤装备性能的优劣对悬河的治理效果具有决定性的影响。为了探究某悬河治理清淤装备高压冲水系统的性能，采用数值模拟方法对悬河治理清淤装备高压冲水系统管路及喷嘴的流场进行研究。结果表明，原型高压冲水管路及喷嘴的结构布置不合理，各喷嘴的最大出口速度与最小出口速度相差 3.86 m/s，9 号喷嘴出口速度的相对值达到 17.35%，各喷嘴的出口速度分布极为不均。对此，有针对性地提出拖耙高压冲水系统的结构优化方案并进行数值验证，优化后的拖耙高压冲水系统的各喷嘴出口速度十分均匀，最大出口速度与最小出口速度仅相差 0.33 m/s，各喷嘴出口速度的相对值均在 1.10% 以内，拖耙高压冲水系统的整体流场得以明显改善。研究成果可为悬河治理清淤装备的设计提供参考。

关键词：悬河治理；清淤装备；高压冲水系统；数值模拟

中图分类号：U615.35+1.2　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1002-4972(2026)07-0211-06

Study on numerical optimization of high-pressure flushing system for dredging equipment in suspended river regulation

HONG Guojun[1,2,3], SHU Minhua[2,3], LI Tiejian[1], YIN Jifu[2,3], LU Yinsong[2,3]

(1. State Key Laboratory of Hydroscience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
2. CCCC National Engineering Research Center of Dredging Technology and Equipment Co., Ltd., Shanghai 201208, China;
3. Key Laboratory of Waterway Dredging Technology of Ministry of Transport, Shanghai 201208, China)

Abstract: The performance of dredging equipment exerts a decisive impact on the regulation effect of suspended rivers. To investigate the performance of the high-pressure flushing system for typical suspended river dredging equipment, a numerical simulation method is adopted to study the flow field inside the pipelines and nozzles of the system. The results show that the structural layout of the original high-pressure flushing pipeline and nozzles is unreasonable. The difference between the maximum and minimum outlet velocities of all nozzles is 3.86 m/s, and the relative deviation of the outlet velocity of No. 9 nozzle reaches 17.35%. The outlet velocity distribution of each nozzle is extremely non-uniform. In view of the above findings, a targeted structural optimization scheme for the towed harrow high-pressure flushing system is proposed and verified by numerical simulation. After optimization, the outlet velocity of each nozzle becomes highly uniform. The velocity difference between the maximum and minimum outlet velocities is only 0.33 m/s, and the relative deviation of the outlet velocity for all nozzles is within 1.10%. The overall flow field of the towed harrow high-pressure flushing system is significantly improved. The research results can provide a reference for the design of dredging equipment used in suspended river regulation.

Keywords: suspended river regulation; dredging equipment; high-pressure flushing system; numerical simulation

收稿日期：2025-11-19　　**录用日期：**2025-12-24

***基金项目：**清华大学水圈科学与水利工程全国重点实验室开发基金资助项目(sklhse-2024-E-01)

作者简介：洪国军(1982—)，男，教授级高级工程师，从事疏浚技术与装备及海洋工程技术装备研究工作。

水运工程

作为世界上输沙量最大、含沙量最高的河流，黄河每年都会产生约 1.6 亿 t 的泥沙，其中 4 亿 t 泥沙会淤积在黄河下游坡降不大、水流平缓的河床之中，导致黄河下游约 800 km 的河床基本高于两岸河堤平原 3~5 m，部分河段可达 10 m，形成了“地上悬河”景观。持续不断的泥沙淤积使得黄河下游面临着决口的严重环境灾害威胁[1-4]，黄河悬河的治理已成为研究热点。

针对黄河悬河的治理问题，专家学者提出了多种措施，其中注水疏浚[5-10]由于施工灵活、成本投入相对较少、受约束较小而引起了较为广泛的关注。注水疏浚的工作原理是将大流量和低压力的水注入航道底部的沉积物中，使其稀释和流化后形成悬浮状的水与沉积物的混合物，并在重力和密度梯度的作用下进行输移，从而将沉积物带离清淤区。与更传统的疏浚方法相比，注水疏浚具有一系列的经济与环境优势，这也促使诸多专家对其进行了研究，如杨含侠等[11]分析了射流冲刷的效率，研究发现在达到冲刷极限深度之前，冲刷深度与冲刷历时的对数成线性关系，且射流角度对冲刷尺度的影响也存在较大的差异；张原锋[12]通过对输沙机理及相关试验资料的分析，认为射流清淤可以提高水流的含沙量，同时也对清淤河段的河槽形态存在明显的改善效果，能够使其趋于窄深，从而进一步提高河道的输沙能力。

本文针对某悬河治理清淤装备的高压冲水系统，采用数值模拟方法对其流场进行数值研究，通过分析高压冲水管路和喷嘴的出口速度等流场特性，探究高压冲水系统结构的合理性，并针对性提出结构优化方案，以期指导悬河治理清淤装备的设计。

1 数值方法及模型

1.1 数值方法

悬河治理清淤装备高压冲水系统流场为三维不可压湍流流动，数值计算中采用定常数值方法开展数值模拟，其连续性方程和动量方程的数学表达式为：

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j}=0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t}+u_j\frac{\partial u_i}{\partial x_j}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x_i}+\mu\frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j\partial x_j}+f_i \tag{2}$$

式中：u_i、u_j 为流体沿 x_i、x_j 方向的速度分量，在三维情况下 $i=j=1$，2，3，分别为 x、y、z 方向的速度分量；ρ 为流体的密度；p 为压力；μ 为分子动力黏性系数；f_i 为质量力，$(f_1,f_2,f_3)=(0,0,-g)$，g 为重力加速度；t 为时间。

本文研究采用剪切应力输运模型[13]（SST k-ω 模型）对 N-S 方程进行封闭，该湍流模型对流场中的涡黏性定义实现了优化，能较好地考虑湍流主剪切应力的输运，提高了对逆压力梯度流动（如分离流）的预测精度。在 SST k-ω 湍流模型中，Menter 对湍流涡黏性系数 μ_t 进行了相应的假定与限制，并最终得到 μ_t 与湍动能 k 和比耗散率 ω 之间的数学关系表达式为：

$$\mu_t=\frac{a_1 k}{\max(a_1\omega,SF_2)} \tag{3}$$

$$F_2=\tanh(v_{\arg_2}^2) \tag{4}$$

其中：

$$v_{\arg_2}=\max\left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta'\omega y},\frac{500\mu}{y^2\omega}\right) \tag{5}$$

式中：y 为网格点到最近壁面的距离；F_2 为混合函数；S 为张力常量；$v_{\arg_2}$ 为 tanh 函数的输入变量；常数 $\beta'=0.09$，$a_1=0.31$。

SST k-ω 湍流模型的 k 和 ω 的输运方程表达式为：

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t}+\bar{u}_j\frac{\partial(\rho k)}{\partial x_j}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\mu+\sigma_k\mu_t)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right]+G_k-\beta'\rho k\omega \tag{6}$$

$$\frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t}+\bar{u}_j\frac{\partial(\rho\omega)}{\partial x_j}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\mu+\sigma_\omega\mu_t)\frac{\partial\omega}{\partial x_j}\right]+\alpha\frac{\omega}{k}G_k-\beta\rho\omega^2+2\rho(1-F_1)\sigma_{\omega2}\frac{1}{\omega}\frac{\partial k}{\partial x_j}\frac{\partial\omega}{\partial x_j} \tag{7}$$

式中：G_k 为湍流生成项；F_1 为混合函数；β、β'、σ_ω、$\sigma_{\omega2}$ 为常数。

方程组所用常数采用下式计算：

$$\psi=F_1\psi_1+(1-F_1)\psi_2 \tag{8}$$

$$F_1=\tanh(v_{\arg_1}^4) \tag{9}$$

$$v_{\arg_1}=\min\left[\max\left(\frac{\sqrt{k}}{\beta'\omega y},\frac{500\mu}{y^2\omega}\right),\frac{4\rho k}{D_{\mathrm{CD},k\omega}\sigma_{\omega2}y^2}\right] \tag{10}$$

其中：

$$D_{\mathrm{CD},k\omega}=\max\left(2\rho\frac{1}{\sigma_{\omega 2}\omega}\frac{\partial k}{\partial x_j}\frac{\partial \omega}{\partial x_j},\ 1.0\times10^{-10}\right) \tag{11}$$

式中：ψ 代表公式中的常数，ψ_1、ψ_2 分别代表下面列出的 2 组常数：$\sigma_{k1}=0.85$，$\sigma_{\omega 1}=0.5$，$\beta_1=0.075$，$\alpha_1=5/9$；$\sigma_{k2}=1.0$，$\sigma_{\omega 2}=0.856$，$\beta_2=0.082\ 8$，$\alpha_2=0.44$。$D_{\mathrm{CD},k\omega}$ 为交叉扩散项。

1.2　模型

悬河治理清淤装备的拖耙长 8 m，宽 1.8 m，整个拖耙结构的高度为 0.6 m，由 15 副耙刀、32 个高压喷嘴组成，喷嘴直径为 20 mm，喷嘴由 2 台离心泵通过高压水管供水，每台高压泵的供水量为 360 m^3/h。拖耙结构布置见图 1。

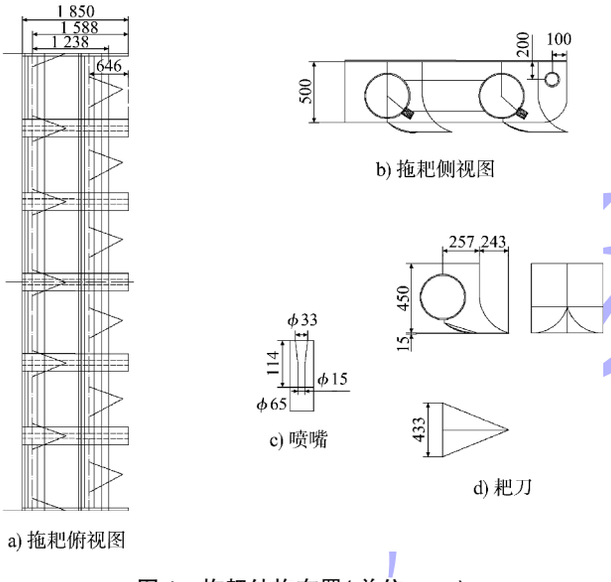


图 1　拖耙结构布置(单位:mm)

Fig. 1　Layout of harrow structure(unit:mm)

2　结果分析

针对试验船拖耙结构开展一定动力条件下拖耙高压冲水系统的流场分析计算，研究拖耙高压冲水系统的内部流场特性及喷嘴出口速度分布情况，并在此基础上开展拖耙高压冲水系统的结构优化研究。

2.1　原型拖耙高压冲水系统的数值研究

根据拖耙结构建立高压冲水系统数值计算模型，原型拖耙高压冲水系统包含 2 个进流口及 32 个喷嘴。为了方便后续分析，对拖耙高压冲水系统中的 32 个喷嘴进行了编号排序，原型拖耙高压冲水管路与喷嘴数值计算域及喷嘴排序见图 2。数值计算采用四面体非结构化网格对高压冲水管路及喷嘴计算域进行空间离散，并对喷嘴处网格进行局部加密处理。网格总数约为 386 万个，网格质量优良，数值计算域网格分布见图 3。对于数值计算的边界条件，根据实际工况，设定两个进口边界为流量入口边界条件，每个进口给定流量为 360 m^3/h，喷嘴口设定为自由出流出口边界条件，其他设定为壁面。

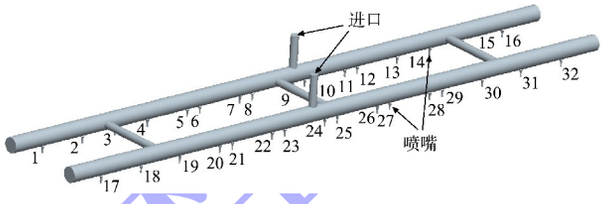


图 2　原型高压冲水管路及喷嘴数值计算域

Fig. 2　Numerical calculation domain of prototype high-pressure flushing pipe and nozzle

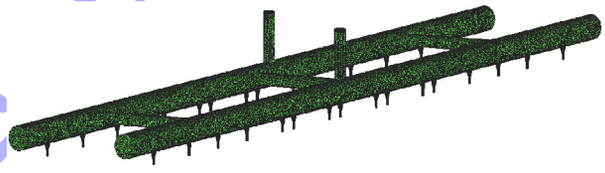


图 3　数值计算域网格分布

Fig. 3　Grid distribution of numerical calculation domain

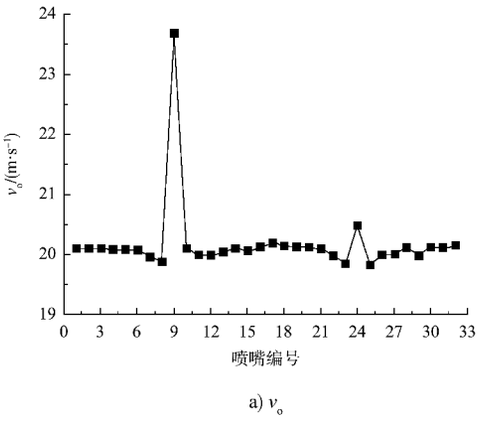
在数值计算过程中对 32 个喷嘴的出口速度进行监测，并对每个喷嘴的出口速度取截面均值；同时，为了更加直观地表现出各喷嘴出口速度的均衡性，定义各个喷嘴出口速度相对 32 个喷嘴平均速度的相对值△，其定义式为：

$$\triangle=\left|\frac{v_{\mathrm{o}}-v_{\mathrm{a}}}{v_{\mathrm{a}}}\right|\times100 \tag{12}$$

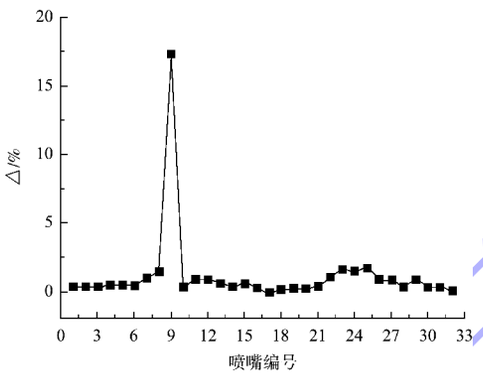
式中：v_{o} 为各喷嘴的出口速度；v_{a} 为 32 个喷嘴出口速度的平均值。

原型高压冲水管路各个喷嘴的出口速度值及出口速度的相对值见图 4。从图 4a)可以看出，9 号喷嘴的出口速度最大，达到 23.69 m/s；喷嘴的最小出口速度为 19.83 m/s，平均出口速度为 20.19 m/s，最大出口速度与最小出口速度相差 3.86 m/s；从图 4b)可以看出，9 号喷嘴出口速度

的相对值达到了 17.35%，即 9 号喷嘴的出口速度远大于 32 个喷嘴的平均出口速度，同时，23~25 号喷嘴的出口速度相对值也较大，为 1.52%~1.77%。



a) v_o

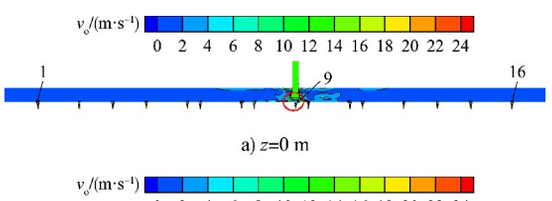


b)△

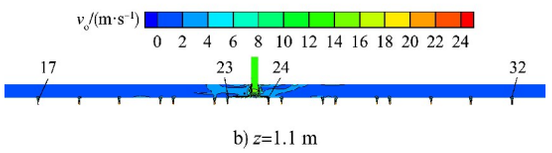
图 4　原型结构喷嘴出口速度对比

Fig. 4　Comparison of outlet velocity of prototype nozzle

原型结构两管路 z=0 m 和 z=1.1 m 截面的速度云图见图 5，高压冲水管路截面局部放大见图 6。可以看出，9 号喷嘴的位置恰好与进流管路正对，因而 9 号喷嘴的出口速度远大于其他喷嘴的出口速度；而 23~25 号喷嘴也恰好位于另一进流管路的附近，从而导致其速度相对也较大。



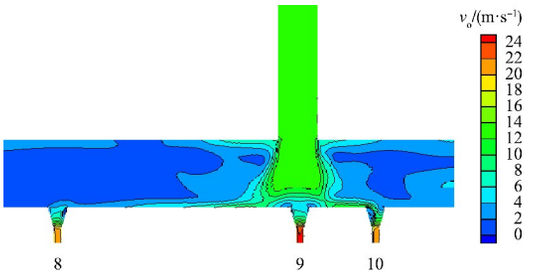
a) z=0 m



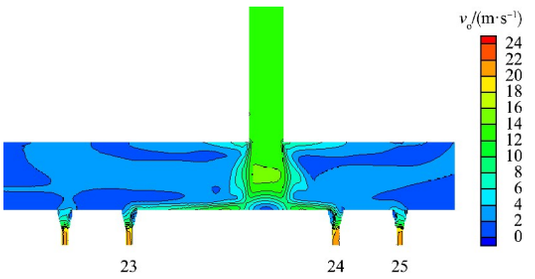
b) z=1.1 m

图 5　两管路中间截面的速度云图

Fig. 5　Velocity contour of the middle section of two pipelines



a) 8~10号喷嘴



b) 23~25号喷嘴

图 6　速度云图局部放大

Fig. 6　Local enlargement of velocity contour

从上述计算结果及分析可看出，原型拖耙高压冲水管路及喷嘴的结构布置相对不够合理，各喷嘴的出口速度分布不均匀，且在高压冲水管内易形成局部涡流，造成管内流场紊乱，从而导致清淤施工后悬河河床出现不平整，影响清淤效果。

2.2　拖耙高压冲水系统结构优化

根据原型拖耙高压冲水系统的数值计算分析结果，对原型管路的喷嘴及进流管路的位置进行优化设计。32 个喷嘴采用均布的方式，进流管路布置于中间连接的管路上，优化布置后的管路及喷嘴结构数值计算域见图 7。

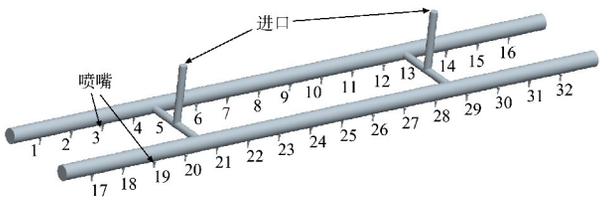


图 7　优化后的高压冲水管路及喷嘴数值计算域

Fig. 7　Numerical calculation domain of the optimized high-pressure flushing pipe and nozzle

采用同样的数值方法及边界条件对优化后的高压冲水管路进行数值计算，并进行速度流场的

分析。优化后高压冲水管路各个喷嘴的出口速度值及出口速度相对值见图 8。从图 8a)可以看出，优化后 32 个喷嘴的出口速度最大值为 20.33 m/s，最小值为 20.00 m/s，平均值为 20.20 m/s，最大出口速度与最小出口速度仅相差 0.33 m/s，与原型结构管路中的 3.86 m/s 相比有了明显的改进。从图 8b)可以看出，优化后管路中各喷嘴出口速度的相对值最大为 1.01%，说明经优化后，各喷嘴的出口速度变得较为均匀。

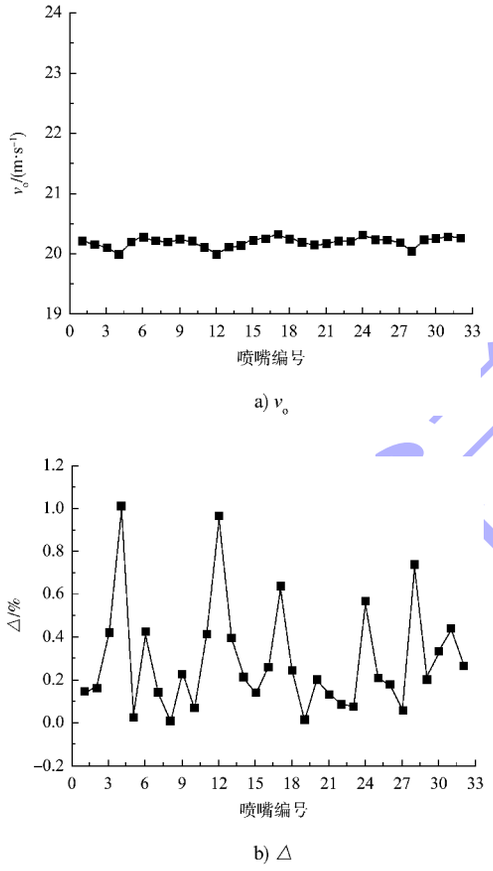


图 8　结构优化后喷嘴出口速度对比

Fig. 8　Comparison of nozzle outlet speed after structural optimization

高压冲水系统结构优化后管路 z=0 m 和 z=1.1 m 截面的速度云图见图 9。可以看出，优化后各喷嘴的出口速度较为均匀，不存在出口速度变化较大的喷嘴，说明优化后各喷嘴的流场变化较为均匀，这将有利于提升悬河治理清淤装备的清淤效果。

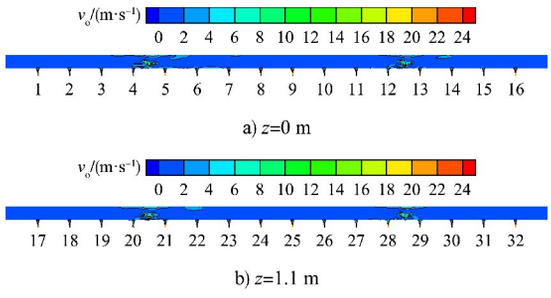


图 9　结构优化后管路中间截面的速度云图

Fig. 9　Velocity contour of middle section of pipeline after structural optimization

3　结论

1）某悬河治理清淤装备原拖耙高压冲水系统管路及喷嘴的结构布置不够合理，高压冲水管路内易形成局部涡流，管内流场十分紊乱，32 个喷嘴中最大出口速度与最小出口速度相差 3.86 m/s，9 号喷嘴的出口速度相对值达到 17.35%，各喷嘴的出口速度分布不均，容易造成清淤施工后悬河河底出现不平整。

2）对原拖耙高压冲水系统管路及喷嘴的结构布置进行了优化，经数值验证，优化后的拖耙高压冲水系统中的各喷嘴出口速度较为均匀，32 个喷嘴中最大出口速度与最小出口速度仅为 0.33 m/s，各喷嘴出口速度的相对值均在 1.1%以内，优化后的拖耙高压冲水系统流场得到了明显改善，对悬河治理清淤装备高压冲水系统的设计具有指导意义。

参考文献：

[1]　冯普林, 包岁利, 李茜, 等. 渭河下游“悬河”现状及治理建议[J]. 陕西水利, 2025(1): 21-25, 29.
FENG P L, BAO S L, LI Q, et al. Current status of the “hanging river” in the lower reaches of the Weihe river and suggestions for its management[J]. Shaanxi water resources, 2025(1): 21-25, 29.

[2] 陈卫宾, 张运凤, 刘生云, 等. 黄河下游二级悬河治理机械放淤技术研究[C]//中国水利学会 2014 学术年会论文集. 南京: 河海大学出版社, 2014: 878-882.
CHEN W B, ZHANG Y F, LIU S Y, et al. Research on the mechanical desilting in secondary perched river harnessing of the lover reaches of Yellow River[C]// Proceedings of 2014 Annual Meeting of China Water Conservancy Society. Nanjing: Hohai University Press, 2014: 878-882.

[3] 钱乐祥, 王万同, 李爽. 黄河“地上悬河”问题研究回顾[J]. 人民黄河, 2005, 27(5): 1-6.
QIAN L X, WANG W T, LI S. Retrospection of study on “suspended river” issue of the Yellow River[J]. Yellow River, 2005, 27(5): 1-6.

[4] 陈新民, 夏佳, 罗国煜. 黄河下游悬河决口灾害的风险分析与评价[J]. 水利学报, 2000, 31(10): 66-70.
CHEN X M, XIA J, LUO G Y. Risk analysis of dike breach in lower reaches of Yellow River[J]. Journal of hydraulic engineering, 2000, 31(10): 66-70.

[5] VERHAGEN H J. Water injection dredging [C]//2nd International Conference on Port Development and Coastal Environment (PDCE 2000). Varna: Varna University of Architecture, Civil Engineering and Geodesy, 2000.

[6] 曾施雨, 王涛, 刘辛愉, 等. 淹没条件下水射流喷嘴内外流场特性[J]. 水运工程, 2020(3): 7-12, 20.
ZENG S Y, WANG T, LIU X Y, et al. Characteristics of flow field inside and outside nozzle of water jet under submerged condition[J]. Port & waterway engineering, 2020(3): 7-12, 20.

[7] 荣建国, 陈天山, 王涛, 等. 黏土耙头喷嘴角度及喷嘴排布优化[J]. 水运工程, 2025(8): 226-234.
RONG J G, CHEN T S, WANG T, et al. Optimization of nozzle angle and nozzle layout for clay rake head[J]. Port & waterway engineering, 2025(8): 226-234.

[8] 杨广志. 航道疏浚中耙吸船耙头高压冲水系统的改进研究[J]. 珠江水运, 2024(4): 141-143.
YANG G Z. Study on improvement of high-pressure flushing system of harrow head of harrow suction ship in waterway dredging [J]. Pearl River water transport, 2024(4): 141-143.

[9] 周忠玮, 尹纪富, 施绍刚, 等. 淹没高压射流垂直切削硬质黏土数值与试验研究[J]. 水运工程, 2019(4): 1-6.
ZHOU Z W, YIN J F, SHI S G, et al. Numerical and experimental study on vertical cutting of hard clay by high pressure water jet under submerged condition[J]. Port & waterway engineering, 2019(4): 1-6.

[10] 倪雁, 夏保琴, 顾磊. 射流水平移动速度对冲刷粉沙特性影响的数值模拟[J]. 水运工程, 2024(1): 71-75.
NI Y, XIA B Q, GU L. Numerical simulation of influence of moving jet horizontal velocity on silt bed scouring[J]. Port & waterway engineering, 2024(1): 71-75.

[11] 杨含侠, 李连祥, 高德松. 黄河潼关河段清淤设备应用及冲沙效率分析[J]. 人民黄河, 2000, 25(7): 24-25.
YANG H X, LI L X, GAO D S. Analysis of application effcet of sedimentation clearing equipment in Tongguan reaches of the Yellow River[J]. Yellow River, 2000, 25(7): 24-25.

[12] 张原锋, 侯素珍, 林秀芝, 等. 射流清淤对提高潼关河段输沙能力的作用[J]. 人民黄河, 2004, 26(6): 29-30.
ZHANG Y F, HOU S Z, LIN X Z, et al. Effect of sedimentation cleaning by jet flow on increasing sediment transporting capacity in Tongguan section[J]. Yellow River, 2004, 26(6): 29-30.

[13] MENTER F R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications[J]. AIAA Journal, 1994, 32(8): 1598-1605.

(本文编辑 王传瑜)