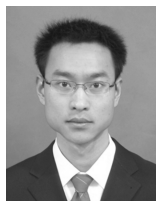


· 施 工 ·



耙吸挖泥船消能箱关键参数 对装舱效果影响的数值分析

胡京招, 曹 蕾, 吴腾伟

(中交疏浚技术装备国家工程研究中心有限公司, 上海 200082)

摘要: 消能箱作为泥舱系统的关键设备, 直接参与疏浚装舱过程, 其出流特性对船舶装舱效果及生产效率有重要影响。以 1.50 万 m^3 耙吸挖泥船的消能箱为研究对象, 采用流场数值模拟手段, 对消能箱主体尺寸、结构形式等影响出流特性的关键参数进行计算分析。结果表明, 在一定范围内, 消能箱管径越大, 消能效果越好, 且出流均匀性得到一定程度改善; 等截面条件下, 圆形截面消能箱的装舱效果显著优于方形截面的设计; 消能箱中部开口指向舱底的速度分量较大, 可通过布置水平挡板进行局部优化。该消能箱设计有助于改善疏浚装舱过程中细粉砂的沉积效果, 节省装舱时间, 减少溢流损失。

关键词: 耙吸挖泥船; 疏浚; 装舱; 消能箱; 泥舱系统

中图分类号: U 664

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)06-0210-05

Numerical analysis of influence of TSHD loading box key parameters on loading effect

HU Jingzhao, CAO Lei, WU Tengwei

(CCCC National Engineering Research Center of Dredging Technology and Equipment Co., Ltd., Shanghai 200082, China)

Abstract: As the key equipment of the hopper system, the loading box directly participates in the loading process, and its discharge characteristics have an important impact on the effect of loading and production efficiency of the ship. Taking the loading box of a 15,000 m^3 trailing suction hopper dredger as the research object, the flow field numerical simulation method is used to calculate and analyze the key parameters such as the main body size and structural form of the loading box, which affect the flow characteristics. The results show that within a certain range, the energy dissipation effect is improved as the diameter of the loading box increases, and the discharge uniformity is improved to a certain extent. Under the condition of equal cross-sectional area, the effect of loading with a circular-section loading box is significantly better than that with a square-section one. The downward velocity component at the middle openings of the loading box is much larger, which can be locally optimized by arranging two horizontal baffles. The loading box design proposed in this study can help to improve the deposition effect in the process of dredging and loading fine silt, save loading time and reduce overflow losses.

Keywords: trailing suction hopper dredger (TSHD); dredging; loading; loading box; hopper system

耙吸挖泥船是疏浚行业的主力船舶, 在航道疏浚、吹填造陆、港口维护等工程中发挥了重要作用。耙吸挖泥船是一种特种船舶, 泥舱系统是其重要组成部分, 具体包括泥井、泥门装置、消能箱、溢流筒等船体结构和疏浚设备。泥舱系统承担疏浚装舱、冲舱排岸的重要功能, 其中消能箱是与疏浚装舱过程直接相关的设备, 泥浆经泥

泵输送、通过装舱管进入到消能箱, 最终排入泥舱。因此, 消能箱结构形式及尺寸设计与泥泵输送工况的匹配性将直接影响疏浚装舱的泥浆沉积效果, 进而影响疏浚生产效率。

我国在疏浚技术研究和疏浚设备研发方面起步晚、积累少, 与荷兰、比利时等疏浚强国相比, 在疏浚船舶设计核心技术及关键施工工艺方面仍

收稿日期: 2022-08-24

作者简介: 胡京招 (1985—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为疏浚装备设计开发与关键技术。

存在差距。目前,国内耙吸挖泥船设计中关于泥舱系统及泥舱关键设备主参数的设定仍然以经验为主,缺乏理论依据支撑和系统性研究。近年来,随着行业的发展,国内主要高校、疏浚企业及相关研发单位(如上海交大、天津航道局、上海航道局、疏浚技术研究中心等)结合应用经验与工况需求,针对现有耙吸船开展了一些泥舱装舱过程的数值模拟或模型试验探索研究^[1-5],一定程度上解决了特殊工况下的装舱溢流问题,取得了一定的成果,但是尚未形成系统性的泥舱及关键设备设计优化技术。

研究消能箱的结构形式、主体尺寸、开口大小与位置分布等关键设计因素对装舱效果的影响,对于提升疏浚装舱的沉积效果、节省装舱时间、减少溢流损失有重要的参考价值。本文针对特定船型,在设计装舱流量下,通过分析消能箱出流特性特征参数,研究消能箱主体尺寸及形状变化对装舱效果的影响规律,提出适用于特定船型与装舱流量的消能箱设计建议。

1 研究基础

通过对国内外现有不同舱容耙吸挖泥船消能箱设计参数的调研与梳理,发现消能箱管径总体上与装舱流量正相关(图1),其中个别设计值偏离趋势线较远,如总装舱流量为5.00万 m^3/h 时,2艘耙吸船的消能箱管径分别为1.10、1.35 m。因此,从现有文献资料可以看出,消能箱管径的设计尺寸随装舱流量的增大而增大,但仍缺乏公认的理论依据或规范指导。本研究将重点针对消能箱管径与装舱流量的匹配性开展计算分析。

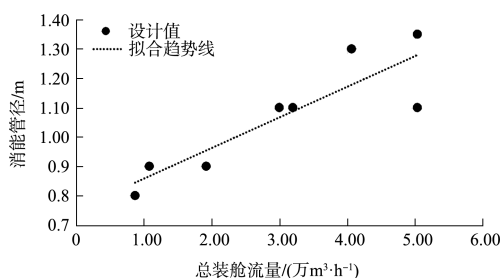


图1 消能箱管径与装舱流量关系曲线

针对消能箱开口朝向,梳理了近年来建造的国内外主要耙吸挖泥船资料。对于泥泵设于艏部的船型,消能箱开口朝向几乎均与泥浆从泥泵至泥舱的输送方向一致,即泥泵安装于艏部,消能箱开口向艏部。笔者对现有成熟船型4 500 m^3 耙吸挖泥船开展了消能箱开口朝向对消能效果影响的数值计算分析。图2为消能箱中心线一侧4个开口的设计,开口朝向艏部,记为F,相反则记为B。以图中4个开口的朝向对算例进行命名:全部朝向艏部,记为F4;全部相反,记为B4;从中心线开始,根据开口朝向,将其他不同算例分别命名为 $F_i B_j$ ($i=1\sim 3, j=1\sim 3$)。消能箱平均出流速度与开口朝向的关系曲线如图3所示,随着开口朝向艏部的面积向艏部转换,平均出流速度渐增。综合考虑出流特性与加工便捷性,后续仍以全部朝向艏部的开口设计为首选方案,下文所述研究也以开口全部朝向艏部为基础。

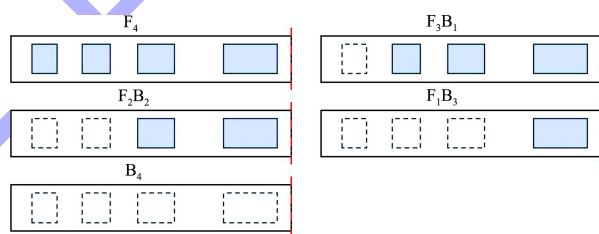


图2 消能箱开口朝向研究算例命名

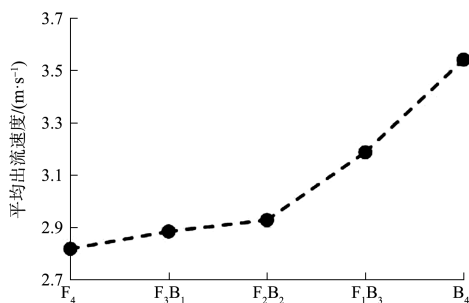


图3 开口朝向对平均出流速度的影响

2 消能箱计算模型

疏浚装舱过程中,针对不同土质采用不同的装舱工艺,即前后装舱的开闭和轮动。针对粉细砂等难沉降土质工况,为了实现更好的沉淀,减少溢流损失,通常以后装舱为主,关闭前装舱。针对易沉降土质(如中粗砂)工况,为实现均匀装

舱,适当轮流使用前后装舱。对于易沉降土质,即便其遭受消能箱出流的冲击,也会迅速再次沉降,总体溢流损失变化不明显;而对于难沉降的细粉砂等,消能箱的出流冲击特性对粉砂沉降时间、运动路径以及溢流损失程度的影响较大。因此,本文针对拟建造的 1.50 万 m^3 等级耙吸挖泥船,选取装载细粉砂常用的艏部单个消能箱作为研究对象,以减小总体平均出流速度及提升出流速度分布均匀性为优化目标,重点针对消能箱的管径、形状开展计算分析。

消能箱三维流体计算域如图 4 所示,包括一段装舱管及消能箱本体,其中装舱管直径为 0.9 m,水平管段长度为 9.0 m,垂直管段长度为 4.4 m,8 个开口以图中数字编号。计算域采用非结构网格划分,壁面进行边界层加密处理。

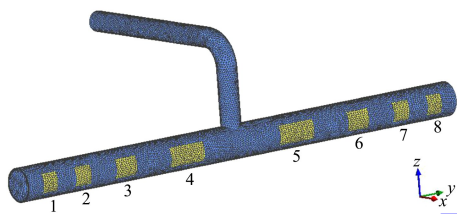


图4 消能箱流道三维模型

考虑到细粉砂装舱工况中砂粒对水流的跟随性较好,砂粒流动特征与清水相似,在消能箱优化计算中仅考虑清水流场,其连续性方程与动量方程见式(1)(2):

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p + \mu \nabla \cdot [\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T] \quad (2)$$

式中: \mathbf{u} 为速度矢量; ρ 为流体密度; p 为压力; μ 为流体动力黏度系数。

基于雷诺时均法(RANS)开展 CFD 计算分析,湍流模型应用 Shear Stress Transport (SST) $k-\omega$ 模型,时间步长取 0.01 s,计算残差下降到 10^{-4} 以下即认为计算收敛。在装舱管入口处设定装舱流量值,在消能箱开口处设定环境压力值。具体计算采用 ANSYS CFX 软件。

3 管径变化对消能效果影响分析

根据 1.5 万 m^3 耙吸挖泥船泥泵输送细粉砂的转速要求,对应的清水设计工况为单泵流量 1.24 万 m^3/h ,即通过消能箱的总装舱流量为 2.48 万 m^3/h 。在此流量下开展消能箱管径影响研究。

参考图 1 数据,装舱流量 2.48 万 m^3/h 对应的消能箱管径约为 1.00 m,以此作为基础管径。经计算,该管径下出口平均流速为 5.6 m/s,局部最大流速达 8.7 m/s。流速分布云图如图 5 所示,位置对称开口的流速分布也呈对称特征,且靠近中心线的 4 个开口的流速相对较大,即 8 个开口的流速分布均匀性较差。

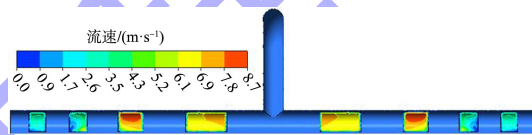


图5 消能箱管径 1.00 m 的出口流速分布云图

本研究以平均出流速度评价消能箱的消能效果,通过对全部开口边界上网格单元的流速进行面积加权平均得到平均出流速度 \bar{v} ;且考虑流量在 8 个开口间均匀分配以提高沉积泥沙的平整度,因此以 8 个开口各自平均流速的标准差 σ 表征出流均匀性:

$$\sigma = \sqrt{\frac{(v_1 - \bar{v})^2 + (v_2 - \bar{v})^2 + \dots + (v_8 - \bar{v})^2}{8}} \quad (3)$$

式中: v_1, v_2, \dots, v_8 分别为开口 1~8 的面平均速度。

保持开口面积不变,以 0.10 m 为间隔逐渐增大消能箱管径至 1.60 m,分析平均出流速度与开口速度标准差随管径的变化规律,结果见图 6。可以看出,在研究管径范围内,随着管径的增大,出口处平均出流速度逐渐降低,对泥舱底部沉积泥沙的总体冲击能量下降;速度标准差也逐渐下降,即速度分布均匀性增加,在管径大于 1.50 m 后速度标准差趋于稳定,进一步提升出流均匀性的空间较小。

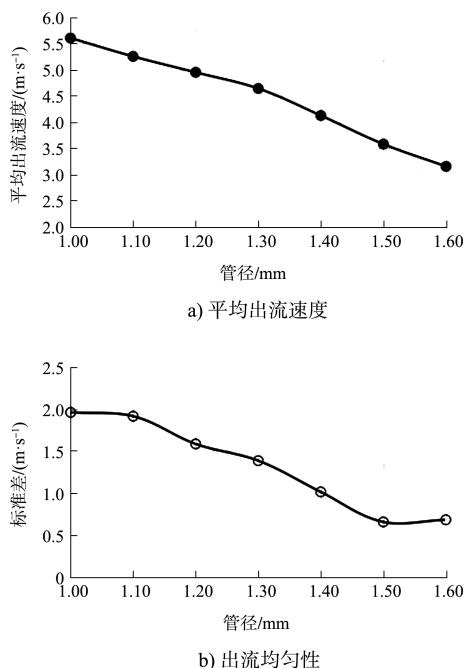


图6 管径对平均出流速度和出流均匀性的影响

管径为 1.50 m 时的出口流速分布云图见图 7, 与图 5 对比可见, 管径增大后出流均匀性明显改善, 除局部小面积范围内存在高于 7.0 m/s 的较大流速或低于 1.0 m/s 的较低流速外, 大部分出口区域的流速值在 2.5~5.0 m/s。因此, 在一定管径范围内, 圆管消能箱管径越大, 出流平均速度越小且分布越均匀, 装舱效果也越好。考虑到大管径消能箱制造成本较高, 体积较大, 且管径增大到一定程度后, 出口流速分布均匀性不再明显改善, 对于本研究中既定的装舱流量, 消能箱管径设计为 1.50 m 相对较为经济。

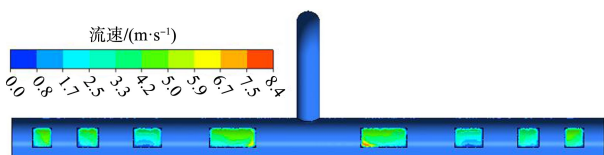


图7 消能箱管径 1.50 m 的出口流速分布云图

4 形状变化对消能效果的影响

近年来建造的耙吸挖泥船消能箱形式以圆管开口为主, 早些年曾有其他消能箱形式, 包括溜泥槽、方形槽等。为了进一步验证圆形管状消能箱的效果, 取等截面面积的方形消能箱进行对比分析。

在上述管径 1.50 m 的圆管消能箱计算结果基础上, 将消能箱改为等截面面积的正方形消能箱 (边长为 1.33 m), 开口布置保持不变, 其出口流速分布云图见图 8。与圆管消能箱的出流特征相比, 方形消能箱中间 2 个开口的最大流速增高且速度梯度较大, 其平均流速约为 7.5 m/s, 明显高于圆管消能箱对应开口的平均流速 (约 4.1 m/s); 两侧 6 个开口的流速较小且分布较均匀, 其平均流速 (约 3.1 m/s) 与圆管消能箱对应值 (约 3.2 m/s) 相近。

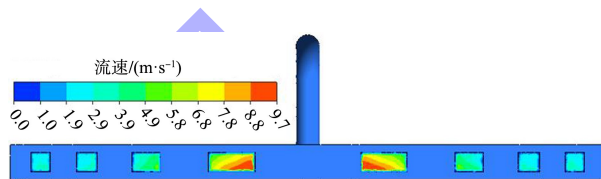


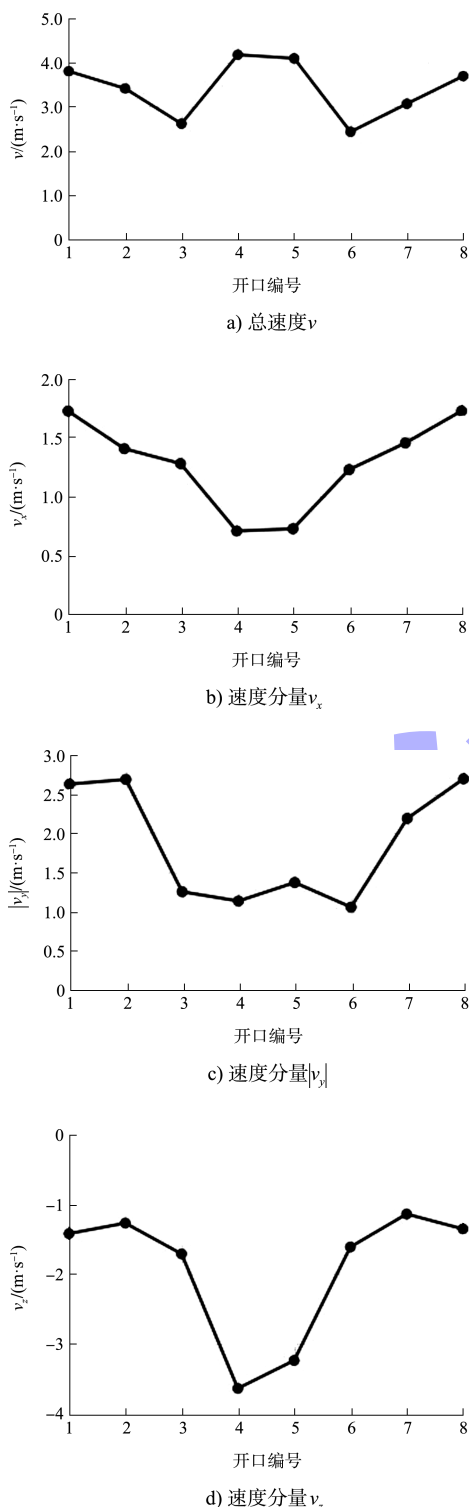
图8 方形消能箱出口流速分布云图

经计算, 方形消能箱的平均出流速度为 4.9 m/s, 是同尺度圆管消能箱的 1.4 倍, 换算为动能则将近为圆管的 2 倍。在出流均匀性方面, 方形消能箱出口速度标准差为 2.0 m/s, 是同尺度圆管消能箱的 3.2 倍。因此, 在等截面面积条件下, 就装舱效果而言, 圆管消能箱优于方形消能箱。此外, 制造圆管消能箱所需钢材量也少于方形消能箱。

5 局部优化分析

根据施工经验, 消能箱各开口的出流方向不同。在装舱流量保持不变的条件下, 基于质量守恒原理, 开口处法向出流速度不变, 消能效果随设计参数的变化体现在另外两个方向的速度分量上。对管径 1.50 m 的圆管消能箱的出口流速 v 进行分解, v_x 表示沿舱长方向的分速度, v_y 表示沿舱宽方向的分速度, v_z 表示沿舱高方向的分速度, 各开口的总流速及分解结果见图 9。结果表明, v 在中部与两端较大; 在水平方向上, v_x 、 v_y 两个分速度均由外侧向中心逐渐下降; 而在垂直方向上, 速度分布规律则相反, v_z 在中间 2 个开口处最大, 在其余开口处均较小, 这是造成总速度在

中间 2 开口处较大的关键原因。因此,可以考虑在中部 2 开口加工过程中保留钢板材料,并将其弯折至水平方向以抵消一部分向下的冲击速度(图 10),起到辅助消能的作用。



注: $|v_y|$ 是 v_y 的绝对值。

图 9 圆管消能箱开口速度分量

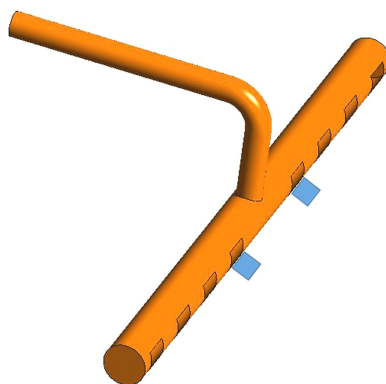


图 10 消能箱中部开口结构优化

6 结论

1) 在一定范围内,消能箱管径与平均出流速度、出流均匀性均成负相关关系,即消能箱管径越大,平均出流速度越低,出流均匀性越好,管径增大到一定程度后,出流均匀性趋于稳定。对于 1.50 万 m^3 耙吸挖泥船,在设计装舱流量 2.48 万 m^3/h 工况下,消能箱管径建议取 1.50 m,继续增大管径则经济性不佳。

2) 对于等截面面积的圆管形消能箱与方形消能箱,在相同工况下,圆管消能箱平均出流速度较低,出口流速均匀性较高,即圆管消能箱装舱效果优于方形消能箱。

3) 消能箱中部 2 个开口存在较大的指向舱底的速度分量,是该开口处总速度较大的关键原因,可通过在该开口下方布置水平挡板的措施来减小该速度分量,起到辅助消能的作用。

参考文献:

- [1] 徐昶,张景明,鲍艳芳.自航耙装舱装置消能效果比较试验[J].中国港湾建设,2006(3):32-35.
- [2] 朱东江,徐立群,倪福生.耙吸船消能箱对装舱影响的数值计算[J].机械与电子,2013(12):78-80.
- [3] 逯新星,魏建峰,陈少军.大型耙吸式挖泥船泥舱格栅设计与装舱溢流损失探讨[J].中国港湾建设,2018,38(10):65-69.
- [4] 于鼎.基于 CFD 的耙吸挖泥船环保阀溢流试验与数值分析[D].上海:上海交通大学,2019.
- [5] 舒敏骅,余竞,张忱,等.耙吸挖泥船泥舱消能结构特性数值研究[J].水运工程,2021(8):207-212.

(本文编辑 王传瑜)