



长吹距工况下大型绞吸船串联施工技术

李 军¹, 张 达¹, 沈 普¹, 王曦巍¹, 张亚楠², 杨正军³

(1. 中交 (天津) 疏浚工程有限公司, 天津 300450; 2. 中交天津航道局有限公司, 天津 300457;
3. 天津市疏浚工程技术企业重点实验室, 天津 300457)

摘要: 天津地区某疏浚工程采用大型绞吸船施工, 最远吹距达 17 km。针对单艘非自航大型绞吸挖泥船无法满足工程长吹距施工的问题, 研究大型绞吸船串联施工技术。通过去除自有闲置绞吸船桥架、钢桩定位等系统, 并增设锚缆定位等辅助设备的方式, 针对串联施工对大型绞吸船进行适应性改造; 通过对串联施工多种工况的理论计算, 确定两船的最佳施工间距范围, 提升大型绞吸船串联系统的生产率和稳定性, 保障工程按期完成。结果表明: 大型绞吸船串联施工设备改造方案及施工工艺满足工程长吹距施工要求, 降低生产成本, 减少船舶停滞, 提升生产率约 24%, 效果显著。

关键词: 大型绞吸船; 长距离吹填; 船舶改造; 串联施工

中图分类号: U 616

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)06-0221-05

Series connection construction technology of large cutter suction dredgers under long discharge distance condition

LI Jun¹, ZHANG Da¹, SHEN Pu¹, WANG Xiwei¹, ZHANG Yanan², YANG Zhengjun³

(1. Tianjin International Marine Engineering Co., Ltd., Tianjin 300450, China; 2. CCCC Tianjin Dredging Co., Ltd., Tianjin 300457, China;
3. Tianjin Key Laboratory for Dredging Engineering Enterprises, Tianjin 300457, China)

Abstract: A dredging project in Tianjin is implemented with a large cutter suction dredger, and the maximum discharge distance of the project is about 17 km. Since a single non-self-propelled large cutter suction dredger cannot meet the requirement of long discharge distance construction, the series connection construction technology of large cutter suction dredgers is studied. By removing the bridge frame, steel pile positioning, and other systems of idle cutter suction dredgers and adding auxiliary equipment such as anchor cable positioning, the adaptive transformation for the large cutter suction dredgers is carried out through series connection construction. Through the theoretical calculation of various working conditions of series connection construction, the optimal construction spacing range of two dredgers is determined. The productivity and stability of the series system of the large cutter suction dredgers are improved to ensure the completion of the project on schedule. The results show that the equipment reconstruction plan and series connection construction technology of large cutter suction dredgers can meet the project requirements of long discharge distance construction, reduce production costs and idle dredgers, and increase productivity by about 24%, with remarkable results.

Keywords: large cutter suction dredger; long-distance hydraulic reclamation; dredger reconstruction; series connection construction

随着我国港口建设的不断发展, 疏浚工程的工况越来越复杂, 对大型绞吸船长排距施工的需求增大。大型绞吸船泥泵系统总排压为 1.6~2.2 MPa, 无法满足 15 km 以上排距的吹填工程, 目前面对

长吹距工程, 国内外通常采用绞吸船串联与其性能匹配的专用接力泵的施工方式^[1], 由于市场上与大型绞吸船匹配的接力泵数量稀少, 且定制专用接力泵成本高、周期长, 因此多采用中小型绞

收稿日期: 2022-07-29

作者简介: 李军 (1985—), 男, 高级工程师, 从事疏浚装备及施工技术工艺研究等工作。

吸船串联多级接力泵施工。但中小型绞吸船产能低，且多级接力泵串联施工操作流程复杂，其中某接力泵故障，将导致整个系统瘫痪，极大地降低时利率。

目前国内疏浚市场存在部分老旧大型绞吸船，其挖掘能力已无法满足需求，长期处于停滞状态，但其输送系统性能良好，与其他大型绞吸船适配性强，串联施工稳定性高。因此将大型绞吸船改造后进行串联施工，可充分发挥集成平台的系统优势，与传统的中小型绞吸船搭配多级接力泵的施工方式相比，效率更高、成本更低、稳定性更强。

本文通过对自有闲置大型绞吸船进行串联施工适应性改造，并与性能相近的绞吸船进行串联作业，总结出完整的绞吸船串联施工改造方案和施工工艺，提高了绞吸船串联系统的生产率和时利率，降低生产成本，减少船舶停滞，实现了该技术在行业内的成功应用，为此类绞吸船长距离吹填工程提供技术支撑。

1 工程概况

天津地区某疏浚工程施工区南北向最大长度2 km，东西向长度约800 m，面积约127.4万 m^2 ，设计底高程-14.6 m，超深0.5 m，超宽5 m，边坡比1:5。施工总平面见图1。



图1 施工总平面

该工程疏浚土质主要为淤泥质土、粉质黏土及粉土，土质级别为1~3级。此工程为长吹距疏浚吹填项目，计划投入绞吸式挖泥船配以800 mm的管径吹填管线，管线铺设包括水上管、水下管、陆地管，长度分别为1.5、2.1、11.4 km，共15.0 km；折算标准岸管长度分别为2.4、2.8、11.4 km，共16.6 km。

2 大型绞吸船串联施工方案设计

由于等效折算标准岸管长度接近17 km，吹距超出船舶设计性能范围，绞吸船的生产效率明显降低。目前的绞吸船无法单独完成，因此将闲置的大型绞吸船进行改造，达到与同类大型绞吸船输送系统串联的目的，加强输送能力以应对长吹距工况。大型绞吸船串联施工过程中遇到以下难点：1)无相关设备选型及船舶改造的经验；2)在保证原有输送能力的前提下，如何通过最小的改动、最低的成本实现既定目标是关键问题；3)由于工期相对紧张，施工船及接力船的效率发挥是影响项目顺利完成的重要因素，既要满足各种极端工况又要充分发挥各个泥泵的输送效率，需要针对施工船与接力船管路中的不同工况，科学、合理布置接力船船位及调试各输送系统参数的合理匹配。

3 设备选型及船舶改造

基于工程排距需要，在目前闲置船舶中，“天达”船与“天滨”船的泥泵设备性能匹配度较高，设计性能参数见表1。

表1 挖泥船泥泵性能参数

船型	水下泵设计排压/kPa	水下泵设计流量/(万 $m^3 \cdot h^{-1}$)	1号舱内泵设计排压/kPa	1号舱内泵设计流量/(万 $m^3 \cdot h^{-1}$)	2号舱内泵设计排压/kPa	2号舱内泵设计流量/(万 $m^3 \cdot h^{-1}$)
“天达”船	330	1.1	580	1.1	580	1.1
“天滨”船	300	1.1	560	1.1	560	1.1

为保证绞吸船串联施工过程中管线连接的便捷和安全，充分发挥大型绞吸船串联施工稳定性高的特点，计划将接力船“天滨”号的水下泵系统移除，施工船“天达”号的管线直接与“天

滨”1号舱内泵连接，串联系统整体共5台泥泵，其中“天达”船3泵，含1台水下泵与2台舱内泵，“天滨”船2泵为2台舱内泵，经计算5台泵可满足使用需求。为便于接力船的位置调整，“天

“天滨”船原有的钢桩定位系统拆除后改用锚缆形式定位,分别在船体四角处加装定位锚及缆车,使接力船的船位调整更加灵活。

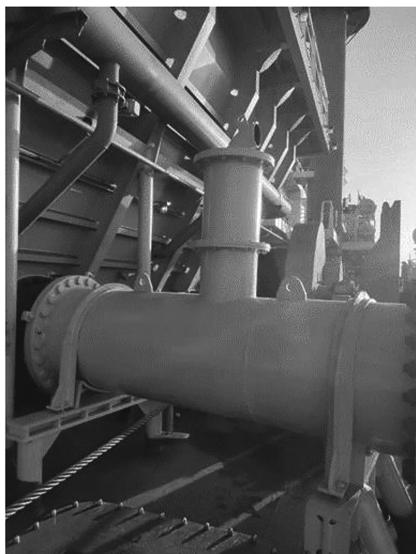
为达到绞吸船串联施工的要求,需将“天滨”船的绞刀桥梁等挖掘系统及钢桩定位系统相关设备拆除,从主体结构、管路系统、接力系统3方面进行改装。

1) 主体结构:在不改变船舶主尺度的前提下,去除船舶挖泥系统和钢桩定位系统相关设备,将船舶首部桥架开槽结构做成浮力舱,并在此位置布置砂斗,用作多功能设备^[2],见图2。

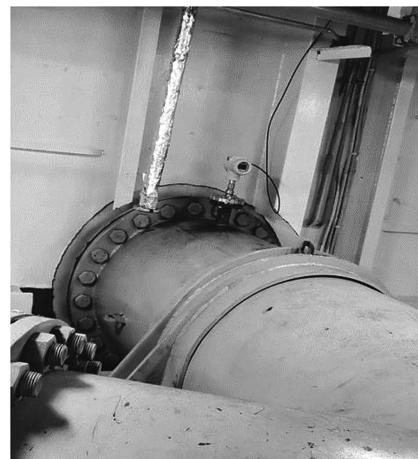


图2 改造后的“天滨”船

2) 管路系统:在“天滨”船的甲板管线上加装排气阀以保护泥泵设备,在1号舱内泵前设置进口压力传感器,便于根据进口压力变化调节船位和泥泵转速,见图3。



a) 水上管接处排气阀



b) 1号泵进口压力表

图3 “天滨”船甲板

3) 接力系统:在砂斗底部侧方开口,将水上排泥管线引至砂斗内侧底部的舱内泵入口,实现管路串联,在2船5泵串联施工时,理论最大排压可达3.6 MPa。

4 接力船位置确定

结合绞吸船施工情况,按照主船泵、主船与接力船间管线、接力船、接力船泵后管线4部分按照清水与泥浆两种不同工况的16种组合分类讨论,计算两船最大与最小距离,见表2。

表2 16种工况组合

工况	主船 泥泵	主船与接力 船之间管线	接力船 泥泵	接力船泵 后管线
1	清水	清水	清水	清水
2	浓度	清水	清水	清水
3	清水	浓度	清水	清水
4	清水	清水	浓度	清水
5	清水	清水	清水	浓度
6	浓度	浓度	清水	清水
7	清水	浓度	浓度	清水
8	清水	浓度	清水	浓度
9	浓度	清水	浓度	清水
10	浓度	清水	清水	浓度
11	清水	清水	浓度	浓度
12	浓度	浓度	浓度	清水
13	浓度	浓度	清水	浓度
14	浓度	清水	浓度	浓度
15	清水	浓度	浓度	浓度
16	浓度	浓度	浓度	浓度

根据 JTS 181-55—2012《疏浚与吹填工程设计规范》^[3], 泥泵总排压与浓度可按下式计算:

$$P_m = \lambda_m \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} + Z - X \quad (1)$$

其中: $\lambda_m = \lambda_w \rho_m$ (2)

$$C = \frac{\rho_m - \rho_w}{\rho - \rho_w} \times 100\% \quad (3)$$

式中: P_m 为输送泥浆时泥泵总排压, m 水柱; λ_m 为管路浆体摩阻系数; L 为折算成标准钢管的长度, m; D 为管线直径, m; v 为管线内流速, m/s; g 为重力加速度, m/s²; Z 为管口中心点位置高程, m; X 为排压测量仪器所在位置高程, m; λ_w 为管路清水摩阻系数; ρ_m 为泥浆密度, t/m³; ρ_w 为海水密度, 取 1.025 t/m³; ρ 为原状土密度, 取 1.75 t/m³。

按照上述 16 种组合分别计算各个工况下两船之间距离范围, 取最危险位置作为边界条件, 计算主船与接力船之间的最大距离与最小距离。满足最大距离的条件是接力船的泵前吸入压力(施工船排压-两船间管线损耗压力) ≥ 100 kPa(根据疏浚与吹填施工规范规定^[4]); 满足最小距离的条件是接力船封水压力(接力船的泵前吸入压力+天滨船 1 号泵与 2 号泵总排压) ≤ 2.5 MPa(“天滨”船设备上限值)。

结合上述公式, 根据实际工程应用, 摩阻系数计 0.013, 折算标准管长度为 16.7 km, 管线直径为 0.8 m, 管口中心点位置与排压测量仪位置均为 3 m, 管内流速范围取 3~6 m/s, 浓度取 30%。计算得出主船和接力船的泥泵流速与排压对应参数, 见表 3。根据参数拟合排压与流速函数关系, 计算出 16 种工况条件下施工船与接力船之间的最大和最小距离见图 4。

由图 4 可知, 工况 7 与 10 即为泥泵内输送介质转换时的工况, 这两种情况引起整个串联系统内排压的强烈变化, 因此管线布设满足上述两种工况下的施工要求, 则其他工况组合均可正常施工。得出两船最佳的合理施工间距范围为 6.6~7.4 km。

表 3 主船与接力船泥泵流速与排压对应参数

流速/ (m·s ⁻¹)	排压/MPa					
	主船 清水	主船与接 力船清水	主船 30% 浓度	主船与接 力船浓度 30%	接力船 清水	接力船 30%
3.0	1.68	3.03	2.01	3.65	1.34	1.64
3.5	1.68	3.01	2.00	3.63	1.33	1.62
4.0	1.67	3.00	2.00	3.61	1.32	1.61
4.5	1.67	2.98	1.99	3.59	1.31	1.60
5.0	1.66	2.96	1.98	3.56	1.30	1.58
5.5	1.64	2.93	1.96	3.53	1.29	1.57
6.0	1.63	2.91	1.94	3.50	1.28	1.56

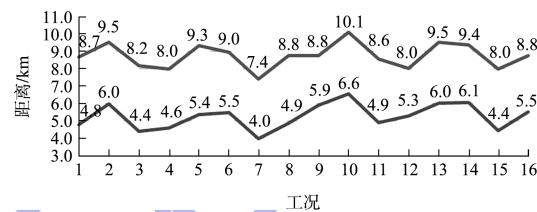
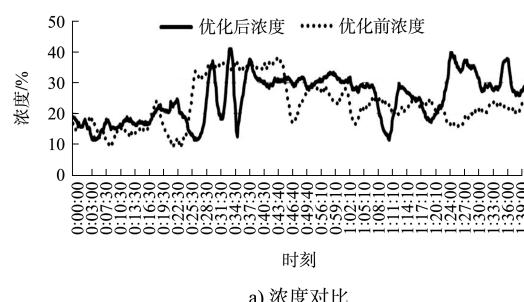


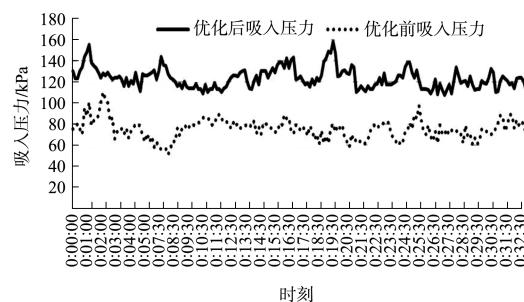
图 4 16 种工况下两船距离范围

5 工艺优化

前期由于施工现场客观因素限制, 串联施工初期接力船“天滨”与施工船“天达”间距折算标准岸管长度达 9.7 km, 超出计算的两船最佳施工间距范围。后期经过协调, 将两船距离调整至计算的最佳施工间距范围内, 并进行相应的工艺优化, 优化前后关键生产参数对比见图 5。



a) 浓度对比



b) “天滨”船 1 号泵泵前吸入压力对比

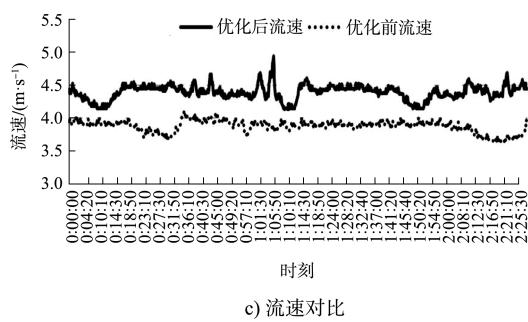


图5 调整管线及船位前后参数对比

对船舶位置、管线和施工工艺进行优化后,串联系统整体施工效率明显提升,“天滨”船1号泵泵前吸入压力由70 kPa提升至120 kPa,平均浓度由22.8%提升至25.1%,平均流速由3.8 m/s提升至4.3 m/s,生产率由1 567 m³/h提升至1 952 m³/h,提升了约24%,见表4。

表4 优化前后参数对比

优化前后	平均流速/(m·s ⁻¹)	平均浓度/%	“天滨”船吸入压力/kPa	生产率/(m ³ ·h ⁻¹)
优化前	3.8	22.8	70	1 567
优化后	4.3	25.1	120	1 952
提升幅度/%	13	10	70	24

6 结论

1) 大型绞吸船串联施工技术在行业内成功应用,工程总结归纳出一套完整的大型绞吸船串联施

工设备改造方案及施工工艺,掌握了大型绞吸船串联施工的关键技术,可为类似工程提供参考。

2) 通过对主船泵、主船与接力船间管线、接力船、接力船泵后管线4部分进行16种工况的分类讨论,计算出施工船与接力船合理施工间距范围。

3) 针对淤泥质土、粉质黏土与粉土土质约16.7 km长吹距施工工况,通过优化管线及船位的布设,绞吸船串联系统整体生产率由1 567 m³/h提升至1 952 m³/h,生产率提升约24%,效果显著。

参考文献:

- [1] 费子豪,吕鑫,李权真.绞吸船串联接力泵船超长排距施工优化[J].水运工程,2022(4): 191-196.
- [2] 田路路,杨立楠.基于绞吸船为母体的大型泵砂船适应性改造和应用[J].中国港湾建设,2022,42(2): 1-5.
- [3] 中交上海航道勘察设计研究院有限公司,中交天津港航勘察设计研究院有限公司.疏浚与吹填工程设计规范:JTS 181-5—2012[S].北京:人民交通出版社,2012.
- [4] 中交天津航道局有限公司,中国水运建设行业协会,中交上海航道局有限公司,等.疏浚与吹填工程施工规范:JTS 207—2012[S].北京:人民交通出版社,2012.

(本文编辑 赵娟)

(上接第198页)

- [8] 谭敏,朱志铎.固化粉土抗拉特性试验研究[J].地下空间与工程学报,2013,9(S2): 1811-1816.
- [9] CONSOLI N C, CRUZ R C, FLOSS M F, et al. Parameters controlling tensile and compressive strength of artificially cemented sand [J]. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 2010, 136(5): 759-763.
- [10] HEJAZI S M, SHEIKHZADEH M, ABTAHI S M, et al. A simple review of soil reinforcement by using natural and synthetic fibers[J]. Construction and building materials, 2012, 30: 100-116.
- [11] 钱晓彤,陈庚,李锋.一种自修复固化土的抗拉强度试验[J].科学技术与工程,2021,21(9): 3770-3775.
- [12] 苏红军.玻璃纤维水泥土劈裂抗拉强度影响因素试验

研究[J].路基工程,2020(1): 71-75, 80.

- [13] 张国龙,任昊铭,章定文,等.玄武岩纤维提升水泥土抗拉性能的试验研究[J].水利水运工程学报,2022(2): 109-116.
- [14] 中国建筑材料科学研究院.用于水泥和混凝土中的粉煤灰:GB/T 1596—2017[S].北京:中国标准出版社,2017.
- [15] 刘思峰,党耀国,方志耕,等.灰色系统理论及其应用[M].5版.北京:科学出版社,2010.
- [16] PARK J, SANDBERG I W. Universal approximation using radial-basis-function networks[J]. Neural computation, 1991, 3(2): 246-257.

(本文编辑 王传瑜)