



绞吸船串联接力泵船超长排距施工优化

费子豪¹, 吕鑫², 李权真¹

(1. 中港疏浚有限公司, 上海 200136;

2. 海洋工程勘测设计院, 自然资源部第二海洋研究所, 浙江 杭州 310012)

摘要: 针对南通港小庙洪上延航道工程一阶段施工项目的超长排距工况条件, 通过对船舶和管线的泥浆扬程、输送阻力损失等水力特性进行分析, 验证“新海蛟”与“航绞接 1 号”采用“2 泵+2 泵”串联施工工艺能保证此次超长排距施工需求, 并推导“航绞接 1 号”的最佳施工位置, 解决绞吸船多级泥泵串联后局部排出压力过高的问题, 并将工艺测算结果和优化措施应用于工程实际。结果表明, 优化后提高了船组的时间利用率和生产率, 取得了较好的施工效果。

关键词: 接力泵船; 长排距; 施工优化

中图分类号: U 616

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)04-0191-06

Construction optimization of super long spacing of cutter suction dredger in series with relay pump ship

FEI Zi-hao¹, LYU Xin², LI Quan-zhen¹

(1. CHEC Dredging Co., Ltd., Shanghai 200136, China;

2. Ocean Engineering Survey and Design Institute, Second Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 310012, China)

Abstract: According to the working condition of super long spacing in the first stage construction project of Xiaomiaohong waterway extension project in Nantong Port, we analyze the the hydraulic characteristics of the ship and pipeline, such as the pressure head of mud pump, transmission resistance loss and etc, verify that the “2 pumps + 2 pumps” series construction technology adopted by the “Xinhaijiao” and “Hangjiaojie No.1” can ensure the construction demand of the super long spacing, and deduce the optimal construction position of “Hangjiaojie No.1”, which can solve the problem that the local discharge pressure is too high after the multi-stage mud pump series connection. We apply the results of process calculation and optimization measures to the follow-up engineering practice. The results show that the optimization improves the hourly interest rate and production rate of ship group, and achieves good construction effect.

Keywords: relay pump ship; long spacing; construction optimization

我国幅员辽阔、河道众多。近年来, 随着国民经济发展迅猛, 国内沿海港口、航道建设由大型化、重型化逐步迈向深水化、绿色化。在疏浚行业, 绞吸式挖泥船挖泥效率高、可控性好, 且因其强大的挖掘能力和适应远距离泵送的优势, 成为全世界应用最广泛的一种挖泥机具。目前, 疏浚施工对环保要求的提高以及输泥路径上的场地限制因素增多, 促使绞吸船需要解决超长排距吹填施工的问题,

为保障长排距施工的安全与稳定, 总结制定更规范、更细致的施工工艺迫在眉睫。

当前最主要解决长排距输送效能不足的方案为绞吸船串联接力泵船施工工艺, 如谷银远^[1]系统性阐述了“新海燕”与“航绞接 1 号”轮组在曹妃甸工程中的技术要点和施工效率分析, 对长排距施工具有指导意义; 吴鹏等^[2]介绍疏浚土长距离管道输送技术在环保疏浚工程中的应用, 彰

收稿日期: 2021-07-13

作者简介: 费子豪(1998—), 男, 从事航道疏浚工程施工管理。

显了长排距施工的环保价值和地形适应性；刘心胜等^[3]介绍绞吸式挖泥船+接力泵船串联施工工艺在连云港 30 万吨级航道一期疏浚工程中的应用，给类似高程大、土质硬等不利工况条件下的吹填上陆施工提供了新的解决方案。

绞吸船串联接力泵船施工工艺中接力泵船位置的确定和船组设备施工效能配套优化是提高生产效率的关键性因素。本文针对南通港小庙洪上延航道工程一阶段的超长排距施工实际，通过数理测算验证泥泵配套是否可行，并分析限制施工的主要因素进行施工优化，可为类似超长排距施

工提供参考借鉴。

1 工程概况

南通港小庙洪上延航道工程(一阶段)主要服务于东灶港作业区、通州作业区以及通州湾港区一港池。起点位于吕四港区 10 万吨级进港航道，终点接入南通港三夹沙南航道，全长 19.2 km，航道通航宽度 246 m，设计底高程-11.7 m，含备淤深度 0.5 m，设计边坡 1:10。通航标准为：满足 5 万吨级散货船乘潮单向通航和 2 万吨级散货船、杂货船全潮双向通航。南通港小庙洪上延航道工程平面布置见图 1。



图 1 南通港小庙洪上延航道工程平面布置

2 设备选用及施工工艺

2.1 设备选用

接力泵船“航绞接 1 号”的船舶总长 54 m，型宽 18 m，总吨位为 1 331 t。绞吸船新海蛟轮总吨位为 3 785 t，总装机功率为 13.926 MW，最大挖深 27 m。接力泵与主船泥泵、水下泵所使用的柴油机均为“卡特彼勒”牌。施工区域和船组设备主要参数为：疏浚土质为淤泥质黏土、粉砂，合计工程量为 126.4 万 m³，近端、远端取泥区吹距(吹距为取泥区至岸上吹填区的实际敷设管线长度)分别约 23.0、27.0 km，设计排距 6 km，接力泵船、主船最大生产能力均为 3 500 m³/h，水下泵、泥泵、接力泵额定转速均为 1 000 r/min。

在疏浚装备方面，针对本标段疏浚范围土质主要为淤泥质粉质黏土夹粉砂和粉砂，采用新型五臂绞刀和刀齿，可以有效切割原状土，最大程度上提高大型绞吸船对当地工况的适应性。

2.2 施工工艺

在南通港小庙洪上延航道工程施工作业中，“新海蛟”与“航绞接 1 号”以串联方式外配 5 艘辅助船舶实现船组联合工作，其施工工艺流程见图 2。

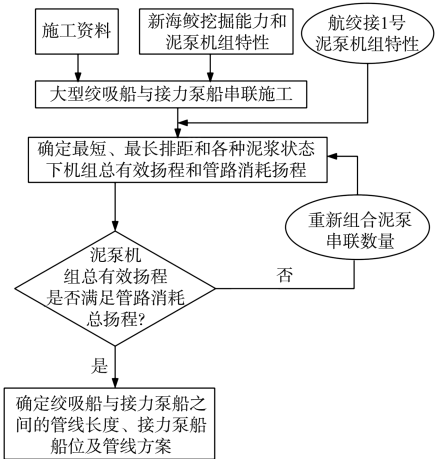


图 2 绞吸+接力泵船施工工艺流程

3 泥泵组合效能验算

3.1 泥泵扬程计算

泥泵清水特性曲线采用二次曲线模拟, 表示为:

$$H_w=aQ^2+b\frac{n}{n_0}Q+c\left(\frac{n}{n_0}\right)^2\tag{1}$$

式中: H_w 为实际转速 n 时的清水扬程; Q 为流量; a 、 b 、 c 为特征曲线在转速 n_0 时的拟合系数。

不同疏浚土泥泵特性曲线由式(2)表示^[4]:

$$H_m=H_w[K_H(\rho_m-1)+1]\tag{2}$$

式中: H_m 为泥泵泥浆扬程; K_H 为土质换算系数, 取 0.75; ρ_m 为泥浆密度, 可由下式计算:

$$\rho_m=(\rho-\rho_w)C+\rho_w\tag{3}$$

式中: C 为泥浆天然体积浓度, 取调试阶段平均实测值 21%; ρ 为天然土平均密度, 取 1.850 t/m³; ρ_w 为清水密度, 取 1.025 t/m³。计算得泥浆密度 $\rho_m=1.198$ t/m³。

绞吸挖泥船和接力泵船泥泵输送泥浆的特性曲线可由式(4)(5)表示:

$$H_{m\text{绞}}=\left[a_1Q^2+b_1\frac{n_1}{n_{01}}Q+c_1\left(\frac{n_1}{n_{01}}\right)^2\right]\cdot[K_H(\rho_m-1)+1]\tag{4}$$

$$H_{m\text{泵}}=\left[a_2Q^2+b_2\frac{n_2}{n_{02}}Q+c_2\left(\frac{n_2}{n_{02}}\right)^2\right]\cdot[K_H(\rho_m-1)+1]\tag{5}$$

式中: $H_{m\text{绞}}$ 、 $H_{m\text{泵}}$ 分别为实际转速 n_1 、 n_2 时绞吸挖泥船、接力泵船泥泵泥浆扬程; a_1 、 b_1 、 c_1 为特征曲线在转速 n_{01} 时的拟合系数; a_2 、 b_2 、 c_2 为特征曲线在转速 n_{02} 时的拟合系数。

将表 1 的泥泵清水扬程代入式(4)(5), 即可算出泥浆扬程。对于本工程“2 泵+2 泵”施工时, 泥浆总扬程 $H'_m=H_{m\text{绞}}+H_{m\text{泵}}=346.85$ m。

表 1 泥泵参数			
船舶	泵机	清水扬程/m	转速/(r·min ⁻¹)
新海蛟	水下泵	74	981
	2 [#] 泵	78	925
航绞接 1 号	1 [#] 泵	75	911
	2 [#] 泵	75	906

注: 各泵机的清水扬程是在 100%转速、流速为 3.44 m/s 时, 查泥泵流速-扬程特性曲线得出。

3.2 管路实耗总水头计算

本工程疏浚施工土质为淤泥质粉质黏土夹粉

砂和粉砂, 灰色, 流塑, 含少量腐殖质, 局部夹薄层粉土。输送阻力损失包含沿程阻力损失 H_f 、局部阻力损失 H_j 、动能引起的阻力损失 H_d 、排高引起的阻力损失 H_h 。总阻力可由下式表示:

$$\begin{aligned}H_Z&=H_f+H_j+H_d+H_h=\\&\sum\xi_{ms}\frac{v_s^2}{2g}+\lambda_{ms}\frac{v_s^2}{2g}\frac{L_s}{D_s}+y(\rho_m-\rho_w)+\rho_m\frac{v^2}{2g}+\\&\sum\xi_{md}\frac{v_d^2}{2g}+\lambda_{md}\frac{\sum L_d v_d^2}{2gD_d}+\rho_m Z\end{aligned}\tag{6}$$

式中: $\sum\xi_{ms}$ 、 $\sum\xi_{md}$ 分别为为吸泥管系、排泥管系局部阻力系数之和; L_s 、 L_d 分别为吸、排泥管系总长; ρ_m 、 ρ_w 分别为泥浆密度、清水密度; λ_{ms} 、 λ_{md} 分别为吸、排管路泥浆沿程阻力系数, 管路泥浆沿程阻力系数可由清水沿程阻力系数与泥浆密度得到: $\lambda_m=\lambda_w\rho_m$, λ_w 可由管径查表内插计算得出, 吸泥管管径为 0.90 m 时 $\lambda_{ms}=0.01416$, 排泥管管径为 0.85 m 时 $\lambda_{md}=0.014455$; y 为挖深; Z 为排高; D_s 、 D_d 分别为吸、排泥管内径; v 为管路出口临界流速; v_s 、 v_d 分别为吸、排泥管平均流速, 由于无实测资料, 在讨论排泥管平均流速时采用最低实用流速(经济流速)作为计算值, 经济流速由泥浆临界流速与经济流速系数 K_v 的乘积得到, 其中淤泥、粉土的 $K_v=1.10$ 。

管路除存在转弯段外还存在吸泥口、闸阀和三通管, 局部损失的计算方式也不相同。吸泥管其他局部损失包括吸泥口、闸阀和三通管等局部损失, 各阻力系数宜采用实测数值, 当无实测值时, 可由《疏浚与吹填工程设计规范》查得。同理利用可查的输送清水局部阻力系数 ξ_w 计算得到输送泥浆时的局部阻力系数 ξ_m , 见表 2。

表 2 部分输送泥浆的局部阻力系数计算结果				
部位	ξ_w	转弯角/(°)	个数	ξ_m
吸泥口	0.192	90	5	0.958
闸阀	0.150	55	2	0.197
三通管	1.250	22	1	1.438
异径管	0.044	10	1	0.216

综上求得吸泥管系局部阻力系数之和 $\sum\xi_{ms}=3.230$, 排泥管局部损失系数之和 $\sum\xi_{md}=7.8053$ 。

根据工况资料确定已知的参数为： C 为 21%，泥沙中值粒径 d_s 为 0.05 mm， y 为 11.7 m， Z 为 4.00 m， D_s 、 D_d 分别为 0.90、0.85 m，原状土密度 ρ_s 、 ρ_m 分别为 2.650、1.198 t/m³， v_s 、 v_d 分别为 3.95、4.43 m/s。

吹填土质的颗粒大小，直接影响输泥管的允许最低流速。针对颗粒细的淤泥质黏土、粉砂，其极限流速在泥浆密度 1.198 t/m³ 的情况下，管内工作流速以 4.43 m/s 为宜。在超长排距下，排泥管远长于吸泥管，经济成本上管理维护费用更高，以排泥管平均流速讨论更为合理。将各数据代入式(6)求得 $H_z=308.79$ m。

综上所述，绘制此工程泥泵管线系统流量扬程曲线见图 3。

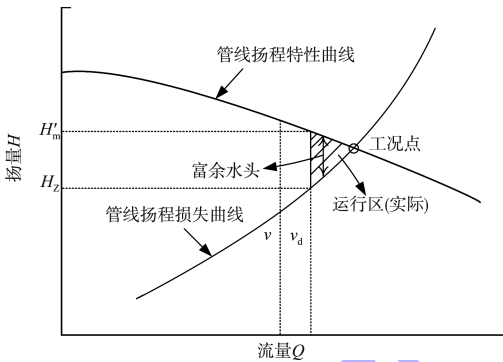


图 3 泥泵流量-扬程曲线

理论上泥泵所提供的扬程与管线损失扬程的交点即是泥泵工作的工况点，但是在实际施工中，泥泵所提供的扬程等于管线损失扬程工况点往往会因为各种限制条件而不满足要求，受限于超长排距，预留的这一部分扬程是为了保留有一定的汽蚀余量，防止“堵管”现象的产生，图中工况点对应的流速大于临界流速 v ，且 $H_z(=308.79\text{ m}) < H_{m\text{绞}} + H_{m\text{泵}}(H'_m=346.85\text{ m})$ ，可知采用“2 泵+2 泵”施工

工作水头较实耗总水头估算值大，满足施工要求。

3.3 接力泵位置确定

理想状态下，为降低能耗、节约成本，首先应考虑让新海蛟轮将泥水混合物泵送至所能达到的最远距离，充分发挥其效能之后由“航绞接1号”的接力泵调整适合剩余排距的泥泵转速实现联合经济输送，但是由于超长排距管线铺设的不确定性，不易配备正好合适的接力泵。因此，确定一个理论的“航绞接1号”布设位置可使接力泵在稳定工作转速下，保证超长排距输送系统的长期稳定运行，不会因为接力泵频繁出现状况而停工调整。根据式(4)(6)推导出接力泵船与主船管线长度计算式：

$$S=(H_{m\text{绞}}-H_{\text{吸}}-H_y-H_d-10)/(\lambda_d \frac{v_d^2 \rho_m}{2gD_d}) \quad (7)$$

式中： $H_{\text{吸}}$ 为吸口局部阻力损失； H_y 为挖深水头损失； λ_d 为“航绞接1号”与“新海蛟”之间排泥管的泥浆沿程阻力系数。在手工测算泵船位置时，需要保证接力泵吸入端压力 $\geq 0.1\text{ MPa}$ ，该接力系统才能正常工作。采用式(7)计算可求得“航绞接1号”与“新海蛟”之间管线长度理论最优值为 $S=7.459\text{ km}$ 。但是在实际施工中，由于受到当地涨落潮水位的影响，接力泵船不一定能布设在最理想位置上。

4 施工效率分析

4.1 原施工参数分析

2021-06-12,“新海蛟”与“航绞接1号”4 泵串联组成的船组系统进场南通港小庙洪上延航道一阶段工程，开工初期实测两船之间管线长度 6.498 km,“航绞接1号”后面水上管子长 1.075 km,岸管长 16.292 km，实现长达 23.9 km 的超长排距施工。收集船组施工数据见表 3。

表 3 船组典型施工数据

日期	浓度/ %	流速/ (m·s ⁻¹)	主船转速/(r·min ⁻¹)		接力泵转速/(r·min ⁻¹)		总排压/ MPa	时间利 用率/%	进尺/ m	油耗/ t	日产量/ 万 m ³	生产率/ (m ³ ·h ⁻¹)
			水下泵	2# 泵	1# 泵	2# 泵						
2021-06-12	17.25	4.28	981	918	911	902	1.86	27.50	43	24.8	0.865	1 310.6
2021-06-13	19.75	4.25	982	916	912	901	1.90	69.58	163	36.0	2.510	1 503.1
2021-06-14	22.00	4.55	983	912	911	903	1.84	30.00	71	17.2	1.030	1 430.6
2021-06-15	19.67	4.23	980	922	910	899	1.83	25.00	88	16.4	0.900	1 500.0

续表3

日期	浓度/ %	流速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	主船转速/($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)		接力泵转速/($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)		总排压/ MPa	时间利 用率/%	进尺/ m	油耗/ t	日产量/ 万 m^3	生产率/ ($\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$)
			水下泵	2# 泵	1# 泵	2# 泵						
2021-06-16	18.00	4.32	981	922	911	904	1.85	81.25	367	36.5	3.150	1 615.4
2021-06-17	24.75	4.50	980	921	913	903	1.84	97.50	260	46.1	3.940	1 683.8
2021-06-18	22.00	4.92	981	922	910	900	1.85	48.33	192	46.2	1.650	1 422.5
2021-06-19	21.57	4.62	979	921	912	905	1.89	32.50	57	17.9	1.050	1 346.2
平均	20.62	4.46	981	919	911	902	1.87	51.46	155	30.1	1.887	1 476.5

注：总排压为接力泵船“航绞接 1 号”的 2# 泵排出压力。

由表 3 可看出：1)实际施工平均流速为 4.46 m/s，这与上述计算的排泥管平均流速理论值 4.43 m/s 一致，验证了效能分析中水力计算的准确性和可行性；2)平均时间利用率仅为 51.46%，计算万立方米油耗为 13.84 t/万 m^3 。施工情况不容乐观，施工效率亟待优化。时间利用率取决于船机设备、绞吸挖泥船和接力泵船的配合以及工况等因素。实际施工中由于接力泵船和管线设备损坏问题(2021-06-13“航绞接 1 号”封水阀泄漏、2021-06-14“航绞接 1 号”附近沉管泄漏、2021-06-16“航绞接 1 号”盘根漏水)，频繁导致施工停滞，使得“新海蛟”未能完全发挥出产能优势。

初步分析是由于主船泥泵输送泥浆所用扬程较大，两船间管路输送清水时的摩阻较小，导致泵前存在富余压力，接力泵输送泥水混合物时吸入压力偏高。考虑接力泵船位在满足吃水限制的情况下应尽可能远离“新海蛟”，保证接力泵设备

和接力泵后管线承压能力不至于损坏和超限，维持整个接力泵船组系统安全、高效和低耗的施工要求。

4.2 改进后效能对比分析

根据“新海蛟”与“航绞接 1 号”的典型施工数据，通过了解现场工况，使用理论计算结果对主船与泵船之间的距离进行优化，并根据现场情况综合考虑。在保证接力泵船泵前压力不小于 0.1 MPa 的前提下，尝试降低接力泵船前的压力值，充分发挥主船和泵船的功效。参考对接力泵距离的测算，同时结合施工各个参数的匹配，最终确定“航绞接 1 号”的实际船位距新海蛟轮的管线加长至 8.427 6 km，其中新海蛟轮施工端点站浮管 0.741 6 km，“新海蛟”到“航绞接 1 号”进水口沉管加长 0.868 km，沉江管总长 7.686 km，绞接后沉管 1.022 km，排距总长延伸至 24.9 km。记录船位变化和管线延伸后的施工数据见表 4。

表 4 调整后船组施工数据

日期	浓度/ %	流速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	主船转速/($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)		接力泵转速/($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)		总排压/ MPa	时间利 用率/%	进尺/ m	油耗/ t	日产量/ 万 m^3	生产率/ ($\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$)
			水下泵	2# 泵	1# 泵	2# 泵						
2021-07-05	30.5	4.27	983	935	922	908	1.95	65.42	136	12.0	2.399 0	1 527.9
2021-07-06	28.0	4.45	981	938	922	905	2.07	96.67	235	61.8	3.948 0	1 701.7
2021-07-07	31.0	4.15	982	934	919	908	1.88	57.50	131	47.5	2.310 0	1 673.9
2021-07-08	32.5	4.16	982	933	920	906	2.30	95.83	258	62.4	4.551 0	1 978.8
2021-07-09	20.6	4.50	981	929	919	907	2.00	68.75	396	49.0	3.659 0	2 217.6
平均	28.5	4.30	982	934	920	907	2.04	76.83	231	46.5	3.373 4	1 820.0

结合表 3、4 对比分析可看出：
1)调整后船组万立方米油耗为 15.31 t/万 m^3 。主要是由于调整后排距加长，船位和管线布置更

为合理，接力泵船和接力泵后管线承压能力极限增大，为充分发挥船组的挖泥疏浚效能，适当提高了主船两个泵机的转速，使船组的泥浆输送耗

能增加。

2) 优化船位和管线布设后避免绞吸船多级泥泵串联后局部排出压力过高的问题, 同时在主船和接力泵船的积极有效沟通下制定了合脱泵流程、加转流程、主船和接力泵船在施工中的注意事项等措施, 保证了船组时间利用率达 77%, 较开工前期增幅近 25%, 平均日进尺量也从 155 m/d 增加至 231 m/d, 提高了船组的泵效, 极大缩短了工期, 创造了良好的经济效益。

3) 对调整后 1 周左右的实际施工工期数据进行整理分析, 发现平均浓度提高到 28.52%, 管阻变大, 加上排距增加, 管线水头损失变大, 导致流速有所下降。但优化后保证了时利率和浓度处于较高水平, 使生产率由原来的平均 1 476.5 m³/h 提高到平均 1 820.0 m³/h, 增幅 23%, 主船施工在 2021-07-07 创造了 4.5 万 m³ 的日最高产量。

4.3 提高生产效率的措施

在本次超长排距施工中, 管路输送能力和施工平稳性为限制施工生产效率的主要因素, 针对上述工程实际遇到的问题, 给出绞吸船串联接力泵船施工工艺中提高生产率和时间利用的建议: 1) 制定合脱泵流程、加转流程、主船和接力泵船在施工中的注意事项, 提高船组之间的沟通配合, 保证船舶的时间利用率; 2) 提高挖泥施工操作人员的业务水平和责任心, 选择合适的绞刀类型、挖泥深度、横移速度、前移距, 以增加泥浆浓度, 减少不必要的施工时间浪费; 3) 工前测试和勘察准备应细致准确, 以便管线铺设科学合理, 尽量减少转弯、爬坡和缩口, 使排距和水头损失最小化。

5 结语

1) 针对南通港小庙洪上延航道工程一阶段施工项目的超长排距工况条件, 通过对泥泵扬程和管路消耗总水头的数理计算, 并结合工程实践结

果, 得出在“新海蛟”与“航绞接 1 号”采用“2 泵+2 泵”串联施工工艺能保证此次工程的超长排距施工需求。

2) 在本次超长排距施工中, 管路输送为限制施工生产效率的主要因素。为提高时间利用率, 保证接力泵设备和接力泵后管线承压能力不至于损坏和超限, 计算了“航绞接 1 号”的理论船位, 避免绞吸船多级泥泵串联后局部排出压力过高的问题。

3) 工艺测算结果应用于工程实际中, 验证结果较好, 生产率增幅 23%, 船舶时间利用率增幅近 25%, 提高了泵效和船组施工能力, 极大缩短了工期, 对类似工程的施工参数控制及设备安全运转具有参考意义, 结合本工程遇到的实际问题归纳总结的提高产量的可行措施也可为类似超长排距施工提供借鉴。

4) 此外, 传统的工前测试仅凭疏浚施工员的经验操作不仅耗时耗力, 且存在诸多安全隐患。可考虑基于数理计算做成实时计算程序或软件, 作为工前辅助设计的参考或驾驶员施工过程的调整依据, 保证后续施工的平稳性和连续性。

参考文献:

- [1] 谷银远. 大型绞吸船与接力泵船在超长排距施工中的效能分析[C]//中国交通建设集团股份有限公司. 2011 年现场技术交流会论文集. 北京: 中国交通建设集团股份有限公司, 2011.
- [2] 吴鹏, 王刚. 疏浚土长距离管道输送技术在环保疏浚工程中的应用[J]. 水运工程, 2017(S2): 33-35.
- [3] 刘心胜, 周林根, 王建平. 接力泵船在连云港 30 万吨级航道疏浚硬质土中的应用[J]. 中国港湾建设, 2014(8): 74-78.
- [4] 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.

(本文编辑 王璁)