

大连太平湾港区复杂土质航道 疏浚工艺研究及应用

王晓萌

(中交(天津)疏浚工程有限公司, 天津 300451)

摘要: 以大连港太平湾港区公共航道工程项目为背景, 针对工程区域土质复杂(以高硬度黏土为主, 含少量中粗砂)、绞吸船施工中黏土易成球、长距离输送(7~9 km)导致管路阻力大等难题展开研究。实际施工采用2艘3 500 m³/h绞吸船串联作业, 采用传统接力船船位定位方法出现吸口压力不足、管线压力波动显著等问题, 制约了双船协同输送能力的充分发挥。对此系统分析了输送过程中管路压力的动态变化规律, 提出了基于实测压力数据的接力船船位动态修正方法, 并结合修正后的泥泵与管路特性曲线, 深入研究了泥泵协同调速机制等关键技术。工程应用表明, 该系列技术使接力船最小吸口压力由76 kPa显著提升至170 kPa, 生产率由1 450 m³/h提升至1 766 m³/h, 有效保障了设备安全运行和施工效率最大化。研究成果成功攻克了远距离输送易成球黏土的施工难题, 为类似复杂工况的疏浚工程提供了宝贵的技术方案与实践范例。

关键词: 绞吸船接力; 泥泵转速; 吸口压力; 水力梯度

中图分类号: U6; U616; U615.351.3; U674.31 文献标志码: A 文章编号: 2095-7874(2026)02-0020-07
doi: 10.7640/zggwjs202602004

Research and application of complex soil type dredging technology in Dalian Taiping Bay Port Area

WANG Xiao-meng

(Tianjin International Marine Engineering Co., Ltd., Tianjin 300451, China)

Abstract: Based on the public channel project of Taiping Bay Port Area in Dalian Port, this paper focuses on addressing challenges such as the complex soil conditions in the construction area (primarily high-hardness clay with some medium-coarse sand), clay balling during cutter suction dredging, and the high pipeline resistance over a long pumping distance of 7-9 km. In the two-vessel tandem operation using 3 500 m³/h dredgers with conventional positioning, insufficient suction pressure and significant pipeline pressure fluctuations limited production efficiency. To resolve these issues, this paper systematically analyzed the dynamic pressure variations in the pipeline pressure during the transportation process, and proposed a dynamic positioning adjustment method for the relay vessel based on real-time pressure data. Combined with revised pump-pipeline performance curves, a coordinated pump speed control strategy was developed. Field application demonstrated that the minimum suction pressure increased from 76 kPa to 170 kPa, and production rates improved from 1 450 m³/h to 1 766 m³/h, ensuring operational safety and maximizing efficiency. The research results have successfully overcome the construction difficulties of long-distance transport of cohesive soils and offer a valuable reference for similar dredging projects under complex conditions.

Key words: cutter suction dredger relay; dredge pump rotation speed; suction inlet pressure; hydraulic gradient

0 引言

起球黏土的长距离输送及绞吸船串联施工等

课题一直是疏浚行业的技术难题, Wilson等^[1]通过研究成球黏土在倾斜管道中的输送特性, 提出了

临界流速与管道倾角的关联模型，为爬坡管布设提供了理论依据；熊庭^[2]针对黏土加气输送技术展开研究，验证了气力辅助对降低管道阻力的有效性；费子豪等^[3]以南通港小庙洪航道工程为例，系统分析了 20 km 超长吹距下绞吸船施工粉土的串联输送工艺，包括接力船理论船位计算方法、绞吸船串联施工操作流程等内容，但其研究对象为均质粉土，泥浆流动性好，所得经验公式难以适用于易成球、阻力大的黏土工况。周光涛等^[4]对成球黏性土的管路输送阻力特性进行了研究，分析已有各种土质浆体输送理论用于成球黏性土管路阻力特性计算可能产生的偏差，并根据分析结果对成球黏性土输送计算公式进行研究，进而提出可用于成球黏性土输送的计算公式。唐达方等^[5]则基于工程实践提炼出具有参考价值的黏土成球判别指标。秦亮等^[6]对成球黏性土的管路输送生产特性及临界流速计算方法进行研究，为黏土堵管控制提供了理论依据。刘少丞等^[7]对起球黏土泥泵特性进行了研究，该研究方法可为起球黏土泥泵扬程水力计算方法提供依据。

尽管已有成果为本领域奠定了基础，但在绞吸船串联施工起球黏土的系统工艺方面，尤其在接力泵船的协同控制策略与管路压力动态响应机制等关键环节，仍缺乏系统性的研究成果。为此，本文以大连港太平湾港区公共航道工程为背景，聚焦高硬度起球黏土在长距离输送中的施工瓶颈，重点研究接力船船位动态修正方法与泥泵协同调速技术，旨在揭示管路压力波动规律并建立优化控制模型，以提升复杂土质条件下的输送效率与系统稳定性。本研究填补了该方向的技术空白，并为类似工程提供可借鉴的工艺方案与实践依据。

1 工程概况

大连港太平湾港区公共航道工程的疏浚总量为 1 070 万 m³。工程区域土质条件复杂，呈明显的层状分布：上层为淤泥质土，下层则为黏土混中砂及块石。下层土体中，黏土占比高达 78%，中砂约占 22%。土工试验表明，该黏土的液性指数为 0.33~0.69，原状土密度 1.95~2.0 t/m³。根据唐达方提出的黏土成球判别指标，此黏土具备显著的起球特性，加之 7.5~9 km 的超长吹距，导致泥浆输送难度极大，对施工工艺提出了严峻挑战。土质土力学指标^[8]数据见表 1。

表 1 土质关键土力学指标统计表

Table 1 Statistics of key geotechnical properties

土质类型	原状土密度/(t·m ⁻³)	含水率/%	标贯击数 N/击	液限/%	塑限/%	塑性指数	液性指数
硬黏土 1	2.00	23.98	7.48	34.02	19.43	14.59	0.33
硬黏土 2	1.95	26.73	14.03	31.02	18.35	12.67	0.69
软黏土	1.79	46.35	1.26	34.43	19.57	14.86	1.85
中砂	2.00	21.00	20.54				

2 工艺研究及验证

2.1 设备选型

绞吸船泥泵的扬程与排泥管线的扬程损耗共同决定了泥浆的输送效率。在起球黏土疏浚项目中，目前国内 3 500 m³/h 绞吸船最大输送吹距约 5 km，输送产量仅 500 m³/h，流速低至 3.8 m/s，甚至出现堵管迹象。选用“天吉船”及“天滨船”进行工艺研究，为提升输送性能，基于 3 500 m³/h 绞吸船泥泵特性曲线，模拟计算 3 500 m³/h“天吉船”3 泵(1 台水下泵+2 台舱内泵)与 3 500 m³/h“天滨船”2 泵(2 台舱内泵)进行串联施工，模拟结果见图 1，船舶性能见表 2。

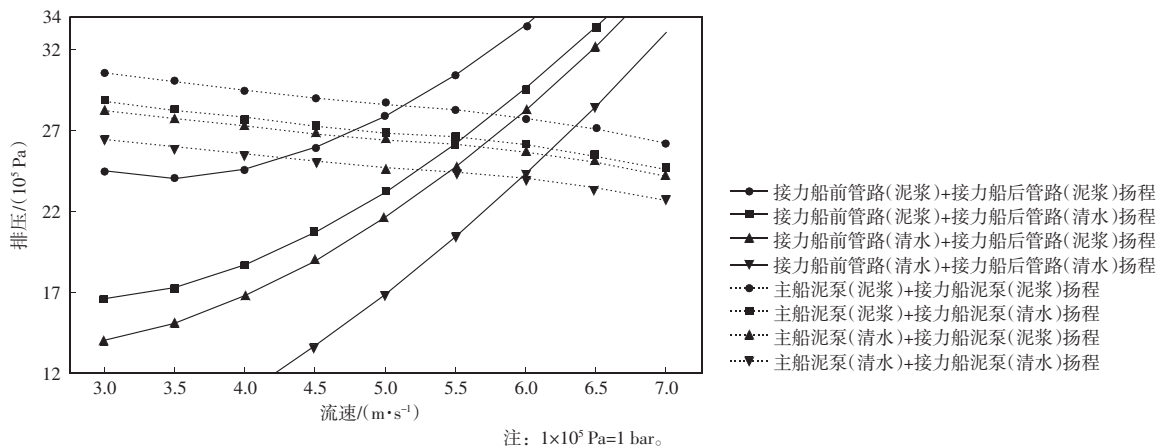


图 1 起球黏土泥泵、管路排压与流速关系曲线图

Fig. 1 Mud pump and pipeline performance curves

表2 “天吉船”及“天滨船”船舶性能表

Table 2 Vessel performance table for Tianji and Tianbin

参数	数值	参数	数值
总长/m	101.8	装机功率/kW	12 396
船宽/m	18.2	舱内泵功率/kW	3 240
型深/m	5.2	舱内泵型号	800WNL
叶轮直径/mm	1 994	水下泵功率/kW	1 900
最大挖宽/m	≤130	水下泵型号	800WNQ
吸排泥管径/mm	800	流量/(m ³ ·h ⁻¹)	12 000
公称产量/(m ³ ·h ⁻¹)	3 500	扬程/m	55

模拟结果确认在长度 9 173.6 m、管径 800 mm 吹填管线下，两船串联施工起球黏土平均流速 4.6 m/s、平均浓度约 18%，在该输送状态下黏土混砂的水力梯度约 35 m/km，而相同浓度和流速下，根据业内工程经验，均质粉土水力梯度约 18 m/km，黏土混砂输送阻力约为粉土的 1.9 倍。同时证明了该方案理论上具有可行性。

2.2 接力船位置的确定

2 条绞吸船串联施工时，接力船船位的传统确定方法通常基于 16 种预设输送工况的模拟计算^[5]。然而，该方法在实际应用中存在明显局限性：1) 大连太平湾土质为黏土混砂(非均质土)，其输送阻力难以精准预测；2) 在实际施工中，16 种预设工况未必全部出现，如当接力船吸口压力最低时，可能表现为接力船前段管线大部分为黏土，接力船后段管线存在部分淤泥。这种压力分布规律受输送流速、管线长度、绞吸船施工周期(倒桩、倒锚和挖泥时间)及土质分布等多因素影响，传统理论计算方法难以准确反映动态工况。

关键系数 K 被定义为接力船后段管线水力梯度与前段管线水力梯度的比值，其主要作用是表征极端工况下泥浆浓度分布的非均匀性，以及因土质不均匀导致的阻力变化特征。 K 值能够量化管线阻力分布差异，是确定接力船最佳位置的核心参数。通过计算 K 的极端值并结合实际压力波动规律，可显著提升接力船船位定位的精度，从而优化串联施工效率。

根据 3 500 m³/h 绞吸船出厂时的泥泵清水特性曲线确定了泥泵压力与流速的基本关系，并结合 JTS 181-5-2012《疏浚与吹填工程设计规范》中关于压力与泥泵转速平方成正比的规定，最终建立了主船排压、接力船吸口压力及排压与泥泵转速、流速及关键系数 K 的关联模型为：

$$\frac{P_3}{P_1} = \frac{-0.003 1V_2^2 - 0.064 2V_2 + 6.438 3}{-0.003 1V_1^2 - 0.064 2V_1 + 6.438 3} \left(\frac{N_3}{N_1}\right)^2 \quad (1)$$

$$\frac{P_6 - P_4}{P_5 - P_2} = \frac{-0.003 1V_2^2 - 0.064 2V_2 + 6.438 3}{-0.003 1V_1^2 - 0.064 2V_1 + 6.438 3} \left(\frac{N_4}{N_2}\right)^2 \quad (2)$$

$$\frac{(P_6 - P_4)V_2}{(P_5 - P_2)V_1} = \left(\frac{N_4}{N_2}\right)^3 \quad (3)$$

$$\frac{\frac{P_6}{L_4}}{\frac{P_3 - P_4}{L_3}} = K \quad (4)$$

式中： P_1 为原主船排压，kPa； P_2 为原接力船吸口压力，kPa； P_3 为现主船排压，kPa； P_4 为现接力船吸口压力，kPa； P_5 为原接力船排压，kPa； P_6 为现接力船排压，kPa； L_3 为现主船至接力船管线路长度，m； L_4 为现接力船后段管线路长度，m； N_1 为原主船泥泵柴油机转速，r/min； N_2 为现主船泥泵柴油机转速，r/min； N_3 为原接力船泥泵柴油机转速，r/min； N_4 为现接力船泥泵柴油机转速，r/min； V_1 为原流速，m/s； V_2 为现流速，m/s。

根据式(1)一式(4)，通过数学推导可得式(5)一式(8)：

$$P_3 = \frac{(P_6 - P_4)P_1}{(P_5 - P_2)} \left(\frac{N_3}{N_1}\right)^2 \left(\frac{N_2}{N_4}\right)^2 \quad (5)$$

$$P_4 = P_6 - \frac{(P_5 - P_2)V_1}{V_2} \left(\frac{N_4}{N_2}\right)^3 \quad (6)$$

$$\frac{N_4}{N_2} = \frac{-0.003 1V_2^3 - 0.064 2V_2^2 + 6.438 3V_2}{-0.003 1V_1^3 - 0.064 2V_1^2 + 6.438 3V_1} \quad (7)$$

$$L_3 = \frac{(P_3 - P_4)KL_4}{P_6} \quad (8)$$

2.3 泥泵转速的调节机制优化

2.3.1 泥泵特性曲线的修正

根据疏浚与吹填工程设计规范，泥泵泥浆扬程宜按式(9)一式(10)计算，其中不同土质下的泥泵泥浆扬程土质换算系数见表 3。

表3 泥泵泥浆扬程土质换算系数表

Table 3 Soil conversion coefficient table for mud pump slurry head

换算系数	土质分类		
	淤泥、黏土、粉土	中、细砂	粗砂、砾石
K_H	0.75	0.50	0.25

$$H_m = H_w [K_H (\gamma_m - 1) + 1] \quad (9)$$

$$\gamma_m = (\gamma - \gamma_w) \rho + \gamma_w \quad (10)$$

式中： H_m 为泥泵泥浆扬程，m； H_w 为泥泵清水扬

程, m; K_H 为泥泵泥浆扬程土质换算系数, 按表 3 确定; γ_m 为泥浆密度, t/m^3 ; γ 为天然土密度, t/m^3 ; ρ 为泥浆天然体积浓度; γ_w 为水密度, t/m^3 。

2.3.2 黏土混中砂黏土阻力的修正

针对黏土混砂, 阻力模型可以参考 Durand 模型^[9](见式(11)), 该公式泥浆水力梯度与固体弗劳德常数、土颗粒浓度有关, 考虑了土颗粒粒径、沉降速度、管径等各类因素对管道输送阻力的影响, 规范推荐该模型的常数 K_D 为 121, 在实际统计中, 验证了 Durand 模型正确性, 仅需要对模型常数 K_D 进行修正就可以满足在各浓度、流速下黏土混砂管道阻力的预测。

$$K_D = \frac{I_m - I_f}{I_f C_{vd}} / \left(\frac{V_m^2}{gD(S_s - 1)} \frac{\sqrt{gd(S_s - 1)}}{V_t} \right)^{-\frac{3}{2}} \quad (11)$$

式中: C_{vd} 为土颗粒浓度; V_m 为泥浆流速, m/s; D 为

管路管径, mm; S_s 为土颗粒密度, t/m^3 ; I_m 为泥浆水力梯度; I_f 为清水水力梯度; K_D 为 Durand 系数; d 为泥沙颗粒粒径, mm; V_t 为泥沙沉降速度, mm/s。

2.3.3 泥泵转速调节机制原理

基于修正后的泥泵、管路系统模型, 绘制主船泥泵(泥浆)+接力船泥泵(泥浆)、主船泥泵(泥浆)+接力船泥泵(清水)、主船泥泵(清水)+接力船泥泵(泥浆)、主船泥泵(清水)+接力船泥泵(清水)、接力船前管路(泥浆)+接力船后管路(泥浆)、接力船前管路(泥浆)+接力船后管路(清水)、接力船前管路(清水)+接力船后管路(泥浆)、接力船前管路(清水)+接力船后管路(清水)的扬程与流量关系曲线, 见图 2。其中 8 条曲线相互交叉共形成 16 个交点^[10], 对应不同施工阶段的典型工况, 其中 3 种典型工况如下:

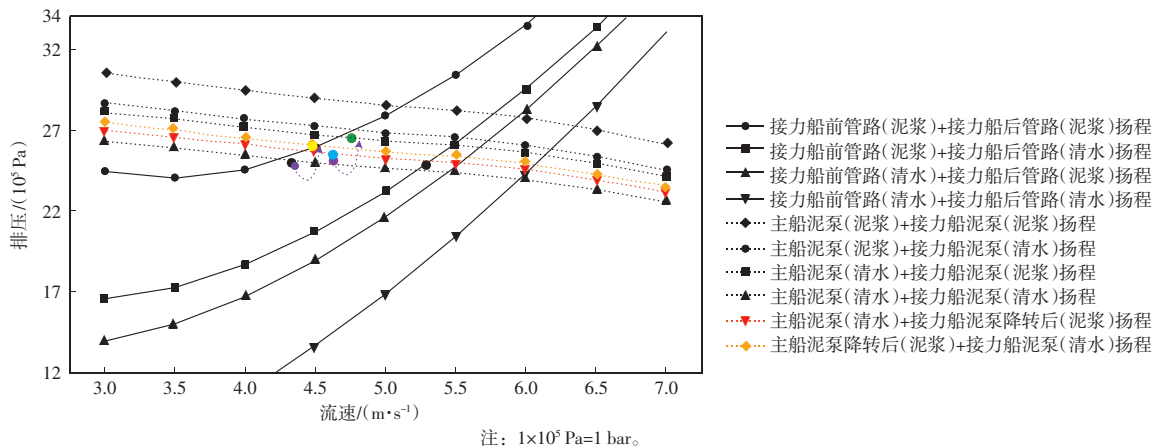


图 2 泥泵、管路排压与流速关系曲线图

Fig. 2 Relationship curves of mud pump, pipeline discharge pressure and flow velocity

1) 最低吸口压力工况(黄色交点)。当主船泥泵(清水)、接力船前管路(泥浆)、接力船泥泵(泥浆)、接力船后管路充满清水时(主船倒锚后首次倒桩), 此时工况区位于图 2 曲线的黄色交点, 吸口压力最低。根据曲线, 流速 4.7 m/s, 总排压 3 300 kPa, 前段管路压力损失 1 700 kPa, 主船排压 1 830 kPa, 接力船吸口压力 130 kPa, 前后段管线水力梯度比为 1.3。

2) 最低流速工况。当主船泥泵(清水)、接力船前管路(泥浆)、接力船泥泵(清水)、接力船后管路充满清水时, 此时流速最低为 4.4 m/s, 高于黏土混砂的临界流速, 无需调节泥泵转速。

3) 最大排压工况(绿色交点)。当主船泥泵(泥浆)、接力船前管路(清水)、接力船泥泵(清

水)、接力船后管路充满泥浆时(主船刚完成倒锚时), 此时工况区位于图 2 曲线的绿色交点, 接力船后段排压最大。根据曲线流速 4.8 m/s, 总排压 3 450 kPa, 前段管路压力损失 1 382 kPa, 主船排压 2 210 kPa, 接力船排压 2 070 kPa, 超过接力船 2 000 kPa 的极限排压。

3 应用及效果

3.1 接力船船位修正模型的应用效果

在太平湾航道疏浚项目中, 前期采用常规接力船船位确定方法(基于 16 种输送工况模拟计算), 当总吹距为 9 173.6 m 时, 理论最优船位为主船与接力船间距 4 139 m、接力船后段管线长度 5 034.6 m, 此时接力船吸口压力理论上应为 140~260 kPa, 绞吸船总扬程随吹距变化曲线见图 3。

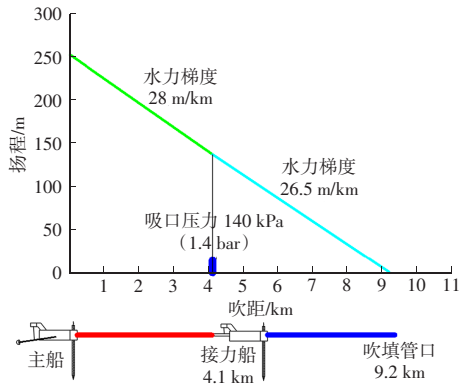


图3 接力船舶位调整前理论计算总扬程随吹距变化曲线图

Fig. 3 Total head vs. pumping distance curve for relay dredger position adjustment

实际施工监测数据显示, 接力船吸口压力波动范围为 76~395 kPa, 吸口压力和 K 值见图 4, 实际 K 值仅为 0.66, 显著低于理论设计值 0.95, 该偏差揭示了黏土混砂土质不均匀性对系统水力特性的显著影响。特别是在吸口压力降至 76 kPa 时, 泥浆流速明显下降, 出现堵管征兆, 表明原定接力船位置存在明显不合理性。这一现象验证了传统船位确定方法在复杂土质(黏土混砂)工况下的适用性局限, 同时也凸显了考虑实际压力波

动进行动态修正的必要性。

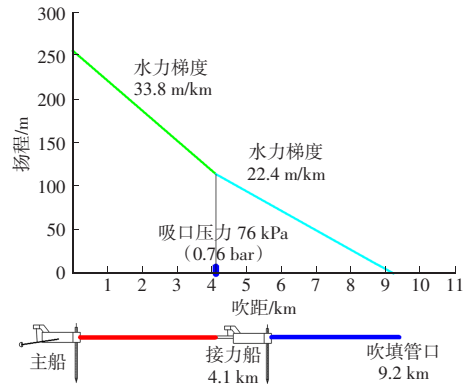


图4 接力船舶位调整前实际总扬程随吹距变化曲线图

Fig. 4 Actual total head vs. discharge distance curve before relay dredger positioning

对此, 统计了各段管线的水力梯度分布及重要节点的压力, 结合上述分析中提出的接力船船位优化计算模型, 得出主船与接力船距离应减少 663.55 m(标准岸管长度), 接力船位置调整前后主要参数对比见表 4, 接力船位置调整前排压曲线见图 5, 接力船位置调整后排压曲线见图 6, 接力船位置调整后绞吸船总扬程随吹距变化曲线见图 7。

表 4 接力船变化前后输送参数对比表

Table 4 Comparison table of conveying parameters before and after relay vessel position adjustment

接力船位置	取值	浓度/%	流速/($m \cdot s^{-1}$)	排压/kPa	吸口压力/kPa	接力船泥泵转速/($r \cdot min^{-1}$)			主船泥泵转速/($r \cdot min^{-1}$)			生产率/($m^3 \cdot h^{-1}$)
						1号泵	2号泵	1号泵	2号泵	3号泵		
调整前	平均值	15.8	5.06	1 458	76~400	287	284	257	327	333	1 450	
	方差		0.35	76								
调整后	平均值	18.3	5.34	1 341	170~450	309	313	249	318	324	1 766	
	方差		0.01	50								

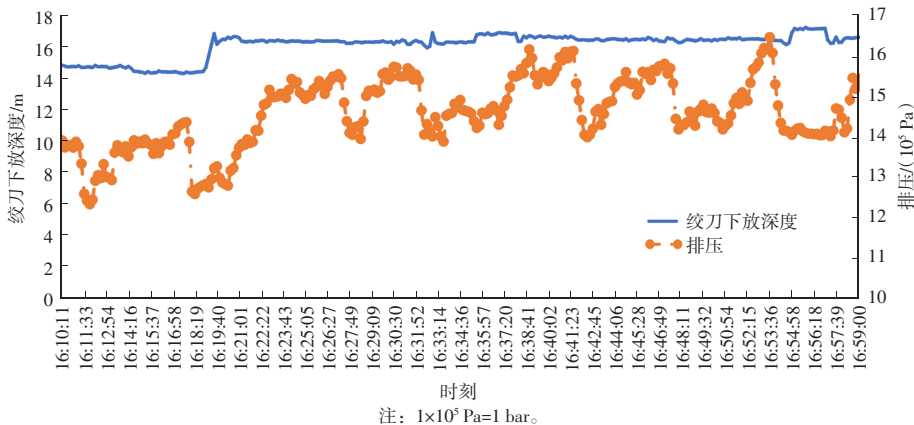


图5 挖深15.4 m下接力位置调整前主船排压随时间变化曲线

Fig. 5 Main dredger discharge pressure vs. time curve before relay vessel positioning

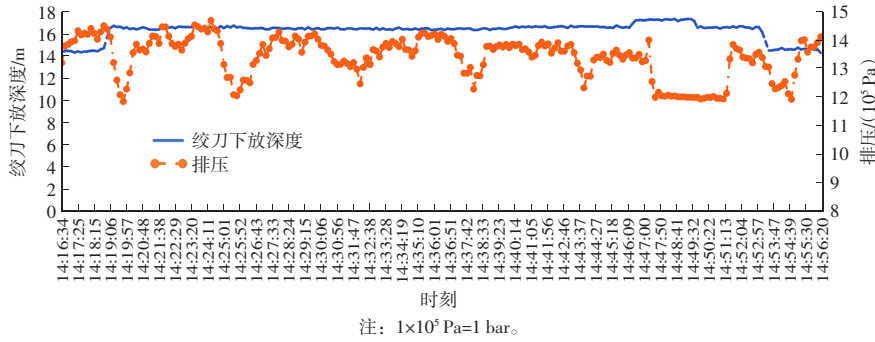


图6 挖深 15.4 m 下接力位置调整后主船排压随时间变化曲线

Fig. 6 Main dredger discharge pressure vs. time curve after relay vessel positioning

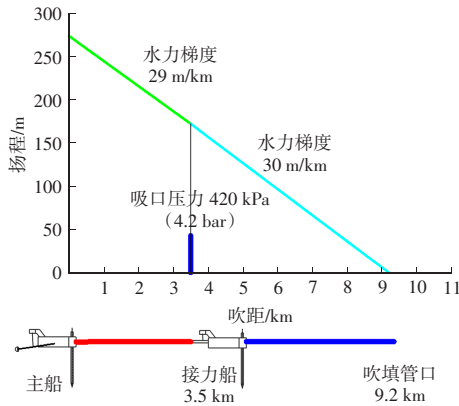


图7 接力船船位调整后实际总扬程随吹距变化曲线

Fig. 7 Actual total head vs. discharge distance curve after relay dredger position adjustment

3.2 泥泵转速调节机制的应用效果

3.2.1 泥泵特性曲线的修正

基于太平洋湾绞吸船接力施工黏土混砂案例，通过统计大量的实际数据反算 K_H ，并得出结论，

泥泵泥浆扬程土质换算系数 K_H 与输送流速及泥浆密度有关，见表 5。

表 5 黏土混砂泥泵泥浆扬程土质实际换算系数 K_H

Table 5 Actual soil conversion coefficient K_H for clay-sand mixture slurry head of mud pump

泥泵转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	密度/ $(t \cdot m^{-3})$	不同流速下的 K_H	
		4.5 m/s	5 m/s
300~310	1.10~1.15	0.82	0.66
	1.15~1.20	0.70	0.51
	1.20~1.30	0.77	0.72

3.2.2 管线阻力的修正

基于船舶实际输送参数统计数据，得出实际 Durand 参数 K_D 与土颗粒浓度 C_{vd} 关系曲线，见图 8，Durand 参数 K_D 在一定浓度范围内基本为定值，与土颗粒浓度不存在线性关系，推荐 Durand 参数 K_D 为 15。

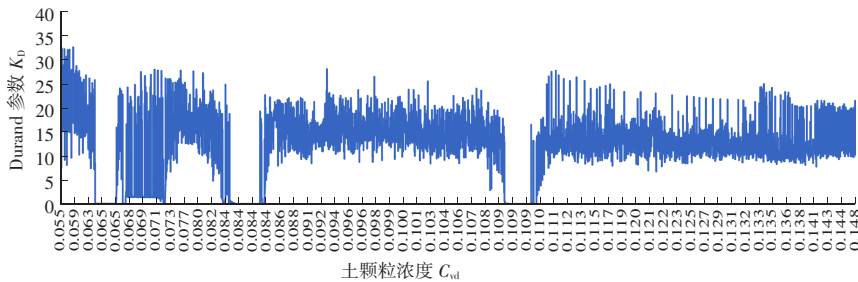


图8 Durand 参数 K_D 与土颗粒浓度 C_{vd} 关系曲线图

Fig. 8 Durand parameter K_D vs. soil particle concentration C_{vd} relationship curve

3.2.3 泥泵转速的调节

针对接力船吸口压力最低及接力船排压最大两工况点泥泵转速调节机制及效果如下：

1) 当吸口压力最低时，接力船的泥泵转速由 340 r/min 降至 325 r/min，根据疏浚与吹填工程设计规范，泥泵扬程与转速平方成正比，泥泵转速

下降后，图 2 黄色工况点将变化至黑色工况点(红色虚线为降转后的泥泵扬程曲线)，流速由 4.7 m/s 降至 4.55 m/s，吸口压力由 130 kPa 升至 400 kPa，接力船压力约 1 770 kPa，吸口压力和接力船排压均满足要求。

2) 当接力船排压最大时，主船的泥泵转速由

296 r/min 降至 281 r/min, 同理, 泥泵转速下降后, 图 2 绿色工况点变化至蓝色工况点(橙色虚线为降转后的泥泵曲线), 接力船排压由 2 070 kPa 降至 1 800 kPa, 排压低于接力船设备限值。

4 结语

1) 文章提出了基于实测压力数据的接力船船位动态修正方法, 显著提升了施工系统的匹配性与稳定性。该方法引入无量纲系数 K 量化管线阻力分布特征, 突破了传统理论模型在黏土混砂复杂工况下的局限性, 实现了船位布置的精准优化。太平湾项目的实际应用表明, 该方法使接力船最小吸口压力由 76 kPa 提升至 170 kPa, 增幅达 123%, 有效解决了吸口负压过大造成的堵管风险, 有效保障了设备安全运行和施工效率最大化。

2) 基于 Durand 阻力模型和《疏浚与吹填工程设计规范》泥泵扬程计算模型, 建立了适用于黏土混砂工况的泥泵-管路系统修正模型, 通过 3 种典型工况的扬程-流量特性分析, 揭示了绞吸船串联施工中的压力波动机理。结果表明, 主船倒锚后进行首次倒桩时, 接力船吸口压力最低, 主船刚完成倒锚时, 接力船压力最高。

3) 提出了泥泵转速协同动态调节机制, 该机制通过接力船泥泵降速调节解决吸口压力不足, 通过主船泥泵降速控制应对排压超限, 确保系统始终运行在安全高效区间。工程应用成效显著, 船舶生产率由 1 450 m³/h 提升至 1 766 m³/h, 流速由 5.06 m/s 提高至 5.34 m/s, 成功攻克了远距离输送易成球黏土的施工难题。

参考文献:

- [1] WILSON K C, TSE J K P. Deposition limit for coarse-particle transport in inclined pipes[C]//Proceedings of hydrotransport 9, BHRA fluid engineering. Cranfield, UK. 1984.
- [2] 熊庭. 绞吸式挖泥船管道加气输送技术研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011.
XIONG Ting. Study on gas-injected transportation technology of cutter suction dredger[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2011.
- [3] 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.
FEI Zi-hao, LÜ Xin, LI Quan-zhen. Construction optimization for super long spacing of cutter suction dredger in series with relay pump ship[J]. Port & Waterway Engineering, 2022(4): 191-196.
- [4] 周光涛, 秦亮, 杨正军. 成球黏性土水力输送阻力特性计算方法[J]. 水运工程, 2019(8): 58-62.
ZHOU Guang-tao, QIN Liang, YANG Zheng-jun. Calculation method of resistance characteristics for hydraulically transport of caly ball[J]. Port & Waterway Engineering, 2019(8): 58-62.
- [5] 唐达方, 秦亮. 疏浚过程中疏浚黏土起球判别指标确定[J]. 水运工程, 2014(8): 176-180.
TANG Da-fang, QIN Liang. Determination of index of dredged clay ball in the process of dredging[J]. Port & Waterway Engineering, 2014(8): 176-180.
- [6] 秦亮, 肖云丰, 杨正军, 等. 成球黏性土长距离输送施工工艺[J]. 中国港湾建设, 2014(8): 64-67.
QIN Liang, XIAO Yun-feng, YANG Zheng-jun, et al. Construction technology for long distance transport of formed ball clay[J]. China Harbour Engineering, 2014, 34(8): 64-67.
- [7] 刘少丞, 秦学明. 管道输送硬塑性黏土水力计算[J]. 水运工程, 2013(4): 179-183.
LIU Shao-cheng, QIN Xue-ming. Hydraulic calculation for pipeline transportation of hard plastic clay[J]. Port & Waterway Engineering, 2013(4): 179-183.
- [8] JTS 181-5—2012, 疏浚与吹填工程设计规范[S].
JTS 181-5—2012, Design code for dredging and reclamation works [S].
- [9] 熊庭, 张梦达, 危卫, 等. 泥浆管道输送特性的 CFD 模拟[J]. 人民黄河, 2018, 40(4): 19-23.
XIONG Ting, ZHANG Meng-da, WEI Wei, et al. CFD simulation of characteristics of pipeline slurry transportation[J]. Yellow River, 2018, 40(4): 19-23.
- [10] 李军, 张达, 沈普, 等. 长吹距工况下大型绞吸船串联施工技术[J]. 水运工程, 2023(6): 221-225.
LI Jun, ZHANG Da, SHEN Pu, et al. Series connection construction technology for large cutter suction dredgers under long discharge distance condition[J]. Port & Waterway Engineering, 2023(6): 221-225.