

## · 施工 ·



# 绞吸船超长距离多点吹填专项方案设计

程旭东，廖朝昶，易伟

(中国铁建港航局集团有限公司，广东 珠海 519070)

**摘要：**随着港口建设、航道维护、岛礁填筑等工程不断朝着更远吹距、更硬底质、更大挖深等复杂工况方向迈进，对疏浚装备选用、技术方案设计及施工组织都提出了更高的要求。针对东营港进港航道现场条件复杂、海况恶劣，且疏浚泥区分散、疏浚土输送距离远、成本控制难度大等问题，通过对超长距离多点吹填施工方案进行疏浚装备比选、管线冗余设计、输送能力计算和施工组合优化，设计了一套技术可行、安全环保、管理便捷、经济实用的绞吸船超长距离多点吹填专项组合施工方案，可为类似疏浚吹填工程提供借鉴。

**关键词：**超长距离；多点吹填；装备比选；优化组合；绞吸船

中图分类号：U 616

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2023)02-0171-05

## Design of special construction scheme of extra-long distance and multi-point filling for cutter suction dredger

CHENG Xu-dong, LIAO Chao-chang, YI Wei

(Chinese Port Railway Bureau Group Co., Ltd., Zhuhai 519070, China)

**Abstract:** As port construction, waterway maintenance, island reclamation and other projects continue to move towards the direction of longer blowing distance, harder bottom, larger digging depth and other complex conditions, higher requirements are put forward for dredging equipment selection, technical scheme design and construction organization. Regarding the complex site conditions of Dongying Port approach channel, poor sea conditions, scattered dredging area, long transport distance of dredged soil, difficult cost control and other problems, the comparison and selection of dredging equipment, pipeline redundancy design, transportation capacity calculation and construction combination optimization are carried out for the construction scheme of ultra-long distance multi-point dredging. A set of special combined construction scheme of extra-long distance multi-point dredging for cutter suction vessel is designed, which is technically feasible, safe, environmentally friendly, convenient and economical, and can provide reference for similar dredging and filling projects.

**Keywords:** extra-long distance; multi-point filling; select dredging equipment; optional regrouping; cutter suction dredger

据统计，目前世界上 70% 的疏浚工程是由绞吸式挖泥船通过水力输送方式完成的。绞吸船具备将疏浚土挖掘输送一次性完成、土质工况适应性好、产能高、施工成本低等特点，在疏浚工程中具有较大的优越性<sup>[1]</sup>。目前，疏浚吹填工程施工通常采用单一船型或 2 种及以上船型联合施工等工艺<sup>[2]</sup>，但随着港口建设、航道维护、岛礁填筑等工程朝着更

远吹距、更硬底质、更大挖深等复杂工况方向迈进，通用装备及工艺已无法满足超长距离多点吹填等特殊项目的需求，这对疏浚装备选型、技术方案设计和施工组织都提出了更高的要求<sup>[3]</sup>。

针对东营港 10 万吨级航道疏浚工程条件复杂、抛泥区远且分散、成本控制难度大等特点，通过疏浚装备比选、工艺优化和技术论证，确定了航道分

段, 设置主支管线, 采用直吹、接力吹、绞吸+耙吸灵活组合施工的专项方案。

## 1 工程概况

东营港 10 万吨级进港航道位于渤海湾西部开敞水域, 兼顾 30 万吨级船舶减载通航, 航道长 15.3 km, 宽 357 m, 疏浚底高程-17.3 m、疏浚总量 2 092 万  $m^3$ , 航道疏浚底质以淤泥质粉土为主, 疏浚土全部用于造陆。工程平面见图 1。

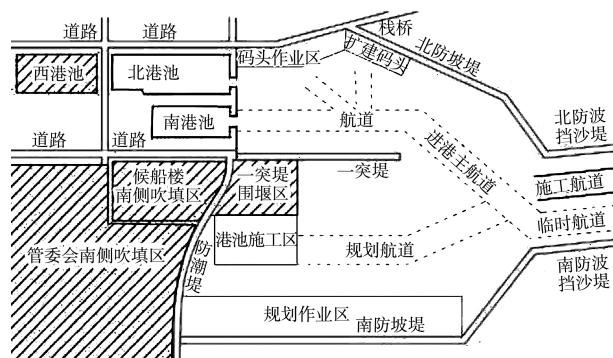


图 1 工程平面

该工程具有以下特点:

1) 抛泥区分散, 疏浚土输送距离远。前期共 4 个抛泥区, 容泥量在 100~230 万  $m^3$ , 交付时间存在不确定性。后期抛泥区位于管委会南侧, 可解决剩余疏浚土存储, 但需完成岸线调整及相关手续后方可使用。抛泥区地理位置分散, 距离航道起点 7.5~10.5 km, 最远排距大于 26 km, 超出国内所有绞吸船输送能力。

2) 船舶进出频繁, 施工干扰大。工程属既有航道疏浚, 危化品船舶往来频繁, 通航流量约 200 艘次/d, 施工干扰及安全管控压力大。

3) 港池水深不足, 环保要求高。港池水深 0~6 m, 无施工专用航道和船舶回旋区, 耙吸船无法一次性抵岸艏吹, 且港池内不允许设置临时储泥坑。

4) 海况恶劣, 有效作业天数少。施工区正对渤

海海峡口门, 常年受外海涌浪侵袭; 夏季突风频发, 难以预测防范; 局部横流瞬时流速达 2.57 m/s, 疏浚船组定位作业困难。据历年气象统计, 绞吸船年均可作业天数仅 220 d。且恶劣海况易造成航道回淤严重, 对成本影响较大。

## 2 方案设计

### 2.1 船舶选型

设备选型及组合工况是方案研究的重点。经调研, 国内类似超大型绞吸船如“天鲸”“8527”“长狮 18”等, 产能可达 4 000  $m^3/h$ , 有效排距可达 15 km, 但市场保有量较少且大部分赴国外施工, 档期受限, 同时月租金高达 500 万元以上。通用型 3 000~3 500  $m^3/h$  绞吸船, 三泵有效排距能达 10 km, 月租金约 280 万元; 两泵最大排距达 7.5 km, 月租金约 160 万元, 且社会资源丰富。专用接力船月租金约 120 万元, 单吸单排超过 9 km, 资源稀少<sup>[4]</sup>。4 种船型使用成本悬殊。

综合本工程特点及设备性价比, 在充分利用自有船舶“铁建绞 01”的前提下, 绞吸船宜选用大型级别, 耙吸挖泥船宜选用中型级别(双耙)。接力泵船的工作流量应与挖泥船泥泵相匹配, 船组总扬程满足总水头损失要求, 优选双吸双排接力泵船(两线路共用), 耙吸、绞吸产能应匹配。

设备选型和组合工艺进行冗余应急设计<sup>[5]</sup>。挖泥船绞刀出现故障时, 能与接力船互换(专用型接力船除外); 接力船舱内泵出现故障时, 从吸入口接入, 总扬程满足最近排距要求; 接力船增加应急液压旁通管线装置, 实现管线瞬间切换; 挖泥船尾管改装为快速接头, 提高效率等。合理的设备选型和灵活的现场资源配置能减少主要设备和生产线路的投入、以及不确定因素造成的停工、窝工损失, 提高作业效率及经济性。高峰期布设 3 条施工线路, 主要设备配置见表 1。

表 1 疏浚设备配置

线路	工艺	设备名称	产能/( $m^3 \cdot h^{-1}$ )	吹距/km	数量/艘	备注
1	直吹	绞吸船	5 000	>10	1	
2	接力吹	绞吸船	3 500	>9+7.5	2	采用双吸双排接力船, 减少 1 艘 2 泵绞吸船
3	联合	绞吸船+耙吸船	绞吸 3 500 耙吸 7 000	>10 或 7.5+7.5	绞吸 1~2 耙吸 1	

## 2.2 临时储泥坑

防淤导堤宽 1.4 km, 大于 2 倍通航宽度, 横向水深变化不大。为减少施工与通航交叉干扰, 在导堤内申办临时航道并布设航标。因港池环保需要, 储泥坑设置在疏浚航道内。为防止港池泥土受落潮流影响而回淤、坍塌至航道, 拟在起点处预留 100 m 后疏浚段。为满足 2 条吹填线路同时连续作业并保证耙吸船卸泥回旋安全, 在 K0+100—K1+200 段纵向设 3 个贯通储泥坑网格, 长 1 100 m×宽 400 m×深 21 m。满足单坑长度大于吹填船长 3 倍和耙吸船长 2 倍、宽度大于耙吸船长 2 倍规范的要求。耙吸船通航水深按 8 m 计算, 单坑储泥容量大于 100 万 m<sup>3</sup>, 满足绞吸船月产能 80% 的规范要求。

## 2.3 管线布置

排泥管作为主要输泥设备之一, 为适应多点吹填、减少纳泥区不确定因素影响、提高作业效率, 设主、支管线, 见图 2。

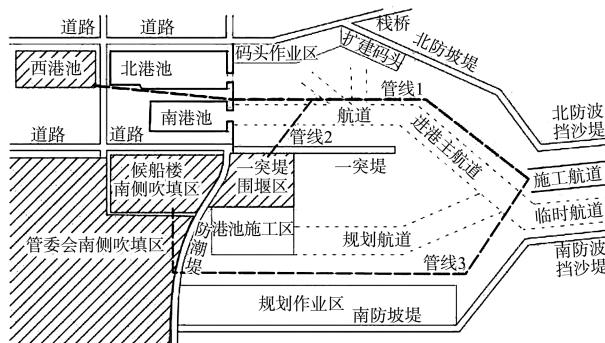


图 2 施工管线布置

1#线主路为西港池、支路为一突堤, 任务完成后进行管线迁改, 主路改至候船楼南、支路不变; 2#线主路为管委会南、支路为防潮堤西; 3#线路视管委会南侧抛泥区交付情况进场。主支线路通过机械闸阀+三通连接切换。管线穿越内外航道时, 为保证通航安全和避免管线折弯, 开挖水下管线槽。

管线在堆场和临时码头组装成段并加装盲板

试压, 确保密封性良好, 每段长 200~500 m, 开工展布或延管时利用拖轮或锚艇浮运至施工现场拼接。因浪大流急, 浮管近似流线形布置, 长度控制在 600 m 以内。为降低自浮管使用成本并减小管阻, 浮管间夹装 1 节 6 m 短钢管。铺设潜管前对预定位置进行扫海测量, 铺设时宜顺直并留有弧度, 避免急弯、死弯。为便于超长潜管故障处理, 顺直段按间距 1 km、跨主航道在两端设置带呼吸阀过桥。潜管与浮管、岸管连接处采用大小径自浮管并抛双向管线锚固定。岸管预先铺设, 岸坡处用地垄钢缆固定。

## 2.4 接力点

接力施工中, 合理布设接力泵船点是关键的环节之一<sup>[6]</sup>。其主要技术应满足以下要求: 1) 为规避恶劣海况对接力船的影响, 接力船宜设置在港池内非通航处。2) 接力泵船不允许执行吸入功能, 余压应大于 0.1 MPa, 否则可能导致泥泵前的管路产生真空, 混合物块体产生巨大的加速度, 泥泵后的管路因真空区混合物严重不足而减速, 在进入加速流体与排出的减速流体相遇点可能产生严重的水锤现象。3) 在最长排距施工条件下, 接力船出口压力不宜过大, 且低于泥泵封水要求, 降低泥泵、管线承压和磨耗。4) 柴油机驱动时应具有良好的转速调节性能, 以适应不同的排距施工安全、高效和降耗要求。

根据现场条件及设备性能, 结合行业及历年经验, 挖泥船与接力船的相对距离宜选择在 4~7 km 之间, 既可以满足最近和最远排距施工要求, 又能充分发挥各泥泵组运行性能, 达到提产降耗目的。

## 2.5 疏浚土方分配及吹距计算

经实测, “铁建绞 01”单船直吹、排距 10.4 km 时, 产能约 2 200 m<sup>3</sup>/h; 排距 12 km 时, 产能约 1 800 m<sup>3</sup>/h。设备配置满足对应航段吹距要求, 见表 2。

表 2 疏浚土分配及吹距

航道里程	疏浚量/ 万 m <sup>3</sup>	抛泥区	容泥量/ 万 m <sup>3</sup>	最大吹距/km				备注
				浮管	潜管	岸管	小计	
K0—K1+200	432	1#	200	0.60	7.00	2.80	10.40	直吹、近挖远吹、远挖近吹
		2#	120	0.60	7.95	0.05	8.60	
		3#	112	0.60	9.00	1.00	10.60	

续表2

航道里程	疏浚量/ 万 m <sup>3</sup>	抛泥区	容泥量/ 万 m <sup>3</sup>	最大吹距/km				备注
				浮管	潜管	岸管	小计	
K1+200—K6+300	820	3 <sup>#</sup>	118	0.60	9.85	1.50	11.95	
		5 <sup>#</sup>	100	0.60	9.85	4.00	14.45	接力吹
		4 <sup>#</sup>	602	0.60	14.95	1.00	16.55	
K6+300—K15+300	840	4 <sup>#</sup>	840	0.60	9.85	1.00	11.45	绞吸+耙吸联合

## 2.6 经济对比分析

仅以 K1+200—K6+300 航段为例, 采用绞吸+耙吸联合施工, 综合成本约 33 元/m<sup>3</sup>, 采用接力施工, 综合成本约 23 元/m<sup>3</sup>, 节约 8 200 万元, 可降低项目成本 11% 以上。如后期进场船舶实测数据好于预期, 经资源重组, 可在不大幅增加每万立方米油耗的前提下, 延展直吹或接力吹航段边界, 或采取先绞吸加深、后耙吸回填平衡土方方式, 相应减少接力吹或绞吸+耙吸施工量, 成本将进一步降低。

## 3 泥泵管线输送能力计算

寻求泥泵与管道的泥浆特性关系, 满足泥泵管路的合理工况, 对提高生产率、降耗具有十分重要的意义<sup>[7]</sup>。综合泥泵的低速限制、管路临界流速和真空限制等因素, 绘制泥泵流量/扬程特性曲线与排泥管路流量/水头特性曲线, 其交汇区即泥泵管路工作区。计算管路输送泥浆实耗总水头并与泥泵总扬程对比, 验证直吹、接力吹技术的可行性。

### 3.1 管路沿程阻力系数计算

弯管局部清水水头损失系数为:

$$\xi = \left[ 0.131 + 0.163 \cdot 2 \left( \frac{d}{R} \right)^{7/2} \right] \left( \frac{\theta}{90} \right)^{1/2} \quad (1)$$

式中:  $\xi$  为局部阻力系数;  $d$  为管道直径, m;  $R$  为转弯半径, m;  $\theta$  为转弯角, (°)。

泥浆沿程阻力系数  $\lambda_m$  为:

$$\lambda_m = \lambda_w \rho_m \quad (2)$$

式中:  $\lambda_m$  为管线输送泥浆时的沿程阻力系数;  $\lambda_w$  为管线输送清水时的沿程阻力系数, 按规范取值;  $\rho_m$  为泥浆密度, kg/m<sup>3</sup>。

以“铁建绞 01”为例, 阻力系数计算结果:

1) 吸泥管局部阻力系数。将吸泥管各弯管段数据代入式(1)中, 可计算出局部水头损失系数; 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, 无实测值时, 依据规范查得。最终

求得吸泥管系局部阻力系数之和  $\Sigma \xi_s = 5.854$ 。

2) 排泥管局部阻力系数。排泥管局部损失的计算方法与吸泥管相同, 将其转弯角参数值代入式(1)可得水上、水下、岸管局部阻力系数, 从而求得排泥管局部清水阻力系数之和  $\Sigma \xi_d = 4.352$ 。

3) 清水沿程阻力系数。依据规范查得  $\phi 900$  mm 钢直管清水沿程阻力系数  $\lambda_w = 0.012$ 。

4) 吹填施工时, 根据不同的泥浆密度按式(2)计算。

### 3.2 单船吹填计算

按照  $\phi 900$  mm 计算疏浚土在不同泥浆体积浓度下的最低实用流速和产量, 综合平衡产量、磨损、泥泵功率及耗油量的关系, 当采用较大流速能提高生产率而单位油耗又不明显增加时, 宜采用较大流速, 否则可能造成功率的浪费和更大的磨损<sup>[8]</sup>。以“铁建绞 01”为例, 排高按 8 m 计算, 依据每个纳泥区的管线长度和不同泥浆体积浓度计算实耗总水头。

本工程土质为淤泥质粉土, 天然土密度取 1.75 t/m<sup>3</sup>, 实耗总水头采用式(3)计算。

$$h_m = \Sigma \xi_{ms} \frac{v_s^2}{2g} + \lambda_{ms} \frac{v_s^2}{2g} \cdot \frac{L_s}{D_s} + y(\rho_m - \rho_w) + \rho_m \frac{v^2}{2g} + \Sigma \xi_{md} \frac{v_d^2}{2g} + \lambda_{md} \frac{\Sigma L_d v_d^2}{2g D_d} + \rho_m Z \quad (3)$$

式中:  $h_m$  为管路输送泥浆实耗总水头, m;  $\Sigma \xi_{ms}$  为吸泥管局部阻力系数之和;  $v_s$  为吸泥管平均流速, m/s;  $g$  为重力加速度, m/s<sup>2</sup>;  $\lambda_{ms}$ 、 $\lambda_{md}$  为吸、排管路泥浆沿程阻力系数;  $L_s$  为吸泥管直管长度, m;  $D_s$  为吸泥管内径, m;  $y$  为水面距海底距离或挖深, m;  $\rho_m$  为泥浆密度, kg/m<sup>3</sup>;  $\rho_w$  为清水密度, kg/m<sup>3</sup>;  $v$  为管路排出口流速, m/s;  $\Sigma \xi_{md}$  为排泥管系局部阻力系数之和;  $\Sigma L_d$  为所有排泥管线长度总和, m;  $v_d$  为排泥管平均流速, m/s;  $D_d$  为排泥管内径, m;  $Z$  为排高, m。实耗总水头计算见表 3。

表3 实耗总水头计算

航道里程	抛泥区	排距/km	不同泥浆体积浓度实耗总水头/m			
			15%	20%	25%	30%
K0—K1+200	1#	10.40	128	141	152	162
	2#	8.60	112	123	133	142
	3#	10.60	132	145	156	167
K1+200—K6+300	3#	11.95	146	160	172	185
	5#	14.45	169	186	200	215
	4#	16.55	194	213	230	246
K6+300—K15+300	4#	11.45	141	154	167	178

注: 下划线数字为“铁建绞01”单船满足对应吹距施工要求。

### 3.3 接力施工计算

由实耗水头计算表可知, 在航段 K0—K1+200 内, “铁建绞 01”直吹满足排距要求。K1+200—K6+300 段则需加接力泵, 接力船扬程  $\geq$  实耗总水头-挖泥船扬程。

根据不同的泥浆体积浓度计算接力泵的最低扬程需求, 从而选择合适的接力泵船。通过计算, 并对照典型代表船性能参数, 选择三泵+两泵绞吸船组合接力, 总扬程通常在 265 m 以上, 大于排距 16.55 km、浓度 30% 所需水头 246 m 要求, 串联接力工艺可以满足正常施工, 且技术经济性较好。

### 3.4 工效分析

挖泥施工总时间包括挖泥时间、生产停歇时间以及非生产停歇时间。本工程疏浚吹填量 2 092 m<sup>3</sup>, 合同工期 448 d。绞吸船按年有效作业天数 220 d、日有效作业时间按 17 h 计; 耙吸船按年有效作业天按 292 d、每天 5 个航次计。参照选型目标船性能, 结合历年经验值和现场试吹效果计算产能。

计算结果为: 1) 1# “铁建绞 01”额定生产能力 5 000 m<sup>3</sup>/h, 实际产能按 2 200 m<sup>3</sup>/h 计(直吹), 可完成疏浚量约 1 010 万 m<sup>3</sup>; 2) 2# 绞吸船额定生产能力 3 500 m<sup>3</sup>/h, 实际产能按 1 800 m<sup>3</sup>/h 计(接力吹), 可完成疏浚量约 769 万 m<sup>3</sup>; 3) 3# 绞吸船额定生产能力 3 500 m<sup>3</sup>/h, 实际产能按 2 000 m<sup>3</sup>/h 计(绞/耙联合), 可完成疏浚量约 730 万 m<sup>3</sup>; 4) 耙吸船舱容 7 000 m<sup>3</sup>, 装舱时间 1 h, 泥泵流量 1.8 万 m<sup>3</sup>/h, 耙吸浓度 40%, 溢流率 40%, 每天按 5 个航次, 可完成疏浚量约 1 025 万 m<sup>3</sup>; 5) 耙吸船抛泥量(绞吸倒吹量)为 615 万 m<sup>3</sup>  $<$  730 万 m<sup>3</sup> 绞吸产能要求。3 条生产线吹填量合计为 2 804 万 m<sup>3</sup>  $>$  2 092 万 m<sup>3</sup>, 保证系数 1.34, 满足工期要求。

## 4 结论

1) 航道分段采用直吹、接力吹、绞吸+耙吸 3 种工艺灵活组合的施工方案。K0+100—K1+200 段, 排距 11 km 以内, 采用通用三泵绞吸船直吹并加深为临时储泥坑, 工艺简单、资源配置少、产能高、成本极低; K1+200—K6+300 段, 排距 11~17 km, 采用通用三泵+两泵绞吸船串联接力方式, 技术可行, 可选择的装备性价比高, 生产效率高、经济效益好; K6+300—K15+300 段, 排距 17 km 及以上, 采用通用三泵绞吸船(或两泵接力)联合耙吸船施工, 技术成熟, 可选择的装备性价比高, 且耙吸船受风浪影响及通航船舶干扰小、薄泥层疏浚效率高, 成本可控。

2) 航段分界点应根据进场船舶的试吹实测数据、抛泥区交付时间和业主进度要求, 现场实时调整, 可减少设备、线路投入及耙吸船联合施工量, 提高效益。

3) 排泥管设置主支管线, 接力工艺进行冗余设计, 可适应多点吹填, 受纳泥区影响小, 船舶利用率高, 成本低。

## 参考文献:

- [1] 中交上海航道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.
- [2] 谭必五.耙吸船与电吹船组合吹填成陆在圈围工程中的应用[J].水运工程, 2017(5): 178-181, 190.
- [3] 中国水力发电工程学会(机械疏浚专业委员会).疏浚与吹填工程技术规范: SL 17—2014 [S].北京: 中国水利水电出版社, 2014.
- [4] 宋俊强, 刘文, 杨正军.绞吸挖泥船串联接力泵船远距离输送工艺[J].水运工程, 2017(5): 173-177.
- [5] 张明, 陈梦.自航绞吸挖泥船“天鲲号”电力驱动系统冗余设计[J].中国港湾建设, 2018, 38(3): 66-69.
- [6] 陈益钟, 张志芳.清淤疏浚中接力泵船位置确定及施工方法探讨[J].人民长江, 2015, 46(8): 92-94.
- [7] 刘文, 陈永利, 刘西平.绞吸船长排距施工控制工艺优化[J].水运工程, 2019(2): 177-180.
- [8] 周禹扬, 张蓓.绞吸船施工效率影响因素分析[J].中国水运(下半月), 2017, 17(5): 317-318.