## 大型绞吸船黏性土质边坡高精度一次成型技术

徐 斌,李 军,李金峰,刘 吴,沈 普

(中交 (天津) 疏浚工程有限公司, 天津 300450)

摘要:伊拉克某疏浚工程采用大型绞吸船进行基坑边坡施工,工期仅为3个月。针对边坡精度要求高、坡比复杂、黏性 土质不易坍塌成坡的问题,进行大型绞吸船黏性土质边坡高精度一次成型技术的研究。通过对绞刀横移速度、绞刀起升速 度进行修正,实现绞刀横移速度与起落桥速度的匹配控制;通过开展典型施工和大量现场实验,确定上坡正刀挖掘、上坡 反刀挖掘、下坡反刀挖掘、下坡正刀挖掘4种施工方法在不同挖深情况下的最佳绞刀横移速度,保证边坡质量。结果表明, 该技术可实现手动边坡施工一次成型,满足工程高精度、短工期的要求,降低生产成本,平均超宽由原来的2.0 m 减小至约 0.5 m,边坡修复效果显著。

关键词:大型绞吸船;黏性土质;边坡施工;一次成型技术中图分类号: U615.35+1文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)05-0194-06

# High-precision one-time forming technology for cohesive soil slope of large cutter suction dredger

XU Bin, LI Jun, LI Jinfeng, LIU Hao, SHEN Pu

(Tianjin International Marine Engineering Co., Ltd., Tianjin 300450, China)

**Abstract:** A dredging project in Iraq uses large cutter suction dredger to construct foundation trench slope, and the construction period is only three months. To solve the problem that the slope accuracy is high and the cohesive soil is not easy to collapse into slope, we decide to study the high-precision one-time forming technology of large cutter suction dredger for foundation trench cohesive soil slope. By correcting the transverse speed of the cutter and the lifting speed of the cutter, the matching control of the transverse speed of the cutter and the speed of the bridge frame is realized. By carrying out typical construction and a large number of field experiments, the optimal cutter traverse speed of four construction methods under different excavation depths is determined, which includes uphill normal cutter excavation, uphill reverse cutter excavation, downhill reverse cutter excavation and downhill normal cutter excavation, and the quality of the slope is guaranteed. The results show that this technology can meet the requirements of high precision and short construction period, and reduce the production cost. The average super width is reduced from 2. 0 m to about 0. 5 m, and the slope repair effect is remarkable.

Keywords: large cutter suction dredger; cohesive soil; trench slope construction; one-time forming technology

国内外传统的边坡施工方法为阶梯法<sup>[1]</sup>,绞 吸船在进行边坡施工时,按照土方平衡的原则分 台阶进行开挖,通过上方的待坍塌土方填补下方 的设计超挖土方,形成设计坡比。但此种方法精 度较低,需依靠潮流或重力作用使疏浚土自然塌 坡,且时间跨度大,不适用于工期短、精度要求 高的疏浚工程。

国际上,荷兰 IHC 等公司开展了自动挖掘控 制器(automatic cutter controller, ACC)和自动泵送 控制器(automatic pump controller, APC)等一系列

收稿日期: 2024-07-16

作者简介:徐斌 (1981--),男,高级工程师,从事疏浚装备及施工技术工艺研究等工作。

智能疏浚技术的研究<sup>[2]</sup>。国内少数疏浚船如"天 鲲号"等装配了无人操控自动挖泥系统<sup>[3]</sup>,可操 纵绞刀同时进行横移、升降<sup>[4]</sup>,通过绞刀沿边坡 设计线开挖,使边坡一次成型,无阶梯状。但此 方法仅适用于少数配有自动挖泥系统的先进疏浚 船舶<sup>[5]</sup>,通过手动进行边横移边起放桥梁的方式, 对黏土边坡进行一次成型施工在国内疏浚行业中 非常少见。

本文通过研究绞刀横移速度<sup>[6]</sup>与起落桥速度 匹配控制,确定不同挖深情况下的最佳开挖方式 及绞刀横移速度,总结形成大型绞吸船黏性土质 边坡高精度一次成型技术,保证边坡施工质量, 以期为大型绞吸船高精度边坡施工提供技术支撑。

#### 1 工程概况

伊拉克某疏浚工程主要包括码头、港池区域 及航道部分的疏浚,总疏浚量1.067亿m<sup>3</sup>。码头 侧边坡最大超宽0.5m,底槽宽8.0m,最大超深 0.3m,坡比分别为1:3.0和1:3.5,码头边坡局 部断面见图1。



注: M.S.L 为平均海平面, L.A.T 为最低天文潮位。

图 1 码头边坡局部断面 (单位: m) Fig. 1 Local section of wharf slope (unit: m)

根据JTJ/T 320—1996《疏浚岩土分类标准》<sup>[7]</sup>, 该工程疏浚土质主要为粉质黏土及黏土粉砂等, 土质级别为 3~6 级。

#### 2 边坡一次成型施工方案设计

根据 JTS 147—2017《水运工程地基设计规 范》<sup>[8]</sup>,结合实际工况,对-22.6~-4.0 m 土层分 层,针对每层土质的关键土力学指标,进行阶梯 法塌坡施工的可行性分析<sup>[9]</sup>。

表 1 传统阶梯法塌坡施工可行性分层分析 Tab. 1 Layered analysis of feasibility of traditional step-by-step slope collapse construction

	•					•
土层深度/m	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	孔隙比		可行性分析
-8.0~≤-4.0	1. 80	3	27	1.1	超过设计坡比,需预留	一定距离防止塌坡过多
-12. 0~ ≤ -8. 0			软黏土	、粉质黏	土、黏土粉砂过渡层	
-18.0~≤-12.0	1.85	3	28	1.0	接近设计坡比,需预留	一定距离防止修坡时造成超挖
-22.6~≤-18.0	1.90	2	32	0.9	传统阶梯法塌坡施工不	不可行,需进行边坡一次成型施工技术

根据分析结果可知,在-22.6~-18.0 m 层无 法依靠水流、重力等实现自然塌坡,传统阶梯法 塌坡施工不具备可行性<sup>[10]</sup>,需进行边坡一次成型 技术施工。大型绞吸船黏性土质边坡高精度一次 成型施工过程中遇到的主要难点为:

 1)横移与起桥联动。主要难点在于对横移速 度和绞刀起升速度的计算及修正及将横移速度与 起桥速度匹配控制。在实际施工过程中,为保障 边横移边起桥施工的稳定性,对船舶操作水平有 极高要求。  2) 绞刀边坡开挖方式。绞刀顺边坡线修整边 坡有上坡、下坡2种挖掘方向,以及正刀、反刀
 2种绞刀挖掘方式,可组合形成上坡正刀、上坡反 刀、下坡反刀、下坡正刀挖掘共4种施工工艺, 边坡一次成型施工质量的关键在于针对不同深度 选择合适的开挖方式。

#### 3 横移速度与起落桥速度控制

 3.1 绞刀横移速度修正 绞吸船横移速度分析见图 2。

(1)



注: vw 为横移速度(即横移绞车收缆速度), ve 为绞刀头横移线速度。



根据图 2 分析,可计算横移缆与船舶轴线夹 角  $\varphi$  和  $v_c$ :  $\varphi = |\alpha - \omega| =$ 

$$\left| \alpha - \operatorname{arccot} \left\{ \frac{y_a - [y_0 + (L_1 + L_4 \cos\theta) \cos\alpha + L_5 \sin\alpha]}{x_a - [x_0 + (L_1 + L_4 \cos\theta) \sin\alpha - L_5 \cos\alpha]} \right\} \right|$$

 $v_{\rm c} = \frac{(L_1 + L_2 + L_3 + L_0 \cos\theta) v_{\rm w}}{(L_1 + L_2 + L_3 + L_4 \cos\theta) \sin\varphi}$ 

式中:  $x_a$ 、 $y_a$  为横移锚坐标;  $x_0$ 、 $y_0$  为 DGPS 天线 位置坐标;  $L_0$  为桥梁长度(即桥架耳轴距离绞刀 头的长度);  $L_1$  为 DGPS 天线安装位置距离桥架耳 轴中心的水平距离;  $L_2$  为 DGPS 天线安装位置距 离台车行走槽端面中点的水平距离;  $L_3$  为钢桩台 车行程;  $L_4$  为横移滑轮与桥架耳轴沿船舶轴线的 距离;  $L_5$  为横移滑轮与船舶轴线的垂线距离;  $\theta$  为桥架下放角度;  $\alpha$  为船首方位角。

根据船舶设计规格, L<sub>0</sub>、L<sub>1</sub>、L<sub>2</sub>、L<sub>4</sub>为固定 值,可得出 ν<sub>c</sub>随着 L<sub>3</sub>、ν<sub>w</sub>、θ和φ而变化,从而 实现对绞刀头横移速度的控制和修正。

3.2 绞刀起升速度修正

设桥架起升滑轮距离桥架耳轴距离为L<sub>6</sub>,起

升钢丝缆收缆速度为 $v_{sw}$ ,绞刀竖向提升速度 $v_{sc}$ ,见图 3。可根据船舶图纸测量得到绞刀竖向移动速度与起升钢丝缆收缆速度的关系,见式(3),可得出 $v_{sc}$ 随着 $L_6$ 、 $v_{sw}$ 、 $\theta$ 和 $\rho$ 而变化,从而实现对绞刀提升速度的修正。



图 3 桥架起升速度分析 Fig. 3 Analysis of bridge lifting speed

$$v_{\rm sw} = \frac{v_{\rm sc} L_6 \cos(\theta - \rho)}{L_0 \cos\theta}$$
(3)

式中: ρ 为桥架起升钢丝缆与垂向夹角。

3.3 横移速度与起桥速度匹配控制

对绞吸船平面和竖向几何关系进行分析,设 挖槽底宽的 1/2 为  $B_0$ ,在挖槽边坡上画若干分段 线,各段之间的水平间距为  $B_i$ ,见图 4。各段的 设计边坡坡度 1: $n_i$ ,则各段之间的垂向间距为  $h_i$ =  $B_i/n_i(i=1,2\cdots)$ 。根据式(2),将  $v_c$ 与  $v_w$ 关系代 入,即可将  $v_w$ 与  $v_{sc}$ 联动,见式(4)。



a) 平面



b) 竖向

图 4 绞吸船平面和竖向几何关系 Fig. 4 Plane and vertical geometric relationship of cutter suction dredger

$$\frac{v_{w}}{v_{sc}} = \frac{\pi (\varepsilon_{i}R_{i} - \varepsilon_{i-1}R_{i-1})\sin\varphi}{180h_{i}} \cdot \frac{L_{1} + L_{2} + L_{3} + L_{4}\sqrt{\left[L_{0}^{2} - \left(T + h_{0} + e - D - \sum_{1}^{n}h_{i}\right)^{2}\right]/L_{0}^{2}}}{L_{1} + L_{2} + L_{3} + L_{0}\sqrt{\left[L_{0}^{2} - \left(T + h_{0} + e - D - \sum_{1}^{n}h_{i}\right)^{2}\right]/L_{0}^{2}}}$$
(4)

式中: ε<sub>i</sub>、ε<sub>i-1</sub> 为第 i 段、第 i-1 段船舶轴线与航道 轴线的夹角; R<sub>i</sub>、R<sub>i-1</sub> 为第 i 段、第 i-1 段钢桩至 绞刀头的水平投影长度; h<sub>i</sub> 为第 i 段的垂向间距; T 为实际水位与水位基准线的距离; h<sub>0</sub> 为挖槽设 计挖深; e 为桥架耳轴距离船底距离; D 为船舶吃 水深度。

综上所述,基于要求的设计坡比,即可建立 v<sub>sc</sub>与v<sub>w</sub>之间的联系,实现横移与起落桥联动,联 动后绞刀边坡开挖轨迹线见图 5。



图 5 绞刀边坡开挖轨迹线 Fig. 5 Trajectory line of cutter slope excavation

### 4 绞刀边坡开挖试验

工程施工船舶为天杉船,采用 3G 五臂绞刀。施 工流速 5.1 m/s 基本保持稳定,绞刀转速 30 r/min、 进尺 1.2 m。4 种绞刀边坡开挖方式见图 6。



() 1 %IL/3121/4

图 6 4 种绞刀边坡开挖方式 Fig. 6 Four kinds of cutter slope excavation methods

由于绞刀移动方向、绞刀旋转方向、泥土及绞 刀受力情况的不同,4种施工工艺的最佳施工参数 组合有所不同,分别对边坡上层、中层、下层黏性 土开展4种施工工艺挖掘试验,试验参数见表2。

根据表2分析可得:1)上坡反刀开挖时横移 拉力和绞刀功率最大,下坡正刀开挖时最小; 2)下坡反刀开挖时吸入密度最大、残留层厚度最 小,上坡正刀开挖时吸入密度最小、残留层厚度 最大;3)为保证边坡质量,在相同的土质和挖掘 参数情况下,上坡正刀开挖需控制的横移速度最 小,下坡反刀的开挖横移速度最大。

Tab.	2 Expe	rimental p	parameter	s of cutter	slope exe	cavation
土层	开挖 方式	横移速度/ (m•min <sup>−1</sup> )	泥浆密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	平均残留层 厚度/m	绞刀 功率/kW	横移 拉力/kN
上层	上坡正刀	7.5~8.0	1. 16	0.08	322.0	370
	上坡反刀	8.0	1. 17	-0.12	423.8	460
	下坡反刀	11.0	1.23	-0.22	395.5	470
	下坡正刀	8.0	1.16	-0.04	271.6	310
中层	上坡正刀	6.5~7.0	1. 15	0.12	375. 1	410
	上坡反刀	7.0	1.15	-0.04	499.2	520
	下坡反刀	10.0	1.21	-0.20	466.7	510
	下坡正刀	7.0	1. 14	0.06	321.0	350
下层	上坡正刀	6.5	1. 15	0.22	417. 1	440
	上坡反刀	6.5~7.0	1. 15	0.04	555.7	550
	下坡反刀	10.0	1.20	-0.22	521.6	530
	下坡正刀	6.5~7.0	1. 14	0. 18	357.4	400

表 2 绞刀边坡开挖试验参数

#### 5 工艺优化

"天杉"船实际施工边坡断面见图 7,结合边 坡开挖试验结果,优化不同深度的边坡开挖方式, 见表 3。





Tah 3	Ontimiza	tion naran	neters of	differen	t depth
	表 3	不同深度	的优化参	診数 🛛 🕹	

土层	横移缆与船舶轴线夹角/(°)	$v_{\rm e}/({\rm m}\cdot{\rm min}^{-1})$	$v_{\rm sc} / ({\rm m} \cdot {\rm min}^{-1})$	$v_{sw}/(\mathbf{m} \cdot \mathbf{min}^{-1})$	用时/s	平均超宽/m
$A_1 \sim A_2$	104. 40	8.85	2. 94	2. 28	35.7	0.44
$\mathbf{A}_2 \thicksim \mathbf{A}_3$	104. 45	8.86	2.93	2.26	35.8	0.45
$A_3 \sim A_4$	107.17	8.98	2. 51	1.92	47.8	0.48
$\mathbf{A}_4 \sim \mathbf{A}_5$	112.06	9.26	2. 53	1.93	47.4	0.5

根据优化结果,当 v<sub>e</sub>分别为 8.85、8.86、 8.98、9.26 m/min 时, A<sub>1</sub>~A<sub>5</sub>4 段的 v<sub>sw</sub>分别设置 为 2.28、2.26、1.92、1.93 m/min, 其随时间的 变化见图 8,可快速进行起桥速度的调整。

设计边坡线与实测边坡线基本一致,见图 9。 通过采用边坡一次成型技术,并对边坡开挖方式 进行优化后,"天杉"船边坡修坡效率约 12.4 m/h, 平均超宽由原来的 2.0 m 减小至约 0.5 m,工期提 前约 15 d。



图 8 起升钢丝缆收缆速度随时间变化 Fig. 8 Change of speed of lifting steel wire cable with time



Fig. 9 Comparison between designed excavation slope line and measured slope line

#### 6 结论

 本文验证了绞刀横移与起落桥联动开挖边 坡方法的必要性,进行了绞刀横移速度修正、绞 刀起升速度修正,提出绞刀横移速度与起落桥速 度的匹配控制方法,形成了大型绞吸船黏性土质 边坡高精度一次成型技术,可为后续类似工程提 供参考。

 2)通过开展典型施工和大量现场实验,确定 上坡正刀挖掘、上坡反刀挖掘、下坡反刀挖掘、
 下坡正刀挖掘4种施工方法在不同挖深情况下的 最佳绞刀横移速度,保证了边坡施工质量。

3)通过优化边坡开挖工艺、绞刀横移速度与 起落桥速度,实现手动施工黏性土质边坡一次成型,"天杉"船边坡修坡效率提升至12.4 m/h,平 均超宽由原来的2.0 m减小至约0.5 m,满足工程 高精度、短工期的要求。

#### 参考文献:

[1] 邓武. 疏浚施工中如何保证边坡质量[J]. 湖南水利水
 电, 2008(2): 15-16.

DENG W. How to ensure slope quality in dredging construction[J]. Hunan hydro & power, 2008(2): 15-16.

- [2] 丁树友,顾明,俞孟蕻.吸挖泥船无人操控自动挖泥系 统研制[J].水运工程,2020(S1):1-6.
  DING S Y, GU M, YU M H. Development of unmanned automatic dredging system for cutter suction dredger[J].
  Port & waterway engineering, 2020(S1): 1-6.
- [3] 罗刚, 冯志勇, 陈定, 等. 大型自航绞吸挖泥船智能化集 成控制系统[J]. 中国港湾建设, 2016, 36(9): 12-16.
  LUO G, FENG Z Y, CHEN D, et al. Integrated intelligent control system for large self-propelled cutter suction dredgers[J]. China harbour engineering, 2016, 36(9): 12-16.
- [4] 肖博, 孙守胜. 绞吸式挖泥船横移系统加速施工[J]. 中 国港湾建设, 2015, 35(9): 77-80.

XIAO B, SUN S S. Accelerating construction for swing system of cutter suction dredge [J]. China harbour engineering, 2015, 35(9):77-80.

- [5] 罗刚, 冯志勇, 陈定, 等. 大型自航绞吸挖泥船智能化集成控制系统[J]. 中国港湾建设, 2016, 36(9): 12-16.
  LUO G, FENG Z Y, CHEN D, etal. Integrated intelligent control system for large self-propelled cutter suction dredgers [J]. China harbour engineering, 2016, 36(9): 12-16.
- [6] 宋冬鹏,张路生.基于神经网络和最大产量估算的挖泥 船横移控制[J].水运工程,2020(S1):123-127.
  SONG D P, ZHANG L S. Lateral movement control of cutter suction dredger based on neural network and maximum output estimation [J]. Port & waterway engineering, 2020(S1):123-127.
- [7] 疏浚岩土分类标准: JTJ/T 320—1996[S]. 北京: 人民交通出版社, 1997.

Classification of rocks and soils to bedredged: JTJ/T 320– 1996[S]. Beijing: China Communications Press, 1997.

[8] 水运工程地基设计规范: JTS 147—2017[S]. 北京: 人
 民交通出版社股份有限公司, 2017.

Code for foundation design on port and waterwayengineering: JTS 147-2017[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2017.

- [9] 仲南艳,殷晓明,王斐. 航道护岸工程中基槽边坡稳定 研究[J]. 水运工程,2007(11): 80-86.
  ZHONG N Y, YIN X M, WANG F. On slope stability of foundation trench in waterway revetment engineering[J].
  Port & waterway engineering, 2007(11): 80-86.
- [10] 曹影峰,李兴高,杨益. 深中通道沉管隧道基槽回淤及
   边坡稳定性研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(7):
   1350-1358.

CAO Y F, LI X G, YANG Y. Back silting and slope stability of foundation trench in Shenzhen-Zhongshan immersed tunnel project [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2020, 42(7): 1350-1358.

(本文编辑 王传瑜)