



# 耙吸挖泥动态分层定深施工工艺应用

徐 军

(中港疏浚有限公司, 上海 200136)

**摘要:** 本文主要介绍了一种适用于耙吸挖泥船疏浚施工的新型施工工艺, 即动态分层定深施工工艺。首先采用敏感性因素分析法对影响疏浚工程扫浅时间的各个因素进行重要性排序, 然后逐个分析每个因素对平整度影响的机理, 最后根据分析结果构建动态分层定深计算公式, 计算得出分阶段施工的不同定深深度。整个工艺通过加强对施工过程中平整度的阶段控制, 从而降低乃至消除后期扫浅时间, 减少前期抢工程量造成的垄沟, 最终减少施工工期, 提高项目收益。通过在洋山四期基建项目中的应用, 体现出该施工工艺的可行性和优势。

**关键词:** 动态分层定深; 过程质量控制; 敏感性因素分析法; 水深均方差

中图分类号: U657.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)01-0199-06

## Application of dynamic delamination depth determination construction technology for rake-suction dredging

XU Jun

(CHEC Dredging Co., Ltd., Shanghai 200136, China)

**Abstract:** This paper mainly introduces a new construction technology suitable for dredging construction of dredging dredger, namely dynamic delamination and depth determination technology. Firstly, sensitivity factor analysis is used to sort the importance of each factor affecting the trimming time of dredging engineering, and then the mechanism of each factor's influence on the smoothness is analyzed one by one. Finally, the calculation formula of dynamic stratified depth determination is constructed according to the analysis results, which can be used to calculate the different depth settings for phased construction. The whole process is to strengthen the stage control of the flatness in the construction process, so as to reduce or even eliminate the late trimming time, reduce the corrugation caused by the early stage of the project, and ultimately reduce the construction period and improve the project income. This paper also shows the feasibility and advantages of this construction technology through its application in Yangshan Phase 4 infrastructure project.

**Keywords:** dynamic delamination depth determination; process quality control; sensitivity factor analysis; mean square error of water depth

定深施工是耙吸挖泥船的常规施工工艺, 即固定一个深度, 通常泥层厚度为 0.5 或 1.0 m, 然后逐层开挖, 直至达到设计深度。控制施工过程中的平整度即施工质量, 减少垄沟形成, 降低最终的扫浅阶段时间<sup>[1]</sup>。

虽然定深开挖是耙吸挖泥船常规的施工工艺,

但由于无论何种工况条件, 定深的深度通常均为 0.5 m 的整数倍, 目前国内的疏浚施工工艺水平尚未达到精细化控制的要求。另外从实际工程施工情况来看, 虽然采用定深开挖的方式, 但几乎所有工程均存在扫浅阶段, 特别是含有一些坚硬土质如细粉砂、黏土的疏浚工程, 在后期为了扫除

收稿日期: 2024-03-26

作者简介: 徐军 (1990—), 男, 工程师, 从事疏浚工程技术管理工作。

前中期出现的垄沟，需花费大量的无效施工时间，或采用扫浅船进行扫浅，甚至可能调遣专用的耙吸挖泥船进行扫浅<sup>[2-4]</sup>。这些措施方法大大增加了项目成本，逐步减少了前期获得的项目利润<sup>[5]</sup>。

通过分析影响扫浅时间的相关因素，采用敏感性因素分析法，排序其重要程度，针对不同工况条件，采用具有针对性的、更加精细化的阶段动态定深开挖，从而达到缩短整体施工工期和提高整体工程利润的目的。这种方式称为动态定深施工工艺研究。

### 1 敏感性因素分析

与施工平整度、工程扫浅时间相关的因素主要包括：土质、耙头定深精度、阶段水深平整度、所需疏浚总体深度、土质复合程度。

根据国内数个疏浚工程（连云港、黄骅、南通、厦门等）历年施工数据（施工阶段水深分析、扫浅阶段时间、土质等），进行因素敏感性分析，以确定显著影响施工扫浅时间的数据。结果表明，从变化趋势来看，敏感性排序为土质>阶段水深平整度>土质复合程度>所需疏浚总体深度>耙头定深精度，具体趋势见图1。

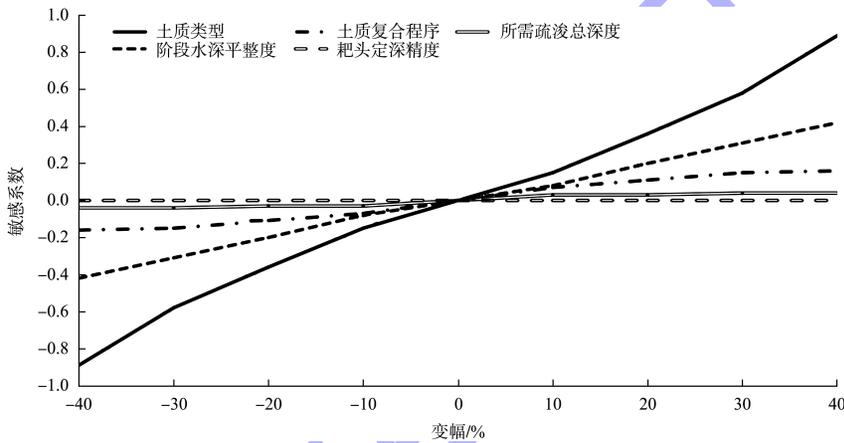


图1 不同因素影响工程扫浅时间的敏感性

Fig.1 Sensitivity of different factors affecting engineering trimming time

#### 1.1 土质

从土质角度分析，以有机质土及泥炭为基准参数，因其流动性较强，几乎对平整度没有影响，疏浚此类土质重点在于做好防污染措施，流态淤泥土也属于此类别<sup>[6]</sup>，但此类土质基本只存在于湖泊底泥清淤工程中，在江河海航道疏浚中几乎没有单纯对此种土质的疏浚工程。随着土质含水量的降低，天然密度的提高，即硬度提高、塑性变弱，土质对于平整度或扫浅时间的影响将越来越显著，呈现出近似二次函数性质的曲线，见图2。本文不讨论碎石土，由于航道土质中含有松散碎石土，实际上较易疏浚，其疏浚难度低于中密砂土，如土质中含有大量中密甚至密实碎石土，则不适用于耙吸船疏浚。

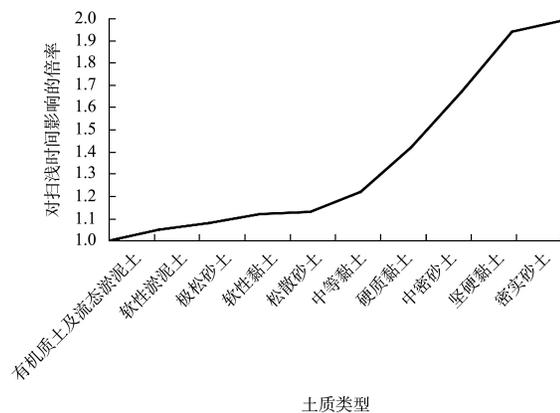


图2 不同航道土质对扫浅时间的影响

Fig.2 Influence of different channel soil quality on trimming time

土质的复合程度也是需要考虑的问题，因为疏浚土质中复合土质种类越多，施工中越容易形

成高差, 最终成为垄沟的可能性也越大。另外, 无论是2种还是5种土质复合, 最终扫浅时间的长短仍取决于最难挖的土质。如2种土质中含有坚硬黏土, 无论另一种为何种土质, 若过程中阶段平整度控制不良, 最终扫浅时间均较长。如果5种土质中最坚硬的土质仅为松散砂土, 那么扫浅时间将比前者短得多。综上所述, 土质的复合程度越高, 对扫浅时间的影响越大, 但总体影响有限, 最重要的是确定哪种土质最难挖掘。

### 1.2 所需疏浚的总深度

所需疏浚的整体深度对最终扫浅时间或最终平整度影响很小, 虽然存在正比趋势, 即所需疏浚总深度越深, 所需扫浅时间越长或平整度控制难度越高, 但总体变化趋势较平缓。事实上, 这种变化趋势主要由于疏浚总深度越深, 土质复合程度会越复杂, 下层土质可能硬度更高、塑性更差, 因此土质对平整度的影响较大。如果工程土质均为淤泥, 即使所需疏浚的整体深度为5~6 m, 基本也不存在平整度的问题; 如果土质为硬质黏土, 即使所需疏浚的整体深度只有1 m, 那么扫浅时间仍较长。因此在动态深度分层公式中不考虑所需疏浚的整体深度。

### 1.3 阶段水深平整度

阶段水深平整度是控制平整度的重要因素。疏浚工程的常见问题是前期为了抢工程量, 往往忽视第1阶段疏浚的平整度, 只要平均水深达到目标, 紧接着开始第2阶段的疏浚, 第2阶段控制定深也不因第1阶段的施工平整度进行任何调整<sup>[7-8]</sup>。如果土质硬度高、塑性差, 在疏浚过程中很容易形成垄沟, 到最终扫浅的时候, 部分高高隆起的长条状或散点浅区将会耗费大量时间和成本进行扫除(图3)。所以在动态定深施工工艺中, 阶段水深平整度是仅次于土质的重要因素。



图3 垄沟形成  
Fig. 3 Ridge formation

### 1.4 耙头定深精度

耙头定深精度不影响施工的平整度, 只影响疏浚的实际深度。因为无论耙头深度仪表精度的高低, 亦或比真实深度更深或更浅, 它对于水深的影响是全局性的, 影响全部施工区域的航道水深, 但不会产生某块区域过深或过浅的问题, 即只影响平均水深, 而不影响平整度与扫浅时间。所以在动态深度分层公式中不考虑此因素。

## 2 模型建立

根据上述分析与实际施工数据研究比对, 最终确定阶段动态分层定深计算公式为:

$$h = ka \cdot \frac{1}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (h_{\text{水深}} - \bar{h})^2 / (n-1)}} \quad (1)$$

式中:  $\sqrt{\sum_{i=1}^n (h_{\text{水深}} - \bar{h})^2 / (n-1)}$  为施工区域水深的均方差的计算公式, 该值以浚前水深图为第1个计算模型, 每次施工平均水深达到分层深度后, 再计算一次, 作为该阶段施工质量控制完成情况的结论, 并作为下一个分层深度的公式计算依据。  $h_{\text{水深}}$  为每个水深测点的水深值,  $\bar{h}$  为当期测图的平均水深,  $n$  为测点数量,  $h$  为每次动态分层深度的水深值;  $a$  为土质复合系数, 通常为0.7~1.0, 根据工程土质复合情况与土质分类灵活确定, 主要体现真实的多种土质复合工况对扫浅时间的影响。例如航道土质较为复杂, 混合了四五种土质, 且含有较难

疏浚的土质,则  $a$  可以取 0.7;如果土质较为单一,且无难以疏浚的土质,则  $a$  可以取 1.0。 $k$  为土质系数,根据疏浚土质确定,参照交通运输部制定的 JTS 181-5—2012《疏浚与吹填工程设计规范》<sup>[9]</sup>,疏浚土一般分为六大类,共 13 组。根据疏浚工程实际施工数据统计并分析, $k$  值取值见表 1。

表 1  $k$  值取值范围  
Tab. 1  $k$  value range

土质分类	$k$ 值建议取值范围	备注
有机质土及流态淤泥土	0.50	基本无需平整度控制
软性淤泥土	0.45~0.50	基本无需平整度控制
极松砂土	0.40~0.45	平整度控制易
软性黏土	0.35~0.40	平整度控制易
松散砂土	0.30~0.35	平整度控制一般
中等黏土	0.20~0.30	平整度控制一般
硬质黏土	0.15~0.25	平整度控制难
中密砂土	0.20~0.25	平整度控制难
坚硬黏土	0.10~0.20	平整度控制极难
密实砂土	0.10~0.25	平整度控制极难

### 3 工程应用

#### 3.1 工程概况

洋山深水港位于杭州湾口东北部、嵊泗县海域,东南紧靠上海市芦潮港,北临长江入海口,具体位于长江口(经江海水道)向西至芦潮港约 32 km,向南至宁波北仑港约 90 km,向东经黄泽洋直达外海<sup>[10]</sup>。陆路由 32.5 km 的东海大桥与上海南汇区芦潮港相连。四期工程与小洋山岛链最西端的洋山二期码头相邻,具体位置见图 4。

四期项目疏浚范围包括:码头前沿泊区、船舶转运区、接驳通道、港内通道,以及码头下方清淤工程等。疏浚工程尺寸见表 2。疏浚范围内航道底泥的土壤主要由淤泥、粉质黏土、粉砂混合黏土构成,分属 3 级土和 8 级土,回淤土为 2 级土<sup>[11]</sup>。土质比例见表 3。



图 4 洋山四期工程疏浚位置

Fig. 4 Dredging location of Yangshan Phase IV project

表 2 洋山四期工程疏浚尺寸

Tab. 2 Dredging scale of Yangshan Phase IV project

疏浚范围	疏浚面积/km <sup>2</sup>	设计底宽/m	疏浚底高程/m	疏浚边坡
码头前沿 5 万吨级	13.4	81	-14.5	码头下方为 1:3
停泊水域 7 万吨级	6.8	81	-15.5	东西边线为 1:5
回旋及连 5 万吨级	87.6	600	-14.5	南边线为 1:15 西边线为 1:50
接水域 7 万吨级	199.6	250~1 308	-15.5	南边线为 1:15 东边线为 1:20
港内航道	26.9	250	-16.0	南边线为 1:15 西边线为 1:50

表 3 洋山四期土质分级及工程量

Tab. 3 Soil classification and engineering quantity of Yangshan Phase IV

疏浚区域	土质分级比例/%	土质分级工程量/万 m <sup>3</sup>						
		2 级土	3 级土	8 级土	2 级土	3 级土	8 级土	合计
码头下方	5 万吨级	0	75	25	0.00	8.43	2.81	11.24
	7 万吨级	0	90	10	0.00	5.98	0.66	6.64
码头前沿	5 万吨级	19	81	0	6.54	56.28	0.00	62.82
停泊水域	7 万吨级	17	42	41	4.06	19.62	19.62	43.30
回旋及连	5 万吨级	20	80	0	31.29	249.70	0.00	280.98
接水域	7 万吨级	19	61	20	105.24	654.77	218.26	978.28
港内航道		17	33	50	33.15	16.57	97.11	178.42
合计	-	-	-	-	163.70	1 059.52	338.46	1 561.68

### 3.2 动态分层控制策划

由于动态分层控制在初始水深和目标水深差值越大、土质越复杂的工况条件下，使用的效果越明显，经过对浚前测图和疏浚土质的综合考虑，决定在 7 万吨级码头前沿停泊水域进行精细化动态分层施工的应用。根据项目土质分级及钻探资料汇总分析得到土质垂直分布情况见表 4。

表 4 洋山四期码头前沿土质垂直分布  
Tab. 4 Vertical distribution of soil in front of Yangshan Phase IV wharf

垂直深度/m	土质情况
11~12	以回淤软性淤泥土为主
12~13	极松砂土混合淤泥及软性黏土
13~14	松散砂土混合密实黏土
14~15	中密砂土混合部分坚硬黏土
15~16	中密砂土混合部分坚硬黏土

其初始平均水深-11.3 m，目标水深-15.5 m。根据前述参数取值范围，结合现场实际工况以及每次定深施工的平整度结果(水深均方差)，采用式(1)计算下次分层深度，最终实施动态分层定深施工工艺的施工情况见表 5。

由表 5 可知，每次定深深度均不同，且未呈现先增大后减小的规律，而是根据前一阶段的平整度控制结果以及土质的变化，动态确定定深深度。在前期土质较易疏浚时，可突破原本 0.5 m 定深的深度，后期由于土质变化导致平整度出现

波动时，会减少定深深度，为确保稳定的质量过程控制，可牺牲一定的施工效率。

表 5 洋山四期码头前沿动态分层定深  
Tab. 5 Dynamic delamination depth in front of Yangshan Phase IV wharf

分层次数	$k$	均方差	$a$	分层深度/m	阶段初始深度/m	阶段目标深度/m
第 1 次	0.48	0.59	0.95	0.77	11.30	12.07
第 2 次	0.45	0.51	0.90	0.79	12.07	12.87
第 3 次	0.40	0.46	0.90	0.78	12.87	13.65
第 4 次	0.30	0.32	0.80	0.75	13.65	14.40
第 5 次	0.20	0.54	0.75	0.27	14.40	14.67
第 6 次	0.20	0.41	0.75	0.27	14.67	14.94
第 7 次	0.20	0.33	0.75	0.45	14.94	15.39
第 8 次	-	0.27	-	0.11	15.39	15.50

### 3.3 动态分层控制效果对比

由表 6 可知，对比 7 万吨级码头前沿停泊水域的原定施工计划，采用动态分层定深施工工艺缩短了扫浅时间和总工期，提高了总体施工效率。对比 5 万吨级码头前沿停泊水域的施工情况可以发现，由于后期土质变化以及固定定深，且没有根据平整度及时调整定深，导致后期扫浅时间较长，总工期比预期长了几天。综合来看，相比一般固定定深施工工艺，采用动态分层定深施工工艺在经济上和质量控制上都更有优势，具备工程实用性。

表 6 洋山四期码头前沿不同定深方式施工效果对比

Tab. 6 Comparison of construction effect at different depths in front of Yangshan Phase IV wharf

	初始水深与目标水深差距/m	定深方式	原定施工时间/d	实际施工时间/d	其中正常施工时间/d	其中扫浅时间/d
7 万吨级码头前沿水域疏浚(原施工方案)	4.2	每次固定 0.5 m, 共 9 次	70	-	57	13
7 万吨级码头前沿水域疏浚(采用动态分层定深工艺建)	4.2	动态分层, 共 8 次	70	65	59	6
5 万吨级码头前沿水域疏浚(实际施工中)	3.9	每次固定 0.5 m, 共 8 次	50	53	46	7

## 4 结论

1) 相比通常的定深施工工艺，采用动态分层定深施工工艺，当疏浚总深度较深、施工上层为较软土质时，计算所得动态定深深度比通常定深深度更深，提高了前期施工经济性。

2) 该工艺能够精细化控制过程施工质量，从而减少后期扫浅时间，提高整体施工效率，缩短工期。

3) 该工艺适用于各类疏浚工程，在浚深深度较大、土质相对复杂，但又有较高质量控制要求

的基建工程中应用效果尤为显著。

4) 在今后的疏浚项目实践中, 此研究可提高施工质量控制水平, 减少乃至消除扫浅时间, 并为我国的疏浚企业降本增效。

参考文献:

[1] 吕玉棋, 韩政, 陈跃发, 等. 耙吸挖泥船疏浚工程浅点的控制与消除[J]. 中国港湾建设, 2014(2): 59-61, 80.

[2] 曾斌华, 何欢翔. 耙吸挖泥船航道疏浚扫浅施工探讨[J]. 珠江水运, 2022(22): 25-27.

[3] 覃腾羽. 疏浚工程复杂环境情况下的扫浅施工工艺[J]. 珠江水运, 2023(16): 63-65.

[4] 潘庆杰. 航道疏浚工程扫浅施工方法与重难点应对[J]. 科技创新与应用, 2019(13): 138-139.

[5] 刘润生, 李金峰. 浅谈耙吸船在疏浚工程中浅点的扫浅施工方法[C] //中国交通建设股份有限公司 2013 年现场技术交流会论文集. 2013: 397-399.

[6] 王林, 葛新兴, 姜中, 等. 大型自航耙吸式挖泥船"精挖"

施工技术在湄洲湾航道疏浚工程中应用浅析[C] //中国水运建设行业协会工程施工专业委员会. 中国水运建设行业协会工程施工专业委员会 2016 年年会论文集. 镇江: 中国水运建设行业协会, 2016: 72-78.

[7] 龙真健. 大型耙吸式挖泥船精挖施工工艺在航道工程中的应用研究[J]. 价值工程, 2020, 39(11): 171-172.

[8] 李世国, 张广雷. 试析耙吸船在航道疏浚中平整度控制的阶段工艺[C] //上海市水利学会. 上海市水利学会 2015 年年会论文集. 上海: 上海科学技术出版社出版, 2015: 39-40.

[9] 中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 中交天津港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.

[10] 左书华, 崔成, 谢华亮, 等. 洋山港四期大型集装箱深水化码头开发建设水动力泥沙关键技术研究[J]. 中国科技成果, 2020, 21(6): 51-54.

[11] 王施恩, 张征. 洋山港四期工程水域水沙环境及港区增深方案研究[J]. 水道港口, 2018, 39(1): 5-11.

(本文编辑 赵娟)

(上接第 184 页)

[10] ESCARTÍN J, HIRTH G, EVANS B. Nondilatant brittle deformation of serpentinites: Implications for Mohr-Coulomb theory and the strength of faults[J]. Journal of geophysical research, 1997, 102(2): 2897-2913.

[11] 娄一青. 降雨条件下边坡渗流及稳定有限元分析[J]. 水利学报, 2007(S1): 346-351.

[12] 韩啸, 陈兵, 徐煜航, 等. 土体洞室开挖的力学参数敏感性分析[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2019, 40(5): 76-82.

[13] 万智, 董辉, 刘宝琛. 基于正交设计下 SVM 滑坡变形时序回归预测的超参数选择[J]. 岩土力学, 2010, 31(2): 503-508, 515.

[14] 王开禾, 罗先启, 沈辉, 等. 围岩力学参数反演的 GSA-BP 神经网络模型及应用[J]. 岩土力学, 2016, 37(S1): 631-638.

[15] 吴博, 赵法锁, 贺子光, 等. 基于 BA-LSSVM 模型的黄

土滑坡致灾范围预测[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(5): 1-6.

[16] 张坤勇, 杜伟, 王乾坤. 基于修正关口-太田模型的归一化变形量开挖边坡失稳判据[J]. 土木工程学报, 2019, 52(11): 86-96.

[17] 李波, 徐宝松, 武金坤, 等. 基于最小二乘支持向量机的大坝力学参数反演[J]. 岩土工程学报, 2008(11): 1722-1725.

[18] SUYKENS J, VANDEWALLE J. Least squares support vector machine classifiers[J]. Neural processing letters, 1999(9): 293-300.

[19] 中交水运规划设计院有限公司. 水运工程抗震设计规范: JTS 146—2012[S]. 北京: 人民交通出版社, 2012.

[20] 重庆市设计院, 中国建筑技术集团有限公司. 建筑边坡工程技术规范: GB 50330—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.

(本文编辑 王璁)