



耙吸式挖泥船疏浚施工组织仿真优化*

唐国磊¹, 汪姣¹, 牛兴黎², 曹乐乐³, 周鹏飞¹, 赵卓瑶¹

(1. 大连理工大学, 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁大连 116024;

2. 莱州市港航服务中心, 山东莱州 261499; 3. 华设设计集团股份有限公司, 江苏南京 210014)

摘要: 合理制定最佳疏浚施工组织计划, 需要考虑众多影响因素及其不确定性且各因素之间相互影响。通过航道疏浚工程施工作业仿真模型, 描述运营船舶进出港和挖泥船疏浚施工过程中存在的不确定性, 以最小化船舶船班费用和碳排放成本之和为目标, 重点分析疏浚段长度和挖泥船船队配置对疏浚工程船舶船班费用、碳排放成本以及综合成本的影响。结果表明, 提出的基于仿真和优化的方法可合理制定疏浚工程施工组织计划。

关键词: 航道; 施工组织; 不确定性; 疏浚段; 仿真

中图分类号: U616

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)07-0193-08

Simulation and optimization for dredging construction organization of trailing suction hopper dredger

TANG Guolei¹, WANG Jiao¹, NIU Xingli², CAO Lele³, ZHOU Pengfei¹, ZHAO Zhuoyao¹

(1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. Laizhou Port and Shipping Service Center, Laizhou 261499, China; 3. China Design Group Co., Ltd., Nanjing 210014, China)

Abstract: To develop an optimal dredging construction organization plan, it is essential to consider various influencing factors along with their uncertainties, all of which interact with one another. We develop a simulation model for dredging operations in waterway dredging projects to describe uncertainties involved in vessel arrivals and departures, as well as in the dredging process of trailing suction hopper dredgers. Based on the objective of minimizing the total cost, we analyze the impact of dredging section length and the dredger fleet on dredger operation expenses, carbon emission cost and comprehensive cost. The results indicate that the proposed method based on simulation and optimization can develop a rational construction organization plan for dredging project.

Keywords: waterway; construction organization; uncertainty; dredging section; simulation

航道疏浚工程中疏浚设备使用费用高昂、施工排放的尾气对环境造成污染, 为减少疏浚设备使用费用、贯彻国家“碳达峰”、“碳中和”战略, 必须重视并加强水运工程建设疏浚成本和碳排放管理, 减少疏浚成本和碳排放。因此, 面对疏浚成本与碳排放的限制要求, 考虑运营船舶对疏浚施工的动态影响, 如何合理组织挖泥船完成施工任务, 同时实现成本和碳排放最小化, 是航道疏浚工程组织需要解决的重要问题之一。

受运营船舶随机进出港会打断挖泥船作业,

恶劣天气、航道水域、土质条件等因素影响, 疏浚设备产量具有不确定性^[1]。JTS 181-5—2012《疏浚与吹填工程设计规范》^[2]、Bray 等^[3]和 Wovtschuk^[4]通过统计历史数据确定因疏浚的中断时间损失, 一定程度上量化了不确定性对疏浚产量的影响。在此基础上, 张亚楠等^[5]、张曦元^[6]、熊庭等^[7]通过建立数学模型计算挖泥船的生产效率以及最佳装舱时间。另外, Kaizer 等^[8]应用排队理论处理船舶交通和挖泥船作业之间的相互作用, 但队列理论无法处理复杂的水域环境和交通规则。

收稿日期: 2023-11-02

*基金项目: 科技部战略性国际科技创新合作重点专项资助项目(2020YFE0201200)

作者简介: 唐国磊(1980—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为港口大数据和智能港口决策。

因此, Souf-Aljen 等^[9]和周伟等^[10]采用离散仿真方法量化分析疏浚作业对航道通航效率的影响。这些研究应用数理统计、排队论和仿真等方法,重点考虑不确定性对生产效率的影响。本文在已有研究的基础上,重点探索疏浚工程施工组织计划与碳排放量的影响关系。

本文基于智能体仿真技术建立航道疏浚工程施工作业仿真模型,描述运营船舶进出港和挖泥船疏浚施工过程中存在的不确定性,以最小化船舶船班费用和碳排放成本之和为目标,重点分析疏浚段长度和挖泥船船队配置对疏浚工程船班费用、碳排放成本及综合成本的影响,为合理制定疏浚工程施工组织计划提供决策参考。

1 问题描述及优化模型

1.1 问题描述

航道疏浚施工组织是指在可利用的挖泥船资源下,基于按期完工的前提,合理规划疏浚段并分配挖泥船,确定每艘挖泥船的进场和离场时间,制定挖泥船施工进度计划。耙吸式挖泥船是装备有吸泥耙头、泥泵和泥舱的大型自航装舱式挖泥船,可以自航、自挖、自载、自卸,常用于港口航道疏浚工程^[11]。为此,本文以耙吸式挖泥船施工为例研究航道疏浚工程的施工组织。

航道疏浚工程的施工组织问题可描述为:某一已建港口 $P = \{B, T, W, M, O\}$, 其中 B 、 T 、 W 和 M 分别为泊位、回旋水域、航道和锚地的集合; 航道疏浚工程任务 $D = \{J, K, S, I, T\}$, 其中 J 、 K 、 S 、 I 和 T 分别为疏浚段、避让区、抛泥区、挖泥船和施工时间的集合; 疏浚段集合 $J = \{1, 2, \dots, j\}$; 避让区集合 $K = \{1, 2, \dots, k\}$; 挖泥船集合 $I = \{1, 2, \dots, i\}$; 施工时间(周)集合 $T = \{1, 2, \dots, t\}$ 。疏浚段长度比例 $\alpha_j (j \in J, A = \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_j\})$ 和挖泥船施工计划 γ_{ijt} (γ_{ijt} 为 0-1 变量, 当挖泥船 i 在施工期第 t 周分配到疏浚段 j 时为 1, 否则为 0) 为决策变量, 决定着疏浚段疏浚量和挖泥船分配, 进而影响挖泥船选型、挖泥船施工时间和停置时间等。

1.2 目标函数

面对疏浚成本与碳排放的限制要求, 本文以最小化疏浚综合成本 C (船舶船班费用 C_D 和碳排放成本 C_E 之和) 为目标, 确定各疏浚段比例和挖泥船分配计划, 具体过程为:

$$C = \min(C_D + C_E) \quad (1)$$

$$C_D = \sum_{t \in T} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \gamma_{ijt} (B_{ij,W} t_{ijt,W} + B_{ij,NW} t_{ijt,NW}) \quad (2)$$

$$C_E = \sum_{t \in T} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \gamma_{ijt} (E_{ij,W} t_{ijt,W} + E_{ij,NW} t_{ijt,NW}) A' \quad (3)$$

式中: $B_{ij,W}$ 和 $B_{ij,NW}$ 分别为耙吸船 i 在疏浚段 j 施工对应的使用和停置船舶费用定额, $E_{ij,W}$ 和 $E_{ij,NW}$ 分别为耙吸船 i 在疏浚段 j 施工对应的使用和停置船舶碳排放因子, $t_{ijt,W}$ 和 $t_{ijt,NW}$ 分别为各个时间段 t 内挖泥船的施工作业时间和停置时间, A' 为边际减排成本。 C_D 、 C_E 分别根据 JTS/T 278-2—2019《疏浚工程船舶艘班费用定额》^[12]、Q/CCCG SY 106—2022《水运工程碳排放测算标准》^[13] 确定: 首先, 选取 $B_{ij,W}$ 、 $B_{ij,NW}$ 、 $E_{ij,W}$ 和 $E_{ij,NW}$; 然后, 计算 $t_{ijt,W}$ 和 $t_{ijt,NW}$; 最后, 叠加计算挖泥船 i 在疏浚段 j 施工的船舶船班费用 C_D , 使用边际减排成本法所估算的提前碳达峰情景下的边际减排成本 A' ^[14] (折合人民币为 347.92 元/tCO₂) 代替碳排放成本简化计算施工船舶的碳排放成本 C_E 。

1.3 约束条件

约束条件为:

$$T \geq \max\left(\sum_{t \in T} \sum_{j \in J} \gamma_{ijt}\right) \quad (\forall i \in I) \quad (4)$$

$$\Delta Q_{j,t} \leq 0 \quad (\forall j \in J) \quad (5)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{t \in T} \gamma_{ijt} \geq 1 \quad (\forall j \in J) \quad (6)$$

$$\sum_{j \in J} \gamma_{ijt} \leq 1 \quad (\forall i \in I, \forall t \in T) \quad (7)$$

$$\gamma_{ijt} H_i \leq H_j \quad (\forall i \in I, \forall j \in J, \forall t \in T) \quad (8)$$

$$\gamma_{ijt} (b_{ij} + C_{ij}) \leq B_j \quad (\forall i \in I, \forall j \in J, \forall t \in T) \quad (9)$$

$$\eta_{ik} L_{ik} \leq \min(L_{ik}) \quad (\forall i \in I, \forall k \in K) \quad (10)$$

$$\eta_{ik} H_k \geq h_i \quad (\forall i \in I, \forall k \in K) \quad (11)$$

$$t_{AWT}/t_{AST} \leq 0.5 \quad (12)$$

式中: $\Delta Q_{j,t}$ 为疏浚工作 j 在施工 t 周后的剩余疏浚

量; H_i 为挖泥船 i 的满载吃水; h_i 为挖泥船 i 的实时吃水; H_j 为疏浚工作 j 的航道水深; H_k 为避让区 k 的水深; b_{ij} 为在疏浚工作 j 施工时, 挖泥船 i 航迹带宽度; C_{ij} 为挖泥船 i 在疏浚工作 j 施工时各项安全距离之和; B_j 为疏浚工作 j 的航道宽度; η_{ik} 为 0-1 变量, 当挖泥船 i 前往避让区 k 避让时为 1, 否则为 0; L_{ik} 为挖泥船 i 距离避让区 k 的距离; t_{AWT} 和 t_{AST} 分别为运营船舶在港口的平均等待时间和平均服务时间, 两者之比为港口服务水平指标。式(4)、(5)表示疏浚船必须在工期内完成各疏浚段的施工任务; 式(6)、(7)表示在工期内至少有一艘疏浚船舶分派到一个疏浚段, 且每艘疏浚船在第 t 周只能够分派到一个疏浚段; 式(8)、(9)表示施工区域航道条件满足疏浚船 i 作业要求; 式(10)、(11)表示疏浚船舶避让时就近选择避让区, 且避让区水域条件满足疏浚船要求; 式(12)表示受疏浚工程影响的运营船舶等待时间应在可接受的范围内^[15]。此外, 航道通航规则包括是否允许超越、会遇等约束, 由航道疏浚工程施工作业仿真模型中的船舶交通管理系统(VTS)智能体负责处理。

显然, 挖泥船的 $t_{ij,W}$ 和 $t_{ij,NW}$ 是求解优化模型的关键参数。然而, 对于已建港口, 受可航行水域的尺度限制, 施工作业会受到运营船舶交通流的影响, 而交通流又受到诸多参数控制, 包括船舶到达、水域环境、恶劣天气、通航规则以及泊位空闲状态等^[16], 具有明显的复杂性与不确定。为此, 本文将采用智能体仿真技术建立航道疏浚

工程施工作业仿真模型, 定量分析运营船舶随机到港、恶劣天气、航道水域条件等不确定性对疏浚工程的影响, 进而确定 $t_{ij,W}$ 和 $t_{ij,NW}$ 等, 为优化模型目标函数确定提供数据。

2 求解方法

2.1 仿真优化求解流程

为求解疏浚船舶施工组织优化模型, 本文在 AnyLogic 软件上采用仿真模型与 OptQuest 优化器相结合的方式求解, 以最少的仿真评估次数找到复杂问题的解决方案。

根据仿真优化基本原理, 耙吸船施工组织方案规划见图 1。仿真优化过程为: 1) 根据决策变量和约束条件, OptQuest 优化器生成疏浚船舶施工组织优化模型的初始可行解(包括疏浚段比例和挖泥船施工计划等), 将其输入到航道疏浚工程施工作业仿真模型中; 2) AnyLogic 仿真引擎根据输入的可行解, 进行重复仿真试验, 待仿真运行结束后将仿真结果(包括港口服务水平、各施工段剩余工程量、各疏浚船舶施工时间等)输出到 OptQuest 优化器; 3) OptQuest 优化器根据目标函数计算该可行解对应的总成本和碳排放, 评估可行解的质量; 4) OptQuest 优化器基于先前可行解及其质量确定新可行解的依据, 将新生成的可行解输出到仿真模型并重复仿真试验评估, 直至获得疏浚船舶施工组织最优方案。

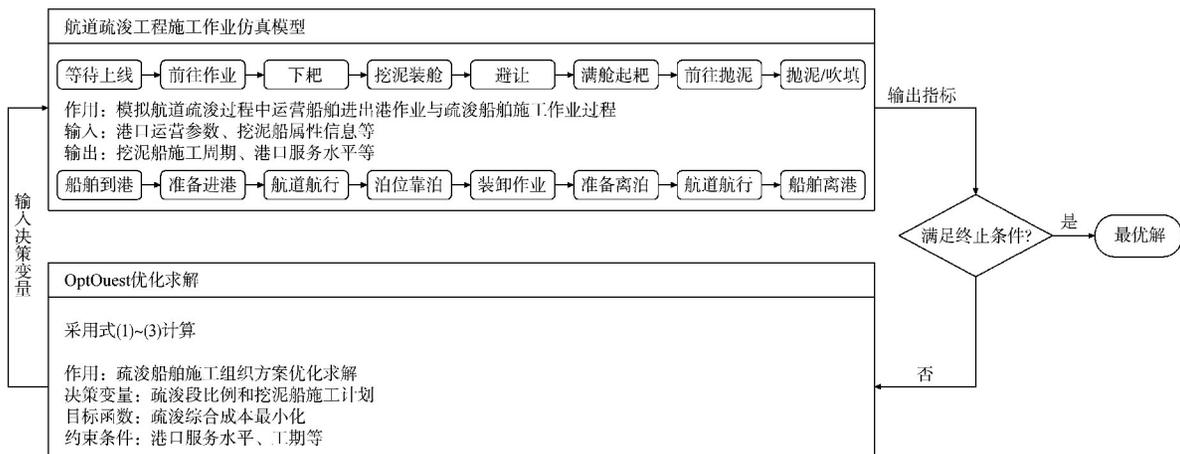


图 1 基于仿真优化的耙吸船施工组织方案规划

2.2 航道疏浚工程施工作业仿真模型

采用智能体仿真建模方法，利用 AnyLogic 软件实现主智能体、挖泥船智能体、运营船舶智能体和 VTS 智能体，建立航道疏浚工程施工作业仿真模型，模拟运营船舶进出港与挖泥船疏浚施工等动态作业过程。该仿真模型实现给定疏浚船舶施工组织方案下港口运营船舶随机到达、进出港、靠泊作业等过程，以及各疏浚船舶进出施工段、挖泥、避让运营船舶、抛泥/吹填等疏浚流程的模拟，最后输出该疏浚施工组织方案下对应的港口服务水平以及疏浚完工时间等指标值。

1) 主智能体是仿真模型的控制智能体，主要功能包括：①定义施工作业过程中涉及的事件、参数、变量、函数、数据集等；②负责初始化港口水域及疏浚施工平面，船舶进出港航路、通航规则、施工航行路线，以及船舶与挖泥船避让规则等基础数据；③创建并激活运营船舶、挖泥船和 VTS 智能体；④输出目标函数所需的指标数据。

2) 挖泥船智能体负责管理挖泥船属性，通过与 VTS 智能体交互实现挖泥船施工状态的转换，模拟挖泥船施工作业的整个流程。挖泥船智能体的状态流程见图 2，模拟挖泥船进场后等待上线、下耙装舱、避让运营船舶、舱满起耙、抛泥、空载返航和重新上线的作业全过程。为描述挖泥船作业效率的影响，引入三角分布函数 $r_{ij} = \text{Triangular}(0.8, 1.2, 1.0)$ ，乘以静态平均效率得到单施工循环挖泥船耙吸效率。疏浚工作完成后，统计挖泥船起锚、下耙、避让、舱满起耙时间点等指标，计算各挖泥船的施工周期时间、挖泥时间、暂停施工避让时间、航行时间等。

3) 运营船舶智能体由主智能体根据船舶到港概率分布规律随机生成，通过与 VTS 智能体的动态交互，模拟运营船舶到达港口、等待分配泊位、航行进港、靠泊装卸作业、离泊解缆、航行出港、离开港口的进出港及靠离泊作业全过程，见图 3。船舶离开港口后，统计运营船舶吨级、种类、到港时间、获得泊位时间、到达泊位时间、完成作业时间、离开港口时间点等指标，计算各运营船的在港时间、等待时间、装卸作业时间等。

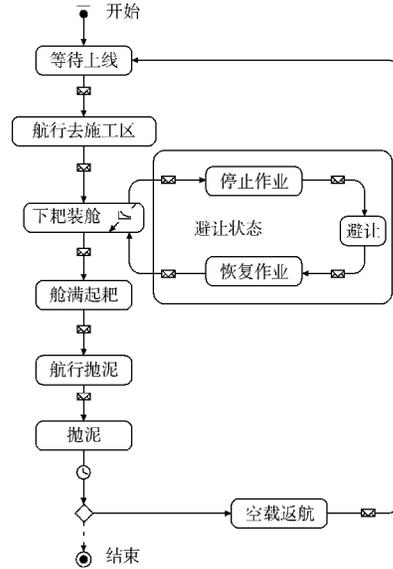


图 2 挖泥船智能体状态流程

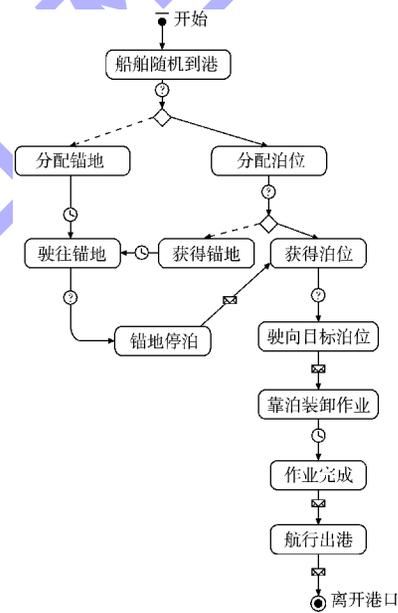


图 3 运营船舶智能体状态流程

4) VTS 智能体负责检查所有水域的水位和交通状态，管理船舶进出港航道、挖泥船避让及恢复作业、挖泥船往返抛泥区等时间窗口。例如，VTS 智能体根据通航规则检查天气条件和航道交通状态，判断运营船舶是否允许进出港；通过运营船舶信息、航行条件和会遇规则等判断挖泥船是否需要避让及是否恢复工作；结合挖泥船舱容和航道交通状态，判断其何时抛泥及是否允许往返抛泥区。若获得条件许可，VTS 智能体将向提出请求的船舶和挖泥船智能体发送信息，实现各

智能体间信息交互。

3 应用实例

如图 4 所示, 某港区水域由锚地 (A_1)、主航道段 ($C_1—C_{10}$)、支航道段 ($C_{11}—C_{13}$)、抛泥航道段 (C_{14})、回旋水域 ($T_1—T_5$)、抛泥区 (U_1 , 距离

航道约 5 km) 和停泊水域 ($Z_1—Z_4$) 组成。本工程使用 4 艘耙吸式挖泥船 (每 10 d 检修 1 次, 具体属性见表 1) 对航道段 ($C_6—C_9$) 进行扩宽加深并航行至抛泥区抛泥, 疏浚工程总量为 370.8 万 m^3 。抛泥区距离疏浚段较近, 挖泥船采用抽舱不溢流方法施工。

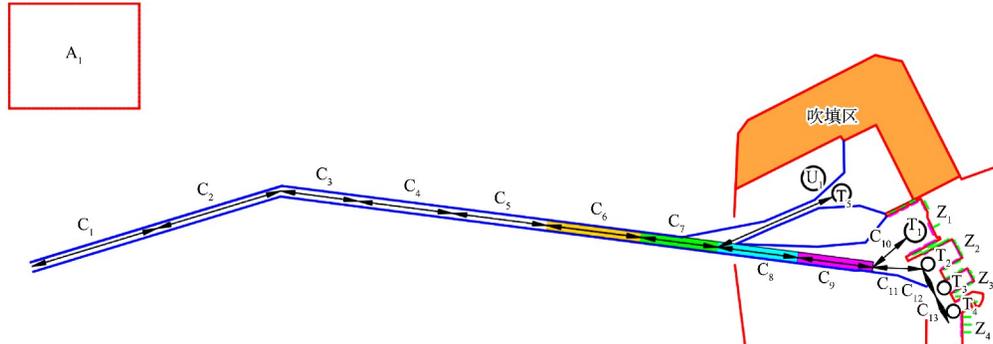


图 4 港口水域及施工平面分布

表 1 挖泥船属性

耙吸式挖泥船编号	舱容/ m^3	无溢流装舱量/ m^3	使用船舶定额/(万元·艘班 $^{-1}$)	停置船舶定额/(万元·艘班 $^{-1}$)	使用船舶碳排放因子/(tCO_2 ·艘班 $^{-1}$)	停置船舶碳排放因子/(tCO_2 ·艘班 $^{-1}$)	进场时间	船舶等级
1	13 000	4 000	15.24	4.82	48.16	4.82	第 3 周	六
2	5 400	1 200	6.06	1.86	23.61	2.36	第 1 周	五
3	5 000	1 200	6.06	1.86	22.13	2.21	第 3 周	五
4	7 000	2 000	9.68	2.99	29.56	2.96	第 3 周	五

1) 挖泥船单施工循环耙吸效率由三角分布函数 $r_{ij} = \text{Triangular}(0.8, 1.2, 1.0)$ 表示, 限制最小耙吸效率 (0.8 倍平均耙吸效率) 和最大耙吸效率 (1.2 倍平均耙吸效率)。

2) 根据对港口运营历史数据的分析, 船舶到达时间间隔和泊位服务时间符合负指数分布, 各吨级到港船舶见表 2。

表 2 预计到港运营船舶吨级、等级和数量

集装箱船/散货船		液体散货船		等级
吨级/万 t	数量/艘次	吨级/万 t	数量/艘次	
[0.3, 3.0)	4 200	[0.3, 2.0)	800	一
[3.0, 5.0)	600	[2.0, 5.0)	250	二
[5.0, 7.0)	670	[5.0, 7.0)	10	三
[7.0, 20.0)	630	[7.0, 10.0)	25	四

3) 疏浚船舶航行时, 耙吸船 1 可与 2 万吨级及以下的集装箱船和散杂货船以及 1 万吨级及以下的液体散杂货船双向通航; 耙吸船 2~4 可与

3 万吨级及以下的集装箱船、5 万吨级及以下的液体散杂货船和散杂货船双向通航。疏浚船舶施工时, 耙吸船 1 可与 5 万吨级以下的集装箱船、液体散杂货船和散杂货船交汇; 而耙吸船 2~4 可与 5 万吨级及以下的集装箱船、液体散杂货船和散杂货船交汇。

3.1 初始施工组织方案评估

根据 JTS 181-5—2012《疏浚与吹填工程设计规范》, 确定生产率和时间利用率等, 拟定初始施工组织方案。该方案按等长度划分疏浚段, 即 $A = \{0.25, 0.25, 0.25, 0.25\}$, 耙吸式挖泥船 1~4 组成挖泥船队 F_1 , 分别服务于疏浚段 C_9 、 C_8 、 C_7 和 C_6 , 采用抽舱不溢流施工方式完成疏浚工作。将该初始施工组织方案输入到仿真模型中, 得到船舶疏浚工程船舶费用、碳排放量、碳排放成本、生产率和时间利用率, 见表 3。

表3 考虑不确定性的初始施工计划仿真结果

耙吸船	施工时间/d	船舶费用/万元	碳排放/tCO ₂	碳排放成本/万元	疏浚综合成本/万元	生产率/(m ³ ·h ⁻¹)		时间利用率/%	
						仿真方法	静态方法	仿真方法	静态方法
1	28	1 200.0	3 730.9	129.8	1 329.8	1 400	1 200	93	80
2	60	1 016.0	3 878.5	134.9	1 150.9	648	600	86	80
3	64	1 076.6	3 848.7	133.9	1 210.5	611	600	81	80
4	45	1 219.1	3 648.4	126.9	1 346.0	864	800	86	80
合计	-	4 511.7	15 106.5	525.5	5 037.2	-	-	-	-

由表3可见,各耙吸船的时间利用率分别为93%、86%、81%和86%,受疏浚段位置等因素影响,按照静态方法将所有疏浚段的时间利用率统一取80%不尽合理。因此,仿真模型有助于协助疏浚工程组织者合理确定时间利用率。此外,初始施工计划疏浚综合成本约为5 037.2万元,约排放15 106.5 tCO₂,且该港区航道疏浚施工期和全年的 t_{AWT}/t_{AST} 均保持在0.238,只是施工期进出港运营船舶的平均等待时间增加了0.03 h,疏浚施工并未对港区运营船舶通航造成明显影响。

3.2 疏浚段比例对施工组织的影响分析

在初始施工组织方案基础上,应用提出的优化模型重新划分疏浚段长度,探索疏浚段比例对船班费用与碳排放量(成本)的影响,结果见图5

(黑点表示不同工况下的仿真结果关于y轴目标的分布,阴影区域表示分布频率,越宽表示在该目标区间内分布的越密集频率越高,可更直观地描述仿真结果的分布情况)。可以看出:1)改变疏浚段比例对港口服务水平有一定的影响,但 t_{AWT}/t_{AST} 均在0.2~0.3,处于可接受的范围之内,疏浚工程对船舶进出港的影响不大。2)改变疏浚段比例对船舶费用与碳排放量(成本)有较明显的影响。例如,船班费用在4 417.0万~5 171.6万元变化,碳排放成本在518.1万~576.9万元变化,疏浚综合成本在4 938.3万~5 748.5万元变化。因此,为最小化船班费用和碳排放量(成本),需要合理地划分疏浚段的长度。

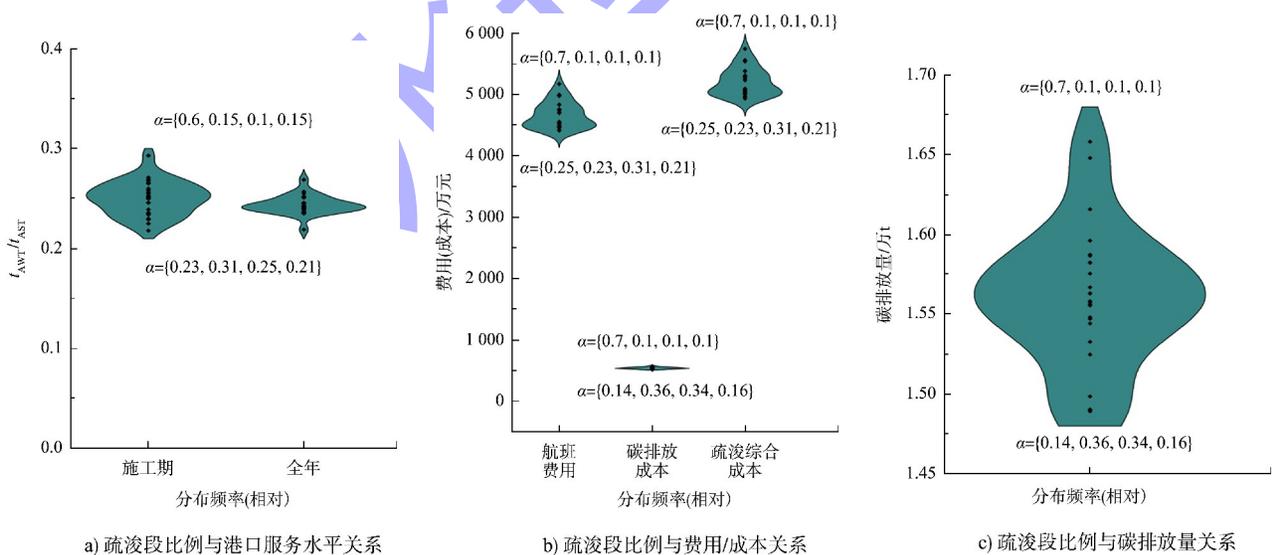


图5 疏浚段比例与港口服务水平、费用/成本以及碳排放量的关系

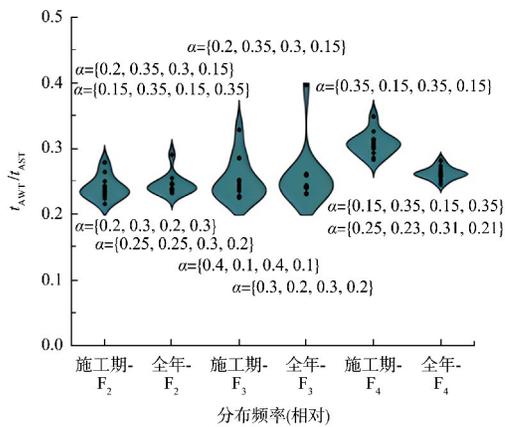
在本案例中,工况 $A = \{0.25, 0.23, 0.31, 0.21\}$ 获得疏浚综合成本最低值为4 938.3万元,相对初始施工计划疏浚综合成本(5 037.2万元)降低约99万元,CO₂排放量减少约209 t;工况 $A =$

$\{0.31, 0.25, 0.23, 0.21\}$ 获得碳排放最小量,CO₂排放量减少214 t。如果更注重低碳施工,可按 $A = \{0.31, 0.25, 0.23, 0.21\}$ 分配疏浚段安排施工组织计划;如果更注重疏浚综合成本,可按 $A =$

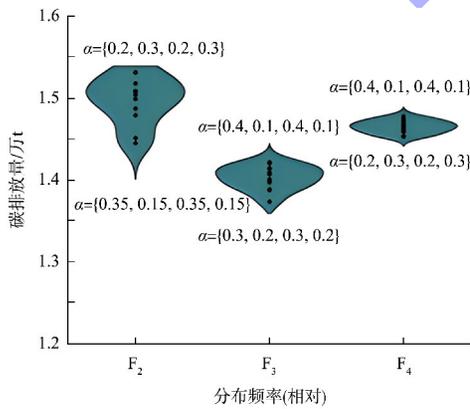
{0.25, 0.23, 0.31, 0.21} 分配疏浚段安排施工组织计划。

3.3 挖泥船队配置对施工组织的影响分析

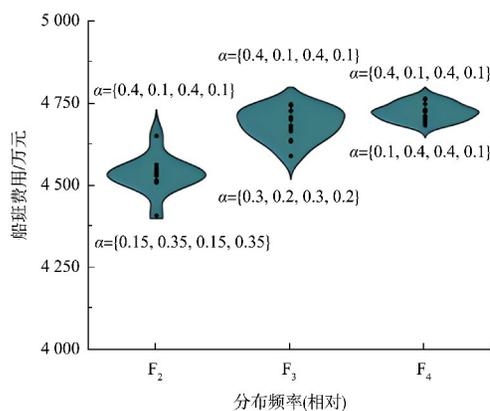
为分析挖泥船队对疏浚工程施工组织的影响, 选取3种挖泥船组合船队, 分别为船队 F_2 (由2艘中型挖泥船4和1艘较小型挖泥船2、1艘较小型挖泥船3组成)、船队 F_3 (4艘中型挖泥船4)、船队 F_4 (4艘大型挖泥船1), 试验结果见图6。



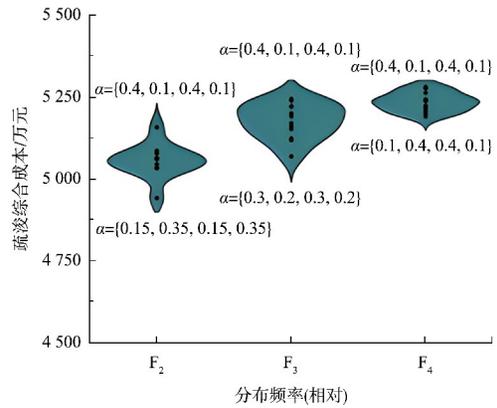
a) 船队 $F_2 \sim F_4$ 疏浚段比例与港口服务水平关系



b) 船队 $F_2 \sim F_4$ 疏浚段比例与碳排放量关系



c) 船队 $F_2 \sim F_4$ 疏浚段比例与船班费用关系



d) 船队 $F_2 \sim F_4$ 疏浚段比例与疏浚综合成本关系

图6 挖泥船队对航道疏浚工程组织的影响

由图6可知: 1) 配置大、中型挖泥船可明显减少总施工时间和降低碳排放量, 但对运营船舶进出港影响变大, 服务水平有所降低, 船班费用和疏浚综合成本有所增加。这是因为较小型挖泥船的船班费用低于中、大型挖泥船, 但较小型挖泥船舱容小导致施工时间大幅增加, 使得疏浚工程中 CO_2 排放量增加, 且碳排放成本在疏浚综合成本中占比约为 1/10, 疏浚综合成本随船班费用的增加而增加。2) 对于船队 F_2 , 当 $A = \{0.15, 0.35, 0.15, 0.35\}$ (各疏浚段对应的挖泥船依次为挖泥船4、2、3、4) 时, 挖泥船船班费用和疏浚综合成本达到最小, 但 CO_2 排放量较大, 相对初始施工计划疏浚综合成本减少 95.2 万元, 碳排放量增加 214 t, 这是由于 $A = \{0.15, 0.35, 0.15, 0.35\}$ 时, 船队 F_2 中较小型挖泥船2和3负责70%的疏浚工作, 尽管增加较小型挖泥船施工比例可以有效减少疏浚费用, 但会增加 CO_2 排放量。3) 对于船队 F_3 , 当 $A = \{0.30, 0.20, 0.20, 0.30\}$ 时, CO_2 排放量和疏浚综合成本均达到最小值, 相对于初始施工计划减少 1364 t 碳排放, 但增加 32 万元的疏浚综合成本。4) 对于船队 F_4 , 当 $A = \{0.10, 0.40, 0.40, 0.10\}$ 时, CO_2 排放量和疏浚综合成本均达到最小值, 相对于初始施工计划减少 560 t 碳排放, 但增加 154 万元疏浚综合成本。

在本案例中, 疏浚综合成本和碳排放量之间常持此增彼减的关系。例如, 增加中、小型挖泥船可有效减少疏浚综合成本, 但超过一定限度会

导致 CO₂ 排放量大幅增加, 对环境造成影响; 增加中、大型挖泥船可有效减少 CO₂ 排放量, 且中型挖泥船的减少效果强于大型挖泥船, 可优先考虑增加中型挖泥船的使用, 但疏浚综合成本会随之增加。

综上, 疏浚段比例和挖泥船船队配置会影响疏浚工程施工组织方案决策, 本文提出的仿真模型和优化模型可以很好地描述施工过程中可能遇到的不确定性, 以及挖泥船与运营船舶的动态交互的复杂性。

4 结语

1) 考虑运营船舶随机到港以及挖泥船作业效率的不确定性, 建立航道疏浚工程施工作业仿真模型, 模拟不确定条件下运营船舶进出港与挖泥船疏浚施工等动态作业过程, 并提出基于仿真和优化的方法确定疏浚工程施工组织计划。

2) 疏浚段比例和挖泥船船队配置会影响疏浚工程施工组织方案决策, 合理划分疏浚段长度和配置疏浚船队有效减少疏浚综合成本和碳排放, 基于仿真和优化的方法可为合理制定疏浚工程施工组织计划提供决策依据。

3) 最小化疏浚综合成本和碳排放量等目标相互制约。增加中、小型挖泥船可有效削减疏浚综合成本, 但过度增加则导致 CO₂ 排放量显著上升而影响环境; 增加中、大型挖泥船可有效减少 CO₂ 排放, 但疏浚综合成本会随之增加。决策者须在疏浚成本和环境影响之间取得平衡, 找到最优解决方案。

参考文献:

- [1] 白硕. 耙吸挖泥船疏浚施工数据深度挖掘与产能优化分析方法及应用[D]. 天津: 天津大学, 2020.
- [2] 中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 中交天津港航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, 2019.
- [3] BRAY R N, BATES A D, LAND J M. Dredging: a

handbook for engineers [M]. 2nd ed. London: Arnold, 1997.

- [4] WOWTSCHUK B M. Production and cost estimating for trailing suction hopper dredge[D]. College Station: Texas A & M University, 2016.
- [5] 张亚楠, 刘昊, 文栋. 黄骅港耙吸船施工周期与装舱时间研究[J]. 水运工程, 2014(7): 154-158.
- [6] 张曦元. 耙吸挖泥船的管道输送建模与控制方法研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2022.
- [7] 熊庭, 汪辰熹, 王斌. 基于双模驱动的耙吸式挖泥船生产率预测[J]. 船舶工程, 2021, 43(11): 6-11.
- [8] KAIZER A, NEUMANN T. The model of support for the decision making process, while organizing dredging works in the ports[J]. Energies (basel), 2021, 14(9): 2706.
- [9] SOUF-ALJEN A S, MAIMUN A, RAHIMUDDIN R, et al. Port capacity forecasting the impact of the dredging works on port sea operations using discrete event simulation[J]. Teknologi, 2016, 78(9/4): 31-40.
- [10] 周伟, 肖英杰, 吴善刚, 等. 基于 Anylogic 的耙吸装驳作业船舶交通组织仿真[J]. 中国航海, 2019, 42(2): 42-46.
- [11] 中交天津航道局有限公司, 中国水运建设行业协会, 中交上海航道局有限公司, 等. 疏浚与吹填工程施工规范: JTS 207—2012 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2012.
- [12] 交通运输水运工程造价定额中心, 原交通部疏浚工程定额站. 疏浚工程船舶艘班费用定额: JTS/T 278-2—2019 [S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2019.
- [13] 中国交通建设集团有限公司. 水运工程碳排放测算标准: Q/CCCG SY106—2022[S]. 北京: 中国交通建设集团有限公司, 2022.
- [14] 曾诗鸿, 李腾飞, 李根. 2030 年碳达峰目标约束下的中国减碳成本研究[J]. 环境保护, 2022, 50(6): 49-53.
- [15] UNCTAD. Port development: a handbook for planners in developing countries[R]. New York: UNCTAD, 1985.
- [16] PIANC MarCom Working Group 121. Harbor approach channels-design guidelines [R]. Belgium: World Association for Waterborne Transport Infrastructure, 2014.

(本文编辑 王璁)