中图分类号：U651　文献标志码：A
DOI:10.27078/j.issn.2097-017X.2026060102

考虑共享机制下的海港锚地资源配置仿真与优化研究

张　艳[1]，姜　晶[1]，孟　德[2]，蒋柳鹏[1]，封学军[1]

（1. 河海大学港口海岸与近海工程学院，江苏 南京 210098；
2. 江苏省交通运输厅港航事业发展中心，江苏 南京 210004）

摘要：为推动港口资源优化整合，本文聚焦于海港锚地配置优化问题，在船型多样化背景下，引入锚位共享机制，综合刻画船舶到港随机性、潮汐变化、极端天气及泊位资源约束等因素的交互影响，构建一个基于离散事件仿真的锚位配置多目标优化模型，以最小化船舶在港时间和锚地建设运营成本为目标，采用NSGA-Ⅱ算法进行求解。以南通港通州湾港区吕四作业区为案例，验证所建模型的适用性和有效性。结果表明：实际锚位供给与船型需求存在结构性矛盾，具体表现为5万吨级锚位过剩、10万吨级锚位不足；若将通用锚地和危险品锚地的配置方案分别调整为4个和3个10万吨级锚位，考虑锚位共享的系统可完全容纳在外海等待的船舶，并将船舶在港时间缩短约3.71%；相较于锚位独占机制，共享机制在不同优化方案下可有效缩短1.2%～7.5%的船舶在港时间。

关键词：锚地；资源配置；离散事件仿真；多目标优化

Research on the simulation and optimization for seaport anchorage area configuration with an anchorage position sharing mechanism

ZHANG Yan[1], JIANG Jing[1], MENG De[2], JIANG Liupeng[1], FENG Xuejun[1]

(1. *College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing* 210098, *China*;
2. *Port and Waterway Development Center of the Jiangsu Provincial Department of Transportation, Nanjing* 210004, *China*)

Abstract: To promote the optimized integration of port resources, this study focuses on the configuration optimization of seaport anchorage areas. Considering the increasingly diversity of vessel types, an anchorage position sharing mechanism is introduced to more realistically characterize the complex interactions among stochastic vessel arrivals, tidal variations, extreme weather, and berth constraints. A multi-objective optimization model for anchorage position configuration is constructed based on the discrete-event system simulation, aiming to minimize both average vessel time in port and anchorage construction and operation costs. The Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II) is employed to solve the model. A case study of the Lvsi Operating Area within the Tongzhou Bay Port Area of Nantong Port is conducted to evaluate the applicability of the proposed model. The results indi-

收稿日期：2026-06-01
基金项目：国家重点研发计划(2021YFB2600203)
第一作者简介：张　艳(1977—)，女，博士，副研究员。研究方向：港航物流与绿色发展。
通信作者简介：封学军(1975—)，男，博士，教授。研究方向：港航物流与绿色发展。

cate that, a structural mismatch exists between the current anchorage position configuration and actual vessel demand, characterized by a surplus of 50000 DWT anchorage positions and a deficiency of 100000 DWT anchorage positions; by reconfiguring the general and dangerous anchorages to four and three 100000 DWT anchorage positions respectively, the system incorporating the sharing mechanism can fully accommodate vessels waiting offshore, reducing the average turnaround time by approximately 3.71%; further optimization reveals that, compared to the exclusive anchorage position mechanism, the sharing mechanism effectively reduces vessel turnaround time by 1.2% to 7.5% under optimized configurations.

Keywords: anchorage area; resource allocation; discrete event simulation; multi-objective optimization

为贯彻落实海洋强国与交通强国发展战略，国家相继出台了《关于推进港口转型升级的指导意见》《关于建设世界一流港口的指导意见》等一系列政策文件[1-2]。依据上述政策导向，相关工作重点聚焦于主要海湾整体规划，有序推进沿海港口群优化整合，支持重点港口绿色化、数字化转型，加快西部陆海新通道建设。这一系列部署为沿海港口发展模式从规模扩张向效益提升的转型升级，以及港口资源系统整合与协同效能的提升，指明了发展要求和实施路径。

然而，随着货物吞吐量增长和船舶大型化导致的深水化发展等趋势增强，沿海港口在基础设施承载能力、资源协同效率及运营管理水平等方面面临着诸多挑战[3]。其中，锚地作为港口系统中为到港船舶提供待泊、候潮或进行各种水上作业所规划的水域[4]，其资源紧张问题带来的连锁效应正日益凸显。据海事服务网CNSS发布，上海港因锚地资源紧张导致锚泊船舶密度过大、锚位间距被极限压缩，曾发生船舶在起锚操作时因空间不足而引发碰撞，造成船毁人亡的重大事故。因此，锚地资源与到港船舶流之间的匹配度不仅关乎滞期成本，更上升为制约航运安全与港口发展的关键瓶颈之一。

针对上述问题，现有文献主要采用排队论、仿真与二者相结合的三类研究方法[5]。基于排队论的研究将锚地、船舶分别视为“服务台”和“顾客”，运用M/M/c等经典排队模型分析系统稳态分布。例如贾松松等[6]提出根据锚地水深和船舶吨级对锚位进行分级，将复杂的港口锚地需求分解为多个同质性子问题，针对每一等级锚位构建船舶排队模型；潘宁等[7]提出用粒子群算法改进灰色马尔科夫模型以预测船舶到港量，以提升排队论的输入质量；李燊名等[8]在锚位等级划分的基础上为湛江港制定最佳锚位数方案，并根据计算结果提出合理的锚地规划方案。排队论因其计算简便、参数易得的特点，被广泛应用于工程计算及学术研究中，但其主要局限在于：排队模型主要面向系统内的作业、等待过程建立模型，无法体现航道的通航条件以及自然条件等因素对港口系统的影响，会与实际产生适配偏差。基于仿真的研究通过构建考虑气象、水文及船舶优先级等因素的运营场景，精细刻画船舶抵离港全流程。如郭子坚等[9]提出锚地容量可靠性的概念，通过冗余设计优化模型提高锚地服务的可靠性，回应了锚地设计容量与实际运行容量存在差距的问题；FENG等[10]基于离散事件仿真方法，提出利用现有锚地资源设置港湾式避让区可作为缓解单向航道瓶颈、实现全生命周期成本最小化的有效策略；CUI等[11]通过构建三维锚地模型，基于蒙特卡洛随机试验在待锚水域内生成大量候选锚点，以船舶安全距离与安全水深为约束仿真筛选出最优的锚点位置。将排队论与仿真方法相结合的研究通常将仿真作为辅助排队论计算与验证的工具。如刘敬贤等[12]通过设计两级串联排队仿真模型，分别计算待泊锚位和候潮锚位数量；HUANG等[13]构建以排队参数为驱动的港口仿真系统，并通过圆填充算法优化锚位布置，实现锚地利用率6%～10%的提升。

面对复杂的港口水域系统和船舶交通组织，更多研究采用仿真与优化相结合的方法，通过算法寻优与仿真检验的反复迭代以求得最优锚位配置。如习凤等[14]以港口运营总成本最小为优化目标，仿真验证内河集装箱港口服务系统的可靠性；刘名武等[15]以港口总成本与船舶在港时间最小为优化目标，构建内河港口锚地-泊位配置仿真模型，分析不同船舶到港强度与泊位服务强度下的最佳配置方案；ZHAO等[16]通过构建锚位分配的仿真模型，直观体现不同分配策略下的锚地拥挤度和船舶在港时间，并以锚地利用率最大和船舶通航综合成本最小为优化目标，实现锚地利用率1%～8%的提升。

上述研究通常将锚位视为不可共享的离散服务单元，较少显式刻画同一锚位内多船共享的动态机制。该假设虽简化了建模与计算过程，却与锚地实际运营中因船舶尺度差异、锚泊时序随机而存在的资源共享现状不符。

基于此，本研究聚焦于海港锚地的配置问题，在船舶多样化背景下，基于“先到先得、向下兼容”的锚位分配原则，引入锚位共享机制：在满足船舶安全间距的前提下允许多艘船舶根据当前锚位面积灵活锚泊，以挖掘锚地资源的剩余锚泊潜力。为深入解析船舶行为随机性、泊位资源约束、潮汐动态约束等因素对锚位配置的影响，本文构建了一个基于离散事件仿真的多目标优化模型，以最小化船舶在港时间和锚地建设运营成本为目标，采用NSGA-Ⅱ算法实现高效求解。最后，以南通港通州湾港区吕四作业区为案例，验证所建模型的适用性和有效性。

1　仿真系统分析

1.1　系统构成

本文构建的仿真系统主要由航道、锚地、泊位三个功能单元，及航行于其间的船舶流所构成。在船舶调度规则与交通管制的约束下，三个功能单元协同运作，完成船舶从进港抵达码头前沿、完成作业后离港全过程涉及的一系列水上作业。其中，航道是利用天然水深或经人工疏浚形成，设有明确界限与助航标志，为船舶进出港提供安全、连续、高效通航路径的水域。锚地是经官方划定、具备适宜水深与底质、供船舶锚泊的水域，其核心功能是作为船舶容纳缓冲区，用于容纳待泊、候潮、避风的船舶。泊位是码头前沿配备专业装卸设施、可供船舶安全系靠并开展装卸作业的服务单元，核心功能为完成船舶的货物装卸任务。上述三个子系统以船舶流串联，形成了紧密耦合、相互反馈的级联服务体系，如图1所示。

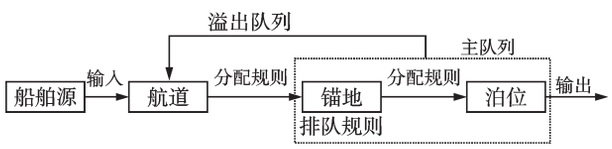


图1　港口系统反馈机制

Fig.1　Feedback mechanism of the port system

1.2　系统边界

为明确仿真模型的具体内容，论文分别从物理、逻辑边界两方面对系统仿真范围予以界定。

物理边界定义了系统所涵盖的完整地理空间范围，可具体分为上边界和下边界：①上边界定义为船舶进入港口系统内，并开始接受该港口统一调度指挥的空间位置，船舶到达此边界视为“到港”；②下边界定义为船舶完成作业后，离开港口管理辖区的空间位置，船舶到达此边界视为“离港”。

逻辑边界定义了系统所涵盖的仿真行为内容，明确仿真的核心模块和简化处理模块：①核心模块：精细刻画船舶在航道中的通航条件（如潮汐、作业时间、极端天气约束）、在锚地的锚位匹配规则与排队等待逻辑以及在泊位的泊位匹配规则与泊位服务效率；②简化模块：将船舶航行过程简化为基于航道安全航速的通过时间，简化船舶掉头、船距控制等具体操纵细节。

1.3　系统工作流程

港口系统的运行流程可分为以下三个阶段：

（1）进港阶段：船舶到港后，若同时满足以下约束可直接进港：①船舶通过航道的全时段处于连续适航潮汐窗口内，保证任意航行时刻的进港航道水深满足船舶吃水要求；②保证任意航行时刻处于日间可通航时间段且未发生极端天气事件；③存在船舶可用的空闲泊位。否则前往锚地排队，若同时满足以下约束可直接进入锚位：①存在可用锚位且锚位未处于饱和状态；②船舶占水域面积（包含回旋半径与船舶安全间距）小于等于锚位剩余面积。否则在外海等待。

（2）作业阶段：船舶以恒定速度行驶并进入泊位，进行装卸作业。

（3）出港阶段：船舶作业完成后，若同时满足以下约束可直接离港：①船舶通过航道的全时段处于连续适航潮汐窗口内，保证任意航行时刻的出港航道水深满足船舶吃水要求；②保证任意航行时刻处于日间可通航时间段且未发生极端天气事件。否则停留在泊位等待。

系统运行呈现为一个典型的离散事件工作流程，如图2所示，由船舶到离、进出锚地、进出泊位等事件触发系统状态的改变。因此，该系统本质上属于多服务台、排队容量有限的串联排队网络。

2　仿真模型构建

2.1　仿真结构设计

仿真模型由永久实体、临时实体及实体间的复杂交互规则构成。永久实体是仿真系统中长期存在的基础服务资源，其配置参数决定了系统的服务能力，此处指航道、锚地和泊位；临时实体是在仿真系统中流动、接受服务的对象，此处指到港船舶。各实体的属性和状态定义如表1所示。

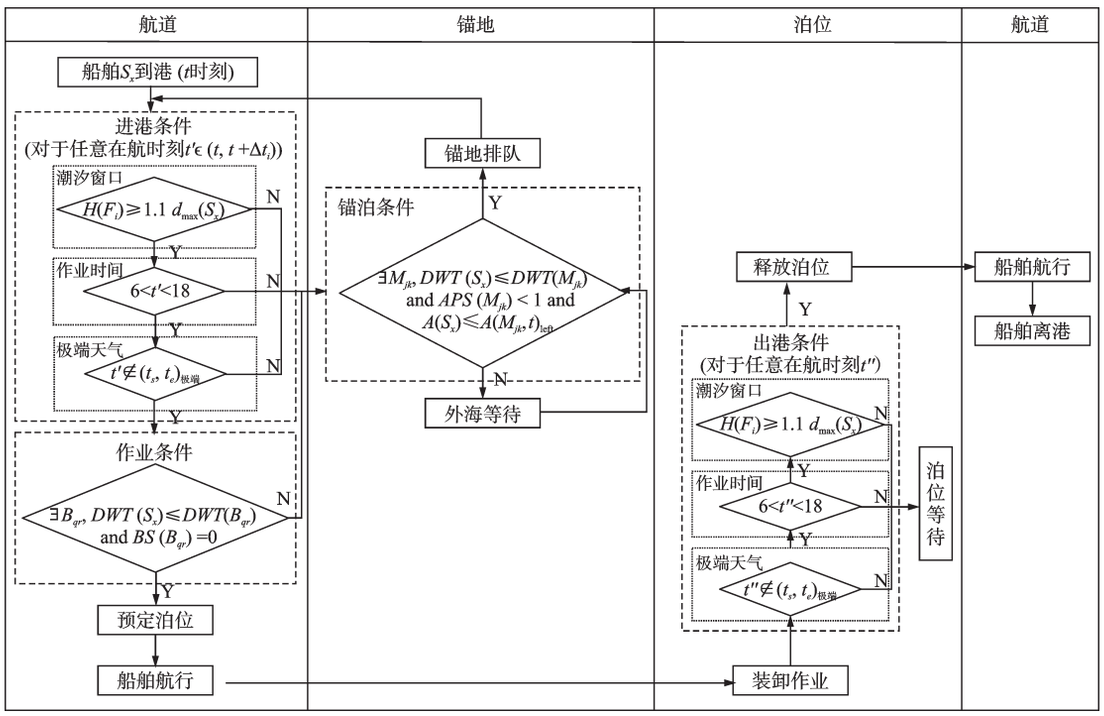


图2　港口系统流程图

Fig.2　Flowchart of port system

表1　仿真模型结构设计

Tab. 1　Structure design of the simulation model

实体		符号	符号解释
航道	集合	$F=\{F_i \mid i\in N^*, 1\leqslant i\leqslant I\}$	I为系统边界内航道总数；i为航道索引；N^*为正常数集合
	属性	$L(F_i)$	航道F_i的长度
		$H(F_i, t)$	航道F_i在t时刻的水深
	状态	$FS(t)=\{0, 1\}$	航道在t时刻的通航状态，取值：0表示正常，1表示限行
锚地	集合	$M=\{M_{g,\,jk}, M_{d,\,jk} \mid j, k\in N^*, 1\leqslant j\leqslant J, 1\leqslant k\leqslant K_j\}$	J为锚位划分的总等级数；j为锚位等级索引；K_j为第j个等级中包含的锚位总数；k为锚位序号索引；g为通用锚地；d为危险品锚地
	属性	$DWT(M_{jk})$	锚位M_{jk}的等级
		$H(M_{jk})$	锚位M_{jk}的设计水深
		H_s	锚地的实际平均水深
		$A(M_{jk})$	锚位M_{jk}的设计面积
		$A=\{A_g, A_d\}$	锚地的实际总面积
		$A\ (M_{jk}, t)_{left}$	锚位M_{jk}在t时刻的剩余面积
	状态	$APS(M_{jk}, t)=\{0, 0.5, 1\}$	锚位M_{jk}在t时刻的占用状态，取值：0表示空闲，0.5表示部分占用，1表示饱和
泊位	集合	$B=\{B_{qr} \mid q, r\in N^*, 1\leqslant q\leqslant Q, 1\leqslant r\leqslant R_q\}$	Q为泊位的总等级数；q为泊位等级索引；R_q为第q个等级中包含的泊位总数；r为泊位序号索引
	属性	$H(B_{qr})$	泊位B_{qr}的水深
	状态	$BS(B_{qr}, t)=\{0, 1\}$	泊位B_{qr}在t时刻的占用状态，取值：0表示空闲，1表示占用
船舶	集合	$S=\{S_x \mid x\in N^*, 1\leqslant x\leqslant X\}$	X为离港船舶总数；x为船舶索引
	属性	$DWT(S_x)$	船舶S_x的载重吨
		$l(S_x)$	船舶S_x的设计船长
		$d_{max}(S_x)$	船舶S_x的满载吃水
		$d_{min}(S_x)$	船舶S_x的空载吃水
		$A(S_x)$	船舶S_x的占用面积(包含回旋半径与安全间距)
	状态	$v(S_x)$	船舶S_x的航速
		$Load(S_x, t)$	船舶S_x在t时刻的装载情况
		$SS(S_x, t)=\{0, 1, 2, 3, 4, 5\}$	船舶S_x在t时刻的状态，取值：0表示到港，1表示在航道航行，2表示在泊位作业，3表示在锚地等待，4表示在外海等待，5表示离港

2.2　仿真流程设计

港口进出港流程可具体分为船舶到达、锚地排队、泊位作业、航道航行四个过程。

(1)船舶到达过程。本研究采用基于数据驱动的拟合优度比较方法,对船舶的实际到港时间间隔进行多种常见概率分布的拟合,并采用K-S检验比较各分布的拟合优度,选择$p>0.05$且K-S统计量最小的分布作为仿真中船舶到港时间间隔的生成模型。同时,为确保仿真的可复现性,实验基于拟合分布预先生成完整的船舶到港时间序列作为确定性输入。

(2)锚地排队过程。该过程主要反映不同的船舶锚泊规则对船舶实体的影响。传统的锚位分配模式通常采用“锚位独占机制”,将锚位视为不可共享的离散单元,并规定任一时刻单个锚位仅允许停靠一艘船舶。这种处理方式虽简化了船舶进入锚地的排队逻辑,却忽略了船舶实际尺度与锚位设计容量之间存在的差异,易导致锚位水域部分闲置、面积资源利用不充分,因而难以灵活应对随机到港船舶流下的动态锚泊需求。为充分盘活锚位闲置区域,深入挖掘锚地资源的潜力,本研究引入“锚位共享机制”。该机制打破了传统“一船一锚位”的刚性约束,在保障船舶锚泊安全间距的前提下,允许多艘船舶根据实时可用空间灵活共享同一锚位的剩余水域,从而实现对锚位面积的精细化利用。

本文明确锚位资源的分配遵循以下基本原则:①先到先服务;②$DWT(S_x)\leqslant DWT(M_{jk})$;③普通船舶与危险品船舶分开锚泊。在此基础上引入锚位共享机制,可通过对参数—锚位状态$APS(M_{jk},t)$的标定过程来实现:

当$APS(M_{jk},t)=0$时,表示锚位处于空闲状态,如图3(a)所示,锚位可接收任意符合等级要求的船舶。当$APS(M_{jk},t)=0.5$时,表示锚位处于部分占用的状态,如图3(b)所示,此时锚位需根据锚位剩余面积与到港船舶占水域面积判断是否能够继续容纳船舶,其实时占用率$O(M_{jk},t)$如下式所示:

$$O(M_{jk},t)=1-\frac{A(M_{jk},t)_{\text{left}}}{A(M_{jk})} \tag{1}$$

当$APS(M_{jk},t)=1$时,表示锚位处于饱和状态,如图3(c)所示,锚位不可接收任何新增船舶,此时锚位剩余面积$A(M_{jk},t)_{\text{left}}$小于系统内最小到港船舶所占用的水域面积$A_{\min}$。

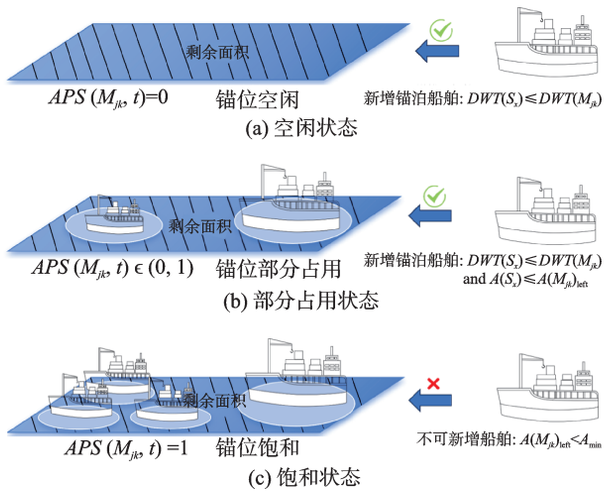


图3　锚位状态分析

Fig.3　Analysis of anchorage position states

(3)泊位作业过程。该过程主要反映泊位实体对船舶实体的影响,具体体现在船舶在港时间和船舶装载状态的变化。泊位资源分配遵循“先到先得、向下兼容”的原则,其服务时间基于历史数据进行概率分布拟合,分布均值表征该泊位的平均装卸效率、分布方差表征作业时间的随机波动程度。

(4)航道航行过程。该过程主要涉及到船舶进出港的若干要求,可分为潮汐、作业时间和极端天气约束,共同构成船舶进出港条件。仿真采用串联校验逻辑,任一条件失效则无法进入航道航行,系统必须保证在这三类约束共同影响下的可通航时间窗口完全覆盖船舶航行时段。

潮汐约束规定船舶应在满足安全水深的情况下航行。为在仿真模型中考虑潮汐影响,规定可用于仿真环境输入的潮位过程函数$\xi(t)$,如下式所示:

$$\xi(t)=H_0+\sum_{n=1}^{N_t}R_n\cos(\omega_n t+\varphi_n) \tag{2}$$

式中,H_0为平均潮位(m);N_t为分潮数量(个),$N_t\in N^*$,通常取8~10个主要分潮以平衡计算精度与效率;R_n为第n个分潮的振幅(m);ω_n为第n个分潮的角速度(°)/h);φ_n为第n个分潮的迟角(°)。R_n、ω_n和φ_n统称为各分潮的调和常数,基于历史潮位观测数据得到各项调和常数后即可构建任意时刻的潮位过程函数。对于需要乘潮的深吃水船舶,根据《海港总体设计规范》(JTS 165—2025),只有当船舶在航行时段内的通航水位$H(F_i,t)$满足$H(F_i,t)\geqslant 1.1d(S_x)$,其中,$d(S_x)$为船舶吃水(m)。

作业时间约束规定船舶应在白天航行。极端天气约束规定船舶在极端天气发生过程中应避免航行。

2.3 仿真代码设计

仿真采用事件调度法，以“驱动-分派-迭代”的思路进行循环直至仿真终止，具体步骤为：①从事件列表中取出下一个最早发生时间，并以此驱动仿真时钟推进；②识别事件类型，并将其分派给相应的处理函数进入事件处理流程（即事件处理规则）；③重复上述步骤，直至仿真终止。该过程的伪代码如表2所示。

表2 仿真模型循环伪代码

Tab.2 Pseudocode of the loop for the simulation model

仿真模型循环伪代码
function mainSimulation（仿真状态 state，仿真终止时间 t_end）：
//步骤①
state.clock← t_event //推进仿真时钟
//步骤②+③
switch event_type：
Case “EVENT_SHIP_ARRIVAL”：
handle_船舶到港事件（state，event_data）
Case “EVENT_START_SAILING”：
handle _开始航行事件（state，event_data）
Case “EVENT_ARRIVE_BERTH”：
handle _抵达泊位事件（state，event_data）
Case “EVENT_REQUEST_FAIRWAY”：
handle _申请进入航道事件（state，event_data）
Case “EVENT_DEPART_BERTH”：
handle _离开泊位事件（state，event_data）
Case “EVENT_DEPART_SYSTEM”：
handle _离港事件（state，event_data）
Case “EVENT_ARRIVE_ANCHOR”：
handle _抵达锚位事件（state，event_data）
Case “EVENT_WEATHER_START”：
handle _极端天气开始事件（state）
Case “EVENT_WEATHER_END”：
handle _极端天气结束事件（state）
Case “EVENT_DAYTIME_START”：
handle _日间开始事件（state）
Case “EVENT_DAYTIME_END”：
handle _日间结束事件（state）
Case “EVENT_UPDATE_TIDAL_DEPTH”：
handle _潮位更新事件（state）
default：
Throw exception（“未知事件类型：” + event_type）
end switch
end while//仿真结束，计算并返回性能指标
return calculatePerformanceMetrics（state）
end function

仿真以Python3.8作为平台，主要调用以下功能模块：Numpy与math用于数值计算与潮汐过程函数的求解；Pandas用于仿真船舶流与仿真输出数据的存储与管理；random与numpy.random用于生成泊位服务时间与极端天气发生时刻等随机变量；heapq用于管理仿真事件队列；enum和collections.Counter用于定义和统计船舶各类运行状态。

3 仿真与优化耦合模型构建

3.1 优化模型构建

港口锚地的核心功能在于充当港口系统的“蓄水池”和“稳压器”[17]，其价值体现在：一是提供安全缓冲，容纳待泊船舶队列，防止船舶占用航道致使港区交通流混乱；二是调节供需平衡，化解因恶劣天气、机械故障、作业高峰等导致的临时性供需矛盾。因此，优化模型以船舶在港时间（F_1）最短与锚地建设运营成本（F_2）最小为优化目标，寻求最优解。

优化模型的决策变量为各等级锚位配置方案，定义为 $K=\{K_{gj},K_{dj}|j\in N^*,1\leqslant j\leqslant J\}$。则目标函数为：

$$\min F_1(K)=\sum_{x=1}^{X}T(S_x)/X \tag{3}$$

$$\min F_2(K)=(1+\beta\cdot N)\sum_{j=1}^{J}\sum_{k=1}^{K_j}\left[c_1\cdot A(M_{jk})\cdot\max(0,H(M_{jk})-H_s)\right]/10^8 \tag{4}$$

约束条件如下式所示：

$$\text{s.t.}\quad K_j\in N_0 \tag{5}$$

$$\sum\nolimits_{j,k}A(M_{g,jk})\leqslant A_g,\quad \sum\nolimits_{j,k}A(M_{d,jk})\leqslant A_d \tag{6}$$

$$F_2(K)\leqslant C \tag{7}$$

式中，$F_1(K)$为船舶在港时间（h）；$T(S_x)$为船舶S_x在港累计时间（h）；$F_2(K)$为锚地建设运营成本（元）；c_1为单位体积锚位建设成本系数（元/m^3）；β为锚位年均运营维护成本系数，与锚位建设总成本相关；N为规划期年数（年），$N\in N^*$。式（5）保证各等级锚位数量必须为非负整数；式（6）保证各锚位面积之和不得超过实际锚地面积；式（7）保证锚地总成本不得超过一定投资上限C。

本文构建的多目标优化模型具有以下特征：①决策变量为整数；②目标函数包含不可解析的“黑箱”函数；③约束条件均为线性不等式与整数约束；④目标函数之间存在权衡关系。

进化算法作为一种启发式群体搜索方法，不依赖于梯度信息，能够有效处理复杂约束和整数变量的多目标优化。其中，NSGA-Ⅱ算法因具有收敛性好、计算效率高、单次运行可得到分布均匀的帕累托前沿等优势，成为求解此类问题的常用方法。因此，本研究选用NSGA-Ⅱ算法进行求解。

3.2　仿真优化耦合框架

图4呈现了上述“仿真-优化”耦合模型的集成框架。其中，仿真模型负责对优化算法所生成的候选锚位配置方案进行模拟运行与性能评估，优化算法基于仿真反馈的系统性能，搜索与筛选直至找到最优的锚位配置方案。具体步骤如下：①优化算法生成一组决策变量，即满足约束条件的锚位配置方案；②在固定随机数种子下调用仿真模型对该配置方案进行模拟试验；③仿真模型返回优化目标函数值并反馈至优化器；④采用NSGA-Ⅱ算法进行非支配排序、选择、交叉与变异等操作，生成新一代方案。上述“生成-仿真-评估-进化”的过程迭代进行直至算法收敛，最终获得帕累托解集。

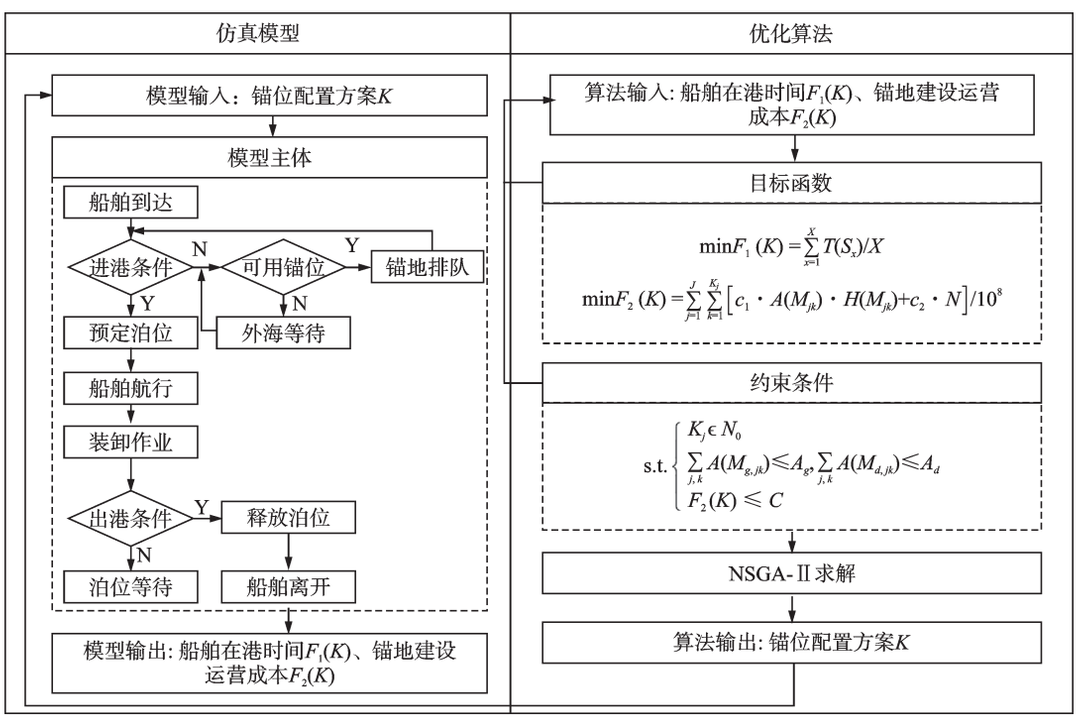


图4　仿真与优化的关系

Fig.4　Relationship between simulation and optimization

4　案例分析

本文选取江苏省南通港通州湾港区吕四作业区作为案例进行分析。吕四作业区位于小庙洪水道南侧，包括环抱式港池、大唐电厂以东长栈桥码头两部分组成，如图5所示，主要以通用散杂货、固体散货和液体散货等物资运输为主。

4.1　研究区域简介

4.1.1　到港船舶与泊位服务情况

吕四作业区采取栈桥式和挖入式相结合的布置方案，设置有大唐电厂码头1#、2#和西港池码头8#～11#两处，共计6个泊位。所有泊位的实际历史服务时间数据经拟合处理后，结果如表3所示。

基于船视宝平台（https://voc.myvessel.cn），本研究采集了上述6个泊位从2026年1月27日至2026年4月24日期间所有到港船舶的AIS数据，共194条有效船舶记录，具体情况如表4所示。

对收集到的194艘船舶的到港时间间隔进行常见概率分布的拟合，拟合结果如表5所示。

经K-S检验得，伽马分布拟合（shape=1.0229；scale=10.8848；location=0.0000）优度最佳，其拟合曲线如图6所示。

仿真生成为期90 d（2160 h）的仿真船舶到港序列，共计198艘船舶。其中，非危险品船舶169艘，危险品船舶29艘。船舶具体到达信息如图7所示。

4.1.2　航道情况

吕四作业区航道可分为两段（如图5所示）：①小庙洪进港航道：航道自外海小庙洪水道至吕四大唐电厂码头附近A点；②吕四环抱式港池进港航道：航道

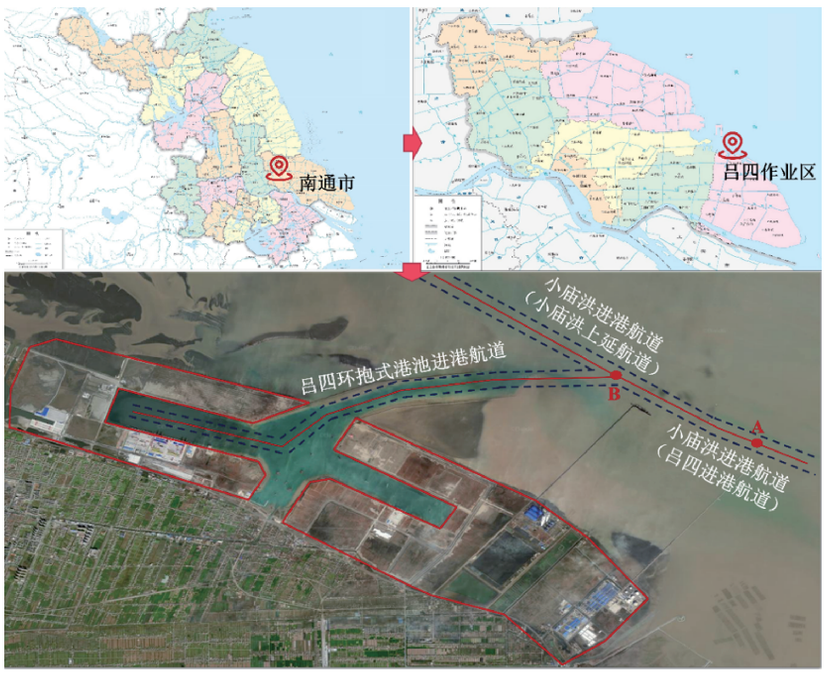


图5　吕四作业区地理位置

Fig.5　Geographical location of the Lvsi Operation Section

表3　吕四作业区泊位情况

Tab. 3　Berths status of the Lvsi Operation Section

泊位名称	泊位吨级	泊位类型	最优分布	K-S统计量	p值	均值/(h/艘)	方差/h^2
大唐电厂码头1#泊位	3.5万吨级	散货	伽马分布	0.16550	0.90698	61.10	455.8
大唐电厂码头2#泊位	3.5万吨级	散货	伽马分布	0.18609	0.69289	59.62	572.9
通远码头8#泊位	10万吨级	集装箱	威布尔分布	0.11254	0.13625	31.81	441.2
通远码头9#泊位	10万吨级	集装箱	—	—	—	46.25	—
通洋码头10#泊位	10万吨级	通用	威布尔分布	0.13996	0.70717	60.50	511.7
通洋码头11#泊位	10万吨级	通用	威布尔分布	0.11538	0.69712	34.90	1085.6

注：由于通远码头9#泊位数据不足，此处仅取均值作为仿真输入。

表4　吕四作业区到港船舶情况

Tab. 4　Arrival vessels of the Lvsi Operation Section

船型	艘次	分吨级(万吨)占比/%				
		0～0.5	0.5～1	1～3	3～5	5～10
杂货	46	54.3	6.5	23.9	8.7	6.5
干散货	49	16.3	4.1	0.0	12.2	67.3
集装箱	70	0.0	41.4	57.1	0.0	1.4
危险品	29	62.1	0.0	13.8	10.3	13.8

表5　船舶到港时间间隔拟合结果

Tab. 5　Fitting results of vessel inter-arrival time

常见分布	K-S统计量	p值
伽马分布	0.04714	0.76621(通过)
威布尔分布	0.04757	0.75664(通过)
指数分布	0.04828	0.74041(通过)
对数正态分布	0.09113	0.07612(通过)
正态分布	0.16535	0.00004(未通过)
瑞利分布	0.31163	0.00000(未通过)

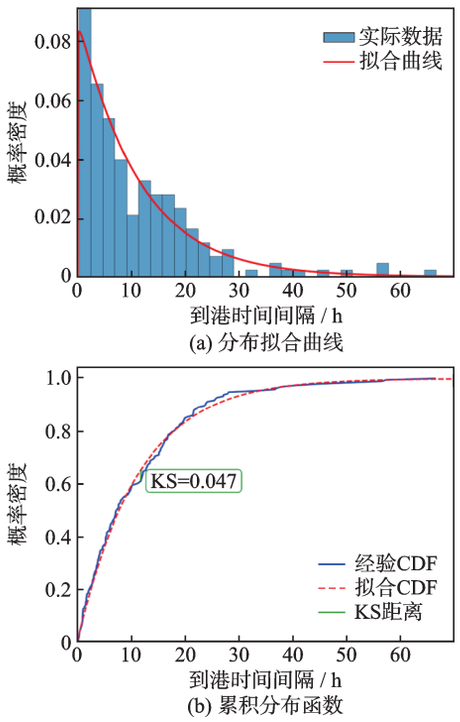


图 6　船舶到港时间间隔拟合曲线

Fig.6　Fitting curve of vessel inter-arrival time

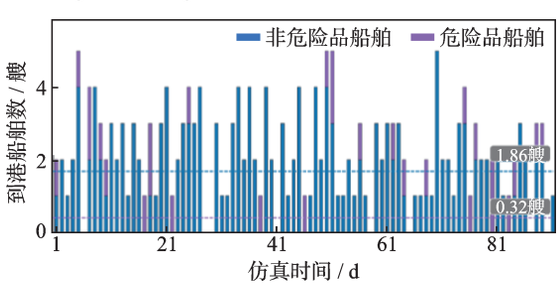


图 7　仿真船舶逐日到达量

Fig.7　Daily arrivals of simulated vessels

自吕四作业区西港池至小庙洪进港航道 B 点。基于《南通沿海港口及其附近水域通航安全管理规定》的相关条例及海事管理实践，对后续仿真模型进行相关设定：①规定船舶安全航速为 14 节（约 25.9 km/h）；②规定每日 6:00～18:00 为允许船舶航行的日间时段，18:00～次日 6:00 为允许船舶航行的夜间时段。

4.1.3　锚地情况

由南通海事发布信息可知，吕四作业区与北侧海门作业区、三夹沙作业区到港船舶共用两处锚地——1#通用锚地和 2#危险品锚地，地理位置如图 8 所示。

对三夹沙作业区、海门作业区在相同时段内的到港船舶数量进行了汇总，共获得 489 条有效的船舶记录。为聚焦于吕四作业区的锚地配置研究，依据吕四作业区的到港船舶占比（28.4%）对锚地总面积进行相应比例的折减，得到吕四作业区对应的理论锚地面积分别为 5.68、3.41_km^2。具体信息如表 6 所示。

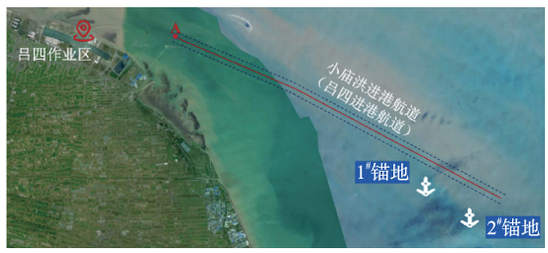


图 8　吕四作业区锚地情况

Fig.8　Anchorage areas of the Lvsi Operation Section

表 6　吕四作业区锚地情况

Tab.6　Anchorage areas of the Lvsi Operation Section

锚地	面积/km^2	锚位配置	用途
1#锚地	5.68	8个5万吨级 2个10万吨级	通用
2#锚地	3.41	5个5万吨级 1个10万吨级	危险品

4.1.4　水文与气象情况

基于国家地球系统科学数据中心（https://www.geodata.cn）的数据，本研究对吕四海洋站潮位数据进行调和分析，得到 8 个主要分潮的振幅和迟角如表 7 所示，代入式(2)后可得到完整的潮位过程函数。

表 7　吕四作业区潮汐调和常数

Tab.7　Tide harmonic constants of the Lvsi Operation Section

分潮	角速度/((°)·h^{-1})	振幅/m	迟角/(°)
主太阴半日潮	28.98	1.20	145.2
主太阳半日潮	30.00	0.36	181.4
太阴椭率主要半日潮	28.44	0.25	121.5
太阴-太阳合成半日潮	30.08	0.10	181.4
太阴-太阳合成全日潮	15.04	0.41	215.3
主太阴全日潮	13.94	0.30	187.6
主太阳全日潮	14.96	0.13	215.3
太阴椭率主要全日潮	13.40	0.06	167.8

以 7 万吨级集装箱船为例，其满载吃水为 14.5 m，则安全水深为 15.95 m，同时满足潮汐和作业时间约束的可通航时间窗口如图 9 所示。

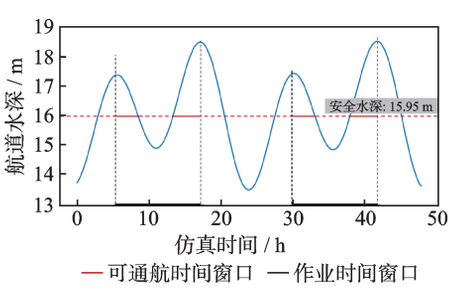


图 9　满足潮汐和作业时间约束的可通航时间窗口

Fig.9　Navigation time windows satisfying tidal and daytime constraints

南通沿海通航安全主要受季风和大雾影响。其中，季风影响较大，集中在11月至次年1月，影响时长为数小时至1天；年平均雾天达60余天，集中在4～5月及12月，影响时长为3～9 h。现场调研表明，研究期内极端天气综合月均发生频率为5次，单次管制时间为9 h。综上所述，具体参数标定如表8所示。

表8　参数标定

Tab. 8　Parameter calibration

参数			数值	单位
仿真	仿真时长		2160	h
	航道	航道长度	{60.3, 5.5, 54.8, 60.3}	km
		航道底标高	−12.5	m
		航道水深	$\xi(t)$+12.5	m
	锚地	锚位等级	{0.5, 1, 3, 5, 10, 15}	万吨
		锚位设计水深	{8.28, 10.44, 14.40, 16.20, 18.00, 21.72}	m
		锚地实际平均水深	15	m
		锚位设计面积	{0.15, 0.18, 0.35, 0.51, 0.67, 0.81}	km^2
		锚地实际总面积	{5.68, 3.41}	km^2
	泊位	泊位等级	{3.5, 10}	万吨
		泊位前沿底标高	{−13.5, −14.5}	m
	船舶	船舶航速	25.9	km/h
	潮汐	潮位过程函数	$\xi(t)$	m
	作业时间	白天时段	[6:00, 18:00]	/
	极端天气	月平均发生次数	5	次/月
		单次管制时间	9	h
优化	到港船舶总数		198	艘
	锚位建设成本系数		30	元/m^3
	锚位年均运营维护成本系数		3%	—
	规划期年数		20	年
	投资上限		25	亿元
	种群规模		50	—
	进化代数		100	—
	交叉概率		0.8	—
	变异概率		0.1	—

注：①航道长度集合内元素分别为系统边界至泊位的航道长度、系统边界至锚地的航道长度、锚地至泊位的航道长度和泊位到边界的航道长度；②鉴于吕四作业区的最大到港船舶不超过10万吨级，为兼顾设计方案成本和锚位可共享性的可行性，规定规划中最大锚位等级为15万吨级；③船舶的其余属性（如设计船长、满载吃水、空载吃水等）由《海港总体设计规范》确定，根据船型、船舶吨级对照选取；④锚地年均运营维护成本依据《水运建设项目经济评价方法与参数》及相关项目报告确定。

4.2　模型结果

4.2.1　稳定性检验

为验证仿真输出指标的可靠性，本研究以50组不同的随机数流进行独立重复试验。统计结果表明，离港船舶数的变异系数为3.8%，系统通过能力指标较为稳定；船舶在港时间的变异系数为14.5%，其波动主要源于作业时间、极端天气与潮汐限制的叠加效应，导致部分船舶存在较长的等待时间。总体而言，各项关键指标的波动幅度在可接受范围内，仿真模型的稳定性通过检验。

4.2.2　实际锚位配置

根据表5信息，在实际锚位配置方案$K=\{K_{gj}, K_{dj}|K_{gj}=\{0,0,0,8,2,0\}, K_{dj}=\{0,0,0,5,1,0\}\}$时，具体仿真结果如表9所示。

由表9信息可知，在当前配置下，共享和独占模型呈现出的结果高度一致。其原因可归结为以下两点：①锚位资源供给过剩。当前配置的锚位总数超过船舶实际锚泊需求，大部分5万吨级锚位在仿真周期内长期处于空闲状态，导致两种锚位分配机制中的船舶行为与港口效能在统计意义上表现趋同。②泊位服务能力充足。当船舶到达强度小于泊位服

表9　实际锚位配置仿真结果

Tab. 9　Simulation results of the as-implemented anchorage position configuration

锚位分配机制	离港船舶/艘	经历外海等待的船舶/艘	$F_1(K)$/h	$F_2(K)$/亿元
共享	186	8(4.3%)	124.42	6.76
独占	186	8(4.3%)	124.42	6.76

务率(即系统服务强度$\rho<1$时),多数船舶可无需排队、直接进港作业。此时,锚地需求主要由潮汐、作业时间和极端天气等外部约束引发,削弱了锚位分配机制对系统性能的影响。

经过进一步的仿真实验验证,在当前船舶到达强度与泊位配置下,若增加锚地建设运营成本至6.79亿元,调整锚位配置方案为$K=\{K_{gj},K_{dj}|K_{gj}=\{0,0,0,0,4,0\},K_{dj}=\{0,0,0,0,3,0\}\}$,即1#公用锚地和2#危险品锚地分别设置4个、3个10万吨级锚位,锚位共享机制下的系统可完全容纳在外海等待的船舶,并将船舶在港时间缩短约3.71%。相比之下,锚位独占机制下的系统仍需增设一个5万吨级锚位才能实现同等容纳能力。

4.2.3　优化锚位配置

上述分析证实,现有配置下锚位的冗余掩盖了共享与独占机制的差异,使得系统在低负荷下运行平稳。为深入挖掘锚地资源潜力,提升港口运营的经济性与资源利用效率,本节将在既定船舶到达强度与泊位约束下,对锚位等级与数量进行重构,寻求更优的资源供给方案。优化算法最终得到锚位共享机制下的帕累托曲线如图10所示。

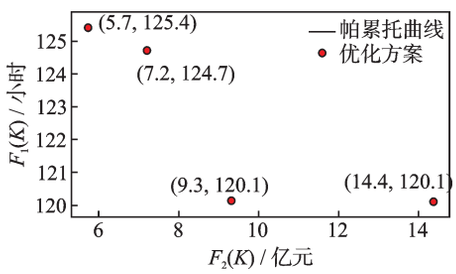


图10　锚地配置帕累托解集

Fig.10　Pareto solutions of anchorage area configuration

根据拟合得到的指数函数为$y=5e^{-0.21x}+120$(拟合优度$R^2=0.99$)。对该函数求一阶导数得$dy/dx=-e^{-0.21x}<0$,证实曲线单调递减:随着锚地建设运营成本$F_2(K)$的增加,船舶平均在港时间$F_1(K)$逐渐降低。进一步分析边际效益可知,边际时间缩减量$-dy/dx=e^{-0.21x}$同样随成本增加而递减,即每增加1亿元锚地成本所能缩短的船舶在港时间逐渐减小,呈现出边际效益递减的规律。

基于图10中的4种配置方案,具体对比锚位共享与独占机制下不同锚位配置方案的系统性能指标,如表10所示。其中,锚位配置以六元组的形式给出,分别对应0.5、1、3、5、10和15万吨锚位。

表10　优化方案对比分析

Tab. 10　Comparative analysis of optimization schemes

序号	分配机制	通用	危险品	$F_1(K)$/h	$F_2K)$/亿元	离港船舶/艘	曾经历外海等待船舶/艘
1	共享	{0, 0, 0, 0, 4, 3}	{0, 0, 0, 0, 0, 1}	120.13	14.37	186	1(0.5%)
	独占			129.28		186	5(2.7%)
2	共享	{0, 0, 2, 3, 3, 1}	{0, 0, 2, 0, 3, 0}	120.13	9.33	186	0(0.0%)
	独占			123.22		186	2(1.1%)
3	共享	{0, 0, 0, 0, 0, 2}	{0, 0, 0, 0, 2, 0}	124.74	7.18	186	4(2.2%)
	独占			134.82		181	41(22.65%)
4	共享	{0, 0, 0, 0, 4, 0}	{0, 0, 1, 3, 1, 0}	125.41	5.74	186	4(2.2%)
	独占			126.90		181	10(5.5%)

仿真结果表明:在锚位共享机制下,当锚地建设运营成本从5.74亿元增至14.37亿元时,船舶在港时间由125.41 h缩短至120.13 h,并趋于稳定。在此过程中,尽管离港船舶总数保持不变,但船舶在外海等待的概率被有效控制在较低水平。相比之下,锚位独占机制在各成本水平下均会导致更长的船舶在港时间(如图11所示),且经历外海等待的船舶数量也相应增加。尤其在低成本配置下,甚至会出现离港船舶减少、港口通过能力下降的情况。

在相同配置下,相较于锚位独占机制,共享机制可有效缩短1.2%～7.5%的船舶在港时间。其根本原因在于,共享机制通过挖掘锚位锚泊潜力,充分盘活锚地剩余容量,从而缓解了因锚位数不足导致的排队效应。而锚位独占机制要求每个锚位在同一时

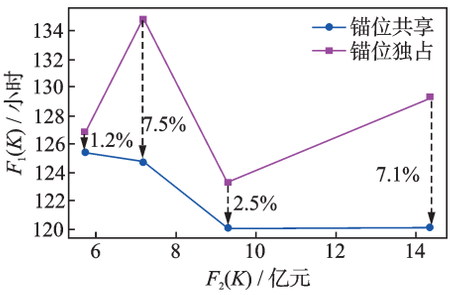


图11　不同锚位分配方式下的时间函数变化趋势

Fig.11　Trends of the time function under different anchorage allocation mechanisms

刻仅能服务一艘船舶，在船舶到达率较高或锚位数有限情况下，易导致船舶等待队列延长、在港时间增加，且对锚位的等级配置更为敏感。以锚地建设运营成本为7.18亿元的方案为例，其在独占机制下的在港时间高达134.82 h，反映出该成本下的锚位等级配置与船舶需求结构不匹配，引发了较为严重的锚位竞争。

5　结　论

论文针对海港锚地的锚位配置问题进行优化研究，取得的主要成果包括：

（1）针对传统锚地仿真研究中“一船一锚位”的局限性，通过引入锚位共享机制，解构船舶进出港全流程，考虑船舶行为随机性、泊位资源约束、潮汐动态约束等因素对锚位配置的影响，构建了一个更贴合真实海港系统运作逻辑的离散事件仿真模型。

（2）以各等级锚位配置方案为决策变量，构建了以船舶在港时间最短和锚地建设运营成本最小为目标的多目标优化模型，将锚地配置问题从传统的容量计算转化为多目标协同优化决策问题，并采用NSGA-Ⅱ算法实现高效求解。

（3）将模型应用于南通港通州湾港区吕四作业区的锚地配置案例中，结果表明：①实际锚位供给与船型需求存在结构性矛盾，具体表现为5万吨级锚位过剩、10万吨级锚位不足；②若将通用锚地和危险品锚地的配置方案分别调整为4个和3个10万吨级锚位，考虑锚位共享机制的系统可完全容纳在外海等待的船舶，并将船舶在港时间缩短约3.71%；③相较于锚位独占机制，共享机制在不同优化方案下可有效缩短1.2%～7.5%的船舶在港时间。

参考文献：

[1] 交通运输部关于推进港口转型升级的指导意见[J]. 中华人民共和国国务院公报，2014(24)：52-55.

[2] 关于建设世界一流港口的指导意见[J]. 中国水运，2019(12)：19-22.

[3] 何昕，黄桂媛. 全球港口物流的机遇与挑战[J]. 中国经贸导刊，2024(16)：106-108.

[4] 中华人民共和国交通运输部. 海港总体设计规范：JTS 165—2025[S]. 北京：人民交通出版社，2025.

[5] 封学军，王苏阳，许博，等. 原油接卸港区单线航道避让区选址与规模仿真研究[J]. 交通运输系统工程与信息，2023，23(3)：253-264.

[6] 贾松松. 基于排队论的港口最佳锚位数研究[D]. 大连：大连海事大学，2011.

[7] 潘宁. 基于船舶到港量的泊位和锚地资源配置研究——以黄骅港煤炭港区为例[D]. 舟山：浙江海洋大学，2023.

[8] 李燊名. 基于排队论的湛江港湾内锚地总体布局分析[J]. 水运工程，2024(7)：56-61.

[9] 郭子坚，薛天寒，王文渊，等. 港口锚地容量可靠性计算方法与冗余设计[J]. 大连理工大学学报，2018，58(5)：494-499.

[10] FENG X J，HU S G，GU W H，et al. A simulation-based approach for assessing seaside infrastructure improvement measures for large marine crude oil terminals [J]. Transportation Research Part E：Logistics and Transportation Review，2020，142：102051.

[11] CUI Z K，ZHANG X L，CHEN Y L，et al. Intelligent detection of 3D anchor position based on Monte Carlo algorithm[J]. Journal of Marine Science and Engineering，2024，12(8)：1347.

[12] 刘敬贤，李昌伟，刘文. 锚地泊位系统服务能力仿真[J]. 大连海事大学学报，2010，36(2)：11-14.

[13] HUANG S Y，HSU W J，HE Y X. Assessing capacity and improving utilization of anchorages[J]. Transportation Research Part E：Logistics and Transportation Review，2011，47(2)：216-227.

[14] 习凤. 内河集装箱港泊位及锚地优化配置研究[D]. 重庆：重庆交通大学，2013.

[15] 刘名武，丰新颖，王勇. 内河集装箱港锚地—泊位资源配置多目标决策[J]. 交通运输系统工程与信息，2017(5)：193-199.

[16] ZHAO J N，ZHOU C H，LI Z，et al. Optimization of anchor position allocation considering efficiency and safety demand [J]. Ocean & Coastal Management，2023，241：106644.

[17] JIA S，LI C L，XU Z. Managing navigation channel traffic and anchorage area utilization of a container port [J]. Transportation Science，2019，53(3)：728-745.