

原油接卸港区单线航道避让区选址与规模仿真研究

封学军¹, 王苏阳¹, 许博^{1,2}, 张艳¹, 黄建梁¹, 顾卫华^{*3}

(1. 河海大学, 港航物流与绿色发展研究所, 南京 210024; 2. 江苏省工程咨询中心有限公司, 南京 210003;

3. 香港理工大学, 电气工程学院, 香港 999077)

摘要: 影响我国原油接卸港区通过能力的瓶颈正从泊位数量不足向航道通过能力制约转移, 尤以大型油轮需要乘潮进港的单线航道为甚。本文以尚未被深入讨论过的原油接卸港区长距离单线航道建设港湾式避让区的选址和规模为研究对象, 在对避让区尺度表征的基础上, 采用离散事件系统仿真方法, 选择Python编程语言构建仿真平台; 以日照实华原油接卸港区(Rizhao Shihua Oil Terminal, RSOT)为案例, 精细化设计相关作业模块, 特别是潮汐和白天作业等混合时间窗口约束, 通过求解港区服务台的服务时间和条件, 分析避让区的选址、规模以及海事规则对于航道通过能力及服务水平等的影响, 以明晰航道避让区的作用机制及机理。结果表明: “价值优先”的海事调度规则相较于传统的“先到先得”规则在一定程度上能提升港区的通过能力, 最大通过能力提升可达2.35%; 港湾式避让区的规模和选址与港区的最大通过能力分别呈正相关和部分相关; 受限于原油港区特殊的安全规则, 案例中, 港湾式避让区选址越靠近港池侧, 港区通过能力的提升越显著, 与锚地侧相比, 最大通过能力提升可达7.56%, 且规模为仅能容纳1艘油轮时, 最大通过能力即可达到拓宽为双向航道时的91.54%, 表现出良好的经济性。

关键词: 水路运输; 选址与规模; 离散事件系统仿真; 港湾式避让区; 单线航道; 原油接卸港区

Simulation and Study of Location and Size of One-way Channel Buffers for Large Marine Crude Oil Terminals

FENG Xue-jun¹, WANG Su-yang¹, XU Bo^{1,2}, ZHANG Yan¹,
HUANG Jian-liang¹, GU Wei-hua^{*3}

(1. Institute of Maritime Logistics and Green Development, Hohai University, Nanjing 210024, China; 2. Jiangsu Engineering Consulting Center, Nanjing 210003, China; 3. Department of Electrical Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong 999077, China)

Abstract: The critical bottleneck affecting a terminal's oil throughput capacity is shifting from the limited number of berths to the channel connecting the berths to the anchorage area. This is especially true for the terminals with a one-way channel where large oil tankers can navigate through the channel only at high tides. Buffers can be installed at those terminals to significantly improve the one-way channel's capacity. This paper examines the buffer's location and size choices for a crude oil terminal with a one-way channel. A discrete-event simulator in-house was developed using Python to explicitly and model the buffer's location and size choices. The simulator accounts for a sufficient level of realism, including the tidal time windows for large tankers and the daytime operation constraints. Taking the Rizhao Shihua Oil Terminal of the Rizhao Port as the case study, this paper used the simulator to analyze the effects of various buffer locations and sizes on the port capacity and service level under two priority rules. They are the conventional "first come, first served (FCFS)" rule and a value priority (VP) rule that prioritizes the tankers with higher holding values. The results show that the VP rule can improve the terminal's capacity by up to 2.35% compared to the FCFS rule. The capacity increases as the buffer moves from the anchorage side to the dockyard side of the channel. The

收稿日期: 2023-03-05

修回日期: 2023-04-10

录用日期: 2023-04-11

基金项目: 国家重点研发计划/ National Key Research and Development Program of China (2021YFB2600203)。

作者简介: 封学军(1975-), 男, 江苏滨海人, 教授, 博士。

*通信作者: weihua.gu@polyu.edu.hk

resulting improvement is up to 7.56%. Moreover, a one-way channel accompanied with a dockyard-side buffer holding one tanker only can attain 91.54% of the capacity of a two-way channel, manifesting the great potential of buffers.

Keywords: waterway transportation; location and size; discrete-event system simulation; channel buffer; one-way channel; crude oil terminals

0 引言

经济持续快速发展,直接带动了中国对于原油等大宗原材料的巨大需求。2020年,我国原油产量为16268万t,原油进口量增加至54239万t,对外依存度超过70%,受疫情和国家能源结构调整政策等影响,2021年,进口量略有下降(51298万t),但进口金额增长34.4%,达到16618亿元^[1]。

由于海运的成本优势,使其成为我国原油进口的主要方式,占比超过60%。随着我国原油接卸泊位的持续建设,影响海运原油接卸能力的瓶颈正从泊位等级和数量向航道通过能力转移,有效提升单线航道的通过能力日益成为行业研究重点。

传统改善单线航道通过能力的途径主要有浚深和拓宽航道等,但这些方法均伴随着巨大的前期建设投入和后期维护成本。在长距离和单线航道中增加避让区为进出港油轮交会提供服务,不仅能提升航道的通过能力,亦能有效控制基础设施建设和维护成本^[2]。

航道中建设避让区的研究可以视为城市交通中港湾式公交车站成果的应用和拓展。港湾式公交车站一般定义为在城市正常道路区段以外特别建造的和供公交车接卸的区域^[3]。研究表明,在道路存在足够空间的前提下,港湾式公交车站对于相邻车道交通流的影响最小^[4]。近年来,航道避让区的研究开始于散货港区,宋向群等^[5]的研究表明,AWT/AST (Average Wait Time/Average Service Time)值是影响避让区效率的重要指标;此后,学者从不同的角度出发,充分验证了单线航道建设避让区的可行性。廖诗管等^[6]从效益性角度出发,针对危化品船舶的通航特性,提出一种定量界定危化品船舶移动安全区的尺度模型,成果可为危化品航道避让区尺度确定提供支撑;TANG等^[7]从安全性角度出发,提出一种SPAC(Ships-Passing Anchorage)模型,提高了港区的通过能力,有效地节省了疏浚成本;金鑫等^[8]从多种措施组合效益出发,通过Arena仿真研究原油接卸港区在增建泊位和建设避让区不同措施组合系统的理论通过能力的变化;FENG等^[9]从经济性角度出发,构建原油港区系统的总成本模型,并提出增加单向航道通过能力最经

济的措施是建设避让区。但上述研究对基于Arena和Matlab等软件的仿真实验结果依赖性很强,对避让区作用机理缺乏深入讨论,特别是针对避让区建设中最为关键的选址和规模等问题鲜见于文献。

排队论被广泛运用于繁忙港口的船只排队和装卸作业等领域。其应用集中于泊位最佳时间分配等问题,目的是最小化船舶在港口的停留时间或系统物流成本。结合特定港口的特点,相关学者借助排队论构建模型,通过拉格朗日松弛法^[9]等数学方法求解,计算最小值。但此类建模在考虑避让区等复杂的船舶调度和靠泊作业中,往往需要较多简化克服建模和求解的困难。近年来,基于排队论思想,将离散事件系统仿真与优化相结合的方法日益成为研究船舶航行作业系统能力的主要手段。HAN等^[10]通过蒙特卡罗仿真的方法,借助混合整数规划模型和遗传算法,解决集装箱码头起重机械调度的问题;URSAVAS等^[11]借助Arena构建集装箱码头的离散事件仿真模型,并嵌入不同船舶优先级下泊位调度的优化工具,为泊位优化问题提供决策支持。但此前的研究对象和成果大部分针对集装箱和干散货船型,对于危险品属性的液体散货船型研究较少。

总体看,港区船舶航行作业系统和航道通过能力的优化研究主要根据航道、船舶和码头属性按照排队论建模分析或仿真二种方法开展。针对集装箱船和干散货船的研究成果较为丰富,而对于液体散货船,因其存在船舶间距和交会约束,成果较少;目前的航道避让区研究均是基于无限容量的避让区规模假设,或依托于航道的临时锚地改建展开,缺乏避让区的选址和规模对于航道通过能力和服务水平影响的量化分析;对于多船型港区的海事调度规则往往采取“先到先得(First Come First Served, FCFS)”的简化处理方式,与实际采用的考虑潮汐等影响的“价值优先(Value Priority, VP)”,例如,“大船优先,进港优先”^[5, 12-13]等规则存在较大出入。

本文基于排队论思想,将原油接卸港区单线航道在建设避让区后系统中串联存在的入港航道服务台、泊位服务台和出港航道服务台合并为作业系

统服务台,解决3个服务台之间存在约束而导致的无法通过马尔科夫链描述和求解的局限性问题;采用离散事件系统仿真方法,以日照实华原油接卸港区(Rizhao Shihua Oil Terminal, RSOT)为对象,构建避让区的规模和选址的仿真模型,通过求解港区服务台的服务时间和条件,量化分析避让区的选址、规模以及海事规则对于航道通过能力、服务水平、船舶等待时间的影响,明晰避让区的作用机制及效果。

1 航道避让区规模和选址模型构建

1.1 研究对象及其参数

本文的仿真模型基于RSOT原油接卸港区构

建。该港区建有30万t级卸油泊位3个,进港主航道长27.8 km,宽390 m,底高程为-19.7 m;到港油轮按照锚地位置和是否乘潮进港属性分为10万t级(阿芙拉型和苏伊士型,无需乘潮进港,占比为10.8%,使用卸油臂能力 $5000\text{ t}\cdot\text{h}^{-1}$)和30万t级(VLCC型,船长0.33 km,需乘潮进港,占比为89.2%,使用卸油臂能力 $8000\text{ t}\cdot\text{h}^{-1}$)两种类型,依据2017年港区船舶签证数据拟合其到港的时间间隔均服从Erlang-2分布,实际装油量分别服从形状参数为0.979和0.427的标准 β 分布,油轮在港服务流程及进出港条件等均与文献[2]保持一致。ROST布局如图1所示。

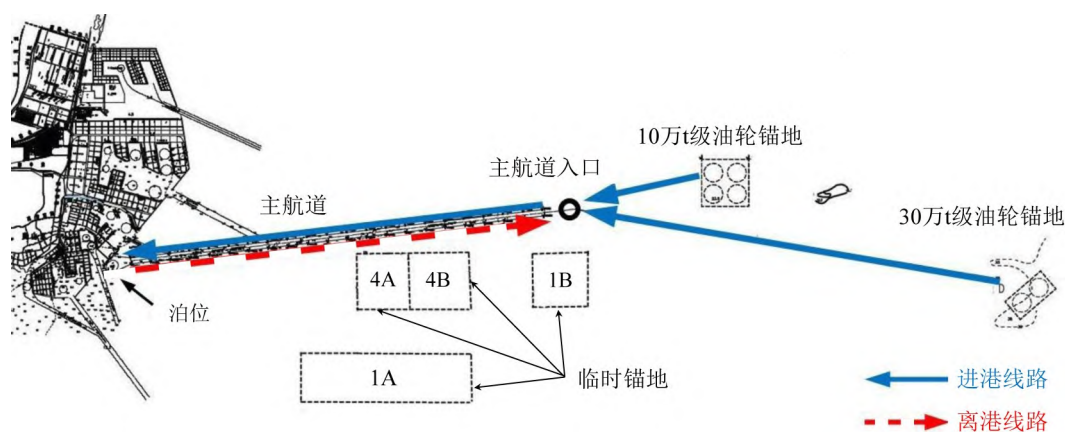


图1 RSOT布局

Fig. 1 Layout of RSOT

1.2 避让区形式与尺度设计

航道避让区形式主要有港湾式和锚地式两种。港湾式避让区类似于城市公交车辆的港湾式站台,由入避让区回旋水域、避让区航道和出避让区回旋水域这3部分组成^[4],如图2(a)所示,船舶可以通过驶入避让区并继续在避让区航道内航行一段时间,完成临时会船,待会船结束后,驶出避让区;出于安全考虑,港湾式避让区仅允许自航出港的船舶使用。锚地式避让区适合于长航道两侧一定范围内已建有临时锚地的特殊情况,由临时锚地和与主航道相连的避让区航道两部分组成^[8],如图2(b)所示,船舶进入临时锚地后,可以选择抛锚等待主航道满足通航条件后再驶回主航道,也可以利用在避让区的航行窗口期实现会船,驳船拖曳或自航的进出港船舶均可以使用锚地式避让区。

根据原油港区特殊的安全性要求,本文选择仅供出港船舶驶入且不可锚泊的港湾式避让区为研究对象。根据《海港总平面设计规范》(JTS165-

2013)对于无掩护的开敞水域,避让区回旋水域长轴和短轴半径分别取最大船型船长($l_{\max}$)的2.5倍和2.0倍。以RSOT为例,到港最大船型为VLCC型,其船长 $l_{\max}=0.33\text{ km}$,对应回旋水域长轴为0.83 km,短轴(即避让区的宽度)为0.66 km。

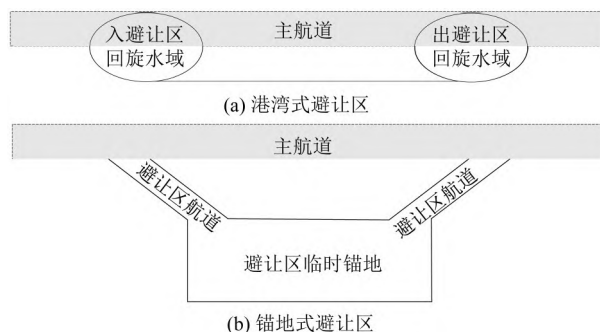


图2 避让区形式

Fig. 2 Types of channel buffers

根据海事规则,当避让区中的船舶数量大于1艘时,若假设船舶实载原油量在港口全部卸空,可以参照普通船型在单线航道中的航行规则,即船舶

之间应满足最小安全间距 $a_0=1\text{ km}$, 避让区的设计尺度如图3所示, 图3中, l_c 为避让区到主航道入口

的距离; l_a 为避让区到港池的距离; L_b^n 为规模为 n 的避让区长度。

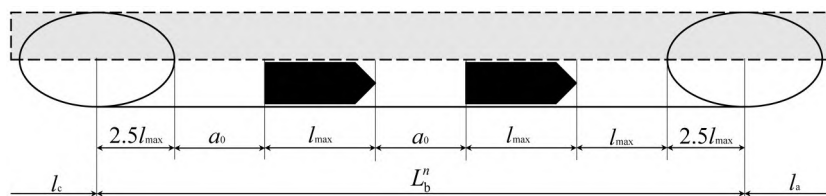


图3 避让区尺度

Fig. 3 Dimension of a buffer

对于避让区长度 L_b^n , 由于船舶需要在避让区入口和出口处转向, 且考虑到出港船舶可以利用避让区与入港船舶在入口处或出口处交会, 因此, L_b^n 还应满足安全船距的需求, 计算不同规模时的最小尺度为

$$L_b^n = \begin{cases} 2(a_0 + 2.5l_{\max}) + l_{\max}, & n = 1 \\ L_b^{n-1} + a_0 + l_{\max}, & n = 2, 3, 4, \dots \end{cases} \quad (1)$$

1.3 仿真模型

基于排队论的视角, 单线航道建设避让区后系统中存在航道、泊位和避让区这3种服务台。由于船舶到达过程和装载量存在不同程度的随机性, 因此, 对于每个服务台而言均面临随机船舶排队问题, 而对于整个港口作业系统和锚地的船舶队列而言, 进港航道服务台、泊位服务台(含多个泊位服务台并联为整体服务台的情况)和出港航道服务台(含港池侧航道服务台、避让区服务台和锚地侧服务台串联为整体服务台的情况)以串联的形式提供依次服务, 而泊位的数量和单线航道的通航规则亦对服务台流程存在一定的约束, 其流程线和约束线如图4所示。

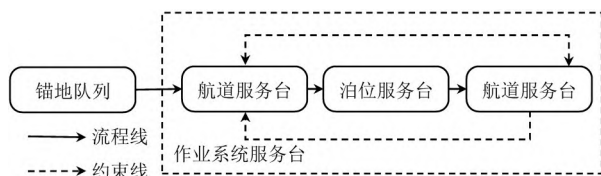


图4 港区排队服务模型示意

Fig. 4 Schematic diagram of queuing model in a crude oil terminal

在获取传统的排队模型(例如M/M/n队列)解析解时, 要求多个服务台之间不存在互相影响。在单线航道中增加避让区后, 入港航道服务台和出港航道服务台成为共用同一服务台, 且与泊位服务台之间存在着约束, 使服务系统难以通过马尔科夫链

描述, 而无法求解。因此, 本文引入面向事件的时间和指针以事件流程而非固定增值向前随机推进的离散事件系统仿真方法, 建模时, 将整个作业系统打包为1个服务台, 即作业系统服务台(如图4中虚线框所示), 其服务状态和服务时间通过仿真方法求解, 从而解决排队论解析求解困难的问题。这样, 仿真模型遵循严格的线性事件流程, 系统内不存在异步并发的情况, 因此, 选择离散事件系统建模中的流程图法建立离散事件系统仿真模型, 其服务流程如图5所示。

仿真模型中, 油轮抵达锚地并完成关检任务为起始边界, 卸载完成并驶离航道为终止边界。油轮是系统中的主要实体, 其余实体包括: 航道、避让区、泊位及潮汐和风浪等自然约束条件, 各实体的属性及状态随离散事件的变化情况将在下述各模块中进一步说明。

1.4 模块设计

1.4.1 锚地作业系统模块

该模块为系统的起始边界, 到油轮分配好泊位准备进入航道结束, 包含: 船舶到达过程、锚地排队流程和船舶泊位分配这3个主要过程。其实现逻辑如图5锚地作业模块所示。

(1) 船舶到达过程

到达过程是锚地作业系统模块的起始过程, 也是仿真模型中船舶实体 i 属性的输入过程, 包括: 油轮船型、实载量和卸货量及到港时间等。船舶到达过程可利用港区长期实测数据或基于船舶自动识别系统(Automatic Identification System, AIS)与海事公开数据拟合^[4], 得到油轮到港的时间序列分布, 当上述数据缺乏时, 也可以采用相关文献的经验分布, 例如Erlang-2分布^[2, 5]。经过船舶到达过程, 船舶实体被输入系统, 实体状态由空白被赋予初始值, 系统时间状态 t 则不变。

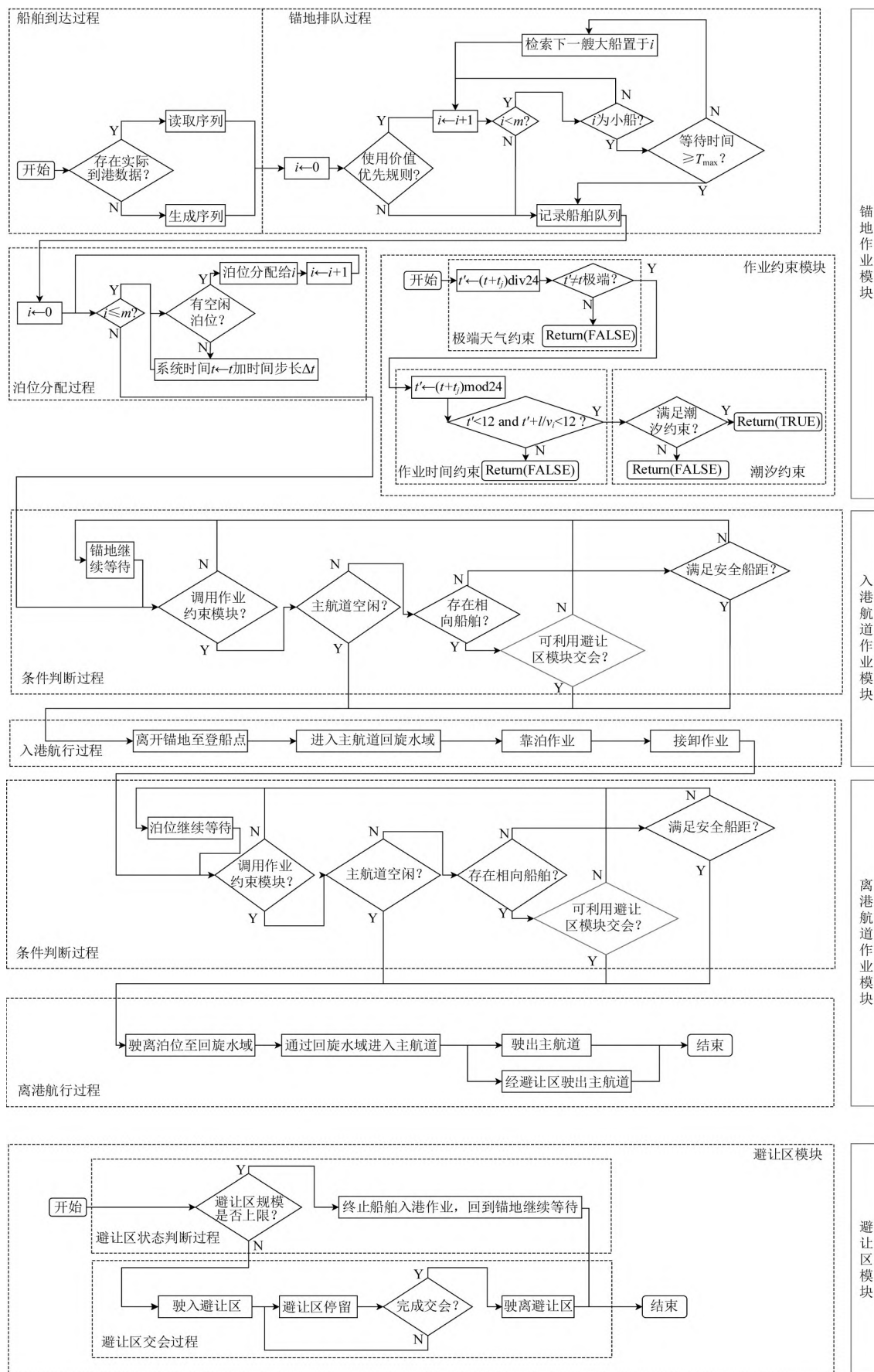


图5 建有避让区的单线航道服务流程

Fig. 5 Flow chart of service process at a terminal with a one-way channel and with a buffer

(2) 锚地排队过程

锚地排队过程主要反映不同的海事调度规则对于系统状态的影响。在FCFS规则下,锚地排队过程不发生作用,船舶实体的等待序列即为生成序列。而在VP规则下,需要对初始生成的船舶等待序列按价值进行重新排序,排序时,优先满足最大等待时间 $T_{\max}$ 的要求,其次满足大船优先的要求。因此,参与锚地排队过程的实体为船舶实体,其实是赋予船舶实体的等待序列属性,实体的其他属性与系统的时间状态 t 不变。

(3) 泊位分配过程

泊位分配过程是锚地作业系统模块的输出过程,主要反映泊位实体对于船舶实体的影响。首先,调用泊位作业模块,判断目前是否有空闲泊位,若存在空闲泊位,则将对序号的船舶实体 i 输出至入港航道作业模块中,同时,占用相应泊位;若不存在空闲泊位,则船舶实体继续等待,同时,系统时间增加一个步长 Δt 。

参与泊位分配过程的实体为船舶实体和泊位实体。当泊位存在空闲时,船舶实体的属性不变,泊位实体的空余个数减少,其余属性与系统时间不变;当泊位不存在空闲时,船舶实体的泊位等待时间和系统时间增加一个时间步长 Δt ,泊位和船舶等实体的属性不变。

(4) 作业条件约束模块

该模块主要针对进港和出港航道作业模块的输入生效,用以判断进出港航道作业是否满足作业条件的若干要求^[2],可分为工作时间约束、极端天气约束和潮汐约束这3个过程。由于作业条件约束只作判断,并无实际离散事件的参与,因此,只有潮汐实体参与其中,且潮汐实体的属性由系统时间状态 t 决定,其余各实体的属性与系统的时间状态均不发生改变。

① 极端天气约束

主要反映港区作业系统中强风、大雾以及强浪等极端天气对于航道作业的影响。由于当船舶实体从锚地作业系统模块输出时,其空间位置依旧存在于锚地,需要经过 t_j 才能行驶到达主航道入口,因此,在考虑时间窗口时应将 t_j 考虑在内, t_j 为 j 型油轮从锚地到达主航道入口所需时间。图5作业约束模块中, t' 为当前的日期,div24的含义为除以24取商整数。极端天气对应的日期以一定的概率出现在1年中的某个时刻。其中, k 表示1年中极端天气的总天数,极端天气 $[i]$ 内存放第 i 个极端天气出现的日期。

② 作业时间约束

该约束主要反映航道必须在白天作业的海事规则约束,仿真模型假设 t 为0的时刻是6:00,每日白天的时刻是6:00-18:00。其中, t' 为6:00后经历的时间,mod 24的含义为除以24取余数,时间窗口中同样应将 t_j 考虑在内。由于航行作业需要保证全过程均为白天,因此,需要考虑经过主航道的耗时 l/v_i ,其中, l 为主航道全长(m); v_i 为第 i 艘船舶在主航道中入港的最大航速($\text{m}\cdot\text{h}^{-1}$)

③ 潮汐约束

潮汐是单线航道中决定大型油轮乘潮进港的重要因素,文献中往往将潮汐周期简化为规则的全日潮或半日潮,实现固定的时间窗口约束,但我国主要原油接卸港区所处的潮汐周期并不规则。以案例中RSOT的不规则半日潮为例,其每天高潮位和低潮位的时间会相应推迟0.8 h。由于潮汐约束并非单一约束,必须与危险品船舶的白天通航作业条件约束联合,使得每日的可用通航时间窗口都会产生一定的偏移,因此,本文采用现实潮汐模型^[1]消除该误差,如图6所示。

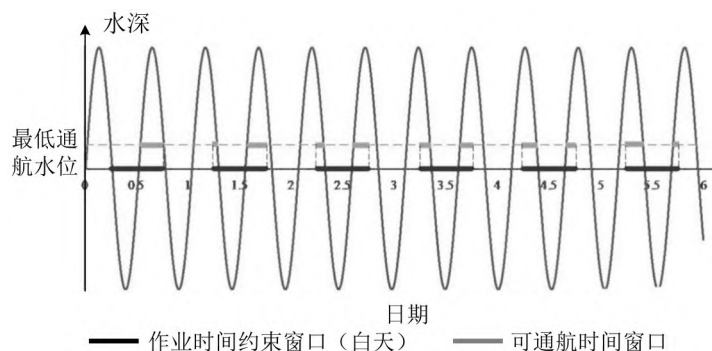


图6 满足潮汐和白天约束的通航时间窗口

Fig. 6 Navigation time windows satisfying tidal and daytime constraints

对于航道内需乘潮的VLCC型船舶,根据海事的管理规则并参考《海港设计总体规范》(JTS165-2013),只有当主航道航行时段内最低通航水位 D 满足 $D \geq \beta d$ 时才能进入,其中, β 为安全系数,对有掩护的水域可取 1.15~1.20,本文取 1.15; d 为船舶吃水(m),本文中需要乘潮的VLCC船型吃水由实际载油量 W 按照 $d = W/27800 + 10$ 计算确定。即VLCC型船舶入港的过程为一个连续的时间窗,时间窗内的潮汐条件需完全满足其入港需求,因此,潮汐约束如下。

油轮进入主航道时,水深不小于规定,因此,约束为

$$h(T_{\text{now}} + t_j) \geq \beta d \quad (2)$$

油轮离开主航道时,水深不小于规定,因此,存在约束为

$$h(T_{\text{now}} + t_j + l/v_i) \geq \beta d \quad (3)$$

当油轮在航道中行驶时,需确保水深始终不小于规定,因此,存在约束为

$$\begin{cases} \dot{h}(T_{\text{now}} + t_j) \geq 0 \text{ and } \dot{h}(T_{\text{now}} + t_j + l/v_i) \geq 0 \text{ or} \\ \dot{h}(T_{\text{now}} + t_j) \leq 0 \text{ and } \dot{h}(T_{\text{now}} + t_j + l/v_i) \leq 0 \text{ or} \\ \dot{h}(T_{\text{now}} + t_j) > 0 \text{ and } \dot{h}(T_{\text{now}} + t_j + l/v_i) < 0 \text{ or} \\ \dot{h}(T_{\text{now}} + t_j) < 0 \text{ and } \dot{h}(T_{\text{now}} + t_j + l/v_i) > 0 \text{ and } h_{\text{lowest}} \geq \beta d \end{cases} \quad (4)$$

式中: h 为航道的水深与时间的关系; $\dot{h}$ 为其一阶导数; T_{now} 为当前时间; h_{lowest} 为当前半日潮期的最小水深。

1.4.2 入港航道作业模块

该模块的作用从船舶离开锚地开始,到船舶进入港内回旋水域结束,包含进入条件判断过程和入港航行过程。主要涉及的实体包括:船舶实体、航道实体和避让区实体,涉及的事件包括:锚地继续等待、离开锚地至登船点和进入主航道行驶至回旋水域这3个。条件判断过程主要对入港航道作业条件约束以及航道的占用情况进行判断,入港航行过程则主要完成船舶实体的空间变化。其实现逻辑如图5入港航道作业模块部分所示。

在锚地继续等待事件中,船舶实体的锚地等待时间增加1个时间步长,其他属性和航道实体的各属性保持不变,系统时间增加1个时间步长;在离开锚地至主航道入口事件中,系统时间增加 t_j^i ,船

舶实体的位置属性由锚地变为主航道入口,主航道的占用属性变更为1,航向属性更新为入港;在进入主航道回旋水域时间中,系统时间增加 l/v_i ,船舶实体的位置属性由主航道变为港池回旋水域,主航道的占用属性变更为0。

在靠泊作业事件中,系统时间增加 t_j^k ,船舶实体的位置属性由回旋水域到达泊位,船舶实体的服务时间属性初始化,泊位的占用属性由0变为1;在接卸作业事件中,系统时间增加 j 型油轮的卸载总耗时 t_j^u ,船舶实体的服务时间增加 t_j^u ,泊位的占用属性为1。

1.4.3 离港作业模块

离港航道作业模块与入港航道作业模块相似,具体包括条件判断过程和离港航行过程,涉及船舶实体、主航道实体、泊位实体和避让区实体。在离泊调头作业事件中,泊位实体的可用泊位数加1,船舶实体的位置由泊位变为主航道,系统时间状态增加 t_j^e ;其余各事件涉及的实体、属性和系统时间状态的变化与入港航道作业模块相似。

1.4.4 避让区作业模块

避让区模块的作用从离港船舶驶入避让区开始到完成交会驶离避让区结束,主要包括避让区状态判断过程和避让区交会过程两部分,具体涉及入港船舶实体、离港船舶实体和避让区实体。

在避让区状态判断过程中,若避让区规模达到上限,即终止入港船舶实体的入港航道作业,入港船舶实体的位置属性变更为锚地,离港船舶和避让区实体的各属性保持不变,系统的时间状态不变;在驶入避让区事件中,离港船舶实体的位置由主航道变更为避让区,避让区可用规模属性减1,系统时间状态不变;在避让区停留事件中,离港船舶实体的避让区等待时间增加1个时间步长,系统时间状态增加1个时间步长,其余各实体属性保持不变;在驶离避让区事件中,离港船舶实体的位置由避让区变为主航道,避让区可用规模属性加1,系统时间状态不变。

1.5 仿真平台比选

目前,在航道建设和调度优化等相关领域研究中,通常分为应用 ARENA、FLEXSIM 和 WITNESS 等软件开展仿真,或是基于 MATLAB、Python 等编

程语言自主实现仿真过程两类。

其中,ARENA等仿真设计软件能够通过模拟离散连续混合的系统,搭建仿真系统模型进行分析和处理,其优点在于软件成熟,有清晰的图形交互界面,便于操作,但其运算时间较长,且受限于软件的限制,其反映实际系统的能力较弱,无法满足较为复杂的仿真系统需求。而通过编程语言自主开发仿真程序虽缺乏人机交互界面,编程的难度较高,但其反映实际系统的能力较强,能够根据模型需求灵活实现,且运算速度较快。其中,MATLAB对于数据结构和数值处理具有天然优势,更接近于脚本语言(Scripting Language),其具有大量成熟的工具箱(Toolbox)可以进行便捷的模块化设计,但也导致其建模仿真大量依赖于模块化的工具箱,灵活性较差。Python作为一门通用编程语言,可以通过numpy、scipy和matplotlib等库(Package)完成数值处理和科学计算的同时,其仿真不依赖于模块化的工具,灵活程度较高,但是相应的编程难度也较大,程序的可读性相对较弱。

由于本文所研究的避让区系统是一个相对复杂的仿真系统,且考虑的诸多要素较为详尽,模块化的仿真软件和MATLAB工具箱无法良好匹配建立的避让区选址优化模型,因此,选择使用Python 3.7编程语言在安装有AMD Ryzen 5 3600X CPU@3.8 GHz和16 G RAM的PC上完成仿真实验。

2 避让区选址和规模对港区通过能力影响分析

2.1 最大通过能力实验

原油港区的最大通过能力定义为港口正常生产作业时,在给定的服务水平阈值下,每年预期可在港口卸载的最大船舶载重吨之和。本文给定的服务水平为 A_{AWT}/A_{AST} , A_{AWT} 表示每艘油轮的平均等待时间,即从油轮到达锚地到离开港口的平均时间减去平均卸油时间和靠离泊位的时间; A_{AST} 表示泊位上每艘油轮的平均卸载时间。其实验步骤如下。

Step 1 $i=0$ 并将总油轮到达率初始化为 $\lambda_0=200$ 油轮 $\cdot$ 年 $^{-1}$,运行1000次仿真,即

$$X_0 = A_{AWT}/A_{AST} \quad (5)$$

式中: A_{AWT} 和 A_{AST} 为1000次仿真中的平均值。设定 $i=1$ 和 $\lambda_1=300$ 油轮 $\cdot$ 年 $^{-1}$,同理计算 $X_1=A_{AWT}/A_{AST}$ 。

Step 2 判断条件 $|X_i-1|\leq\epsilon$,其中,1为预定义的服务水平阈值; ϵ 为公差($\epsilon=0.01$)。若满足,转到Step 3;否则, $i\leftarrow i+1$,通过线性插值计算 λ_i 为

$$\lambda_i = \frac{\lambda_{i-1}(x-X_{i-2}) + \lambda_{i-2}(X_{i-1}-x)}{X_{i-1}-X_{i-2}} \quad (6)$$

Step 3 进行1000次仿真,并计算 $X_i=A_{AWT}/A_{AST}$, X_i 为第 i 次仿真的服务水平,重复Step 2。

Step 4 最大通过能力计算为在给定的油轮到达率下的1年仿真期内所得的总卸油吨数。

2.1.1 实验方案与结果

为研究避让区选址和规模对于原油港区通过能力影响的一般性规律,本文分别选择港池端、主航道中间端和出口端这3个选址开展预实验,根据式(1)对每个选址分别设计可以容纳1~ n 艘油轮的实验组,如图7所示, n 取值到实验组发生重叠时停止增加,以此探究避让区选址和规模对于通过能力和油轮平均等待时间的影响。

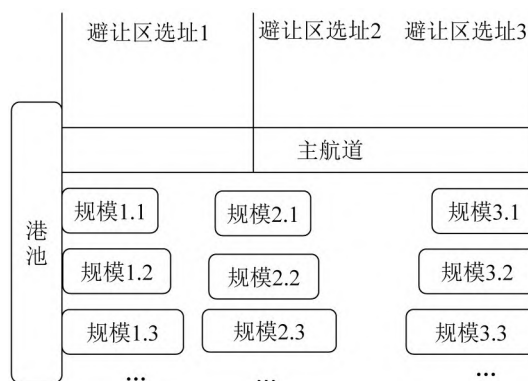


图7 实验方案选址与规模示意

Fig. 7 Buffer location and size options

根据研究案例的实际情况,本文针对3组(编号1~3分别代表避让区位于港池侧、航道中部和锚地侧)选址下的8种避让区规模(编号1~8分别代表避让区可同时容纳1~8艘船舶, $n=1,2,\dots,8$)在FCFS和VP调度规则下进行最大通过能力的仿真实验。同时,设置无避让区和拓宽为双向航道时的最大通过能力仿真实验,分别作为空白对照组和效果对照组。实验结果如表1所示(其中, l_a 为避让区距港池的距离)。

表1 通过能力实验结果

Table 1 Simulated capacity results

编号	l_a	L_b^n	l_s	通过能力/百万t	
				FCFS	VP
无避让区				83.20	84.20
1.1	0.0	4.0	24.0	90.38	91.14
1.2	0.0	5.4	22.6	92.30	93.63
1.3	0.0	6.8	21.2	92.37	93.80
1.4	0.0	8.2	19.8	93.07	94.22
1.5	0.0	9.6	18.4	93.57	93.85
1.6	0.0	11.0	17.0	94.88	94.96
1.7	0.0	12.4	15.6	95.02	95.65
1.8	0.0	13.8	14.2	95.34	96.87
2.1	12.0	4.0	12.0	88.70	89.25
2.2	11.3	5.4	11.3	89.16	90.95
2.3	10.6	6.8	10.6	89.83	90.26
2.4	9.9	8.2	9.9	90.50	91.17
2.5	9.2	9.6	9.2	90.76	91.88
2.6	8.5	11.0	8.5	91.38	91.90
2.7	7.8	12.4	7.8	91.50	92.24
2.8	7.3	13.4	7.3	91.70	92.28
3.1	24.0	4.0	0.0	85.31	85.85
3.2	22.6	5.4	0.0	86.04	86.73
3.3	21.2	6.8	0.0	86.83	87.05
3.4	19.8	8.2	0.0	87.43	88.34
3.5	18.4	9.6	0.0	88.15	89.03
3.6	17.0	11.0	0.0	88.21	89.13
3.7	15.6	12.4	0.0	88.89	90.44
3.8	14.2	13.8	0.0	88.88	90.97
拓宽航道				98.73	100.80

2.1.2 影响港区通过能力的因素分析

(1) 船舶调度规则的影响

表1表明,VP规则下港区通过能力较FCFS规则均有不同程度的提升。其中,在无避让区的情况下,可提升港区最大通过能力1.20%;设置避让区后,提升幅度受其选址与规模的影响,介于0.08%~2.35%之间。当避让区位于港池侧和主航道中部时,船舶调度规则对于通过能力的影响随着避让区规模的增大无明显趋势;当避让区处于锚地侧时,VP规则对于通过能力的提升随着避让区规模的增大总体体现出增加趋势。原因为:①当避让区存在于港池侧时,其规模的显著影响对象为出港的船舶,受到泊位数量(3个)的限制,出港船舶的优先级总是高于入港船舶,因此,极少出现泊位上的油轮同时完成接卸作业并按照优先级出港的现象,使得港池侧船舶进出近似于FCFS规则,因而,其对于避让区的规模并不敏感;②案例港区较为繁忙,锚地内长期存在等待入港的油轮,而VP规则主要控制入港船舶,当避让区位于锚地侧时,其规模对入港

船舶的影响明显, n 最大时提升效果可达最大值2.35%。

总体看,VP规则对于避让区能力的发挥有着不同程度的提升,但同时也受避让区的选址和规模的影响。因此,为了尽可能的控制变量,减少选址和规模对于通过能力的重复作用,后续内容将仅讨论VP规则下避让区选址和规模的影响。

(2) 避让区选址和规模的影响

将表1中避让区选址和规模对应的港区通过能力绘制成折线图,如图8所示,可见避让区的规模和港区通过能力总体呈正相关关系,选址对通过能力的影响表现出显著差异性。

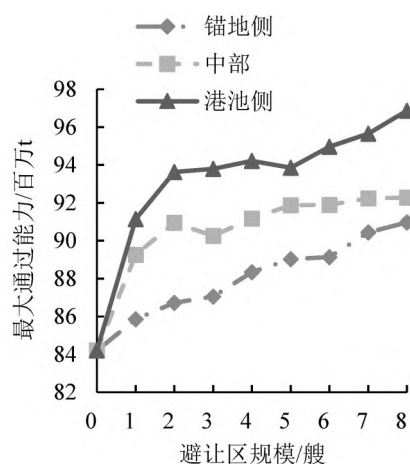


图8 选址与规模对通过能力的影响

Fig. 8 Effect of buffer location and size on capacity

当避让区处于港池侧时,对于港区通过能力的提升最为明显,随着选址向锚地侧移动其效应递减。在相同规模下,港池侧的避让区相较于锚地侧的避让区,其最大通过能力提升了5.94%~7.56%。当港池侧避让区规模仅能容纳1艘油轮时,其能够给港区通过能力带来8.63%的提升,已经达到了拓宽为双向航道时最大通过能力的91.54%,而此时避让区的建设成本远小于拓宽航道,充分证明了避让区的经济性^[2]。

当规模进一步扩大时,系统通过能力的提升幅度逐渐降低,其趋势线近似为对数函数形式,分别为

$$Y = \begin{cases} 4.82 \ln(n+1) + 86.291, & \text{港池侧} \\ 3.2923 \ln(n+1) + 85.776, & \text{中部} \\ 2.9861 \ln(n+1) + 83.724, & \text{锚地侧} \end{cases} \quad (7)$$

式中: Y 为系统通过能力(百万t); n 为避让区规模(艘)。

因此,避让区的建设存在明显的规模收益递减

效应,并与文献[5]结论“当 A_{AWT}/A_{AST} 一定,避让区容量较小时,航道通过能力增长较快;避让区容量较大时,航道通过能力增长较慢”相吻合。为便于分析,后续相关讨论将聚焦于单船规模的避让区选址问题。

2.2 避让区选址对港区服务水平的敏感性分析

取不同选址时避让区的最小规模($l_b=4$),即仅可容纳1艘最大油轮的情况,对应的 l_c 分别为24, 12和0,设置 $A_{AWT}/A_{AST}=\{0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0\}$ 这6种情况讨论不同服务水平对港区最大通过能力的敏感性。仿真步骤参考最大通过能力的思路,结果如图9所示。可见,不同服务水平要求及避让区选址对于港区最大通过能力均存在敏感响应,但也表现出较为明显的差异性。在港口服务水平较好(A_{AWT}/A_{AST} 较小)时,最大通过能力对于港口服务水平较为敏感,对于避让区选址的敏感程度较低。例如,当 A_{AWT}/A_{AST} 小于0.6时,港口服务水平对于通过能力的影响最大为29.54%,最小为26.30%,而避让区选址对于通过能力的影响最大仅为4.41%。原因为该状态下,港区整体较为空闲,船舶流量不高,导致避让区的利用率较低,能力发挥并不显著,因而,对于避让区选址的敏感程度较差。随着港口服务水平的劣化(A_{AWT}/A_{AST} 增大),最大通过能力对于港口服务水平的敏感度逐渐降低,但对于避让区选址的敏感程度逐渐提升,当 A_{AWT}/A_{AST} 大于0.9时,港口服务水平对于通过能力的影响最大为5.37%,最小为2.94%,而避让区选址对于通过能力的影响最大达到9.26%,最小为6.16%。原因为该状态下,随着港口愈发繁忙,航道通过能力成为系统的严重瓶颈,避让区开始大量地在港区作业系统中发挥作用,使得选址对于最大通过能力的影响愈加显著。

上述分析结论对于港口服务水平的另一个重要指标——油轮平均等待时间也适用。在VP规则下,案例中10万t级油轮的平均等待时间均远高于30万t级油轮。随着到船率的增加,油轮的平均等待时间呈现指数函数型的上升,使避让区选址对于油轮平均等待时间的影响更加显著。

2.3 结果分析

避让区的存在实质是在单线航道中提供1个进港船舶和出港船舶实现交会的安全区域,从而使船舶的进港过程可以在另一艘船舶出港过程中

提前 T_a 开始。与航道拓宽为双线的情况相比,单线航道建设避让区为船舶提供交会的能力存在范围限制,即需要交会发生在避让区所在的区域内,因此,可以提前的时间 T_a 存在一定的区间范围。不同的避让区选址对于船舶进出港时间的影响如图10所示,可见当避让区的规模相同,且满足出港船舶使用时,越靠近港池侧,泊位空闲时间越小, T_a 越大。

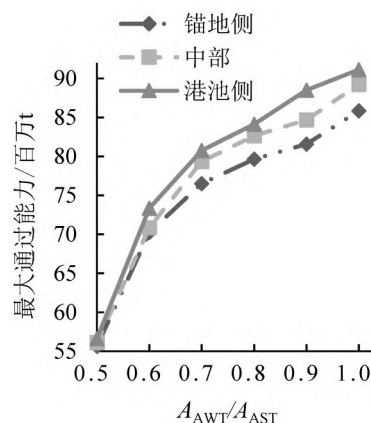


图9 港口服务水平及避让区选址对最大通过能力的影响

Fig. 9 Effect of service level and buffer location on capacity

基于避让区的交会作业功能,通过计算可得, $T \in \left[\frac{l_c}{v_i} + \frac{l_c}{v_0}, \frac{l_b+l_c}{v_i} + \frac{l_b+l_c}{v_0} \right]$, 其中, v_i 为船舶在主航道中入港的最大航速,案例中两类油轮均由拖轮辅助入港,取值 $14 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$; v_0 为船舶在主航道中出港的最大航速,按油轮卸空后使用自身动力出港,取值 $16 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。 T_a 下限表示入港船舶最迟能到达登船点的时间,若 $T_a < \frac{l_c}{v_i} + \frac{l_c}{v_0}$, 则入港船舶和出港船舶会在锚地侧的单向航道相遇;其上限表示入港船舶最早能到达航道入口的时间,若 $T_a < \frac{l_b+l_c}{v_i} + \frac{l_b+l_c}{v_0}$, 则入港船舶和出港船舶会在港池侧的单向航道相遇。即 T_a 的区间大小反映了避让区在进出港过程中产生作用的概率,其上限值则反映了当避让区发挥作用时对系统通过能力的提升量。

从 T_a 的区间可知,避让区的规模 l_b 显然与 T_a 呈正相关, l_b 越大, T_a 的置信区间越大,港区的通过能力也越大,即 l_b 与港区作业系统的能力也为正相关;而避让区的选址 l_c 与 T_a 的上限和下限同时存在正相关,因此, l_c 越大, T_a 的最大值越大,但 T_a 的区间不变,使得避让区发挥作用的概率不变,单

次作用能够发挥的能力相应增大。

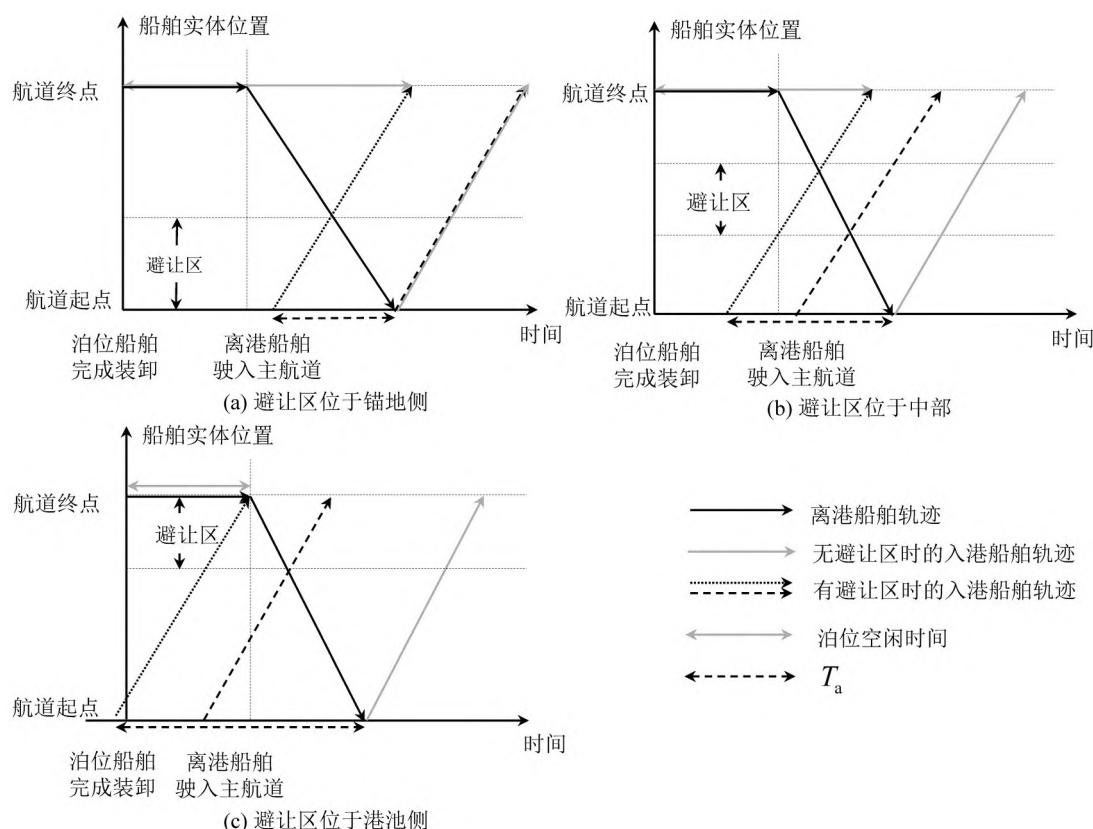


图 10 不同避让区选址对于船舶轨迹的影响

Fig. 10 Effect of buffer location on tanker trajectories

由于RSOT港区较为繁忙,锚地长期存在油轮等待入港,使得 T_a 的下限总是满足的, T_a 的区间近似为 $T_a \in \left[0, \frac{l_b + l_c}{v_i} + \frac{l_b + l_c}{v_0}\right]$ 。在这种情况下, l_c 与系统通过能力呈现完全正相关。验证了仿真中相关结论的正确性:当港区到船率较低和港口服务水平较高时,避让区选址对于港区作业系统的影响并不显著;而随着到船率的提升和港口服务水平劣化,航道瓶颈产生,避让区开始显著地发挥作用,其选址对港区作业系统产生显著影响。

值得注意的是:①由于原油接卸港区特殊安全规则要求,使得避让区只能供出港油轮保持航行状态下使用;②案例RSOT港区中以接卸30万t的VLCC船型为主,进入主航道需要乘潮(不规则半日潮)航行,且时间窗口受载油量的随机分布和白天作业共同限制,而小部分10万t级阿芙拉型和苏伊士型油轮进港仅受白天作业的限制。上述复杂的自然条件和安全规则限制既是本文研究选择仿真方法开展研究的原因,也是导致案例中避让区选址位于港池侧时发挥作用最好的原因。

3 结论

本文基于离散事件系统构建了原油接卸港区单线航道避让区的精细化仿真模型,研究港湾式避让区的选址、规模以及海事规则对于通过能力、服务水平及船舶等待时间的影响及其作用机理,以作业繁忙的RSOT港区为案例,主要研究结论如下:

(1) VP规则相较于FCFS规则可以一定程度上提升港区作业系统的通过能力,在存在避让区的情况下,可使得港区最大通过能力提升2.35%。

(2) 避让区的选址和港区的作业能力呈部分相关,越靠近港池侧,避让区能产生交会作用的概率越小,但是单次作用对于航道通过能力的提升越明显;对于较为繁忙的RSOT港区,避让区越靠近港池一侧,对于港区的系统通过能力的提升越显著,在相同的规模下,相较于锚地侧其最大通过能力提升可达7.56%;随着港区服务水平劣化,最大通过能力对避让区选址的敏感程度逐渐提升,且不同选址对油轮平均等待时间的影响更加显著。

(3) 避让区的规模和港区通过能力总体呈正相关关系,当港池侧避让区规模为仅能容纳1艘油轮时,其能够给港区通过能力带来8.63%的提升,已

经达到了拓宽为双向航道时通过能力的91.54%,表现出良好的经济性。

参考文献

- [1] 中华人民共和国海关总署[EB/OL]. (2023-03) [2023-03-20]. <http://www.customs.gov.cn/>. [The General Administration of Customs of the People's Republic of China (GACC)[EB/OL]. (2023-03) [2023-03-20]. <http://www.customs.gov.cn/>.]
- [2] 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.
- [3] FITZPATRICK K, PERKINSON D, HALL K. Findings from a survey on bus stop design[J]. Journal of Public Transportation, 1997, 1(3): 17-27.
- [4] ZHANG J, LI Z, ZHANG F, et al. Evaluating the impacts of bus stop design and bus dwelling on operations of multitype road users[J]. Journal of Advanced Transportation, 2018, 2018: 4702517.
- [5] 宋向群, 张颖超, 唐国磊, 等. 单线航道避让区对散货港区航道通过能力的影响[J]. 水运工程, 2012(11): 124-126, 144. [SONG X Q, ZHANG Y C, TANG G L, et al. Affection of turnout anchorage on throughput capacity of fairway in coastal bulk port[J]. Port & Waterway Engineering, 2012(11): 124-126, 144.]
- [6] 廖诗管, 翁金贤, 胡甚平. 液化天然气船通航模式下的航道通过能力评价方法[J]. 交通运输系统工程与信息, 2022, 22(2): 290-297. [LIAO S G, WENG J X, HU S P. A capacity estimation approach for waterway traffic under LNG carriers navigation mode[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2022, 22(2): 290-297.]
- [7] TANG G, GUO X, YU X, et al. SPAC to improve port performance for seaports with very long one-way entrance channels[J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 2014, 140(4): 04014011.
- [8] 金鑫, 封学军, 张艳, 等. 原油接卸港区通过能力提升研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2017, 45(2): 182-188. [JIN X, FENG X J, ZHANG Y, et al. Capacity improvements of crude oil import terminals[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2017, 45(2): 182-188.]
- [9] IMAI A, NISHIMURA E, PAPADIMITRIOU S. The dynamic berth allocation problem for a container port[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2001, 35(4): 401-417.
- [10] HAN X L, LU Z Q, XI L F. A proactive approach for simultaneous berth and quay crane scheduling problem with stochastic arrival and handling time[J]. European Journal of Operational Research, 2010, 207(3): 1327-1340.
- [11] URSAVAS E. Priority control of berth allocation problem in container terminals[J]. Annals of Operations Research, 2022, 317(2): 805-824.
- [12] 郑红星, 刘保利, 王泽浩, 等. 考虑潮汐的多港池港口船舶调度优化[J]. 系统工程理论与实践, 2018, 38(10): 2638-2651. [ZHENG H X, LIU B L, WANG Z H, et al. Ship scheduling optimization in multi-harbor basin port considering tidal influence[J]. System Engineering-Theory & Practice, 2018, 38(10): 2638-2651.]
- [13] 徐国裕, 郭涂城, 吴兆麟. 单向水道船舶进出港最佳排序模式[J]. 大连海事大学学报, 2008, 34(4): 150-153, 157. [XU G Y, GUO T C, WU Z L. Optimum scheduling model for ship in/out bound harbor in one way traffic fairway[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2008, 34(4): 150-153, 157.]