

DOI:10. 3876/j. issn. 1000 - 1980. 2017. 02. 013

原油接卸港区通过能力提升研究

金鑫,封学军,张艳,蒋柳鹏,杨义林

(河海大学港口海岸与近海工程学院,江苏南京 210098)

摘要: 为拓宽解决中国主要港区的原油接卸量通过能力不足问题的思路,以原油接卸港区航行作业和码头装卸作业 2 个子系统为研究对象,针对我国普遍采用的单向航道特点,运用 Arena 软件仿真获得增建泊位、建设避让区不同措施组合下系统的理论通过能力、平均在港延误时间等关键指标,为我国原油接卸港区的通过能力提升提供优化方案。以日照实华原油码头有限公司为实例的研究表明:泊位建设对原油接卸码头通过能力提升的百分比随泊位数增加而降低;避让区建设对通过能力提升的百分比随泊位数增加而提高;两者协同可显著提升通过能力并大幅减少油轮平均在港延误时间。

关键词: 原油接卸港区;通过能力;仿真;避让区

中图分类号: U697 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000 - 1980(2017)02 - 0182 - 07

Capacity improvements of crude oil import terminals

JIN Xin, FENG Xuejun, ZHANG Yan, JIANG Liupeng, YANG Yilin

(College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to expand ideas for improving the insufficient capacity of many crude oil import terminals in China, this study examined the capacity improvements of a crude oil import terminal consisting of a navigation subsystem and a terminal subsystem. As the navigation subsystem featured a one-way navigation channel, we focused on the scenario of adding berths for unloading and building a ship-passing anchorage (SPAC) as a buffer zone. The terminal capacity and the tanker average delay time under different scenarios were obtained through simulation with the software Arena. A case study of the Shihua Terminal of the Rizhao Port shows that the marginal increase in the capacity of the crude oil import terminal decreases with the mere increase of the unloading berths; that the percentage increase in the capacity, as a result of building a SPAC, increases with the added unloading berths; and that adding unloading berths and building an extra anchorage area concurrently reduce the average delay time of tankers at the port significantly.

Key words: crude oil import terminal; capacity; simulation; anchorage area

经济持续快速发展,直接带动了原油等大宗原材料的需求,使中国港口的液、散货业务呈快速增长趋势,其中原油需求量极为巨大。而我国原油生产量与消费量之间存在差距,且缺口逐年拉大,供需矛盾日益突出,不得不通过增加进口来满足原油供求平衡问题^[1]。2014 年石油消费量达到 5.2 亿 t,进口原油首次超过 3 亿 t,石油对外依存度接近 60%;至 2020 年上述数据将分别达到 4.0 亿 t 和 67%^[2]。

码头原油吞吐量的增加伴随着油轮大型化和船舶流密度的增加,航行作业系统往往会成为油码头作业系统的瓶颈。对于天然水深不能满足船舶安全通航的航道,油轮大型化必然导致港区主航道尺度的大型化。以 30 万 DWT 油轮为例,其船宽约为 60 m,满载吃水超过 21 m,即使按单向通行设计主航道,60 m 的设

收稿日期: 2016 - 05 - 27

基金项目: 国家自然科学基金(41401120, 51009060, 50909042); 江苏省社会科学基金(14JD014)

作者简介: 金鑫(1991—),男,吉林磐石人,硕士研究生,主要从事油码头生产作业系统通过能力研究。E-mail:jinxin9106@126.com

通信作者: 封学军,教授。E-mail:fxj@hhu.edu.cn

计船宽也会使航道的设计宽度超过 320 m、航道底部与平均潮位的距离超过 22 m^[3]。考虑巨大的疏浚和维护成本,目前我国与油码头配套的深水航道设计标准多数采用单向通行、乘潮进港方案。如何提升单向航道通过能力已成为港口和船舶共同关注焦点。宋向群等^[4]、Tang 等^[5]针对集装箱疏港航道的特点,提出在航道中建设一块锚地作为避让区,缓解由于进出港船舶不能同时使用航道而造成的船舶压港,进而提高航道通过能力。

仿真技术的快速发展为解决复杂的码头生产作业系统提供了有效手段。Lagana 等^[6]通过建立仿真模型优化了泊位分配和装卸机械对船舶装卸服务的并行操作。Legato 等^[7]对集装箱码头装卸作业系统建立了仿真模型,对装卸机械在集装箱码头上的移动进行了最优化。Arango 等^[8]将遗传算法添加到仿真模型中,解决了塞维利亚港的泊位分配问题。关于船舶航行作业系统的仿真研究近些年亦有所增加^[9-14]。但针对油码头作业系统建立仿真模型的研究非常有限,近年来仅见 Feng 等^[15]就宁波—舟山港 30 万 t 级油码头作业系统建立仿真模型,提出了综合通过成本的概念并给出了油码头的最优吞吐量。

考虑原油泊位资本和知识密集型特点以及巨大的沉没成本,如何在尽可能控制现有泊位数量的基础上,在成本可控范围内通过提升技术手段和管理效率增加繁忙港口的通过能力已成为行业发展的迫切要求。笔者通过构建 Arena 仿真模型,探讨采用何种基础设施建设方案增加油码头生产作业系统的通过能力、降低船舶延时,以满足繁忙油码头的市场需求。

1 仿真模型

1.1 系统边界与流程

原油接卸码头生产作业系统由 3 个子系统共同构成(图 1):子系统 1——航行作业子系统,子系统 2——码头作业子系统,子系统 3——储运作业子系统。原油的通过能力由 3 个子系统中的最低水平决定,属典型的木桶定律。从我国原油码头设计、建设的实际情况来看,子系统 3 在设计阶段会有较大预留,且新建罐区的成本比子系统 1 和 2 低,另外子系统 1 和 2 的新建受自然条件的约束较大,而管道以外的运输能力提升则相对容易实现,所以子系统 1 和 2 是繁忙港口通过技术手段和管理效率来增加其通过能力的重点。

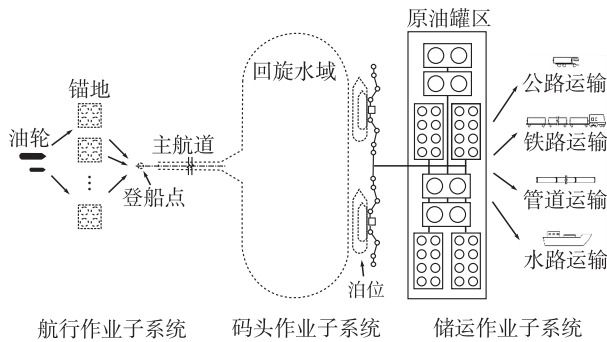


图 1 油码头生产作业系统组成

Fig.1 Components of crude oil terminal operation system

本文模型仅考虑子系统 1 和 2 的通过能力提升问题,暂不考虑码头子系统 3 原油罐区的容量以及原油管道运输等限制因素;同时,研究的对象为单向航道、大船需乘潮进出的港区。

图 2 为油轮进出港流程,由 3 个部分组成:顶部和底部分别显示了油轮的进港流程和离港流程,中间的部分包含了油轮在码头的靠离泊作业、卸载作业和延误。

1.2 仿真模型输入要素

1.2.1 船舶

不同类型的油轮到港数量、载油量、待泊锚地、自然条件的约束等方面有较大差别,因此在模型中需要生成不同船型的油轮数据。调查靠泊油轮的历史资料,设模型中存在 n 种船型,其中船型 j ($1 \leq j \leq n$) 油轮的载重吨(dead weight tonnage, DWT)为 W_j ,其实际载油量 w_j 以及到港时间间隔 h_j 服从某种概率分布,可通过历史数据拟合得出。另外,船型 j 油轮的平均卸载速度为 u_j ,总卸载所需时间为 $t_{u,j}$,包括船型 j 油轮卸

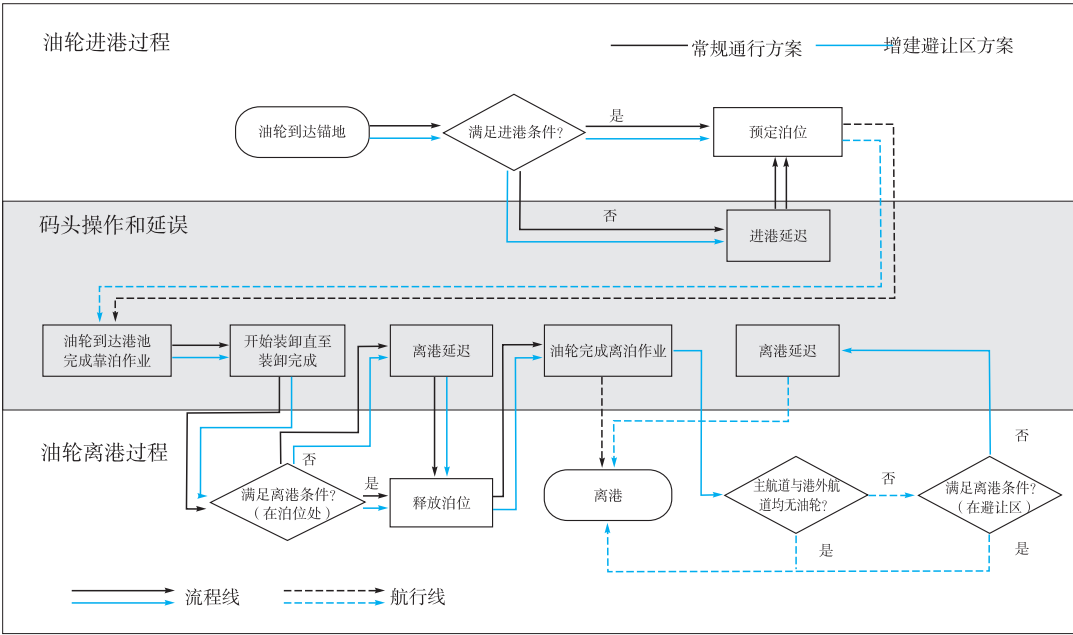


图 2 油轮进出港流程
Fig. 2 Tanker inbound and outbound procedures

载前后的准备时间 $t_{u,j}^{(1)}$ 和净卸载时间 $t_{u,j}^{(2)}$, 净卸载时间 $t_{u,j}^{(2)} = w_j/u_j$ 。

1.2.2 港区布局方案

锚地:供油轮候潮、待泊、联检及避风使用,也是油轮进港的起点,其在港区的位置由具体功能以及服务船型决定。设原油港区锚地的位置与油轮船型一一对应,其总数量为 n ,其中第 j 个 ($1 \leq j \leq n$) 锚地与登船点的距离为 l_j ,行驶的平均速度为 v_j ,故从锚地行驶到登船点的时间 $t_j = l_j/v_j$ 。登船点距离主航道的入口有一定的距离,但这个距离与主航道全长相比可以忽略不计,出于简化模型的考虑,认为登船点即为主航道的入口。

主航道:主航道是船舶进出港的必经之路。设主航道全长为 l_c ,各种船型油轮在主航道的平均行驶速度相同,均为 v_c ,因此油轮通过主航道的的时间 $t_c = l_c/v_c$ 。

回旋水域:回旋水域是油轮在靠泊或离泊时掉头转向所需的水域。一般来说,在回旋水域中油轮关闭主机,在拖轮辅助下完成回旋操作。设船型 j 油轮的靠离泊时间为 $t_{i,j}$ 。

1.2.3 自然条件约束

影响油轮航行装卸的水文气象条件包括:强风、大雾以及强浪。模型中,以不可作业天数 f_u 反映以上极端水文气象条件。

因大船需乘潮进港,潮汐因素对码头的通过能力有较大影响,根据港口所在区域潮汐特征值可生成航道水深-时间关系函数 $h(t)$ 。

1.2.4 海事规则

海事规则是港口属地海事管理部门规定的船舶在码头装卸航行需要遵守的规则,因码头布置形式、海域情况及船型的不同而变化,如是否允许白天作业、同向油轮间安全距离和占用航道优先次序等;本文关注的核心为保障航行安全而要求的富裕水深问题。

船型 j 的进港油轮在刚到达登船点和刚通过主航道的 2 个时间点,水深要满足 $h(t_{\text{now}} + t_j) > kd_j$ 和 $h(t_{\text{now}} + t_j + t_c) > kd_j$ 要求,其中: $h(t)$ 为时刻 t 对应的航道水深(单位:m); t_{now} 为仿真时钟当前值,(单位:h); k 为安全系数; d_j 为船型 j 的进港油轮吃水(单位:m)。同时还需满足如下 4 个条件中的任意一条 (a) $h'(t_{\text{now}} + t_j) > 0$ 和 $h'(t_{\text{now}} + t_j + t_c) > 0$; (b) $h'(t_{\text{now}} + t_j) < 0$ 和 $h'(t_{\text{now}} + t_j + t_c) < 0$; (c) $h'(t_{\text{now}} + t_j) > 0$ 和 $h'(t_{\text{now}} + t_j + t_c) < 0$; (d) $(h'(t_{\text{now}} + t_j) < 0, h'(t_{\text{now}} + t_j + t_c) > 0)$ 和 $h_{\text{lowest}} > kd_j$ 。其中, h' 为航道水深函数的导数; h_{lowest} 为一个潮汐周期中的低潮位水深。

1.3 仿真模型输出

模型输出的数据主要包括:船舶的进港延误、离港延误等。

1.4 基础设施建设方案选择

由1.1节内容可知,提高码头作业系统通过能力的关键在于泊位和航道两者通过能力的协同提升。其中,前者通过新建泊位数量解决;后者基于工程和维护成本考虑,在不改变主航道尺度和水深条件下,本文提出建设油轮避让区(ship-passing anchorage:SPAC)措施。定义船舶避让区:位于主航道附近,可供离港油轮临时进出以避免与进港船只交汇的安全水域。其功能可表述为:当进出港油轮就单向航道的使用权发生冲突的时候,离港油轮在安全区间外先行进入避让区域等待,至进港油轮通过避让区一定安全距离后,再驶离避让区进入主航道离港。油轮在避让区中可以选择停泊或者转向行驶。因为离港油轮的吃水较小,对避让区的水深情况要求不高,所以优先进入避让区主动避让进港油轮。

2 案例分析

日照港岚山港区地处山东半岛南翼,北邻青岛港,南毗连云港,是我国京沪线以西、亚欧大陆桥沿线地带的便捷出海口,具有较好的区位优势和建港条件。日照实华原油码头有限公司于2010年及2014年在岚山港区中作业区先后建成了2个30万t级原油码头泊位,预留同等级泊位2个。从2010年12月27至2014年6月30日,码头总接卸5492万t原油。

与该码头配套的主航道长27.8km,航道走向83°22'2"~263°22'2",航道宽390m,航道底高程为-19.7m(相对于岚山港区理论最低潮面),如图3所示(图中1A等为岚山港区锚地的代号)。日照港岚山港区原油码头(RSOT)建成以来吞吐量持续增加。据预测^[16]:2020年和2030年通过油码头的原油吞吐量将达到6000万t和8000万t,当前的设计通过能力为3800万t。

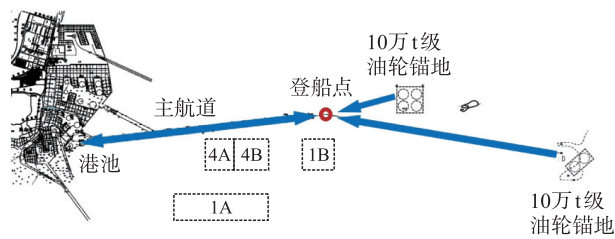


图3 日照港岚山港区油码头总平面布置
Fig.3 General layout of Lanshan district of Rizhao Port

2.1 船舶数据拟合

码头主要的卸载船型为30万DWT和10万DWT。由于15万DWT和8万DWT数量很少,且其锚地、航行线路、进出港条件均与10万DWT一致,所以仿真过程中将两者的数量合并到10万DWT油轮中。30万DWT和10万DWT船型比例为8:1。

油轮到港时间间隔分布服从二阶爱尔朗分布^[16],均值参数取决于当年的吞吐量。假设靠泊船型与比例不变,依据历史数据和有界分布形式的要求,通过Arena软件输入分析器拟合10万DWT油轮实际载油量服从三角分布Tri(50183,101685,105043)t。主航道满足该类船型全天候进出吃水要求。

同理拟合30万DWT载油量服从三角分布Tri(36140,255760,278000)t。当30万DWT油轮载油量超过21.5万t时,低潮位时主航道水深不满足其进出港条件,简化其实际载油量与吃水呈线性关系如下:

$$w = 27\,800d - 278\,000$$

(1)

式中:w——油轮载油量,万t;d——油轮吃水,m。

2.2 潮汐水深-时间函数拟合

RSOT所处海域潮汐为半日潮,周期约为12.4h,一个潮汐周期中潮位与时间的关系近似为正弦。该海区大潮潮差和小潮潮差的差值超过3m,对油轮乘潮进港的影响较为明显,应用中国海域潮汐预报软件Chinatide估算出一年里潮位随时间变化关系,发现按照时间顺序排列潮汐周期的振幅随时间的变化规律也接近正弦函数,周期为15d,拟合振幅与时间关系见式(2)(3)。

$$a=0.794\sin\left(\frac{2\pi}{15}N\right)+1.5344$$

(2)

$$N=\frac{t_{\text{now}}}{24}\text{mod}15$$

(3)

式中: a ——振幅; N ——当前仿真时钟在周期15 d 中的序列号。

2.3 其他输入要素

仿真中需输入其他要素数值见表1。

表1 仿真模型输入要素汇总

Table 1 Summary table of input factors in simulation model						
l_j/km	$v_j/(\text{km}\cdot\text{h}^{-1})$	t_j/h	l_c/km	$v_c/(\text{km}\cdot\text{h}^{-1})$	t_c/h	$t_{t,j}/\text{h}$
$l_1=8.5$ $l_2=23.6$	16	$t_1=0.5$ $t_2=1.5$	27.8	14	2.0	$t_{t,1}=1$ $t_{t,2}=1.5$
n	d_j/m	$u_j/(\text{t}\cdot\text{h}^{-1})$	$t_{u,j}^{(1)}/\text{h}$	f_u/d	k	
2	Tri(11.3,19.2,20)	$u_1=5\,000$ $u_2=8\,000$	$t_{u,1}^{(1)}=5$ $t_{u,2}^{(1)}=7$	28	1.15	

注:数据来源为文献[16-17]。

2.4 油轮的进出港条件

结合自然条件约束以及海事规则,可以得出图2 中不同船型的进出港条件,见表2。

表2 油轮的进出港条件

Table 2 Tanker inbound and outbound conditions		
进港条件		出港条件
30 万 DWT 油轮	10 万 DWT 油轮	
(a)水文、气象条件正常 (b)保证油轮在回旋水域靠泊的整个过程为白天 (c)有空闲泊位 (d)主航道没有影响进港的油轮 (e)回旋水域没有离泊油轮 (f)与各船有足够的安全距离 (g)满足乘潮条件	(a)水文、气象条件正常 (b)保证油轮在回旋水域靠泊的整个过程为白天 (c)有空闲泊位 (d)主航道没有影响进港的油轮 (e)回旋水域没有离泊油轮 (f)与各船有足够的安全距离	(a)水文、气象条件正常 (b)保证油轮在回旋水域靠泊的整个过程为白天 (c)回旋水域没有油轮 (d)主航道没有影响离港的油轮 (e)港外航道没有进港的油轮

2.5 基础设施建设方案

2.5.1 避让区建设方案

在日照港的诸多锚地中,4A 锚地距离主航道较近,使用频率并不高,且锚地与主航道连接的过渡段水深足够,在该处设置避让区不需要支付额外的建设成本,系理想的避让区选址,具体情况见图4,在模型中假设该避让区只能容纳1 艘油轮。

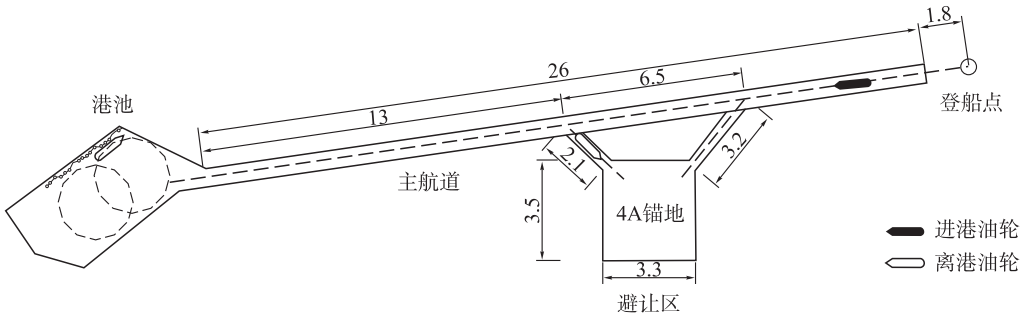


图4 避让区在港区中的理想选址(单位:km)

Fig.4 Ideal location of SPAC in port area (units: km)

避让区建成后,图2 中油轮的进出港条件会有所改变,见表3。

表 3 增建避让区之后的油轮进出港条件

进港条件		离港条件	
30 万 DWT 油轮	10 万 DWT 油轮	在泊位处	在避让区
(a)水文、气象条件正常	(a)水文、气象条件正常	(a)水文、气象条件正常	(a)水文、气象条件正常
(b)保证油轮在回旋水域靠泊的整个过程为白天	(b)保证油轮在回旋水域靠泊的整个过程为白天	(b)保证油轮在回旋水域离泊的整个过程为白天	(b)港外航道没有影响离港的油轮
(c)有空闲泊位	(c)有空闲泊位	(c)回旋水域没有油轮	(c)主航道没有影响离港的油轮
(d)主航道没有影响进港的油轮	(d)主航道没有影响进港的油轮	(d)主航道没有影响离港的油轮	(c)主航道没有影响离港的油轮
(e)与各船有足够的安全距离	(e)与各船有足够的安全距离	(e)港外航道没有进港的油轮	
(f)满足乘潮条件		(f)避让区没有油轮	

2.5.2 泊位建设方案

RSOT 现有 2 个卸油泊位,实际吞吐量已经达到其设计通过能力,新泊位建设已开始前期工作。按照相关规划,仿真过程中分别按新建 1 个和 2 个泊位情况加以讨论。

2.5.3 避让区和泊位建设组合方案

组合方案包括增建 1 个泊位与增建避让区的组合以及增建 2 个泊位与增建避让区的组合 2 个方案。

3 结果分析

应用 Arena 软件,设置仿真时间步长为 1 a,总时间为 10 a (2015—2024 年),油轮平均在港延误时间以 48 h 为上限,仿真次数 100 次。

表 4 为不同建设方案下油码头生产作业系统的理论通过能力。由表 4 可知,在不增加泊位情况下,通过避让区建设可增加通过能力 14.7%;建设完泊位 3 和泊位 4 以后,通过避让区建设可增加通过能力 15.9% 和 18.7%,即避让区建设对通过能力提升的百分比随泊位数增加而提高;第 3 个泊位建成后,RSOT 的理论通过能力相对于 2 个泊位的情况增加 43.3%,第 4 个泊位建成后,RSOT 的理论通过能力相对于 3 个泊位的情况增加 25.9%,即泊位建设对通过能力提升的百分比随泊位数增加而降低。

图 5 为不同建设方案下,油轮未来 10 a 平均在港延误时间。由图 5(a)可见,至 2024 年,若仅新建 1 个泊位,10 万 DWT 船型平均在港延误时间将超过 48 h;避让区建设可使其大幅下降至 30 h。当 2 个泊位和避让区都建成使用时,该船型平均在港延误时间将降至 17 h。图 5(b)亦可得出类似结论。因此,对于 RSOT

表 4 不同建设方案下油码头作业系统的理论通过能力

Table 4 Theoretical maximum capacity of crude oil terminal operation system under different scenarios	
方案	通过能力/10 ⁴ t
2 个泊位	6 266.26
2 个泊位+避让区	7 184.45
3 个泊位	8 981.76
3 个泊位+避让区	10 412.05
4 个泊位	11 312.00
4 个泊位+避让区	13 436.76

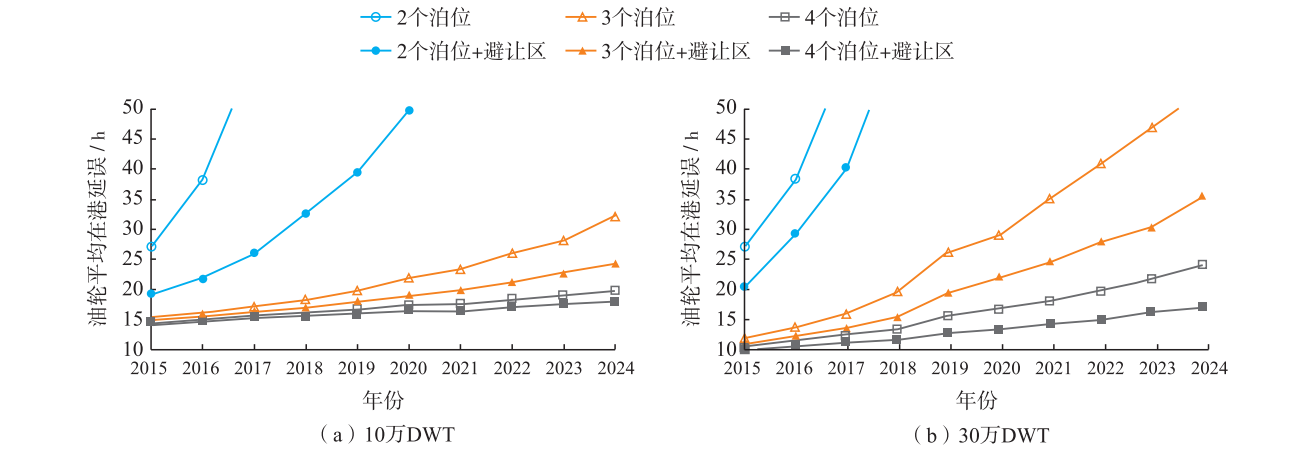


图 5 油轮未来 10 a 的平均在港延误时间

Fig. 5 Tanker average delay time over next 10 years

服务的2种主要船型,建设避让区或建设泊位都可以显著减少油轮未来10a的平均在港延误。同时实施2种建设方案可大幅度减少船舶平均在港延误时间从而显著提升RSOT服务水平。

4 结 语

针对原油接卸码头生产作业系统通过能力不足的问题,提出建设避让区和新增泊位数量6种不同组合方案,基于Arena软件建立仿真模型分析不同方案下码头的通过能力和平均在港延误时间。

结果表明,泊位建设对原油接卸码头通过能力提升的百分比随泊位数增加而降低;避让区建设对通过能力提升的百分比随泊位数增加而提高;两者协同可显著提升通过能力并大幅减少油轮平均在港延误时间。

进一步考虑子系统3对通过能力的影响、避让区在航道中的选址优化以及基于综合通过成本确定最优的基础设施建设时序将是后续研究的重点。

参考文献:

- [1] 田春荣. 2014年中国石油和天然气进出口状况分析[J]. 国际石油经济, 2015, 23(3):57-67. (TIAN Chunrong. China's 2014 oil and gas import/export analysis[J]. International Petroleum Economics, 2015, 23(3):57-67. (in Chinese))
- [2] 中新社. 商务部官员:2020年中国油气对外依存度预计达67% [EB/OL]. [2015.3.21]. <http://energy.chinanews.com/ny/2015/11-19/7632101.shtml>
- [3] MCBRIDE M, BRIGGS M J, GROENVELD R, et al. PIANC report No. 121-2014, harbour approach channel- design guidelines[M]. Brussels;PIANC,2014.
- [4] 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. (SONG Xiangqun, ZHANG Yingchao, TANG Guolei, et al. Affection of turnout anchorage on throughput capacity of fairway in coastal bulk port[J]. Port & Waterway Engineering, 2012(11):124-126. (in Chinese))
- [5] TANG Guolei, GUO Zijian, YU Xuhui, et al. SPAC to improve port performance for seaports with very long one-way entrance channels[J]. Journal of Waterway Port Coastal & Ocean Engineering, 2014, 140(4):86-95.
- [6] LAGANA D, LEGATO P, PISACANE O, et al. Solving simulation optimization problems on grid computing systems[J]. Parallel Computing, 2006, 32(9):688-700.
- [7] LEGATO P, CANONACO P, MAZZA R M. Yard crane management by simulation and optimization [J]. Maritime Economics & Logistics, 2009, 11(1):36-57.
- [8] ARANGO C, CORTÉS P, MUÑUZURI J, et al. Berth allocation planning in Seville inland port by simulation and optimization [J]. Advanced Engineering Informatics, 2011, 25(3):452-461.
- [9] THIERS G F, JANSSENS G K. A port simulation model as a permanent decision instrument[J]. Simulation Transactions of the Society for Modeling & Simulation International, 1998, 71(2):117-125.
- [10] CORTÉS P, MUÑUZURI J, IBÁÑEZ J N, et al. Simulation of freight traffic in the Seville Inland port[J]. Simulation Modelling Practice & Theory, 2007, 15(3):256-271.
- [11] SMITH L D, SWEENEY D C, CAMPBELL J F. Simulation of alternative approaches to relieving congestion at locks in a river transportation system[J]. Journal of the Operational Research Society, 2009, 60(4):519-533.
- [12] KÖSE E, BAŞAR E, DEMIRCI E, et al. Simulation of marine traffic in Istanbul Strait[J]. Simulation Modelling Practice & Theory, 2003, 11(7/8):597-608.
- [13] ÖZBAŞB, OR I. Analysis and control of maritime transit traffic through the Istanbul channel: a simulation approach[J]. Central European Journal of Operations Research, 2007, 15(3):235-252.
- [14] ALMAZ O A, ALTIOK T. Simulation modeling of the vessel traffic in Delaware River: impact of deepening on port performance [J]. Simulation Modelling Practice & Theory, 2012, 22(3):146-165.
- [15] FENG Xuejun, WANG Mingong, LI Yuwei, et al. Optimal throughput of crude oil terminals with options for infrastructure improvements[J]. Journal of Coastal Research,2015, 73(1/2):628-634.
- [16] 中交水运规划设计院. 日照港岚山港区深水航道一期工程扩建项目工程可行性研究[R]. 北京:中交水运规划设计院有限公司,2012.
- [17] 中交水运规划设计院. 日照港岚山港区30万吨级原油码头扩建工程工程可行性研究报告[R]. 北京:中交水运规划设计院有限公司,2011.