

· 信息技术 ·



散货码头过驳转运作业仿真研究

郑天奇¹, 刘春泽^{1,2}, 李 刚¹, 褚广强¹, 唐 颖^{1,2}

(1. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007;

2. 中交集团综合交通虚拟仿真应用技术研发中心 (港口和城市), 北京 100007)

摘要: 通过海上过驳转运系统实现散货运输可有效降低港口及航道建设成本。海上过驳转运系统运行受过驳作业能力、航道条件、转运船数量、转运船航行及避让等因素影响, 无法仅通过规范公式测算确定转运船合理数量。结合实际工程案例, 分析过驳转运系统的生产作业流程, 建立过驳转运系统仿真模型并模拟其作业过程, 对转运船的配置规模进行敏感性研究。结果表明, 随着转运船数量增加, 每艘船的平均等待时间增加, 平均作业时间减少。此外, 以满足运量需求为基础, 确定了不同时期转运船的最少配置数量。系统仿真分析方法可为过驳转运系统的设计和后续运营提供支撑。

关键词: 散货码头; 过驳转运系统; 转运船; 系统仿真

中图分类号: U656.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)04-0143-06

Simulation research on transshipment operation of bulk cargo terminal

ZHENG Tianqi¹, LIU Chunze^{1,2}, LI Gang¹, CHU Guangqiang¹, TANG Ying^{1,2}

(1. CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China;

2. CCCC Comprehensive Transportation Virtual Simulation Application Technology Research and Development Center (Port and City), Beijing 100007, China)

Abstract: The implementation of bulk cargo transportation through ship-to-ship transfer system can effectively reduce the construction costs of ports and waterways. The operation of ship-to-ship transfer system is affected by factors such as the ability of transfer operations, channel conditions, number of transfer ships, navigation and avoidance of transfer ships. Therefore, the reasonable number of transfer ships cannot be determined only by the calculation of standardized formulas. Based on practical engineering cases, the production operation process of the transfer system is analyzed, a simulation model for the transfer system is established, its operation process is simulated, and sensitivity research on the configuration scale of transfer ships is conducted. The results show that as the number of transfer ships increases, the average waiting time per ship increases and the average operating time decreases. In addition, the minimum number of barge configurations for different periods is determined based on meeting the demand for transportation volume. The system simulation analysis method can provide certain support for the design and subsequent operation of the transshipment system.

Keywords: bulk cargo terminal; lightering transshipment system; transshipment vessel; system simulation

随着国际航运船舶大型化发展趋势的不断深化, 国内大宗干散货进口贸易对大型化船舶运输的依赖程度逐年提升。但受制于航道水深、泊位等级等因素, 许多港区不具备接卸大型船舶的条件。为了满足腹地产业发展需求, 减少物流成本

及航道、港口固定设施投资成本, 利用海上过驳转运系统实现货料的运输已成为许多港区更好的选择。过驳转运系统包括过驳系统和转运系统, 其中过驳系统位于外海锚地, 负责实现远洋运输船舶与转运船之间的货料倒运, 转运系统负责实

收稿日期: 2024-05-08

作者简介: 郑天奇 (1993—), 男, 硕士, 工程师, 从事港口航道设计。

现货料在外海锚地与码头之间的运输^[1]。目前在几内亚、印尼等资源丰富的国家沿海驳运作业十分普遍,我国长江口、珠江口也存在部分驳运作业方式。

转运船配置的数量对过驳转运系统的作业效率具有显著影响,配置过少会导致远洋船舶等候时间延长,配置过多则会导致转运船舶空闲并增加投资^[2]。转运船在航道通航时需考虑与港区其他作业船舶的互相避让,在需要乘潮海域,还需要在乘潮窗口期内完成物料运输,上述复杂因素导致无法通过规范公式测算转运船舶配置的合理数量。本文结合实际工程案例,利用系统仿真方法对满足货料转运需求的最优转运船配置数量展开研究,并为分析过驳转运系统的优化提供解决方案。

1 工程概况

国内某新建铝土矿过驳转运系统工程上游为外海远洋运输船舶,下游为正在建设的2个5万吨级卸船码头,单个泊位的年设计通过能力为180万t。港区近期年设计货运量为1500万t,远期为4000万t。过驳锚地位于外海,天然水深超过23m,共布置3个过驳锚位,能够满足3艘20万吨级散货船停泊。转运船进出港作业依托已建5万吨级进港主航道,过驳锚地至卸船泊位的航道总长约40km^[3]。工程周边已建码头3座,共10个泊位,泊位等级为3万~5万吨级,已建3座码头的年设计吞吐量分别为602万、620万、240万t。考虑到重载船舶需要乘潮进港,为了提高航道利用率,保证工程年周转量,消除航道对进港船舶的影响,考虑在港内布置一块内锚地,容量为8个,仅供本工程转运驳船锚泊使用^[4]。

2 过驳转运方案

2.1 过驳方案

工程拟将远洋运输船舶(17万~20万DWT)上

的铝土矿转运至转运船(5万DWT)上,根据项目年过驳量、货物特性等因素,采用平台方式过驳^[5-6]。过驳平台采用与散货船体类似的自航海上移动平台作为承载体,其主甲板上设置散货卸船和装船设备,用于将物料在两艘不同的船舶之间进行转移的大型海上物料装卸平台。平台采用单点或多点系泊方式停泊于相对固定的海域,锚点能力需满足整个装卸作业组的需要,见图1。

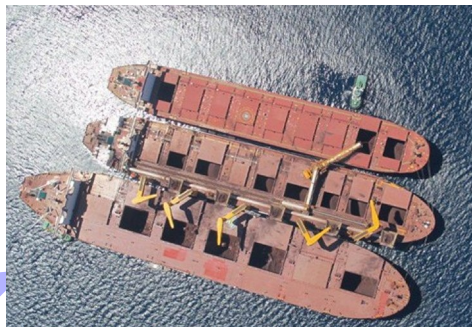


图1 过驳系统

Fig.1 Lightering system

过驳平台采用旧船改造方案,以15万~20万DWT二手散货船为平台,增加自卸设备(起重机)和装船臂、锚系泊设施、靠船设施、电力设施等,以及由此带来的结构改造^[7]。过驳平台卸船侧停靠铝土矿远洋运输船,配备5台SWL50T克令吊,单台平均卸船效率为585t/h;平台上皮带机转运系统及装船臂的额定效率为5000t/h。过驳平台每天可完成1.2艘驳船(约5.4万t)过驳,年完成量约1377万t。

2.2 转运方案

根据实际生产作业情况,采用水上运输时,运输船型越大,综合运输成本越低。本工程根据航道宽度、水深条件,选择可以通航的最大船型作为转运船。工程主航道为5万吨级单向航道,故转运船舶采用5万吨级散货船。

过驳转运流程为:17万~20万DWT远洋船→过驳平台克令吊→过驳平台漏斗+带式输送机→过驳平台移动式装船机→卸船码头。

3 仿真模型建立

3.1 整体模型

根据工程所在地相关设计资料,利用 AnyLogic 系统仿真软件,建立过驳转运系统仿真模型,模

拟过驳转运的整个过程,见图2、3。模型范围包括过驳船舶、外海锚地、过驳平台、进港航道、港池内临时锚地^[8-9]、港池内接卸码头以及周边已建码头等,并考虑潮汐水位对船舶航行的影响。

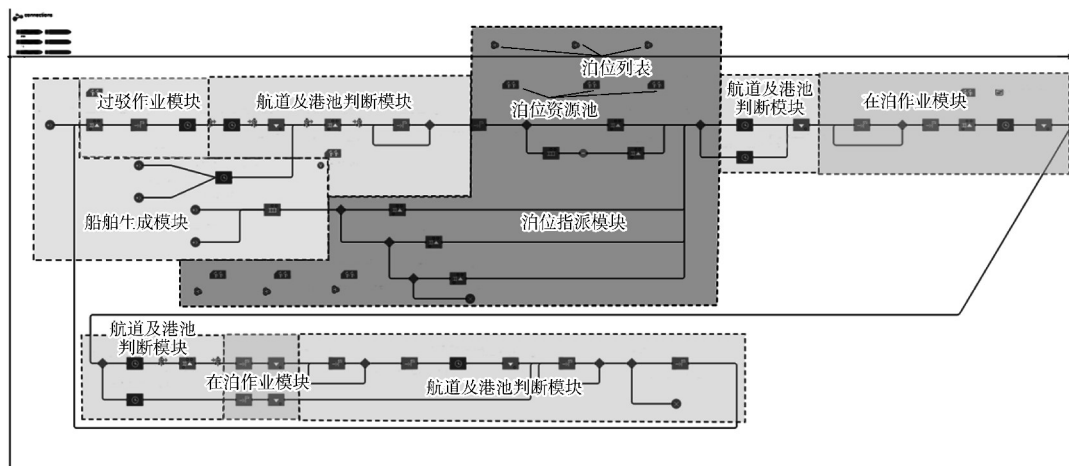


图2 过驳系统仿真逻辑模型

Fig. 2 Simulation logic model of lightering system

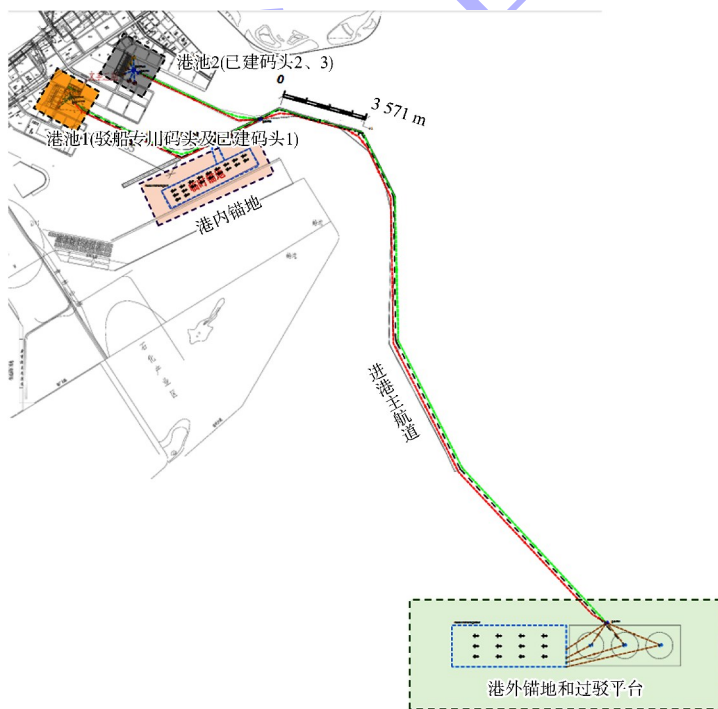


图3 过驳系统仿真模型界面

Fig. 3 Interface of lightering system simulation model

3.2 船舶生成模块

船舶到港间隔满足二阶爱尔兰分布,各目的

港的到港船舶分别生成且不相互影响。模型输入的船舶情况见表1。

表 1 模型输入的泊位和船舶情况
Tab. 1 Berth and vessel conditions input into model

位置	码头名称	泊位数量/个	吞吐量需求/万 t	到达船舶类型	比例/%	船舶到达间隔/h
港池 1	驳船专用码头	2	—	5 万吨级转运驳船	100	驳船循环运行
	已建码头 1	4	602	3 万吨级船舶	77	38.7
				5 万吨级船舶	23	
港池 2	已建码头 2	4	620	3 万吨级船舶	50	43.3
				5 万吨级船舶	50	
	已建码头 3	2	240	4 万吨级杂货船	100	112.0

3.3 泊位指派模块

按照码头公司和船舶吨级，进行各吨级船舶分泊位的指派。各已建码头根据泊位类型对应生成运输船舶，间隔和船型比例见表 1，泊位占用规则为：1) 驳船在过驳平台按先到先服务占用平台泊位；2) 已建码头 1、2 均可停靠 5 万、3 万吨级 2 种船型，其中 5 万吨级船舶仅可占用相应码头的 5 万吨级泊位，3 万吨级船舶优先占用相应码头的 3 万吨级泊位，其次可占用 5 万吨级泊位；3) 已建码头 3 仅有 1 种船型，且仅占用该码头的泊位。

3.4 航道段和港池判断模块

模型中的航道被分为若干航道段，驳船在过驳平台作业完成后，或非驳船指泊成功后，依次判断到达和离开的各航道段和港池在当前时间段内的潮位条件(如需乘潮)、航道单向条件、船舶安全间距等，满足条件的船舶可以进港^[10-11]。

船舶在码头泊位作业完成后，依次判断到达和离开的各航道段和港池在当前时间段内的潮位条件(如需乘潮)、航道单向条件、船舶安全间距等，满足条件的船舶可以出港。

船舶按照各航道段的航速匀速航行，平均航速 ≤ 8 kn。当地潮位为不规则半日潮，高潮历时(乘潮窗口期)4 h，乘潮船舶仅能在乘潮窗口期内航行。进港乘潮船舶在乘潮窗口期较出港船舶具有更高优先级，其他情况下出港船舶较进港船舶具有更高优先级，不同类型船舶在同为进港或出港时具有相同优先级。

3.5 在泊作业模块

靠泊后，船舶在泊位上完成规定时间的辅助作业、装卸作业、离港准备作业，并按照当时情况在泊位等待潮位条件和航行条件。

3.6 过驳平台作业模块

外海锚地最多允许 3 艘船舶同时过驳作业。过驳平台额定作业效率为 5 000 t/h，考虑换船、移仓、清仓时间，平台平均作业效率按 2 925 t/h 考虑，驳船载质量 5.00 万 t，有效装卸量按 4.75 万 t 考虑；船间、靠离泊时间按 1.5 h 计。

3.7 其他参数

海域年过驳作业天数及码头年作业天数按 280 d 考虑，日工作时间按 22 h 考虑。

4 仿真试验及结果分析

4.1 仿真试验设计

模型中作业的驳船数量为 1~15 艘，分别设定 15 个试验工况，重点对过驳运量、转运船等待时间和作业时间进行分析。

仿真模型模拟运行 310 d，其中包括试验预热 30 d，码头每天作业 22 h。每个工况分别进行多组试验，并对各工况评价指标取平均值。

4.2 驳运能力

根据仿真模型的运行结果，得到过驳运量与转运船配置规模的关系。当配置转运船数量小于 8 艘时，过驳系统的能力随着配置转运船数量的增加而逐渐增大。当配置转运船数量达到 8 艘以上时，过驳系统的能力趋于平缓，并保持在 4 000 万 t 左右。

根据仿真结果，近期运量目标 1 500 万 t 条件下，至少需配置 3 艘转运船。远期运量目标 4 000 万 t，至少需要配置 8 艘转运船。按照设计条件，只要转运船配置充足，即能实现港区近期和远期作业需要，见图 4。

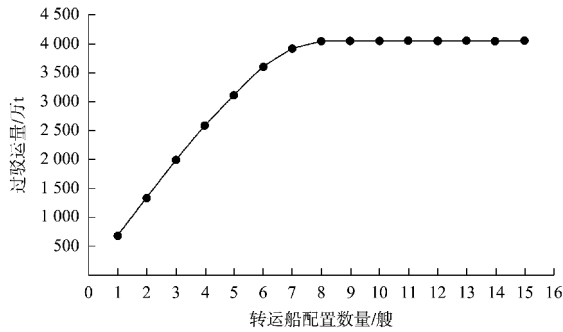


图4 过驳运量与转运船配置规模的关系

Fig. 4 Relationship between lightering volume and configuration scale of transshipment vessels

此外,如图5所示,仿真结果显示,随着转运船配置数量的增加,周边已建3个码头的年运量与其设计吞吐量基本保持一致,各已建港区基本可以完成既定运量。由此可见,过驳平台的建成运营在满足自身货运需求的情况下,不会对周围已建港区造成显著的影响。

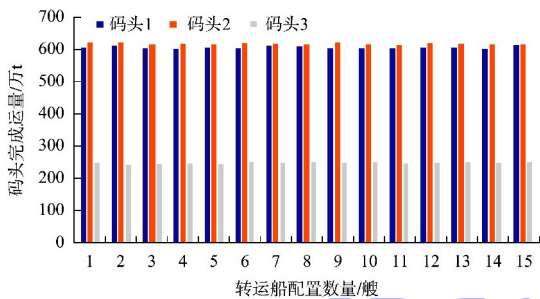


图5 已建工程年运量与转运船配置数量的关系

Fig. 5 Relationship between annual freight volume of completed project and number of configured transshipment vessels

4.3 转运船平均等待时间占比

船舶平均等待时间占比指船舶平均等待时间占船舶平均循环工作时间的比例。其中船舶平均等待时间包含船舶在锚地等泊位时间、等过驳平台时间及等待进出港航道条件的时间。

根据仿真模型的运行结果,每艘转运船的平均等待时间随着配置转运船的数量增加而增大。当配置转运船的数量小于3艘时,转运船平均等待时间占比约为9%,增加转运船的数量不会提升其等待时间;当配置转运船数量为4~8艘时,转运船平均等待时间随着转运船数量的增加而增大,当配置8艘时,其平均等待时间占比约为30%;之后,转

运船的平均等待时间仍随着配置转运船的数量而增加,但增速放缓,当配置15艘转运船时,其平均等待时间占比约为60%,此时多配置的转运船大多在外海锚地等待,没有进入航道作业,见图6。

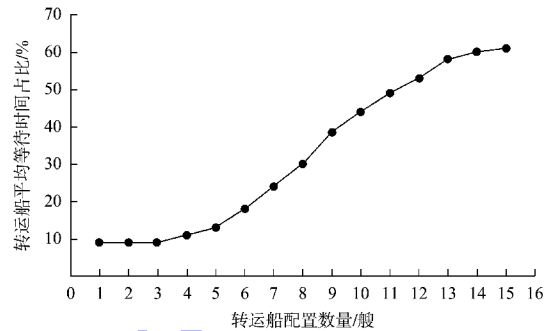


图6 转运船平均等待时间占比与配置数量的关系

Fig. 6 Relationship between proportion of average waiting time and number of configured transshipment vessels

4.4 转运船平均作业时间占比

船舶平均作业时间占比指船舶平均作业时间占船舶平均循环工作时间的比例。其中船舶平均作业时间包含在码头和在过驳平台的靠离泊作业、辅助作业、装卸作业时间。

根据仿真模型的运行结果,每艘转运船的平均作业时间随着配置转运船的数量增加而减少。当配置转运船数量在3艘以下时,转运船平均作业时间占比维持在81%左右。当配置的转运船数量在4~10艘时,转运船平均作业时间占比随着配置数量的增加而减少,当配置10艘转运船时,平均作业时间占比为50%。之后,随着转运船配置数量的增加,转运船平均作业时间占比随之降低,并逐步趋于平缓,维持在40%左右,见图7。

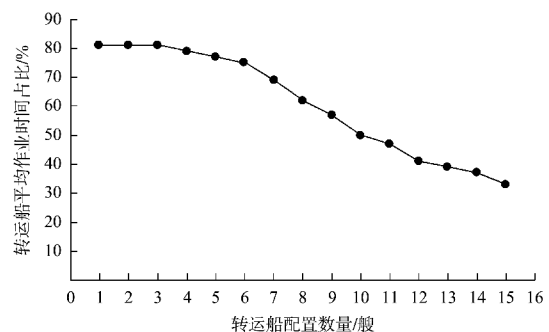


图7 转运船平均作业时间占比与配置数量的关系

Fig. 7 Relationship between proportion of average operating time and number of configured transshipment vessels

5 结论

1) 仿真结果表明, 过驳系统的能力随着配置转运船数量的增加而逐渐增大, 当配置转运船数量达到 8 艘以上时, 过驳系统的最大能力基本保持在 4 000 万 t, 且过驳系统建设运营后, 各港区基本可以完成既定运量。

2) 随着转运船数量增加, 每艘船的平均等待时间增加, 平均作业时间减少, 采用 8 艘驳船时, 驳船平均等待时间占比约 30%, 作业时间占比约 62%。

3) 为完成近期 1 500 万 t 的运量, 至少需要 3 艘驳船; 为完成远期 4 000 万 t 的运量, 至少需要 8 艘驳船。

参考文献:

- [1] 安东. 水上过驳装卸工艺系统设计及运输船舶的选择[J]. 水运工程, 2019(12): 75-79.
AN D. Handling system design of ship to ship transfer system and selection of transfer vessels [J]. Port & waterway engineering, 2019(12): 75-79.
- [2] 李刚, 黄敬东. 一种港口驳运系统设备配置方案[J]. 港口装卸, 2021(1): 25-27.
LI G, HUANG J D. An equipment configuration scheme of port transshipment system [J]. Port operation, 2021(1): 25-27.
- [3] 刘春泽, 郭享, 商剑平, 等. 合理确定港口锚地规模的仿真方法[J]. 水运工程, 2023(12): 46-51.
LIU C Z, GUO X, SHANG J P. Simulation method of reasonable determination of anchorage scale in port [J]. Port & waterway engineering, 2023(12): 46-51.
- [4] 顾俊, 崔冠辰. 唐山港曹妃甸港区东区主航道设计[J]. 港工技术, 2018, 55(2): 7-11.
GU J, CUI G C. Main channel design of east area of Caofeidian harbor at Tangshan Port [J]. Port engineering technology, 2018, 55(2): 7-11.
- [5] 王海燕, 邓鹏翥, 徐昕旸. 基于差分进化算法的铝矾土转运船队规模优化研究[J]. 中国航海, 2023, 46(1): 88-93.
WANG H Y, DENG P Z, XU X Y. Optimization of fleet size for bauxite transshipment using differential evolution algorithm [J]. Navigation of China, 2023, 46(1): 88-93.
- [6] 石峰, 陶可健, 黄立文. LNG 船对船过驳作业配置模型与安全稳定性分析[J]. 交通信息与安全, 2022, 40(6): 53-62.
SHI F, TAO K J, HUANG L W. A study of configuration model and safety analysis for ship-to-ship transfers of liquefied natural gas [J]. Journal of transport information and safety, 2022, 40(6): 53-62.
- [7] 胡瑞平, 李秀钧, 辛立民. 基于 SIMPROCESS 的海上输送转运系统仿真建模[J]. 系统仿真学报, 2009(14): 4513-4515.
HU R P, LI X J, XIN L M. Simulation modeling of shipping transfer system based on SIMPROCESS [J]. Journal of system simulation, 2009(14): 4513-4515.
- [8] 张江南. 复杂环境条件下的航道通过能力研究[J]. 水运工程, 2021(9): 131-135.
ZHANG J N. On waterway throughput capacity under complex environment [J]. Port & waterway engineering, 2021(9): 131-135.
- [9] 江尧珀. 海上过驳平台系船浮筒泊位的设计[J]. 水运工程, 1986(7): 10-15.
JANG Y P. Design of mooring buoy berth for offshore barge platform [J]. Port & waterway engineering, 1986(7): 10-15.
- [10] 陈沈阳, 邵哲平, 方祥麟, 等. 港口航道交通流仿真模型的研究[J]. 大连海事大学学报, 2001, 27(1): 34-38.
CHEN S Y, SHAO Z P, FANG X L, et al. The study of the maritime traffic flow simulation model based on fairway [J]. Journal of Dalian Maritime University, 2001, 27(1): 34-38.
- [11] 徐磊, 付博新, 廖勇, 等. 基于单点系泊的 LNG 船过驳新型作业模式[J]. 水道港口, 2022, 43(5): 616-623.
XU L, FU B X, LIAO Y, et al. New operation mode of LNG ship transfer based on single point mooring [J]. Journal of waterway and harbor, 2022, 43(5): 616-623.

(本文编辑 王传瑜)