

文章编号:1671-1637(2023)05-0183-09

多港口区域泊位资源的最优配置与分配

郑建风,赵煜星,刘欣桐,郭倪楠

(大连海事大学 交通运输工程学院,辽宁 大连 116026)

摘 要:在区域港口发展一体化的背景下,通过调整不同班轮公司的船舶挂靠港口,研究了多港口区域泊位资源的配置与分配问题;为提高泊位利用率,将不同班轮公司组合形成稳定班轮集群,并将多港口区域泊位资源与不同班轮集群之间进行最优匹配,以泊位总数最少和船舶挂靠港口调整最小为目标建立集划分模型,设计了基于排队论和合作博弈理论的三阶段优化方法;以珠江三角洲区域的 3 个港口(香港港、盐田港和蛇口港)和 4 个班轮公司的船舶挂靠该区域多港口为例进行算例分析。数值分析结果表明:三阶段优化方法可以使这 4 个班轮公司的船舶总平均排队长度由 23.569 1 艘减少至 22.930 2 艘,即多港口区域的泊位资源整合可以有效缓解港口拥挤和船舶排队;3 个港口服务 4 个班轮公司船舶需配置的泊位数由 31 减少至 27,说明多港口区域的泊位资源的合理配置与分配,不仅可以提高泊位资源利用率,也可以减少不同港口的泊位资源的重复建设;从泊位服务船舶数量的角度,服务不同的班轮集群的船舶对港口的吸引力不同,说明港口可以选择合适的班轮公司作为服务对象来提高泊位运营效率。

关键词:水路运输;泊位资源配置与分配;三阶段优化法;多港口区域;班轮集群;集划分模型

中图分类号:U691.3 **文献标志码:**A **DOI:**10.19818/j.cnki.1671-1637.2023.05.012

Optimal configuration and allocation of berth resources in multi-port regions

ZHENG Jian-feng, ZHAO Yu-xing, LIU Xin-tong, GUO Ni-nan

(College of Transportation Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, Liaoning, China)

Abstract: Under the background of integrated regional port development, by adjusting berthing ports for the ships from different liner shipping companies, the configuration and allocation of berth resources in multi-port regions were investigated. To improve berth utilization, different liner shipping companies were combined to form stable liner ship clusters and determine the optimal matching between berth resources and different liner ship clusters in multi-port regions. A set partitioning model was established to minimize the number of berths and berthing ports to be adjusted, and a three-stage optimization approach dependent on the queuing theory and cooperative game theory was presented. Three ports (Hong Kong Port, Yantian Port, and Shekou Port) in the Pearl River Delta region, with the ships from four liner shipping companies berthing at the region, were numerically analyzed. Numerical analysis results show that by using the three-stage optimization approach, the average queuing length of the ships from these four liner shipping companies decreases from 23.569 1 to 22.930 2, therefore the integration of berth

收稿日期:2023-04-12

基金项目:国家自然科学基金项目(72371046,72031005,71871036)

作者简介:郑建风(1981-),男,浙江金华人,大连海事大学教授,理学博士,从事港航运输规划与管理研究。

引用格式:郑建风,赵煜星,刘欣桐,等.多港口区域泊位资源的最优配置与分配[J].交通运输工程学报,2023,23(5):183-191.

Citation: ZHENG Jian-feng, ZHAO Yu-xing, LIU Xin-tong, et al. Optimal configuration and allocation of berth resources in multi-port regions[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2023, 23(5): 183-191.

resources in multi-port regions is helpful in relieving port congestion and ship queuing. The number of berths to be allocated by three ports serving four liner shipping companies reduces from 31 to 27, indicating that the reasonable configuration and allocation of berth resources in multi-port regions can not only improve berth utilization, but also reduce the repetitive construction of port resources of different ports. From the perspective of the number of ships served by berths, the port has different attractiveness when serving the ships of various liner ship clusters, indicating that the port should properly select liner shipping companies for serving their ships in order to improve the operation effectiveness of berth resources. 5 tabs, 5 figs, 29 refs.

Key words: waterway transportation; configuration and allocation of berth resource; three-stage optimization approach; multi-port region; liner ship clusters; set partitioning model

Author resume: ZHENG Jian-feng(1981-), male, professor, PhD, jfzheng@dlmu.edu.cn.

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (72371046, 72031005, 71871036)

0 引 言

随着国际航运市场的不断发展,很多港口都会面临港口拥堵。根据船舶估值机构 VesselsValue 提供的数据,2021 年 10 月 19 日,全球共有 334 艘集装箱船等待在各个港口,世界各大港口都出现了港口拥堵的状况^[1]。港口拥堵对于港口、船公司、货主等都会造成不同程度的损失。

泊位作为港口最重要的资源,也是船舶在港作业时的瓶颈所在。为缓解港口拥堵并提高港口竞争力,很多港口企业投入大量的资金建设更多的泊位,提升港口资源供给水平。这样也导致港口资源重复建设严重,港口之间恶性竞争激烈,特别是多港口区域(一个区域内有多个港口且位置相邻)。2015 年以来,中国交通运输部提出着力推进区域港口发展一体化进程,从优化港口总体布局、推进港口资源整合等方面推动港口供给侧结构性改革^[2]。为此,中国很多港口合作紧密,有些港口甚至形成一个港口集团有限公司。例如,2017 年 11 月 27 日,辽宁省所属港口整合成为辽宁港口集团有限公司。

对于港口资源整合,提高港口资源利用率,可以通过行政和市场等不同手段。本文以多港口区域为研究对象,考虑港口间紧密合作的场景,采用市场手段,旨在提高多港口区域的泊位利用率,以最少的泊位数量来服务挂靠该区域港口的船舶。

基于此,从船舶到港需求管理的角度,本文提出并研究多港口区域泊位资源配置与分配问题,其中泊位资源配置问题主要研究多港口区域需要配置的最优泊位数量,而泊位资源分配问题主要研究多港口区域的泊位资源如何在不同港口之间进行最优分配。对于船舶到港需求管理,本文主要考虑为船舶

调整挂靠港口。在多港口区域,港口相邻,其内陆腹地重合度高,使得挂靠多港口区域的船舶只需挂靠其中任意一个港口就可以满足在该区域的作业需求,因此,多港口区域为船舶到港需求管理(特别是船舶调整挂靠港口)提供天然优势。本文研究的多港口区域泊位资源配置与分配问题,为提高泊位利用率,以多港口区域需要配置的泊位数量最小化为主要目标,同时也为船舶提供较好的服务水平,主要表现为不同船舶是否有意愿进行挂靠港口的调整,具体请参见第 1 节(问题描述)中的说明和介绍。

目前,关于泊位相关问题研究内容广泛,多是解决泊位分配问题(Berth Allocation Problem, BAP)。BAP 主要解决泊位资源在运营层面的调度问题,也被称为泊位调度问题。范志强^[3]研究船舶动态到港情况下的连续泊位分配问题;Barbosa 等^[4]针对离散和动态泊位分配问题,提出了一种混合进化算法;Ursavas 等^[5]提出一个以随机动态规划方法为基础的模型,描述不同类型的进港船舶在随机到达下的最佳策略;Lalla-Ruiz 等^[6]在水深和潮汐限制下,为抵达集装箱码头的班轮分配可用的停泊位置;Xiang 等^[7]考虑不确定性因素的泊位配置问题,建立了以经济效益和顾客满意度为目标的双目标鲁棒泊位分配模型;Xu 等^[8]提出了一种结合模拟退火和分枝定界算法的鲁棒泊位调度算法;Schepler 等^[9]研究考虑多码头和多式联运的集装箱港口泊位优化模型;Imai 等^[10]设计了基于拉格朗日松弛的启发式算法来求解动态的泊位分配问题;Correcher 等^[11]提出一种能使船舶停靠在码头任何位置的混合整数规划模型。以往关于 BAP 的研究基本不考虑泊位资源的配置与分配优化问题。

在泊位资源配置方面,Zheng 等^[12]提出在单港

口为稳定的班轮集群分配专用泊位,并建立混合整数规划模型;Ilari 等^[13]建立了港口资源分配问题的综合仿真模型,并设计了进化路径算法去寻求全局最优解;Legato 等^[14]分别在战术和运作层面展开对泊位分配问题的研究。此外,学者们也经常使用排队论方法解决港口泊位资源配置问题^[15-20]。关于泊位资源配置问题,以往的研究主要关注单港口情景。

在多港口资源分配方面,张恒等^[21]建立了双港泊位分配协同优化模型,为绿色港口的建设提供理论支撑;徐亚等^[22]为应对多港口资源整合与低碳运营的需求,通过引入一个虚拟码头将多码头泊位调度问题转换为特殊的单码头泊位调度问题;Venturini 等^[23]以多港口为背景,所有船舶在港总成本最小作为目标函数建立泊位优化调度模型。毕娅等^[24]建立了集装箱港口集群下多港口多泊位联合调度的多目标非线性决策模型,并设计了改进的遗传算法。关于多港口资源分配问题,以往的研究不关注泊位资源的配置优化。

在港口资源的配置与调度方面,也有一些学者从战略层和运营层相结合的角度进行研究。Guo 等^[25]将泊位分配和班轮聚类问题相结合确定船舶靠泊时间和其分配的泊位数;梅益群等^[26]建立了考虑泊位偏好和岸桥移动频数的泊位岸桥联合调度两阶段模型;焦小刚等^[27]研究了泊位疏浚情况下连续型泊位和动态岸桥联合调度问题。关于港口资源的配置与调度问题,以往的研究主要关注单港口的情景。

综上所述,以往关于泊位的相关研究中,大多是基于运营层面的 BAP 研究。而关于泊位资源配置(或配置与调度)问题,主要是考虑单港口的情景。本文拓展单港口泊位资源配置问题,从战略层面展开多港口泊位资源的配置与分配问题的研究,建立集划分模型,提出三阶段优化方法进行求解。通过数值试验表明,在多港口区域整合泊位资源,不仅能有效减轻船舶排队,还能提高泊位利用率,减少港口运营成本。本文的研究为多港口区域泊位资源配置和分配的研究提供一个良好的理论框架。

1 假设条件和问题描述

1.1 假设条件

为方便建立多港口区域泊位资源配置与分配模型并设计求解算法,做出以下假设。

(1)船舶到港时间为到达多港口区域的第一个港口的时间。

(2)通过船舶挂靠港口调整后,任意船舶只挂靠

多港口区域内的一个港口,同时同一个班轮集群中的船舶挂靠多港口区域中相同的港口。

(3)船舶在港口作业服务时间是船舶在多港口区域所有港口作业服务时间的总和。

(4)船舶在港口排队服务时,考虑先到先服务的原则,排队系统的容量没有限制。

(5)任意泊位可以为任意船型进行服务。

1.2 问题描述

本文研究多港口区域泊位资源配置与分配问题。港口腹地范围是影响资源配置与分配的一大因素,港口对腹地的吸引和辐射作用受到空间距离的制约,这就会使腹地形成以港口为核心的圈层状空间分布结构,因此,可以利用圈层法,以港口为圆心,辐射距离为半径绘制港口腹地。在算例分析中,考虑中国珠三角地区的盐田港、蛇口港、香港港,分别以3个港口作为圆心,利用圈层法绘制其腹地,如图1所示。船舶在挂靠这个区域的港口时,不同港口之间具有相互替代性,即船舶可以挂靠该区域中的任意港口来完成该区域的作业需求。

从船舶到港需求管理的角度,可以将本文研究的多港口区域泊位资源配置与分配问题具体表现为多港口泊位资源与不同班轮公司的船舶之间的最优匹配,其中本文考虑的船舶到港需求管理主要表现为船舶调整挂靠港口。当各班轮公司船舶到达多港口区域时可以选择其中一个或多个港口进行挂靠,如图2中阶段Ⅰ所示。为了简单刻画船舶到港需求管理策略,即船舶挂靠港口调整策略,本文从班轮公司的角度,考虑不同班轮组合形成班轮集群,而同一班轮集群的船舶挂靠多港口区域中相同的港口,在此基础上对多港口泊位资源进行配置与分配,如图2中阶段Ⅱ所示。

为了进一步描述不同班轮公司是否有意愿加入班轮集群并为所属船舶统一调整挂靠港口,本文基于合作博弈理论中的 Shapley 值法和核仁理论来分析班轮集群的稳定性。班轮集群的稳定性取决于班轮集群内各班轮公司分摊的成本。 c_l 为班轮公司 l ($\forall l \in L$) 分摊的成本,其中 L 为班轮公司集合。为确定稳定的班轮集群,采用核仁理论进行判断。即当且仅当满足如下条件时班轮集群 C 是稳定的

$$\sum_{l \in C} c_l = h(z_C) \quad (1)$$

$$\sum_{l \in C_1} c_l \leq h(z_{C_1}) \quad \forall C_1 \subset C \quad (2)$$

式中: z_C 、 z_{C_1} 分别为多港口区域为服务班轮集群 C 、

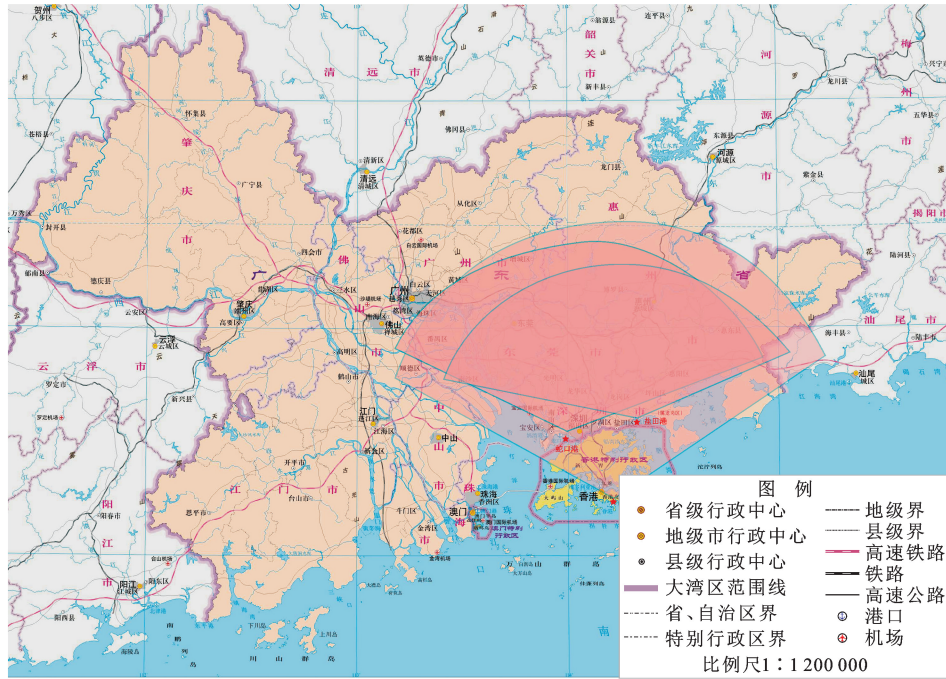


图1 珠三角地区港口的内陆腹地

Fig.1 Inland hinterland of ports in Pearl River Delta

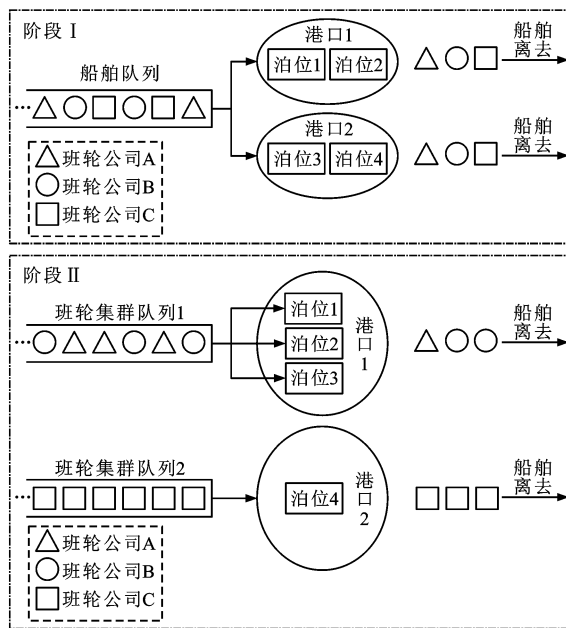


图2 泊位资源配置与分配过程

Fig.2 Configuration and allocation of berth resources

C_1 的船舶需要配置的泊位数; $h(z_c)$ 、 $h(z_{c_1})$ 分别为服务 z_c 、 z_{c_1} 每日的运营成本。

式(1)表明集群的总成本与集群成员所分摊的成本之和相等,即满足公平性;式(2)表明集群成员分摊的成本不超过单独经营的成本,即满足合理性。

2 模型构建

在多港口合作背景下,建立混合整数规划模型

来求解多港口区域的泊位资源配置与分配问题,目标函数 J 为

$$\min J = \sum_{C \in \bar{M}} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \left(\frac{x_{i,C} b_{j,C}}{\bar{b}} + \frac{\bar{x}_C z_C}{\bar{z}} \right) \quad (3)$$

约束条件为式(1)、(2)、(4)~(7),即

$$y_{l,C} - \bar{x}_C = 0 \quad \forall l \in C, \forall C \in \bar{M} \quad (4)$$

$$\sum_{i \in N} x_{i,C} = \bar{x}_C \quad \forall C \in \bar{M} \quad (5)$$

$$\sum_{C \in \bar{M}_l} y_{l,C} = 1 \quad \forall l \in L \quad (6)$$

$$\sum_{C \in \bar{M}} x_{i,C} z_C \leq a_i \quad \forall i \in N \quad (7)$$

式中: N 为多港口区域港口的集合; $\bar{M}$ 为稳定班轮集群的集合; $\bar{M}_l$ 为包含班轮公司 l 的稳定班轮集群集合; $\bar{b}$ 为班轮集群挂靠不同港口时航线变动次数的平均值; $\bar{z}$ 为多港口区域为服务班轮集群需要配置的泊位数的平均值; $b_{j,C}$ 为班轮集群 C 的船舶挂靠港口 j 的航线调整数量; a_i 为港口 i 拥有泊位的数量; $\bar{x}_C$ 为 0-1 变量,当班轮集群 C 作为最佳班轮集群被选择时为 1,否则为 0; $y_{l,C}$ 为 0-1 变量,当班轮集群 C 被选择且 C 中的成员包含班轮公司 l 时取值为 1,否则为 0; $x_{i,C}$ 为 0-1 变量,当班轮集群 C 中的船舶选择挂靠港口 i 时为 1,否则为 0。

目标函数式(3)表示船舶挂靠港口的变动和总泊位数加权最小,目的是减少泊位数和降低调整船

船舶挂靠港口的次数,挂靠港口调整次数与泊位数现实意义不同,因此,在目标函数中使用平均值法将其变为量纲一;式(4)表示逻辑关系限制,即无论班轮集群 C 是否被选择,变量 $\bar{x}_C$ 与 $y_{l,C}$ 的取值保持一致;式(5)表示当班轮集群 C 被选择时,其船舶挂靠一个相同的港口;式(6)表示班轮公司只能属于一个被选中的稳定的班轮集群;式(7)表示多港口区域中港口泊位资源的限制。

由于模型中的集合 $\bar{M}$ 和 $\bar{M}_l$, 以及 $z_C, c_l, \bar{b}$ 和 $\bar{z}$ 的值都是未知的,本文提出的资源配置与分配模型可以认为是一个集划分模型,因此,无法直接使用数学规划求解器对模型进行求解,本文设计三阶段优化方法对其进行求解。

3 三阶段优化方法

为求解本文提出的集划分模型,设计三阶段优化方法:第1阶段基于排队论方法求解不同班轮集群的最优泊位数 z_C ;第2阶段利用 Shapley 值法和核仁理论来确定稳定的班轮集群集合(集合 $\bar{M}$ 和 $\bar{M}_l$);基于第1、2阶段的结果,本文提出的集划分模型可以简化为一个线性规划模型,第3阶段利用线性规划求解器进行求解。

3.1 第1阶段排队论方法

以船舶为客户,以泊位为服务台,可以为船舶与泊位的服务系统建立一个排队系统。本文的排队系统可以描述为 $M/E_k/z$ 排队系统,其中 k 为爱尔朗分布的阶数, z 为港口为服务班轮集群配置的泊位数。为刻画排队系统, λ 为船舶到达率, μ 为港口服务率,服务强度 ρ 为

$$\rho = \frac{\lambda}{z\mu} \quad (8)$$

对于港口服务时间,其均值 u 和方差 σ^2 为

$$u = \frac{1}{\mu} \quad (9)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{k\mu^2} \quad (10)$$

根据泊位每天作业成本 c_1 和船舶每天在港成本 c_2 ,有 z 个泊位的排队系统每天的作业成本 $f(z)$ 为

$$f(z) = c_1 z + c_2 \pi(z) \quad (11)$$

式中: $\pi(z)$ 为当港口为服务班轮集群配置 z 个泊位时,其船舶的每日平均队长。

在 $M/E_k/z$ 排队系统中,没有确定的平均队长公式,因此,本文引用 Kimura^[28] 对于平均等待时间的估算公式进行计算,记为 W_1 。利用标准的 $M/$

z 和 $M/D/z$ 排队系统的平均等待时间(分别记为 W_2 和 W_3)近似得出 $M/E_k/z$ 排队系统的平均等待时间,即

$$W_1 = \frac{1 + c_s^2}{2c_s^2/W_2 + (1 - c_s^2)/W_3} \quad (12)$$

$$c_s^2 = \frac{1}{k} \quad (13)$$

对于标准的 $M/M/z$ 排队系统,可以推导出 W_2 的数学表达式。对于 $M/D/z$ 排队系统,根据 Kimura^[28] 可以估算得到

$$W_3 = \frac{1 + u(z)g(\rho)}{2} W_2 \quad (14)$$

$$u(z) = \frac{(z-1)(\sqrt{4+5z}-2)}{16z} \quad (15)$$

$$g(\rho) = \frac{1-\rho}{\rho} \quad (16)$$

然后,根据 Little 公式,有

$$\pi(z) = \lambda W_1 + \frac{\lambda}{\mu} \quad (17)$$

最后,利用不等式确定最优泊位数 z^* ,即

$$\pi(z^*) - \pi(z^* + 1) \leq \frac{c_1}{c_2} \leq \pi(z^* - 1) - \pi(z^*) \quad (18)$$

3.2 第2阶段合作博弈理论

根据第1阶段的求解结果,为服务任意班轮集群 C 的船舶,应配置的最优泊位数为 z_C^* ,则该班轮集群的运营成本 $h(z_C^*)$ 为

$$h(z_C^*) = c_2 \pi(z_C^*) \quad (19)$$

本文采用 Shapley 值法对班轮集群中各班轮公司进行分摊成本,那么分摊给班轮公司 l ($\forall l \in L$) 的运营成本 c_l 为

$$c_l = \sum_{C \subseteq L} \frac{(|C|-1)!(|L|-|C|)!}{|L|!} \cdot [h(z_C^*) - h(z_{C,l}^*)] \quad (20)$$

式中: $z_{C,l}^*$ 为服务班轮集群 C 除去班轮公司 l 后船舶需要分配的最优泊位数; $|C|$ 、 $|L|$ 分别为集合 C 、 L 中班轮公司的数量。

分析不同班轮集群中班轮公司合作的稳定性,基于核仁理论,稳定的班轮集群 C 满足如下条件

$$\sum_{l \in C} c_l = h(z_C^*) \quad (21)$$

$$\sum_{l \in L_1} c_l \leq h(z_{L_1}^*) \quad \forall L_1 \subset C \quad (22)$$

3.3 第3阶段线性规划问题

基于前两阶段的结果,本文的集划分模型可以转换为如下的线性规划问题

$$J = \min \sum_{C \in \bar{M}} \sum_{i \in N} \sum_{\substack{j \in N \\ j \neq i}} \left(\frac{x_{i,C} b_{j,C}}{b} + \frac{\bar{x}_C z_C^*}{z} \right) \quad (23)$$

约束条件为式(4)~(6)与(24),即

$$\sum_{C \in M} x_{i,C} z_C^* \leq a_i \quad \forall i \in N \quad (24)$$

第3阶段利用线性规划求解器求解该问题。

4 数值算例

珠江三角洲区域有多个港口,其中香港港、盐田港、蛇口港经济腹地重合度高,如图1所示。本文的算例分析考虑这3个港口。参考张一诺^[29]研究中对于排队论方法中的参数,设置 c_1 为每天6.89万元, c_2 为每天8.50万元。为了验证本文提出的排队论系统,收集马士基(Maersk, MSK)、中国远洋海运集团(China COSCO Shipping Corporation, COSCO)、现代商船(Hyundai Merchant Marine, HMM)、海洋网联船务(Ocean Network Express, ONE)4个班轮公司在3个港口的挂靠数据,进行了船舶到港时间和在港时间分布的实证研究,并给出了三阶段优化方法求解后的数值结果。

4.1 船舶到港时间和在港时间分布的实证研究

通过MSK、COSCO、HMM和ONE官网收集挂靠香港港、盐田港和蛇口港的船舶到港时间和离港时间。实际上,班轮公司通常考虑周服频率,所以本文收集2020年10月份中一周的数据进行分析。

为验证船舶到港时间和在港时间分布规律,采用经典的皮尔逊卡方检验法来拟合数据,统计量 χ^2 表达式为

$$\chi^2 = \sum_{h=1}^r \frac{(d_h - np_h)^2}{np_h} \quad (25)$$

式中: d_h 为分段 h 对应事件(例如船舶到港数量为 h)的实测频数; n 为样本数; p_h 为分段 h 对应事件发生的理论概率; r 为有效事件的个数。

自由度为 $R, R=r-s-1, s$ 为预测的随机分布中参数的个数,泊松分布中 $s=1$,爱尔朗分布中 $s=2$ 。给定显著水平 P ,若统计量 χ^2 落在否定域 $\theta=\{\chi^2>\chi^2_P(R)\}$ 中,拒绝分布假设,反之接受假设。

以COSCO和MSK组成的班轮集群为例,拟合在港服务时间分布服从爱尔朗分布。将服务时间以3为组距分12组,记录每个时间段到达船舶的数量,理论频数低于2时合并区间。如表1所示,总实测频数为105次,有效事件 $r=10$,自由度 $R=10-2-1$,当取 $P=0.05$ 时 $\chi^2_{0.05}(7)=14.067\,0>\chi^2=11.809\,1$,因此,服从 $\mu=1.428$ 的4阶爱尔朗分布。

经检验,单个班轮公司、两家及以上的班轮公司所形成的班轮集群,其船舶在港时间分布均服从爱尔朗分布。船舶到港时间的拟合同样使用皮尔逊卡

表1 COSCO和MSK组成的班轮集群在港时间分布检验

Table 1 Port time distribution test of liner ship clusters composed of COSCO and MSK

h	d_h	p_h	np_h	$(d_h - np_h)^2 / np_h$
0~4	1	0.016 2	1.701 0	0.288 9
4~8	14	0.109 8	11.529 0	0.529 6
8~12	21	0.194 6	20.433 0	0.015 7
12~16	25	0.207 6	21.798 0	0.470 4
16~20	17	0.171 5	18.007 5	0.056 4
20~24	7	0.121 5	12.757 5	2.598 4
24~28	7	0.077 8	8.169 0	0.167 3
28~32	2	0.046 3	4.861 5	1.684 3
32~36	6	0.026 1	2.740 5	3.876 8
36~40	2	0.014 1	1.480 5	
40~44	2	0.007 3	0.766 5	2.121 4
44~48	1	0.003 7	0.388 5	

方检验法,结果表明班轮公司个体和班轮集群的船舶到港时间均服从泊松分布,参数取值如表2所示。

表2 不同班轮集群的泊松分布和爱尔朗分布的参数

Table 2 Parameters of Poisson distribution and Erlang distribution of different liner ship clusters

班轮集群	λ	k	μ
{HMM, ONE, MSK, COSCO}	30.57	4	1.409
{HMM, ONE, MSK}	25.57	4	1.405
{ONE, MSK, COSCO}	24.43	3	1.467
{HMM, MSK, COSCO}	21.14	4	1.360
{HMM, ONE, COSCO}	20.57	5	1.398
{HMM, ONE}	15.57	4	1.391
{MSK, COSCO}	15.00	4	1.428
{HMM, MSK}	16.14	4	1.342
{ONE, COSCO}	14.43	5	1.492
{HMM, COSCO}	11.14	5	1.301
{ONE, MSK}	19.43	4	1.479
{HMM}	6.14	3	1.204
{COSCO}	5.00	3	1.424
{ONE}	9.43	6	1.533
{MSK}	10.00	4	1.431

4.2 最优泊位数计算

不同班轮集群对应的最优泊位数结果,如表3所示,可知:如果不考虑班轮公司间的合作,4个公司MSK、COSCO、HMM、ONE分别需要10、5、7、9个泊位,当4个公司形成班轮集群时,只需要26个泊位为其服务,班轮公司合作对于港口资源整合优势十分明显。

表 3 最优泊位数结果

Table 3 Results of optimal berth number

班轮集群	z^* /个	$\pi(z^*)$ /艘
{HMM, ONE, MSK, COSCO}	26	22.590 1
{HMM, ONE, MSK}	22	19.100 1
{ONE, MSK, COSCO}	21	17.241 5
{HMM, MSK, COSCO}	19	16.415 7
{HMM, ONE, COSCO}	18	15.574 3
{HMM, ONE}	15	12.024 5
{MSK, COSCO}	14	10.942 0
{HMM, MSK}	14	12.844 2
{ONE, COSCO}	13	10.086 0
{HMM, COSCO}	11	9.282 2
{ONE, MSK}	17	13.634 6
{COSCO}	5	4.111 0
{HMM}	7	5.723 1
{ONE}	9	6.428 0
{MSK}	10	7.307 0

4.3 成本分摊与稳定的班轮集群

采用 Shapely 值法分摊各公司每日在港成本,结果如表 4 所示,可知:在独自运营下 MSK、COSCO、HMM、ONE 的每日成本分别为 6.237×10^5 、 3.518×10^5 、 4.894×10^5 、 5.488×10^5 元;各公司在最优的稳定集群下分摊的成本分别为 5.807×10^5 、 3.232×10^5 、 4.464×10^5 、 5.234×10^5 元,成本分别降低 6.89%、8.12%、8.77%、4.63%。由此可见,以班轮集群配置泊位在成本方面也是具有一定的优势。

表 4 成本分摊结果

Table 4 Results of cost allocation

班轮集群	每家公司每天分摊的成本/ 10^5 元			
	MSK	COSCO	HMM	ONE
{HMM, ONE, MSK, COSCO}	6.044	3.246	4.604	5.370
{HMM, ONE, MSK}	6.138		4.591	5.567
{ONE, MSK, COSCO}	6.102	3.232		5.364
{HMM, MSK, COSCO}	5.970	3.442	4.598	
{HMM, ONE, COSCO}		3.339	4.598	5.296
{HMM, ONE}			4.641	5.234
{MSK, COSCO}	6.027	3.308		
{MSK, HMM}	5.807		4.464	
{ONE, COSCO}		3.319		5.289
{HMM, COSCO}		3.279	4.655	
{ONE, MSK}	6.189			5.440
不合作	6.237	3.518	4.894	5.488

表 5 班轮集群稳定性

Table 5 Liner ship clusters stability

案例	班轮集群		每家公司每天分摊的成本/ 10^5 元			
			MSK	COSCO	HMM	ONE
1	2 家班轮公司	{ONE, MSK}	6.189			5.440
		{ONE, COSCO}		3.319		5.289
		{MSK, COSCO}	6.027	3.308		
	3 家班轮公司	{ONE, MSK, COSCO}	6.102	3.232		5.364
	不参与合作		6.237	3.518	4.894	5.488
2	2 家班轮公司	{HMM, ONE}			4.641	5.234
		{HMM, MSK}	5.807		4.464	
		{ONE, MSK}	6.189			5.440
	3 家班轮公司	{HMM, ONE, MSK}	6.138		4.591	5.567
	不参与合作		6.237	3.518	4.894	5.488

下面利用核仁理论确定稳定的班轮集群。以 {ONE, MSK, COSCO} 和 {HMM, ONE, MSK} 2 个案例为例分析班轮集群稳定性,如表 5 所示,可知:在案例 1 中,基于核仁理论可以得到由 ONE、MSK、COSCO 组成的每个班轮集群都是稳定的;在案例 2 中 HMM、ONE、MSK 形成的集群并不稳定,因为 MSK、ONE、MSK 中任何 2 个班轮公司都更愿意结成合作关系,而不是组成大的班轮集群;从 4 个班轮公司中可以获得 8 个稳定班轮集群 {HMM, ONE, MSK, COSCO}、{ONE, MSK, COSCO}、{HMM, ONE}、{MSK, COSCO}、{MSK, HMM}、{ONE, COSCO}、{HMM, COSCO}、{ONE, MSK},而其他包含 2 个及以上班轮公司的班轮集群都是不稳定的。基于上述 8 个稳定班轮集群,以及每个班轮公司 {HMM}、{ONE}、{MSK}、{COSCO},据此展开第 3 阶段的计算。

4.4 泊位资源分配结果

当第 3 阶段不考虑约束式(24)时,也就是多港口区域的泊位资源无限时,得到最优结果:为服务这 4 个班轮公司的船舶,珠三角地区需要配置 27 个泊位,其中盐田港应为班轮集群 {HMM, MSK} 分配 14 个泊位,香港港应为班轮集群 {ONE, COSCO} 分配 13 个泊位,如表 3 所示。如果珠三角地区的多个港口只为这 4 个班轮公司提供服务,而且不同港口泊位资源没有限制的话,只需要在盐田港和香港港配置一定数量的泊位就可以满足这 4 个班轮公司船舶在该地区的作业需求,从而可以提高泊位资源的利用率,也可以减少泊位资源的重复建设。

4.5 灵敏度分析

为研究参数的弹性,对部分参数进行灵敏度分析。

令 E_k 中的 k 为 3 时, 改变 λ 和 μ 的值, 可分析这 2 个参数对最优泊位数 z^* 的影响, 如图 3 所示, 可知: z^* 基本上是 λ 的线性函数; 随着 μ 的增加, z^* 逐渐减小。

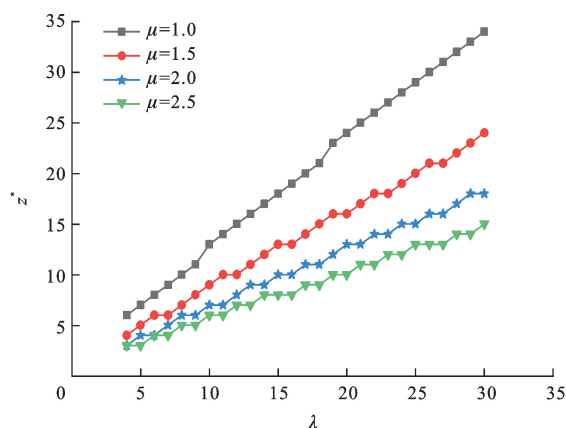


图 3 不同 λ 和 μ 下的最优泊位数

Fig. 3 Optimal berth numbers for different λ and μ

通过统计得到的不同班轮集群的船舶到港时间分布的参数 λ 和 z^* 的关系, 如图 4 所示, 可知: 当需要分配相同的泊位数时, 港口更希望服务更多的船舶来提高泊位利用率, 因此, $\{HMM, MSK\}$ 比 $\{MSK, COSCO\}$ 更受港口欢迎; 以 MSK 和 ONE 为例, 其到港船舶数量差不多, 而 ONE 需要的泊位数更少, 因此, 港口更愿意给 ONE 分配泊位进行服务。

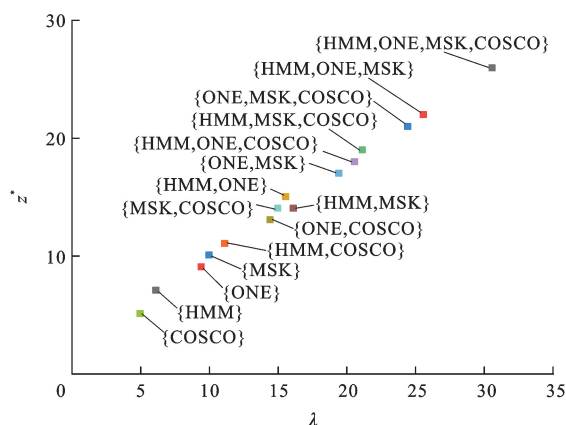


图 4 z^* 与 λ 的关系

Fig. 4 Relationship between z^* and λ

每个港口的泊位资源是有限的, 比较多港口区域中港口泊位数对目标函数值的影响, 如图 5 所示, 可知: 当蛇口港泊位资源有限时, 目标函数值不发生改变, 而盐田港和香港港泊位资源有限时, 目标函数值会显著变大; 香港港是否有充足的泊位资源对泊位分配结果影响较大, 其次是盐田港。

5 结 语

(1) 基于皮尔逊卡方检验的实证研究发现, 不同

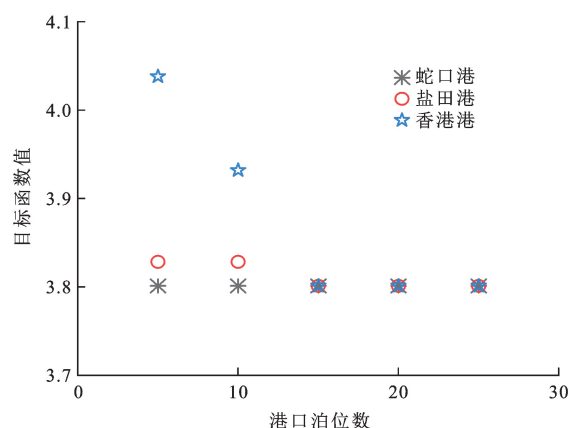


图 5 港口泊位数对目标函数值的影响

Fig. 5 Impact of port berth number on objective function value

班轮集群的船舶的到港时间和在港时间分布均服从泊松分布和爱尔朗分布。

(2) 考虑班轮集群的船舶到港作业需求管理, 建立多港口区域泊位资源配置与分配的三阶段优化方法的研究框架。数值结果表明: 在多港口区域进行泊位资源的配置与分配, 可以显著降低船舶等泊时长, 减少船舶在港成本; 区域内泊位资源的有效整合有利于提高泊位利用率, 降低泊位运营成本。

(3) 后续可对 BAP 进行拓展研究, 考虑船舶到港作业需求管理的影响, 将战术层面和运营层面的决策相结合, 建立模型, 并设计高效的求解算法。

参考文献:

References:

- [1] GUI Dong-ping, WANG Hai-yan, YU Meng. Risk assessment of port congestion risk during the COVID-19 pandemic[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2022, 10(2): 150.
- [2] 王伟, 纪翌佳, 金凤君. 基于动态空间面板模型的中国港口竞争与合作关系研究[J]. 地理研究, 2022, 41(3): 616-632. WANG Wei, JI Yi-jia, JIN Feng-jun. The competition and cooperation relationship of Chinese Ports based on dynamic spatial panel model[J]. Geographical Research, 2022, 41(3): 616-632. (in Chinese)
- [3] 范志强. 连续泊位分配问题研究: 模型优化与计算分析[J]. 工业工程与管理, 2016, 21(3): 81-87. FAN Zhi-qiang. Research on continuous berth allocation problem: model comparison and computational analysis[J]. Industrial Engineering and Management, 2016, 21(3): 81-87. (in Chinese)
- [4] BARBOSA F, BERBERT RAMPAZZO P C, YAMAKAMI A, et al. The use of frontier techniques to identify efficient solutions for the berth allocation problem solved with a hybrid evolutionary algorithm[J]. Computers and Operations Research, 2019, 107: 43-60.
- [5] URSAVAS E, ZHU S X. Optimal policies for the berth

- allocation problem under stochastic nature[J]. *European Journal of Operational Research*, 2016, 255(2): 380-387.
- [6] LALLA-RUIZ E, EXPÓSITO-IZQUIERDO C, MELIÁN-BAIISTA B, et al. A set-partitioning-based model for the berth allocation problem under time-dependent limitations[J]. *European Journal of Operational Research*, 2016, 250(3): 1001-1012.
- [7] XIANG Xi, LIU Chang-chun, MIAO Li-xin. A bi-objective robust model for berth allocation scheduling under uncertainty[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2017, 106: 294-319.
- [8] XU Ya, CHEN Qiu-shuang, QUAN Xiong-wen. Robust berth scheduling with uncertain vessel delay and handling time[J]. *Annals of Operations Research*, 2012, 192(1): 123-140.
- [9] SCHEPLER X, BALEV S, MICHEL S, et al. Global planning in a multi-terminal and multi-modal maritime container port[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2017, 100: 38-62.
- [10] 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.
- [11] CORRECHER J F, ALVAREZ-VALDES R, TAMARIT J M. New exact methods for the time-invariant berth allocation and quay crane assignment problem[J]. *European Journal of Operational Research*, 2019, 275(1): 80-92.
- [12] ZHENG Jian-feng, YANG Ling-xiao, HAN Wen-cheng, et al. Berth assignment for liner carrier clusters under a cooperative environment[J]. *Computers and Operations Research*, 2021, 136: 105486.
- [13] ILATI G, SHEIKHOESLAMI A, HASSANNAYEBI E. A simulation-based optimization approach for integrated port resource allocation problem[J]. *PROMET—Traffic and Transportation*, 2014, 26(3): 243-255.
- [14] LEGATO P, MAZZA R M, GULLÌ D. Integrating tactical and operational berth allocation decisions via simulation-optimization[J]. *Computers and Industrial Engineering*, 2014, 78: 84-94.
- [15] SAEED N, LARSEN O. Application of queuing methodology to analyze congestion: a case study of the Manila International Container Terminal, Philippines[J]. *Case Studies on Transport Policy*, 2016, 4(2): 143-149.
- [16] EL-NAGGAR M. Application of queuing theory to the container terminal at Alexandria seaport[J]. *Journal of Soil Science and Environmental Management*, 2010, 1(4): 77-85.
- [17] DRAGOVIĆ B, PARK N K, RADMILOVIĆ Z. Ship-berth link performance evaluation: simulation and analytical approaches[J]. *Maritime Policy and Management*, 2006, 33(3): 281-299.
- [18] KOZAN E. Analysis of the economic effects of alternative investment decisions for seaport systems[J]. *Transportation Planning and Technology*, 1994, 18(3): 239-248.
- [19] SEN P. Optimal priority assignment in queues: application to marine congestion problems[J]. *Maritime Policy and Management*, 1980, 7(3): 175-184.
- [20] EDMOND E D, MAGGS R P. How useful are queue models in port investment decisions for container berths?[J]. *Journal of the Operational Research Society*, 1978, 29(8): 741-750.
- [21] 张恒,陈秋双.考虑船舶废气排放的港口群协同泊位分配研究[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2014, 14(4): 99-106.
ZHANG Heng, CHEN Qiu-shuang. Coordinated berth allocation for port group considering vessel emissions[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2014, 14(4): 99-106. (in Chinese)
- [22] 徐亚,杜玉泉,龙磊.支持多码头协调运作的泊位调度模型和算法[J]. *系统工程*, 2015, 33(1): 128-138.
XU Ya, DU Yu-quan, LONG Lei. Berth scheduling model and algorithm for coordinated operation of multiple container terminals in a port[J]. *Systems Engineering*, 2015, 33(1): 128-138. (in Chinese)
- [23] VENTURINI G, IRIS Ç, KONTOVAS C A, et al. The multi-port berth allocation problem with speed optimization and emission considerations[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2017, 54: 142-159.
- [24] 毕娅,李文锋.集装箱港口集群下多港口多泊位联合调度方法[J]. *计算机应用*, 2012, 32(2): 448-451.
BI Ya, LI Wen-feng. Multi-port and multi-berth integrated scheduling based on container port cluster[J]. *Journal of Computer Applications*, 2012, 32(2): 448-451. (in Chinese)
- [25] GUO Li-ming, ZHENG Jian-feng, DU Hao-ming, et al. The berth assignment and allocation problem considering cooperative liner carriers[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2022, 164: 102793.
- [26] 梅益群,韩晓龙.考虑泊位偏好和岸桥移动的泊位岸桥联合调度[J]. *计算机工程与应用*, 2022, 58(6): 241-249.
MEI Yi-qun, HAN Xiao-long. Joint scheduling of berths and quay cranes considering berth preference and quay crane movement[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2022, 58(6): 241-249. (in Chinese)
- [27] 焦小刚,郑斐峰,徐寅峰,等.考虑泊位疏浚的连续型泊位和动态岸桥联合调度[J]. *运筹与管理*, 2020, 29(2): 47-57.
JIAO Xiao-gang, ZHENG Fei-feng, XU Yin-feng, et al. Integrated continuous berth allocation and time-variant quay crane assignment under berth dredging in container terminal[J]. *Operations Research and Management Science*, 2020, 29(2): 47-57. (in Chinese)
- [28] KIMURA T. Approximations for multi-server queues: system interpolations[J]. *Queueing Systems*, 1994, 17(3): 347-382.
- [29] 张一诺.港口通用泊位最佳数量的计算方法[J]. *系统工程理论与实践*, 1983(1): 35-41.
ZHANG Yi-nuo. Calculation method of optimal number of port general berths[J]. *System Engineering Theory and Practice*, 1983(1): 35-41. (in Chinese)