

# 运价敏感性视角下考虑空箱调运的班轮企业双渠道舱位分配

孙赫迎, 高路逸, 高远<sup>†</sup>, 张文会

(东北林业大学 土木与交通学院, 黑龙江省 哈尔滨 150040)

**摘要:** 在航运业数字化转型的背景下, 班轮企业在线上线下双渠道中差异化的超售行为改变了各渠道的舱位供需匹配关系, 从而导致双渠道成本结构呈现异质性, 进而增加了双渠道舱位分配的复杂性. 针对这一难题, 本文基于托运人对运价的不同敏感性 (分为运价敏感型与运价不敏感型), 构建了双渠道舱位分配和舱位定价联合优化模型. 进一步, 将空箱调运纳入决策框架, 构建了两阶段非线性规划模型, 以同步优化舱位分配量、舱位运价及空箱调运量. 以中远海运的一条从远东至南非的航线作为案例进行算例和敏感性分析. 结果表明, 与忽略空箱调运的模式相比, 考虑空箱调运可使班轮企业的期望总收益提升 32%. 此外, 在现货市场托运人履约率、合同市场托运人置信水平、现货市场随机需求波动等参数变动情况下, 考虑空箱调运的模式表现出更优的收益稳定性. 本文通过对托运人类型的精细化分类, 为航运数字化背景下的班轮企业运营管理提供了理论支持与决策参考.

**关键词:** 托运人运价敏感性; 线上线双渠道; 舱位分配; 舱位超售; 空箱调运; 协同优化

中图分类号: U695.2 文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyj.2025.1029

引用格式: 孙赫迎, 高路逸, 高远, 等. 运价敏感性视角下考虑空箱调运的班轮企业双渠道舱位分配 [J]. 控制与决策

## Dual-channel slot allocation of a liner company considering empty container repositioning from the perspective of freight rate sensitivity

SUN He-ying, GAO Lu-yi, GAO Yuan<sup>†</sup>, ZHANG Wen-hui

(School of Civil Engineering and Transportation, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

**Abstract:** In the context of digital transformation in the shipping industry, the divergent overbooking behaviors of liner companies in both online and offline channels have altered the supply-demand matching relationship in each channel. This results in heterogeneous cost structures, which further complicates the slot allocation in dual-channel. To address this challenge, this paper categorizes shippers into freight rate-sensitive and freight rate-insensitive types and then develops a joint optimization model for dual-channel slot allocation and pricing. Furthermore, empty container repositioning is incorporated into the decision-making framework, and a two-stage nonlinear programming model is established to synchronously optimize slot allocation quantity, freight rates, and empty container repositioning volume. A shipping route from the Far East to South Africa operated by COSCO Shipping is selected as a case study for numerical and sensitivity analyses. Results show that compared with the mode that ignores empty container repositioning, considering this factor can increase the liner company's expected total profit by 32%. In addition, when parameters such as the fulfillment rate of shippers in the spot market, the confidence level of shippers in the contract market, and the random demand fluctuation in the spot market change, the mode considering empty container repositioning exhibits better profit stability. By the refined classification of shipper types, this paper provides theoretical support and decision-making reference for the operational management of liner companies in the context of shipping digitalization.

**Keywords:** shipper's freight rate sensitivity; online and offline dual channels; slot allocation; slot overbooking; empty container repositioning; collaborative optimization

## 0 引言

集装箱运输是国际贸易的主要运输方式, 承担

了 90% 的国际贸易运量<sup>[1]</sup>. 近年来, 受疫情、地缘政治等因素影响, 国际贸易运输需求增长放缓, 集装箱

收稿日期: 2025-11-23; 录用日期: 2026-01-31.

基金项目: 中国博士后科学基金面上项目 (2024M760393); 黑龙江省博士后面上项目 (LBH-Z24056).

责任编委: 龙建成.

<sup>†</sup>通信作者. E-mail: gaoy@nefu.edu.cn.

班轮运输市场竞争日益加剧<sup>[2]</sup>。因此,为了提升收益,班轮企业亟需优化舱位分配策略。在此背景下,越来越多的班轮企业加速数字化转型,在保留原有线下销售渠道的基础上,拓展自营线上销售渠道。例如,马士基在2017年推出在线订舱平台 *Marsk Spot*, 中远海运也在2022年推出电商平台 *SynConHub*。这类线上舱位销售平台丰富了托运人的订舱渠道,已成为班轮企业提升竞争力的重要途径。在实际中,托运人往往同时向多家班轮企业订舱,临近船期时仅选择一家班轮企业完成货物运输,这会导致其他未被选择的班轮企业舱位利用率下降<sup>[3]</sup>。因此,班轮企业普遍采取舱位超售策略以提高舱位利用率<sup>[4]</sup>。然而,频繁超售容易引发托运人的信任危机,不利于班轮企业的长期发展。为缓解这一问题,部分班轮企业在线上销售渠道推出了舱位保障服务,承诺尽量避免让托运人遭遇甩柜,并在舱位超售情况发生时提供补偿。例如,通过 *Maersk Spot* 订舱的托运人在遭遇甩柜时,可获得一定赔偿。相比之下,线下销售渠道的托运人在因班轮企业超售舱位而导致订舱失败时,则很少获得类似补偿<sup>[5]</sup>。因此,针对班轮企业在线上线下销售渠道中超售行为的异质性,如何合理配置舱位资源成为其运营管理中的关键问题。

在集装箱舱位分配研究领域,现有文献主要从单一渠道和双渠道两个维度展开。在单一渠道舱位分配方面,郑建风等<sup>[6]</sup>针对传统舱位分配模型未充分考虑需求流动性与收益波动的问题,通过细分市场并引入风险规避理论,构建了混合整数非线性舱位分配模型。Wang 和 Meng<sup>[7]</sup>考虑现货市场需求和船舶剩余舱位的双重不确定性,构建了两阶段随机非线性非凸规划模型,研究集装箱现货市场运费率优化问题。Song 等<sup>[8]</sup>在运力受限和需求不确定下,基于委托代理理论,通过决策在线下销售渠道中的舱位分配量,分析了雇佣货运代理和无船承运人两种策略的适用性。Hu 等<sup>[9]</sup>则基于电商和传统环境下,构建了考虑空箱运输的合同客户与散客舱位分配模型。在双渠道舱位分配方面, Sun 等<sup>[10]</sup>分别构建了 NVOCC 单渠道与在线和 NVOCC 双渠道下的合同机制模型,通过决策班轮企业在合同市场分配给 NVOCC 的舱位数量,研究班轮企业渠道选择问题。

在舱位超售研究领域,航空公司通常基于货物重量与体积两个维度来判断是否发生超售, Wannakrairot 和 Phumchusri<sup>[11]</sup>综合考虑随机预订请求水平、到场率和预订请求密度,构建了针对航空货运二维特性的超售模型。Du 等<sup>[12]</sup>针对货物重量与体积不确定引发的超售问题,构建了马尔可夫决策过

程模型,提出数量基和重量-体积基两类近似定价方法。与航空货运领域不同,航运领域的超售主要取决于班轮企业分配舱位数与托运人实际履约需求之间的偏差。Wang 等<sup>[1]</sup>研究班轮航运联合合同选择与舱位分配问题,针对长期合同集装箱到场率不确定及运力限制下的超售行为,构建了风险厌恶型两阶段随机规划模型。Sun 等<sup>[4]</sup>探讨了班轮企业在线上 and 线下销售渠道的差异化超售行为,构建托运人订舱和班轮企业定价两阶段博弈模型,确定双方双赢的销售渠道。

此外,班轮企业的舱位分配不仅受限于船舶运力,还受各港口空箱存量的影响。国际贸易中常出现出口量大的港口空箱短缺、进口量大的港口空箱积压现象,形成了资源错配问题<sup>[13]</sup>。在多式联运空箱调运方面, Wang 等<sup>[14]</sup>针对海铁多式联运中铁路货运面临的空箱调运成本高和区域资源短缺等难题,利用蒙特卡洛模拟随机需求,提出了重箱与空箱协同调度优化方案。Du 等<sup>[15]</sup>则针对中欧班列因中欧贸易顺差导致的回程空箱调运、运力浪费问题,构建了以最小化空驶与类客运回程运营总成本的整数规划模型。在海运空箱调运方面,王文敏等<sup>[2]</sup>研究了在线订舱模式下结合超售策略的舱位分配与空箱调运协同优化问题,构建了双混合整数规划模型。Liang 等<sup>[13]</sup>针对随机需求,构建了动态舱位分配与空箱重定位的随机规划模型。蔡佳芯等<sup>[16]</sup>基于马尔科夫决策过程与动态规划相结合的方法,构建了多周期空箱存储与调运联合优化混合整数规划模型。王文敏等<sup>[17]</sup>进一步采用 LSTM-MLP 模型预测货物及空箱的运输需求,构建了多周期混合整数联合优化模型。因此,在满足托运人运输需求和实现班轮企业收益最大化的目标下,对舱位分配与空箱调运的协同优化具有重要现实意义。

实践中,由于运输货种属性不同,托运人对舱位运价的敏感程度也存在差异。例如,运输钢铁、建筑材料等货物的托运人对舱位运价较敏感,属于运价敏感型;而运输笔记本电脑、电子元件等高附加值货物的托运人则更注重时效性,对运价相对不敏感,属于运价不敏感型<sup>[18]</sup>。在制造业领域,张浩男等<sup>[19]</sup>构建制造商与零售商的异质性时间偏好下的跨期决策动态规划模型,研究闭环供应链的回收决策制定及回收模式选择问题。赵道致和冯慧中<sup>[20]</sup>考虑产能需求方对加工交期和价格敏感,构建垄断型产能分享平台和双边用户的两阶段决策模型。在航运领域,现有研究多聚焦于托运人对运输时间敏感性对舱位分配和路径规划的影响, Wang 等<sup>[21]</sup>研究时间敏感货物

的集装箱舱位分配问题, 刻画了含交货时间奖惩机制的运价函数, 构建了忠诚策略与扩张策略下的随机混合整数二次规划模型. 汪挺松和李曼<sup>[22]</sup>针对时间敏感型货物, 设计了运价与配送时间关联的定价机制, 构建了两阶段舱位分配随机整数规划模型. Wang等<sup>[23]</sup>则基于空箱调度约束, 构建两种可多项式求解的链路型线性规划模型, 研究运输时间敏感型的班轮集装箱分配问题. 然而, 现有研究未能充分刻画托运人对运价敏感性对双渠道运输需求的影响. 托运人对运价敏感性的差异会影响托运人的运输需求, 从而导致线上线下渠道的运输需求与分配舱位之间存在差异. 这种由托运人对运价敏感性不同所引起的供需匹配差异, 显著增加了班轮企业在双渠道下进行舱位分配决策的难度.

已有研究在舱位分配和空箱协同优化方面, 多聚焦于单一渠道和托运人对运输时间敏感性视角, 忽略了线上与线下销售渠道差异化的超售行为所导致双渠道供需匹配关系和成本结构的异质性, 且鲜有考虑托运人对运价敏感性的异质性对双渠道供需匹配关系的影响. 为此, 本文综合考虑班轮企业线上线下双渠道销售模式与托运人运价敏感性, 对托运人实施精细化分类, 融合线上线下渠道间差异化的超售补偿成本, 构建了两阶段非线性规划模型, 并进一步将空箱调运纳入模型框架, 构建了考虑空箱调运的两阶段非线性规划模型. 本研究旨在为航运数字化背景下班轮企业的运营管理提供理论依据, 并为实施托运人精细化管理提供方法参考.

## 1 问题描述

本文研究某班轮企业在固定航线上部署船舶开展多航次双向运输的场景. 为保障收益稳定性, 班轮企业会先在合同市场销售舱位, 即根据与合同市场的托运人预先签订的协议, 以较低运价在各航程中为其预留一定数量的舱位. 之后, 班轮企业将剩余的舱位投放到现货市场进行销售. 在现货市场中, 班轮企业采用线上线下双渠道销售舱位. 班轮企业在线上销售渠道直接面向托运人销售舱位, 在线下销售渠道则通过货运代理人销售舱位, 班轮企业需向其支付一定比例的佣金<sup>[24]</sup>. 此外, 本文将现货市场的托运人分为运价敏感型和运价不敏感型. 班轮企业在线上 and 线下销售渠道设定不同的单位超售补偿成本.

基于上述设定, 本文首先构建了不考虑空箱调运的双渠道舱位分配与定价两阶段联合优化模型. 第一阶段, 在合同市场中, 班轮企业根据协议运价和一定的置信水平, 为托运人分配舱位; 第二阶段, 在

现货市场中, 班轮企业根据剩余的舱位数量, 结合不同类型托运人的特点以及相关成本, 决策各渠道的舱位分配与舱位运价, 以实现班轮企业总收益的最大化. 随后, 构建了考虑空箱调运的双渠道舱位分配与定价两阶段联合优化模型. 第一阶段合同市场的舱位分配方式不变; 第二阶段则综合考虑现货市场剩余舱位数量、不同托运人类型、各项成本以及空箱调运, 决策各渠道的舱位分配与舱位运价, 以实现班轮企业总收益的最大化. 问题假设如下:

- 1) 班轮企业部署的船舶总舱位数已知;
- 2) 班轮企业的船舶运输航线及挂靠港口固定且已知;
- 3) 班轮企业的船舶规模足以支持多航程双向往返运输;
- 4) 在不考虑空箱调运模式中, 缺箱港口通过租赁集装箱满足需求, 在考虑空箱调运模式中, 则通过空箱调运来满足;
- 5) 班轮企业在前一航程于各港口卸下的重箱, 可在后续航程中作为空箱投入使用. 本文使用的参数定义如表1所示.

## 2 模型构建

### 2.1 托运人的运输需求函数

#### 2.1.1 合同市场上托运人的运输需求函数

班轮企业在合同市场和现货市场上销售舱位, 合同市场的托运人需求具有不确定性, 因此, 班轮企业需根据市场变动和历史数据对其进行预测. 本文假设合同市场托运人需求 $D_{ij}^{C,n}$ 服从对数正态分布, 即 $D_{ij}^{C,n} \sim \ln N(\mu_{ij}^C, \sigma_{ij}^C)$ <sup>[22]</sup>, 其中,  $\mu_{ij}^C$ 为合同市场托运人的需求均值,  $\sigma_{ij}^C$ 为合同市场托运人的需求标准差.

#### 2.1.2 现货市场上运价敏感型和运价不敏感型托运人的运输需求函数

在现货市场, 运价敏感型托运人的需求函数如式(1)所示.

$$D_{ij}^{M,S1,n} = a_{ij}^{M,S1,n} - b_{ij}^{M,S1,n} P_{ij}^{S1,n} + a_{3-\xi}(\beta_1 - \beta_2) + \varepsilon^{[25]}. \quad (1)$$

其中,  $a_{ij}^{M,S1,n}$ 为运价敏感型托运人的基本需求;  $b_{ij}^{M,S1,n}$ 为运价敏感型托运人对运价的敏感系数;  $p_{ij}^{S1,n}$ 为运价敏感型托运人对应的运价;  $a_{3-\xi}$ 为单位舱位超售补偿成本差异对线上销售渠道订舱的运价敏感型托运人的需求刺激系数, 其中 $\xi = 1, 2$ ;  $(\beta_1 - \beta_2)$ 为线上与线下销售渠道的单位舱位超售补偿成本差异<sup>[25]</sup>;  $\varepsilon$ 为随机波动<sup>[8]</sup>, 服从均匀分布.

运价不敏感型托运人的需求函数如式(2)所示.

表1 参数定义

参数	含义	参数	含义
$K$	船舶总舱位数	$\Omega$	港口OD对
$P(i, j, k \in P)$	港口集合	$L$	航段集合
$C_t$	班轮企业的重箱单位运输成本	$R_{ij}$	港口 <i>i</i> 到港口 <i>j</i> 的距离
$\delta_{ij}^{L,n}$	是否经过航段(不经过航段: $\delta_{ij}^{L,n} = 0$ ; 经过航段: $\delta_{ij}^{L,n} = 1$ )	$C$	在合同市场, 订舱的托运人
$M(A \cup O \in M)$	在现货市场, 托运人集合( $A$ : 通过线上销售渠道订舱的托运人; $O$ : 通过线下销售渠道订舱的托运人)	$S(S1 \cup S2 \in S)$	在现货市场, 托运人运价敏感型集合( $S1$ : 运价敏感型托运人; $S2$ : 运价不敏感型托运人)
$D_{ij}^{M,S,n}$	在现货市场, 第 <i>n</i> 航程订舱的托运人运输需求 ( $A \cup O \in M$ ) ( $S1 \cup S2 \in S$ )	$a_{ij}^{M,S,n}$	在现货市场, 第 <i>n</i> 航程订舱的托运人基本需求 ( $A \cup O \in M$ ) ( $S1 \cup S2 \in S$ )
$b_{ij}^{M,S,n}$	在现货市场, 第 <i>n</i> 航程订舱的托运人对运价的敏感系数 ( $A \cup O \in M$ ) ( $S1 \cup S2 \in S$ )	$a_{3-\xi}$	单位舱位超售补偿成本差异对线上销售渠道订舱的运价敏感型托运人的需求刺激系数 ( $\xi = 1, 2$ )
$C_f$	班轮企业的船舶固定成本	$\alpha$	机会约束模型参数
$\mu_{ij}^C$	在合同市场, 托运人需求均值	$\sigma_{ij}^C$	在合同市场, 托运人需求方差
$C_v$	在合同市场, 班轮企业的运营成本	$\rho$	托运人在现货市场的履约率
$\beta_{1,2}$	在现货市场销售渠道的单位舱位超售补偿成本(1: 线上销售渠道; 2: 线下销售渠道) ( $\beta_1 > \beta_2$ )	$\lambda_{1,2}$	在现货市场销售渠道的运营成本 (1: 线上销售渠道; 2: 线下销售渠道)
$v_i^{M,S,n}$	班轮企业第 <i>n</i> 航程在港口 <i>i</i> 的超售舱位限制数	$Y$	在现货市场, 班轮企业在线下销售渠道支付给货运代理人的佣金率
$P_{ij}^C$	在合同市场, 班轮企业从港口 <i>i</i> 到港口 <i>j</i> 与托运人的固定协议运价	$\varepsilon$	在现货市场, 托运人的需求随机波动系数, 服从均匀分布 $U[-h, h]$
$z_{ij}^n$	班轮企业第 <i>n</i> 航程从港口 <i>i</i> 到港口 <i>j</i> 的空箱租赁量	$C_{ij}^{z,n}$	班轮企业第 <i>n</i> 航程的单位空箱租赁成本
决策变量:			
$x_{ij}^{C,n}$	在合同市场, 班轮企业第 <i>n</i> 航程从港口 <i>i</i> 到港口 <i>j</i> 分配给托运人的舱位数	$x_{ij}^{M,S,n}$	在现货市场, 班轮企业第 <i>n</i> 航程从港口 <i>i</i> 到港口 <i>j</i> 分配给托运人的舱位数 ( $A \cup O \in M$ ) ( $S1 \cup S2 \in S$ )
$x_{ij}^{E,n}$	班轮企业第 <i>n</i> 航程从港口 <i>i</i> 到港口 <i>j</i> 的空箱调运量	$P_{ij}^{S,n}$	在现货市场, 班轮企业第 <i>n</i> 航程从港口 <i>i</i> 到港口 <i>j</i> 的舱位运价 ( $S1 \cup S2 \in S$ )
空箱调运相关变量:			
$N(n \in N)$	班轮企业的航程数	$OR_i^{E,n}$	班轮企业第 <i>n</i> 航程港口 <i>i</i> 的初始空箱数
$T_{ij}^{E,n}$	班轮企业第 <i>n</i> 航程从港口 <i>i</i> 到港口 <i>j</i> 的单位空箱调运收益	$C_{i,j,t}^{E,n}$	班轮企业第 <i>n</i> 航程从港口 <i>i</i> 到港口 <i>j</i> 的单位空箱运输成本
$C_i^{E,n}$	班轮企业第 <i>n</i> 航程港口 <i>i</i> 的单位空箱存储成本	$R_i^{E,n}$	班轮企业第 <i>n</i> 航程船舶离港后港口 <i>i</i> 的空箱剩余数
$D_{ij}^{E,n}$	班轮企业第 <i>n</i> 航程从港口 <i>i</i> 到港口 <i>j</i> 的空箱需求量	$\psi$	班轮企业的空箱需求最低满足系数

$$D_{ij}^{M,S2,n} = a_{ij}^{M,S2,n} - b_{ij}^{M,S2,n} P_{ij}^{S2,n} + \varepsilon. \quad (2)$$

其中,  $a_{ij}^{M,S2,n}$  为运价不敏感型托运人的基本需求;  $b_{ij}^{M,S2,n}$  为运价不敏感型托运人对运价的敏感系数;  $P_{ij}^{S2,n}$  为运价不敏感型托运人对应的运价。

## 2.2 不考虑空箱调运的双渠道舱位分配和定价联合优化模型

本文将不考虑空箱调运的双渠道舱位分配和定价联合优化模型称为模式 1, 分为两阶段求解。

第一阶段: 班轮企业在合同市场的舱位分配模型如式 (3)~(6) 所示。

$$\max Z_1 = \sum_{n \in N} \sum_{i,j \in P} (p_{ij}^C - C_v - C_t \cdot R_{ij}) x_{ij}^{C,n}, \quad (3)$$

$$\text{s.t. } P(x_{ij}^{C,n} \leq D_{ij}^{C,n}) \geq 1 - \alpha, \forall i, j \in P, n \in N, \quad (4)$$

$$\sum_{i,j \in P} x_{ij}^{C,n} \cdot \delta_{ij}^L \leq K, \forall i, j \in P, n \in N, \quad (5)$$

$$x_{ij}^{C,n} \in N, \forall i, j \in P, n \in N. \quad (6)$$

其中, 式 (3) 表示班轮企业在合同市场收益的最大化, 第一项为班轮企业的舱位销售收益, 第二项为班轮企业的运营成本<sup>[4]</sup>, 第三项为班轮企业的运输成本。约束 (4) 为机会约束<sup>[22]</sup>, 表明班轮企业在合同市场预留给托运人的舱位能够被有效利用, 即当班轮企业为合同市场托运人预留的舱位超出其实际需求时, 班轮企业会承受机会损失, 而这种情况发生的概率控制在  $\alpha$  以内; 约束 (5) 为舱位总数约束, 即班轮企业在各航段分配给合同市场托运人的舱位数均不

超过船舶总舱位数; 约束 (6) 为非负整数约束, 即班轮企业分配给合同市场托运人的舱位数为非负整数。

第二阶段: 班轮企业在现货市场的舱位分配和舱位运价联合决策模型如式 (7)~(13) 所示。

$$\begin{aligned} \max Z_2 = & \sum_{n \in N} \left( \sum_{i,j \in P} (p_{ij}^{S1,n} D_{ij}^{A,S1,n} + p_{ij}^{S2,n} D_{ij}^{A,S2,n}) + \right. \\ & \sum_{i,j \in P} (1 - Y)(p_{ij}^{S1,n} D_{ij}^{O,S1,n} + p_{ij}^{S2,n} D_{ij}^{O,S2,n})) - \\ & \sum_{n \in N} \sum_{i,j \in P} \beta_1 \cdot ((\rho \cdot D_{ij}^{A,S1,n} - x_{ij}^{A,S1,n}) + \\ & (\rho \cdot D_{ij}^{A,S2,n} - x_{ij}^{A,S2,n})) - \sum_{n \in N} \sum_{i,j \in P} \beta_2 \cdot \\ & ((\rho \cdot D_{ij}^{O,S1,n} - x_{ij}^{O,S1,n}) + \\ & (\rho \cdot D_{ij}^{O,S2,n} - x_{ij}^{O,S2,n})) - \sum_{n \in N} \sum_{i,j \in P} \lambda_1 \cdot \\ & (x_{ij}^{A,S1,n} + x_{ij}^{A,S2,n}) - \sum_{n \in N} \sum_{i,j \in P} \lambda_2 \cdot \\ & (x_{ij}^{O,S1,n} + x_{ij}^{O,S2,n}) - \sum_{n \in N} \sum_{i,j \in P} (C_i \cdot R_{ij} \cdot \\ & (x_{ij}^{A,S1,n} + x_{ij}^{A,S2,n} + x_{ij}^{O,S1,n} + x_{ij}^{O,S2,n})) - \\ & \sum_{n \in N} C_f^n - \sum_{n \in N} \sum_{i,j \in P} C_{ij}^z z_{ij}, \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \text{s.t. } x_{ij}^{M,S,n} & \leq \rho \cdot D_{ij}^{M,S,n}, \forall i, j \in P, \forall n \in N \\ (A \cup O \in M, S_1 \cup S_2 \in S), \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \sum_{i,j} (x_{ij}^{M,S,n} \cdot \delta_{ij}^L) & \leq K - \sum_{i,j} x_{ij}^{C,n} \cdot \delta_{ij}^L \\ \forall i, j \in P, \forall n \in N (A \cup O \in M, S_1 \cup S_2 \in S), \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \rho D_{ij}^{M,S,n} - x_{ij}^{M,S,n} & \leq v_{ij}^{M,S}, \\ \forall i, j \in P \forall n \in N, (A \cup O \in M, S_1 \cup S_2 \in S), \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \beta_1 < \beta_2 < p_{ij}^{S,n} & \leq \bar{p}_{ij}^{S,n}, \forall i, j \in P \forall n \in N, \\ (S_1 \cup S_2 \in S), \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} D_{ij}^{M,S,n} \in N, \forall i, j \in P \forall n \in N, \\ (A \cup O \in M, S_1 \cup S_2 \in S), \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} x_{ij}^{C,n}, x_{ij}^{M,S,n} \in N, p_{ij}^{S,n} > 0, \forall i, j \in P \\ \forall n \in N, (S_1 \cup S_2 \in S). \end{aligned} \quad (13)$$

其中, 式 (7) 为班轮企业在现货市场收益的最大化, 第一项和第二项分别为班轮企业通过线上和线下销售渠道销售舱位所获得的订舱收益<sup>[4,8]</sup>, 第三项和第四项分别为班轮企业支付给通过线上和线下销售渠道订舱的托运人的舱位超售补偿成本<sup>[2]</sup>, 第五项和第六项分别为班轮企业通过线上和线下销售渠道售舱的运营成本<sup>[26]</sup>, 第七项为班轮企业的运输成本<sup>[17]</sup>, 第八项为班轮企业的船舶运输固定成本<sup>[2]</sup>, 第九项为班

轮企业的空箱租赁成本<sup>[13]</sup>。

约束 (8) 为舱位分配量约束, 即班轮企业在现货市场分配给托运人的舱位数要小于等于托运人的履约需求<sup>[2]</sup>; 约束 (9) 为舱位总数约束, 即班轮企业各航段分配给现货市场的舱位总数之和不超过班轮企业分配给合同市场后剩余的舱位数; 约束 (10) 为超售约束, 即班轮企业在现货市场的舱位超售数不超过舱位超售数限制; 约束 (11) 为运价约束, 即班轮企业在现货市场的舱位运价大于其在现货市场的超售补偿成本, 小于等于其在现货市场的舱位运价上限; 约束 (12) 为非负整数约束, 即班轮企业现货市场上托运人的需求为非负整数。约束 (13) 为决策变量约束, 即班轮企业在合同市场和现货市场分配给托运人的舱位数为非负整数, 班轮企业在现货市场的舱位运价为正数。

班轮企业的期望总收益模型如式 (14) 所示:

$$\max Z_3 = \max Z_1 + \max Z_2. \quad (14)$$

其中, 式 (14) 为班轮企业总收益最大化, 第一项和第二项分别为班轮企业在合同市场和现货市场的收益最大化。

### 2.3 考虑空箱调运的双渠道舱位分配和定价联合优化模型

本文将考虑空箱调运的双渠道舱位分配和定价联合优化模型称为模式 2, 分为两阶段求解。

第一阶段: 班轮企业在合同市场的舱位分配模型如式 (15) 所示。

$$\max Z_4 = \sum_{n \in N} \sum_{i,j \in P} (p_{ij}^C - C_v - C_t \cdot R_{ij}) x_{ij}^{C,n}. \quad (15)$$

约束条件: (4)、(5)、(6)

其中, 式 (15) 表示班轮企业在合同市场收益的最大化, 第一项为班轮企业的舱位销售收益, 第二项为班轮企业的运营成本<sup>[4]</sup>, 第三项为班轮企业的运输成本。

第二阶段: 班轮企业在现货市场的舱位分配和舱位运价联合决策模型如式 (16)~(26) 所示。

$$\begin{aligned} \max Z_5 = & \sum_{n \in N} \left( \sum_{i,j \in P} (p_{ij}^{S1,n} D_{ij}^{A,S1,n} + p_{ij}^{S2,n} D_{ij}^{A,S2,n}) + \right. \\ & \sum_{i,j \in P} (1 - Y)(p_{ij}^{S1,n} D_{ij}^{O,S1,n} + p_{ij}^{S2,n} D_{ij}^{O,S2,n})) + \\ & \sum_{n \in N} \sum_{i,j \in P} T_{ij}^{E,n} x_{ij}^{E,n} - \sum_{n \in N} \sum_{i,j \in P} C_{i,j,t}^{E,n} R_{ij} x_{ij}^{E,n} - \\ & \sum_{n \in N} \sum_{i,j \in P} R_i^{E,n} C_i^{E,n} - \sum_{n \in N} \sum_{i,j \in P} \beta_1 \cdot \\ & ((\rho \cdot D_{ij}^{A,S1,n} - x_{ij}^{A,S1,n}) + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \sum_{n \in N} \sum_{i, j \in P} \beta_2 \cdot ((\rho \cdot D_{ij}^{O, S1, n} - x_{ij}^{O, S1, n}) + \\
& (\rho \cdot D_{ij}^{O, S2, n} - x_{ij}^{O, S2, n})) - \sum_{n \in N} \sum_{i, j \in P} \lambda_1 \cdot \\
& (x_{ij}^{A, S1, n} + x_{ij}^{A, S2, n}) - \sum_{n \in N} \sum_{i, j \in P} \lambda_2 \cdot \\
& (x_{ij}^{O, S1, n} + x_{ij}^{O, S2, n}) - \sum_{n \in N} \sum_{i, j \in P} (C_t \cdot R_{ij} \cdot \\
& (x_{ij}^{A, S1, n} + x_{ij}^{A, S2, n} + x_{ij}^{O, S1, n} + x_{ij}^{O, S2, n})) - \\
& \sum_{n \in N} C_f^n, \quad (16)
\end{aligned}$$

约束条件: (8)、(10)、(11)、(12)、(17)

$$\begin{aligned}
\text{s.t. } & \sum_{i, j} ((x_{ij}^{M, S, n} + x_{ij}^{E, n}) \cdot \delta_{ij}^L) \leq K - \\
& \sum_{i, j} x_{ij}^{C, n} \cdot \delta_{ij}^L, \quad \forall i, j \in P, \forall n \in N \\
& (A \cup O \in M, S1 \cup S2 \in S), \quad (17)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& x_{ij}^{E, n} \in N, \\
& \forall n \in N \forall i, j \in P, (A \cup O \in M, S1 \cup S2 \in S), \quad (18)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
R_i^{E, n} &= OR_i^{E, n} + \sum_{k \in P, k \neq i} x_{ki}^{E, n} - \sum_{i, j \in P} x_{ij}^{M, S, n} - \\
& \sum_{j \in P, j \neq i} x_{ij}^{E, n} - \sum_{i, j \in P} x_{ij}^{C, n}, \quad (n = 1), \\
& \forall i, j \in P (A \cup O \in M, S1 \cup S2 \in S), \quad (19)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
R_i^{E, n} &= R_i^{E, (n-1)} + \sum_{k \in P, k \neq i} x_{ki}^{E, n} - \\
& \sum_{k \in P, k \neq i} x_{ki}^{M, S, (n-1)} + \sum_{i, j \in P} x_{ki}^{C, (n-1)} - \\
& \sum_{j \in P, j \neq i} x_{ij}^{E, n} - \sum_{i, j \in P} x_{ki}^{M, S, n} - \\
& \sum_{i, j \in P} x_{ij}^{C, n} (\forall n \in N \cap (n \geq 2)), \\
& \forall i, j \in P (A \cup O \in M, S1 \cup S2 \in S) \quad (20)
\end{aligned}$$

$$\psi D_{ij}^{E, n} \leq x_{ij}^{E, n} \leq D_{ij}^{E, n} \quad \forall i, j \in P, \forall n \in N, \quad (21)$$

$$\begin{aligned}
& \sum_i x_{ij}^{E, n} \leq K - x_{ij}^{C, n} - x_{ij}^{M, S, n}, \\
& \forall i, j \in P \forall n \in N, (A \cup O \in M, S1 \cup S2 \in S), \quad (22)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \sum_{j \in P} x_{ij}^{E, n} \leq OR_i^{E, n} - \left( \sum_{j \in P} x_{ij}^{C, n} + \sum_{j \in P} x_{ij}^{M, S, n} \right), \\
& (n = 1) \forall i, j \in P, (A \cup O \in M, S1 \cup S2 \in S), \quad (23)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \sum_{j \in P} x_{ij}^{E, n} \leq R_i^{E, (n-1)} + \\
& \left( \sum_{j \in P} x_{ij}^{C, (n-1)} + \sum_{j \in P} x_{ij}^{M, S, (n-1)} \right) +
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \sum_{k \in P, k \neq i} x_{ki}^{E, n} - \left( \sum_{j \in P} x_{ij}^{C, n} + \sum_{j \in P} x_{ij}^{M, S, n} \right), \\
& (\forall n \in N \cap (n \geq 2)) \forall i, j \in P, \\
& (A \cup O \in M, S1 \cup S2 \in S), \quad (24)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \sum_{j \in P} x_{ij}^{E, n} \leq OR_i^{E, n} - \sum_{j \in P} (x_{ij}^{C, n} + x_{ij}^{M, S, n}), \\
& (n = 1) \forall i, j \in P, (A \cup O \in M, S1 \cup S2 \in S), \quad (25)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \sum_{j \in P} x_{ij}^{E, n} \leq R_i^{E, (n-1)} + \sum_{k \in P, k \neq i} (x_{kj}^{C, n} + x_{kj}^{M, S, (n-1)}) + \\
& \sum_{k \in P, k \neq i} x_{ki}^{E, n} - \sum_{j \in P} (x_{ij}^{C, n} + x_{ij}^{M, S, n}), \\
& (\forall n \in N \cap (n \geq 2)) \\
& \forall i, j \in P, (A \cup O \in M, S1 \cup S2 \in S). \quad (26)
\end{aligned}$$

其中, 式 (16) 表示班轮企业在现货市场收益的最大化, 第一项和第二项分别为班轮企业通过线上和线下销售渠道售舱所获得的订舱收益<sup>[4][8]</sup>, 第三项为班轮企业进行空箱调运获得的空箱调运收益, 第四项为班轮企业进行空箱调运的空箱运输成本, 第五项为班轮企业的空箱存储成本, 第六项和第七项分别为班轮企业支付给通过线上和线下销售渠道订舱的托运人的舱位超售补偿成本<sup>[2]</sup>, 第八项和第九项分别为班轮企业通过线上和线下销售渠道售舱的运营成本, 第十项为班轮企业的运输成本, 第十一项为班轮企业的船舶运输固定成本<sup>[2]</sup>.

约束 (17) 为舱位总数约束, 即班轮企业各航段分配给现货市场托运人的舱位总数之和不超过班轮企业分配给合同市场托运人后剩余的舱位数; 约束 (18) 为非负整数约束, 即班轮企业在现货市场的空箱调运数为非负整数; 约束 (19) 和 (20) 是空箱状态方程约束; 约束 (21) 为空箱调运量约束, 即班轮企业的空箱调运量大于最低空箱调运量, 小于空箱需求; 约束 (22) 为运力优先级约束, 即班轮企业船舶运力先分配给合同市场, 再分配给现货市场, 剩余舱位分给空箱调运; 约束 (23) 和 (24) 为空箱调运可行性约束; 约束 (25) 和 (26) 为空箱调运量约束, 即班轮企业各港空箱调运量要小于其港口可用空箱量。

班轮企业的期望总收益模型如式 (27) 所示。

$$\max Z_6 = \max Z_1 + \max Z_2. \quad (27)$$

其中, 式 (27) 表示班轮企业总收益最大化, 第一项和第二项分别为班轮企业在合同市场和现货市场的收益最大化。

## 2.4 机会约束条件转换

约束条件 (4) 属于机会约束, 为解决这一问题, 本文需对合同市场中托运人的需求分布作出特定假

设. 现有研究大多假设托运人需求服从正态分布, 但基于该分布生成样本时, 可能出现需求为负的结果. 而实际场景中托运人需求不可能为负, 因此现有研究的这一假设存在明显不合理之处. 因此, 本文假设合同市场上托运人的需求服从对数正态分布, 且不同港口对之间的需求相互独立, 以避免需求为负数<sup>[22]</sup>. 基于上述假设, 机会约束可等价转化为确定性约束 (28). 本文采用 Python 软件, 利用 Gurobi 求解器进行求解.

$$x_{ij}^{C,n} \leq Z_{1-\alpha} = \sup\{Z|Z = \Phi_{ij}^{-1}(1-\alpha)\} \quad \forall i, j \in P, \forall n \in N. \quad (28)$$

### 3 算例分析与敏感性分析

#### 3.1 数值介绍

以班轮企业中远海运 ZAX2 航线为例进行算例分析. ZAX2 航线如图 1 和图 2 所示, 经过的港口如下: 高雄 (171) 厦门 (287) 香港 (38) 南沙 (30) 蛇口 (1470) 新加坡 (211) 巴生西 (4200) 德班 (832) 开普敦 (6500) 巴生西 (211) 新加坡 (1338) 钦州 (448) 香港 (342) 高雄. 根据查询到的数据得到港口对之间距离, 两相邻港口之间的数字即为两港口之间的距离 (单位为海里). 为简化表示, 本文将航线定义为 1-(171)-2-(287)-3-(38)-4-(30)-5-(1470)-7-(211)-8-(4200)-9-(832)-10-(6500)-8-(211)-7-(1338)-6-(448)-3-(342)-1.



图1 ZXA2 航线

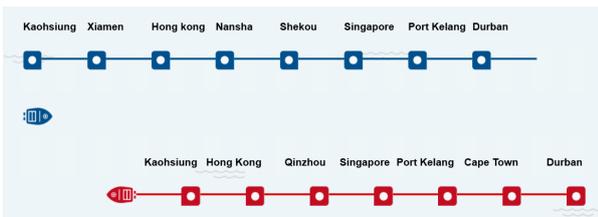


图2 ZXA2 航线往返港口

班轮企业部署数艘 14000 TEU 的船舶在该航线上开展多航程双向往返运输, 两个港口形成一个港口对, 每个港口对均有可能产生托运人运输需求, 且需求相互独立. 班轮企业的船舶固定成本为 9000

USD<sup>[2]</sup>, 现货市场线上和线下销售渠道的运营成本分别为 140 USD/TEU 和 120 USD/TEU<sup>[26]</sup>, 重箱单位运输成本与距离相关, 为 0.1 USD/TEU/海里<sup>[17]</sup>, 合同市场的运营成本为 80 USD/TEU, 现货市场在线下销售渠道支付货运代理人的佣金率为 10%<sup>[24]</sup>. 现货市场各类托运人的基本需求和运价敏感系数<sup>[27]</sup> 如表 2 所示.

表2 托运人需求及运价敏感系数设置

托运人类型	基础需求	运价敏感系数
(A, S1)	$a_{ij}^{A,S1,n} \sim rand(300, 600)$	$b_{ij}^{A,S1,n} \sim rand(0.3, 0.5)$
(A, S2)	$a_{ij}^{A,S2,n} \sim rand(200, 500)$	$b_{ij}^{A,S2,n} \sim rand(0.1, 0.3)$
(O, S1)	$a_{ij}^{O,S1,n} \sim rand(300, 600)$	$b_{ij}^{O,S1,n} \sim rand(0.3, 0.5)$
(O, S2)	$a_{ij}^{O,S2,n} \sim rand(200, 500)$	$b_{ij}^{O,S2,n} \sim rand(0.1, 0.3)$

由于模式 1 不考虑空箱短缺的情况, 其满足托运人所需的空箱通过租赁获得, 本文设置空箱租赁成本为合同市场托运人运价的一半<sup>[13]</sup>. 因此在计算班轮企业期望最优总收益时, 结果已经扣除租赁集装箱成本<sup>[2]</sup>. 在模式 2 下, 空箱调运的收益取合同市场运费的一半<sup>[13]</sup>, 空箱调运运输成本与距离相关, 设置为 0.03 USD/TEU/海里<sup>[17]</sup>, 空箱需求量服从正态分布  $N(500, 2^2)$ <sup>[2]</sup>.

#### 3.2 算例分析

将以上数据代入到模型求解. 设置航程  $N = 5$ , 现货市场托运人的履约率为  $\rho = 0.87$ <sup>[2]</sup>, 合同市场托运人的置信水平为  $\alpha = 0.05$ , 空箱存储成本为 70 USD/TEU<sup>[17]</sup>, 根据班轮企业提供的数据, 对于通过线上和线下销售渠道订舱的托运人, 其单位舱位超售补偿成本分别设置为 400 USD/TEU 和 200 USD/TEU. 两种模式的结果对比如表 3 所示.

表3 模式结果对比

	模式1	模式2
期望最优总收益(USD)	17132700	22641610
期望运输总舱位数(TEU)	38165	36809
期望总超售舱位(TEU)	3218	4212
空箱调运量(TEU)		17305

由表 3 可知, 在模式 2 下, 班轮企业期望运输总舱位数为 36809 TEU, 比在模式 1 下减少了 3.5%. 此外, 在模式 2 下, 班轮企业期望总超售舱位数为 4212 TEU, 比在模式 1 下增加了 30.8%. 班轮企业在模式 2 下比在模式 1 下运输更少的舱位数并超售更多的舱位数, 这是因为模式 2 考虑空箱调运, 占用了部分船舶运力, 减少了可用于承运货物的舱位. 但是, 班轮企业在模式 2 的期望总收益为 22641610 USD, 比模式 1 的期望总收益提高了约 32%, 这是因为班轮

企业在模式2下无需承担高额的空箱租赁成本,并可以通过空箱调运获取收益.从长远来看,考虑空箱调运给班轮企业带来更长期高效的收益.模式1和模式2下运价敏感型托运人和运价不敏感型托运人

的舱位运价如图3和图4所示,结果显示班轮企业在两种模式下均为运价敏感型的托运人设定了较低运价以刺激需求,而针对运价不敏感型的托运人则设定较高运价以最大化收益.

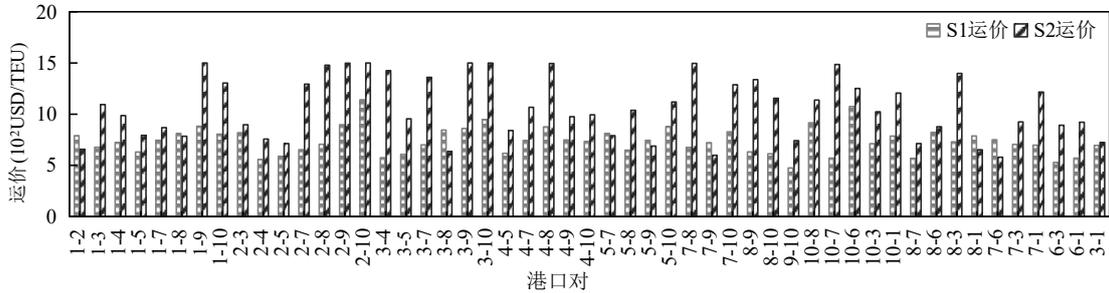


图3 班轮企业在模式1下的舱位运价

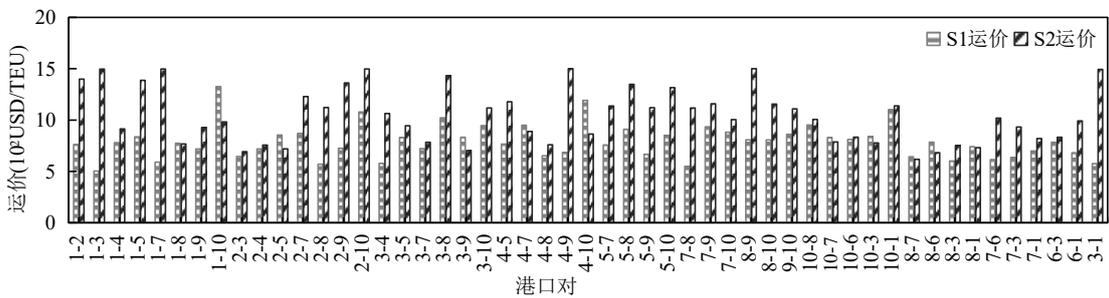


图4 班轮企业在模式2下的舱位运价

### 3.3 敏感性分析

#### 3.3.1 现货市场托运人履约率

分析现货市场托运人履约率 $\rho$ 对班轮企业超售舱位数、运输总舱位数以及期望总收益的影响, $\rho = (0.70, 0.75, 0.80, 0.85, 0.87, 0.89, 0.90, 0.91, 0.93, 0.95)$ 结果如图5所示.

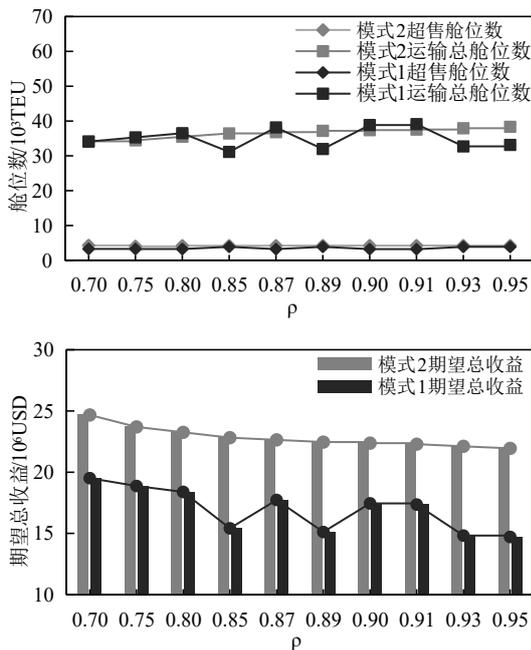


图5 现货市场托运人履约率敏感性分析

由图5(a)和5(b)可见,在模式1下,当 $0.70 < \rho \leq 0.80$ 和 $0.90 < \rho \leq 0.91$ 时,随着 $\rho$ 的增加,班轮企业超售舱位数减少和运输总舱位数增加,超售成本的增加更大程度降低了期望总收益.当 $0.80 < \rho \leq 0.85$ , $0.87 < \rho \leq 0.89$ 及 $0.91 < \rho \leq 0.93$ 时,随着 $\rho$ 的增加,班轮企业超售舱位数增加以及运输总舱位数减少,增加的超售补偿成本和减少的舱位收益使班轮企业期望总收益降低.当 $0.85 < \rho \leq 0.87$ 和 $0.89 < \rho \leq 0.90$ 时,随着 $\rho$ 的增加,班轮企业超售舱位数减少以及运输总舱位数增加,增加的运输舱位数使其期望总收益增加.当 $0.93 < \rho \leq 0.95$ 时,随着 $\rho$ 的增加,班轮企业超售舱位数减少以及运输总舱位数增加.尽管班轮企业通过增加运输总舱位数增加了收益,但其增加的运营和运输成本降低了期望总收益.

另外,在模式2下,当 $0.70 < \rho \leq 0.93$ 时,随着 $\rho$ 的增加,班轮企业超售舱位数和总运输舱位数均增加. $\rho$ 的增加使现货市场托运人履约需求增加,超售补偿成本处于可控范围.然而,过多的履约需求会导致舱位数受限以及班轮企业无法通过运输更多空箱获取空箱调运收益,超售补偿成本的增加也不容忽视,因此班轮企业期望总收益降低.当 $0.93 < \rho \leq 0.95$ 时,随着 $\rho$ 的增加,班轮企业超售舱

位数减少和运输总舱位数增加, 班轮企业通过减少舱位超售数, 同时几乎承接托运人的全部需求, 运营和运输成本的增加降低了期望总收益。

总之, 在两种模式下, 随着托运人履约率的增加, 增加的运输舱位数会提高运营和运输成本, 班轮企业期望总收益也降低。另外, 在模式 2 下, 空箱调运机制可缓冲托运人履约率波动对班轮企业收益的冲击, 其收益波动幅度相对更小。

### 3.3.2 合同市场托运人置信水平

分析合同市场托运人置信水平  $(1 - \alpha)$  对运输总舱位数、合同市场托运人分配舱位数以及期望总收益的影响, 选取  $\alpha = (0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05, 0.10, 0.15, 0.20)^{[22]}$ , 结果如图 6 所示。

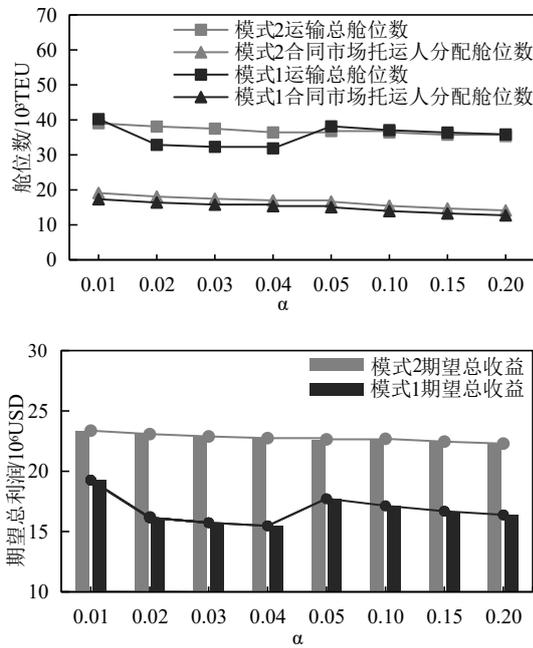


图6 合同市场托运人置信水平敏感性分析

由图 6(a) 和 6(b) 可见, 在模式 1 下, 当  $0.01 < \alpha \leq 0.04$  时, 随着  $\alpha$  的增加, 运输总舱位数减少, 原因在于班轮企业分配到合同市场的舱位数减少, 分配到现货市场的舱位数增加, 而班轮企业未能将这部分增加的舱位分配到现货市场, 因此期望总收益降低。当  $0.04 < \alpha \leq 0.05$  时, 随着  $\alpha$  的增加, 运输总舱位数增加, 班轮企业通过减少超售舱位数, 将合同市场的剩余舱位数分配至现货市场, 期望总收益增加。当  $0.02 < \alpha \leq 0.04$  和  $0.05 < \alpha \leq 0.2$  时,  $\alpha$  的增加意味着合同市场托运人的履约风险上升, 班轮企业为规避机会损失, 运输总舱位数和向合同市场分配的舱位数均减少, 因此期望总收益也不断降低。另外, 在模式 2 下, 随着  $\alpha$  的增加, 班轮企业分配到合同市场的舱位数不断减少, 这是因为班轮企业为避免损失, 减少向合同市场分配舱位数。同时, 班轮企业运

输总舱位数减少, 超售舱位数趋于稳定, 合同市场收益的降低使班轮企业期望总收益不断降低。

在两种模式下, 随着置信水平  $(1 - \alpha)$  的降低, 班轮企业期望总收益不断降低, 因为较低的置信水平会导致班轮企业承担更多的机会损失, 因此, 根据历史数据估计一个较高的置信水平可以有效提高班轮企业期望总收益。

### 3.3.3 现货市场托运人需求随机波动

分析现货市场托运人需求随机波动系数  $\varepsilon$  对运输总舱位数、现货市场分配舱位数以及期望总收益的影响, 随机波动系数  $\varepsilon$  服从均匀分布  $U[-h, h]$ , 选取  $h = (10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100)^{[8]}$ , 结果如图 7 所示。

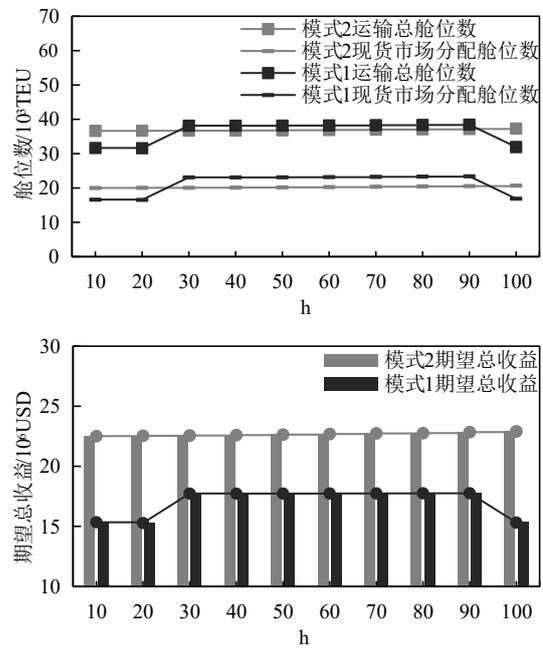


图7 现货市场托运人需求随机波动敏感性分析

由图 7(a) 和 7(b) 可见, 在模式 1 下, 当  $10 < h \leq 20$  时, 随着  $h$  的增加, 班轮企业向现货市场分配的舱位数减少, 此时需求波动较小, 班轮企业期望总收益也略有降低。当  $20 < h \leq 90$  时, 随着  $h$  的增加, 需求波动加剧, 班轮企业向现货市场分配的舱位数增加, 其期望总收益也持续增加。当  $90 < h \leq 100$  时, 随着  $h$  的增加, 需求波动性上升带来的风险加剧, 班轮企业通过减少在现货市场分配的舱位数以规避风险, 其期望总收益也大幅下降。另外, 在模式 2 下, 随着  $h$  的增加, 班轮企业向现货市场分配的舱位数不断增加, 其期望总收益也不断增加。班轮企业在模式 2 下通过空箱调运来面对需求波动加剧带来的风险挑战, 从而获取更高的期望总收益。

### 3.3.4 单位舱位超售补偿成本

分析班轮企业在线上 and 线下销售渠道的单位舱

位超售补偿成本 $\beta_1$ 和 $\beta_2$ 对班轮企业超售舱位数、现货市场分配舱位数以及期望总收益的影响. 根据班轮企业官网的数据, 其单位舱位超售补偿成本为0~450 USD/TEU. 首先, 设置 $\beta_1=250$  USD/TEU,  $\beta_2$ 在0~200 USD/TEU 选取六组数据, 结果如图8(a)和8(b)所示. 随后, 设置 $\beta_2=200$  USD/TEU,  $\beta_1$ 在250~450 USD/TEU 选取六组数据, 结果如图8(c)和8(d)所示.

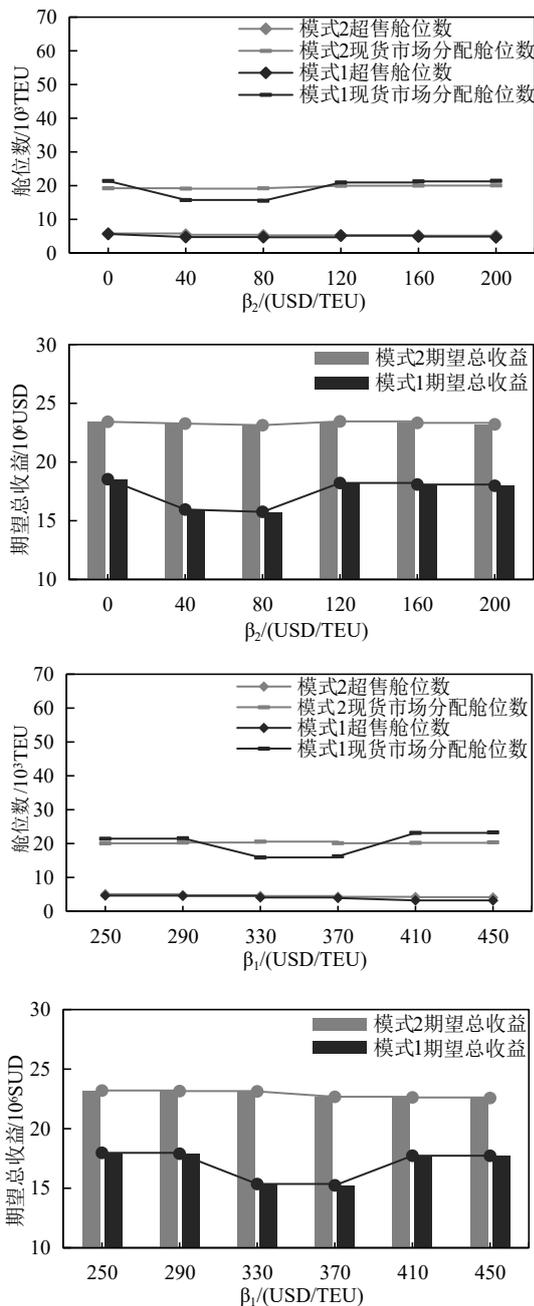


图8 两种渠道下单位舱位超售补偿成本敏感性分析

由图8(a)和8(b)可见, 在模式1下, 当 $0 < \beta_2 \leq 40$ 时, 随着 $\beta_2$ 的增加, 超售舱位数和现货市场分配舱位数减少.  $\beta_2$ 的增加意味着线下销售渠道单位超售补偿成本上升, 班轮企业通过减少超售舱位数和现货市场的舱位投入来规避超售补偿成本. 但是运输

总舱位的减少导致舱位收入降低, 因此班轮企业期望总收益降低. 当 $40 < \beta_2 \leq 80$ 时, 随着 $\beta_2$ 的增加, 超售舱位数和现货市场分配舱位数均减少, 减少的运输舱位数降低了班轮企业期望总收益. 当 $80 < \beta_2 \leq 120$ 时, 随着 $\beta_2$ 的增加, 超售舱位数和现货市场分配的舱位数增加, 现货市场增加的舱位收益增加了班轮企业期望总收益. 当 $120 < \beta_2 \leq 200$ 时, 随着 $\beta_2$ 的增加, 超售舱位数减少, 现货市场分配舱位数增加. 班轮企业通过超售舱位获取的边际收益降低, 现货市场舱位分配数的增加带来了更高收益以及更高的运营和运输成本, 因此班轮企业期望总收益减少. 另外, 在模式2下, 当 $0 < \beta_2 \leq 80$ ,  $120 < \beta_2 \leq 200$ 时, 随着 $\beta_2$ 的增加, 超售舱位数和现货市场分配的舱位数减少, 过高的超售补偿成本使得班轮企业通过减少向现货市场分配舱位数来规避风险, 班轮企业期望总收益降低. 当 $80 < \beta_2 \leq 120$ 时, 随着 $\beta_2$ 的增加, 超售舱位数和现货市场分配舱位数增加, 较高的现货市场舱位收益引起班轮企业期望总收益的增加. 与常规认知不同的是, 在考虑空箱调运的模式下, 随着 $\beta_2$ 的增加, 班轮企业的期望总收益先降低后增加再降低, 且在 $\beta_2 = 120$ 时, 期望总收益最高.

由图8(c)和8(d)可见, 在模式1下, 当 $250 < \beta_1 \leq 290$ ,  $330 < \beta_1 \leq 370$ 以及 $410 < \beta_1 \leq 450$ 时, 随着 $\beta_1$ 的增加, 超售舱位数减少, 现货市场分配舱位数增加, 因为 $\beta_1$ 的增加意味着更高的线上渠道单位超售补偿成本, 班轮企业通过减少超售舱位数并增加在现货市场分配的舱位数, 由此带来的收益抵消了超售舱位数减少带来的损失, 因此班轮企业期望总收益增加. 当 $290 < \beta_1 \leq 330$ 时, 随着 $\beta_1$ 的增加, 班轮企业超售舱位数和现货市场分配舱位数均减少, 成本的下降也导致班轮企业期望总收益降低. 当 $370 < \beta_1 \leq 410$ 时, 随着 $\beta_1$ 的增加, 超售舱位数减少, 现货市场分配舱位数增加, 班轮企业通过增加向现货市场分配的舱位数, 持续缩减超售舱位数来控制成本, 因此期望总收益增加. 另外, 在模式2下, 随着 $\beta_1$ 的增加, 超售舱位数持续减少, 现货市场分配舱位数持续增加, 但也给班轮企业带来更高的运营和运输成本, 因此期望总收益持续降低.

随着线上和线下销售渠道下单位超售补偿成本的增加, 在模式2下, 班轮企业期望总收益波动较小, 其更倾向于在线上销售渠道设置较低水平的单位超售补偿成本 (如 $\beta_1 = 250$ ), 在线下销售渠道设置中等水平的单位超售补偿成本 (如 $\beta_2 = 120$ ). 在模式

1 下, 班轮企业期望总收益波动明显, 其更倾向于在线下销售渠道不设置单位超售补偿成本, 在线上销售渠道设置较低水平的单位超售补偿成本 (如  $\beta_1 = 250$ ).

#### 4 结论

本文根据班轮企业是否考虑空箱调运, 研究考虑托运人对运价敏感性的线上和线下双渠道集装箱舱位分配和舱位定价问题. 以中远海运的一条航线为例进行算例分析, 得到结果如下:

1) 在本研究的算例背景下, 班轮企业考虑空箱调运可以显著提升其获利能力, 该模式下的期望总收益要比不考虑空箱调运的模式提升约 32%.

2) 现货市场托运人履约率的上升会通过增加运营成本 and 运输成本, 降低班轮企业期望总收益. 此外, 班轮企业应致力于提高合同市场托运人置信水平以增加期望收益. 相比于不考虑空箱调运的模式, 班轮企业在考虑空箱调运的模式中对这两类因素的变动表现出更强的收益稳定性.

3) 当发生政策变动、地缘冲突等引发市场需求剧烈波动时, 考虑空箱调运的班轮企业, 其期望总收益与收益稳定性均能得到显著提升.

4) 单位超售补偿成本的增加不一定会导致班轮企业收益下降. 在不考虑空箱调运的模式中, 当线上和线下两种销售渠道下的单位超售补偿成本处于中等水平时, 班轮企业倾向于提高该成本以增加收益. 此外, 在线下销售渠道不提供超售补偿以及在线上销售渠道设置较低的单位超售补偿成本, 有助于班轮企业实现更高的期望总收益. 而在考虑空箱调运的模式中, 当线下销售渠道的单位超售补偿成本处于中等水平时, 班轮企业同样倾向于设定较高的单位超售补偿成本. 通过在线上销售渠道维持较低水平的单位超售补偿成本, 并在线下销售渠道采用中等水平的单位超售补偿成本, 班轮企业可获得更高的期望总收益.

然而, 本文仍存在一定的局限性, 如当前研究未考虑多航线、多船舶的协同运行. 此外, 本文未能充分考虑实际运营中托运人对运价敏感性的连续分布特征. 因此, 针对具有连续价格敏感性的托运人进行双渠道舱位分配和空箱调运协同优化, 也是后续需要研究的问题.

#### 参考文献 (References)

- [1] Wang Y D, Gu Y Y, Wang T S, et al. A risk-averse approach for joint contract selection and slot allocation in liner container shipping[J]. [Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review](#), 2022, 164: 102781.
- [2] 王文敏, 蔡佳芯, 王小寒, 等. 基于在线订舱与超订策略的集装箱班轮舱位分配与空箱调运协同优化[J]. [运筹与管理](#), 2024, 33(5): 16-21.  
(Wang W M, Cai J X, Wang X H, et al. Collaborative optimization on container liner slot allocation and empty container repositioning based on booking online and overbooking strategies[J]. [Operations Research and Management Science](#), 2024, 33(5): 16-21.)
- [3] Zhao H, Meng Q, Wang Y D. Exploratory data analysis for the cancellation of slot booking in intercontinental container liner shipping: A case study of Asia to US West Coast Service[J]. [Transportation Research Part C: Emerging Technologies](#), 2019, 106: 243-263.
- [4] Sun H Y, Lam J S L, Zeng Q C. The dual-channel sales strategy of liner slots considering shipping e-commerce platforms[J]. [Computers & Industrial Engineering](#), 2021, 159: 107516.
- [5] Wang T S, Xing Z, Hu H T, et al. Overbooking and delivery-delay-allowed strategies for container slot allocation[J]. [Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review](#), 2019, 122: 433-447.
- [6] 郑建风, 秦苑, 赵志昊. 考虑需求转移与风险规避的舱位分配[J]. [交通运输系统工程与信息](#), 2025, 25(1): 241-249.  
(Zheng J F, Qin Y, Zhao Z H. Slot allocation considering demand transfer and risk-averse[J]. [Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology](#), 2025, 25(1): 241-249.)
- [7] Wang Y D, Meng Q. Optimizing freight rate of spot market containers with uncertainties in shipping demand and available ship capacity[J]. [Transportation Research Part B: Methodological](#), 2021, 146: 314-332.
- [8] Song Z Z, Tang W S, Zhao R Q. Ocean carrier canvassing strategies with uncertain demand and limited capacity[J]. [Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review](#), 2017, 104: 189-210.
- [9] Hu J K, Huang Y F, Zhao X Y. Research on the slot allocation of container liner under E-commerce environment[J]. [Computers & Industrial Engineering](#), 2019, 129: 556-562.
- [10] Sun H Y, Zeng Q C, Lam J S L, et al. Sales strategy selection for liner companies under shipping e-commerce considering canvassing ability competition[J]. [European Journal of Operational Research](#), 2025, 320(1): 85-100.
- [11] Wannakrairot A, Phumchusri N. Two-dimensional air cargo overbooking models under stochastic booking request level, show-up rate and booking request density[J]. [Computers & Industrial Engineering](#), 2016, 100: 1-12.
- [12] Du C Y, He F, Lin X. Dynamic pricing for air cargo revenue management[J]. [Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review](#), 2025, 197: 104088.

- [13] Liang J P, Ma Z Y, Wang S, et al. Dynamic container slot allocation with empty container repositioning under stochastic demand[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2024, 187: 103603.
- [14] Wang Y H, Wu Y Y, Hao C Q, et al. Research on the scheduling in sea-rail intermodal trains based on full-length and full-occupied strategy[J]. *Research in Transportation Business & Management*, 2025, 59: 101301.
- [15] Du Y Y, Zhou W Y, Lian F. A scheme for passenger service-like backhaul for China railway express trains[J]. *Transport Policy*, 2022, 120: 56-68.
- [16] 蔡佳芯, 李宇博, 王小寒, 等. 基于 (D, U) 控制策略的港口群空箱存储与调运联合优化[J]. *控制与决策*, 2022, 37(11): 3012-3022.  
(Cai J X, Li Y B, Wang X H, et al. Inventory-repositioning integrated optimization of empty container in port group based on(D, U)control strategy[J]. *Control and Decision*, 2022, 37(11): 3012-3022.)
- [17] 王文敏, 刁瑾洁, 杨珍花, 等. 需求未知与差异化服务策略下舱位分配与空箱调运联合优化[J]. *控制与决策*, 2025, 40(12): 3734-3742.  
(Wang W M, Diao C J, Yang Z H, et al. Joint optimization of slot allocation and empty container allocation under indeterminate demand and diversity service strategy[J]. *Control and Decision*, 2025, 40(12): 3734-3742.)
- [18] Zheng X B, Kim Y S, Shin Y R. Cost effectiveness analysis in short sea shipping: Evidence from northeast Asian routes[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2021, 9(12): 1340.
- [19] 张浩男, 于浚, 徐娜, 等. 异质性时间偏好下制造商主导的闭环供应链决策[J]. *控制与决策*, 2025, 40(12): 3667-3677.  
(Zhang H N, Yu H, Xu N, et al. Decision making of manufacturer-dominated closed-loop supply chain under heterogeneous time preference[J]. *Control and Decision*, 2025, 40(12): 3667-3677.)
- [20] 赵道致, 冯慧中. 考虑产能需求方交期和价格敏感的产能分享平台定价策略[J]. *控制与决策*, 2024, 39(2): 625-632.  
(Zhao D Z, Feng H Z. Capacity sharing platform pricing strategy considering delivery time and price sensitivity of capacity demand side[J]. *Control and Decision*, 2024, 39(2): 625-632.)
- [21] Wang T S, Tian X C, Wang Y D. Container slot allocation and dynamic pricing of time-sensitive cargoes considering port congestion and uncertain demand[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2020, 144: 102149.
- [22] 汪挺松, 李曼. 时间敏感型货物两阶段集装箱舱位分配问题研究[J]. *运筹与管理*, 2018, 27(10): 1-10.  
(Wang T S, Li M. Two-phase container slot allocation for time-sensitive cargo[J]. *Operations Research and Management Science*, 2018, 27(10): 1-10.)
- [23] Wang S A, Meng Q, Lee C Y. Liner container assignment model with transit-time-sensitive container shipment demand and its applications[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2016, 90: 135-155.
- [24] Geng X J, Tan Y R, Wei L. How add-on pricing interacts with distribution contracts[J]. *Production and Operations Management*, 2018, 27(4): 605-623.
- [25] Nematollahi M, Hosseini-Motlagh S M, Pazari P. Analytical insights into coordination and competition in dual-channel supply chains: A multi-factor dependent demand perspective[J]. *Journal of Retailing and Consumer Services*, 2024, 78: 103706.
- [26] Yang Z L, Shang W L, Miao L, et al. Pricing decisions of online and offline dual-channel supply chains considering data resource mining[J]. *Omega*, 2024, 126: 103050.
- [27] Wang J J, Liu J G, Zhang X. Service purchasing and market-entry problems in a shipping supply chain[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2020, 136: 101895.

## 作者简介

孙赫迎 (1994-), 女, 讲师, 博士, 主要研究方向为港航运营管理, E-mail: [s\\_heyings@nefu.edu.cn](mailto:s_heyings@nefu.edu.cn);

高路逸 (2002-), 男, 硕士生, 主要研究方向为物流系统仿真与优化, E-mail: [2983761309@qq.com](mailto:2983761309@qq.com);

高远 (1993-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为交通信息工程及控制, E-mail: [gaoy@nefu.edu.cn](mailto:gaoy@nefu.edu.cn);

张文会 (1978-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为交通安全与环境, E-mail: [rayear@163.com](mailto:rayear@163.com).