文章编号: 1000-6788(2012)12-2684-08 中图分类号: U169.12; F550 文献标志码: A

集装箱班轮运输两阶段舱位分配与动态定价模型

杨华龙 [1], 刘 迪 [1,2], 王 霞 [1], 张 燕 [1]

(1. 大连海事大学 交通运输管理学院, 大连 116026; 2. 大连交通大学 交通运输工程学院, 大连 116028)

摘 要 为解决随机需求环境下集装箱班轮运输的舱位分配与动态定价问题, 依据班轮运输市场的合同客户和普通客户分类, 分两阶段分别建立了合同市场客户重箱运输与班轮公司空箱调运的舱位分配模型以及现货市场分时段动态定价模型, 并针对舱位分配模型的随机特征和动态定价模型统计量的误差特性, 分别设计机会约束和稳健优化算法求解, 算例验证了上述模型与算法的适用性和有效性.

关键词 班轮运输; 收益管理; 舱位分配; 动态定价

Slot allocation and dynamic pricing models by two stages for container liner shipping

YANG Hua-long[1], LIU Di[1,2], WANG Xia[1], ZHANG Yan[1]

(1. Transportation Management College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China;
2. Transportation Engineering College, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China)

Abstract In order to solve the problems of slot allocation and dynamic pricing of container liner shipping under the condition of random demand, this paper established respectively the slot allocation model for customer's loaded container shipping and liner's empty container allocation and transportation in contract market as well as the dynamic pricing model in spot market by two stages. The chance constrained programming and the robust optimization algorithm were designed respectively with regard to the random characteristics of the slot allocation model and the error feature of statistic in the dynamic pricing model. The results of a case study validate that the established models and their algorithms are feasible and effective.

Keywords liner shipping; revenue management; slot allocation; dynamic pricing

1 引言

近年来, 伴随着经济全球化的迅猛发展, 集装箱班轮运输呈现船舶大型化、航线网络化、经营联盟化等趋势, 使得集装箱班轮公司管理的难度不断加大. 集装箱班轮运输业具有运力相对固定且运输服务不可存储, 但可以预售; 固定成本高而边际成本低; 需求可以分类, 但波动性大, 市场竞争激烈等应用收益管理的一些典型特征 [1]. 如何运用收益管理理论, 在满足集装箱托运人货运需求的情况下, 提高集装箱班轮的运输效率和效益, 是关系到集装箱班轮公司未来生存和发展的重要决策问题.

收益管理起源于 20 世纪 70 年代美国的航空业, 经过近 40 多年的发展, 已经成为管理科学的一个重要分支, 并得到广泛应用 [2]. 目前, 基于收益管理的座/舱位分配及动态定价问题仍是航空、海运等交通运输应用领域研究的热点 [3−5]. 在海运集装箱运输方面, Lee 等 [6] 应用启发式算法解决海运货物运输业出现的延迟收益管理问题, 制定混合整数线性规划确定海运能力最优分配的阈值政策; Ting 和 Tzeng[7] 基于收益管理的思想, 提出了一种模糊多目标规划方法来求解班轮运输中集装箱货位的分配问题, 考虑了托运人的满意度和航运商收益的最大化两大目标; Ha[8] 利用泛太平洋西向航线的订货数据, 应用期望边际收益 (EMR) 和阈曲线 (threshold calve) 模型, 对集装箱班轮公司的舱位控制策略进行了较为深入的研究; Maragos[9] 分析了

收稿日期: 2012-02-09
资助项目: 国家自然科学基金 (70972008, 71202108); 大连市科技计划项目 (20120275); 中央高校基本科研业务资助; 大连海事大学优秀科技创新团队培养计划 (2011ZD027)
作者简介: 杨华龙 (1964–), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向: 国际集装箱运输, E-mail: hlyang@dlmu.edu.cn.

班轮货运的特点, 并对单航段和多航段集装箱舱位动态分配问题进行了研究; Lu 等 [10] 对近洋航线的班轮联营企业的舱位租赁及其分配问题做了实证研究, 并以数学规划模型来求解舱位的租赁和分配的优化模型; 陈春益和李启安 [11] 集中考虑了集装箱货运收益管理中的舱位分配问题, 考虑了重箱和空箱的排程, 将该问题作为一个多种商品网络流量问题来考虑, 并采用台湾一个实际航运商的数据对模型进行了实例研究; 卜祥智等 [12] 基于收益管理的思想对海运集装箱的舱位分配问题进行了研究, 建立了考虑多产品和空箱调运的海运集装箱多航段能力分配模型, 并基于需求的不确定性考虑, 应用了稳健优化的方法对该模型进行求解.

综上, 现有文献研究主要集中在集装箱班轮空间上的运力或舱位分配方面, 考虑的仅是在既定的港口间班轮运价条件下的收益管理问题, 尚未充分考虑集装箱班轮运输合同市场和现货市场的差异化定价以及现货市场时间上 (分时段) 的动态定价问题. 本文以集装箱班轮运输合同市场的舱位分配与现货市场的定价策略为切入点, 建立基于收益管理的集装箱班轮运输分阶段舱位分配与动态定价模型, 以期丰富和完善集装箱班轮运输收益管理理论和实践, 为集装箱班轮公司运营管理提供科学的决策工具.

2 问题描述

集装箱班轮运输是指集装箱班轮公司根据航线集装箱运输需求情况, 通过船型论证和航线配船决策, 选配特定的集装箱船, 在特定的航线上、按照特定的船期和特定的挂靠港顺序进行有规则的集装箱货物运输 [13]. 显然, 集装箱班轮运输具有 "定船、定线、定期和定港" 等特征, 为了维持航班的长期正常运营, 班轮公司一般都要拥有长期的合同客户, 如一些大的货主、货运代理公司、无船承运人和一些大的贸易团体, 这些长期合同客户通常占集装箱货运需求的很大比例, 目前海运市场大约有 80%左右的运力是通过合同的形式出售给这些大客户, 余下的客户可看作为现货市场中的普通客户.

由此可见, 依据合同客户和普通客户的分类, 班轮公司与货主 (或托运人) 签署集装箱运输合同 (提单) 可分为两个阶段: 第一阶段是班轮公司提前将部分舱位以事先议定的合同运费率预售给合同客户; 第二阶段是班轮公司根据对现货市场需求的预测, 给出公开报价, 并接受普通客户的订舱.

在第一阶段中, 长期客户的集装箱运价是确定的, 各段班轮航线的空箱调运单位成本也是确定的, 因此班轮公司需要决策的就是确定分配给长期客户和空箱的各段航线的舱位数量, 使公司收益最大. 由于集装箱班轮的运力 (即总舱位数) 是相对固定的, 因此, 在第二阶段中, 班轮公司需要决策的就是如何将第一阶段舱位分配后的剩余舱位进行再次分配, 班轮公司可以根据对现货市场的集装箱货运需求预测, 将揽货期分为几个时段, 分别确定每个时段的集装箱运价和舱位分配数量, 以使公司总收益最大. 第一阶段的舱位分配结果会影响到第二阶段的总舱位分配量, 也会影响各时段的集装箱运价和舱位分配数量.

3 模型构建

3.1 基本模型

假定某班轮公司经营一条有 p 个港口的多港挂靠集装箱班轮航线, $\Omega=\{(i\rightarrow j)\}$ 为港口对或航段的集合, $i,j=1,2,\cdots,p$, 其中 i 表示装箱港, j 表示卸箱港, 当 $i<j$ 时 $(i\rightarrow j)$ 表示去程航段, 当 $i>j$ 时, $(i\rightarrow j)$ 表示回程航段. 若不区分合同市场和现货市场, 仅讨论集装箱班轮运输的舱位分配问题, 则可以建立以下航线收益最大化基本模型 (M1):

目标函数: $\max z=\sum\limits_{(i\rightarrow j)\in\Omega}(r_{ij}x_{ij}-c_{ij}y_{ij})$

约束条件:

$$\sum_{(i\rightarrow j)\in\Omega,i<j}(x_{ij}+y_{ij})+\sum_{(k\rightarrow j)\in\Omega,k<i<j}(x_{kj}+y_{kj})\leq Q,\ \forall i=1,2,\cdots,p-1 \quad ①$$

$$\sum_{(i\rightarrow j)\in\Omega,i>j}(x_{ij}+y_{ij})+\sum_{(k\rightarrow j)\in\Omega,k>i>j}(x_{kj}+y_{kj})\leq Q,\forall\, i=2,\cdots,p \quad ②$$

$$\underline{D}_{ij}\leq x_{ij}\leq\overline{D}_{ij} \quad ③$$

$$\sum_{(i\rightarrow j)\in\Omega}y_{ij}\geq E_j,\ \forall j=1,2,\cdots,p \quad ④$$

$$y_{jk}=0,\text{当 } E_j>0 \text{ 时},\ \forall j,k=1,2,\cdots,p,\ k\neq j \quad ⑤$$

$$x_{ij}, y_{ij} \in N \cup \{0\} \qquad ⑥$$

其中: x_{ij} 为决策变量, 表示航段 $(i \rightarrow j)$ 的集装箱运输量; y_{ij} 为决策变量, 表示航段 $(i \rightarrow j)$ 的空箱运输量; r_{ij} 表示航段 $(i \rightarrow j)$ 的集装箱单位运费率; c_{ij} 表示航段 $(i \rightarrow j)$ 的空箱单位运费率; Q 表示航线集装箱总舱位数; $\overline{D}_{ij}$ 表示航段 $(i \rightarrow j)$ 的运量的上限值; $\underline{D}_{ij}$ 表示航段 $(i \rightarrow j)$ 的运量的下限值; E_j 表示港口 j 的空箱需求量.

约束条件 ① 表示在港口 $i(i=1,2,\cdots,p-1)$ 去程航段上集装箱运输量和空箱运输量之和不能大于该航线集装箱总舱位数, 约束条件 ② 表示在港口 $i(i=2,\cdots,p)$ 回程航段上集装箱运输量和空箱运输量之和不能大于该航线集装箱总舱位数, 约束条件 ③ 表示各航段集装箱运量不能小于某一下限值, 也不能超过某一上限值 (可由以前运量数据统计估计获得), 约束条件 ④ 表示从各港口运到港口 j 的空箱数量要不小于港口 j 对空箱的需求量, 约束条件 ⑤ 表示需要空箱的港口不能往其它港口调运空箱, 约束条件 ⑥ 为决策变量的整数约束.

3.2 舱位分配模型

若分阶段讨论集装箱班轮运输舱位分配和动态定价问题, 那么, 第一阶段的目标就是分配合同客户和空箱合适的舱位数量, 以使班轮公司收益最大化, 即有模型 (M2):

目标函数: $\max z = \sum\limits_{(i\rightarrow j)\in \Omega} (r_{ij}^a x_{ij}^a - c_{ij} y_{ij})$

约束条件:

$$\sum_{(i\rightarrow j)\in\Omega, i<j} (x_{ij}^a + y_{ij}) + \sum_{(k\rightarrow j)\in\Omega, k<i<j} (x_{kj}^a + y_{kj}) \le Q,\ \forall i=1,2,\cdots,p-1 \qquad ①$$

$$\sum_{(i\rightarrow j)\in\Omega, i>j} (x_{ij}^a + y_{ij}) + \sum_{(k\rightarrow j)\in\Omega, k>i>j} (x_{kj}^a + y_{kj}) \le Q,\ \forall i=2,3,\cdots,p \qquad ②$$

$$x_{ij}^a \le D_{ij}^a \qquad ③$$

$$\sum_{i:(i\rightarrow j)\in\Omega} y_{ij} \ge E_j, \forall\, j=1,2,\cdots,p \qquad ④$$

$$y_{jk}=0, \text{当 } E_j>0 \text{ 时},\ \forall j,k=1,2,\cdots,p,\ k\ne j \qquad ⑤$$

$$x_{ij}^a, y_{ij} \in N \cup \{0\} \qquad ⑥$$

其中, x_{ij}^a 为决策变量, 表示航段 $(i \rightarrow j)$ 的长期合同运力需求的舱位数量; D_{ij}^a 表示航段 $(i \rightarrow j)$ 的长期合同集装箱货物的舱位随机需求量; r_{ij}^a 表示航段 $(i \rightarrow j)$ 的长期合同集装箱的运费率 (\$/TEU); 约束条件 ① 表示在港口 $i(i=1,2,\cdots,p-1)$ 去程航段上分配的长期合同运力需求的舱位数量和空箱运输量之和不能大于该航线集装箱总舱位数; 约束条件 ② 表示在港口 $i(i=2,\cdots,p)$ 回程航段上分配的长期合同运力需求的舱位数量和空箱运输量之和不能大于该航线集装箱总舱位数; 约束条件 ③ 为航段 $(i \rightarrow j)$ 上分配的长期合同运力需求的舱位数量不能大于该航段长期合同集装箱的舱位需求量; 约束条件 ④ 表示从各港口运到港口 j 的空箱数量要大于港口 j 对空箱的需求量; 约束条件 ⑤ 表示需要空箱的港口不能往其它港口调运空箱; 约束条件 ⑥ 为决策变量的整数约束.

3.3 动态定价模型

对于现货市场而言, 其需求随着价格变化而变化. 假定集装箱班轮公司现货市场的揽货期为 T. 按周 (或天将 T 划分为 t 个时段.

令 r_{ijt}^b 表示航段 $(i \rightarrow j)$ 的现货市场集装箱货物在第 t 时段的价格, r_{ijt}^b 为决策变量; x_{ijt}^b 表示航段 $(i \rightarrow j)$ 的现货市场集装箱货物在第 t 时段的舱位需求量; 且 x_{ijt}^b 为价格 r_{ijt}^b 的函数, $x_{ijt}^b = x_{ijt}^b(r_{ijt}^b)$. 其中需求函数 $x_{ijt}^b(r_{ijt}^b)$ 的形式是已知的, 这里假定为简单的线性函数, 即

$$x_{ijt}^b = \alpha_{ijt} - \beta_{ijt} \cdot r_{ijt}^b, \quad t=1,2,\cdots,T \qquad (1)$$

其中, 系数 $\alpha_{ijt}, \beta_{ijt}$ 需要用统计方法估计出来.

则第二阶段的动态定价模型 (M3) 为:

目标函数: $\max z = \sum\limits_{t=1}^{T} \sum\limits_{(i\rightarrow j)\in\Omega} r_{ijt}^b x_{ijt}^b = \sum\limits_{t=1}^{T} \sum\limits_{(i\rightarrow j)\in\Omega} r_{ijt}^b (\alpha_{ijt} - \beta_{ijt} r_{ijt}^b)$

约束条件:

$$\sum_{(i\to j)\in\Omega,i<j}\left(\sum_{t=1}^{T}(\alpha_{ijt}-\beta_{ijt}r_{ijt}^{b})+x_{ij}^{a^*}+y_{ij}^{*}\right)+\sum_{(k\to j)\in\Omega,k<i<j}\left(\sum_{t=1}^{T}(\alpha_{kjt}-\beta_{kjt}r_{kjt}^{b})+x_{kj}^{a^*}+y_{kj}^{*}\right)\le Q \quad ①$$

$$\sum_{(i\to j)\in\Omega,i>j}\left(\sum_{t=1}^{T}(\alpha_{ijt}-\beta_{ijt}r_{ijt}^{b})+x_{ij}^{a^*}+y_{ij}^{*}\right)+\sum_{(k\to j)\in\Omega,k>i>j}\left(\sum_{t=1}^{T}(\alpha_{kjt}-\beta_{kjt}r_{kjt}^{b})+x_{kj}^{a^*}+y_{kj}^{*}\right)\le Q \quad ②$$

$$0<r_{ij}^{a}\le r_{ijt}^{b}\le R_{ij} \quad ③$$

其中, R_{ij} 表示航段 $(i\to j)$ 的一个价格上限, $x_{ij}^{a^*}$、y_{ij}^{*} 为第一阶段舱位分配模型 (M2) 的最优解.

在模型 (M3) 中, 约束条件 ① 表示在港口 $i(i=1,2,\cdots,p-1)$ 去程航段上分配的现货市场集装箱货物的舱位需求量、长期合同运力需求的舱位数量和空箱运输量之和不能大于该航线集装箱总舱位数; 约束条件 ② 表示在港口 $i(i=2,\cdots,p)$ 回程航段上分配的现货市场集装箱货物的舱位需求量、长期合同运力需求的舱位数量和空箱运输量之和不能大于该航线集装箱总舱位数; 约束条件 ③ 表示现货市场集装箱运价不小于合同市场的集装箱运价, 同时不大于一个价格上限 R_{ij}.

4 模型求解

4.1 舱位分配模型求解

由于随机需求变量 D_{ij}^{a} 的存在, 模型 (M2) 为一个随机整数规划模型. 本文借助机会约束规划方法 [14], 考虑到所作决策在不利情况发生时可能不满足约束条件, 故采用以下原则, 即允许所作决策在一定程度上不满足约束条件, 但该决策应使约束条件成立的概率不小于某一置信水平. 求解机会约束规划的一般方法是根据事先给定的置信水平, 把机会约束规划转化为各自的确定等价类, 然后用传统方法求解其等价的确定性规划模型.

模型的求解步骤如下:

1) 确定置信水平为 u_{ij}, 将模型 (M2) 中的约束条件 ③ 转化为机会约束, 即

$$P(x_{ij}^{a}\le D_{ij}^{a})\ge u_{ij} \quad (2)$$

2) 寻找机会约束的确定性等价类. 假设的分布函数为 $\Theta(\cdot)$, 则可得 (2) 式的等价类为

$$x_{ij}^{a}\le K_{u_{ij}}=\sup\{K\mid K=\Theta^{-1}\big(1-u_{ij}\big)\} \quad (3)$$

其中 $\Theta^{-1}(\cdot)$ 为函数 $\Theta(\cdot)$ 的逆函数. 当式 (3) 的解不唯一时, 选择其中最大的一个.

3) 将模型 (M2) 转化为如下的线性模型 (M4):

目标函数: $\max z=\sum\limits_{(i\to j)\in\Omega}(r_{ij}^{a}x_{ij}^{a}-c_{ij}y_{ij})$

约束条件:

$$\sum_{(i\to j)\in\Omega,i<j}(x_{ij}^{a}+y_{ij})+\sum_{(k\to j)\in\Omega,k<i<j}(x_{kj}^{a}+y_{kj})\le Q,\ \forall i=1,2,\cdots,p-1 \quad ①$$

$$\sum_{(i\to j)\in\Omega,i>j}(x_{ij}^{a}+y_{ij})+\sum_{(k\to j)\in\Omega,k>i>j}(x_{kj}^{a}+y_{kj})\le Q,\ \forall i=2,\cdots,p \quad ②$$

$$x_{ij}^{a}\le\sup\{K\mid K=\Theta^{-1}\big(1-u_{ij}\big)\} \quad ③$$

$$\sum_{i:(i\to j)\in\Omega}y_{ij}\ge E_j,\ \forall j=1,2,\cdots,p \quad ④$$

$$y_{jk}=0, \text{当 } E_j>0 \text{ 时},\ \forall j,k=1,2,\cdots,p,\ k\ne j \quad ⑤$$

$$x_{ij}^{a},y_{ij}\in N\cup\{0\} \quad ⑥$$

求解模型 (M4), 即可求得第一阶段的最优舱位分配结果 $x_{ij}^{a^*}$ 和 y_{ij}^{*}.

4.2 动态定价模型求解

在现货市场模型 (M3) 中, 实际需求量是随机波动的, 其最优解对需求函数 $x_{ijt}^{b}(r_{ijt}^{b})$ 的系数依赖性很强. 如果式 (1) 中系数 α_{ijt} 和 β_{ijt} 的估计不准确, 那么最优解可能不满足舱位限制的约束条件, 从而不满足获得最大收益的目的. 实际上, 为了得到稳健最优解 (robust optimization), 不必要求所有情况下的约束条件都必

须满足, 可以在某个缩小的系数变化范围内求得最优解, 它依然能满足适应系数变化的稳定要求, 却不至于过多地损失目标函数值. 为此, 我们采用冉伦等提出的稳健模型方法 [15], 以适应需求的这种不确定性.

令 $\tilde{\alpha}_{ijt} \in [\alpha_{ijt} - \hat{\alpha}_{ijt}, \alpha_{ijt} + \hat{\alpha}_{ijt}]$, $\tilde{\beta}_{ijt} \in [\beta_{ijt} - \hat{\beta}_{ijt}, \beta_{ijt} + \hat{\beta}_{ijt}]$, 其中: $\tilde{\alpha}_{ijt}, \tilde{\beta}_{ijt}$ 表示需求函数系数 α_{ijt}, β_{ijt} 的实际值, $\hat{\alpha}_{ijt} > 0$, $\hat{\beta}_{ijt} > 0$ 表示系数 $\tilde{\alpha}_{ijt}$, $\tilde{\beta}_{ijt}$ 的变化幅度. 假设 δ_{ijt} 和 ε_{ijt} 是闭区间 $[-1, 1]$ 上取值的变量, δ_{ijt} 表示实际值 $\tilde{\alpha}_{ijt}$ 与估计值 α_{ijt} 之间的偏差程度, ε_{ijt} 表示实际值 $\tilde{\beta}_{ijt}$ 与估计值 β_{ijt} 之间的偏差程度, 即有 $\tilde{\alpha}_{ijt} = \alpha_{ijt} + \hat{\alpha}_{ijt}\delta_{ijt}$, $\tilde{\beta}_{ijt} = \beta_{ijt} + \hat{\beta}_{ijt}\varepsilon_{ijt}$. 第 t 时段的实际需求量 $\tilde{x}^b_{ijt}(r^b_{ijt}) = \tilde{\alpha}_{ijt} - \tilde{\beta}_{ijt} r^b_{ijt} = (\alpha_{ijt} + \hat{\alpha}_{ijt}\delta_{ijt}) - (\beta_{ijt} + \hat{\beta}_{ijt}\varepsilon_{ijt}) r^b_{ijt}$, 由此可得, 第 t 时段的实际需求量 $\tilde{x}^b_{ijt}(r^b_{ijt})$ 与名义需求量 $x^b_{ijt}(r^b_{ijt})$ 相差的绝对值为 $|\hat{\alpha}_{ijt}\delta_{ijt} - \hat{\beta}_{ijt}\varepsilon_{ijt} r^b_{ijt}|$.

引入参数 Γ_{ij}, Γ_{ij} 为一个给定的非负实数, 用来约束航段 $(i \to j)$ 实际各时段总需求量偏离名义总需求量的程度, 即有:

$$\left| \sum_{t=1}^{T} \left(\hat{\alpha}_{ijt}\delta_{ijt} - \hat{\beta}_{ijt}\varepsilon_{ijt} r^b_{ijt} \right) \right| \le \sum_{t=1}^{T} \left| \hat{\alpha}_{ijt}\delta_{ijt} - \hat{\beta}_{ijt}\varepsilon_{ijt} r^b_{ijt} \right| \le \Gamma_{ij} \tag{4}$$

Γ_{ij} 可以取 $[0, \sum_{t=1}^{T}(\hat{\alpha}_{ijt} + \hat{\beta}_{ijt} R_{ij})]$ 上的任意值, Γ_{ij} 取值越大, 表明集装箱班轮公司掌握的需求信息越少, 反之, Γ_{ij} 取值越小, 则代表集装箱班轮公司掌握的需求信息越多.

由此, 可将模型 (M3) 转化为如下的稳健定价模型 (M5):

$$\max z = \sum_{t=1}^{T} \sum_{(i\to j)\in\Omega} r^b_{ijt}(\alpha_{ijt} - \beta_{ijt} r^b_{ijt}) + \min\left(\sum_{t=1}^{T} \sum_{(i\to j)\in\Omega} r^b_{ijt}(\hat{\alpha}_{ijt}\delta_{ijt} - \hat{\beta}_{ijt}\varepsilon_{ijt} r^b_{ijt}) \right)$$

约束条件:

$$\begin{aligned} &\sum_{(i\to j)\in\Omega, i<j} \left(\sum_{t=1}^{T}(\alpha_{ijt} - \beta_{ijt} r^b_{ijt}) + \sum_{t=1}^{T}(\hat{\alpha}_{ijt}\delta_{ijt} - \hat{\beta}_{ijt}\varepsilon_{ijt} r^b_{ijt}) + x^{a^*}_{ij} + y^*_{ij} \right) \\ &\quad + \sum_{(k\to j)\in\Omega, k<i<j} \left(\sum_{t=1}^{T}(\alpha_{kjt} - \beta_{kjt} r^b_{kjt}) + \sum_{t=1}^{T}(\hat{\alpha}_{kjt}\delta_{kjt} - \hat{\beta}_{kjt}\varepsilon_{kjt} r^b_{kjt}) + x^{a^*}_{kj} + y^*_{kj} \right) \le Q \end{aligned} \tag{①}$$

$$\begin{aligned} &\sum_{(i\to j)\in\Omega, i>j} \left(\sum_{t=1}^{T}(\alpha_{ijt} - \beta_{ijt} r^b_{ijt}) + \sum_{t=1}^{T}(\hat{\alpha}_{ijt}\delta_{ijt} - \hat{\beta}_{ijt}\varepsilon_{ijt} r^b_{ijt}) + x^{a^*}_{ij} + y^*_{ij} \right) \\ &\quad + \sum_{(k\to j)\in\Omega, k>i>j} \left(\sum_{t=1}^{T}(\alpha_{kjt} - \beta_{kjt} r^b_{kjt}) + \sum_{t=1}^{T}(\hat{\alpha}_{kjt}\delta_{kjt} - \hat{\beta}_{kjt}\varepsilon_{kjt} r^b_{kjt}) + x^{a^*}_{kj} + y^*_{kj} \right) \le Q \end{aligned} \tag{②}$$

$$\sum_{t=1}^{T}(\hat{\alpha}_{ijt}\delta_{ijt} - \hat{\beta}_{ijt}\varepsilon_{ijt} r^b_{ijt}) \le \Gamma_{ij} \tag{③}$$

$$\sum_{t=1}^{T}(\hat{\alpha}_{ijt}\delta_{ijt} - \hat{\beta}_{ijt}\varepsilon_{ijt} r^b_{ijt}) \ge -\Gamma_{ij} \tag{④}$$

$$|\delta_{ijt}| \le 1,\ |\varepsilon_{ijt}| \le 1 \tag{⑤}$$

$$r^a_{ij} \le r^b_{ijt} \le R_{ij} \tag{⑥}$$

将模型 (M5) 中约束条件 ③ 分别与约束条件 ① 和 ② 合并, 由此可进一步将模型 (M5) 松弛为下述稳健模型 (M6):

目标函数: $\max z = \sum_{t=1}^{T} \sum_{(i\to j)\in\Omega} r^b_{ijt}(\alpha_{ijt} - \beta_{ijt} r^b_{ijt}) + \min\left(\sum_{t=1}^{T} \sum_{(i\to j)\in\Omega} r_{ijt}(\hat{\alpha}_{ijt}\delta_{ijt} - \hat{\beta}_{ijt}\varepsilon_{ijt} r^b_{ijt}) \right)$

约束条件:

$$\begin{aligned} &\sum_{(i\to j)\in\Omega, i<j} \left(\sum_{t=1}^{T}(\alpha_{ijt} - \beta_{ijt} r^b_{ijt}) + x^{a^*}_{ij} + y^*_{ij} \right) + \sum_{(k\to j)\in\Omega, k<i<j} \left(\sum_{t=1}^{T}(\alpha_{kjt} - \beta_{kjt} r^b_{kjt}) + x^{a^*}_{kj} + y^*_{kj} \right) \\ &\qquad \le Q - \sum_{(i\to j)\in\Omega, i<j} \Gamma_{ij} - \sum_{(k\to j)\in\Omega, k<i<j} \Gamma_{kj} \end{aligned} \tag{①}$$

$$\sum_{(i\to j)\in\Omega,i>j}\left(\sum_{t=1}^{T}(\alpha_{ijt}-\beta_{ijt}r_{ijt}^{b})+x_{ij}^{a^*}+y_{ij}^{*}\right)+\sum_{(k\to j)\in\Omega,k>i>j}\left(\sum_{t=1}^{T}(\alpha_{kjt}-\beta_{kjt}r_{kjt}^{b})+x_{kj}^{a^*}+y_{kj}^{*}\right)\le Q-\sum_{(i\to j)\in\Omega,i>j}\Gamma_{ij}-\sum_{(k\to j)\in\Omega,k>i>j}\Gamma_{kj} \quad ②$$

$$\sum_{t=1}^{T}(\hat{\alpha}_{ijt}\delta_{ijt}-\hat{\beta}_{ijt}\varepsilon_{ijt}r_{ijt}^{b})\ge-\Gamma_{ij} \quad ③$$

$$|\delta_{ijt}|\le 1,\ |\varepsilon_{ijt}|\le 1 \quad ④$$

$$r_{ij}^{a}\le r_{ijt}^{b}\le R_{ij} \quad ⑤$$

模型 (M6) 的目标函数增加了收入变化量的最小值达到最大的一项, 这是一个两层规划问题, 其内层最小化问题可以看作是以 δ_{ijt}, ε_{ijt} 为决策变量的线性规划, 利用强对偶定理可得, 模型 (M6) 等价于下述凸规划问题模型 (M7):

目标函数: $\max z=\sum\limits_{t=1}^{T}\sum\limits_{(i\to j)\in\Omega}r_{ijt}^{b}(\alpha_{ijt}-\beta_{ijt}r_{ijt}^{b})-\left(\sum\limits_{(i\to j)\in\Omega}\Gamma_{ij}w_{ij}+\sum\limits_{t=1}^{T}\sum\limits_{(i\to j)\in\Omega}(\hat{\alpha}_{ijt}-\hat{\beta}_{ijt}r_{ijt}^{b})(r_{ijt}^{b}-w_{ij})\right)$

约束条件:

$$\sum_{(i\to j)\in\Omega,i<j}\left(\sum_{t=1}^{T}(\alpha_{ijt}-\beta_{ijt}r_{ijt}^{b})+x_{ij}^{a^*}+y_{ij}^{*}\right)+\sum_{(k\to j)\in\Omega,k<i<j}\left(\sum_{t=1}^{T}(\alpha_{kjt}-\beta_{kjt}r_{kjt}^{b})+x_{kj}^{a^*}+y_{kj}^{*}\right)\le Q-\sum_{(i\to j)\in\Omega,i<j}\Gamma_{ij}-\sum_{(k\to j)\in\Omega,k<i<j}\Gamma_{kj} \quad ①$$

$$\sum_{(i\to j)\in\Omega,i>j}\left(\sum_{t=1}^{T}(\alpha_{ijt}-\beta_{ijt}r_{ijt}^{b})+x_{ij}^{a^*}+y_{ij}^{*}\right)+\sum_{(k\to j)\in\Omega,k>i>j}\left(\sum_{t=1}^{T}(\alpha_{kjt}-\beta_{kjt}r_{kjt}^{b})+x_{kj}^{a^*}+y_{kj}^{*}\right)\le Q-\sum_{(i\to j)\in\Omega,i>j}\Gamma_{ij}-\sum_{(k\to j)\in\Omega,k>i>j}\Gamma_{kj} \quad ②$$

$$r_{ij}^{a}\le r_{ijt}^{b}\le R_{ij} \quad ③$$

$$w_{ij}\ge 0 \quad ④$$

其中, w_{ij} 为模型 (M6) 内层规划的对偶规划中的决策变量.

求解模型 (M7), 即可求得第二阶段的最优定价, 继续利用式 (1) 便可求得第二阶段的舱位分配结果.

5 算例分析

某多港挂靠班轮航线配置了载箱量为 4000TEU 的集装箱船, 经停 4 个港口, 航线一端包括港口 1 和港口 2, 航线另一端有港口 3 和港口 4, 如图 1 所示.

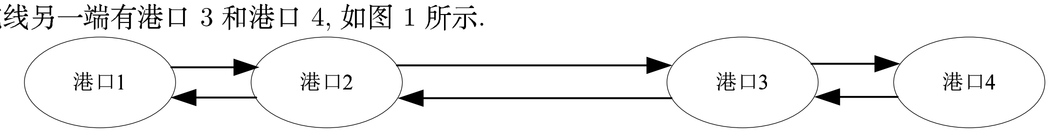

图 1 多港挂靠班轮航线

航段 $(i\to j)$ 之间合同客户的重箱单位收益和空箱运输成本数据已知, 假定各航段 $(i\to j)$ 间合同客户舱位需求信息已经通过历史数据统计得出, 为服从正态分布的随机变量, $D_{ij}^{a}\sim N(\overline{D}_{ij}^{a},\sigma_{ij}^{a2})$. 具体数据见表 1 所示.

在求解第一阶段模型 (M4) 时, 假设其置信水平为 95%, 则利用 Lingo 软件包可得到第一阶段的最优分配方案, 见表 2 所示.

在第二阶段, 假设班轮的航次周期为 $T=2$ 周. 以周为周期, 则 T 可以分 2 个时段. 假定统计估计出的系数及其变化幅度见表 3 所示: 本算例中通过测算 Γ_{ij} 的取值范围 $[0,\sum_{t=1}^{T}(\hat{\alpha}_{ijt}+\hat{\beta}_{ijt}R_{ij})]$, 并在假定集装箱班轮公司掌握了一定的需求信息后, 给出 Γ_{ij} 的取值见表 3 所示.

那么求解第二阶段模型 (M7) 可得第二阶段的动态定价及舱位分配结果, 见表 4 所示.

表 1 基本数据表

航段 $(i \to j)$	1-2	1-3	1-4	2-1	2-3	2-4	3-1	3-2	3-4	4-1	4-2	4-3
合同客户单位运费率 $r_{ij}^a(\$)$	160	1200	1245	150	1115	1250	1170	1020	190	1245	1125	195
运输空箱的单位成本 $c_{ij}(\$)$	155	260	275	165	250	260	255	245	138	275	260	135
客户舱位需求下限值 $\underline{D}_{ij}(TEU)$	66	825	1058	66	1147	726	682	836	68	786	945	74
客户舱位需求上限值 $\overline{D}_{ij}(TEU)$	180	2265	1879	300	2163	2010	1957	1833	200	1886	2042	250
合同客户舱位需求均值 $\overline{D}_{ij}^a(TEU)$	117	558	643	90	452	720	318	485	49	855	621	165
合同客户舱位需求标准差 $\sigma_{ij}^a(TEU)$	12	115	130	8	110	120	109	130	10	110	160	19
航段价格上限 $R_{ij}(\$)$	240	1500	1600	240	1400	1550	1500	1400	260	1600	1550	260
港口 j 空箱需求量 $E_j(TEU)$	150 $(j=1)$			180 $(j=2)$			0 $(j=3)$			0 $(j=4)$		

表 2 第一阶段最优舱位分配

航段 $(i \to j)$	1-2	1-3	1-4	2-1	2-3	2-4	3-1	3-2	3-4	4-1	4-2	4-3
重箱舱位数 (TEU)	82	669	628	68	453	768	411	610	36.3	865	686	39
空箱舱位数 (TEU)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

表 3 系数取值表

$(i \to j)$	1-2	1-3	1-4	2-1	2-3	2-4	3-1	3-2	3-4	4-1	4-2	4-3
α_{ij1}	150	650	655	170	590	645	675	550	135	680	665	145
α_{ij2}	150	645	700	170	610	650	680	560	150	650	570	125
β_{ij1}	0.8	0.4	0.35	0.4	0.2	0.35	0.35	0.25	0.4	0.4	0.35	0.45
β_{ij2}	0.6	0.45	0.3	0.4	0.15	0.4	0.35	0.3	0.35	0.3	0.3	0.4
$\hat{\alpha}_{ij1}$	25	50	46	16	52	49	48	45	18	54	48	17
$\hat{\alpha}_{ij2}$	20	44	48	19	35	51	43	36	16	49	38	15
$\hat{\beta}_{ij1}$	0.4	0.25	0.15	0.25	0.08	0.25	0.15	0.1	0.2	0.15	0.1	0.2
$\hat{\beta}_{ij2}$	0.3	0.28	0.15	0.25	0.05	0.3	0.2	0.15	0.18	0.17	0.1	0.2
Γ_{ij}	10	50	28	8	14	42	31	21	6	30	20	7

表 4 第二阶段动态定价及舱位分配

航段 $(i \to j)$	1-2	1-3	1-4	2-1	2-3	2-4	3-1	3-2	3-4	4-1	4-2	4-3
提前 1 周 $(t=1)$ 定价 $(\$/TEU)$	180	1280	1500	178	1500	1450	1500	1470	210	1479	1485	235
提前 1 周 $(t=2)$ 定价 $(\$/TEU)$	173	1256	1450	170	1446	1375	1425	1368	198	1433	1319	220
提前 1 周 $(t=1)$ 重箱舱位数 (TEU)	6	138	130	99	290	138	150	183	51	88	145	39
提前 2 周 $(t=2)$ 重箱舱位数 (TEU)	46	80	265	102	393	100	181	150	81	220	174	37

将第一阶段模型 (M4) 与第二阶段模型 (M7) 的最优结果整合后, 便可以得到两阶段集装箱舱位分配结果, 与应用基本模型 (M1) 求得的分配结果比较见表 5 所示.

表 5 两阶段模型与基本模型结果比较

航段 $(i \to j)$		1-2	1-3	1-4	2-1	2-3	2-4	3-1	3-2	3-4	4-1	4-2	4-3	总收入 ($)
两阶段模型	重箱舱位	134	887	1023	269	1136	1005	742	942	168	1173	1006	115	10 088 745
	空箱舱位	0	0	0	0	0	0	150	180	0	0	0	0	
基本模型	重箱舱位	180	825	1058	300	1147	970	682	836	200	1207	945	250	9 094 215
	空箱舱位	0	0	0	0	0	0	150	180	0	0	0	0	

由表 5 的结果可以看出, 运用收益管理理论, 即使在不作合同市场和现货市场区分的情形下, 建立基本舱位分配模型, 可以对集装箱班轮重箱和空箱舱位进行合理分配, 并获得优化的班轮运输效益结果为 $9 094 215, 而若进一步区分合同市场和现货市场, 并分两阶段建立集装箱班轮运输舱位分配和动态定价模型, 则最终获得的班轮运输效益优化结果为 $10 088 745, 比基本舱位分配模型的优化结果要多出 $994 530, 即班轮公司的收益增加了 $994 530. 由此说明, 本文提出的基于收益管理的两阶段集装箱班轮运输舱位分配和动态定价模型和算法更为适用和有效.

6 结论

本文基于收益管理的思想, 以集装箱班轮运输中的长期合同市场与现货市场的客户细分为切入点, 综合

考虑了空箱调运因素, 分两阶段建立了集装箱班轮运输的舱位分配模型和动态定价模型, 分别设计了机会约束和稳健优化求解算法, 并通过算例进行了适用性和有效性的验证. 为集装箱班轮运输舱位的合理分配和运价的灵活制订并进而提高班轮运输的效益提供了有价值的决策参考.

本文的上述研究仅是针对单一的班轮多港挂靠航线的情形, 今后应进一步探讨在集装箱干/支线联运航线、多种类集装箱以及托运人有策略性选择行为等复杂情形下的集装箱班轮运输舱位分配和动态定价模型和应用问题.

参考文献

[1] 卜祥智, 赵辉, 武振业, 等. 基于收益管理的海运集装箱舱位分配随机规划模型 [J]. 系统工程理论方法应用, 2005, 14(4): 330–334.
Bu X Z, Zhao H, Wu Z Y, et al. Study on the stochastic programming model of ocean shipping container slot allocation problem based on revenue management[J]. Systems Engineering Theory Methodology Applications, 2005, 14(4): 330–334.

[2] 李根道, 熊中楷, 李薇. 基于收益管理的动态定价研究综述 [J]. 管理评论, 2010, 22(4): 97–108.
Li G D, Xiong Z K, Li W. Review of studies on dynamic pricing in revenue management[J]. Management Review, 2010, 22(4): 97–108.

[3] 李豪, 熊中楷, 屈卫东. 基于乘客分类的航空客运座位控制和动态定价综合模型 [J]. 系统工程理论与实践, 2011, 31(6): 1062–1070.
Li H, Xiong Z K, Qu W D. Optimal seating control and dynamic pricing for airline tickets with passenger segment[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2011, 31(6): 1062–1070.

[4] 肖勇波, 陈剑, 刘晓玲. 基于乘客选择行为的双航班机票联合动态定价模型 [J]. 系统工程理论与实践, 2008, 28(1): 46–55.
Xiao Y B, Chen J, Liu X L. Joint dynamic pricing for two parallel flights based on passenger choice behavior[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2008, 28(1): 46–55.

[5] 陈继红. 集装箱班轮联营系统舱位租赁与分配决策优化模型 [J]. 数学的实践与认识, 2011, 41(17): 48–55.
Chen J H. Decision-making & optimization models of slot chartering & allocation for joint service of containerized liner shipping system[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2011, 41(17): 48–55.

[6] Lee L H, Chew E P, Sim M S. A heuristic to solve a sea cargo revenue management problem[J]. OR Spectrum, 2007, 29(1): 23–136.

[7] Ting S C, Tzeng G H. Fuzzy muli-objective programming approach to allocating containership slots for liner shipping revenue management[C]// The 16th International Conference on MCDM, Semmering, 2002: 1–16.

[8] Ha D. Capacity management in the container shipping industry: The application of yield management techniques[D]. Knoxiville: University of Tennessee, 1994.

[9] Maragos S A. Yield management for the maritime industry (shipping, itineraries)[D]. Massachusetts Institute of Technology, 1994.

[10] Lu H A, Chu C W, Che P Y. Seasonal slot allocation planning for a container liner shipping service[J]. Journal of Marine Science and Technology, 2010, 15(1): 84–92.

[11] 陈春益, 李启安. 货柜航商收益管理之研究 —— 以舱位分配为例 [R]. 台湾: 国立成功大学交通管理科学研究所, 2002: 1–18.
Chen C Y, Li Q A. Research of revenue management for shipping company — A case study on slot allocation[R]. Taiwan: Institute of Transportation Management Science, National Cheng Kung University, 2002: 1–18.

[12] 卜祥智, 赵泉午, 陈荣秋. 基于收益管理的海运集装箱舱位分配与路径选择优化模型 [J]. 管理工程学报, 2008, 22(3): 94–99.
Bu X Z, Zhao Q W, Chen R Q. An optimization model of ocean shipping container slot allocation and routing choice problem based on revenue management[J]. Journal of Industrial Engineering and Engineering Management, 2008, 22(3): 94–99.

[13] 杨华龙, 陈晓东. 大陆北方/台湾班轮航线方案优化研究 [J]. 系统工程理论与实践, 2001, 21(3): 112–115.
Yang H L, Chen X D. Research on optimization of liner routing plan between north PRC and Taiwan[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2001, 21(3): 112–115.

[14] 卜祥智, 陈荣秋, 赵泉午. 考虑长期运力合同的班轮收益管理运输路径优化模型 [J]. 中国管理科学, 2007, 15(6): 39–45.
Bu X Z, Chen R Q, Zhao Q W. An optimization model of routing problem with long-term contract for liner revenue management[J]. Chinese Journal of Management Science, 2007, 15(6): 39–45.

[15] 冉伦, 李金林, 徐丽萍. 收益管理中单产品动态定价的稳健模型研究 [J]. 数理统计与管理, 2009, 28(5): 934–941.
Ran L, Li J L, Xu Li P. Study on the robust model in single-unit product dynamic pricing in revenue management[J]. Application of Statistics and Management, 2009, 28(5): 934–941.