

考虑货物时间价值的洲际班轮航线配船 与航速优化

邢玉伟, 杨华龙*, 郑建风, 宋 巍
(大连海事大学交通运输工程学院, 辽宁大连 116026)

摘要: 针对价值较高且时效性较强的洲际班轮集装箱货物运输决策问题, 基于时间价值原理, 建立了洲际班轮航线往返长航段航速调整与即期市场运费率间的函数关系. 结合班轮网络多航线多类型船舶联合配置的要求, 构建了以船公司班轮运输周总利润最大化为目标的航线配船与航速优化混合整数非线性规划模型, 设计了结合枚举的离散线性化求解算法. 算例结果表明, 考虑货物时间价值的洲际班轮航线配船与航速优化, 不但能够提高洲际航线往返长航段的船舶航速, 减少货物运输时间, 而且还可以减少船舶配置数量, 有效地增加船公司的班轮运输总利润. 研究结论可为船公司班轮运营提供科学的决策参考.

关键词: 洲际班轮; 航线配船; 航速; 货物时间价值; 非线性混合整数规划模型

中图分类号: U692.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-5781(2022)06-0796-15

doi: 10.13383/j.cnki.jse.2022.06.006

Optimization of fleet deployment and vessel sailing speed for intercontinental liner considering cargo time value

Xing Yuwei, Yang Hualong*, Zheng Jianfeng, Song Wei

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

Abstract: This paper focuses on the decision-making problem of high value and time-sensitive intercontinental liner container cargo transportation. Based on the principle of time value, the functional relationship between containership sailing speed adjustment of round long legs and spot market freight rate, are analysed. A mixed integer non-linear model is established to maximize the total weekly profit of a shipping company. An enumeration and discretization linearized algorithm are designed to solve the proposed model. The results indicate that considering cargo time value can increase vessel sailing speeds on two long legs. Moreover, it can decrease transportation time of container cargoes and reduce the number of deployed vessels. Consequently, the weekly profit of the shipping company is very likely to increase significantly attributing to the optimization of fleet deployment and vessel sailing speed. The findings of this paper can provide a scientific decision-making reference for container liner operation of shipping companies.

Key words: intercontinental liner; fleet deployment; sailing speed; cargo time value; mixed-integer nonlinear programming model

收稿日期: 2019-12-09; 修订日期: 2022-05-23.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(72071024; 71871036); 辽宁省社会科学规划基金项目(L21CJY004); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(3132021175; 3132022187; 3132022648).

*通信作者

1 引言

集装箱班轮运输是国际工业品和一般消费品海运贸易的主要运输方式^[1], 其具有客户(货主)众多且分散、货物价值相对较高且种类繁多等特征^[2]. 为了应对集装箱运输需求等的变化, 船公司在航线设计(海运网络设计)^[3]和船型论证^[4]决策的基础上, 通常每隔一段时间(3个月~6个月)需要重新进行航线配船决策^[5], 即安排合适类型和数量的船舶按既定的顺序挂靠航线上的港口, 为客户提供周而复始的(周班或双周班^[6])运输服务. 由于航线距离和发船频率(如周班)一定, 故船舶航速的大小与航线配船数量及货物运送时间密切相关. 同时, 货物运送时间又是托运人关注的重要因素. 如数字货运代理公司(Flexport)专家分析指出, 在中国到美国东/西海岸集装箱班轮航线(简称东/西海岸航线)上, 由于在东海岸航线上货物运送时间更长, 故自新冠肺炎疫情全球蔓延导致运力紧张以来, 客户偏好选择西海岸航线运输集装箱货物, 使得西海岸航线集装箱运费率飙升^[7]. 此外, 船舶航速对燃油消耗也会产生重要的影响^[8,9]. 因此, 针对具有较高价值和运输时效性要求较强的洲际集装箱运输货物, 研究班轮网络航线配船与航速优化问题具有重要的理论和现实意义.

航线配船问题与航速优化问题既相互制约又相互促进^[10], 是一有机整体. 学者们对此展开了许多深入的研究, 综述性文章可参阅文献^[11]. 在假定运费率不变且航线货运需求(或其均值)一定的条件下, Ronen^[12]分析了单一航线船舶航速与航线配船数量之间的权衡关系, 以班轮运输总运营成本最小化为目标, 建立了航速与航线配船非线性规划模型. 在此基础上, Gelareh等^[13]针对网络多航线的配船问题, 建立了航速与航线配船混合整数非线性规划模型.

上述运费率不变假定下的研究都是以船公司班轮运输总运营成本最小化作为目标的, 这与现实中船公司所追求的利润最大化目标并不完全相符. 为此, 一些学者开始关注船公司班轮运输中的收入变化问题. 如 Xia等^[14]考虑发船频率对航线货运需求的影响, 提出一个综合测算运输收入和各项运输成本的班轮运输模型, 用以解决航线配船、船舶航速以及发船频率等决策问题, 旨在追求船公司利润最大化; Zhen等^[15]考虑船队规模和码头泊位资源等约束, 探讨了船舶在各港口集装箱货物 OD(起讫港口对)流的配载数量问题, 以船公司总利润最大化为目标, 对集装箱班轮网络航线配船进行了建模和求解.

以上文献丰富和拓展了航线配船与航速优化目标的范畴, 但却并未考虑集装箱货物的时间价值, 忽视了客户集装箱货物运输的时效性问题^[16,17]. 对于许多时间敏感的集装箱货物而言, 运送时间的延误(如在某具体班轮航次中出现港口拥堵^[18]情形), 会给客户造成一定的损失, 此时, 船公司可采取降低运费率的灵活动态定价策略, 给予货主一定的补偿, 以便提升市场竞争力^[19]. 而运送时间的缩短, 则可以增加客户集装箱货物的时间价值收益(或节省货物的库存成本), 此时, 客户会愿意将部分增加的收益以运费的形式支付给船公司, 以鼓励其缩短集装箱货物运送时间. 由此可见, 在班轮运输决策中考虑集装箱货物运输过程中产生的时间价值因素, 将会给船公司带来提高收益的机会^[20]. 此外, 由于班轮运输具有固定成本高, 边际成本低, 运力相对固定且不可存储, 客户众多且可细分等应用收益管理技术的典型特征, 采取动态(差异)定价可以有效提高船公司班轮运输收益^[21-23]. 故在集装箱班轮运输市场竞争激烈、运费率波动剧烈的新形势下, 许多班轮公司已纷纷开始采用差异定价策略, 如马士基航运公司采用 Maersk Spot 在线系统进行集装箱班轮运输差异定价^[24].

鉴于此, 本文在考虑货物时间价值因素对船公司运营决策影响的基础上, 从以下两方面对洲际班轮网络航线配船和航速优化问题进行扩展研究: 一是通过建立洲际航线长航段上船舶航速与即期市场运费率之间的函数关系, 提出班轮运输即期市场差异定价策略; 二是在前期班轮运输单航线配船与航速优化研究^[20]的基础上, 结合班轮网络多航线上货运需求量差异及船舶类型和数量限制等因素, 构建班轮网络航线配船和航速优化模型. 本文的创新之一是在考虑货物时间价值的前提下, 提出了基于运费率航速函数的差异定价策略; 创新之二是结合班轮网络多航线上货运需求量差异, 构建了洲际班轮网络航线配船与航速优化混合

整数非线性规划模型, 以实现船公司班轮运输收益的最大化目标。

2 问题描述

在洲际集装箱班轮运输中, 船公司一般需要在开辟的多条班轮网络航线上, 配置各类不同型号的船舶, 以满足区域内众多客户长期的需求。如某船公司在东亚-美西区域内运营的由 4 条班轮网络航线上, 配置了两种型号的船舶, 如表 1 所示。

表 1 某船公司东亚-美西区域班轮运输网络
Table 1 The liner transportation network from East Asia to Western US of a shipping company

航线	最大载箱量 / TEU	挂靠港口顺序					
		1	2	3	4	5	6
航线 1	10 060	连云港	上海	宁波	长滩	西雅图	—
航线 2	8 400	东京	青岛	上海	宁波	洛杉矶	奥克兰
航线 3	8 400	青岛	上海	宁波	洛杉矶	奥克兰	—
航线 4	10 060	宁波	上海	釜山	长滩	釜山	—

由表 1 不难发现, 在每条洲际航线上, 船舶挂靠的各个港口按照地理位置可以分别划为该航线的东亚端或美西端, 即可将所有挂靠港口划分为航线的两端。其中对于某个航段, 如果它所连接的一个港口位于洲际航线的一端, 而另一个港口位于洲际航线的另一端, 这样的航段称为长航段; 对于洲际航线同一端港口之间的航段则称为短航段。由此可见, 每条洲际航线有两个往返长航段, 其余均为短航段。如在表 1 中的航线 1 上, 连云港、上海和宁波均位于中国(东亚端), 长滩、西雅图均位于美西端, 其去程长航段为宁波-长滩, 回程长航段为西雅图-连云港。

由于短航段距离相对较近, 若考虑货物时间价值而优化调整船舶航速, 其带来的船舶航行时间减少量并不显著, 这些较小的时间变化会被班轮船期设计时所赋予的航行时间缓冲抵消, 因而其对船公司运费收入和与船舶相关成本的影响便会微乎其微。而在长航段上, 若考虑货物时间价值而优化调整船舶航速, 将会带来以下三个方面的影响。第一, 长航段上船舶航速调整可以改变船舶在洲际两端起讫港口对间运输货物的时间, 从而影响船公司的运费收入。比如, 提高长航段的船舶航速不但可以节约货物运输过程中的“库存成本”, 而且还有助于客户(货主)抢占商机, 从而获取更多的货物(销售)收益, 所以客户会愿意为此向船公司支付更高的运费率。此时, 如果船公司对不同的客户采取差异定价, 即对于长约客户, 船公司按照运费率协议的基本运费率折扣收取运费; 对于即期市场客户, 船公司收取受运输时间影响而变化的差异化运费, 则会影响船公司的运费收入。第二, 长航段上的船舶航速调整可以改变各航线所配船舶的数量及与船舶相关的成本。由于航线距离和发船频率是确定的, 船舶航速调整势必会改变船舶往返航次的总时间, 从而影响配船数量以及船舶相关的成本。第三, 长航段上船舶航速调整可以改变船舶燃油成本。长航段船舶航速发生改变时, 则船舶在该航段上每天的燃油消耗量便会以速度变化的三次方近似成正比, 因而燃油成本也会随之发生明显变化。

根据上述分析, 当考虑货物时间价值时, 本文提出洲际班轮网络航线配船与航速优化问题研究思路如下: 通过分析长航段上船舶航速调整对客户货物库存成本和资金成本的影响, 建立即期市场运费率与长航段上船舶航速间函数关系; 依据船舶一个往返航次时间应是周的整数(该整数亦为航线配置的船舶数量)倍的条件, 确立配船数量与船舶所有航段航速间约束关系; 根据燃油消耗与航速间的函数关系, 给出长航段上航速调整后的船舶燃油消耗量公式。在此基础上, 以船公司班轮网络航线运输总收益最大化为目标, 构建优化模型并设计相应的算法, 最终得出班轮网络航线配置船舶的类型、数量和船舶航速。

为了便于建模, 本问题研究做以下假设:

1) 决策期内班轮运输网络各航线船舶挂靠的港口及其顺序已知;

- 2) 各航线发船频率均为每周一班;
- 3) 同一航线上配置的船舶类型一致;
- 4) 决策期为半年, 不考虑偶发的天气、港口拥堵等不可抗力因素;
- 5) 不考虑航行条件对燃油消耗的影响.

3 模型建立和算法设计

3.1 符号说明

模型中参数符号定义如表 2 所示

表 2 参数和决策变量说明

Table 2 The description of parameters and decision variables

参数/决策变量	解释
Φ	所有航线的集合, $\Phi = \{1, 2, \dots, R\}$, $r \in \Phi$ 代表其中一条航线
Ω	所有船型的集合, $\Omega = \{1, 2, \dots, V\}$, $v \in \Omega$ 代表其中一种船型
A_r	航线 r 一端港口的集合, $A_r = \{1, 2, \dots, N_r\}$
B_r	航线 r 另一端港口的集合, $B_r = \{N_r + 1, N_r + 2, \dots, N_r + M_r\}$
L_{ri}	航线 r 上航段 i 的距离, $i \in A_r \cup B_r = \{1, 2, \dots, N_r + M_r\}$
L_{rN_r}	航线 r 上航段 N_r 的距离, 即航线 r 上船舶去程长航段的距离
$L_{rN_r+M_r}$	航线 r 上航段 $N_r + M_r$ 的距离, 即航线 r 上船舶回程长航段的距离
S_v	v 型船舶的设计航速
S_{vmin}	v 型船舶的最小航速
S_{vmax}	v 型船舶的最大航速
F_v	v 型船舶按照设计航速行驶时的每天燃油消耗量
Q_{ri}	航线 r 上航段 i 的集装箱运量
T_{ri}	船舶在航线 r 上港口 i 的挂靠时间
T_{rij}	船舶在航线 r 上从港口 i 到港口 j 货物的最大允许运输时间
P	燃油价格
C_v	每艘 v 型船舶每周的固定营运成本
Z_v	最大允许配置的 v 型船的数量
G_v	v 型船的载箱量
Y_{rij}	r 航线上从港口 i 到港口 j 即期市场客户集装箱基本运费率
D_{rij}	每周航线 r 上港口 i 到港口 j 集装箱平均运输需求
α_{rij}	航线 r 上从港口 i 到港口 j 长约客户集装箱基本运费率折扣
U_r	航线 r 上集装箱货物的平均单位价值
S_{vr}^*	未考虑货物的时间价值时, v 型船在航线 r 航段 i 的最优航速
ϕ	船公司得到的货物时间价值收益共享系数
ρ	货物的时间价值系数
γ_{rij}	航线 r 上港口 i 到港口 j 之间即期市场客户货运需求的百分比
S_{vri}	未考虑货物时间价值时, v 型船在航线 r 航段 i 的船舶航速
S_{vrN_r}	考虑货物时间价值时, v 型船在航线 r 航段 N_r 的船舶航速
$S_{vrN_r+M_r}$	考虑货物时间价值时, v 型船在航线 r 航段 $N_r + M_r$ 的船舶航速
m_{vr}	航线 r 上所配置的 v 型船舶数量
x_{vr}	0-1 变量, 当 v 型船舶配置在航线 r 上取 1, 否则取 0
y_{rij}	考虑货物时间价值时, 在航线 r 上从港口 i 到港口 j 的即期市场客户集装箱运费率

3.2 船舶航速变化所带来的影响

根据上述问题描述, 若考虑集装箱货物时间价值, 船公司将往返两个长航段 N_r 和 $N_r + M_r$ 上的船舶航速分别由 $S_{vrN_r}^*, S_{vrN_r+M_r}^*$ 提高到 $s_{vrN_r}, s_{vrN_r+M_r}$, 则船舶在两个长航段上节约的航行时间分别为 $\left(\frac{L_{rN_r}}{\sum_{v=1}^V S_{vrN_r}^* x_{vr}} - \frac{L_{rN_r}}{\sum_{v=1}^V x_{vr} s_{vrN_r}} \right)$ 和 $\left(\frac{L_{rN_r+M_r}}{\sum_{v=1}^V S_{vrN_r+M_r}^* x_{vr}} - \frac{L_{rN_r+M_r}}{\sum_{v=1}^V x_{vr} s_{vrN_r+M_r}} \right)$. 此时, 即期市场客户在两个长航段

上获得的货物时间价值收益分别为 $U_r \rho \left(\frac{L_{rN_r}}{\sum_{v=1}^V S_{vrN_r}^* x_{vr}} - \frac{L_{rN_r}}{\sum_{v=1}^V x_{vr} s_{vrN_r}} \right) / (24 \times 365)$, $U_r \rho \left(\frac{L_{rN_r+M_r}}{\sum_{v=1}^V S_{vrN_r+M_r}^* x_{vr}} - \frac{L_{rN_r+M_r}}{\sum_{v=1}^V x_{vr} s_{vrN_r+M_r}} \right) / (24 \times 365)$, $\forall r \in \Phi$.

于是, 将即期市场客户获得的货物时间价值收益的一部分(比率 $\phi (0 \leq \phi \leq 1)$)以运费率的形式付给船公司, 则可得船公司对上述即期市场客户的差异化运费率为

$$y_{rij} = Y_{rij} + \phi U_r \rho \left(\frac{L_{rN_r}}{\sum_{v=1}^V S_{vrN_r}^* x_{vr}} - \frac{L_{rN_r}}{\sum_{v=1}^V x_{vr} s_{vrN_r}} \right) / (24 \times 365), \forall r \in \Phi, i \in A_r, j \in B_r, \quad (1)$$

$$y_{rij} = Y_{rij} + \phi U_r \rho \left(\frac{L_{rN_r+M_r}}{\sum_{v=1}^V S_{vrN_r+M_r}^* x_{vr}} - \frac{L_{rN_r+M_r}}{\sum_{v=1}^V x_{vr} s_{vrN_r+M_r}} \right) / (24 \times 365), \forall r \in \Phi, i \in B_r, j \in A_r. \quad (2)$$

船舶航速变化还将会导致在航线上配置船舶数量的变化, 当提高各航线往返长航段的船舶航速后, 船公司为了保证周班的发船频率, 在各航线上所需配置的船舶数量应该满足

$$\sum_{i=1}^{N_r-1} \frac{L_{ri}}{\sum_{v=1}^V S_{vri}^* x_{vr}} + \frac{L_{rN_r}}{\sum_{v=1}^V x_{vr} s_{vrN_r}} + \sum_{i=N_r+1}^{N_r+M_r-1} \frac{L_{ri}}{\sum_{v=1}^V S_{vri}^* x_{vr}} + \frac{L_{rN_r+M_r}}{\sum_{v=1}^V x_{vr} s_{vrN_r+M_r}} + \sum_{i=1}^{N_r+M_r} T_{ri} \leq 168 \sum_{v=1}^V x_{vr} m_{vr}, \quad \forall r \in \Phi. \quad (3)$$

此外, 船舶航速变化也会引起船舶航行燃油消耗成本的变化, 根据船舶每天的燃油消耗量与航速之间的立方函数关系, 可得每艘 v 型船在航线 r 上航段 i 每天的燃油消耗量为

$$f(S_{vri}^*) = F_v \left(\frac{S_{vri}^*}{S_v} \right)^3, \quad \forall v \in \Omega, r \in \Phi, i \in \{1, 2, \dots, N_r - 1\} \cup \{N_r + 1, N_r + 2, \dots, N_r + M_r - 1\}. \quad (4)$$

船舶在航线 r 上去程长航段 N_r 的每天燃油消耗量为

$$f(s_{vrN_r}) = F_v \left(\frac{s_{vrN_r}}{S_v} \right)^3, \quad \forall v \in \Omega, r \in \Phi. \quad (5)$$

船舶在 r 航线上回程长航段 $N_r + M_r$ 的每天燃油消耗量为

$$f(s_{vrN_r+M_r}) = F_v \left(\frac{s_{vrN_r+M_r}}{S_v} \right)^3, \quad \forall v \in \Omega, r \in \Phi. \quad (6)$$

不难发现, 航期内总的油耗量为各个航段的油耗量乘以其航行天数, 然后再加总求和. 如船舶在 r 航线上程长航段 N_r 每天油耗量为 $f(s_{vrN_r}) = \sum_{v=1}^V F_v \left(\frac{s_{vrN_r}}{S_v} \right)^3 x_{vr}$, $\forall r \in \Phi$, 则在航期内对应的燃油消耗量为 $f(s_{vrN_r}) \left(\frac{L_{ri}}{s_{vrN_r}} \right) = \sum_{v=1}^V \left[F_v \left(\frac{s_{vrN_r}}{S_v} \right)^3 x_{vr} \frac{L_{ri}}{s_{vrN_r}} \right] = \sum_{v=1}^V \left(\frac{F_v}{S_v^3} \right) (L_{ri} s_{vrN_r}^2) x_{vr}$, $\forall r \in \Phi$, 在此基础上再乘以 P 即可得到该航段的燃油成本, 其它航段的燃油消耗成本计算方法相类似. 由于长航段的船舶航速需要重新优化, 因此把去程以及回程长航段的计算单独列出.

于是, 航线 r 上船舶一个往返航次的航行燃油成本为

$$F_r = \sum_{v=1}^V \frac{P F_v}{(S_v)^3} \left(\sum_{i=1}^{N_r-1} L_{ri} S_{vri}^{*2} + L_{rN_r} s_{vrN_r}^2 + \sum_{i=N_r+1}^{N_r+M_r} L_{ri} S_{vri}^{*2} + L_{rN_r+M_r} s_{vrN_r+M_r}^2 \right) x_{vr}, \quad \forall r \in \Phi. \quad (7)$$

3.3 模型建立

根据上述分析,可建立班轮网络航线配船和航速优化模型为

$$\begin{aligned} \text{Max } Z = & \sum_{r=1}^R \sum_{i=1}^{N_r} \sum_{j=N_r+1}^{N_r+M_r} [\gamma_{rij} D_{rij} y_{rij} + \alpha_{rij} (1 - \gamma_{rij}) D_{rij} Y_{rij}] + \\ & \sum_{r=1}^R \sum_{i=N_r+1}^{N_r+M_r} \sum_{j=1}^{N_r} [\gamma_{rij} D_{rij} y_{rij} + \alpha_{rij} (1 - \gamma_{rij}) D_{rij} Y_{rij}] - \\ & \sum_{r=1}^R \sum_{v=1}^V \frac{PF_v x_{vr}}{24(S_v)^3} \left(\sum_{i=1}^{N_r-1} L_{ri} S_{vri}^{*2} + L_{rN_r} s_{vrN_r}^2 + \sum_{i=N_r+1}^{N_r+M_r-1} L_{ri} S_{vri}^{*2} + L_{rN_r+M_r} s_{vrN_r+M_r}^2 \right) - \\ & \sum_{r=1}^R \sum_{v=1}^V C_v x_{vr} m_{vr}, \end{aligned} \quad (8)$$

s.t.

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^{N_r-1} \frac{L_{ri}}{\sum_{v=1}^V S_{vri}^* x_{vr}} + \frac{L_{rN_r}}{\sum_{v=1}^V x_{vr} s_{vrN_r}} + \sum_{i=N_r+1}^{N_r+M_r-1} \frac{L_{ri}}{\sum_{v=1}^V S_{vri}^* x_{vr}} + \frac{L_{rN_r+M_r}}{\sum_{v=1}^V x_{vr} s_{vrN_r+M_r}} + \sum_{i=1}^{N_r+M_r} T_{ri} \leq \\ 168 \sum_{v=1}^V x_{vr} m_{vr}, \quad \forall r \in \Phi, \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \sum_{k=i}^{N_r-1} \frac{L_{rk}}{\sum_{v=1}^V S_{vrk}^* x_{vr}} + \frac{L_{rN_r}}{\sum_{v=1}^V x_{vr} s_{vrN_r}} + \sum_{k=N_r+1}^{j-1} \frac{L_{rk}}{\sum_{v=1}^V S_{vrk}^* x_{vr}} + \sum_{k=i}^j T_{rk} \leq T_{rij}, \\ \forall r \in \Phi, i \in A_r, j \in B_r, \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \sum_{k=i}^{N_r+M_r-1} \frac{L_{rk}}{\sum_{v=1}^V S_{vrk}^* x_{vr}} + \frac{L_{rN_r+M_r}}{\sum_{v=1}^V x_{vr} s_{vrN_r+M_r}} + \sum_{k=1}^{j-1} \frac{L_{rk}}{\sum_{v=1}^V S_{vrk}^* x_{vr}} + \sum_{k=i}^{N_r+M_r} T_{rk} + \sum_{k=1}^j T_{rk} \leq T_{rij}, \\ \forall r \in \Phi, i \in B_r, j \in A_r, \end{aligned} \quad (11)$$

$$Q_{rk} = \sum_{i=1}^k \sum_{j=N_r+1}^{N_r+M_r} D_{rij}, \quad \forall r \in \Phi, k \in \{1, 2, \dots, N_r\}, \quad (12)$$

$$Q_{rk} = \sum_{i=N_r+1}^k \sum_{j=1}^{N_r} D_{rij}, \quad \forall r \in \Phi, k \in \{N_r+1, N_r+2, \dots, N_r+M_r\}, \quad (13)$$

$$Q_{rk} < \sum_{v=1}^V G_v x_{vr}, \quad \forall r \in \Phi, k \in \{1, 2, \dots, N_r+M_r\}, \quad (14)$$

$$S_{v \min} \leq s_{vrN_r} \leq S_{v \max}, \quad \forall v \in \Omega, r \in \Phi, \quad (15)$$

$$S_{v \min} \leq s_{vrN_r+M_r} \leq S_{v \max}, \quad \forall v \in \Omega, r \in \Phi, \quad (16)$$

$$\sum_{r=1}^R x_{vr} m_{vr} \leq M_v, \quad \forall v \in \Omega, \quad (17)$$

$$\sum_{v=1}^V x_{vr} = 1, \quad \forall r \in \Phi, \quad (18)$$

$$m_{vr} \in Z^+ \cup \{0\}, \quad \forall v \in \Omega, r \in \Phi, \quad (19)$$

$$x_{vr} \in \{0, 1\}, \quad \forall v \in \Omega, r \in \Phi, \quad (20)$$

$$y_{rij} \in R^+, \quad \forall r \in R, i \in A_r \cup B_r, j \in A_r \cup B_r, \quad (21)$$

其中式(8)为优化模型,旨在决策出每条航线上所配的船舶类型,船舶数量,船舶在各个航段的航速,以及各个港口对间的集装箱运费率等变量,以追求船公司所有航线周总利润最大,其中第一项和第二项之和为各航线上配置的所有船舶的周总运费收入之和;第三项为船公司在每条航线上所有船舶的周燃油成本之和,也可以理解为每条航线单艘船舶完成一个航次所消耗的燃油成本之和;第四项表示船公司在各条航线上所配船舶的周固定营运成本之和.式(9)表示各航线船舶数量约束;式(10)和式(11)表示各航线港口对之间船舶运输集装箱货物所允许的最大运输时间约束;式(12)和式(13)为各航线各航段货运量应满足港口对之间集装箱运输需求;式(14)为各航线所配船型的舱容约束,即各航线所配船型一定要满足航线货运量需求;式(15)和式(16)表示各航线船舶长航段航速变量范围约束;式(17)表示配置同一种类型的船舶数量变量不能超过可租用的该种类型的船舶数量;式(18)表示每条航线仅配置一种类型的船舶(船舶类型 0-1 变量约束);式(19)表示每条航线船舶数量变量的整数约束;式(20)表示 0-1 变量约束;式(21)表示考虑货物时间价值之后,各航线上两个港口间即期市场客户的集装箱运费率变量为正实数.

3.4 结合枚举的离散化算法

模型(8)为非线性混合整数规划模型,式(8)中航线 r 上港口 i 到港口 j 的集装箱运费率 y_{rij} 包含往返长航段船舶航速(s_{vrN_r} 和 $s_{vrN_r+M_r}$)的倒数项,同时船舶往返航次的燃油总成本中也包含这两个决策变量的平方项;此外,约束条件式(9)~式(11)中包含决策变量 s_{vrN_r} 和 $s_{vrN_r+M_r}$ 的倒数项,式(19)包含配船数量的整数项 m_{vr} ,式(20)包含船型选择的整数变量 x_{vr} ,以及式(21)各航线港口对间即期市场客户运费率 y_{rij} 的正实数约束,使得模型难以直接求解.另外,由于在航运实际中,船公司在特定区域内班轮运输网络经营的航线数 N 通常不多,其经营的船舶类型 M 也非常有限,如在东亚-美西区域运营的班轮运输网络中航线数为 4 条,船型为 2 类(见表 1).因此,在满足式(12)~式(14)时,可以容易地枚举确定出较少的 M^N 种各航线所配置船舶类型的组合.在每种确定的航线船型组合下,变量 x_{vr} 可以去掉,如 $\sum_{v=1}^M x_{vr} S_{vrN_r}^*$ 就可以表示为 S_{v_r, rN_r}^* ,此时,式(12)~式(14)也可以省略,这样,模型(8)便可加以简化.为此,本文设计的算法求解步骤如下:

步骤 1 利用枚举法生成各条航线配置船舶的 M^N 种组合,在每个组合下,航线 r 上配置的船型 v 确定, x_{vr} 的取值确定,用 v_r 表示航线 r 上所确定的船型.

步骤 2 在不考虑集装箱货物时间价值的情况下,将每条航线上各航段的船舶航速 $S_{v_r, ri}$ 作为决策变量,此时,模型(8)的目标函数和约束条件中的 $S_{v_r, ri}^*$ 由 $S_{v_r, ri}$ 替代, s_{vrN_r} 由 S_{v_r, rN_r} 替代, $s_{vrN_r+M_r}$ 由 S_{v_r, rN_r+M_r} 替代.

步骤 3 对模型的约束进行线性化处理.定义新的决策变量 $W_{v_r, ri} = 1/S_{v_r, ri}$,且令 $W_{v \min} = 1/S_{v \max}$, $W_{v \max} = 1/S_{v \min}$,此时,模型(8)即可转换为如下等价模型.

$$\begin{aligned} \text{Max } Z = & \sum_{r=1}^R \sum_{i=1}^{N_r} \sum_{j=N_r+1}^{N_r+M_r} [\gamma_{rij} D_{rij} y_{rij} + \alpha_{rij} (1 - \gamma_{rij}) D_{rij} Y_{rij}] + \\ & \sum_{r=1}^R \sum_{i=N_r+1}^{N_r+M_r} \sum_{j=1}^{N_r} [\gamma_{rij} D_{rij} y_{rij} + \alpha_{rij} (1 - \gamma_{rij}) D_{rij} Y_{rij}] - \\ & \frac{P}{24} \sum_{r=1}^R \sum_{i=1}^{N_r+M_r} \frac{F_{v_r}}{(S_{v_r})^3} L_{ri} W_{v_r, ri}^{-2} - \sum_{r=1}^R C_{v_r} m_{v_r, r}, \end{aligned} \quad (22)$$

s.t.

$$\sum_{i=1}^{N_r+M_r} L_{ri} W_{v_r, ri} + \sum_{i=1}^{N_r+M_r} T_{ri} \leq 168 m_{v_r, r}, \quad \forall v \in \Omega, r \in \Phi, \quad (23)$$

$$\sum_{k=i}^{j-1} L_{rk} W_{v_r, rk} + \sum_{k=i}^j T_{rk} \leq T_{rij}, \quad \forall v \in \Omega, r \in \Phi, i \in A_r, j \in B_r, \quad (24)$$

$$\sum_{k=i}^{N_r+M_r} L_{rk} W_{v,rk} + \sum_{k=1}^{j-1} L_{rk} W_{v,rk} + \sum_{k=i}^{N_r+M_r} T_{rk} + \sum_{k=1}^j T_{rk} \leq T_{rij},$$

$$\forall v \in \Omega, r \in \Phi, i \in B_r, j \in A_r, \quad (25)$$

$$W_{v \min} \leq W_{v,ri} \leq W_{v \max}, \quad \forall v \in \Omega, i \in \{1, 2, \dots, N_r + M_r\}, \quad (26)$$

$$m_{v,r} \in Z^+ \cup \{0\}, \quad \forall v \in \Omega, r \in \Phi, \quad (27)$$

$$y_{rij} \in R^+, \quad \forall r \in R, i \in A_r \cup B_r, j \in A_r \cup B_r. \quad (28)$$

在模型(22)中, 约束条件都转化成了线性约束, 只有目标函数的第三项中包含非线性项 $W_{v,ri}^{-2}$.

步骤4 将变量 $W_{v,ri}$ 在其定义区间 $[W_{v \min}, W_{v \max}]$ 做离散化处理. 船舶航速以节为单位, 在航运实践运营决策中, 航速取值通常取到小数点后一位. 据此, 本文将船舶航速按照 0.1 节的间隔进行离散, 令

$$Q_v = 10(S_{v \max} - S_{v \min}). \quad (29)$$

此时, 船舶航速被等间隔地划分为 Q_v+1 个取值, $v \in \Omega$, 即

$$S_{vq_v} = S_{v \min} + 0.1q_v, \quad \forall v \in \Omega, q_v \in \{0, 1, \dots, Q_v\}. \quad (30)$$

相应的, W_{vq_v} 也有 Q_v+1 个取值, 即

$$W_{vq_v} = 1/S_{vq_v}, \quad \forall v \in \Omega, q_v \in \{0, 1, \dots, Q_v\}. \quad (31)$$

W_{vq_v} 的取值如图 1 所示.

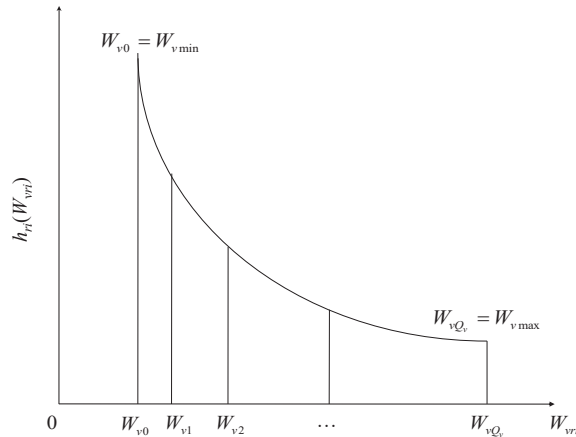


图1 决策变量的离散化处理

Fig. 1 Discretization of decision variables

模型(22)中每个决策变量 $W_{v,ri}$ 的最优值均在集合 $\{W_{vq_v}, v \in \Omega, q_v \in \{0, 1, \dots, Q_v\}\}$ 中选取, 为了决策出航线 r 上航段 i 的船舶航速值, 定义 0-1 变量如下.

$$\beta_{v,riq_v} = \begin{cases} 1, & W_{v,ri} = W_{vq_v} \\ 0, & W_{v,ri} \neq W_{vq_v}, \quad \forall v \in \Omega, q_v \in \{0, 1, \dots, Q_v\}, \end{cases} \quad (32)$$

则有

$$W_{v,ri} = \sum_{q_v=0}^{Q_v} W_{vq_v} \beta_{v,riq_v}. \quad (33)$$

此时, 模型(22)可以转化为模型(34).

$$\begin{aligned} \text{Max } Z = & \sum_{r=1}^R \sum_{i=1}^{N_r} \sum_{j=N_r+1}^{N_r+M_r} [\gamma_{rij} D_{rij} y_{rij} + \alpha_{rij} (1 - \gamma_{rij}) D_{rij} Y_{rij}] + \\ & \sum_{r=1}^R \sum_{i=N_r+1}^{N_r+M_r} \sum_{j=1}^{N_r} [\gamma_{rij} D_{rij} y_{rij} + \alpha_{rij} (1 - \gamma_{rij}) D_{rij} Y_{rij}] - \\ & \frac{P}{24} \sum_{r=1}^R \sum_{i=1}^{N_r+M_r} \frac{F_{v_r}}{(S_{v_r})^3} L_{ri} \sum_{q_v=0}^{Q_v} (W_{vq_v})^{-2} \beta_{v_r,riq_v} - \sum_{r=1}^R C_{v_r} m_{v_r,r}, \end{aligned} \quad (34)$$

s. t.

$$\sum_{i=1}^{N_r+M_r} L_{ri} \sum_{q_v=0}^{Q_v} W_{vq_v} \beta_{v_r,riq_v} + \sum_{i=1}^{N_r+M_r} T_{ri} \leq 168 m_{v_r,r}, \quad \forall v \in \Omega, r \in \Phi, \quad (35)$$

$$\sum_{k=i}^{j-1} L_{rk} \sum_{q_v=0}^{Q_v} W_{vq_v} \beta_{v_r,rkq_v} + \sum_{k=i}^j T_{rk} \leq T_{rij}, \quad \forall v \in \Omega, r \in \Phi, i \in A_r, j \in B_r, \quad (36)$$

$$\sum_{k=i}^{N_r+M_r} L_{rk} \sum_{q_v=0}^{Q_v} W_{vq_v} \beta_{v_r,rkq_v} + \sum_{k=1}^{j-1} L_{rk} \sum_{q_v=0}^{Q_v} W_{vq_v} \beta_{v_r,rkq_v} + \sum_{k=i}^{N_r+M_r} T_{rk} + \sum_{k=1}^j T_{rk} \leq T_{rij}, \quad (37)$$

$$W_{v \min} \leq \sum_{q_v=0}^{Q_v} W_{vq_v} \beta_{v_r,riq_v} \leq W_{v \max}, \quad \forall v \in \Omega, r \in \Phi, i \in \{1, 2, \dots, N_r + M_r\}, \quad (38)$$

$$\sum_{q_v=0}^{Q_v} \beta_{v_r,riq_v} = 1, \quad \forall v \in \Omega, r \in \Phi, i \in \{1, 2, \dots, N_r + M_r\}, \quad (39)$$

$$\beta_{v_r,riq_v} \in \{0, 1\}, \quad \forall v \in \Omega, r \in \Phi, i \in \{1, 2, \dots, N_r + M_r\}, q_v \in \{0, 1, \dots, Q_v\}, \quad (40)$$

$$m_{v_r,r} \in Z^+ \cup \{0\}, \quad \forall v \in \Omega, r \in \Phi, \quad (41)$$

$$y_{rij} \in R^+, \quad \forall r \in R, i \in A_r \cup B_r, j \in A_r \cup B_r. \quad (42)$$

步骤 5 求解船舶航速 $S_{v_r,ri}^*$. 很明显, 转换后的模型(34)为整数线性规划模型, 其决策变量仅包含 0-1 变量 β_{v_r,riq_v} 以及整数变量 $m_{v_r,r}$, 可以利用 CPLEX 对模型(34)进行求解, 得到船公司周总利润最大时的 $W_{v_r,ri}^*$ 值, 进而间接求得 v 型船舶在航线 r 航段 i 的最优航速 $S_{v_r,ri}^*$.

步骤 6 仿照步骤 3 和步骤 4, 对模型(8)中的变量 s_{vrN_r} 和 $s_{vrN_r+M_r}$ 进行线性化和离散化处理, 将模型(8)转化为模型(43).

$$\begin{aligned} \text{Max } Z = & \sum_{r=1}^R \sum_{i=1}^{N_r} \sum_{j=N_r+1}^{N_r+M_r} \left\{ \left[Y_{rij} + \frac{\phi U_r \rho}{24 \times 365} \left(\frac{L_{rN_r}}{S_{v_r,rN_r}^*} - L_{rN_r} \sum_{q_v=0}^{Q_v} W_{vq_v} \beta_{v_r,rN_rq_v} \right) \right] \times \right. \\ & \left. \gamma_{rij} D_{rij} + \alpha_{rij} (1 - \gamma_{rij}) D_{rij} Y_{rij} \right\} + \\ & \sum_{r=1}^R \sum_{i=N_r+1}^{N_r+M_r} \sum_{j=1}^{N_r} \left\{ \left[Y_{rij} + \frac{\phi U_r \rho}{24 \times 365} \left(\frac{L_{rN_r+M_r}}{S_{v_r,rN_r+M_r}^*} - L_{rN_r+M_r} \sum_{q_v=0}^{Q_v} W_{vq_v} \beta_{v_r,rN_r+M_rq_v} \right) \right] \times \right. \\ & \left. \gamma_{rij} D_{rij} + \alpha_{rij} (1 - \gamma_{rij}) D_{rij} Y_{rij} \right\} - \\ & \frac{P}{24} \sum_{r=1}^R \frac{F_{v_r}}{(S_{v_r})^3} \left(\sum_{i=1}^{N_r-1} L_{ri} S_{v_r,ri}^{*2} + \sum_{i=N_r+1}^{N_r+M_r-1} L_{ri} S_{v_r,ri}^{*2} + L_{rN_r} \sum_{q_v=0}^{Q_v} (W_{vq_v})^{-2} \beta_{v_r,rN_rq_v} + \right. \end{aligned}$$

$$L_{rN_r+M_r} \sum_{q_v=0}^{Q_v} (W_{vq_v})^{-2} \beta_{v,rN_r+M_rq_v} \Big) - \sum_{r=1}^R C_{v_r} m_{v_r r}, \quad (43)$$

s.t.

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^{N_r-1} \frac{L_{ri}}{S_{v_r r i}^*} + \sum_{i=N_r+1}^{N_r+M_r-1} \frac{L_{ri}}{S_{v_r r i}^*} + L_{rN_r} \sum_{q_v=0}^{Q_v} W_{vq_v} \beta_{v,rN_rq_v} + \\ & L_{rN_r+M_r} \sum_{q_v=0}^{Q_v} W_{vq_v} \beta_{v,rN_r+M_rq_v} + \sum_{i=1}^{M_r+N_r} T_{ri} \leq 168m_{v_r r}, \quad \forall v \in \Omega, r \in \Phi, \end{aligned} \quad (44)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{k=i}^{N_r-1} \frac{L_{rk}}{S_{v_r r k}^*} + \sum_{k=N_r+1}^{j-1} \frac{L_{rk}}{S_{v_r r k}^*} + L_{rN_r} \sum_{q_v=0}^{Q_v} W_{vq_v} \beta_{v,rN_rq_v} + \sum_{k=i}^j T_{rk} \leq T_{rij}, \quad \forall v \in \Omega, \\ & r \in \Phi, i \in A_r, j \in B_r, \end{aligned} \quad (45)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{k=i}^{N_r+M_r-1} \frac{L_{rk}}{S_{v_r r k}^*} + L_{rN_r+M_r} \sum_{q_v=0}^{Q_v} W_{vq_v} \beta_{v,rN_r+M_rq_v} + \sum_{k=1}^{j-1} \frac{L_{rk}}{S_{v_r r k}^*} + \sum_{k=i}^{N_r+M_r} T_{rk} + \sum_{k=1}^j T_{rk} \leq \\ & T_{rij}, \quad \forall v \in \Omega, r \in \Phi, i \in B_r, j \in A_r, \end{aligned} \quad (46)$$

$$W_{v \min} \leq \sum_{q_v=0}^{Q_v} W_{vq_v} \beta_{v,rN_rq_v} \leq W_{v \max}, \quad \forall v \in \Omega, r \in \Phi, \quad (47)$$

$$W_{v \min} \leq \sum_{q_v=0}^{Q_v} W_{vq_v} \beta_{v,rN_r+M_rq_v} \leq W_{v \max}, \quad \forall v \in \Omega, r \in \Phi, \quad (48)$$

$$\sum_{q_v=0}^{Q_v} \beta_{v,rN_rq_v} = 1, \quad \forall v \in \Omega, r \in \Phi, \quad (49)$$

$$\sum_{q_v=0}^{Q_v} \beta_{v,rN_r+M_rq_v} = 1, \quad \forall v \in \Omega, r \in \Phi, \quad (50)$$

$$\beta_{v,rN_rq_v} \in \{0, 1\}, \quad \forall v \in \Omega, r \in \Phi, q_v \in \{0, 1, \dots, Q_v\}, \quad (51)$$

$$\beta_{v,rN_r+M_rq_v} \in \{0, 1\}, \quad \forall v \in \Omega, r \in \Phi, q_v \in \{0, 1, \dots, Q_v\}, \quad (52)$$

$$m_{v_r r} \in Z^+ \cup \{0\}, \quad \forall v \in \Omega, r \in \Phi, \quad (53)$$

$$y_{rij} \in R^+, \quad \forall r \in R, i \in A_r \cup B_r, j \in A_r \cup B_r, \quad (54)$$

其中式(49)和式(50)分别表示船舶在各航线去程长航段和回程长航段上只能选择一个最优航速值。

步骤7 利用 CPLEX 求解。显然, 转换后的模型(43)也仅含有 0-1 变量 β_{v,rN_rq_v} , $\beta_{v,rN_r+M_rq_v}$ 和整数变量 $m_{v_r r}$ 的整数线性规划模型, 利用 CPLEX 对模型(43)求解, 得到各航线最优的 w_{v,rN_r}^* , $w_{v,rN_r+M_r}^*$ 和最优的配船数量 $m_{v_r r}^*$, 从而可以得到去程长航段的船舶最优航速 $s_{v,rN_r}^* = \frac{1}{w_{v,rN_r}^*}$ 以及回程长航段的船舶最优航速 $s_{v,rN_r+M_r}^* = \frac{1}{w_{v,rN_r+M_r}^*}$ 。

步骤8 遍历所有航线船型组合, 根据步骤2至步骤7, 依次计算出每个组合下船公司周总利润大小, 选取使船公司周总利润最大的组合作为各航线最终的配船类型, 并将此组合下各航线的最优配船数量以及最优船舶航速作为最终优化决策结果, 算法结束。

4 算例分析

4.1 数据搜集

以表1所示的某船公司在东亚-美西贸易区域内运营的班轮网络及船型为例, 考虑到航线货运需求变化

及燃油价格波动等因素, 船公司需要进行航线配船和航速优化决策. 船舶在四条航线各个港口的停泊时间由该公司网站查阅获得, 如表 3 所示.

表 3 船舶在各港停泊时间/h

Table 3 The berthing time of containerships in each port / h

港口序号	1	2	3	4	5	6
航线 1	20	48	20	83.5	35	—
航线 2	8	28	36	36	72	35.5
航线 3	22	22	20	61	24	—
航线 4	17	43	15	91	15	—

假定该船公司拥有最大载箱量为 10 060 TEU 和 8 400 TEU 的船舶各 12 艘, 船舶其它相关数据均取自 Brouer 等^[25] 建立的标准算例库 LINER-LIB-2012, 如表 4 所示.

表 4 船舶信息

Table 4 The information of containerships

最大载箱量 / TEU	周固定营运成本 / USD	最小航速 / 节	设计航速 / 节	最大航速 / 节	船舶在设计航速下的燃油消耗 / t / d
10 060	269 500	18.0	23.0	28.0	222.9
8 400	245 000	18.0	22.5	28.0	208.4

限于篇幅, 表 5 仅列出了航线 1 港口对间的未来一段时期周集装箱货物运输需求量、运费率和最大允许运输时间信息. 其中运费率和船公司对客户承诺的最大允许运输时间数据取自该公司网站公布的信息. 由于货运需求数据属于商业机密, 故难以从该公司直接获得. 为此, 本文在市场调研的基础上, 对标准算例库^[25]中的货运需求数据进行适当调整而获得. 需求量为假定的未来预测值, 运费率和船公司对客户承诺的港口对间最大允许运输时间来自船公司公布的数据. 表 5 中, 决策期内的平均燃油价格为 500 USD/t, 集装箱货物的单位价值为 250 000 美元. 货物时间价值系数取值为 8%. 另外, 假设各港口对间即期市场客户运输需求量的比例系数均为 60%, 船公司获得的客户货物时间价值收益共享系数为 60%, 长约客户的基本运费率折扣为 90%. 各航段距离取自算例库(这里从略)^[25].

表 5 航线 1 港口对间的信息

Table 5 The information of port pairs on route one

起始港	目的港	需求量 / TEU	运费率 / (USD/TEU)	最大允许运输时间 / h
连云港	长滩	846	1 150	432
连云港	西雅图	835	1 055	624
上海	长滩	1 723	1 050	336
上海	西雅图	1 687	1 075	528
宁波	长滩	1 665	1 163	312
宁波	西雅图	1 522	900	504
长滩	连云港	768	875	336
长滩	上海	1 627	800	408
长滩	宁波	1 506	820	456
西雅图	连云港	844	820	456
西雅图	上海	1 695	780	528
西雅图	宁波	1 623	800	576

4.2 算例结果分析

利用 CPLEX 对模型进行求解. 首先, 根据求解步骤 1 至步骤 5, 求得船公司不考虑货物时间价值时的采取统一定价下的结果; 然后, 在此基础上, 根据求解步骤 6 至步骤 8, 求得考虑货物时间价值时的差异定价的结果, 如表 6 所示.

由表 6 可见, 船公司在未考虑货物时间价值时所采取的统一定价策略, 与在考虑货物时间价值时所采取的差异定价策略, 所得到的航线配置船型结果是一致的, 但与表 1 中的原方案相比, 航线 1 和航线 3 配置的

船型发生了互换改变. 这表明各航线配置的船舶类型与航线货运需求量有关, 与是否考虑货物时间价值无关. 原因在于, 船公司在本决策期进行班轮网络航线配船与航速优化决策时, 各航线上货运需求量选用的是本决策期预测数据. 因此, 当各决策期货运需求量预测数据出现不同时, 船公司配置在各航线上的船舶类型可能会发生改变, 以便在船舶运力与货运需求相匹配的条件下实现船公司收益最大化的目标.

表 6 航线配船与航速优化结果
Table 6 The optimization results of fleet deployment and sailing speed

定价策略	航线	最大载箱量 / TEU	船舶航速 / 节						配船数量	周总利润 / USD	船公司周总利润 / USD
			航段 1	航段 2	航段 3	航段 4	航段 5	航段 6			
统一定价	航线 1	8 400	18.0	18.0	18.5	18.5	18.7	—	6	11 564 712	47 693 328
	航线 2	8 400	19.7	19.5	19.6	20.0	19.7	19.8	5	12 699 955	
	航线 3	10 060	18.0	19.5	19.2	18.0	18.0	—	5	12 569 105	
	航线 4	10 060	20.6	20.7	19.9	20.8	20.8	—	5	10 859 556	
差异定价	航线 1	8 400	18.0	18.0	20.7	18.5	20.6	—	5	11 867 175	48 238 192
	航线 2	8 400	19.7	19.5	19.6	20.3	19.7	20.5	5	12 703 190	
	航线 3	10 060	18.0	19.5	24.0	18.0	23.6	—	4	12 719 649	
	航线 4	10 060	20.6	20.7	24.8	23.9	20.8	—	4	10 948 178	

此外, 由表 1 还可看出, 本文提出的差异定价策略与传统的统一定价策略相比, 除航线 2 船舶配置数量保持不变外, 另外 3 条航线的船舶配置数量都减少了 1 艘, 这表明各航线配置的船舶的数量与是否考虑货物时间价值有关. 此外, 在 4 条航线的往返长航段上船舶航速均有所提高. 其中, 航线 1 去程航段 3(宁波-长滩)的船舶航速从 18.5 节增加到 20.7 节, 回程航段 5(西雅图-连云港)的船舶航速从 18.7 节增加到 20.6 节; 航线 2 去程航段 4(宁波-洛杉矶)的船舶航速从 20.0 节增加到 20.3 节, 回程航段 6(奥克兰-东京)的船舶航速从 19.8 节增加到 20.5 节; 航线 3 去程航段 3(宁波-洛杉矶)的船舶航速从 19.2 节增加到 24.0 节, 回程航段 5(奥克兰-青岛)的船舶航速从 18.0 节增加到 23.6 节; 航线 4 去程航段 3(釜山-长滩)的船舶航速从 19.9 节增加到 24.8 节, 回程航段 4(长滩-釜山)的船舶航速从 20.8 节增加到 23.9 节; 船公司的周总利润从 47 693 328 USD 增加到 48 238 192 USD. 研究表明, 考虑货物时间价值能够提高船公司的周总利润. 这是由于, 当船公司考虑货物时间价值时, 船舶在各航线往返长航段的航行速度便会得以提高, 这虽然会导致燃油成本的增加, 但是由于可以节省货物运输时间, 增加客户的货物时间价值收益, 从而使得船公司可以通过对即期市场客户采取差异定价策略, 提高其班轮运输收益. 船舶航速的提高, 还有可能减少航线配置船舶的数量, 从而减少船公司的船舶固定运营成本.

由于货物时间价值收益共享系数是影响运费率的重要因素, 燃油价格是影响燃油成本的关键因素. 为此, 本文以下针对货物时间价值收益共享系数及燃油价格两个参数进行敏感性分析. 当考虑货物时间价值时, 令货物时间价值收益共享系数在 $[0, 1]$ 区间范围内变化, 其它参数不变, 可得船公司周总利润和航线 1 去程长航段船舶航速的变化情况, 结果如图 2 所示.

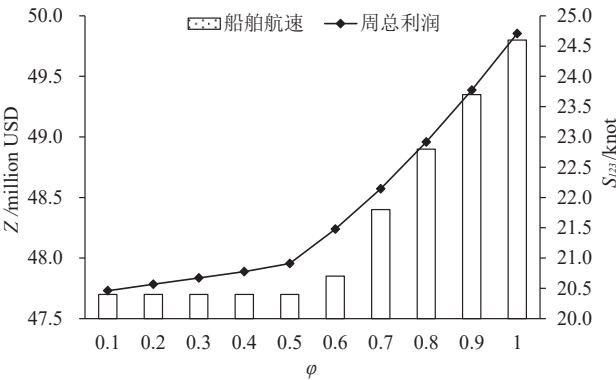


图 2 货物时间价值收益共享系数敏感性分析

Fig. 2 Sensitivity analysis of cargo time value sharing rate

由图2可以看出,随着货物时间价值收益共享系数的增大,船公司周总利润也随之提高,在航线1上去程长航段船舶航速也呈上升趋势.这是由于,当考虑货物时间价值时,船公司对即期市场客户采取了差异定价策略,此时,货物时间价值收益共享系数越大,船公司对即期市场客户的运费率就越高,船公司获得的运输收益增加就越明显.与此类似,随着货物的时间价值收益共享系数的变大,在长航段上提高船舶航速,为船公司增加的运费收益就会大于燃油消耗量增大所增加的燃油成本,因此,船公司就会更倾向于提高船舶航速.

令燃油价格在一定的区间范围内变化,其它参数保持不变,当分别考虑和不考虑货物时间价值时,则可得船公司周总利润和航线1去程长航段船舶航速的变化情况,结果如图3所示.

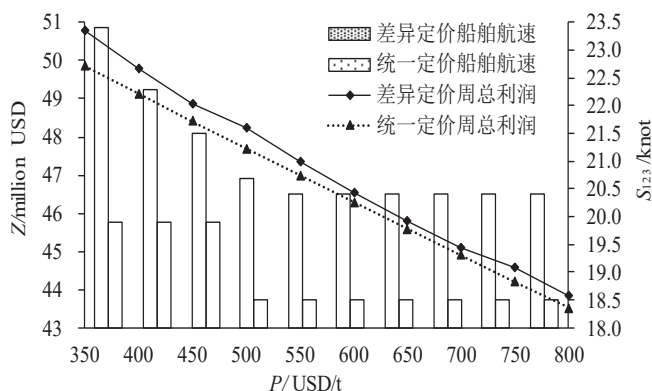


图3 燃油价格敏感性分析

Fig. 3 Sensitivity analysis of fuel price

由图3可见,随着燃油价格的升高,两种定价策略下的船公司周总利润都呈下降趋势,在航线1上去程长航段船舶航速也都呈下降趋势.这是由于燃油价格升高,必然导致燃油成本的增加,从而使船公司的周总利润降低,而且,在其它条件不变的情形下,由于船舶每天的燃油消耗量与航速的立方成比例,在燃油价格升高时,减低航速是降低燃油成本的有效措施.此外,从图3中还可以看出,无论燃油价格如何变化,在考虑货物时间价值时,船公司周总利润均高于不考虑时的总利润,在航线1上去程长航段的船舶航速也均高于不考虑货物时间价值时的船舶航速.究其原因,是因为当考虑货物时间价值时,船公司便会提高在各航线往返长航段的船舶航速,对即期市场客户采取更高的班轮差异运费率,从而带来额外的运输收益,故船公司的周总利润要高于不考虑时的总利润.

5 结束语

本文基于时间价值原理,研究了考虑集装箱货物时间价值的洲际班轮航线配船与航速优化问题,为船公司提高班轮运输收益和市场竞争能力提供了一种新的解决方案.本文的贡献在于建立了洲际班轮航线往返长航段航速调整与即期市场运费率间的函数关系,将集装箱货物的时间价值因素转化为船公司的班轮运费收入因素,提高了船公司的班轮运输收益.

本文结论对船公司的管理启示如下:第一,在航距长、运量大的洲际班轮运输中,货物时间价值是关乎货主利益得失的一个重要因素.船公司应该积极掌握货物价值及其时间敏感度信息,从而制订出集装箱货物的差异运费率,以有效提高船公司的班轮运输收益;第二,燃油成本是集装箱班轮运输成本中的最主要构成部分,也与船舶航速的立方近似成正比.船公司需要密切关注和预测燃油价格变化趋势,确定最优的各航段船舶航速;第三,班轮运输网络航线配与航速优化是一项中期战术性决策,对提高船公司班轮运输收益和改善客户服务水平至关重要.船公司应统筹优化调配网络航线上的各类型船舶,灵活合理地配置在网络各航线上,以实现船公司班轮运输网络航线总收益最大化的目标.

由于班轮航线运费率变化可能会对集装箱货运需求量产生影响,进而会影响船公司的班轮运输收益。此外,港口拥堵会延误集装箱货物的运送时间,也会给客户造成一定的损失,进而会影响船公司分享的货物时间价值收益。因此,考虑班轮运费率与货运需求联动关系,以及考虑港口拥堵因素的班轮网络航线配船与航速优化问题也值得进一步研究。

参考文献:

- [1] Wang T, Xing Z, Hu H T, et al. Overbooking and delivery-delay-allowed strategies for container slot allocation. *Transportation Research, Part E: Logistics and Transportation Review*, 2019, 122: 433–447.
- [2] Dulebenets M A, Osguven E E. Vessel scheduling in liner shipping: Modeling transport of perishable assets. *International Journal of Production Economics*, 2017, 184: 141–156.
- [3] Ng M W. Distribution-free vessel deployment for liner shipping. *European Journal of Operational Research*, 2014, 238(3): 858–862.
- [4] 赵宇哲, 周晶淼, 迟国泰. 竞争环境下轴-辐式海运网络设计与定价决策. *系统工程学报*, 2018, 33(5): 41–52.
Zhao Y Z, Zhou J M, Chi G T. Hub-and-spoke shipping network design and pricing decision in a competitive environment. *Journal of Systems Engineering*, 2018, 33(5): 41–52. (in Chinese)
- [5] Meng Q, Wang T S. A chance constrained programming model for short-term liner ship fleet planning problems. *Maritime Policy & Management*, 2010, 37(4): 329–346.
- [6] Wang S N, Gao S X, Tan T Z, et al. Bunker fuel cost and freight revenue optimization for a single liner shipping service. *Computers and Operations Research*, 2019, 111: 67–83.
- [7] 腾讯网. 中美海运贸易“持续火爆”: 运费飙涨 167%, 船船爆舱一箱难求. <https://xw.qq.com/cmsid/20200825A0MDWH00>, 2020–8–25/2022–3–30.
Tencent. The maritime trade between China and US continues to be hot: freight rates soared by 167 % and it's hard to find a shipping space available on the voyage. <https://xw.qq.com/cmsid/20200825A0MDWH00>, 2020–8–25/2022–3–30.
- [8] Dulebenets M A, Pasha J, Abioye O F, et al. Vessel scheduling in liner shipping: A critical literature review and future research needs. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 2021, 33(1): 43–106.
- [9] Wang C X, Chen J J. Strategies of refueling, sailing speed and ship deployment of containerships in the low-carbon background. *Computers & Industrial Engineering*, 2017, 114: 142–150.
- [10] De A, Choudhary A, Turkay M, et al. Bunkering policies for a fuel bunker management problem for liner shipping networks. *European Journal of Operational Research*, 2021, 289(3): 927–939.
- [11] Wang S, Meng Q. Container liner fleet deployment: A systematic overview. *Transportation Research, Part C: Emerging Technologies*, 2017, 77: 389–404.
- [12] Ronen D. The effect of oil price on containership speed and fleet size. *Journal of the Operational Research Society*, 2011, 62(1): 211–216.
- [13] Gelareh S, Meng Q. A novel modeling approach for the fleet deployment problem within a short-term planning horizon. *Transportation Research, Part E: Logistics & Transportation Review*, 2010, 46(1): 76–89.
- [14] Xia J, Li K X, Ma H, et al. Joint planning of fleet deployment, speed optimization, and cargo allocation for liner Shipping. *Transportation Science*, 2015, 49(4): 922–938.
- [15] Zhen L, Hu Y, Wang S, et al. Fleet deployment and demand fulfillment for container shipping liners. *Transportation Research, Part B: Methodological*, 2019, 120: 15–32.
- [16] Wang N, Yan B, Wu N, et al. Comments on “case studies of shipping along arctic routes. Analysis and profitability perspectives for the container sector”. *Transportation Research, Part A: Policy & Practice*, 2016, 94: 699–702.
- [17] Zhen L, Wang S A, Laporte G, et al. Integrated planning of ship deployment, service schedule and container routing. *Computers and Operations Research*, 2019, 104: 304–318.
- [18] Yao Q, Xu L, Zhang Q. Container slot allocation for time-sensitive cargo in maritime transportation: A one-phase model with consideration of port congestion. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2021: 1–11.

- [19] 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. *Transportation Research, Part E: Logistics and Transportation Review*, 2020, 144: 1–16.
- [20] 邢玉伟, 杨华龙, 马雪菲. 差异化定价策略下的远洋班轮航速与航线配船优化. *系统工程理论与实践*, 2018, 38(12): 3222–3234. Xing Y W, Yang H L, Ma X F. Optimization of containership sailing speed and fleet deployment for continental ocean liner based on freight rate differentiation strategy. *Systems Engineering: Theory & Practice*, 2018, 38(12): 3222–3234. (in Chinese)
- [21] 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. *运筹与管理*, 2018, 27(10): 1–10. Wang T S, Li M. Two-phase container slot allocation for time-sensitive cargo. *Operations Research and Management Science*, 2018, 27(10): 1–10. (in Chinese)
- [22] 孙赫迎, 曾庆成, 菅文涛, 等. 考虑托运人估值不确定的航运企业在线预售定价模型. *系统工程学报*, 2021, 36(1): 59–73. Sun H Y, Zeng Q C, Jian W T, et al. Shipping company online pre-sale pricing model considering shipper valuation uncertainty. *Journal of Systems Engineering*, 2021, 36(1): 59–73. (in Chinese)
- [23] 宫晓婷, 迟国泰, 赵志冲. 防船东欺诈的运费价差合约拍卖模型研究. *系统工程学报*, 2020, 35(3): 354–415. Gong X X, Chi G T, Zhao Z C. Auction model of shipowners' fraud-resistant for freight spread contracts. *Journal of Systems Engineering*, 2020, 35(3): 354–415. (in Chinese)
- [24] Meng Q, Zhao H, Wang Y. Revenue management for container liner shipping services: Critical review and future research directions. *Transportation Research, Part E: Logistics and Transportation Review*, 2019, 128: 280–292.
- [25] Brouer B D, Alvarez J F, Plum C E M, et al. A base integer programming model and bench mark suite for liner-shipping network design. *Transportation Science*, 2014, 48(2): 281–312.

作者简介:

邢玉伟(1990—), 女, 辽宁朝阳人, 博士, 讲师, 研究方向: 集装箱运输, Email: xingyuwei1990@dlmu.edu.cn;

杨华龙(1964—), 男, 辽宁大连人, 博士, 教授, 研究方向: 海运物流管理, Email: hlyang@dlmu.edu.cn;

郑建风(1981—), 男, 浙江浦江人, 博士, 教授, 研究方向: 班轮航线设计, Email: jfzheng@dlmu.edu.cn;

宋 巍(1988—), 女, 河南兰考人, 博士生, 研究方向: 班轮运输定价, Email: songwei_198@163.com.