

文章编号:1006-2467(2022)07-0953-12

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2021.105

基于合作协议的集装箱班轮运输船期设计和加油策略联合优化

李德昌, 杨华龙, 段静茹

(大连海事大学 交通运输工程学院, 辽宁 大连 116026)

摘要: 针对码头运营商与船公司间签署船舶到港多时间窗、多起讫时刻和多装卸速率合作协议下的集装箱班轮运输船期设计和加油策略联合优化问题,考虑各加油港燃油价格差异和折扣因素,建立了以班轮运输服务总成本最小化为目标的船期设计和加油策略非线性混合整数规划模型,结合船舶驾驶操控实际,设计了离散化和线性化模型求解技术方法.以中国远洋海运集团有限公司AEX1航线为例进行了大量模拟验证.算例结果显示,船期设计和加油策略联合优化有助于船公司灵活地调整船舶航速,可显著降低班轮运输服务总成本.敏感性分析表明,随着合作协议中船舶到港时间窗长度的扩大,班轮运输服务总成本和船舶航次加油量都随之降低;无论燃油价格如何变化,船期设计和加油策略联合优化都能有效降低班轮运输服务总成本.

关键词: 班轮运输;合作协议;船期设计;加油策略;联合优化

中图分类号: U 692.3

文献标志码: A

A Joint Optimization of Vessel Scheduling and Refueling Strategy for Container Liner Shipping with Cooperative Agreements

LI Dechang, YANG Hualong, DUAN Jingru

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

Abstract: This paper studies the joint optimization problem of vessel scheduling and refueling strategy for container liner shipping with cooperative agreements signed by the container terminal operators and the shipping company with multiple vessel arrival time windows, multiple start and end times, and multiple handling rates. A non-linear mixed integer programming model for vessel scheduling and refueling strategy problem of liner shipping is established considering fuel price difference and discount factors at different refueling ports, which aims to minimize the total cost of liner shipping service. A set of discretization and linearization technique is applied to the original model in accordance with the vessel navigation controlling practice. Taking the AEX1 route served by China COSCO Shipping Corporation Limited as an example, a large number of simulation verifications are conducted. The results of numerical examples show that the joint optimization of vessel scheduling and refueling strategy helps shipping companies to flexibly adjust vessel sailing speed. It can significantly reduce the total cost of liner shipping service. The sensitivity analysis indicates that the total cost of liner shipping service and the vessel refueling volume in a voyage will reduce with the expansion of time window of vessel arrival at port in the cooperative agreement. No

收稿日期:2021-04-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(72071024)

作者简介:李德昌(1994-),男,山东省德州市人,博士生,主要从事集装箱班轮运输研究.

通信作者:杨华龙,男,教授,博士生导师,电话(Tel.):0411-84728392;E-mail:hlyang@dlmu.edu.cn.

matter how the fuel price changes, the joint optimization of vessel scheduling and refueling strategy can effectively reduce the total cost of liner shipping service.

Key words: liner shipping; cooperative agreement; vessel scheduling; refueling strategy; joint optimization

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体,承运的货物具有价值高、种类繁多、交易频繁、时间性强等特点^[1].为此,船公司需要为客户提供周而复始的“定线、定船、定期和定港”班轮运输服务^[2].为了有效地应对集装箱海运市场需求、燃油价格等因素的变化,通常每隔一段时间(3~6个月),船公司便需要根据船舶到离挂靠港口时间窗约束进行集装箱班轮运输船期设计^[3],以便在满足客户集装箱货物运输需求的前提下,实现班轮运输成本最小化目标.随着近年来海运供应链协同的不断深化,船公司与码头运营商间纷纷签署船舶到港多时间窗等合作协议,这不仅放松了船舶到港时间窗约束,也为船公司船舶航速调整和加油策略提供了更多的优化空间.尤其是在当前船用燃油价格剧烈波动的新形势下,研究基于港航合作协议的集装箱班轮船期设计和加油策略联合优化问题具有重要的现实意义.

集装箱班轮运输船期设计问题最早由文献[4]提出,在假定航线货运需求量确定的条件下,其建立了整数线性规划模型,制定出了船舶到/离港口的船期.文献[5]进一步探讨了在需求随机波动,但需求均值和方差已知情况下的船期设计问题,构建了非线性混合整数规划模型.燃油成本在集装箱班轮运输成本中占有很大的比例,有文献研究表明船舶燃油消耗量与速度的立方成正比^[6],故船舶燃油消耗费用与航速成非线性关系^[7],航速优化问题对船公司具有重要的现实意义^[8].据此,文献[9]建立了以航速为变量的船期问题非线性规划模型,并设计了线性逼近算法求解.文献[10]进一步研究了港口具有到达时间限制的航速优化和船期设计问题,建立了非线性规划模型.考虑燃油价格的波动因素及班轮航线上各加油港燃油价格的差异和折扣情况,文献[11]以船公司班轮运输服务总成本最小化为目标函数,建立了船期设计和加油策略的混合整数非线性规划模型,并选用一条亚欧班轮航线进行了实例研究.上述已有研究,从运输需求确定到随机、从船舶航速固定到调整优化、从航线加油港和加油量给定到加油策略选择等因素方面不断深化,为班轮运输经营提供了重要的理论和实践指导,但研究都是

假定船舶到达挂靠港口仅限于某一特定的时间窗内,忽视了船公司与港口码头运营商签署合作协议下的船舶到达港口时间优选问题.

随着近年来船公司与港口间航运供应链融合程度的不断加深,许多港口码头运营商和船公司间签署了船舶到港多时间窗的合作协议^[12].文献[13]评估了多时间窗策略,结果发现多时间窗策略不仅能够影响船舶航速和船期,也能影响班轮运输服务的总成本.有鉴于此,本文通过引入船公司与码头运营商间签署的船舶到港多时间窗、多起讫时刻和多装卸速率合作协议,对班轮运输船期设计和加油策略联合优化问题开展深入的研究,本文的主要贡献包括:

(1) 通过分析多时间窗和多装卸速率下船舶航速与船期设计、加油策略的联动关系机理,构建基于合作协议的船期设计和加油策略非线性混合整数模型,以实现班轮运输船期设计和船舶加油的联合优化.

(2) 引入船舶迟到港口惩罚成本和集装箱货物库存成本,设立包括船舶运营成本、燃油成本、港口装卸成本、迟到港口惩罚成本和集装箱货物库存成本的班轮运输服务总成本最小化目标,以实现船公司、港口码头运营商和客户三方共赢.

(3) 结合船舶驾驶操纵实际,设计先对船舶航速变量加以离散化、再对模型进行线性化的求解算法.在航运实际背景下进行大规模算例模拟验证分析,以便为航运供应链深度融合新形势下的集装箱班轮运输实践应用提供决策参考.

1 问题描述及基本假设

1.1 问题描述

在航运供应链协同的背景下,为了提高港口码头作业和船公司班轮运输组织的效率和效益,船公司纷纷与各船舶挂靠港口码头运营商签署船舶到港多时间窗、多起讫时刻^[14]和多装卸速率合作协议^[15].某船舶到港时间窗有3个开始时刻和3个结束时刻,如图1所示.

由图1可知,船舶到港时间窗的3个可选开始时刻分别为第18 h,第24 h和第30 h,3个可选的

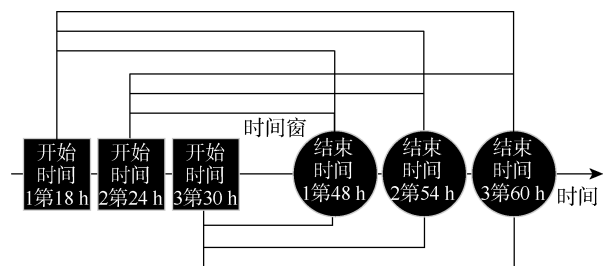


图1 到港时间窗

Fig. 1 Arrival time windows at port

结束时刻分别为第48 h,第54 h和第60 h.假设第0 h为星期日凌晨0点,则到港时间窗的3个开始时刻分别为星期一下午6点、星期二凌晨0点和早上6点;3个结束时刻分别为星期三凌晨0点、早上6点和中午12点,由此可组合出9个不同时段或长度的时间窗.考虑到集装箱码头泊位可用时间资源的稀缺性,这里将船舶到港时间定义为船舶靠泊码头的时.此外,结合码头岸桥等装卸设备的使用情况,港口码头运营商还可提供多种不同费率下的集装箱装卸速率供船公司选择.

为了满足托运人在航线各港口每周的集装箱运输需求,船公司在保证发船频率为周班的条件下,船舶一个往返航次时间(从某一始发港出发,顺序途径各挂靠港装卸货物,最终返回始发港所花费的时间)应为周的整数倍,该整数亦应为航线配置的船舶数量.于是,船公司的船期设计和加油策略问题将包含以下决策内容:① 确定航线船舶配置数量和各航段上船舶的航行速度;② 选定船舶到达和离开港口的时间;③ 选定各挂靠港口的集装箱装卸速率;④ 选择加油港口并确定加油量.决策目标是使船公司的班轮运输服务总成本(包括航线上所有配置船舶的周运营成本、周燃油成本、周港口装卸成本、周集装箱货物库存成本和周迟到港口惩罚成本)最小化.其中,迟到港口惩罚成本是指船舶未能在港口提供的时间窗内按时到达停靠的泊位,发生时间延迟需要承担的惩罚成本.

1.2 基本假设

为了便于建模,本文结合实际作出以下基本假设:

- (1) 班轮航线配置的集装箱船舶类型相同.
- (2) 班轮航线船舶挂靠港口及顺序确定.
- (3) 班轮航线发船频率为周班.

2 优化模型构建

2.1 燃油成本函数

船舶每天燃油消耗量通常与航速的立方成正

比^[6],但考虑到其还与动力装置、自然条件等多种因素密切相关,故可建立船舶在航段 p 燃油消耗量函数为

$$f(v_p) = \frac{F_D D_p}{24 v_D^3} v_p^{\alpha-1} \quad (1)$$

$$\forall p \in P$$

式中: $\alpha(\alpha \approx 3)$ 为船舶燃油消耗速度函数系数,其与船型及航段航行条件等因素相关,可由船舶实际航行统计数据加以校准确定; F_D 为船舶在设计航速下每天的燃油消耗量; D_p 为航段 p (即港口 p 至港口 $p+1$)距离; $P = \{1, 2, \dots, N\}$ 为班轮航线上港口的集合, N 为港口总数, D_N 为港口 N 至港口1的距离; v_D 为船舶的设计航速; v_p 为船舶在航段 p (即港口 p 至港口 $p+1$)上的航速.

于是,船舶一个往返航次的燃油消耗量应等于加油量,即:

$$\sum_{p \in P} (y_{p2} - y_{p1}) = \sum_{p \in P} \frac{F_D D_p}{24 v_D^3} v_p^{\alpha-1} \quad (2)$$

$$\forall p \in P$$

式中: y_{p1} 为船舶到达港口 p 时的燃油库存水平; y_{p2} 为船舶离开港口 p 时的燃油库存水平.

由于班轮航线上船舶挂靠的加油港口相距较远,燃油价格差异较大,加之可能存在价格折扣因素,所以,船舶的加油费用与加油港选择和加油量的确定密切相关.若船舶在港口 p 加油有两次折扣,则船舶在港口 p 的加油费用函数可以表示为^[16]

$$C_p^{\text{fue}} = \begin{cases} C_p^{\text{f0}} (y_{p2} - y_{p1}), & 0 \leq y_{p2} - y_{p1} \leq W_{p1} \\ C_p^{\text{f0}} [W_{p1} + \lambda_{p1} (y_{p2} - y_{p1} - W_{p1})], & W_{p1} < y_{p2} - y_{p1} \leq W_{p2} \\ C_p^{\text{f0}} [W_{p1} + \lambda_{p1} (W_{p2} - W_{p1}) + \lambda_{p2} (y_{p2} - y_{p1} - W_{p2})], & W_{p2} < y_{p2} - y_{p1} \end{cases} \quad (3)$$

$$\forall p \in P$$

式中: W_{p1} 为在港口 p 出现第1次折扣时的加油量; W_{p2} 为在港口 p 出现第2次折扣时的加油量; C_p^{f0} 为港口 p 加油量在 W_{p1} 以内时的单位燃油正常价格; λ_{p1} 为港口 p 加油量在区间 $(W_{p1}, W_{p2}]$ 时的燃油价格第1次折扣率; λ_{p2} 为港口 p 加油量在 W_{p2} 以上时的燃油价格第2次折扣率,且 $\lambda_{p1}, \lambda_{p2}$ 满足 $0 < \lambda_{p2} \leq \lambda_{p1} \leq 1$.

因此,船舶一个往返航次的燃油成本 C^{fc} 为

$$C^{\text{fc}} = \sum_{p \in P} (C^{\text{F}} x_p + C_p^{\text{fue}}) \quad (4)$$

$$\forall p \in P$$

式中: x_p 为0-1变量,即若船舶在港口 p 加油,则等于1,否则等于0; C^{F} 为船舶加油固定费用.

2.2 目标函数

由式(2)和(4)可建立一个船舶往返航次燃油消耗费用与航速间的联系,据此便可建立船期设计和加油策略联合优化模型[M1].

$$\begin{aligned} \min(z) = & C^{\text{oc}}m + \sum_{p \in P} (C_p^{\text{F}}x_p + C_p^{\text{fue}}) + \\ & \sum_{p \in P} \sum_{t \in \Gamma_p} \sum_{h \in \Omega_{pt}} C_{pth}^{\text{hc}} z_{pth} N_p^{\text{por}} + \\ & \sum_{p \in P} C_p^{\text{ic}} N_p^{\text{sea}} \left(\frac{D_p}{v_p} + t_p^{\text{d}} - t_p^{\text{a}} \right) + \sum_{p \in P} C_p^{\text{lc}} t_p^{\text{l}} \quad (5) \\ & \forall p \in P, \quad \forall t \in \Gamma_p, \quad \forall h \in \Omega_{pt} \end{aligned}$$

式中: C^{oc} 为船舶运营成本; m 为班轮航线配置的船舶数量; C_{pth}^{hc} 为在时间窗 t 内、选择装卸费率 h 时,港口 p 的装卸成本; z_{pth} 为 0-1 变量,即若在港口 p 选择时间窗 t 和装卸速率 h ,则等于 1,否则等于 0; N_p^{por} 为港口 p 装卸的集装箱总量; C_p^{ic} 为航段 p 运输的单位集装箱库存成本; N_p^{sea} 为航段 p 运输的集装箱总量; t_p^{a} 为船舶到达港口 p 的时刻; t_p^{d} 为船舶离开港口 p 的时刻; C_p^{lc} 为船舶在港口 p 的迟到处罚成本; t_p^{l} 为船舶到达港口 p 延迟的时间; $\Gamma_p = \{1, 2, \dots, M_p\}$ 为船舶到达港口 p 时间窗的集合, M_p 为时间窗总数; $\Omega_{pt} = \{H_{pt1}, H_{pt2}, \dots, H_{ptL_{pt}}\}$ 为港口时间窗 t 内集装箱装卸速率的集合, L_{pt} 为装卸速率总数. 在模型[M1]中,目标函数式(5)表示航线上班轮运输服务总成本最小化,其中第 1 项为航线上所有船舶的周运营成本;第 2 项为船舶一个往返航次的燃油成本(也等于航线上所有船舶的周燃油成本);第 3 项为船舶一个往返航次的集装箱装卸成本(也等于航线上所有船舶的周装卸成本);第 4 项为船舶一个往返航次的集装箱货物的库存成本(也等于航线上所有船舶的周集装箱货物库存成本);第 5 项为船舶一个往返航次迟到港口的惩罚成本(也等于航线上所有船舶的周迟到港口惩罚成本).

2.3 约束条件

船舶在港口的加油量约束可表示为

$$0.1Wx_p \leq y_{p2} - y_{p1} \leq Wx_p, \quad \forall p \in P \quad (6)$$

式中: W 为船舶油舱的最大容量.

船舶航次的初始燃油量可表示为

$$y_{11} = I_0 \quad (7)$$

式中: I_0 为船舶初始燃油量.

船舶在进出港口时的油量约束可分别表示为

$$y_{p1} \geq 0.1W \quad (8)$$

$$y_{p2} \leq W \quad (9)$$

$$\forall p \in P$$

各航段上船舶航行的燃油消耗量可分别表示为

$$y_{p2} - y_{(p+1)1} = \frac{F_D D_p v_p^{\alpha-1}}{24 v_D^3} \quad (10)$$

$$\forall p \in P, \quad p < N$$

$$y_{N2} - y_{11} = \frac{F_D D_N v_N^{\alpha-1}}{24 v_D^3} \quad (11)$$

船舶只选择一个时间窗到达港口可表示为

$$\sum_{t \in \Gamma_p} x_{pt} = 1 \quad (12)$$

$$\forall p \in P, \quad \forall t \in \Gamma_p$$

式中: x_{pt} 为 0-1 变量,即若船舶在港口 p 选择时间窗 t 内到达,则等于 1,否则等于 0.

船舶只能在选定的时间窗内选择一个开始时刻进行装卸作业,可表示为

$$\sum_{t \in \Gamma_p} \sum_{s \in \Psi_{pt}} x_{pts} = 1 \quad (13)$$

$$x_{pts} \leq x_{pt} \quad (14)$$

$$\forall p \in P, \quad \forall t \in \Gamma_p, \quad \forall s \in \Psi_{pt}$$

式中: x_{pts} 为 0-1 变量,即若在港口 p 选择时间窗 t 的开始时刻 s ,则等于 1,否则等于 0; $\Psi_{pt} = \{S_{pt1}, S_{pt2}, \dots, S_{ptK_{pt}}\}$ 为港口 p 时间窗 t 开始时刻的集合, K_{pt} 为开始时刻总数.

船舶只能在选定的时间窗内选择一个装卸作业结束时刻可表示为

$$\sum_{t \in \Gamma_p} \sum_{e \in \Phi_{pt}} x_{pte} = 1 \quad (15)$$

$$x_{pte} \leq x_{pt} \quad (16)$$

$$\forall p \in P, \quad \forall t \in \Gamma_p, \quad \forall e \in \Phi_{pt}$$

式中: x_{pte} 为 0-1 变量,即若在港口 p 选择时间窗 t 的结束时刻 e ,则等于 1,否则等于 0; $\Phi_{pt} = \{E_{pt1}, E_{pt2}, \dots, E_{ptK_{pt}}\}$ 为港口 p 时间窗 t 结束时刻的集合.

船舶只能在选定的时间窗内选择一个集装箱装卸费率进行作业,可表示为

$$\sum_{t \in \Gamma_p} \sum_{h \in \Omega_{pt}} z_{pth} = 1 \quad (17)$$

$$z_{pth} \leq x_{pt} \quad (18)$$

$$\forall p \in P, \quad \forall t \in \Gamma_p, \quad \forall h \in \Omega_{pt}$$

船舶在港装卸时间约束可表示为

$$t_p^{\text{h}} = \sum_{t \in \Gamma_p} \sum_{h \in \Omega_{pt}} z_{pth} \frac{N_p^{\text{por}}}{H_{pth}}, \quad \forall p \in P \quad (19)$$

式中: t_p^{h} 为船舶在港口 p 的装卸时间.

船舶离开港口的时刻约束可表示为

$$t_p^{\text{d}} = t_p^{\text{a}} + t_p^{\text{w}} + t_p^{\text{h}}, \quad \forall p \in P \quad (20)$$

式中: t_p^{w} 为船舶在港口 p 的等待时间.

船舶迟到港口的时刻约束可表示为

$$t_p^{\text{l}} \geq t_p^{\text{a}} - \sum_{t \in \Gamma_p} \sum_{e \in \Phi_{pt}} E_{pte} x_{pte}, \quad \forall p \in P \quad (21)$$

船舶在后一个港口的等待时间约束可表示为

$$t_{p+1}^w \geq \sum_{t \in \Gamma_{p+1}^s} \sum_{s \in \Psi_{(p+1)t}} S_{(p+1)s} x_{(p+1)ts} - t_p^a - t_p^h - t_p^w - \frac{D_p}{v_p}, \quad \forall p \in P, p < N \quad (22)$$

$$t_1^w \geq \sum_{t \in \Gamma_1^s} \sum_{s \in \Psi_{1t}} S_{1s} x_{1ts} - t_N^a - t_N^h - t_N^w - \frac{D_N}{v_N} + 168m \quad (23)$$

船舶到达港口的时刻约束可表示为

$$t_{p+1}^a = t_p^d + \frac{D_p}{v_p}, \quad \forall p \in P, p < N \quad (24)$$

$$t_1^a = t_N^d + \frac{D_N}{v_N} - 168m \quad (25)$$

船舶一个往返航次的时间应为周的整数倍,也等于 168 h(1 周)乘以航线上配置的船舶数量,则有:

$$\sum_{p \in P} \left(\frac{D_p}{v_p} + t_p^d - t_p^a \right) = 168m \quad (26)$$

船舶航速范围限制可表示为

$$v^{\min} \leq v_p \leq v^{\max}, \quad \forall p \in P \quad (27)$$

式中: v^{\min} 为船舶最小航行速度; v^{\max} 为船舶最大航行速度。

航线上配置的船舶数量约束可表示为

$$m \leq m^{\max} \quad (28)$$

式中: m^{\max} 为航线上允许配置的船舶最大数量。

3 模型求解

3.1 模型分析

由于模型[M1]为一个非线性混合整数模型,目标函数式(5)中既含有航速变量 v_p 的倒数项,约束条件式(10)和(11)中又含有变量 v_p 的幂次方项;式(22)~(26)中均含有变量 v_p 的倒数项,所以难以直接求解^[17]。为此,本文将模型中的变量 v_p 替换为其倒数 $u_p = 1/v_p$,则式(22)~(26)均可变为线性约束,但是式(10)和(11)仍为非线性约束。接下来,本文采用先对变量 v_p 取离散值,再对式(10)和(11)中的燃油消耗量函数线性化处理的方法进行模型求解。

3.2 模型转化

在实际船舶驾驶操纵中,船长设定的航速取值通常到小数点后一位,即到 0.1 kn^[18]。文献[15]的研究表明,将航速变量区间[15, 25] kn 划分 50 等份(即航速间隔长度小于等于 0.2 kn)进行离散取值,便可满足船舶航行燃油消耗量函数离散化的精度要求。因此,本文采用 0.1 kn 为等间隔长度对变量 v_p 进行离散取值符合理论和实践要求,即令

$$Q = \frac{v^{\max} - v^{\min}}{0.1} \quad (29)$$

于是,可将船舶航速等间隔地离散为 $Q+1$ 个取值,则有:

$$v_q = v^{\min} + 0.1q, \quad q \in \{0, 1, \dots, Q\} \quad (30)$$

由此可见,只有当模型[M1]中航速变量的最优值 v_p^* 在集合 $\{v_q, q \in \{0, 1, \dots, Q\}\}$ 中取值,才符合船舶驾驶操纵的实际要求。对应地,船舶航速的倒数也有 $Q+1$ 个 w_q 值,则有:

$$w_q = \frac{1}{v_q}, \quad q \in \{0, 1, \dots, Q\} \quad (31)$$

据此,可对船舶航行燃油消耗量函数 $f(u_p)$ 进行离散化,如图 2 所示。

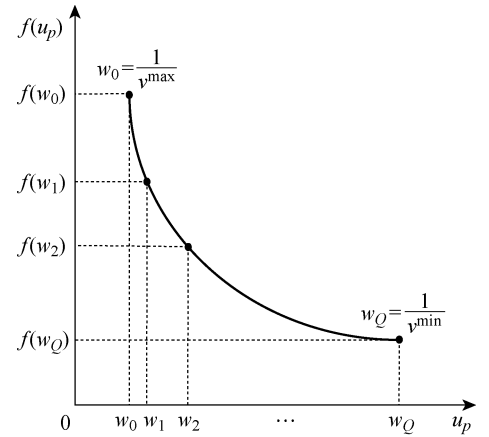


图 2 燃油消耗量函数离散化

Fig. 2 Discretization of fuel consumption function

由图 2 可见,由于航速变量最优值的倒数 u_p^* 只能在集合 $\{w_q, q \in \{0, 1, \dots, Q\}\}$ 中取值,所以船舶航行燃油消耗量函数 $f(u_p)$ 就被处理成离散化函数 $f(u_p) = \{f(w_q), q \in \{0, 1, \dots, Q\}\}$ 。

为了便于模型求解,定义 0-1 变量,则有:

$$\beta_{pq} = \begin{cases} 1, & u_p = w_q, \forall p \in P, q \in \{0, 1, \dots, Q\} \\ 0, & u_p \neq w_q, \forall p \in P, q \in \{0, 1, \dots, Q\} \end{cases} \quad (32)$$

$$u_p = \sum_{q=0}^Q \beta_{pq} w_q, \quad \forall p \in P \quad (33)$$

由此,模型[M1]可以转化为如下模型[M2]。

目标函数:

$$\begin{aligned} \min(z) = & C^{\text{oc}} m + \sum_{p \in P} (C_p^{\text{F}} x_p + C_p^{\text{fuel}}) + \\ & \sum_{p \in P} \sum_{t \in \Gamma_p^h} \sum_{h \in \Omega_{pt}} C_{pth}^{\text{hc}} z_{pth} N_p^{\text{por}} + \\ & \sum_{p \in P} C_p^{\text{ic}} N_p^{\text{sen}} (D_p \sum_{q=0}^Q \beta_{pq} w_q + t_p^d - t_p^a) + \\ & \sum_{p \in P} C_p^{\text{lc}} t_p^1 \end{aligned} \quad (34)$$

约束条件:

$$y_{p2} - y_{(p+1)1} = \frac{F_D D_p \sum_{q=0}^Q \beta_{pq} \omega_q^{1-\alpha}}{24 v_D^3}$$

(35)

$$y_{N2} - y_{11} = \frac{F_D D_N \sum_{q=0}^Q \beta_{Nq} \omega_q^{1-\alpha}}{24 v_D^3}$$

(36)

$$t_{p+1}^w \geq \sum_{t \in \Gamma_{p+1}} \sum_{s \in \Psi_{(p+1)t}} S_{(p+1)ts} x_{(p+1)ts} - t_p^a - t_p^h - t_p^w - D_p \sum_{q=0}^Q \beta_{pq} \omega_q$$

(37)

$$t_1^w \geq \sum_{t \in \Gamma_1} \sum_{s \in \Psi_{1t}} S_{1ts} x_{1ts} - t_N^a - t_N^h - t_N^w - D_N \sum_{q=0}^Q \beta_{Nq} \omega_q + 168m$$

(38)

$$t_{p+1}^a = t_p^d + D_p \sum_{q=0}^Q \beta_{pq} \omega_q$$

(39)

$$t_1^a = t_N^d + D_N \sum_{q=0}^Q \beta_{Nq} \omega_q - 168m$$

(40)

$$\sum_{p \in P} (D_p \sum_{q=0}^Q \beta_{pq} \omega_q + t_p^d - t_p^a) = 168m$$

(41)

$$\frac{1}{v^{\max}} \leq u_p \leq \frac{1}{v^{\min}}$$

(42)

$$\forall p \in P, \forall p \in P, p < N$$

需要说明的是,式(6)~(9)、式(12)~(21)、式(28)与式(35)~(42)共同构成模型[M2]的约束. 显然,模型[M2]为线性混合整数规划模型,故可以用商用软件(如 CPLEX 等)求解,且由于模型[M2]中最优解 u_p^* 只能在集合 $\{w_q, q \in \{0, 1, \cdots, Q\}\}$ 中取值,即 $u_p^* = w_q^*, w_q^* \in \{w_q, q \in \{0, 1, \cdots, Q\}\}$.

u_p^* 对应的倒数值 $v_p^* = \frac{1}{u_p^*} = \frac{1}{w_q^*} = v_q^*, (v_q^* \in \{v_q, q \in \{0, 1, \cdots, Q\}\})$,亦是模型[M1]中航速变量的最优解(见图 2),因此,模型[M2]和模型[M1]的最优解相同.

4 实例数值分析

4.1 数据收集与处理

以中国远洋海运集团有限公司的集装箱班轮 AEX1 航线为例,该航线上船舶一个往返航次挂靠港口依次为:青岛—上海—宁波—盐田—新加坡—巴生—费利克斯托—鹿特丹—汉堡—泽布吕赫—鹿特丹—巴生—盐田—青岛,共计挂靠 13 个港口(船舶挂靠一次计一个港口). 参照文献[11, 16, 19],本文的相关参数数据设置如表 1 所示. 其中:TEU 为以长度为 6.096 m 的集装箱为国际计量单位,也称国际标准箱单位.

各航段距离 D_p 和统计得到近 3 个月各挂靠港口的燃油价格 C_p^{f0} 如表 2 所示.

表 1 相关参数

Tab. 1 Relevant parameters

参数	取值
$\frac{F_D}{v_D^3}$	0.013
α	3
$C^{oc}/(\text{美元} \cdot \text{周}^{-1})$	300 000
W/t	5 000
I_0/t	2 000
$C^F/(\text{美元} \cdot \text{次}^{-1})$	1 000
$C_p^c/(\text{美元} \cdot \text{TEU}^{-1} \cdot \text{h}^{-1})$	0.5
$\lambda_{p1}, \lambda_{p2}/\%$	95, 90
$W_{p1}, W_{p2}/t$	2 000, 3 000
$v^{\min}, v^{\max}/\text{kn}$	15, 25
$m^{\max}/\text{艘}$	10

表 2 港口燃油价格和航段距离

Tab. 2 Port fuel prices and distances

港口	$D_p/\text{n mile}$	$C_p^{f0}/(\text{美元} \cdot \text{t}^{-1})$
青岛	408	429
上海	136	425
宁波	727	438
盐田	1 445	—
新加坡	204	395
巴生	8 012	398
费利克斯托	118	—
鹿特丹	302	372
汉堡	335	288
泽布吕赫	70	—
鹿特丹	8 088	372
巴生	1 649	398
盐田	1 105	—

本文设置船舶迟到港口的惩罚成本 C_p^c 由均匀分布 $U[3\,000, 5\,000]$ 美元/h 随机生成,由于船公司在港口的集装箱装卸量数据属于企业商业机密,为此,本文参照文献[15]在港口装卸集装箱量 N_p^{por} 由均匀分布 $U[500, 2\,000]$ TEU 随机生成,船舶在各航段载运的集装箱量 N_p^{sea} 由均匀分布 $U[8\,000, 12\,000]$ TEU 随机生成.

假设各港口向船公司提供 4 个船舶到港时间窗,每个时间窗分别有 3 个开始时间和 3 个结束时间. 其中,航线上第 1 个港口青岛港提供的 4 个船舶

到港时间窗,以及每个时间窗的开始时间如表 3 所示.

表 3 青岛港各时间窗开始时间
Tab.3 Start time of each time window at Qingdao Port h

时间窗	开始时间 1	开始时间 2	开始时间 3
1	0	6	12
2	18	24	30
3	36	42	48
4	54	60	66

其他港口 4 个时间窗的各开始时间根据公式 $S_{(p+1)ts} = S_{pts} + \frac{D_p}{v_p}$, $p \in P, t \in \Gamma_p, s \in \Psi_{pt}$ 取值,其中,船舶航段上的预计航速 V_p 由均匀分布 $U[15, 25]$ kn 随机生成;每个时间窗的结束时间根据公式 $E_{pte} = S_{pts} + \Delta_{pt}$, $p \in P, t \in \Gamma_p, s \in \Psi_{pt}, e \in \Phi_{pt}$ 取值, Δ_{pt} 为时间窗长度,由均匀分布 $U[49, 54]$ h 随机生成.

由于各港口集装箱码头泊位数量和装卸设施设备不同,其装卸工艺方案亦不尽相同,所以各港口的

集装箱装卸速率也有所差异.为此本文参照文献 [19],假设各港口为船公司提供 4 个集装箱装卸速率,按公式取值 $H_{pth} = \bar{H}_{pth} \pm \Delta_h, p \in P, t \in \Gamma_p, h \in \Omega_{pt}$,其中, \bar{H}_{pth} 为平均装卸速率, \bar{H}_{pth} 的 4 个取值分别为 120,170,220,270 TEU/h, Δ_h 由均匀分布 $U[0, 20]$ TEU/h 随机生成;各集装箱装卸速率下对应的装卸成本按公式取值 $C_{pth}^{hc} = \bar{C}_{pth} \pm \Delta_{hc}, p \in P, t \in \Gamma_p, h \in \Omega_{pt}$,其中, \bar{C}_{pth} 为每个标准箱对应的平均装卸成本, \bar{C}_{pth} 的 4 个取值分别为 275,350,425,500 美元/TEU, Δ_{hc} 由均匀分布 $U[0, 50]$ 美元/TEU 随机生成.

4.2 算例计算

考虑到算例中存在一些随机产生的数据,故首先按上述规则随机生成 1 000 个(保证算例数据的充分性)场景,然后在 Pentium(R) i5 3.10 GHz 内存为 4 GB 的电脑上利用 ILOG CPLEX 12.6 软件进行算例数值分析,得到在 1 000 个场景中船舶最早、平均和最迟到/离各挂靠港的船期,以及在各加油港最小、平均和最大加油量优化结果,如表 4 所示.

表 4 往返航次到离港船期和加油策略
Tab.4 Vessel arrival/departure time at ports and refueling strategy for a round trip voyage

港口	最早到港 时间/h	平均到港 时间/h	最迟到港 时间/h	最早离港 时间/h	平均离港 时间/h	最迟离港 时间/h	最小加 油量/t	平均加 油量/t	最大加 油量/t
青岛	0	0	0	4	32	80	—	—	—
上海	21	49	98	26	65	109	—	—	—
宁波	31	71	114	41	83	124	—	—	—
盐田	71	113	154	78	124	165	—	—	—
新加坡	137	185	230	142	195	240	—	—	—
巴生	151	204	248	166	214	256	500.00	2 058.27	3 000.00
费利克斯托	492	549	618	497	571	655	—	—	—
鹿特丹	502	576	660	518	586	674	—	—	—
汉堡	531	598	686	541	611	693	3 432.00	4 389.05	4 500.00
泽布吕赫	556	625	707	565	637	714	—	—	—
鹿特丹	568	640	717	579	651	725	—	—	—
巴生	907	989	1 050	929	1 006	1 060	500.00	589.64	807.58
盐田	995	1 075	1 127	1 124	1 115	1 132	—	—	—
青岛	1 176	1 176	1 176	1 180	1 208	1 256	—	—	—

由表 4 可见,在各个模拟场景下,船舶一个往返航次的总时间均为 1 176 h(7 周),因而该班轮航线的配船数量均应为 7 艘,且船舶一个往返航次的加油港口也均保持不变,即巴生(去程)、汉堡和巴生

(回程).但船舶到/离各港口的最早和最迟时间,以及在各加油港口加油量的最小和最大值均存在较大差异.这表明尽管在上述各个模拟场景下,班轮航线配船数和船舶加油港保持不变,但由于船舶到/离各

港口时间及加油量与船舶在各港口装卸的集装箱数量、各港口码头运营商提供的时间窗和装卸速率等因素密切相关. 因此,在班轮运输船期设计和船舶加油实际决策中,船公司应通过统计分析船舶在各港口装卸集装箱数量真实数据,并与码头运营商签署有效的合作协议,获取确切的船舶到港多时间窗、多起讫时间和多装卸速率数据,以确定符合实际的船舶到/离各港口时间及加油量.

将本文模型[M2]与文献[11]的模型[M3](考虑各加油港燃油价格差异和折扣因素,无合作协议)和文献[15]的模型[M4](不考虑各加油港燃油价格差异和折扣因素,有合作协议)进行算例结果对比分析,以验证本文模型的有效性和适用性. 计算得出 3 个模型[M2],[M3]和[M4]在各模拟场景下,船舶一个往返航次总加油量及各项成本的最小值、平均值和最大值优化结果,如表 5 所示.

表 5 不同模型下一个往返航次优化结果
Tab. 5 Optimization results of a round voyage of different models

模型	取值	总加油量/t	营运成本× 10 ⁻⁶ /美元	装卸成本× 10 ⁻⁶ /美元	惩罚成本× 10 ⁻³ /美元	燃油成本× 10 ⁻⁶ /美元	库存成本× 10 ⁻⁶ /美元	总成本× 10 ⁻⁷ /美元
[M2]	最小值	5 824	2. 100	3. 474	0	1. 777	3. 982	1. 221 5
	平均值	7 037	2. 100	4. 689	89	2. 265	4. 709	1. 385 2
	最大值	7 647	2. 100	6. 011	1 399	2. 560	5. 382	1. 587 7
[M3]	最小值	6 044	2. 100	3. 306	0	1. 856	4. 026	1. 242 7
	平均值	6 774	2. 100	4. 896	302	2. 169	4. 807	1. 427 4
	最大值	7 624	2. 100	6. 346	4 426	2. 478	5. 365	1. 879 2
[M4]	最小值	5 841	2. 100	3. 515	0	2. 281	3. 966	1. 292 1
	平均值	7 065	2. 100	4. 682	95	2. 759	4. 704	1. 434 0
	最大值	7 651	2. 100	6. 011	1 528	2. 988	5. 418	1. 669 4

由表 5 可见,在各模拟场景下各模型得到的船舶营运成本均相同,表明航线配船数量均为 7 艘. 从最小值看,模型[M2]得到的航次总加油量(亦即燃油消耗量)和燃油成本比模型[M3]和模型[M4]的都低;从平均值和最大值来看,模型[M2]得到的航次总加油量(亦即燃油消耗量)和燃油成本比模型[M3]的高,比模型[M4]的低. 其他各项结果对比显示,模型[M2]得到的船舶迟到港口惩罚成本均比[M3]和[M4]的低;模型[M2]得到的装卸成本、集装箱货物库存成本比模型[M3]的低,比模型[M4]的略高.

此外,模型[M2]得到的所有场景班轮运输服务总成本最小值、平均值和最大值均最低,从平均值上看,比模型[M3]的节省了 3. 0%,比模型[M4]的节省了 3. 4%. 究其原因,是由于与模型[M3]相比,模型[M2]考虑了在港口码头运营公司与船公司签署合作协议下,船公司拥有了多时间窗、多起讫时刻和多装卸速率等多项选择,这样船公司便可以通过优化提高船舶航速,虽然使得船舶燃油消耗量和燃油成本有所增加,但却可以更为灵活地选择船舶到离港口时刻和装卸速率,较为明显地降低了装卸成本、迟到港口惩罚成本和集装箱货物库存成本,使班轮

运输服务总成本得到显著降低. 与模型[M4]相比,模型[M2]考虑了各港口的燃油价格差异和折扣因素,使得船公司可以选择在油价较低的加油港加油,且可以选择多加油以享受油价折扣,使得航次燃油成本得到明显减少. 这样以来,虽然得到的船舶平均航速、航次装卸成本、迟到港口惩罚成本和集装箱货物库存成本等结果没有明显的差别,但模型[M2]得到的班轮运输服务总成本明显降低. 由此可见,本文模型比已有文献研究模型更为有效.

4.3 敏感性分析

4.3.1 时间窗长度变化的影响 船舶到港时间窗长度是船公司与各港口码头运营商签署合作协议中的一项重要条款,是船期设计和加油策略问题需要考虑的一项重要因素. 本文将时间窗长度由均匀分布 $U[24, 29]$ h 随机生成,逐渐递增至由均匀分布 $U[69, 74]$ h 随机生成,构造 11 组时间窗长度由小到大的算例,每组算例由 1 000 个按上述规则随机生成的模拟场景组成,求解得到不同时间窗长度下各模拟场景班轮运输一个往返航次总时间最优值均为 1 176 h(7 周),最优配船数均为 7 艘,船舶加油量各模拟场景的平均值如表 6 所示.

由表 6 的各模拟场景加油量平均值可以看出,

表 6 不同时间窗长度下的加油量平均值结果
Tab.6 Average refueling results at different lengths of time window

时间窗 长度/h	各加油港加油量/t			合计/t
	巴生(去程)	汉堡	巴生(回程)	
U[24, 29]	2 114.49	4 373.21	584.58	7 072.28
U[29, 34]	2 102.04	4 381.56	592.90	7 076.50
U[34, 39]	2 087.93	4 383.51	590.06	7 061.50
U[39, 44]	2 080.80	4 381.93	585.97	7 048.70
U[44, 49]	2 072.53	4 379.49	590.29	7 042.31
U[49, 54]	2 058.27	4 389.05	589.64	7 036.96
U[54, 59]	2 052.40	4 379.20	589.83	7 021.43
U[59, 64]	2 044.22	4 378.04	587.91	7 010.17
U[64, 69]	2 039.85	4 370.51	585.93	6 996.29
U[69, 74]	2 019.83	4 380.21	577.92	6 977.96
U[74, 79]	2 015.72	4 376.71	583.13	6 975.56

随着船舶到港时间窗长度的扩大,在巴生(去程)加油量随着时间窗长度范围的扩大而不断减少,其他两个港口加油量变化不太明显,船舶一个往返航次的总加油量逐渐减少.究其原因,是因为随着船舶到港时间窗长度的扩大,船公司可以更加灵活地调慢航速,从而减少燃油消耗量,有助于船舶节能减排.

随着船舶到港时间窗长度的变化,船舶一个往返航次各项成本在各模拟场景下的平均值如图 3 所示.其中: C^{tc} 为总成本; C^{plc} 为迟到惩罚成本; C^{cb} 为成本统称.

由图 3 的各模拟场景平均值可以看出,随着船舶到港时间窗长度的扩大,船公司班轮运输服务总成本、船舶一个往返航次迟到港口惩罚成本、燃油成本及装卸成本都呈降低的趋势,船舶一个往返航次库存成本呈升高的趋势.这是因为,船舶到港时间窗长度越大,船公司便越能灵活地调慢船舶航速,越能减小船舶迟到港口的可能性,并越容易选择较低的

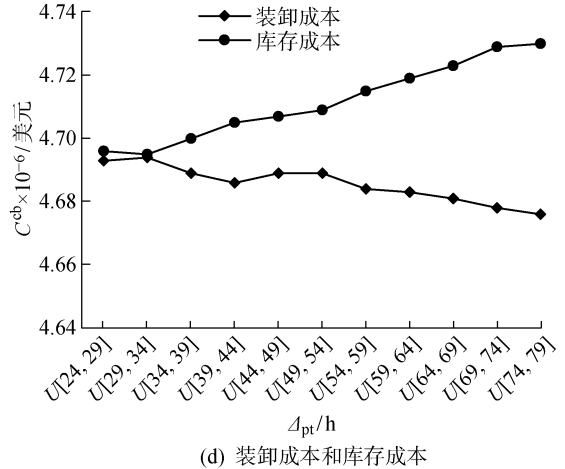
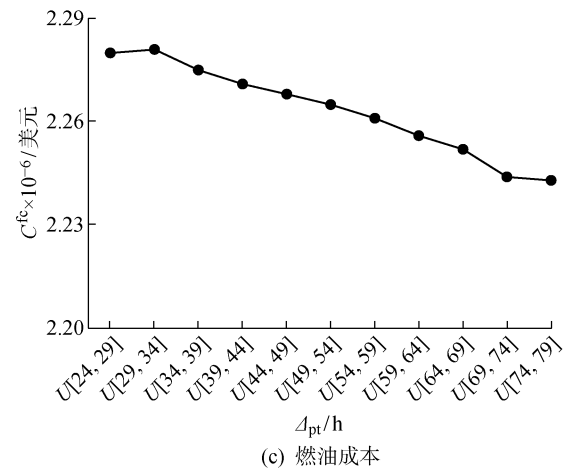
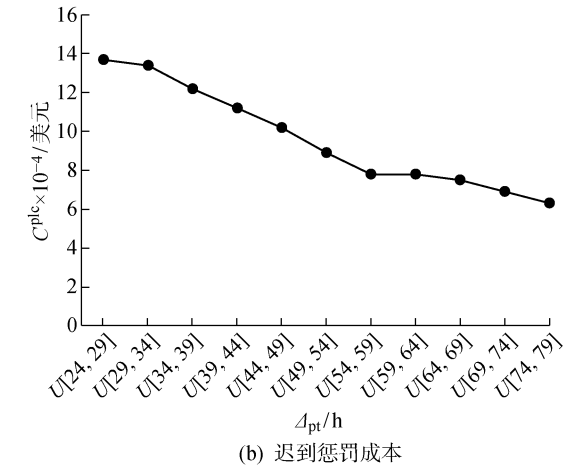
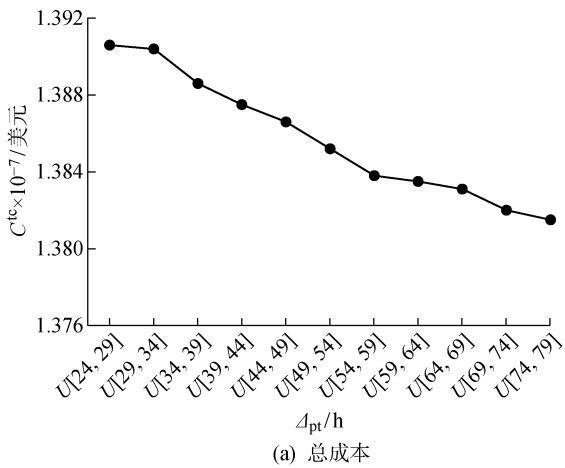


图 3 不同时间窗长度下成本变化

Fig. 3 Cost changes at different lengths of time window

装卸作业速率装卸集装箱货物,因而越能降低船舶迟到港口惩罚成本、燃油成本和装卸成本.同时,船舶到港时间窗长度越大,越会容易造成船舶在港装卸时间的延长,因而越会导致一个往返航次库存成本的增加.但由于库存成本所占比例较低,所以随着船舶到港时间窗长度的扩大,班轮运输服务总成本仍呈降低的趋势.

4.3.2 燃油价格变化的影响 燃油成本是班轮运输成本的主要构成部分,本文在表 2 给出的各挂靠港口燃油价格的基础上,按燃油价格变化率(ζ)由 $-30\%\sim+60\%$ 递增构造 10 组算例,每组算例由 1 000 个按上述规则随机生成的场景组成,求解得到不同燃油价格变化率下班轮运输一个往返航次总时间最优值均为 1 176 h(7 周),最优配船数均为 7 艘,船舶加油策略各模拟场景平均优化结果如表 7 所示.

表 7 不同燃油价格变化率下的加油量平均值结果
Tab.7 Average refueling results at different change rate of fuel price

变化率/%	各加油港加油量/t					合计/t
	新加坡	巴生	汉堡	鹿特丹	巴生	
-30	—	2 313.64	4 488.31	—	784.69	7 586.64
-20	—	2 220.44	4 468.06	—	683.69	7 372.19
-10	—	2 099.90	4 402.63	—	624.98	7 127.51
0	—	2 058.27	4 389.05	—	589.64	7 036.96
+10	—	2 025.15	4 365.62	—	556.03	6 946.80
+20	—	1 880.76	4 334.44	—	517.25	6 732.45
+30	1 750.46	—	4 274.87	—	500.00	6 525.33
+40	1 630.14	—	4 188.93	—	500.00	6 319.07
+50	1 489.49	—	4 139.83	—	500.00	6 129.32
+60	1 257.12	—	4 191.41	500.00	—	5 948.53

由表 7 的各模拟场景平均值可以看出,当燃油价格变化率在 $-30\%\sim+20\%$ 时,随着燃油价格变化率(亦即燃油价格)的升高,船舶在巴生(去程)、汉堡、巴生(回程)等港口的加油量均呈减少的趋势;当燃油价格变化率在 $+30\%\sim+50\%$ 时,新加坡取代了巴生(去程)成为新的加油港口,且随着燃油价格的升高,船舶在新加坡的加油量逐渐减少,在汉堡的加油量有增有减,在巴生(回程)的加油量保持不变;当燃油价格变化率为 $+60\%$ 时,鹿特丹取代了巴生(回程)成为新的加油港口.此外,随着燃油价格的升高,一个往返航次船舶总加油量呈逐渐减少的趋势.究其原因,是由于高速航行会造成燃油成本乃至周班轮运输服务总成本均急剧升高,因此,船公司需要

降低船舶航速,从而减少燃油消耗量及一个往返航次船舶的总加油量.

此外,当燃油价格变化率在 $-30\%\sim+60\%$ 时,随着燃油价格的升高,计算得出 3 种模型[M2],[M3]和[M4]船舶一个往返航次各模拟场景的总成本平均值敏感性分析对比结果如图 4 所示.

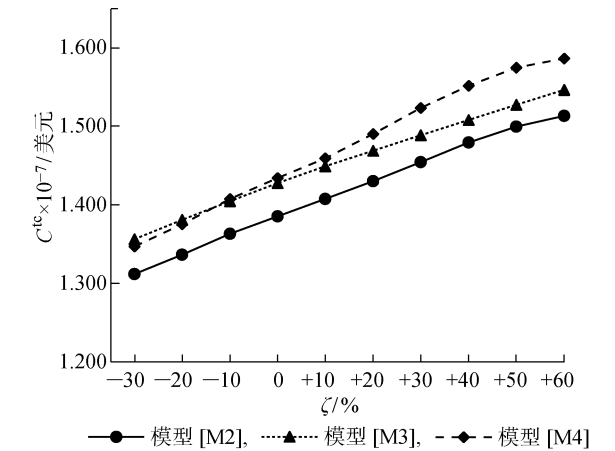


图 4 敏感性分析对比结果
Fig.4 Comparison at sensitivity analysis

由图 4 各模拟场景的总成本平均值可以看出,随着燃油价格的升高,3 种模型得到的船公司周班轮运输服务总成本都呈增加的趋势.当燃油价格变化率较低时,模型[M4]得到的总成本低于模型[M3]得到的总成本;当燃油价格变化率较高时,模型[M3]得到的总成本低于模型[M4]得到的总成本.但无论燃油价格怎样变化,模型[M2]得到的总成本总是最低的.究其原因,是因为当各加油港燃油价格在较低位增加时,尽管燃油成本会有所提高,但船舶到港多时间窗、多起讫时刻和多装卸速率合作协议能使船公司更加灵活地调整船舶航速,选择合理的装卸速率,降低船舶延误惩罚成本、库存成本和装卸成本,从而使得合作协议下不考虑加油策略的模型[M4]得到的总成本低于无合作协议下考虑加油策略模型[M3]得到的总成本;而当各加油港燃油价格处于较高位增加时,燃油成本在班轮运输服务总成本中的占比必然升高,考虑各加油港燃油价格及其燃油折扣差异的加油策略,可以使船公司选择合理的加油港和加油量,有效减缓燃油成本的急剧升高,从而使得无合作协议下考虑加油策略模型[M3]得到的燃油成本低于合作协议下不考虑加油策略模型[M4]得到的总成本.合作协议下考虑加油策略的模型[M2]兼具模型[M3]和[M4]的优点,所以不论燃油价格如何变化,本文模型方法都具备明显的成本优势.

5 结论

在集装箱班轮运输中,设计合理稳定的船期既能较好地满足客户集装箱货物托运和交付的需求,又是船公司和港口码头运营商运营组织优化的需要.本文基于港口码头运营商与船公司间签署的多时间窗、多起讫时刻和多装卸速率合作协议,构建了班轮运输船期设计和加油策略联合优化模型,设计了离散线性化模型求解方法,AEX1航线1000个模拟场景的算例计算结果表明:

(1) 尽管在各模拟场景下得到的船舶到/离各港口时刻及加油量存在明显差异,但船舶一个往返航次的总时间、航线配船数量和加油港选择等优化结果均保持不变.

(2) 无论燃油价格如何变化,基于船舶到港多时间窗、多起讫时刻和多装卸速率合作协议,进行船期设计和加油策略联合优化所得到的各模拟场景班轮运输服务总成本最小值、平均值和最大值均低于已有文献的相对应结果值,平均值可节省3.0%以上.

(3) 在合作协议中的船舶到港时间窗长度越长,越有利于船公司灵活地调整各航段的船舶航速,降低船公司班轮运输服务总成本.虽然船舶到港时间窗长度并不等同于船舶占用码头泊位时间长度,但其长度的增加却可能会对港口码头泊位资源服务其他船公司造成不利的影响,故会给码头运营商带来机会成本损失.因此,确定合理的船舶到港时间窗长度对于船公司与各港口码头运营商间签署共赢的合作协议而言至关重要.

需指出的是,本研究是在假定船公司与各港口码头运营商已签署多时间窗等合作协议前提下开展的,尚未考虑港口服务于多条集装箱班轮航线下的码头泊位时间资源约束因素.如何在考虑港口集装箱航线间影响及码头泊位时间资源约束的条件下,设计船公司与码头运营商共赢的合作协议,并据此进行班轮运输船期设计和加油策略联合优化,将是一个值得今后深入研究的问题.

参考文献:

[1] FAN Y, BEHDANI B, BLOEMHOF-RUWAARD J, *et al.* Flow consolidation in hinterland container transport: An analysis for perishable and dry cargo [J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2019, 130: 128-160.

[2] WANG S A, MENG Q. Robust bunker management

for liner shipping networks[J]. *European Journal of Operational Research*, 2015, 243(3): 789-797.

[3] CHRISTIANSEN M, FAGERHOLT K, NYGREEN B, *et al.* Ship routing and scheduling in the new millennium[J]. *European Journal of Operational Research*, 2013, 228(3): 467-483.

[4] PERAKIS A N, JARAMILLO D I. Fleet deployment optimization for liner shipping—Part 1: Background, problem formulation and solution approaches [J]. *Maritime Policy & Management*, 1991, 18(3): 183-200.

[5] MANWO N. Distribution-free vessel deployment for liner shipping[J]. *European Journal of Operational Research*, 2014, 238(3): 858-862.

[6] BROUER B D, ALVAREZ J F, PLUM C E M, *et al.* A base integer programming model and benchmark suite for liner-shipping network design [J]. *Transportation Science*, 2014, 48(2): 281-312.

[7] 范厚明, 于佳琪, 马梦知, 等. 模糊时间窗下多船型不定期船调度与航速联合优化[J]. *上海交通大学学报*, 2021, 55(3): 297-310.

FAN Houming, YU Jiaqi, MA Mengzhi, *et al.* Heterogeneous tramp ship scheduling and speed optimization with fuzzy time window[J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2021, 55(3): 297-310.

[8] REINHARDT L B, PISINGER D, SIGURD M M, *et al.* Speed optimizations for liner networks with business constraints[J]. *European Journal of Operational Research*, 2020, 285(3): 1127-1140.

[9] RONEN D. The effect of oil price on containership speed and fleet size[J]. *Journal of the Operational Research Society*, 2011, 62(1): 211-216.

[10] FAGERHOLT K, LAPORTE G, NORSTAD I. Reducing fuel emissions by optimizing speed on shipping routes[J]. *Journal of the Operational Research Society*, 2010, 61(3): 523-529.

[11] WANG C X, CHEN J J. Strategies of refueling, sailing speed and ship deployment of containerships in the low-carbon background[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2017, 114: 142-150.

[12] WANG S A, ALHARBI A, DAVY P. Liner ship route schedule design with port time windows[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2014, 41: 1-17.

[13] ALHARBI A, WANG S A, DAVY P. Schedule design for sustainable container supply chain networks with port time windows[J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2015, 29(3): 322-331.

[14] LIU Z Y, WANG S A, DU Y Q, *et al.* Supply chain

- cost minimization by collaboration between liner shipping companies and port operators[J]. **Transportation Journal**, 2016, 55(3): 296-314.
- [15] DULEBENETS M A. Minimizing the total liner shipping route service costs via application of an efficient collaborative agreement[J]. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, 2019, 20(1): 123-136.
- [16] YAO Z S, NG S H, LEE L H. A study on bunker fuel management for the shipping liner services[J]. **Computers & Operations Research**, 2012, 39(5): 1160-1172.
- [17] WANG S A, MENG Q, LIU Z Y. Bunker consumption optimization methods in shipping: A critical review and extensions[J]. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, 2013, 53: 49-62.
- [18] 邢玉伟, 杨华龙, 马雪菲. 差异化定价策略下的远洋洲际班轮航速与航线配船优化[J]. **系统工程理论与实践**, 2018, 38(12): 3222-3234.
- XING Yuwei, YANG Hualong, MA Xuefei. Optimization of containership sailing speed and fleet deployment for continental ocean liner based on freight rate differentiation strategy [J]. **Systems Engineering-Theory & Practice**, 2018, 38(12): 3222-3234.
- [19] DULEBENETS M A, OZGUVEN E E. Vessel scheduling in liner shipping: Modeling transport of perishable assets[J]. **International Journal of Production Economics**, 2017, 184: 141-156.
- (本文编辑:石易文)