

考虑碳排放和班轮联盟合作的航线网络优化模型^{*}

杨 中¹, 葛诗浓², 刘宴志¹, 陈 康²

(1. 大连海事大学 航海学院; 2. 大连海事大学 航运经济与管理学院, 辽宁 大连 116026)

摘要:【目的】考虑到碳税的征收和班轮联盟运营成为主流,对该趋势下航线网络设计问题进行研究。【方法】采用合作博弈和逆优化理论,构建混合整数规划模型。该模型基于班轮联盟承运人之间的舱位交易活动,同步决策班轮航线网络设计方案、船队设计方案、航速方案、货物运输方案以及各承运人之间的舱位交易价格,该价格可确保各承运人按联盟整体收益最大的货物运输方案运营时,都能获得自身最大收益,从而确保了联盟合作的达成。采用遗传算法框架,设计模型的求解算法。【结果】基于亚欧航线实际运营数据,设置不同运价和碳税费率的案例,进行了灵敏度分析,结果显示不同情境下的航线网络方案中,碳税支出和联盟合作方案有所不同。【结论】运价对联盟网络结构和收益分配有明显影响:随着运价的提升,网络结构复杂性增强,市场份额高的承运人投资收益率更高;征收碳税明显改变了船舶运营策略:随着碳税费率的升高,船舶短途运输航程明显增加,承运人倾向于选择增加船舶数量,降低航速运营。

关键词:航线设计;班轮联盟;碳排放;合作博弈;逆优化

中图分类号:U692.3

文献标志码:A

文章编号:1672-6693(2022)01-0090-10

集装箱海运系统是全球最为重要的低成本、高运能的运输系统。全球约 70% 的工业品生产需要依托基于集装箱海运系统构建的高效供应链体。集装箱航线网络设计的优劣直接决定了集装箱海运系统的运营效率与成本。优良的航线网络可以明显降低系统运作成本和提高运输服务效率与水平,进而提升相关集装箱班轮公司(以下简称承运人)的经济收益与市场竞争力。

迄今为止,众多学者已就班轮航线网络设计问题(LSND)提出了很多切实可行的决策方法,有关这一问题的系统性回顾可参阅文献[1-3]。目前,相关研究的重心已从仅对航线设计加以关注过渡到在航线设计中考虑货运路径设计、船队设计、空箱调运、航速优化等相关问题。例如,文献[4]在探讨 LSND 设计方案时考虑了空箱调运因素,并构造了一个双层规划模型,其中上层模型用于优化航线挂靠港口的选择而下层模型则用于优化港口的挂靠顺序以及空箱调运方案,并使用了遗传算法求解该模型。文献[5]在思考 LSND 时,还考虑了航线配船和货物运输路径设计问题,在研究中将航速作为决策变量之一,以航线运营总利润最大为目标,建立了非线性混合整数规划模型。文献[6]在文献[5]的基础上,考虑了运输时限对 LSND 方案设计的影响,提出了一个既要满足运输时限要求又要最大化总利润的网络设计与航线配船的两阶段模型,其中第一阶段采用聚类算法筛选出航线挂靠港口,第二阶段采用基于列生成思想的启发式算法求解最优的航线挂靠顺序和配船方案。

近些年来,班轮联盟逐步发展成为航运市场的主流运营模式,如何在联盟背景下考虑 LSND 逐步成为研究的热点。目前众多学者集中采用合作博弈理论对它展开研究。合作博弈理论在其他研究领域已有广泛的应用^[7-8]。对于班轮联盟下的 LSND,Agarwal 等人^[9-10]提出了一个可以同时优化航线网络设计、船队设计和货物运输方案的模型,并指出在联盟运营模式下 LSND 的解决应当充分考虑各成员间的合作博弈关系,并提出了一种利益交易机制。在该机制下,联盟成员共同运营一个航运网络,并且可以对自有运输资源进行交易,即:若某成员使用了其他成员的船舶运输自己的货物,则需向对方支付一定的费用。他们的研究进一步提出,只要通过优化上述费用来保证每个承运人按照联盟整体收益最大的货物运输方案运营,就可实现自身运营收益的最大化,进而确保每个承运人均有意愿参与联盟合作。刘荣亮等人^[11]采用合作博弈理论,研究了班轮联盟下的

* 收稿日期:2021-03-30 修回日期:2021-06-17 网络出版时间:2022-02-09 13:48

资助项目:辽宁省社会科学规划基金(No. L19BGL005);国家自然科学基金(No. 72071025)

第一作者简介:杨中,男,研究方向为交通运输工程,E-mail:17863152779@163.com;通信作者:陈康,男,教授,博士,E-mail:chenkang@dlmu.edu.cn

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1165.N.20220209.1321.018.html

LSND 和空箱调运问题,并提出了一种以空箱互租价格和舱位互租价格为核心的收益分配机制。该机制可以确保各联盟成员收益最大的经营决策与联盟整体经营决策一致,从而确保了联盟合作的达成。Arslan 等人^[12]同样研究了班轮联盟合作下的 LSND——与 Agarwal 等人的工作不同的是,他们在研究中考虑了联盟合作成本(成员间信息交换成本、运输资源交易成本、违约成本等)对航运网络设计与合作达成的影响。

2010 年以来,集装箱航运市场出现的两个重大变化正深刻影响及改变着集装箱航运市场运作模式:1) 燃油碳税体系的建立与应用。近些年来,世界各国为控制海运系统的碳排放总量,陆续开始对集装箱海运系统征收碳税,这进一步增加了船舶运营成本,使得决策者在设计航线网络时不得不更加慎重地考虑与燃油消耗有关的船队设计、航速调整问题。2) 航运联盟的广泛兴起。为了应对愈加激烈的市场竞争,不少承运人开始结成各类同盟,通过共享运输资源来提升服务水平与市场控制能力^[13]。该现象的出现使得决策者们在考虑 LSND 时,不仅需要思考航线设计的最优化问题,还必须考虑如何在联盟模式下运营该航线,以及由此产生的联盟收益分配等问题。因此,在结合上述背景对过去的相关研究重新加以审视时,可以发现有关学者在考虑 LSND 时并未注意并聚焦到这两个重大变化及它们的耦合效应对 LSND 决策方法的影响。有鉴于此,本文将考虑征收碳税与班轮联盟合作因素,以此探讨 LSND 的设计问题,并提出有关求解算法。

1 问题描述

在集装箱班轮运输系统中,船舶按照固定航线,以固定的频率和服务价格,在相关港口间以周期性运营的方式,向货主提供海上运输服务。为了确保系统合理运行,承运人在考虑航线设计之外,还需要决策船舶运力的使用和港口间货运量的大小。由于这些问题与航线设计关联密切,因此需要设计一个框架来协同解决。除了上述问题外,决策者还需考虑两个问题。首先,在考虑碳税与班轮联盟因素的条件下,承运人还需考虑如何合理设定船舶航速以最大程度地降低运营成本以及如何确保航运联盟的稳定运行。其次在实践中,1 个常见的班轮联盟运输系统由 2~3 个承运人合作运营。有关承运人共同构建一个航线网络,并分别运营该网络的不同部分。在班轮联盟中,承运人可以将自己的船舶舱位作为资源进行交易,例如:若承运人 A 的货物使用了承运人 B 的船舶舱位,则 B 需要向 A 支付一定的运输费用(该价格被称为“舱位交易价格”)。这意味着在设计航线网络系统时,决策者还必须考虑如何合理地设定舱位交易价格,以及如何确保在该价格的影响下,实现如下目标:1) 联盟的总体收益最大;2) 各承运人有意愿保持联盟的稳定运营,即按照联盟总体收益最大的方案运营时各承运人还可以实现自身收益最大化。

综上所述,本文探讨的 LSND 方案将致力于在考虑联盟收益最大化与合作稳定的目标下,同步解决如下问题:1) 如何在征收碳税的基础上,设定航线挂靠港口及顺序、联盟船队方案、船舶航速设定方案以及货物运输方案(各港口间的货运需求运量);2) 如何合理设定舱位交易价格,以实现各承运人在按照联盟总体收益最大的方案运营时,还可以实现自身收益最大化,从而维护联盟合作的意愿。本文将上述问题称为考虑碳排放和班轮联盟合作的航线网络优化问题(CPSAND)。

2 模型建立

2.1 班轮航线网络设计定义

集装箱班轮航线网络通常由若干条班轮航线构成,在考虑联盟因素的情况下,各航线可能由不同的承运人负责运营,如图 1a 所示,该航线网络由承运人 A 和承运人 B 共同运营。本文就联盟运营的航线网络作如下假设:1) 联盟航线网络由有限个承运人共同运营;2) 各承运人运营的航线网络范围没有重合;3) 各承运人负责运营自己所辖的航线,但可相互租借对方船舶的舱位来运输自身的货运需求,从而构建起联盟网络;4) 各承运人航线服务频率均相同,航线规划期为 1 周,服务频率统一以班·周⁻¹为单位;5) 各承运人使用相同类型的船舶运营航

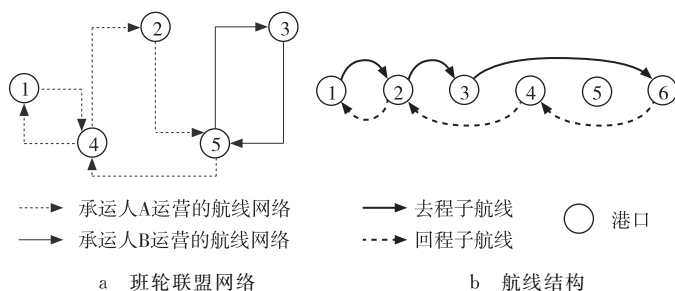


图 1 班轮联盟网络和航线结构

Fig. 1 Structure of an alliance network and a shipping route

线网络。图 1b 给出了具体的某条班轮航线示意图。本质上,1 条航线其可被视为 1 个闭合的环状网络;在实践中,承运人通常会将班轮航线拆分成去程和回程两个子航线。

采用向量 $\mathbf{G}_k$ 表示某个航线方案,集合 $\Omega = \{\mathbf{G}_k\}$ 。用 $\mathbf{X} = (x_k)$ 表示所有 0-1 决策变量 x_k 构成的向量,在这里 x_k 为对应于方案 $\mathbf{G}_k$ 的 0-1 变量;当 $x_k = 1$ 时,表示选择 $\mathbf{G}_k$ 运营;当 $x_k = 0$ 时,表示不选择 $\mathbf{G}_k$ 运营。此外,用 $\tilde{i} \in N^c$ 表示承运人的索引, N^c 为承运人集合;用 $\mathbf{G}_{\tilde{i}} = (V_{\tilde{i}}, E_{\tilde{i}}, M_{\tilde{i}})$ 表示 $\mathbf{G}_k$ 中承运人 $\tilde{i}$ 的航线方案,其中 $V_{\tilde{i}}, E_{\tilde{i}}, M_{\tilde{i}}$ 分别表示 $\mathbf{G}_k$ 中承运人 $\tilde{i}$ 的挂靠港口集合、运营航段集合和虚拟航段集合。需要说明的是,本文用两种方式表示运营航段,有时用 $(u, v, \tilde{i})$ 表示承运人 $\tilde{i}$ 运营的港口 u 与 v 之间的航段,有时用 e 泛指某个航段。此外,虚拟航段集合 $M_{\tilde{i}}$ 的作用是描述货运需求运量(以下简称运量)在航线网络上的变化情况。如图 1b 所示,在去程子航线中,港口 1—6 涉及到 3 个航段,即港口 1—2、港口 2—3 以及港口 3—6。此时为了方便描述港口 1 与港口 6 之间的运量,本文在港口 6 至港口 1 间引入一个虚拟航段,方向为由港口 6 指向港口 1,并规定该航段上的运量应等于在港口 1—6 间的实际货物运输量(详情可见后文 2.3 部分),如此本文便可以通过观测虚拟航段上的运量变化,来获取实际的运输方案中港口之间的运量信息,这有利于简化问题的复杂度。此外,还用 $\Theta = \bigcup_{\tilde{i} \in N^c} \Theta_{\tilde{i}}$ 表示所有承运人的运输需求集合,其中: $\Theta_{\tilde{i}} = \{(o, d, \tilde{i})\}$ 表示承运人 $\tilde{i}$ 的运输需求集合, $(o, d, \tilde{i})$ 表示承运人 $\tilde{i}$ 在港口 o 至 d 间的运输需求。借助上述定义,本文便可将 $\mathbf{G}_k$ 表示为如下形式:

$$\mathbf{G}_k = (V_k, E_k, M_k), V_k = \bigcup_{\tilde{i} \in N^c} V_{\tilde{i}}, E_k = \bigcup_{\tilde{i} \in N^c} E_{\tilde{i}}, M_k = \bigcup_{\tilde{i} \in N^c} M_{\tilde{i}}。$$

另外,用 $\mathbf{Y} = (\gamma_{kei})$ 表示 0-1 变量 γ_{kei} 构成的向量, γ_{kei} 为指示变量,如果航线网络 $E_{\tilde{i}}$ 中包含航段 $e \in E_k$,则取值为 1,否则为 0。可以看出,当航线方案 $\mathbf{G}_k$ 确定时, $\mathbf{Y} = (\gamma_{kei})$ 也随之确定。

2.2 船队设计与运营活动的相关变量与关系的定义

在本文中: $\mathbf{S} = (s_e)$ 表示船舶运营的航速向量, s_e 表示航段 e 上的船舶营运航速,其中 $e \in \bigcup_{\mathbf{G}_k \in \Omega} E_k$,航速的单位为海里·小时⁻¹; $s_{\min}, s_{\max}$ 表示船舶航速下限和上限, d_e^{ist} 表示航段 e 的航行距离,单位为海里。 c_i 表示承运人 $\tilde{i}$ 联盟运营的总成本。 $N_{\tilde{i}}^d, c_{\tilde{i}}^r$ 以及 $c_{\tilde{i}}^t$ 分别表示采用 $\mathbf{G}_k$ 时承运人 $\tilde{i}$ 所需配置的船舶数量、需要支付航线运营成本以及船舶租金。 c_{kei}^o 与 c_{kei}^t 分别表示当采用 $\mathbf{G}_k$ 时承运人 $\tilde{i}$ 为运营航段 e 所消耗的燃油与支付的碳税。 c_0^r 表示单艘船舶规划期租金总额, c_0^o 表示燃油的单位价格, c_0^t 表示当燃油消耗量 c_{kei}^o 超过该航段 e 燃油消耗限制量 L_e 时,单位燃油消耗所产生的碳税费率。上述各参数的关系定义如下:

$$N_{\tilde{i}}^d = \left\lceil \sum_{e \in E_{\tilde{i}}} \frac{d_e^{ist}}{168s_e} f \right\rceil, \forall \tilde{i} \in N^c, \mathbf{G}_k \in \Omega; \quad (1)$$

$$c_{\tilde{i}} = c_{\tilde{i}}^r + c_0^o \sum_{e \in E_{\tilde{i}}} c_{kei}^o + \sum_{e \in E_{\tilde{i}}} c_{kei}^t, \forall \tilde{i} \in N^c, \mathbf{G}_k \in \Omega; \quad (2)$$

$$c_{\tilde{i}}^r = c_0^r N_{\tilde{i}}^d, \forall \tilde{i} \in N^c, \mathbf{G}_k \in \Omega; \quad (3)$$

$$c_{kei}^o = \frac{d_e^{ist} F(s_e) f}{24s_e}, \forall \tilde{i} \in N^c, \mathbf{G}_k \in \Omega, e \in E_{\tilde{i}}; \quad (4)$$

$$c_{kei}^t = \begin{cases} 0, & \text{如果 } c_{kei}^o \leq L_e \\ c_0^t (c_{kei}^o - L_e), & \text{如果 } c_{kei}^o > L_e \end{cases}, \forall \tilde{i} \in N^c, \mathbf{G}_k \in \Omega, e \in E_{\tilde{i}}。 \quad (5)$$

其中:(1)式给出了 $N_{\tilde{i}}^d$ 的计算方式,表示当规划期为 1 周时,为满足航线方案 $\mathbf{G}_{\tilde{i}}$ 的服务频率 f ,承运人 $\tilde{i}$ 需要配备的船舶数量,它是一个向上取整函数。(2)式表示承运人 $\tilde{i} \in N^c$ 的航线运营成本由船舶租金、燃油成本和碳税成本构成,3 项成本的具体计算方法由(3)~(5)式给出,其中, $F(s_e)$ 是一个关于航速 s_e 的函数,代表以航速 s_e 行驶时船舶每天的燃油消耗量,服务频率 f 以班·周⁻¹为单位。需要说明的是,在(5)式中,本文给出了一个分段函数以刻画实践中承运人的碳税支付机制,即对于每个航段 e ,存在一个碳税起征点。

2.3 舱位交易机制的相关定义

为了描述联盟成员间的舱位交易活动,本文根据模型需要,分别用 $f_{(u,v,j)}^{(o,d,\tilde{i})}$ 和 $f_e^{(o,d,\tilde{i})}$ 表示运输需求 $(o, d, \tilde{i})$ 在航段 $(u, v, \tilde{j})$ 和航段 e 上的运量,用 r_e 表示航段 e 上船舶的舱位交易价格,并规定承运人 $\tilde{i} \in N^c$ 每使用航段 e 运输 1 个标准箱即 1 TEU 的货物,便需要向运营该航段的承运人缴纳 r_e 单位的费用。上述运量、交易以及承运人的收入关系如下式所示:

$$\sum_{(u,v,j) \in E_k \cup M_k} f_{(u,v,j)}^{(o,d,\tilde{i})} - \sum_{(v,u,j) \in E_k \cup M_k} f_{(v,u,j)}^{(o,d,\tilde{i})} = 0, \forall \mathbf{G}_k \in \Omega, \tilde{i} \in N^c, v \in V_k, (o, d, \tilde{i}) \in \Theta_{\tilde{i}}; \quad (6)$$

$$\sum_{\tilde{i} \in N^c} \sum_{(o,d,\tilde{i}) \in \Theta_{\tilde{i}}} f_e^{(o,d,\tilde{i})} \leq x_k C^A, \forall \mathbf{G}_k \in \Omega, e \in E_k; \quad (7)$$

$$f_{(d,o,\tilde{i})}^{(o,d,\tilde{i})} \leq d^{(o,d,\tilde{i})}, \forall \tilde{i} \in N^c, (o,d,\tilde{i}) \in \Theta_{\tilde{i}}; \quad (8)$$

$$f_e^{(o,d,\tilde{i})} = 0, \forall \tilde{i} \in N^c, (o,d,\tilde{i}) \in \Theta_{\tilde{i}}, \mathbf{G}_k \in \Omega, e \in M_k \setminus (d,o,\tilde{i}); \quad (9)$$

$$f_e^{(o,d,\tilde{i})} \geq 0, \forall \tilde{i} \in N^c, (o,d,\tilde{i}) \in \Theta_{\tilde{i}}, \mathbf{G}_k \in \Omega, e \in E_k \cup M_k; \quad (10)$$

$$I_{\tilde{k}\tilde{i}} = \sum_{(o,d,\tilde{i}) \in \Theta_{\tilde{i}}} f_{(d,o,\tilde{i})}^{(o,d,\tilde{i})} \tilde{r}^{(o,d,\tilde{i})} + \sum_{e \in E_k} r_e \left(\sum_{(o,d,\tilde{j}) \in \Theta \setminus \Theta_{\tilde{i}}} \gamma_{\tilde{k}\tilde{i}} f_e^{(o,d,\tilde{j})} - \sum_{(o,d,\tilde{i}) \in \Theta_{\tilde{i}}} (1 - \gamma_{\tilde{k}\tilde{i}}) f_e^{(o,d,\tilde{i})} \right), \forall \tilde{i} \in N^c, \mathbf{G}_k \in \Omega. \quad (11)$$

其中: C^A 表示船舶的最大载箱量; $d^{(o,d,\tilde{i})}$ 与 $\tilde{r}^{(o,d,\tilde{i})}$ 表示承运人 $\tilde{i}$ 由港口 o 至 d 的货运需求量以及单位 TEU 运价; $I_{\tilde{k}\tilde{i}}$ 表示承运人 $\tilde{i}$ 的收益; (6) 式表示船舶在港口的运量平衡约束, 即运入任意港口的货运需求量应等于从该港口运出的货运需求量; (7) 式表示船舶装载能力约束, 在任意航段 e 上运输的货运需求总量不能超过船舶的最大载箱量; (8) 式表示运输需求限制约束; (9) 式表示 $(o,d,\tilde{i})$ 仅允许在虚拟航段 $(d,o,\tilde{i})$ 上运输, 在其他虚拟航段的运量为 0; (10) 式为运量的非负约束; (11) 式用于计算在 $\mathbf{G}_k$ 下承运人 $\tilde{i}$ 的收益 $I_{\tilde{k}\tilde{i}}$, 式中等式右边第 1 项表示承运人 $\tilde{i}$ 的运费收入, 第 2 项用于刻画承运人 $\tilde{i}$ 与联盟其他成员的舱位交易。在联盟机制的作用下, 各承运人均会根据 r_e 和 $\gamma_{\tilde{k}\tilde{i}}$, 合理的设定 $f_e^{(o,d,\tilde{i})}$, 以实现自身收益的最大化。

2.4 CPSAND 的优化决策模型

基于上述设定, 本文构造了一个混合整数规划模型, 简记为 [CPSAND], 具体如下所示。

$$\max_{(\mathbf{F}, \mathbf{S}, \mathbf{Y}, \mathbf{X}, \mathbf{R})} \sum_{(o,d,\tilde{i}) \in \Theta} f_{(d,o,\tilde{i})}^{(o,d,\tilde{i})} \tilde{r}^{(o,d,\tilde{i})} - \sum_{\mathbf{G}_k \in \Omega} \sum_{\tilde{i} \in N^c} c_{\tilde{k}\tilde{i}} x_k; \quad (12)$$

$$\text{s. t. (1)~(11) 式;}$$

$$\sum_{\mathbf{G}_k \in \Omega} x_k = 1; \quad (13)$$

$$\mathbf{F} = \arg \max_{\mathbf{P}} \left\{ \sum_{\mathbf{G}_k \in \Omega} x_k \left(\sum_{(o,d,\tilde{i}) \in \Theta_{\tilde{i}}} f_{(d,o,\tilde{i})}^{(o,d,\tilde{i})} \tilde{r}^{(o,d,\tilde{i})} + \sum_{e \in E_k} r_e \left(\sum_{(o,d,\tilde{j}) \in \Theta \setminus \Theta_{\tilde{i}}} \gamma_{\tilde{k}\tilde{i}} f_e^{(o,d,\tilde{j})} - \sum_{(o,d,\tilde{i}) \in \Theta_{\tilde{i}}} (1 - \gamma_{\tilde{k}\tilde{i}}) f_e^{(o,d,\tilde{i})} \right) \right) \right\}, \forall \tilde{i} \in N^c; \quad (14)$$

$$\mathbf{P} = \left\{ \left(f_e^{(o,d,\tilde{i})} \right) \left| \begin{array}{l} \sum_{(u,v,\tilde{j}) \in E_k \cup M_k} f_{(u,v,\tilde{j})}^{(o,d,\tilde{i})} - \sum_{(v,u,\tilde{j}) \in E_k \cup M_k} f_{(v,u,\tilde{j})}^{(o,d,\tilde{i})} = 0, \forall \mathbf{G}_k \in \Omega, \tilde{i} \in N^c, v \in V_k, (o,d,\tilde{i}) \in \Theta_{\tilde{i}} \\ \sum_{\tilde{i} \in N^c} \sum_{(o,d,\tilde{i}) \in \Theta_{\tilde{i}}} f_e^{(o,d,\tilde{i})} \leq x_k C^A, \forall \mathbf{G}_k \in \Omega, e \in E_k \\ f_{(d,o,\tilde{i})}^{(o,d,\tilde{i})} \leq d^{(o,d,\tilde{i})}, \forall \tilde{i} \in N^c, (o,d,\tilde{i}) \in \Theta_{\tilde{i}} \\ \tilde{f}_e^{(o,d,\tilde{i})} \geq 0, \forall \tilde{i} \in N^c, (o,d,\tilde{i}) \in \Theta_{\tilde{i}}, \mathbf{G}_k \in \Omega, e \in E_k \cup M_k \end{array} \right. \right\}. \quad (15)$$

其中: $\mathbf{F} = (f_e^{(o,d,\tilde{i})})$, $\mathbf{S} = (s_e)$, $\mathbf{X} = (x_k)$, $\mathbf{R} = (r_e)$, $\mathbf{Y} = (\gamma_{\tilde{k}\tilde{i}})$ 。(12) 式为目标函数, 表示联盟总收益最大。(13) 式用于确保仅有 1 个 $\mathbf{G}_k$ 被选择。(14) 式和 (15) 式表明对于任意承运人 $\tilde{i} \in N^c$, 只有能够实现承运人 $\tilde{i}$ 自身收益的最大化的 $\mathbf{F}$ 才是 CPSAND 的一个可行解。

3 算法设计

3.1 算法设计思路

[CPSAND] 是一个复杂非线性混合整数规划模型。受 (13) 式的影响, 该模型几乎无法直接求解。但深入分析后可以发现: 当航线选择方案 $\mathbf{X}$ 与航速设定方案 $\mathbf{S}$ 已知时, [CPSAND] 的结构与经典的运输问题颇为类似。利用这个特征, 可从 [CPSAND] 中剥离出两个简化的模型, [CPSAND-I] 与 [CPSAND-II], 其中: 前者以 $\mathbf{F}$ 为决策变量, 以联盟货运收入最大为目标, 是一个标准的多商品流模型; 后者则以舱位交易价格 $\mathbf{R}$ 为决策变量, 为一个没有目标函数的决策模型。

[CPSAND-I]: 对于一组可行的 $\mathbf{X} = (x_k)$, $\mathbf{Y} = (\gamma_{\tilde{k}\tilde{i}})$ 和 $\mathbf{S} = (s_e)$, 有:

$$\max_{\mathbf{F}} \sum_{(o,d,\tilde{i}) \in \Theta} f_{(d,o,\tilde{i})}^{(o,d,\tilde{i})} \tilde{r}^{(o,d,\tilde{i})},$$

$$\text{s. t. } \mathbf{F} \in \mathbf{P}.$$

[CPSAND-II]: 对于一组可行的 $\mathbf{X} = (x_k)$, $\mathbf{Y} = (\gamma_{\tilde{k}\tilde{i}})$, $\mathbf{S} = (s_e)$ 以及 $\mathbf{F}$, 对于所有 $\tilde{i} \in N^c$ 应满足:

$$\text{s. t. (11), (14), (15) 式。}$$

对于一组可行的 $\mathbf{X}=(x_k), \mathbf{Y}=(\gamma_{k\bar{i}})$ 和 $\mathbf{S}=(s_e)$, 可以通过首先求解[CPSAND-I]获得一组收益最优的 $\mathbf{F}^*$ 而后据此求解[CPSAND-II], 此时[CPSAND-II]中的决策变量仅为 $\mathbf{R}$ 。至此, [CPSAND-II]便被简化为如何通过合理设定 $\mathbf{R}$ 以确保对于任意承运人而言 $\mathbf{F}^*$ 均为收益最大的方案, 即 $\mathbf{F}^*$ 均满足(14)式。借助于逆优化理论, 可以将[CPSAND-II]等价变换为[CPSAND-IIE], 从而相对容易地计算出所需的 $\mathbf{R}$ 。通过上述过程, 本文实质上便获得了这样一条技术路线, 即对于一组给定 $\mathbf{X}=(x_k), \mathbf{Y}=(\gamma_{k\bar{i}})$ 和 $\mathbf{S}=(s_e)$, 首先通过求解[CPSAND-I]获得 $\mathbf{F}^*$, 而后据此通过求解[CPSAND-IIE]获得所需的定价方案 $\mathbf{R}^*$, 这就为本文尝试使用智能算法求解 $\mathbf{X}, \mathbf{Y}$ 和 $\mathbf{S}$ 创造了条件。

[CPSAND-IIE]: 对于所有 $\mathbf{G}_k \in \Omega$, 有:

$$(\boldsymbol{\pi}, \boldsymbol{\alpha}, \boldsymbol{\beta}, \mathbf{R}) \in \bigcup_{\bar{i} \in \mathbb{N}^c} \text{INVP}^{\bar{i}}.$$

其中: $\boldsymbol{\pi}=(\pi_v^{(o,d,\bar{i})}), \boldsymbol{\alpha}=(\alpha_e)$ 以及 $\boldsymbol{\beta}=(\beta^{(o,d,\bar{i})})$ 分别为约束(6)式, (7)式和(8)式的对偶变量; INVP $^{\bar{i}}$ 的具体形式如下:

$$\begin{aligned} \pi_o^{(o,d,\bar{i})} - \pi_d^{(o,d,\bar{i})} + \beta^{(o,d,\bar{i})} &\geq \tilde{r}^{(o,d,\bar{i})}, \forall f_{(d,o,\bar{i})}^{(o,d,\bar{i})} \in J; \pi_o^{(o,d,\bar{i})} - \pi_d^{(o,d,\bar{i})} + \beta^{(o,d,\bar{i})} = \tilde{r}^{(o,d,\bar{i})}, \forall f_{(d,o,\bar{i})}^{(o,d,\bar{i})} \in J^+; \\ \pi_o^{(o,d,\bar{j})} - \pi_d^{(o,d,\bar{j})} + \beta^{(o,d,\bar{j})} &\geq 0, \forall f_{(d,o,\bar{j})}^{(o,d,\bar{j})} \in Q; \pi_o^{(o,d,\bar{j})} - \pi_d^{(o,d,\bar{j})} + \beta^{(o,d,\bar{j})} = 0, \forall f_{(d,o,\bar{j})}^{(o,d,\bar{j})} \in Q^+; \\ \pi_v^{(o,d,\bar{i})} - \pi_u^{(o,d,\bar{i})} + \alpha_e - \gamma_{k\bar{i}} r_e &\geq 0, \forall f_{(u,v)}^{(o,d,\bar{i})} \in T; \pi_v^{(o,d,\bar{i})} - \pi_u^{(o,d,\bar{i})} + \alpha_e - \gamma_{k\bar{i}} r_e = 0, \forall f_{(u,v)}^{(o,d,\bar{i})} \in T^+; \\ \pi_v^{(o,d,\bar{j})} - \pi_u^{(o,d,\bar{j})} + \alpha_e + (1 - \gamma_{k\bar{i}}) r_e &\geq 0, \forall f_{(u,v)}^{(o,d,\bar{j})} \in U; \pi_v^{(o,d,\bar{j})} - \pi_u^{(o,d,\bar{j})} + \alpha_e + (1 - \gamma_{k\bar{i}}) r_e = 0, \forall f_{(u,v)}^{(o,d,\bar{j})} \in U^+; \\ \pi_v^{(o,d,\bar{i})} &\geq 0, \forall v \in V_k, (o,d,\bar{i}) \in \Theta_i, \bar{i} \in \mathbb{N}^c; \alpha_e \geq 0, \forall e \in E_k; \beta^{(o,d,\bar{i})} \geq 0, \forall (o,d,\bar{i}) \in \Theta_i, \bar{i} \in \mathbb{N}^c. \end{aligned}$$

其中:

$$\begin{aligned} J &= \{f_{(d,o,\bar{i})}^{(o,d,\bar{i})} \mid f_{(d,o,\bar{i})}^{(o,d,\bar{i})} = 0, \forall (o,d,\bar{i}) \in \Theta_i\}, J^+ = \{f_{(d,o,\bar{i})}^{(o,d,\bar{i})} \mid f_{(d,o,\bar{i})}^{(o,d,\bar{i})} > 0, \forall (o,d,\bar{i}) \in \Theta_i\}, \\ Q &= \{f_{(d,o,\bar{j})}^{(o,d,\bar{j})} \mid f_{(d,o,\bar{j})}^{(o,d,\bar{j})} = 0, \forall (o,d,\bar{j}) \in \Theta \setminus \Theta_i\}, Q^+ = \{f_{(d,o,\bar{j})}^{(o,d,\bar{j})} \mid f_{(d,o,\bar{j})}^{(o,d,\bar{j})} > 0, \forall (o,d,\bar{j}) \in \Theta \setminus \Theta_i\}, \\ T &= \{f_e^{(o,d,\bar{i})} \mid f_e^{(o,d,\bar{i})} = 0, \forall (o,d,i) \in \Theta_i, e \in E_k\}, T^+ = \{f_e^{(o,d,\bar{i})} \mid f_e^{(o,d,\bar{i})} > 0, \forall (o,d,i) \in \Theta_i, e \in E_k\}, \\ U &= \{f_e^{(o,d,\bar{j})} \mid f_e^{(o,d,\bar{j})} = 0, \forall (o,d,j) \in \Theta \setminus \Theta_i, e \in E_k\}, U^+ = \{f_e^{(o,d,\bar{j})} \mid f_e^{(o,d,\bar{j})} > 0, \forall (o,d,j) \in \Theta \setminus \Theta_i, e \in E_k\}. \end{aligned}$$

本文采用基于遗传算法(GA)框架的启发式算法进行求解, 思路可参考图 2。首先, 对 $\mathbf{X}, \mathbf{Y}$ 和 $\mathbf{S}$ 进行染色体编码, 1 组染色体代表 1 个可行的航线与航速方案。其次, 以 $\mathbf{X}, \mathbf{Y}$ 和 $\mathbf{S}$ 为输入参数, 求解[CPSAND-I]中的线性规划模型, 获得使联盟收益最大的舱位交换方案(货物运输方案) $\mathbf{F}^*$ 。而后, 以 $\mathbf{F}^*$ 作为已知参数, 求解模型[CPSAND-IIE], 获得舱位交易价格 $\mathbf{R}^*$ 。最后, 根据[CPSAND-I]计算的联盟最大收益对编码实施评价、选择、交叉、变异等 GA 算法的计算作业, 最终给出计算结果。有关选择、交叉、变异的算子均参考文献[14]。

3.2 编码设计

本文提出的编码方法如图 3 所示, 这里使用一个由若干子编码构成的染色体表示一个航线方案, 其中每个子编码记为 s_i^{cd} , 用于刻画一个联盟内承运人 $\bar{i}$ 的网络方案。每个 s_i^{cd} 由 5 组基因串构成, 分别记为 $s_{i1}^{eq} \sim s_{i5}^{eq}$ 。其中: s_{i1}^{eq} 为整数序列型编码, 用于协助描述挂靠港口访问顺序; s_{i2}^{eq} 和 s_{i3}^{eq} 为 0-1 整数编码, 用于刻画去程子航线和回程子航线挂靠港口选择; s_{i4}^{eq} 和 s_{i5}^{eq} 则为实数编码, 分别用于描述去程和回程子航线相关航段的航速选择。结合图 3 中的实例, 说明 $s_{i1}^{eq} \sim s_{i5}^{eq}$ 的具体解码过程。第 1 步要确定去程和回程子航线挂靠的港口。在 s_{i2}^{eq} 和 s_{i3}^{eq} 中, 每个位置上的数字代表对应号码的港口挂靠情况, 当数字为 1 表示该港口被挂靠, 为 0 则相反。在 s_{i2}^{eq} 中, 1, 2, 4, 7 号位置的数字为 1, 其他位置为 0, 则代表去程子航线挂靠的港口为 1, 2, 4, 7 号港。同理, s_{i3}^{eq} 中 1, 2, 3, 4, 7 号位置数字为 1, 代表回程子航线挂靠的港口为 1, 2, 3, 4, 7 号港。第 2 步要确定去程和回程子航线挂靠港口的顺序。 s_{i1}^{eq} 序列自左向右定义了去程子航线挂靠港口的先后顺序, 自右向左定义了回程子航线的靠港先后顺序。比较去程挂靠港口 1, 2, 4, 7 号港在 s_{i1}^{eq} 中自左向右的排序, 可以获得去程靠港顺序为 1, 3, 4, 7。同理, 根据 s_{i1}^{eq} 中自右向左的排序, 可以获得回程子航线靠港顺序为 4, 7, 3, 2, 1。第 3 步确定航线上每个航段的船舶航速。 s_{i4}^{eq} 和 s_{i5}^{eq} 序列中的前 N 位数字分别用来设置去程和回程子航线途径的前 N 个航段的船舶航速。设其中某一位的数字为 η , 利用公式 $\eta(s_{\max} - s_{\min}) + s_{\min}$ 便可计算出该位置对应航段的船舶航速。

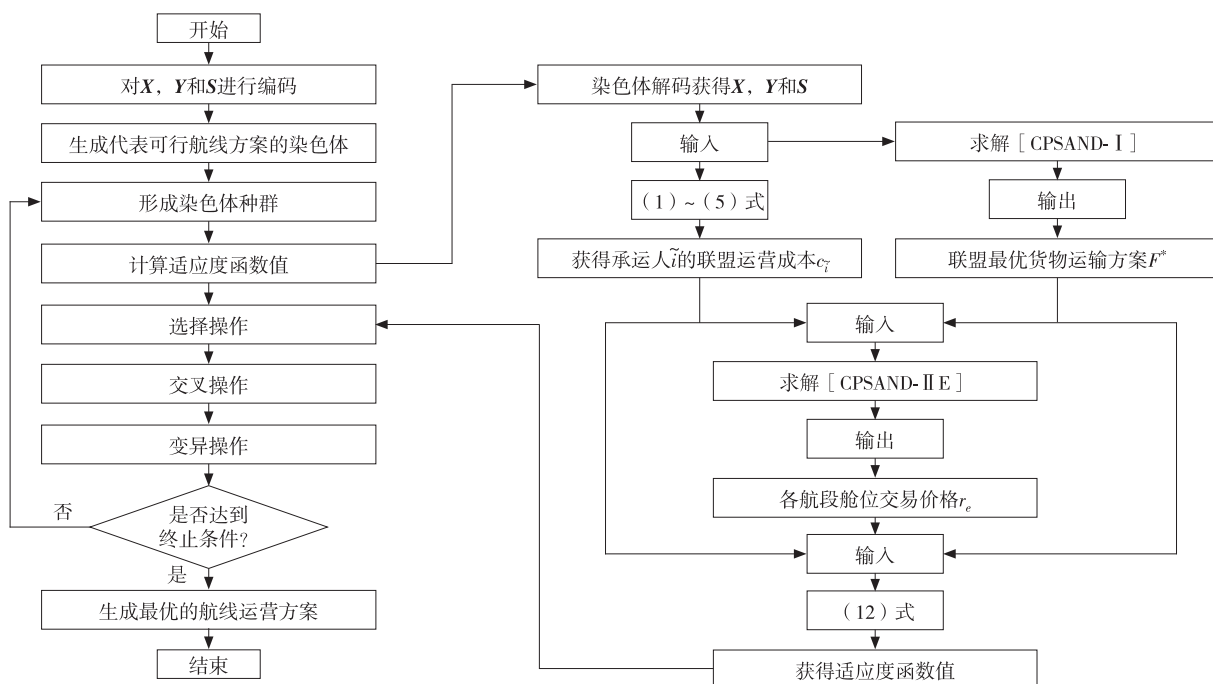


图 2 算法设计思路

Fig. 2 Design idea of the algorithm proposed

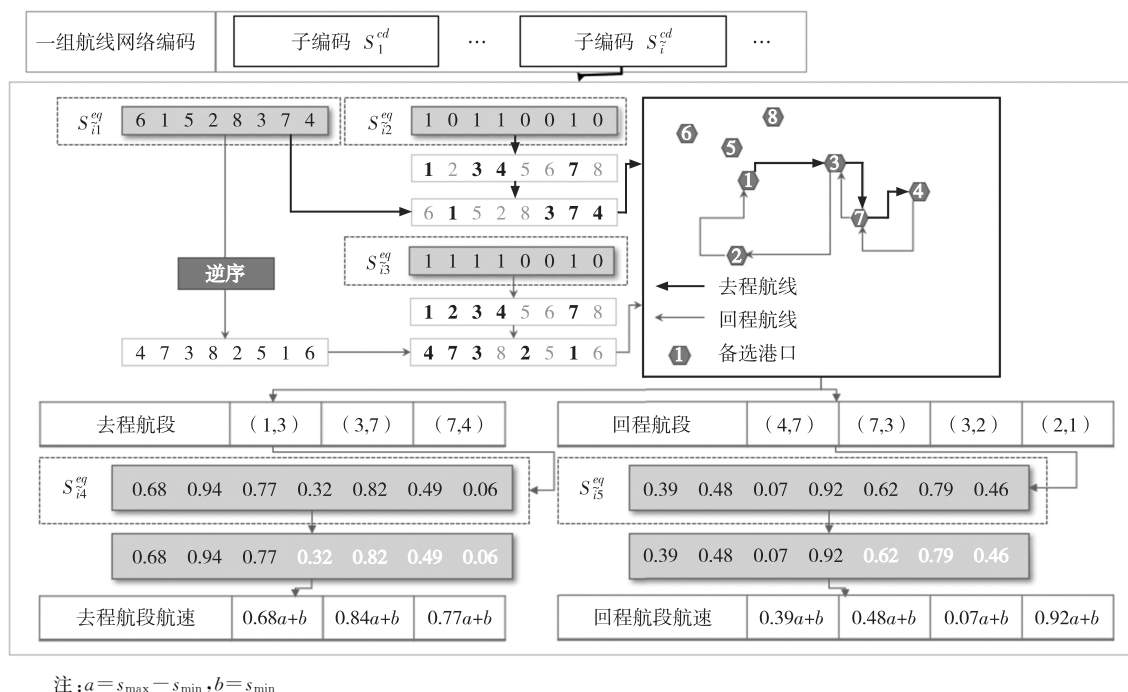


图 3 染色体编码设计方法

Fig. 3 Design method of the chromosome coding

4 算例分析

4.1 实验设计与数据选择

本文设置了两组实验方案,第1组为港口间货运价格为100%以及提高到115%时,研究联盟航线网络方案、船队设计方案、货物运输方案以及各航段的舱位交易价格的设定。并基于上述案例,探讨联盟合作对承运人运营收益的影响。第2组为港口间货运价格为100%时,分别将碳税费率提高到原有的115%和130%时,研究航线派船方案,船舶航速以及各种运营成本的变化情况。在港口方面选择天津、大连、青岛、上海、高雄、釜山、博

多、东京、勒阿弗尔、费利克斯托和汉堡作为备选港口,港口间运输距离、货运需求量和货运价格获取自相关报告与调查。假定 A 和 B 有两个承运人合作运营联盟航线,服务频率为 1 周 1 班,货运需求和运量均以 $\text{TEU} \cdot \text{周}^{-1}$ 为单位,并选择载箱量为 14 000 TEU 的集装箱船运营,此种船型的航速设计范围在每小时 12~18 海里,船舶租金为每日 168 000 美元。在燃油成本的计算方面,本文沿用文献[15]的设定,这里不再赘述。

4.2 联盟航线网络与收益分配的讨论

对联盟运营整体状况进行对比分析,在 100% 运价案例中,联盟最优航线网络如图 4 所示。共计运输货运需求为 36 040 TEU,联盟运营总收入为 4 688 万美元,产生的总成本为 3 712 万美元。在 115% 运价案例中,如图 5 所示,运输货运需求共计 45 800 TEU,联盟运营收入为 6 070 万美元,产生的总成本为 3 857 万美元。

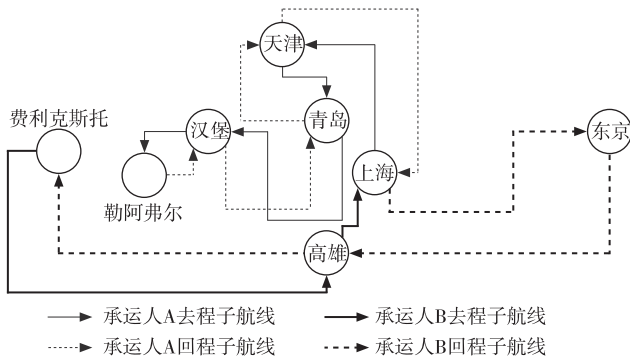


图 4 100% 运价时联盟航线网络

Fig. 4 Alliance network in 100% revenue case

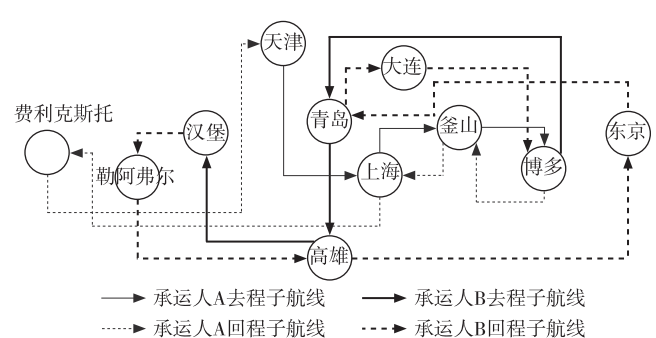


图 5 115% 运价时联盟航线网络

Fig. 5 Alliance network in 115% revenue case

计算发现运价提升后,挂靠港口的数量明显增加,航线覆盖的范围也随之扩大。由于大连、釜山、博多等 3 个港口的加入,联盟去程和回程子航线在上海、釜山、博多、青岛、高雄等 5 个港口共同挂靠,中国东南沿海至日韩之间形成了短途运输航线,货运时效性大大增强。中国东南沿海至日本、韩国的货运量由 50 TEU 增长到 7 110 TEU,日本、韩国至中国的货运量也从 300 TEU 增长至 1 040 TEU。相对地,由于上海至天津航线需要先行驶到欧洲的勒阿弗尔再返回上海,运输时间过长,且此部分运费较低,导致上海至天津的货运量由 1 220 TEU 骤减至 460 TEU。

此外,随着航线网络的变化,承运人运输了更多的货运需求,各航段平均载箱量明显增加,运营收益明显提高。对比表 1 给出的两种情境下联盟运营数据发现:115% 运价案例与 100% 运价案例相比,货物运量、联盟货运收入和运营成本涨幅分别为 27.1%、29.5% 和 3.9%;各航段平均载箱量从 3 888 TEU 上升到 4 821 TEU,涨幅达 24%。这表明,承运人选择了尽可能多的挂靠港口,以揽取更多货源。与此同时,货运量增加导致船舶航段平均载箱量增加,承运人可以更好地发挥规模经济的优势,降低船舶的空载成本,提高货物运输的净收益。

表 1 各案例下联盟运营数据

Tab. 1 Operation data in each case

案例	货运需求总运量/TEU	货运收入/万美元	运营成本/万美元
100% 运价	36 040	4 688	3 712
115% 运价	45 800	6 070	3 867

如表 2 和表 3 所示,在承运人合作决策方面,在 100% 运价案例中,A 承运人投入 9 条船舶运营,运费收入为 2 027 万美元,成本为 2 035 万美元;B 承运人投资 7 条船舶,运费收入为 2 661 万美元,成本为 1 677 万美元。在只计算运费收入的前提下,A 承运人联盟运营为轻微亏损状态,而 B 承运人获得了高额收益。为了达成联盟最优的货物运输计划,A 承运人需要在自己运营的航段上出租给 B 承运人大量船舶舱位达 34 765 TEU;而 A 承运人租用 B 承运人的舱位数为 17 835 TEU,仅为 A 承运人出租舱位数的 51.3%。在这种情境下,A 承运人通过舱位交易活动,为提供给 B 承运人的舱位获得了大量补贴,而 B 承运人借助 A 承运人的运营网络,无成本地获得了大量货运收入,作为代价 B 承运人以舱位交易价格的形式变相地支出一部分货运收入,使 A 承运人投资收益

率上升到与自身持平,维护了 A 承运人继续合作的意愿。

在 115%运价案例中,情况发生了很大变化。每个承运人货运量随着联盟货运量的增长而增长,货运收入也随之增加。然而,由于 B 承运人占据了更高的市场份额,导致联盟方案中 B 承运人的货物运量明显高于 A 承运人,因此 B 承运人获得了更多的货运收入。仔细分析货运方案可以发现:A 承运人在青岛到汉堡、高雄到汉堡、高雄到费利克斯托、上海到费利克斯托、青岛到博多、青岛到费利克斯托等 6 个港口对间的运量总计达到 11 265 TEU,占货运总数的 58.0%;然而这部分货运需求全部需要经过 B 承运人的航线网络,因此需要以舱位交易价格的形式支出大量费用。此外,A 承运人总共使用 B 承运人舱位数 35 835 TEU,出租给 B 承运人的舱位数为 36 299 TEU,两者比例为 98.7%。由此可以看出,相比于 100%运价案例,此时 A 承运人租用 B 承运人的船舶舱位数量明显增加;在货物运量差异明显案例下,A 承运人无法像 100%运价案例中通过舱位交易活动获得大量补贴来弥补运费收入的差距,从而导致两者投资收益率的差距明显增大。换言之,联盟为了实现整体收益最大的货物运输方案,在 A 承运人在与 B 承运人运量差异明显案例下,需要投入相等的船舶数量来配合 B 承运人完成货物运输任务。

表 2 各案例下联盟内承运人的经营数据
Tab.2 Operation data for every carrier in each case

案例	承运人	货运需求运量/TEU	运费收入/万美元	运营成本/万美元	运营船舶数量
100%运价	A	13 063	2 027	2 035	9
	B	22 977	2 661	1 677	7
115%运价	A	19 436	2 660	1 934	10
	B	26 364	3 411	1 923	10

表 3 联盟各承运人舱位交易活动的相关数据
Tab.3 Data about capacity exchange activity for every carrier

案例	承运人	租用舱位所支付的费用/万美元	出租舱位所获得的补偿/万美元	运营净收益/万美元
100%运价	A	1 694	2 230	528
	B	2 230	1 694	449
115%运价	A	4 016	4 185	895
	B	4 185	4 016	1 318

4.3 征收碳税对航线运营方案影响的分析

在 100%运价案例中研究提高碳税价格后航线网络及运营方案的变化情况,主要分 115%碳税费率和 130%碳税费率两种情形进行分析,此时的联盟航线网络如图 6 和图 7 所示。分析结果显示,相比 115%碳税费率情形,在 130%碳税费率情形下,航线网络中短途海运航段明显增加。在联盟运营成本方面,如表 4 所示,在 115%碳税费率情形和 130%碳税费率情形下,航线运营总成本均基本持平,但其中几项成本构成发生了变化:在 115%碳税费率情形下,航线网络运营共需要 23 条船,船舶租金为 1 440 万美元,燃油支出为 526 万美元,碳税税费为 480 万美元;然而在 130%碳税费率情形下,船舶租金为 1 560 万美元,燃油支出为 370 万美元,碳税支出为 510 万美元。由此可以看出,随着碳税费率的增长,联盟缴纳的碳税总费用并未发生很大程度的改变,燃油支出明显下降,航线派遣的船舶数量增加。分析以上数据不难推测,承运人为了降低运营成本,选择以更多的船舶数量,更低的航速运营船舶。由于航速降低,因此船舶消耗的燃油也下降,从而导致更少的燃油成本支出;并且在碳税费率提高的情形下,由于燃油消耗量下降,因此碳税总支出够保持相对不变。

5 结论

本文在碳税体系的建立与应用和班轮联盟模式成为主流的背景下,对航线优化设计问题开展了研究。基于逆优化理论和整数规划方法,构建了基于联盟内承运人之间的合作博弈关系的数学模型,对联盟达成条件和各参与方利益分配进行了定量分析。考虑到承运人各方对系统成本与运价的敏感性,本文基于运价和碳税费率不同的涨幅情况设计了数值实验,通过对比分析实验结果,本文得出了以下结论:

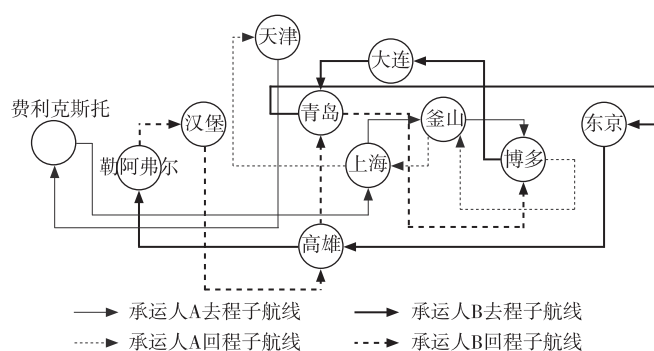


图 6 115%碳税费率时联盟航线网络

Fig. 6 Alliance network for 115% carbon tax rate

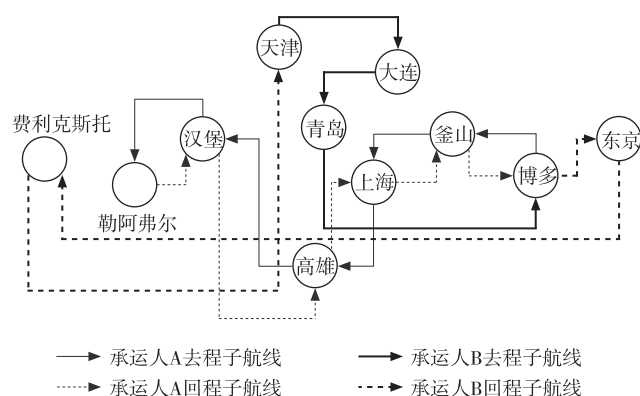


图 7 130%碳税费率时联盟航线网络

Fig. 7 Alliance network for 130% carbon tax rate

表 4 不同碳税费率下联盟的经营数据

Tab. 4 Alliance data under different carbon tax rate

案例	联盟运营总成本/万美元	船舶租金/万美元	燃油支出/万美元	碳税支出/万美元
115%碳税	2 440	1 440	520	480
130%碳税	2 460	1 580	370	510

1) 碳税费率的提高影响了承运人控制航线运营成本的策略。实验结果表明,系统成本对于碳税费率的上升比较敏感,由于碳税直接提高了承运人的燃油成本,相对于以更高航速、投入更少船舶的运营策略来说,承运人应当更倾向于增加船舶数量、降低船舶航速,更为精准地控制燃油与碳税成本的支出。另外,在联盟合作背景下,碳税成本能否合理控制也是影响承运人能否顺利开展合作的关键因素之一。

2) 舱位交易价格的设计对联盟最优运营方案的实现起到了决定性作用。舱位交易价格本质是联盟对承运人投入的运输资源的定价,联盟通过制定统一的定价方案引导各方以联盟整体最优的策略进行资源交易,使用运输资源的承运人将自身运费收入分出一部分作为运输资源提供方的补贴,从而实现了对承运人运费收入的再分配。这种分配有效地维护了承运人各方参与联盟合作的意愿。实验结果表明,舱位交易价格的设计依赖于具体的联盟航线网络和货物运输方案。随着航线挂靠的港口增加和货运价格的上涨,承运人各方之间的竞争加剧,市场份额大的承运人在舱位定价中占据了主动权,更有机会成为联盟合作博弈的获利者。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] MENG Q, WANG S, ANDERSSON H, et al. Containership routing and scheduling in liner shipping: overview and future research directions[J]. Transportation Science, 2014, 48(2): 265-280.
- [3] CHRISTIANSEN M, HELLSTEN E, PISINGER D, et al. Liner shipping network design[J]. European Journal of Operational Research, 2020, 286(1): 1-20.
- [4] SHINTANI K, IMAI A, NISHIMURA E, et al. The container shipping network design problem with empty container repositioning[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2007, 43(1): 39-59.
- [5] 张燕, 杨华龙, 计明军. 考虑航速优化的班轮航线网络设计[J]. 交通运输系统工程与信息, 2016, 16(5): 219-226.
ZHANG Y, YANG H L, JI M J. Liner service network design with speed optimization[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2016, 16(5): 219-226.
- [6] 张燕, 计明军, 郑建凤. 考虑运输时限和航速优化的班轮航线网络设计[J]. 交通运输系统工程与信息, 2019, 19(5): 219-224.
ZHANG Y, JI M J, ZHENG J F. Liner service network design with transit time constraints and speed optimization[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2019, 19(5): 219-224.
- [7] 蔡蕾, 曾哈, 彭超靖. 基于博弈理论的药品需求方利益分配机制初探[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2020, 37(4): 6-14.

- CAI L, ZENG H, PENG C J. A preliminary exploration of the benefit distribution mechanism of China's drug demand side based on game theory[J]. Journal of Chongqing Normal University (Natural Science), 2020, 37(4): 6-14.
- [8] 张保帅, 沈坤平, 田盈. 基于演化博弈的制造业金融化调控机制研究[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2019, 36(1): 14-20.
- ZHANG B S, SHEN K P, TIAN Y. Study on regulatory mechanism of manufacturing industry based on evolutionary game[J]. Journal of Chongqing Normal University (Natural Science), 2019, 36(1): 14-20.
- [9] AGARWAL R, ERGUN O. Ship scheduling and network design for cargo routing in liner shipping[J]. Transportation Science, 2008, 42(2): 175-196.
- [10] AGARWAL R, ERGUN O. Network design and allocation mechanisms for carrier alliances in liner shipping[J]. Operations Research, 2010, 58(6): 1726-1742.
- [11] 刘荣亮, 史立, 冯杰. 班轮联盟调箱优化模型及激励机制设计[J]. 上海海事大学学报, 2018, 39(4): 7-13.
- LIU R L, SHI L, FENG J. Optimization model of empty container allocation for liner alliance and incentive mechanism design [J]. Journal of Shanghai Maritime University, 2018, 39(4): 7-13.
- [12] ARSLAN O, ARCHETTI C, JABALI O, et al. Minimum cost network design in strategic alliances[J]. Omega-International Journal of Management Science, 2020, 96(C): 1-10.
- [13] LEE E S. Improving a firm's performance within a strategic shipping alliance[J]. The Asian Journal of Shipping and Logistics, 2019, 35(4): 213-219.
- [14] CHEN K, XIN X, ZHANG T, et al. Multiport cooperative location model with a safe-corridors setting in west Africa[J]. International Journal of Logistics Research and Applications, 2020, 23(6): 580-601.
- [15] CARIOU P, CHEAITOU A, LARBI R, et al. Liner shipping network design with emission control areas: a genetic algorithm-based approach[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2018, 63: 604-621.

Operations Research and Cybernetics

Shipping Network Optimization Model Considering Carbon Emission and Liner Alliance Cooperation

YANG Zhong¹, GE Shinong², LIU Yanzhi¹, CHEN Kang²

(1. College of Navigation, Dalian Maritime University;

2. School of Maritime Economics & Management, Dalian Maritime University, Dalian Liaoning 116026, China)

Abstract: [Purposes] Considering the imposition of carbon tax and alliance operation becoming the mainstream of liner shipping industry, the problem of shipping network design is studied under this trend. [Methods] A mixed integer network optimization model is established by using cooperative game theory and inverse optimization idea. On the basis of considering the cost of carbon tax and alliance cooperation, the fleets and freight demands of the alliance members are integrated to optimize the alliance shipping network scheme, fleet deployment scheme, cargo transportation scheme, sailing speed scheme and a unified set of fleet capacity trading prices with the greatest overall benefit of the alliance simultaneously, and that set of fleet capacity trading prices can ensure that the greatest overall benefit scheme of the alliance can be realized when each carrier carries out fleet capacity trading activities according to its own interests maximization. Genetic algorithm framework is used to design the algorithm of the model. [Findings] Based on the actual operation data of the Asia-Europe route, the cases of different freight rates and carbon tax rates are set to carry out sensitivity analysis. The results indicate that carbon tax expenditure and alliance cooperation method are different in different cases. [Conclusions] The experimental results show that the freight rates have a significant effect on the network structure of the alliance and benefit distribution. With the increase of freight rates, the complexity of network structure increases, and the carrier with higher market share has higher rate of return on investment. The imposition of carbon tax systems significantly changes the ship operation strategy. With the increase of carbon tax rate, the ship's short-distance voyages increase, and the carriers tend to increase the number of operating ships and reduce the sailing speed.

Keywords: shipping network design; liner alliance; carbon emissions; cooperative game; inverse optimization

(责任编辑 方 兴)