

考虑货主选择惯性的班轮联盟航运网络设计

陈海潮

同济大学经济与管理学院, 上海

收稿日期: 2023年2月10日; 录用日期: 2023年3月2日; 发布日期: 2023年3月16日

摘要

为了应对贸易冲突加剧和新冠肺炎疫情的影响, 班轮公司开始结成联盟从而维持航运服务的稳定性, 托运人在选择海洋运输服务时也变得更加敏感。在上述特定市场形势下, 我们研究了考虑托运人敏感性(即选择惯性)的班轮联盟航运网络设计问题, 并建立了一个非线性的混合整数规划模型。模型使班轮联盟的利润最大化, 优化了联盟航线、船队设计方案和舱位分配方案。为了保证联盟运营的可持续性, 建立了联盟成员之间的利润分配机制。我们基于遗传算法框架提出了一种求解模型的启发式算法。根据亚洲和西欧之间的实际航运数据, 进行了数值实验。研究结果可为班轮联盟的可持续经营提供理论支持。

关键词

航运网络设计, 班轮联盟, 选择惯性, 遗传算法

Liner Alliance Shipping Network Design Considering the Shipper's Choice Inertia

Haichao Chen

School of Economics and Management, Tongji University, Shanghai

Received: Feb. 10th, 2023; accepted: Mar. 2nd, 2023; published: Mar. 16th, 2023

Abstract

Affected by the intensification of trade conflicts and the impact of the COVID-19, liner companies began to form alliances to enhance supply chain resilience, and shippers became more sensitive when choosing ocean transport services. Motivated by the market situation, we investigate the liner alliance shipping network design problem considering the sensitivity of the shippers (i.e., choice inertia) and a mixed integer programming model is established. The model maximizes the profit of the alliance and optimizes the alliance shipping network, fleet design scheme and the slot allocation scheme. To ensure the sustainability of alliance operations, a profit distribution mechanism

is developed. A genetic-based heuristic is developed to solve the models. Based on the real shipping data between Asia and Western Europe, numerical experiments are carried out. The model and algorithms can provide decision-making reference for the daily operations of a liner alliance.

Keywords

Shipping Network Design, Liner Alliance, Choice Inertia, Genetic Algorithm (GA)

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着经济全球化的发展,海运在运输远距离和大宗货物时,由于其成本优势,在国际贸易中发挥着越来越重要的作用[1]。目前,海运承担的货运量占全球贸易量的 80%以上[2]。集装箱海运作为一种重要的海上运输方式,自 20 世纪 50 年代集装箱被发明以来发展迅速。特别是在过去三十年中,集装箱运输的年增长率超过 8% [3]。集装箱海运服务由班轮公司通过其航运网络提供。为了提供相对稳定的服务,班轮公司通常会提前三个月至六个月设计并发布航运网络的运营信息(即货轮类型、发船频率、停靠港口、港口停靠顺序和运价) [4]。货主(托运人)根据班轮公司披露的信息,将货物交给适合的班轮公司进行运输。航运网络的合理性和有效性不仅直接影响班轮公司的利润甚至未来的可持续发展,而且通过影响供应链和产品价格的稳定性,影响所有企业和个人。因此,如何设计科学有效的航运网络始终是业界和学术界共同的研究热点。

然而近年来,受贸易纠纷和 COVID-19 的影响,海运市场出现了一些新变化。海洋市场的运输需求与运输供给同时呈现出不确定性。一方面,航运市场需求不稳定,需求的季节性波动以及疫情和政治等不可抗力造成需求波动使得班轮公司难以维持航线的日常运营[5]。2016 年 8 月 31 日,世界第六大班轮公司 HANJIN 宣布破产。为了应对需求波动,班轮公司必须相互合作,整合班轮资源和运输需求,形成班轮联盟。班轮联盟的成立有助于提高船舶利用率,占据更高的市场份额并形成规模经济[6]。到 2020 年 3 月,世界三大班轮联盟(2M 联盟、OCEAN 联盟和 The 联盟)的运力占全球市场总运力的近 80% [7]。另一方面,新冠肺炎导致的运输服务供应能力的不确定性也使货主的日常运营面临严峻挑战。在这种背景下,货主在选择班轮公司时往往表现出一定的选择惯性,货主倾向于继续与原来的运输伙伴合作,除非班轮公司无法满足其运输需求[8]。因此在实践中,班轮公司为了与货主维持稳定的合作伙伴关系,尽管在淡季会遭受损失,但仍提供稳定的运输服务。

基于上述背景,本文旨在对集装箱运输网络设计问题进行深入研究,将货主的选择惯性和班轮联盟的要素纳入模型。每个联盟成员运营其航运子网络,所有子网络共同构成了整个联盟的航运网络。联盟必须需要制定合理的利润分配方案,这是维持联盟稳定性的必要前提。同时,受选择惯性的影响,联盟的航运网络必将是一个包含多阶段的网络。因此,本文研究了考虑货主选择惯性的班轮联盟航运网络设计问题(LASND)。在当前复杂的海运环境下,研究 LASND 有助于建立一个稳定的航运系统,使班轮公司和货主共同受益,并维护全球供应链的稳定。

2. 问题描述

2.1. LASND

LASND 包含三个关键要素:班轮公司、货物和停靠港口。班轮公司通常提前 3-6 个月公布发船频率、

停靠港口、停靠顺序、班轮类型和运价，以提供相对稳定的运输服务[9]。因此，我们设定了班轮公司需要在 LASND 中做出的决定，涉及停靠港口、停靠顺序和舱位分配方案相关元素的优化。

然而，一旦将联盟要素和货主的选择惯性引入模型，决策过程就不同于传统的航运网络设计。为了在波动的世界经济和贸易环境中保持供应链的稳定性，货主对运输服务供应商的选择具有选择惯性[8]。在一个规划期内，当班轮联盟能够在当前子规划期满足货主的运输需求时，即使存在更经济的选择，货主也会在下一子规划期内继续与该班轮联盟合作。然而，一旦货主的运输需求没有得到充分满足，货主在接下来的子规划期内将不会再选择该班轮联盟的运输服务。这使得班轮联盟有必要根据 LASND 背景下的市场条件，在规划期内调整运营决策。

此外，LASND 是一个涉及多家班轮公司的问题。班轮联盟由多家班轮公司组成。各班轮公司的子网络被整合成整个班轮联盟的航运网络。为了避免无效的内部竞争，每条航段只能由一个联盟成员运营。当航运网络确定后，联盟需要制定一个舱位分配方案，以实现利润最大化。换言之，联盟必须对每个运输需求做出拒绝或接受的决定。运输服务完成后，联盟的利润如何在成员之间合理分配是联盟必须解决的问题。利润分配机制是联盟持续运作的关键。

为方便起见，本文中常用的符号列于表 1 (Table 1)中。

Table 1. The notations used in this paper

表 1. 本文符号注释

集合	
T	所有子规划期的集合，元素为 t
G_k	联盟航运网络方案 k ，包含每个子规划期的航运网络， $G_k := \{G_{k1}, G_{k2}, \dots, G_{kN}\}$
G_{kt}	t 子规划期的联盟航运网络方案 G_k
Ξ	联盟所有航运网络方案的集合，元素为 G_k
V_{kt}	航运网络 G_{kt} 中停靠的港口集合
E_{kt}	航运网络 G_{kt} 中的航段集合
M_{kt}	航运网络 G_{kt} 中虚拟航段集合
W_{kt}	航运网络 G_{kt} 中 O-D 对集合，元素为 (o, d) (表示从港口 o 到港口 d)
C	班轮联盟成员的集合，元素为 \tilde{i}
$V_{k\tilde{i}t}$	航运网络 G_{kt} 中联盟成员 \tilde{i} 运营航线所停靠的港口集合
$E_{k\tilde{i}t}$	航运网络 G_{kt} 中联盟成员 \tilde{i} 运营的航段集合
$M_{k\tilde{i}t}$	航运网络 G_{kt} 中联盟成员 \tilde{i} 对应的虚拟航段集合
$W_{k\tilde{i}t}$	航运网络 G_{kt} 中联盟成员 \tilde{i} 的 O-D 对集合
参数	
(o, d, \tilde{i})	该 (o, d) 运输需求由成员 \tilde{i} 获得， $\Gamma_{\tilde{i}} := \{(o, d, \tilde{i})\}$
e 或 (i, j)	航段 $e := (i, j)$
B_{ship}	货轮的最大运力
$q_t^{(o, d, \tilde{i})}$	第 t 子规划期，联盟成员 \tilde{i} 获得的港口 o 到港口 d 的运输需求
$q_t^{(o, d)}$	第 t 子规划期，联盟获得的港口 o 到港口 d 的总运输需求
dis_e	航段 e 的距离
η	单位化石燃料售价

Continued

变量	
x_k	0~1 变量, 当联盟选择航运网络 G_{k_t} 时为 1, 否则为 0
f	周发船频率
$f_{et}^{(o,d,\tilde{i})}$	航运网络 G_{k_t} 中, 航段 e 上运输的成员 \tilde{i} 获得的 (o,d) 需求的货运量
$f_{et}^{(o,d)}$	航运网络 G_{k_t} 中, 航段 e 上运输的 (o,d) 需求的总货运量
P_e	航段 e 上每标准箱运力的租赁价格
$s_t^{(o,d,\tilde{i})}$	t 子规划期, 联盟成员 \tilde{i} 获得的 (o,d) 需求的运输需求满足率
$s_t^{(o,d)}$	t 子规划期, 联盟获得的 (o,d) 总需求的运输需求满足率
$\delta_{k\tilde{i}t}$	0~1 变量, 当 $E_{k\tilde{i}t}$ 包含航段 e 时, $\delta_{k\tilde{i}t} = 1$; 否则为 0
$N_{k\tilde{i}}^{\text{ship}}$	联盟成员 \tilde{i} 投入航运网络 G_{k_t} 中的船数
$T_{k\tilde{i}t}$	航运网络 G_{k_t} 中成员 \tilde{i} 运营的航线上班轮航行一圈的时间
$T_{k_t}^{(o,d)}$	航运网络 G_{k_t} 中港口 o 到港口 d 的实际时间
$C_{k\tilde{i}t}^p$	航运网络 G_{k_t} 中联盟成员 \tilde{i} 运营航线的港口相关成本
$C_{k\tilde{i}t}^{\text{fuel}}$	航运网络 G_{k_t} 中联盟成员 \tilde{i} 运营航线的航行相关成本
$I_{k_t}^{(o,d)}$	航运网络 G_{k_t} 中港口 o 到港口 d 单位标准箱的运价
I_{k_t}	航运网络 G_{k_t} 中联盟的总收入
$C_{k_t}^{\text{week}}$	航运网络 G_{k_t} 中联盟的周总成本

2.2. 选择惯性

航运市场中, 班轮联盟为了实现利润最大化, 通常会放弃部分运输需求。然而, 由于货主存在选择惯性, 放弃的运输需求将不会在随后的子规划期恢复。这使得班轮联盟在设计其航运网络时, 必须从整个规划期的角度来制定舱位分配方案。为了描述货主的选择惯性, 本文定义了一个变量, 将货物运输量与航运需求量之比称为需求满足率。让 N 表示 T 所包含子规划期数量的集合, $t \in [1, N]$ 表示特定的子规划期。 $f_t^{(o,d)}$ 和 $q_t^{(o,d)}$ 分别表示 t 子规划期中班轮联盟从港口 o 到港口 d 的实际货运量和运输需求。然后, 我们用 $s_t^{(o,d)}$ ($0 \leq s_t^{(o,d)} \leq 1$) 表示在 t 内, 始发地 o 到目的地 d 的运输需求的满足率, $s_0^{(o,d)}$ 表示初始运输需求满足率。 $s_t^{(o,d)}$ 通过公式(1)计算:

$$s_t^{(o,d)} = \frac{f_t^{(o,d)}}{q_t^{(o,d)}} \quad \forall t \in T \quad (1)$$

这样, 货主的选择惯性可以抽象为(2)和(3):

$$\text{若 } f_t^{(o,d)} = s_t^{(o,d)} \times q_t^{(o,d)}, \text{ 则 } s_{t+1}^{(o,d)} = s_t^{(o,d)} \quad \forall t \in [1, N-1] \quad (2)$$

$$\text{若 } f_t^{(o,d)} < s_t^{(o,d)} \times q_t^{(o,d)}, \text{ 则 } s_{t+1}^{(o,d)} \leq \frac{f_t^{(o,d)}}{q_t^{(o,d)}} \quad \forall t \in [1, N-1] \quad (3)$$

由于联盟的运输需求来自不同的联盟成员, 用 \tilde{i} 表示一个联盟成员, 用 C 表示所有成员的集合; $q_t^{(o,d,\tilde{i})}$ 和 $s_t^{(o,d,\tilde{i})}$ 分别表示在 t 子规划期成员 \tilde{i} 的 (o,d) 运输需求和 (o,d) 运输需求满足率。联盟的运输需求和满意度与每个成员的运输需求和满意度之间存在以下关系, 如等式(4)和(5)。

$$q_t^{(o,d)} = \sum_{i \in C} q_t^{(o,d,\tilde{i})} \quad \forall t \in T \tag{4}$$

$$s_t^{(o,d)} = s_t^{(o,d,\tilde{i})} \quad \forall t \in T, \tilde{i} \in C \tag{5}$$

2.3. 班轮联盟航运网络

便于读者理解，图 1(a)提供了一个简易的班轮联盟航运网络。联盟由三家班轮公司构成，每家班轮公司独立经营一条航线，为了避免恶性竞争，每条航段最多仅由一家班轮公司运营。联盟每条航线都是一条回路，为了方便理解，将一条航线分为前进子航线和返航子航线，见图 1(b)，(1,2)表示一个航段，每条航线由多个航段构成。

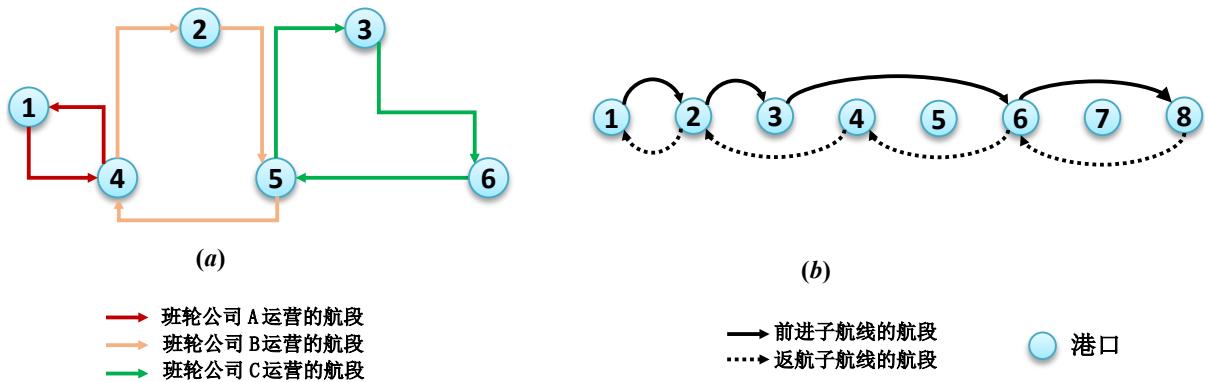


Figure 1. An alliance shipping network design scheme (SNDS) (a) and a shipping route (b)

图 1. 班轮联盟航运网络示例(a)和航线示例(b)

为了方便计算港口间的货运量，本文引入了虚拟航段的概念。图 2 中，黑色箭头表示实际航段，红色箭头表示虚拟航段。虚拟航段(8,1)的运输量仅用于计算港口 1 运往港口 8 的运输量，不表示港口 8 到港口 1 的实际运输。

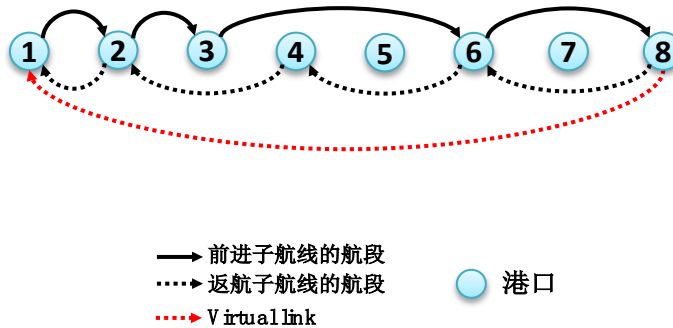


Figure 2. Virtual link

图 2. 虚拟航段

2.4. 联盟利润分配机制

没有合理的利润分配机制，联盟就无法形成。由于联盟成员之间存在分工，联盟成员可以使用其他成员运营的航线运输自己的运输需求。我们将这种行为称为舱位租赁。若成员 A 使用成员 B 的航段运输一个标准箱，则需要向成员 B 支付一个标准箱的租金，称为舱位租赁价格。联盟航运网络中的每条航段 $e = (i, j)$ 都具有对应的舱位租赁价格 p_e ，同一条航段在不同子规划期可能不同，用 $p_{e,t}$ 表示。为了确保利

利润分配的公平性, 我们参考了[6], 对班轮联盟稳定运营的条件进行了以下假设: 1) 每个联盟成员根据实际情况为其负责运营的航线的每条航段设定交易价格, 该价格适用于所有其他成员。2) 基于舱位租赁价格, 每个成员为实现自身利益最大化的利润分配机制就是联盟总利润最大的舱位分配机制。

3. 模型建立

在建立 LASND 模型之前, 参考相关文献进行以下假设[10]:

- 1) 每个联盟成员都使用同一种规格的货轮;
- 2) 每条航段仅能由一个联盟成员运营;
- 3) 每个子规划期的运输需求是确定的, 并且每周运输需求均匀分布;
- 4) 货轮在每个港口均停留 18 个小时。

$$I_{kt} = \sum_{\tilde{i} \in C} \sum_{(o,d,\tilde{i}) \in \Gamma_{\tilde{i}}(d,o) \in M_{k\tilde{i}}} f_{(d,o)t}^{(o,d,\tilde{i})} r_t^{(o,d,\tilde{i})} \quad \forall G_k \in \Xi, t \in T \quad (6)$$

$$I_{k\tilde{i}t} = \sum_{(o,d,\tilde{i}) \in \Gamma_{\tilde{i}}(d,o) \in M_{k\tilde{i}}} f_{(d,o)t}^{(o,d,\tilde{i})} r_t^{(o,d,\tilde{i})} + \sum_{t \in T} \sum_{e \in E_{k\tilde{i}}} P_{et} \left[\sum_{(o,d,\tilde{j}) \in \Gamma_{\tilde{i}}} f_{et}^{(o,d,\tilde{j})} \delta_{ke\tilde{i}t} - \sum_{(o,d,\tilde{i}) \in \Gamma_{\tilde{i}}} f_{et}^{(o,d,\tilde{i})} (1 - \delta_{ke\tilde{i}t}) \right] \quad \forall G_k \in \Xi, t \in T \quad (7)$$

$$T_{k\tilde{i}te} = \frac{\text{dis}_e}{v_e} + 18 \quad \forall \tilde{i} \in C, t \in T, G_k \in \Xi, e \in E_{k\tilde{i}} \quad (8)$$

$$N_{k\tilde{i}t}^{\text{ship}} = \left\lceil \sum_{e \in E_{k\tilde{i}}} \frac{T_{k\tilde{i}te}}{24 \times 7} f \right\rceil \quad \forall \tilde{i} \in C, t \in T, G_k \in \Xi \quad (9)$$

$$C_{k\tilde{i}t}^{\text{port}} = |V_{k\tilde{i}t}| (1.95U + 5200) \quad \forall \tilde{i} \in C, t \in T, G_k \in \Xi \quad (10)$$

$$C_{k\tilde{i}te}^{\text{fuel}} = \alpha \beta f \sqrt{U} [v_e]^3 \quad \forall \tilde{i} \in C, t \in T, G_k \in \Xi, e \in E_{k\tilde{i}} \quad (11)$$

$$C_{k\tilde{i}te}^{\text{oper}} = \gamma_1 U \gamma_2 \quad \forall \tilde{i} \in C, t \in T, G_k \in \Xi, e \in E_{k\tilde{i}} \quad (12)$$

$$C_{kt}^{\text{week}} = \sum_{\tilde{i} \in C} \left[C_{k\tilde{i}t}^{\text{port}} + \sum_{e \in E_{k\tilde{i}}} \frac{(C_{k\tilde{i}te}^{\text{oper}} + C_{k\tilde{i}te}^{\text{fuel}} N_{k\tilde{i}t}^{\text{ship}}) T_{k\tilde{i}te}}{24} \right] \quad \forall G_k \in \Xi, t \in T \quad (13)$$

班轮联盟的成本由港口相关成本、燃油成本和运营成本三部分组成。 $|\cdot|$ 表示集合中元素的数量。 U 表示班轮的装载能力, α 和 β 分别表示燃料燃烧效率和燃料价格, $\gamma_1 \geq 0$ 是班轮资本成本系数, $\gamma_2 \in (0,1]$ 是班轮规模经济效应相关参数。

LASND 的模型可以表示为 LSANDM:

[LASNDM]:

$$\max_{(F,P)} z = \sum_{G_k \in \Xi} \left[\sum_{t \in T} \left(I_{kt} - \left\lceil \frac{T'}{7} \right\rceil \sum_{t \in T} C_{kt}^{\text{week}} \right) x_k \right] \quad (14)$$

s.t. (6)~(13)

$$x_k = \begin{cases} 1, & \text{If network design scheme } G_k \text{ is selected} \\ 0, & \text{Otherwise} \end{cases} \quad \forall G_k \in \Xi \quad (15)$$

$$\sum_{G_k \in \Xi} x_k = 1 \quad (16)$$

$$\sum_{(r,s) \in E_{k\tilde{i}} \cup M_{k\tilde{i}}} f_{(r,s)t}^{(o,d,\tilde{i})} - \sum_{(s,r) \in E_{k\tilde{i}} \cup M_{k\tilde{i}}} f_{(s,r)t}^{(o,d,\tilde{i})} \leq 0$$

$$\forall G_k \in \Xi, \tilde{i} \in C, t \in T, (o, d, \tilde{i}) \in \Gamma_{\tilde{i}}, s \in V_{kt} \tag{17}$$

$$\sum_{\tilde{i} \in C} \sum_{(o, d, \tilde{i}) \in \Gamma_{\tilde{i}}} f_{et}^{(o, d, \tilde{i})} \leq B_{\text{ship}} x_k \quad \forall e \in E_{kt}, t \in T, G_k \in \Xi \tag{18}$$

$$f_{(d, o)t}^{(o, d, \tilde{i})} \leq q_t^{(o, d, \tilde{i})} s_t^{(o, d)}$$

$$\forall (d, o) \in M_{\tilde{i}}, (o, d, \tilde{i}) \in \Gamma_{\tilde{i}}, \tilde{i} \in C, t \in T, G_k \in \Xi \tag{19}$$

$$f_{(d, o)t}^{(o, d, \tilde{i})} - q_t^{(o, d, \tilde{i})} s_{t+1}^{(o, d)} = 0$$

$$\forall (d, o) \in M_{\tilde{i}}, (o, d, \tilde{i}) \in \Gamma_{\tilde{i}}, \tilde{i} \in C, t \in [1, N-1], G_k \in \Xi \tag{20}$$

$$0 \leq s_{t+1}^{(o, d)} \leq s_t^{(o, d)} \leq s_0^{(o, d)}$$

$$\forall t \in [1, N-1], (d, o) \in M_{\tilde{i}}, \tilde{i} \in C, t \in T, G_k \in \Xi \tag{21}$$

$$f_{et}^{(o, d, \tilde{i})} = 0 \quad \forall e \in M_{\tilde{i}} \setminus (d, o), t \in T, (o, d, \tilde{i}) \in \Gamma_{\tilde{i}}, \tilde{i} \in C, G_k \in \Xi \tag{22}$$

$$f_{et}^{(o, d, \tilde{i})} \geq 0 \quad \forall e \in E_{\tilde{i}} \cup M_{\tilde{i}}, t \in T, (o, d, \tilde{i}) \in \Gamma_{\tilde{i}}, \tilde{i} \in C, G_k \in \Xi \tag{23}$$

$$\mathbf{F} = \left(f_{et}^{(o, d, \tilde{i})} \right) = \arg \max_{\mathbf{Q}} \left\{ \sum_{G_k \in \Xi} x_k \left[\sum_{t \in T} \sum_{(o, d, \tilde{i}) \in \Gamma_{\tilde{i}}, (d, o) \in M_{\tilde{i}}} \tilde{f}_{(d, o)t}^{(o, d, \tilde{i})} r_t^{(o, d, \tilde{i})} + \sum_{t \in T, e \in E_{kt}} p_{et} \left(\sum_{(o, d, \tilde{i}) \in \Gamma_{\tilde{i}}} \tilde{f}_{et}^{(o, d, \tilde{i})} \delta_{ke\tilde{i}} - \sum_{(o, d, \tilde{i}) \in \Gamma_{\tilde{i}}} \tilde{f}_{et}^{(o, d, \tilde{i})} (1 - \delta_{ke\tilde{i}}) \right) \right] \right\} \text{ for all } \tilde{i} \in C \tag{24}$$

通过对上述模型的分析，不难发现，尽管模型是 NP 难题，但对于任意一组 $\mathbf{X} = (x_k)$ 和 $\mathbf{\Lambda} = (\delta_{ke\tilde{i}})$ ，我们都可以简单的求得此时的班轮联盟的总利润以及对应的 $\mathbf{P} = (p_{et})$ 和 \mathbf{F} 。然而，此时的参数和决策变量与我们的求解目标完全相反。这里，我们应用[6]提出的逆优化方法，将原问题线性化后转换为其对偶问题。通过这种方式， \mathbf{P} 成为新模型的决策变量。令 $\gamma = (\gamma_{rt}^{(o, d, \tilde{i})})$ ， $\xi = (\xi_{et})$ ， $\varpi = (\varpi_t^{(o, d, \tilde{i})})$ 和 $\varrho = (\varrho_t^{(o, d, \tilde{i})})$ 分别定义为约束(17~20)的对偶变量。定义 $\bar{q}_t^{(o, d, \tilde{i})} = \frac{q_{t+1}^{(o, d, \tilde{i})}}{q_t^{(o, d, \tilde{i})}}$ ($t < N$) 来描述运输需求随运输需求满意度的变化。于是，上述模型可以转化为[LASNDM-T]。

[LASNDM-T]: 对任意 $\tilde{i} \in C$,

$$\gamma_{ot}^{(o, d, \tilde{i})} - \gamma_{dt}^{(o, d, \tilde{i})} + \omega_t^{(o, d, \tilde{i})} + \varrho_t^{(o, d, \tilde{i})} - \bar{q}_t^{(o, d, \tilde{i})} \varrho_{t+1}^{(o, d, \tilde{i})} \geq r_t^{(o, d, \tilde{i})} \quad \forall f_{(d, o)t}^{(o, d, \tilde{i})} \in R \tag{25}$$

$$\gamma_{ot}^{(o, d, \tilde{i})} - \gamma_{dt}^{(o, d, \tilde{i})} + \omega_t^{(o, d, \tilde{i})} + \varrho_t^{(o, d, \tilde{i})} - \bar{q}_t^{(o, d, \tilde{i})} \omega_{t+1}^{(o, d, \tilde{i})} = r_t^{(o, d, \tilde{i})} \quad \forall f_{(d, o)t}^{(o, d, \tilde{i})} \in R_+ \tag{26}$$

$$\gamma_{ot}^{(o, d, \tilde{j})} - \gamma_{dt}^{(o, d, \tilde{j})} + \omega_t^{(o, d, \tilde{j})} + \varrho_t^{(o, d, \tilde{j})} - \bar{q}_t^{(o, d, \tilde{j})} \varrho_{t+1}^{(o, d, \tilde{j})} \geq 0 \quad \forall f_{(d, o)}^{(o, d, \tilde{j})} \in T \tag{27}$$

$$\gamma_{ot}^{(o, d, \tilde{j})} - \gamma_{dt}^{(o, d, \tilde{j})} + \omega_t^{(o, d, \tilde{j})} + \varrho_t^{(o, d, \tilde{j})} - \bar{q}_t^{(o, d, \tilde{j})} \omega_{t+1}^{(o, d, \tilde{j})} = 0 \quad \forall f_{(d, o)}^{(o, d, \tilde{j})} \in T_+ \tag{28}$$

$$\gamma_{st}^{(o, d, \tilde{i})} - \gamma_{rt}^{(o, d, \tilde{i})} + \xi_{et} - \delta_{ke\tilde{i}} p_{et} \geq 0 \quad \forall f_{(r, s)t}^{(o, d, \tilde{i})} \in U \tag{29}$$

$$\gamma_{st}^{(o, d, \tilde{i})} - \gamma_{rt}^{(o, d, \tilde{i})} + \xi_{et} - \delta_{ke\tilde{i}} p_{et} = 0 \quad \forall f_{(r, s)t}^{(o, d, \tilde{i})} \in U_+ \tag{30}$$

$$\gamma_{st}^{(o, d, \tilde{j})} - \gamma_{rt}^{(o, d, \tilde{j})} + \xi_{et} + (1 - \delta_{ke\tilde{i}}) p_{et} \geq 0 \quad \forall f_{(r, s)t}^{(o, d, \tilde{j})} \in Y \tag{31}$$

$$\gamma_{st}^{(o,d,\tilde{j})} - \gamma_{rt}^{(o,d,\tilde{j})} + \xi_{et} + (1 - \delta_{keit}) p_{et} = 0 \quad \forall f_{(r,s)t}^{(o,d,\tilde{j})} \in Y_+ \quad (32)$$

$$\gamma_{rt}^{(o,d,\tilde{i})} \geq 0 \quad \forall r \in V_k, t \in T, (o, d, \tilde{i}) \in \Gamma_{\tilde{i}}, \tilde{i} \in C \quad (33)$$

$$\xi_{et} \geq 0 \quad \forall e \in E_{kt}, t \in T \quad (34)$$

$$\varpi_i^{(o,d,\tilde{i})} \geq 0 \quad \forall (o, d, \tilde{i}) \in \Gamma_{\tilde{i}}, \tilde{i} \in C, t \in T \quad (35)$$

这里,

$$R := \left\{ f_{(d,o)t}^{(o,d,i)*} \mid f_{(d,o)t}^{(o,d,i)*} = 0, \forall (o, d, \tilde{i}) \in \Gamma_{\tilde{i}}, (d, o) \in M_{k\tilde{i}}, t < N \right\} \quad (36)$$

$$R_+ := \left\{ f_{(d,o)t}^{(o,d,i)*} \mid f_{(d,o)t}^{(o,d,i)*} > 0, \forall (o, d, \tilde{i}) \in \Gamma_{\tilde{i}}, (d, o) \in M_{k\tilde{i}}, t < N \right\} \quad (37)$$

$$T := \left\{ f_{(d,o)}^{(o,d,\tilde{j})*} \mid f_{(d,o)}^{(o,d,\tilde{j})*} = 0, \forall (o, d, \tilde{j}) \in \Gamma \setminus \Gamma_{\tilde{i}}, (d, o) \in M_{kt} \setminus M_{k\tilde{i}}, t < N \right\} \quad (38)$$

$$T_+ := \left\{ f_{(d,o)}^{(o,d,\tilde{j})*} \mid f_{(d,o)}^{(o,d,\tilde{j})*} > 0, \forall (o, d, \tilde{j}) \in \Gamma \setminus \Gamma_{\tilde{i}}, (d, o) \in M_{kt} \setminus M_{k\tilde{i}}, t < N \right\} \quad (39)$$

$$U := \left\{ f_{et}^{(o,d,\tilde{i})*} \mid f_{et}^{(o,d,\tilde{i})*} = 0, \forall (o, d, \tilde{i}) \in \Gamma_{\tilde{i}}, e = (r, s) \in E_{kt}, t \in T \right\} \quad (40)$$

$$U_+ := \left\{ f_{et}^{(o,d,\tilde{i})*} \mid f_{et}^{(o,d,\tilde{i})*} > 0, \forall (o, d, \tilde{i}) \in \Gamma_{\tilde{i}}, e = (r, s) \in E_{kt}, t \in T \right\} \quad (41)$$

$$Y := \left\{ f_{et}^{(o,d,\tilde{j})*} \mid f_{et}^{(o,d,\tilde{j})*} = 0, \forall (o, d, \tilde{j}) \in \Gamma \setminus \Gamma_{\tilde{i}}, e = (r, s) \in E_{kt}, t \in T \right\} \quad (42)$$

$$Y_+ := \left\{ f_{et}^{(o,d,\tilde{j})*} \mid f_{et}^{(o,d,\tilde{j})*} > 0, \forall (o, d, \tilde{j}) \in \Gamma \setminus \Gamma_{\tilde{i}}, e = (r, s) \in E_{kt}, t \in T \right\} \quad (43)$$

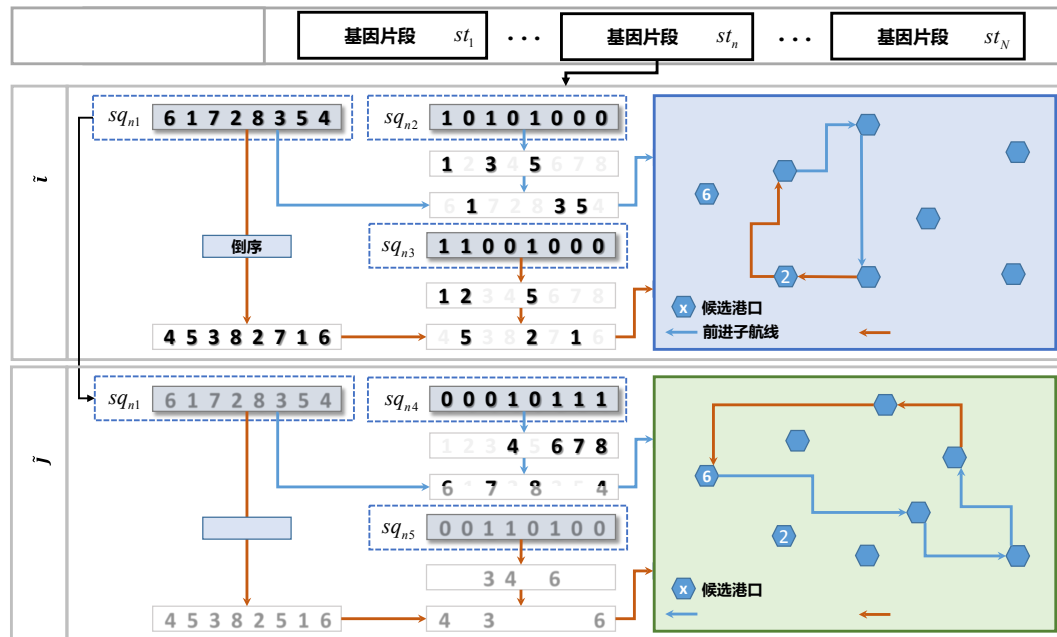


Figure 3. Methods of encoding and decoding

图 3. 编码和解码方法

4. 算法设计

根据上述分析, 对任意 $(\mathbf{X}, \Delta)^T$, 我们可以轻易求出联盟总利润。换句话说, 对于任意给定的航运网络 G_k , 我们都可以判断该航运网络的优劣并且得到此时的舱位分配方案和利润分配方案。因此, 我们可以通过不断得修正 $(\mathbf{X}, \Delta)^T$, 最终得到一个满意解, 完成航运网络的设计工作。本文基于遗传算法框架设计了求解 LASND 的启发式算法。染色体编码方式见图 3。每个染色体分为 5 个基因片段。 sq_{n1} 是 8 个候选港口的随机编码, sq_{n2} 和 sq_{n3} 分别表示联盟成员 i 运营航线的前进子航线和返航子航线中在 sq_{n1} 对应的港口是否停靠, 1 表示停靠, 0 表示不停靠。同理, sq_{n4} 和 sq_{n5} 决定了成员 j 运营的航线。适应值函数即联盟总利润, 遗传算法选择操作使用轮盘赌, 交叉操作采用多点交叉。种群迭代最多进行 500 代, 迭代中途, 一旦连续 200 代种群的最优适应值不再增加, 迭代终止。

5. 数值实验

5.1. 参数设置

本文针对亚洲 - 西欧航运网络开展了数值实验, 以验证模型和算法的有效性。港口数据、港口距离、港口运输需求量、运价等数据均来源于中远海运集团数据库, 并根据 2021 中国集装箱货运指数(CCFI), 对每个规划期的需求数据进行了微调。11 个候选港口及其相对位置如图 4 所示。



Figure 4. The candidate ports

图 4. 候选港口

整个规划期为 1 年, 规划期内包含三个子规划期(120 天), 分别是航运淡季(5 月~8 月)、平常期(1 月~4 月)和旺季(9 月~12 月)。为了便于展示和理解, 在数值试验中, 班轮联盟仅由 2 个班轮公司构成。事实上, 模型对于更多联盟成员同样适用。集装箱船的容量为 14,000 标准箱, 速度为 15 海里/小时, 化石燃料价格为 300 美元/吨, 交叉和变异的概率分别为 0.9 和 0.1 [11]。

5.2. 运输需求的灵敏度分析

我们在本节中进行了敏感性分析以研究联盟成员运输需求与联盟航运网络设计之间的关系。我们固定 B 公司的航运需求，并将 A 公司的货运需求调整为基准的 120% 和 140% (初始运输需求为 100%)，以观察班轮航运网络的变化。这三种场景分别表示为 D1 至 D3。由班轮公司 A 和 B 组成的班轮联盟在上述 3 种场景下的航运网络如表 2 所示，联盟成员在不同运输需求下的利润见图 5。每种场景的运输网络包含三个子规划阶段分布的 6 条航线。

Table 2. Calculation results under various shipping demands

表 2. 不同运输需求下的计算结果

场景	子规划期	航线网络 A: 联盟成员 A B: 联盟成员 B	运输量 (TEU/week)	货运收入 ($\times 10^4$ USD/week)	总利润 ($\times 10^4$ USD/week)	分配利润 ($\times 10^4$ USD/week)
D1	1	A: 1-4-3-7-4-8-1	12,624	1870	1459	589
		B: 3-2-9-5-10-11-5-6-3	28,000	3347		870
	2	A: 1-7-10-5-8-9-2-1	15,258	2554	2697	1045
		B: 4-8-6-5-10-11-5-3-4	32,742	4137		1652
	3	A: 5-11-10-2-1-3-4-5	18,653	2739	2785	1087
		B: 11-7-3-8-6-4-3-7-11	38,162	4832		1698
D2	1	A: 4-5-10-11-7-11-1-3-4	15,909	2319	2039	803
		B: 8-2-4-5-11-10-4-9-6-8	33,425	4118		1236
	2	A: 1-6-9-7-11-5-4-8-3-2-1	18,635	2864	2243	956
		B: 4-7-11-10-9-5-6-2-3-4	39,648	5205		1287
	3	A: 7-1-3-5-8-4-9-10-11-7	21,683	3085	2553	1024
		B: 5-3-2-9-7-6-1-11-10-5	42,000	5939		1529
D3	1	A: 5-3-1-2-7-11-10-8-6-5	17,909	2561	1849	795
		B: 10-11-7-5-4-3-2-6-8-10	38,879	4728		1054
	2	A: 2-3-6-8-4-5-10-11-3-2	21,867	3101	2731	1073
		B: 6-5-9-11-10-7-2-4-5-6	46,401	5387		1658
	3	A: 3-2-6-5-4-7-11-10-8-5-3	24,997	3728	3527	1333
		B: 1-9-10-7-2-4-5-8-6-3-1	53,694	6739		2194

对于场景 D1，图 5 显示了整个规划期的班轮联盟网络，每个子规划期的航运网络包括两条航线。在第一个子规划期，A 公司的航运量为 13,055 TEU/周，B 公司航运量为 28,000 TEU/周。该联盟每周产生 1459 万美元的总利润。根据舱位租赁机制重新分配利润后，班轮公司 A 和 B 分别每周赚 589 万美元和 870 万美元。尽管班轮公司 A 的运输量不足 B 的一半，但利润达到 B 公司的 67.7%。这是因为当两家班轮公司结成联盟时，航运网络设计必须从整体角度出发。班轮联盟的利润必须根据已经制定的利润分配机制重新分配。班轮公司 B 在这里向 A 公司支付更多的机位租赁费。这种利益分配机制维护了班轮联盟的稳定性和长期利益，提高了联盟抵御风险的能力。

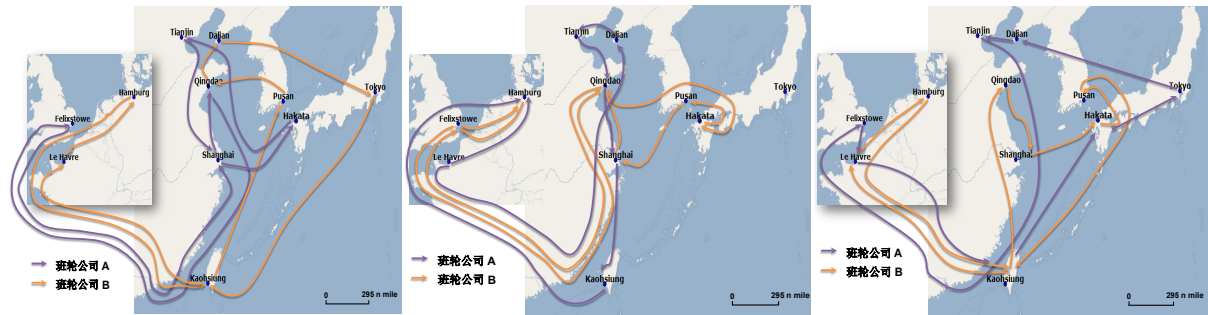


Figure 5. The candidate ports
图 5. 候选港

分析三种场景下的航运网络后，不难发现，港口停靠顺序的变化会显著影响班轮的运输量，进而影响联盟的收入和利润。停靠港口和停靠顺序的变化导致班轮在某些停靠港装卸的货物量发生变化。在场景 D1 的第一个子规划期和场景 D2 的第三个子规划期，受班轮运力和成本的限制，班轮公司 B 不得不放弃部分运输需求。考虑货主选择惯性的背景下，每个子规划期的航运网络都会显著影响下一个子规划期的航线。场景 D2 的第一个子规划期，班轮公司 A 运营的航线上，集装箱船的货物装载率仅为 56.8%，这表明联盟愿意接受短期损失从而在整个规划期获得更多的利润。

6. 结论

新冠肺炎疫情的蔓延和国际贸易的不稳定使得海运服务的需求和供应同时存在不确定性。近年来，班轮公司逐渐结成联盟，采取一致行动，避免风险，提高运力资源利用率。联盟必须综合考虑每个成员的运力和运输需求，从整体角度设计航运网络。面对不稳定的海运服务供应，货主在选择海运服务时表现出选择惯性。基于上述情况，本文讨论了考虑货主选择惯性的班轮联盟航运网络设计问题。根据数值实验结果，可以得出以下结论：

- 1) 班轮联盟的利润与其航运网络密切相关。航运网络受到航运需求的影响。班轮联盟应根据航运需求的变化及时调整其航运网络。航运网络的调整包括停靠港、呼叫顺序、运输方案和服务频率的变化。
- 2) 货主的选择惯性在一定程度上决定了班轮联盟运输需求的稳定性。运输需求的稳定有助于联盟的可持续发展。因此，班轮联盟应该提供稳定的运输服务，以获得更多的长期利益。
- 3) 为了应对新冠疫情等不稳定因素，班轮公司必须联合起来组建联盟。本文提供了一种有效的班轮联盟航运网络设计方法。

参考文献

- [1] Zheng, J.F., Hou, X.J., Qi, J.W. and Yang, L.X. (2020) Liner Ship Scheduling with Time-Dependent Port Charges. *Maritime Policy & Management*, **49**, 18-38. <https://doi.org/10.1080/03088839.2020.1849840>
- [2] Wan, C., Yan, X., Zhang, D., Qu, Z. and Yang, Z. (2019) An Advanced Fuzzy Bayesian-Based FMEA Approach for Assessing Maritime Supply Chain Risks. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, **125**, 222-240. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2019.03.011>
- [3] Christiansen, M., Hellsten, E., Pisinger, D., Sacramento, D. and Vilhelmsen, C. (2020) Liner Shipping Network Design. *European Journal of Operational Research*, **286**, 1-20. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.09.057>
- [4] Wang, S. and Meng, Q. (2017) Container Liner Fleet Deployment: A Systematic Overview. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, **77**, 389-404. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2017.02.010>
- [5] Xu, L., Yang, S., Chen, J. and Shi, J. (2021) The Effect of COVID-19 Pandemic on Port Performance: Evidence from China. *Ocean & Coastal Management*, **209**, 105660. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2021.105660>
- [6] Agarwal, R. and Ergun, Ö. (2010) Network Design and Allocation Mechanisms for Carrier Alliances in Liner Shipping.

-
- Operations Research*, **58**, 1726-1742. <https://doi.org/10.1287/opre.1100.0848>
- [7] Liu, Y., Xin, X., Yang, Z., Chen, K. and Li, C. (2021) Liner Shipping Network-Transaction Mechanism Joint Design Model Considering Carbon Tax and Liner Alliance. *Ocean & Coastal Management*, **212**, 105817. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2021.105817>
- [8] Chen, K., Chen, D., Sun, X. and Yang, Z. (2016) Container Ocean-Transportation System Design with the Factors of Demand Fluctuation and Choice Inertia of Shippers. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, **95**, 267-281. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2016.09.015>
- [9] Chen, C. and Zeng, Q. (2010) Designing Container Shipping Network under Changing Demand and Freight Rates. *Transport*, **25**, 46-57. <https://doi.org/10.3846/transport.2010.07>
- [10] Cheng, Q. and Wang, C. (2021) Container Liner Shipping Network Design with Shipper's Dual Preference. *Computers & Operations Research*, **128**, 105187. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2020.105187>
- [11] Gao, S., Xin, X., Li, C., Liu, Y. and Chen, K. (2022) Container Ocean Shipping Network Design Considering Carbon Tax and Choice Inertia of Cargo Owners. *Ocean & Coastal Management*, **216**, 105986. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2021.105986>