

文章编号:1003-207(2015)07-0103-10

DOI:10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2015.07.013

竞争环境下的轴-辐式集装箱海运网络设计问题

赵宇哲

(大连海事大学交通运输管理学院, 辽宁 大连 116026)

摘要:针对航运企业的重组与全球扩张引起的竞争问题,提出了竞争环境下的轴-辐式集装箱海运网络设计模型。模型采用基于路径的变量作为决策变量,利用离散函数来表示航运企业与航运联盟的竞争可吸引的流量(或客户),目的在于通过设计混合轴-辐式集装箱海运网络,实现以更低的服务成本和更短的服务时间最大化可吸引的流量,建立了枢纽港口数量约束、航线连接约束、航线中转约束、流量竞争约束等,运用多点交叉遗传算法进行求解,最后结合亚欧航线的集装箱海运市场进行实例分析,对考虑客户需求多样性与航运联盟对策下的轴-辐式集装箱海运网络进行设计,并验证了算法的计算效果。

关键词:轴-辐式网络;竞争;枢纽选址;遗传算法;集装箱海运

中图分类号:U6-9; O221.4 **文献标识码:**A

1 引言

海运业伴随着经济全球化的进程在全球范围内取得了空前的发展。目前,海上运输承担了国际贸易总量的 89.6%、贸易总值的 70.1%,已成为国际贸易中最重要的运输方式。货物运输包括:集装箱、普通货物、超尺度或超重货物,其中集装箱的比例明显大于其它种类货物^[1]。过去三十年,海上运输持续增长、年平均增长率为 3.1%,运输需求的增长直接导致了海运市场上运力供给的快速增长。航运企业作为海运市场的主体,也是海运资源重组的执行者。为争夺更大的市场份额,航运企业的重组与全球扩张,成为对海运市场结构和发展趋势产生重要影响的新生因素。通过航运企业的合作,建立起来的航运联盟可采取运价协定、货载分配协定等对内措施和回扣制度、联运协定等对外措施消除竞争,控制海运资源并排挤其它航运企业^[2],这使得一些运营规模较小或新进入市场的航运企业正逐渐丧失它

们的市场份额。集装箱海运网络是航运企业提供集装箱海运服务的运营基础^[3],对于不属于航运联盟的中小型航运企业而言,为争取更多的或者至少恢复已经丧失的市场份额,如何设计能与航运联盟相竞争的集装箱海运网络至关重要。

由于集装箱海运服务的需求派生于全球经济增长的需要,轴-辐式网络凭借其符合全球贸易格局的结构特性和规模经济效应,能够大幅减少船舶运营成本、船舶运营数量,提高船舶负载率、船舶利用率,已成为全球集装箱海运系统中最重要的网络形态,引起了学术界与航运界的广泛关注^[4-5]。轴-辐式网络,根据网络中是否存在直接连接可分为纯轴-辐式网络和混合轴-辐式网络^[6]。纯轴-辐式网络是网络中所有非枢纽节点上的流量都要通过枢纽节点进行中转,非枢纽节点之间不存在直接连接的连接;混合轴-辐式网络中的连接除了非枢纽节点与枢纽节点之间的连接以外,还允许非枢纽节点之间的直接连接。由于混合轴-辐式网络可根据集装箱海运需求的多样性、市场竞争的加剧等因素灵活分配枢纽港口中转并进行设计相应的航线连接,因此它比纯轴-辐式网络具有明显的竞争优势,但其组织形式也更为复杂。

轴-辐式网络设计问题的研究主要集中于不同情景下的枢纽选址模型设计:中心问题,中位问题,覆盖问题等^[7]。Campbell 等^[8]、Alumur 等^[9]、Campbell 等^[10]和 Faharani 等^[11]对枢纽选址模型作

收稿日期:2013-11-21; 修订日期:2014-2-27

基金项目:长江学者和创新团队发展计划资助项目(IRT13048);国家自然科学基金资助项目(71273037,71403035);辽宁省高校创新团队支持计划资助项目(LT2013011);交通运输部交通软科学项目(2013-322-225-240);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(3132013080, 3132015218)

作者简介:赵宇哲(1983-),男(汉族),黑龙江大庆人,大连海事大学交通运输管理学院,讲师,博士,研究方向:港口规划与管理、发展决策与管理。

了完整性的评述。当前,枢纽选址模型设计的趋势在于开发新的构想,沿着这个研究方向已经有很多研究进行了多面性的探讨:折扣流量问题^[8-9]、枢纽容量问题^[12]、网络效应问题^[13]等,研究中仍有两方面关注非常少:竞争与轴-辐式网络在海运上的应用。(1)关于具有竞争性的枢纽选址模型设计研究中,Marianov等^[14]第一个针对出现在客运和货运中的竞争问题进行了枢纽选址设计,构建的竞争原则是提供运输服务收入的增加;将市场上现存企业称为领导者,同时将新加入市场企业称为跟随者;结果显示跟随者若想进入市场需通过设计新的枢纽以及降价的方式促使用户改变选择,以最大化运输服务的收入。Sasaki等^[15]通过设计一个Stackelberg枢纽选址模型用于制定市场中领导者和跟随者之间的竞争策略,结果显示若领导者的决策与跟随者不一致,则其市场份额将会受到竞争威胁。Lüer-Villagra等^[16]针对客户选择行为对市场竞争策略的影响,构建一个连续型枢纽选址模型用于评估跟随者是否该进入市场,结果显示跟随者进入市场时应考虑客户对价格的敏感度,否则跟随者无法估计市场需求和可能的利润。上述问题的枢纽选址模型设计的都是一些传统的目标函数,只考虑了成本、利润、费用等因素,但在具有竞争性的枢纽选址模型的应用研究中,需结合一些其它的潜在属性来设置更客观的目标函数,Eiselt等^[17]拓展了Marianov等的研究,提出基于费用/时间的吸引力函数最大化的非线性模型,用于解决客运和货运中的流量竞争问题。另外,Sasaki等^[18]提出竞争者之间策略应设立非枢纽节点之间的直接连接以最大化其利益,且每条连接路径上允许存在多个枢纽节点。(2)关于轴-辐式网络在海运上的应用研究中,Imai等^[19]对常规船型的多港挂靠方式和大型船舶的轴-辐式网络方式进行对比分析,设计出一个可同时运用于多港挂靠和轴-辐式网络的优化模型,并结合实例证明该模型在处理集装箱空箱调运问题时能获得显著效果;计明军等^[20]综合考虑枢纽港口的泊位时间限制和集装箱船舶容量限制,建立了一个以航行时间最小为目标函数的轴-辐式集装箱海运网络模型,通过一种嵌入式的混合遗传算法求解出最优船舶容量。上述研究在理论上界定了轴-辐式网络在集装箱海运应用中的重点方向,主要表现在模型设计中应更多的考虑一些现实因素,包括关于集装箱海运中的运输费用/时间、中转费用/时间、运输流量、基于费用/时间的吸引力等竞争因素,关于集装箱海运中港口的

地理位置、航线连接上的枢纽港口数量、非枢纽港口之间的直达航线等网络因素。

最近,Gelareh等^[21]综合考虑了多港挂靠和轴-辐式网络的运输方式、非枢纽港口之间直达航线的潜在优势、基于费用/时间的吸引力等因素,建立了竞争环境下的班轮运输网络设计模型,提出了海运市场中跟随者的竞争策略,进一步丰富了具有竞争性的枢纽选址模型在海运上的应用研究,但仍存在以下局限:(1)模型采用的是基于弧的变量,尽管基于弧的变量分解具有较好的收敛性,但它比基于路径的变量分解需要更多的时间进行比较^[22];(2)模型未能考虑海运市场中跟随者对客户需求(费用/时间)多样性的竞争策略,更未能关注领导者对于跟随者进入海运市场的对策。

鉴于上述分析,本文针对航运企业的重组与全球扩张引起的竞争问题,以混合轴-辐式集装箱海运网络为基本网络结构,引入考虑服务成本和服务时间的(流量)吸引力函数;采用基于路径的变量,建立竞争环境下的轴-辐式集装箱海运网络设计问题的数学模型,设计求解这一问题的遗传算法;最后,结合亚欧航线的集装箱海运市场进行实例分析,对考虑客户需求多样性与航运联盟对策下的轴-辐式集装箱海运网络进行设计,并验证了算法的计算效果。

2 模型描述

竞争环境下的轴-辐式集装箱海运网络设计问题可定义:假设存在一个航运联盟A(领导者)运营的集装箱海运网络 $G^A = (N^A, V^A)$,其中 $N^A = \{1, 2, \dots, n\}$ 为港口集合, $V^A = \{(v_i^A, v_j^A) \mid v_i^A, v_j^A \in N^A, j \neq i\}$ 为航线集合;对应于港口 i 到港口 j 的集装箱OD流 $i \rightarrow j$ ($j \neq i$)上的服务成本 C_{ij}^A 和服务时间 T_{ij}^A 。对于一个同为 n 个港口服务,但不属于航运联盟A的中小型航运企业B(跟随者),在调查客户需求及其位置的基础上,需要选择位于同一集装箱海运网络范围内的 p ($p \leq n$)个港口作为枢纽港口,通过设计混合轴-辐式集装箱海运网络 $G^B = (N^B, V^B)$,实现以更低的服务成本 C_{ij} 和更短的服务时间 T_{ij} 为客户提供服务,争取集装箱OD流 $i \rightarrow j$ 上的流量(或客户)最大化其市场份额。

3 模型分析

3.1 吸引力函数

对于一个已经存在的航运联盟A运营的集装箱海运网络 $G^A(N^A, V^A)$,若航运企业B由于其设计

的轴-辐式集装箱海运网络 G^B 的结构特性,对应于港口 i 到港口 j 的集装箱 OD 流 $i \rightarrow j$ 上的服务水平优于 A,不失一般性,假设 $C_{ij} \leq C_{ij}^A$ 且 $T_{ij} \leq T_{ij}^A$,则航运联盟 A 在集装箱 OD 流 $i \rightarrow j$ 上的流量将被吸引至航运企业 B 上^[14]。但是,是否只要满足 $C_{ij} \leq C_{ij}^A$,且 $T_{ij} \leq T_{ij}^A$ 时,航运联盟 A 在集装箱 OD 流 $i \rightarrow j$ 上的流量就将全部吸引至航运企业 B 上? 现实情况中,服务水平的提升并不会导致流量全部转变,因其还会受到地理位置、环境等因素影响。但一般来说,服务水平提升的程度越高,可获取的流量要显著大于那些服务水平只有轻微提升的转变。因此,本文采用离散函数 O_{ijm} , $m \in \{1, 2, \dots, M\}$ 来表示航运企业 B 对于航运联盟 A 在集装箱 OD 流 $i \rightarrow j$ 上流量的吸引力,见图 1。对应于集装箱 OD 流 $i \rightarrow j$,考虑服务成本的吸引力函数为 O_{ijm}^c 考虑服务时间的吸引力函数为 O_{ijm}^t , 于是有:

$$O_{ijm}^c = \begin{cases} O_{ij1}^c, & C_{ij} \leq \theta_1 C_{ij}^A \\ O_{ij2}^c, & \theta_1 C_{ij}^A < C_{ij} \leq \theta_2 C_{ij}^A \\ O_{ij3}^c, & \theta_2 C_{ij}^A < C_{ij} \leq \theta_3 C_{ij}^A \\ \vdots & \vdots \\ O_{ijM}^c, & \theta_{M-1} C_{ij}^A < C_{ij} \leq \theta_M C_{ij}^A \end{cases} \quad (1)$$

其中 $O_{ij1}^c, O_{ij2}^c, \dots, O_{ijM}^c \in (0, 1)$ 表示航运企业 B 利用更低的服务成本在集装箱 OD 流 $i \rightarrow j$ 上争取的流量比例, $0 < \theta_1^c < \theta_2^c < \dots < \theta_M^c \leq 1$, 且有 $O_{ij(M+1)}^c = 0$;

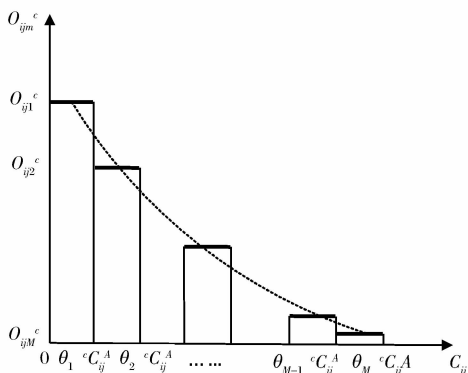
$$O_{ijm}^t = \begin{cases} O_{ij1}^t, & T_{ij} \leq \delta_1 T_{ij}^A \\ O_{ij2}^t, & \delta_1 T_{ij}^A < T_{ij} \leq \delta_2 T_{ij}^A \\ O_{ij3}^t, & \delta_2 T_{ij}^A < T_{ij} \leq \delta_3 T_{ij}^A \\ \vdots & \vdots \\ O_{ijM}^t, & \delta_{M-1} T_{ij}^A < T_{ij} \leq \delta_M T_{ij}^A \end{cases} \quad (2)$$

其中 $O_{ij1}^t, O_{ij2}^t, \dots, O_{ijM}^t \in (0, 1)$ 表示航运企业 B 利用更短的服务时间在集装箱 OD 流 $i \rightarrow j$ 上争取的流量比例, $0 < \delta_1^t < \delta_2^t < \dots < \delta_M^t \leq 1$, 且有 $O_{ij(M+1)}^t = 0$ 。

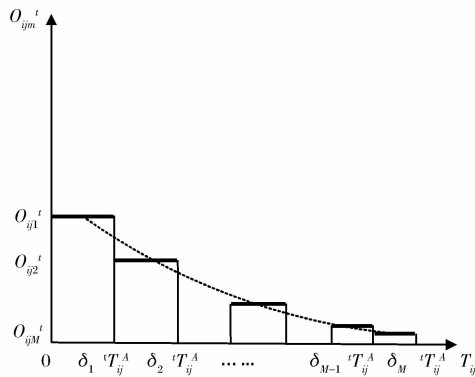
采用离散函数来表示航运企业的(流量)吸引力函数,需注意以下两方面^[21]: (1)与空运、铁运等公共运输中客户对服务成本/时间等高度敏感不一致,集装箱海运中的客户在更换航运企业为其服务时,除了服务成本、服务时间外还考虑地理位置、环境等因素,因此航运企业 B 作为客户选择的基础是具有有限的临界值,即 θ_m^c 与 δ_m^t 的设定应在一定的范围内;(2)对于提供相同服务水平的两家企业,与空运、铁运等公共运输中客户易于选择品牌更好/规模更大的服务企业不一致,集装箱海运中的客户则更倾向于同时选择两家航运企业为其服务,这可促进航运企业竞争以制止价格垄断行为,因此航运企业 B 在服务成本上更易争取到不错的市场份额,即 O_{ijm}^c 与 θ_m^c 之间, O_{ijm}^t 与 δ_m^t 之间关系的设定存在一定的差异,见图 1(a)与图 1(b)。

3.2 混合轴-辐式网络

对于一个不属于航运联盟 A 的中小型航运企业 B,进入已知存在的集装箱海运市场时,所有港口 (n 个)的位置是已知的,但并不确定它们是枢纽港口还是非枢纽港口,轴-辐式集装箱海运网络 G^B 设计的关键在于确定哪些港口作为枢纽港口(剩余港口自然作为非枢纽港口)以及枢纽港口与非枢纽港口之间、枢纽港口之间和非枢纽港口之间的航线连接。根据上述分析,竞争环境下的轴-辐式集装箱海运网络 G^B 属于混合轴-辐式网络,非枢纽港口不仅可分配给多个枢纽港口,还可直接分配给多个非枢



(a) 考虑服务成本的吸引力函数



(b) 考虑服务时间的吸引力函数

图 1 航运企业 B 的离散吸引力函数

纽港口,但中转只能在枢纽港口进行,见图2。这种分配关系与对应于港口*i*到港口*j*的集装箱OD流*i*→*j*上的流量、运输费用/时间,中转费用/时间等因素相关。

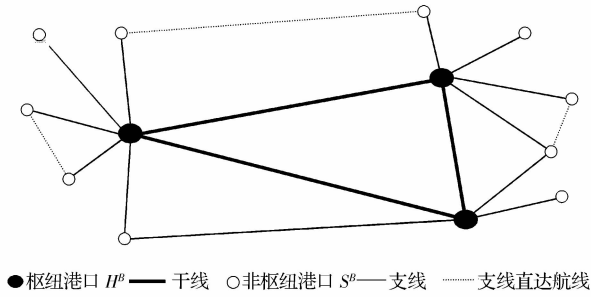


图2 轴-辐式集装箱海运网络 G^B 结构

轴-辐式集装箱海运网络 $G^B = (N^B, V^B)$ 中,港口集合 $N^B = H^B \cup S^B = \{1, 2, \dots, n\}$, 其中 H^B 表示枢纽港口集合, S^B 表示非枢纽港口集合; 航线集合 $V^B = \{(v_i^B, v_j^B) \mid v_i^B, v_j^B \in V^B, j \neq i\}$, 其中 v_i^B 表示离开起点港口 $i \in N^B$ 的集装箱 OD 流向集合, v_j^B 表示到达讫点港口 $j \in N^B$ 的集装箱 OD 流向集合。对应于起点港口 i 到讫点港口 j 的集装箱 OD 流 $i \rightarrow j$ 上不允许超过 2 个枢纽港口, 集装箱 OD 流 $i \rightarrow j$ 上的航线连接只可能是 2, 3 或 4 个港口, 于是有^[23]: 2 个港口的航线连接: $(i, j) \in H^B \times H^B \cup H^B \times S^B \cup S^B \times H^B \cup S^B \times S^B$; 3 个港口的航线连接: $(i, k, j) \in S^B \times H^B \times H^B \cup S^B \times H^B \times S^B \cup H^B \times H^B \times S^B$; 4 个港口的航线连接: $(i, k, l, j) \in S^B \times H^B \times H^B \times S^B$ 。

上述的轴-辐式集装箱海运网络 $G^B = (N^B, V^B)$ 中, 对应于起点港口 i 到讫点港口 j 的集装箱 OD 流 $i \rightarrow j$ 上的航线连接不具有唯一性。因此, 需要在几条航线连接中选择其一作为集装箱 OD 流 $i \rightarrow j$ 。

4 模型构建

4.1 基本假设

假设 1 轴-辐式集装箱海运网络结构相对稳定, 不考虑灾害、战争等突发状况对网络结构的影响。

假设 2 轴-辐式集装箱海运网络中所有集装箱 OD 流 $i \rightarrow j$ 上的流量已知且固定, 不考虑集装箱船舶运力的限制。

假设 3 轴-辐式集装箱海运网络中所有集装

箱 OD 流 $i \rightarrow j$ 上的服务成本 C_{ij} 和服务时间 T_{ij} 为已知; 考虑到枢纽港口之间运输的规模经济效应, 折扣系数 α 为已知。

假设 4 轴-辐式集装箱海运网络中各个港口的中转费用 C_k^r 和中转时间 T_k^r 为已知。

假设 5 轴-辐式集装箱海运网络中各个港口的容量满足所有集装箱流 $i \rightarrow j$ 上的流量之和, 不考虑港口容量限制约束。

4.2 模型参数

i 为起点港口; j 为讫点港口; k, l 为枢纽港口; p 为枢纽港口的数量; n 为所有港口的数量。

C_{ik}, C_{kl}, C_{lj} 分别为起点港口 i 与枢纽港口 k 、枢纽港口 k 与枢纽港口 l 、枢纽港口 l 与讫点港口 j 之间的运输费用; C_{ij} 为起点港口 i 与讫点港口 j (i, j 为非枢纽港口) 之间的直达运输费用。

α 为枢纽港口 k, l 之间运输的折扣系数, $0 < \alpha < 1$ (规模经济效应)。

T_{ik}, T_{kl}, T_{lj} 分别为起点港口 i 与枢纽港口 k 、枢纽港口 k 与枢纽港口 l 、枢纽港口 l 与讫点港口 j 之间的运输时间; T_{ij} 为起点港口 i 与讫点港口 j (i, j 为非枢纽港口) 之间的直达运输时间。

C_k^r 为枢纽港口 k 的中转费用; T_k^r 为枢纽港口 k 的中转时间。

4.3 决策变量

h_k 为枢纽港口选择变量。若港口 k 被选择为枢纽港口, 则 $h_k = 1$; 否则 $h^k = 0$ 。

x_{ij}^k 为起讫港口 i, j 之间的集装箱 OD 流 $i \rightarrow j$ 上存在枢纽港口 k (k, l) 的选择变量。若存在 4 个港口的航线连接 (i, k, l, j) , 包括 $k \neq i, j, l \neq i, j, k$, 则 $x_{ij}^k = 1$, 否则 $x_{ij}^k = 0$; 若存在 3 个港口的航线连接 (i, k, j) , 包括 $k \neq i, j, l = j; k \neq i, j, l = k; k = i, l \neq i, j$ 三种情况, 则 $x_{ij}^k = 1$, 否则 $x_{ij}^k = 0$; 若存在 2 个港口的航线连接 (i, j) , 包括 $k = i, l = j; k = i, k \neq j, l = k; k \neq i, k = j, l = k$ 三种情况, 则 $x_{ij}^k = 1$, 否则 $x_{ij}^k = 0$ 。

y_{ij} 为起讫港口 i, j 之间的集装箱 OD 流 $i \rightarrow j$ 上不存在枢纽港口 k (k, l) 的选择变量。若存在 2 个港口的航线连接 (i, j) , 其中 $k \neq i, j, l \neq i, j$, 则 $y_{ij} = 1$; 否则 $y_{ij} = 0$ 。

z_{ij}^k 为起讫港口 i, j 之间的集装箱 OD 流 $i \rightarrow j$ 经过枢纽港口 k 中转的示性变量。若集装箱 OD 流 $i \rightarrow j$ 经过枢纽港口 k 中转, 且 $k \neq i, j$, 则 $z_{ij}^k = 1$; 否则 $z_{ij}^k = 0$ 。

W_{ij}^m 表示起讫港口 i, j 之间的集装箱 OD 流 $i \rightarrow$

j 上的服务成本 C_{ij} 在区间 $[\theta_{m-1}^c C_{ij}^A, \theta_m^c C_{ij}^A]$ 上, 其中 $m \in \{1, 2, \dots, M\}$, 则 $W_{ij}^m = 1$; 否则 $W_{ij}^m = 0$ 。

U_{ij}^m 表示起讫港口 i, j 之间的集装箱 OD 流 $i \rightarrow j$ 上的服务时间 T_{ij} 在区间 $[\delta_{m-1}^t T_{ij}^A, \delta_m^t T_{ij}^A]$ 上, 其中 $m \in \{1, 2, \dots, M\}$, 则 $U_{ij}^m = 1$; 否则 $U_{ij}^m = 0$ 。

4.4 数学模型

竞争环境下的轴-辐式集装箱海运网络设计问题相应的数学模型为:

$$\max Q = \mu \sum_i \sum_{j \neq i} \sum_{m=1}^{M+1} O_{ijm}^m W_{ij}^m + (1 - \mu) \sum_i \sum_{j \neq i} \sum_{m=1}^{M+1} O_{ijm}^m U_{ij}^m \quad (3)$$

$$\text{s. t. } \sum_k h_k = p \quad (4)$$

$$\sum_k \sum_l x_{ij}^{kl} + y_{ij} = 1, \forall i, j \neq i \quad (5)$$

$$\sum_l x_{ij}^{kl} \leq h_k, \forall i, j \neq i, k \quad (6)$$

$$\sum_k x_{ij}^{kl} \leq h_l, \forall i, j \neq i, l \quad (7)$$

$$y_{ij} \leq 1 - h_i, \forall i, j \neq i \quad (8)$$

$$y_{ij} \leq 1 - h_j, \forall i, j \neq i \quad (9)$$

$$z_{ij}^k \leq h_k, \forall i, j \neq i, k \neq i, j \quad (10)$$

$$z_{ij}^k \leq 1 - y_{ij}, \forall i, j \neq i, k \neq i, j \quad (11)$$

$$\sum_k \sum_l (C_{ik} + \alpha C_{kl} + C_{lj}) x_{ij}^{kl} + C_{ij} y_{ij} + \sum_{k \neq i, j} C_k^r z_{ij}^k \leq C_{ij}^A \sum_m \theta_m^c W_{ij}^m + W_{ij}^{M+1} E, \forall i, j \neq i \quad (12)$$

$$\sum_m W_{ij}^m = 1 \quad (13)$$

$$\sum_k \sum_l (T_{ik} + T_{kl} + T_{lj}) x_{ij}^{kl} + T_{ij} y_{ij} + \sum_{k \neq i, j} T_k^r z_{ij}^k \leq T_{ij}^A \sum_m \delta_m^t U_{ij}^m + U_{ij}^{M+1} E, \forall i, j \neq i \quad (14)$$

$$\sum_m U_{ij}^m = 1 \quad (15)$$

$$x_{ij}^{kl}, y_{ij}, z_{ij}^k, h_k, W_{ij}^m, U_{ij}^m \in \{0, 1\} \quad (16)$$

目标函数(3)为航运企业 B 关于服务成本 C_{ij} 与服务时间 T_{ij} 的(流量)吸引力函数的凸组合, 其中 Q 表示航运企业 B 对于航运联盟 A 在集装箱 OD 流 $i \rightarrow j$ 上可争取的总流量比例, $\mu \in (0, 1)$ 表示航运企业 B 对于服务成本的重视程度, $(1 - \mu)$ 则表示航运企业 B 对于服务时间的重视程度。约束(4)为航运企业 B 决定设计枢纽港口的数量约束; 约束(5)表示起讫港口 i, j 之间的集装箱 OD 流 $i \rightarrow j$ 上有且仅有一条航线连接; 约束(6) - (7) 表示起讫港口 i, j 之间的集装箱 OD 流 $i \rightarrow j$ 上经过的必须是枢纽港

口, 不能通过非枢纽港口中转, 且不允许超过 2 个枢纽港口; 约束(8) - (9) 表示起讫港口 i, j 之间的集装箱 OD 流 $i \rightarrow j$ 上若不存在枢纽港口, 则航线连接的起讫港口 i, j 必须为非枢纽港口; 约束(10) - (11) 表示起讫港口 i, j 之间的集装箱 OD 流 $i \rightarrow j$ 上若至少存在一个枢纽港口, 则只有当枢纽港口不作为起讫港口 i, j 时才进行中转; 约束(12) - (13) 为起讫港口 i, j 之间的集装箱 OD 流 $i \rightarrow j$ 上航运企业 B 关于服务成本 C_{ij} 的流量竞争约束, 只有当航运企业 B 设计包括起点港口 i 到讫点港口 j 的运输费用和中转费用的服务成本 C_{ij} 小于已经存在的航运联盟 A 的服务成本 $\theta_m^c C_{ij}^A$ 时才可能争取到流量, 否则起讫港口 i, j 之间的集装箱 OD 流 $i \rightarrow j$ 上的流量由航运联盟 A 控制, 即 $W_{ij}^{M+1} = 1$ 时, 航运企业 B 设计的服务成本 C_{ij} 并不能吸引流量, 其中 E 为绝对大的值; 同理, 约束(14) - (15) 表示起讫港口 i, j 之间的集装箱 OD 流 $i \rightarrow j$ 上, 航运企业 B 关于服务时间 T_{ij} 的流量竞争约束; 约束(16) 表示决策变量为 0-1 示性变量。

5 模型算法

求解模型(3) - (16) 的难度在于以下几个方面: (1) 枢纽港口集合 $H^B \subset N^B$ 的确定是离散的; (2) 目标函数(3) 为关于服务成本 C_{ij}^B 与服务时间 T_{ij}^B 的(流量)吸引力函数的凸组合, 使模型同时考虑两项数量指标; (3) 流量竞争约束(12) - (15) 使轴-辐式集装箱海运网络 G^B 的设计影响着航运企业 B 可能争取的流量, 即 $x_{ij}^{kl}, y_{ij}, z_{ij}^k$ 与 W_{ij}^m, U_{ij}^m 两组决策变量之间存在一定的相关性; (4) 轴-辐式集装箱海运网络 G^B 属于混合轴-辐式网络, 航线连接的设计具有特殊要求;

由于, 模型(3) - (16) 是 NP-难问题, 应用标准遗传算法(GA)求解模型(3) - (16) 时, 基于枢纽港口的航线连接表示的编码方式是最自然、最常用的个体表示方法, 但为保证航运企业 B 决定设计枢纽港口的数量限制, 需要在交叉算子和变异算子上对标准遗传算法作出适当调整。

5.1 染色体编码

轴-辐式集装箱海运网络 G^B 的关键在于枢纽港口集合 $H^B \subset N^B$ 的确定, 因此采用实数编码的方式对枢纽港口选择变量 h_k 进行染色体编码。每一元素的值表示港口是否选择作为枢纽港口, 1 表示枢纽港口, 0 表示非枢纽港口。

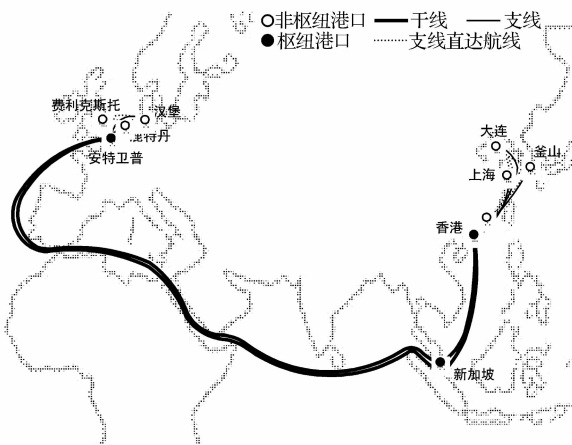


图 3 权重 $\mu=0.7$ 时轴-辐式集装箱海运网络 G^B 的设计结果

口之间的航线连接都经过香港和安特卫普中转,以借助枢纽港口之间干线运输的规模经济效益降低服务成本;另一方面,受限于地理位置的因素,亚洲与

欧洲两个区域内的港口之间更多采用的是直达运输,包括支线(枢纽港口与非枢纽港口之间)与支线直达航线(非枢纽港口之间),以避免绕道产生过多的服务成本和服务时间。

为验证多点交叉遗传算法的有效性,分别选取 $p=2,3,4,5,6$, 将其与允许不可行解的遗传算法进行对比,见表 3。允许不可行解的遗传算法在进行交叉操作时,不考虑子代的枢纽港口数量限制,直接对所有子代进行适应度函数计算。由表 3 可知,利用允许不可行解的遗传算法求出的(近似)最优解中,枢纽港口数量存在波动,且均与预期确定的枢纽港口数量 p 不符,为非可行解。而多点交叉遗传算法的(近似)最优解中,枢纽港口数量分别为 2,3,4,5,6,均为可行解。显然,相比于允许不可行解的遗传算法,多点交叉遗传算法可避免非可行解的产生,对竞争环境下的轴-辐式集装箱海运网络设计问题具有较好的求解效果。

表 3 允许不可行解的遗传算法与多点交叉遗传算法的对比分析

算法	枢纽港口数量 p	最优值	枢纽港口	最劣值	枢纽港口	平均值	平均枢纽港口数量
允许不可行解的遗传算法	2	61.92	1,3,5,6,7,9,10	61.26	3,5,6,7,8,10	61.31	6
	3	62.88	1,3,5,6,7,8,9,10	61.26	3,5,6,7,8,10	61.53	7
	4	62.88	1,3,5,6,7,8,9,10	61.26	3,5,6,7,8,10	61.53	7
	5	62.36	1,3,4,5,6,7,8,9,10	60.86	3,4,5,7,8,9,10	61.26	8
	6	62.88	1,3,5,6,7,8,9,10	61.26	3,5,6,7,8,10	61.47	7
多点交叉遗传算法	2	54.76	5,10	54.76	5,10	54.76	2
	3	57.22	5,6,10	55.04	5,6,9	56.27	3
	4	59.14	5,6,7,9	58.32	5,6,7,10	58.95	4
	5	60.08	3,5,6,8,10	59.46	3,5,6,9,10	59.63	5
	6	60.86	5,6,7,8,9,10	60.18	5,6,7,8,9,10	60.49	6

6.3 不同权重系数下的设计分析

航运企业 B 设计其运营的轴-辐式集装箱海运网络同时受到服务成本和服务时间两个因素的影响,为争取到更多的流量,航运企业 B 可根据集装箱海运市场中客户需求来设定不同的重视程度 ($\mu, 1-\mu$)。选取 $p=3; \mu=0, 0.1, 0.2, \dots, 1$ 。设置上述模型算法基本参数,计算结果见表 4。

由表 4 可知,随着 μ 的增加,航运企业 B 逐渐重视其提供的服务成本,枢纽港口的选择发生了一定的变化,由(2,4,5)经(5,6,7)变为(5,6,10),同时枢纽港口的中转次数由 40 增至 81。可见,枢纽港口在轴-辐式集装箱海运网络中具有重要的地位。当 $\mu=0$ 时,航运企业 B 仅以减少服务时间入手,试图凭借较少的服务时间吸引集装箱海运市场中的客户;此时,枢纽港口的中转次数只有 40,支线直达航

表 4 不同权重系数的轴-辐式集装箱海运网络 G^B 的设计结果

权重系数 μ	目标函数	枢纽港口	中转次数	支线直达航线数量
0	36	2,4,5	40	24
0.1	38.48	5,6,7	64	18
0.2	40.96	5,6,7	65	18
0.3	43.76	5,6,7	72	18
0.4	46.96	5,6,7	74	18
0.5	50.2	5,6,7	74	18
0.6	53.44	5,6,7	74	18
0.7	56.68	5,6,7	74	18
0.8	59.92	5,6,7	74	18
0.9	63.16	5,6,7	74	18
1.0	66.4	5,6,10	81	14

线数量最大,为 24。这说明,对于一些对服务时间要求较高的客户,航运企业可通过降低在枢纽港口的中转次数以减少服务时间。当 $\mu=0.1$ 时,枢纽港口

的中转次数增至 64, 增长幅度达到 60%, 支线直达航线数量由 24 减至 18。这表明, 航运企业 B 在设计轴-辐式集装箱海运网络时开始考虑服务成本, 通过提高在枢纽港口的中转次数, 实现枢纽港口之间的干线运输带来的规模经济效应, 减少服务成本以争取获得更多的流量。

除此之外, 在 μ 由 0.1 增至 0.9 的过程中, 枢纽港口的选择一直未发生变化, 中转次数的变化也不明显, 支线直达航线数量也始终未变, 但航运企业 B 同航运联盟 A 竞争可获取的总流量由 34.38 增至 63.16; 这在一定程度上说明了服务成本在集装箱海运市场中的重要性。或者, 由于相同航线在服务时间上差异不大, 航运企业 B 在刚刚进入市场时为更好地同航运联盟 A 展开竞争, 应考虑将其提供的服务成本尽量压低; 另一方面, 受限于地理位置的因素, 部分起讫港口之间的支线直达航线比较固定, 可见, 支线直达航线数量受 μ 的影响较小。

6.4 不同降价系数下的设计分析

航运联盟 A 若发现集装箱海运市场中有竞争者出现, 且感知到来自航运企业 B 的威胁。考虑到服务时间受限于航海技术, 短时间内很难通过减少服务时间夺回流量, 航运联盟 A 将通过降价策略(除以降价系数 ψ)来制止航运企业 B 的竞争。选取 $\psi = 1.3, 1.4, 1.5, 1.6, 1.7, 1.8, 1.9, 2.0$; $\mu = 0.7$ 时; 设置上述模型算法基本参数, 计算结果见表 5。

表 5 不同降价系数下的轴-辐式集装箱海运网络 G^B 的设计结果

降价系数 ψ	目标函数	枢纽港口	中转次数	支线直达航线数量
1.3	39.2	5,6,10	74	18
1.4	34.28	5,6,10	72	18
1.5	30.44	5,9,10	58	22
1.6	27.04	5,9,10	54	22
1.7	25.08	1,3,5	46	24
1.8	24.12	1,3,5	46	24
1.9	22.84	1,3,5	46	24
2.0	21.88	1,3,5	46	24

由表 5 可知, 随着 ψ 的增加, 航运企业 B 竞争所获取的总流量由 39.2 降至 21.88, 同时枢纽港口的中转次数由 74 降到 46; 这说明, 原本依靠规模经济效应产生的成本优势已经丧失, 航运企业 B 不得不保留某些具有时间优势的航线, 支线直达航线数量由 18 增至 24。相比于表 3 中 $\mu = 0$ 的情况, 当 $\psi = 1.7$ 后, 枢纽港口的中转次数稳定于 46, 稍大于仅依靠时间优势时枢纽港口的中转次数 40, 这主要是由航运联盟 A 运营的集装箱海运网络 G^A 中某些起

讫港口之间航线的服务成本过高造成的。即使航运联盟 A 的降价系数达到 2.0, 航运企业 B 仍可在这些航线上获取流量。这在一定程度上表明, 对于某些在航运联盟 A 运营下但不受重视的航线, 航运企业 B 可通过合理的枢纽港口选择策略来减少服务成本。以获取该航线上的流量。

值得注意的是, 由表 4-5 还可发现, 在不同权重系数 μ 与不同降价系数 ψ 下的轴-辐式集装箱海运网络 G^B 设计中, 港口 5 香港一直被航运企业 B 选择作为枢纽港口。这说明, 具有地理优势(到其它港口的服务成本更低或服务时间更短)的港口在轴-辐式集装箱海运网络设计中更容易选择作为枢纽港口。

7 结语

本文针对航运企业的重组与全球扩张引起的竞争问题, 提出了竞争环境下一种新的混合整数线性规划的轴-辐式集装箱海运网络设计问题的数学模型。模型采用基于路径的变量 x_{ij}^k 表示起讫港口 i, j 之间的集装箱 OD 流 $i \rightarrow j$ 上经过枢纽港口 $k (k, l)$ 的选择变量, 利用离散函数来表示航运企业与航运联盟竞争可吸引的流量, 目的在于通过设计混合轴-辐式集装箱海运网络, 在更低的服务成本和更短的服务时间下最大化可吸引的流量; 模型约束有 13 个, 包含枢纽港口数量约束、航线连接约束、航线中转约束、流量竞争约束等, 保证了模型设计应考虑的竞争因素与网络因素。由于竞争环境下的轴-辐式集装箱海运网络设计问题是 NP-难问题, 精确算法无法在较短时间内得到最优解, 设计了多点交叉遗传算法进行相应的优化求解, 通过与允许不可行解的遗传算法进行对比, 计算结果表明, 多点交叉遗传算法可避免非可行解的产生, 具有较好的求解效果。最后, 结合亚欧航线的集装箱海运市场进行实例分析, 对考虑客户需求多样性与航运联盟对策下的轴-辐式集装箱海运网络进行设计, 计算结果显示: (1) 为能够在与航运联盟竞争中争取更多的或者至少恢复已经丧失的市场份额, 对于不属于航运联盟的中小型航运企业, 应考虑通过选取合理的枢纽港口, 借助枢纽港口之间干线运输的规模经济效应降低服务成本, 以提高集装箱海运服务水平。(2) 受限于地理位置的因素, 具有地理优势的港口更容易选择作为枢纽港口, 部分起讫港口之间的支线直达航线比较固定, 可避免过多绕道产生的服务成本和服务时间; 中小型航运企业在刚刚进入市场时应重点考虑

将其提供的服务成本尽量压低。(3) 航运联盟若发现集装箱海运市场中存在竞争者,通过降价策略便可夺回大部分的流量,但不是全部的流量;中小型航运企业应重点关注集装箱海运市场中不受航运联盟重视的客户需求,通过合理的枢纽港口选择策略设计相应的轴-辐式集装箱海运网络。

参考文献:

- [1] Nasrin A, Reza Z F, Mark G. Network design approach for hub ports-shipping companies competition and cooperation[J]. *Transportation Research Part A*, 2013, 48(2): 1-18.
- [2] 王成金. 世界航运企业重组及其对航运网络结构的影响——兼论对中国港口体系的影响[J]. *世界地理研究*, 2008, 17(1): 94-104.
- [3] Ducruet C, Notteboom T. The worldwide maritime network of container shipping: spatial structure and regional dynamics[J]. *Global networks*, 2012, 12(3): 395-423.
- [4] Wang Chengjin, Wang Jiaoe. Spatial pattern of the global shipping network and its hub-and-spoke system [J]. *Research in Transportation Economics*, 2011, 32(1): 54-63.
- [5] Meng Qiang, Wang Xinchang. Intermodal hub-and-spoke network design: Incorporating multiple stakeholders and multi-type containers [J]. *Transportation Research Part B*, 2011, 45(4): 724-742.
- [6] 李阳. 轴-辐式网络理论及应用研究[D]. 上海: 复旦大学, 2006.
- [7] 傅少川, 胡梦飞, 唐方成. 禁忌搜索算法在单分配多枢纽轴辐式物流网络中的应用[J]. *中国管理科学*, 2012, 20(3): 145-151.
- [8] Campbell J F. Hub location for time definite transportation[J]. *Computers and Operations Research*, 2009, 36(12): 3107-3116.
- [9] Alumur S, Kara B Y. Network hub location problems: the state of the art[J]. *European Journal of Operational Research*, 2008, 190(1): 1-21.
- [10] Campbell J F, O'Kelly M E. Twenty-five years of hub location research[J]. *Transportation Science*, 2012, 46(2): 153-169.
- [11] Faharani R, Hetmakfar M, Boloori A, et al. Hub location problems: a review of models, classification, solution techniques, and applications[J]. *Computers and Industrial Engineering*, 2013, 64(4): 1096-1109.
- [12] Gabriela M, Bernd W. Hub locator: An exact solution method for the multiple allocation hub location problem [J]. *Computers and Operations Research*, 2002, 29(6): 715-739.
- [13] Economides N. The economics of networks[J]. *International Journal of Industrial Organization*, 1996, 1(14): 673-700.
- [14] Marianov V, Serra D, ReVelle C. Location of hubs in a competitive environment [J]. *European Journal of Operational Research* 1999, 114(2): 363-371.
- [15] Sasaki M, Suzuki A, Drezner Z. On the selection of hub airports for the airline hub-and-spoke system [J]. *Computers and Operations Research*, 1999, 26(14): 1411-1422.
- [16] Lüer-Villagra A, Marianov V. A competitive hub location and pricing problem [J]. *European Journal of Operational Research*, 2013, 231(3): 734-744.
- [17] Eiselt H A, Marianov V. A conditional p-hub location problem with attraction functions [J]. *Computers and Operations Research*, 2009, 36(12): 3128-3135.
- [18] Sasaki M, Campbell J F, Ernst A T, et al. Hub arc location with competition [R]. Working Paper, Technical Report of the Nanzan Academic Society Information Sciences and Engineering, 2009.
- [19] Imai A, Shintani K, Papadimitriou S. Multi-port vs. hub-and-spoke port calls by containerships [J]. *Transportation Research Part E*, 2009, 45(5): 740-757.
- [20] 计明军, 陈哲, 王清斌. 集装箱船舶支线运输航线优化算法 [J]. *交通运输工程学报*, 2011, 11(4): 68-75.
- [21] Gelareh S, Nickel S, Pisinger D. Liner shipping hub network design in a competitive environment [J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2010, 46(6): 991-1004.
- [22] Bektas T, Chouman M, Crainic T G. Lagrangean-based decomposition algorithms for multicommodity network design problems with penalized constraints [J]. *Networks*, 2010, 55(3): 171-180.
- [23] 倪玲霖, 史峰. 多分配快递轴辐网络的枢纽选址与分配优化方法 [J]. *系统工程理论与实践*, 2012, 32(2): 441-448.
- [24] 陆婧, 杨忠振, 刘瑞菊. 考虑发车间隔与乘客人数关系的机场长途巴士时刻表优化设计 [J]. *系统工程理论与实践*, 2013, 33(8): 2097-2104.
- [25] 邓亚娟, 陈小鸿, 杨超. 需求不确定的枢纽辐射式航线网络设计 [J]. *交通运输工程学报*, 2009, 9(6): 68-74.

Hub-and-spoke Container Shipping Network Design in a Competitive Environment

ZHAO Yu-zhe

(College of Transportation Management, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract: A novel mixed integer linear programming mathematical model for the hub-and-spoke container shipping network design in a competitive environment is proposed for the competition problem caused by reorganization and global expansion of container shipping liners. Path-based formulations are adopted as decision variables in the model. A discretized attraction function is introduced to indicate the number of network traffic (customers) of the container shipping alliance that can be attracted to the newcomer container shipping liners through competition. The aim of the model is to maximize the number of network traffic attracted which depends on lower transportation cost and shorter service time - by designing its mixed hub-and-spoke container shipping network. There are 13 constraints including the number of hub ports, routes connection, route transition and network traffic competition to ensure competition factors and network design factors the model should consider. As it is a NP-hard problem, a multi-point crossover genetic algorithm is given to solve the problem. By comparing the genetic algorithm allowed infeasible solutions, the results show that the multi-point crossover genetic algorithm which can avoid infeasible solutions has a better solution. Finally, the example of a container shipping market of Asia-Europe routes is analyzed, and the major data sources are obtained from CI (Containerization International)-Online, 100allin, Seagle and BLM-Shipping. Hub-and-spoke container shipping networks are designed for the cases of the various demands of customers and the countermeasure of container shipping alliance. The calculation results show that (1) Small and medium enterprises should consider that the costs reduction offered by the scale economy for transferring origin-destination (O-D) flows among the reasonable set of hub ports. (2) Since direct routes between the origin-destination (O-D) ports are relatively fixed and can avoid excessive costs and time generated by the detour, small and medium enterprises should consider that cutting costs when entering the container shipping market. (3) Small and medium enterprises should focus on the customer demands from the container shipping market not covered by container shipping alliance, in order to design the hub-and-spoke container shipping network by reasonable hub port selection strategy.

Key words: hub-and-spoke network; competition; hub location; genetic algorithm; container shipping