文章编号：1000-8608(2018)02-0133-08

考虑规模效应的一带一路海运枢纽网络比较研究

姚婉莹， 胡志华*， 刘婵娟

（上海海事大学 物流研究中心，上海 201306）

摘要： 为优化海上丝绸之路的海运枢纽网络，推行“一带一路(B&R)”的倡议，在传统轴辐式海运网络的基础上分别建立线型、环型枢纽网络结构，并引入规模效应折扣，用遗传算法求解不同海运网络的枢纽选址问题. 最后，根据结果对3种不同的网络结构即轴辐式网络和线型、环型枢纽网络的适用性和总成本进行比较分析. 结果表明：在“一带一路”倡议提出的背景下，改变单分配轴辐式网络结构，构造线型、环型枢纽网络，能够充分发挥政策引导的规模效应，从而降低总运输成本. 进一步证明“一带一路”倡议对于沿线地区发展海运贸易具有积极作用.

关键词： 海运网络；一带一路；枢纽选址；规模效应；遗传算法

中图分类号： U113；F511.41 **文献标识码：** A **doi：** 10.7511/dllgxb201802004

0 引 言

自2013年习近平主席提出建设一带一路以来，中国推进“一带一路”的倡议给世界贸易发展带来了新的商机. 海上丝绸之路是丝绸之路在海运发展中的延伸，是我国对外贸易进出口的重要通道，它将通过大量基础设施投资，激发沿线国家经济、贸易增长的潜力.

在海运网络中通常采用以港口为辐、轴节点，以各条航线为链路的轴辐式网络结构，其中重要港口吸引和汇集周边小港的货流而成为枢纽港，国家间通过各个枢纽港之间的干线运输实现规模化贸易. 轴辐式网络的枢纽选址与设计问题最早由O′Kelly提出[1]，以实现规模效应、降低物流成本的目的. 在相关文献中，大多数枢纽选址问题有两个常见的假设. 首先，每条OD(origin to destination)流都必须经过至少一个枢纽点，干线连接各个枢纽点，支线将辐节点连接到枢纽点[2]. 其次，干线运输上存在规模经济效益. Abdinnour-Helm等[3]据此引入折扣系数，当枢纽间货流量达到一定规模时，干线运输成本降低. O′Kelly等[4]在随后的研究中提出利用线性成本函数，当通过链路的货流量增加时，单位流量的运输成本随之降低. 对于轴辐式网络的研究不断发展，胡晶晶等[5]综合考虑轴辐式网络设计问题，分析了依赖于容量的枢纽点建设成本对总成本的影响；胡青蜜等[6]建立了基于不同顾客市场份额效用函数的网络设计模型，以应对轴辐式网络联盟企业竞争的问题.

在实际运用中，一些学者聚焦于特定结构的枢纽网络设计问题. O′Kelly等[7]最早研究枢纽网络拓扑结构的灵活性问题. 之后，de Sá等[8]考虑了树状星型拓扑结构；Contreras等[9]提出具有双层结构的环星型网络，第1层是枢纽点间链路首尾相连的环型结构，第2层是枢纽点连接到中心点、辐节点对应分配单个枢纽点的星型结构. 上述研究中缺少对不同结构枢纽网络的比较分析，同时在设计海运枢纽网络时未充分结合特有的政策环境，从政策影响因素出发考虑枢纽选址和网络设计问题.

基于已有的研究成果，本文提出构造“一带”

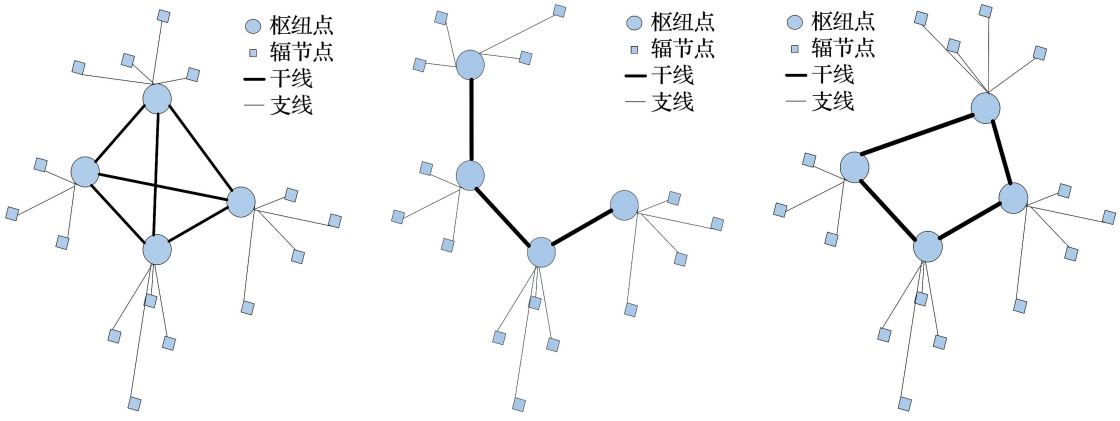
收稿日期： 2017-08-28； **修回日期：** 2018-01-16.
基金项目： 国家自然科学基金资助项目(71471109)；上海市科学技术委员会重点项目(16040501800)；交通运输部科技计划应用基础研究项目(2015329810260)；上海海事大学研究生创新基金资助项目(2017ycx026).
作者简介： 姚婉莹(1993-)，女，硕士生，E-mail：646140985@qq.com；胡志华*(1979-)，男，教授，博士生导师，E-mail：zhhu@shmtu.edu.cn；刘婵娟(1992-)，女，博士生，E-mail：491432270@qq.com.

或“一路”网络结构，在单分配轴辐式枢纽网络的基础上，引入受政策影响的规模效应折扣系数，建立线型、环型枢纽网络模型. 通过对枢纽数量、折扣系数和总成本等综合考虑，在对比分析 3 种枢纽网络适用性的同时，论证建设符合“一带一路”网络特征的枢纽运输体系对于海运贸易的积极作用.

1 问题描述

在“一带一路”倡议提出后，我国与沿线国家各个港口间的贸易往来更加频繁，轴辐式运输网络一方面面临运量增大、总成本上升的问题；另一方面，其相互连通的干线网络流量集中度降低，无法将规模效应所带来的优势充分发挥. 而从节点位置考虑，单分配轴辐式网络中存在能够连成线型或环型干线链路、构造“一带”或“一路”网络结构的潜在节点.

本文主要从枢纽点选址、节点分配、总成本等方面研究单分配轴辐式网络、线型及环型枢纽网络的设计问题，采取比较分析法讨论 3 种枢纽网络的适用性. 在线型、环型枢纽网络中，每条 OD 流都将通过枢纽点汇入同一条干线链路或回路进行集散，因此枢纽点间干线货流量大，能够获得“一带一路”政策环境下的规模效应运输折扣. 如图 1 所示，图中干线链路线条的粗细表示货流量集中规模的大小，可见线型及环型枢纽网络干线货流量集中度要高于轴辐式网络. 因此规模效应的程度(折扣系数 λ 的大小)对总运输成本的影响是本文研究线型、环型枢纽网络的重点，同时论证参与共建“一带一路”枢纽网络运输体系对沿线国家海运贸易的积极影响.



(a) 单分配轴辐式网络 (b) 线型枢纽网络 (c) 环型枢纽网络

图 1 3 种类型枢纽网络示意图

Fig. 1 Illustration of three types of hub network

2 模型建立

根据问题分析，以整个枢纽网络的总成本最小为目标函数，构建单分配轴辐式网络、线型及环型枢纽网络的数学模型. 相关符号说明见表 1.

在模型中，枢纽网络的总成本由 4 部分构成：枢纽点的建造成本；收集成本，由辐节点运往枢纽点所产生的物流成本；配送成本，即枢纽点向下级节点配送产生的运输成本；枢纽点间干线运输的转运成本. 本文针对 3 种不同的网络结构，引入干线规模折扣系数 λ 作为参数衡量枢纽点间转运成本. 在运输模式为单分配传统轴辐式网络时，折扣系数 $\lambda=1$；而当采用线型或环型枢纽网络时，折扣系数取(0,1)的可变数值.

在给定的枢纽网络 G 中，选定 P 个节点作为枢纽点，任意一对节点之间都存在 OD 流. 模型方程为

$$\min F=\sum_{k\in N}f_k x_{kk}+\sum_{i,k\in N}\chi O_i d_{ik}x_{ik}+\lambda\sum_{i,k,l\in N}\alpha y_{ikl}d_{kl}+\sum_{i,k\in N}\delta D_i d_{ki}x_{ik}$$

$$\text{s.t.}\ \sum_k x_{ik}=1$$

$$x_{ik}\leqslant x_{kk}$$

$$\sum_l y_{ikl}-\sum_l y_{ilk}=O_i x_{ik}-\sum_j w_{ij}x_{ik}$$

$$\sum_{l\neq k} y_{ikl} \leqslant O_i x_{ik}$$

$$x_{ik} \in \{0,1\}$$

$$y_{ikl} \geqslant 0$$

表 1　相关符号定义

Tab. 1　The definition of related symbols

符号	含义
$N=\{1,\cdots,n\}$	枢纽网络的节点集合，$i,j,k,l\in N$
P	枢纽点个数
d_{ij}	从节点 i 到节点 j 的距离，$d_{ij}=d_{ji}$，该距离满足三角不等式
w_{ij}	从节点 i 到节点 j 的流量
O_i	流出节点 i 的所有流量
D_i	流入节点 i 的所有流量
χ	单位距离内，辐节点与枢纽点间流量的单位收集成本
δ	单位距离内，辐节点与枢纽点间流量的单位配送成本
α	单位距离内，枢纽点间流量的单位转运成本
λ	折扣系数，$\lambda\in(0,1]$
y_{ikl}	从节点 i 出发，通过枢纽点 k 与 l 的流量
f_k	建造枢纽点 k 的固定成本
$x_{ik}\in\{0,1\}$	当节点 i 被分配给枢纽点 k 时 $x_{ik}=1$，否则为 0；$x_{kk}=1$ 表示 k 为枢纽点

目标函数式表示总成本最小. 约束条件中，条件 1 表示节点分配关系；条件 2 表示非枢纽点只能分配给枢纽点；条件 3 表示节点的流量平衡约束；条件 4 表示从节点 i 出发经过枢纽点 k、l 的流量小于所有从节点 i 出发的总流量；条件 5 表示 x_{ik} 为 0-1 决策变量；y_{ikl} 流量的非负限制如条件 6 所示.

3　模型求解

现有求解枢纽选址问题的启发式算法包括遗传算法、粒子群优化技术、邻域搜索等. 例如 Ilic 等[10]在前人的研究基础上提出了新的邻域搜索算法来解决无容量限制的单分配轴辐式枢纽选址问题；王静慧[11]结合车辆的时间需求设计求解快递运输模型的 C-W 节约算法和遗传算法；赵宇哲[12]通过对遗传算法编码方式进行适当改变求解竞争环境下的集装箱海运轴辐式网络设计问题.

本文主要采用遗传算法来求解已建立的网络模型. 目前遗传算法在改进优化[13]、神经网络训练[14]、模式识别[15]、时序预测[16]等方面应用广泛. 求解本文模型的难度在于：枢纽选址问题是 NP-hard 问题，在应用标准遗传算法求解时，需要对编码方式进行优化，以更加合理地选择枢纽点，并对交叉算子和变异算子做出适当调整. 结合本文模型，算法设计的具体步骤如下：

步骤 1　将获取的节点数据集进行初步处理.

步骤 2　遵循遗传算法基本流程求解，基本流程如图 2 所示.

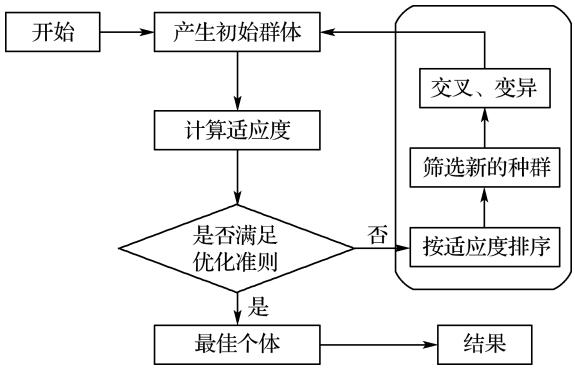


图 2　遗传算法基本流程图

Fig. 2　The basic flow chart of genetic algorithm

遗传算法参数设置为种群大小 40、迭代次数 80、交叉概率 0.7、变异概率 0.4. 最佳个体结果即为所选枢纽点解集.

对不同遗传算法编码所求结果进行比较.

方法一　hub-number 编码——随机产生 P 个取值范围在(0,1)的数值，将产生的数值取整即为所选的枢纽点序号.

方法二　order-sequence 编码——在(0,1)随机生成 200 个实数，并按数值由大到小的顺序排列，选择排位最前(即数值最大)的 P 个，即为选中的枢纽点，此方法保证了描述数列排序的全可能性.

步骤 3　根据遗传算法寻找到的枢纽点解集，分别计算 3 种枢纽网络的总成本.

步骤 4　根据步骤 2 中得出的枢纽点位置和分配关系，分别绘制网络结构图.

4 算例分析

本文引用来自于 OR-Library 测试数据集中求解单分配枢纽选址问题的 AP 数据集(http://people.brunel.ac.uk/~mastjjb/jeb/orlib/phubinfo.html),内含 200 个节点,原轴辐式网络枢纽点数量 $P=8$,节点之间的流量 w_{ij}、距离 d_{ij} 是已知的;设辐节点与枢纽点间单位距离/流量的收集成本 $\chi=3$,单位距离/流量的配送成本 $\delta=2$,初始转运成本 $\alpha=2$.本文中枢纽点建造成本为固定成本,取值 200 000 元.算例实验均在 Matlab 软件平台上编译并执行.

4.1 实验结果

本文假设规模效应折扣系数 $\lambda\in\{0.75,0.80,0.90,1.00\}$,$P\in\{6,7,8\}$.对于每一种网络模型,"枢纽选址"列显示该网络在对应 λ 和 P 取值下的最佳选址处的枢纽点序号,"总成本"列记录对应选址结果的总成本最小值.算法求解如图 3 所示,G_n、F_v 分别表示迭代次数、适应度(运输成本和);随着迭代次数的增加,算法所求目标函数总成本不断降低,逐步优化.

单分配轴辐式网络实验结果如表 2 所示,当枢纽点数量增加,枢纽点建造成本上升,总成本随之增加.采用 order-sequence 编码,总成本最小时,建立 6 个枢纽点可满足当前的网络流量需求,总成本为 2 601 847.85 元.线型枢纽网络以及环型枢纽网络实验结果如表 3、4 所示,当规模效应折扣增大时,线型、环型枢纽网络总成本降低;在同等折扣系数下,枢纽点数量与总成本的大小呈正相关.在折扣系数 $\lambda=0.75$ 且枢纽点数量 $P=6$ 时,采用 order-sequence 编码,线型和环型枢纽网络总成本均为最小,分别为 2 532 203.41 元和 2 304 225.79 元.

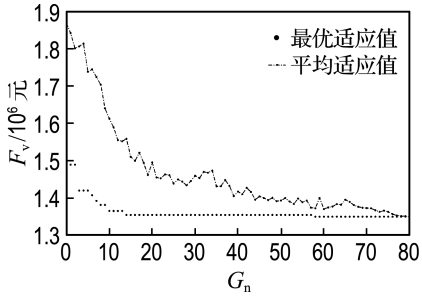


图 3 遗传算法求解过程

Fig. 3 The solving process of genetic algorithm

表 2 单分配轴辐式网络枢纽选址及总成本

Tab. 2 The hub location and total costs of single allocation hub-spoke network

λ	P	hub-number 编码		order-sequence 编码	
		枢纽选址	总成本/元	枢纽选址	总成本/元
1.00	6	42,94,98,101,147,159	2 554 317.15	7,31,41,106,129,160	2 601 847.85
1.00	7	42,52,107,119,141,147,159	2 718 814.72	7,18,42,83,130,151,159	2 795 222.96
1.00	8	33,52,61,101,112,129,151,159	2 927 513.03	27,35,41,95,98,101,146,160	3 017 064.37

表 3 线型枢纽网络枢纽选址及总成本

Tab. 3 The hub location and total costs of linear hub network

λ	P	hub-number 编码		order-sequence 编码	
		枢纽选址	总成本/元	枢纽选址	总成本/元
0.90	6	46,84,99,107,117,127	2 047 232.38	6,7,8,44,50,94	2 745 911.76
0.90	7	98,99,105,106,107,108,117	2 212 257.81	16,60,76,107,108,115,133	2 938 997.22
0.90	8	69,98,99,107,108,115,117,127	2 648 124.38	16,27,67,80,91,98,131,150	3 206 362.25
0.80	6	46,87,99,105,106,115	1 908 236.62	28,48,55,99,107,159	2 600 295.58
0.80	7	58,79,98,99,108,116,117	2 029 851.61	16,26,44,52,99,115,132	2 794 272.51
0.80	8	84,98,99,105,106,107,108,116	2 395 134.78	18,43,55,69,97,104,159,163	3 018 448.30
0.75	6	68,87,99,107,115,117	1 830 236.90	60,96,106,126,138,148	2 532 203.41
0.75	7	46,89,98,107,108,116,127	1 983 534.23	7,28,30,48,80,115,159	2 682 056.90
0.75	8	43,79,84,99,105,106,107,117	2 190 347.46	18,24,35,42,61,68,98,132	2 874 560.37

表 4　环型枢纽网络枢纽选址及总成本

Tab. 4　The hub location and total costs of circular hub network

λ	P	hub-number 编码		order-sequence 编码	
		枢纽选址	总成本/元	枢纽选址	总成本/元
0.90	6	76,98,99,106,116,117	2 289 957.44	34,54,85,95,115,148	2 410 352.06
0.90	7	98,99,106,108,115,117,127	2 454 337.99	27,34,43,56,57,84,123	2 670 127.22
0.90	8	66,93,94,103,112,113,125,140	2 595 503.34	26,27,55,84,106,114,127,160	2 794 525.70
0.80	6	84,99,107,117,108,127	2 044 015.42	16,36,60,84,117,153	2 362 160.39
0.80	7	46,96,106,107,117,118,127	2 308 277.37	14,37,45,69,107,108,148	2 532 933.32
0.80	8	76,98,99,108,113,115,116,127	2 513 170.89	16,35,41,44,61,67,125,160	2 804 232.79
0.75	6	66,79,84,106,107,112	1 982 450.14	16,46,69,96,98,116	2 304 225.79
0.75	7	34,76,98,99,106,117,118	2 209 478.23	14,16,49,67,95,98,149	2 492 354.15
0.75	8	45,46,84,99,106,116,117,127	2 390 972.87	14,46,76,96,107,116,126,142	2 765 879.73

对于两种不同的编码方式，order-sequence 编码在寻找最佳枢纽位置时要优于 hub-number 编码. 例如，图 4、5 所示为相同环型枢纽网络实例中 $\lambda=0.80$、$P=8$ 时的两种编码方式所求结果（P_x、P_y 代表节点横纵坐标位置），虽然采用 hub-number 编码所求网络总成本相对较低，但枢纽点分布过于集中. 在实际应用中枢纽港位置紧邻，将出现大量货流汇聚一片枢纽港群而造成网络拥堵的情况，同时导致资源浪费、无法满足各个港口的真实需求等问题. 因此本文不再分析基于 hub-number 编码方式产生的结果.

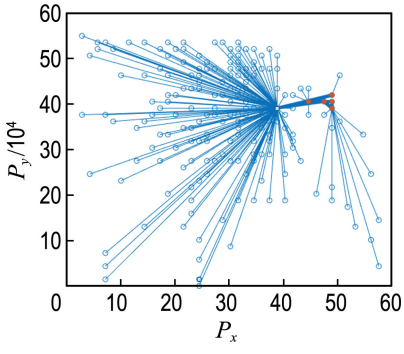


图 4　hub-number 编码求解

Fig. 4　Hub-number coding solution

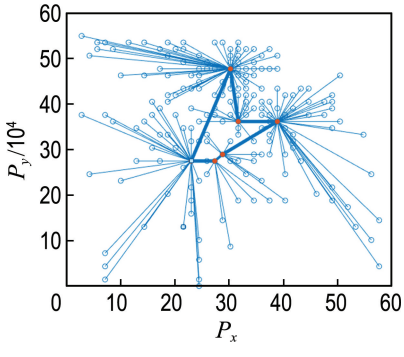


图 5　Order-sequence 编码求解

Fig. 5　Order-sequence coding solution

通过分析表 2～4 中的数据，可得出以下结论：

（1）在枢纽点数量不变的条件下，线型、环型枢纽网络的总成本随着折扣系数 λ 的减小而降低，呈正相关；3 种网络模型中，枢纽点数量的增加都会导致建设投入资本增大，总成本提高，但同时增加枢纽点数量也可缓解枢纽处理容量饱和的问题，使得辐节点的分配更加均衡. 在实际“一带一路”沿线贸易中，采用不同运输网络时可以根据实际货流量的大小，结合“一带一路”倡议中优惠政策，设置规模效应折扣系数的大小，并通过增加或减少枢纽点数量均衡流量分配，调节总成本.

（2）不同实验中某些枢纽点重复出现，例如：在线型枢纽网络中，点 16、48、115、159 等货流量较大，附近节点众多. 对应实际应用中，即在海运枢纽网络里存在自身货流量较大且地理位置适中的港口，能够发展建设成为主要枢纽港，即最具有竞争力的港口，带动周围腹地贸易发展.

（3）调整枢纽点数量以及折扣系数的过程中，观察到位置相近的节点枢纽性发生变化. 一方面，在枢纽点数量不变、折扣系数调整时，例如线型枢纽网络中 $\lambda=0.75$、$P=6$ 时点 106 被选为枢纽点，在 $\lambda=0.80$、$P=6$ 时相邻点 107 被选为枢纽点（106 点变为辐节点），类似情况还有环型点[106,107]等也发生节点枢纽性变化. 另一方面，在同等折扣系数下枢纽点数量变化时，例如环型枢纽网络 $\lambda=0.80$、$P=7$ 时点 45 被选为枢纽点，

$P=8$ 时点 44 被选为枢纽点. 出现上述枢纽性变化的原因在于,当枢纽点数量及规模效应折扣系数变化时,位置、货流量等作为选择枢纽点的主要条件影响到运输距离、成本及规模效应集中度,基于总成本最小化的枢纽点选址将发生改变. 在“一带一路”建设时,港口和其周边港口在发展过程中,由于政策等因素变化且原有的枢纽港货流量饱和,此时周边港口获得更大的发展空间和同样优惠的成本折扣,并能够缓解周边枢纽港的运输压力,将发展成为新兴枢纽港,带动腹地发展.

4.2 网络方案分析与比较

对于单分配轴辐式网络,如图 6 所示,具有网络连通性强、灵活性高的特点. 但当线型及环型枢纽网络分别获得 0.80、0.90 的规模效应折扣系数时,建设 6 个枢纽港,其总成本将远低于单分配轴辐式网络. 因此,对于建设“一带”或“一路”结构的海运枢纽网络,单分配轴辐式网络规模集聚效应较小,无法进一步获得政策带来的成本优惠.

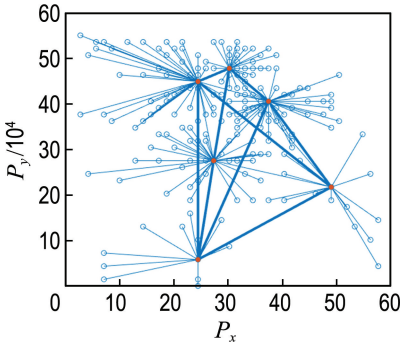


图 6 单分配轴辐式网络结构

Fig. 6 The structure of single allocation hub-spoke network

对于线型枢纽网络,如图 7 所示,枢纽点间形成链路,主要航线纳入海上丝绸之路的覆盖范围. 相比单分配轴辐式网络,在相同枢纽点数量的情况下,规模效应折扣系数小于 0.80 时,线型枢纽网络的总成本更低,由此可以推断出,加入建设“一带”或“一路”结构的运输体系,采用线型枢纽网络进行贸易运输,对于沿线国家航运发展具有积极影响. 同时,本文认为在沿铁路线分布的陆上贸易经济带也同样适用结构的枢纽运输网络,可在实际中加以论证.

对于环型枢纽网络,如图 5 所示,枢纽点间形成回路,首尾枢纽点相连. 与线型枢纽网络相比,

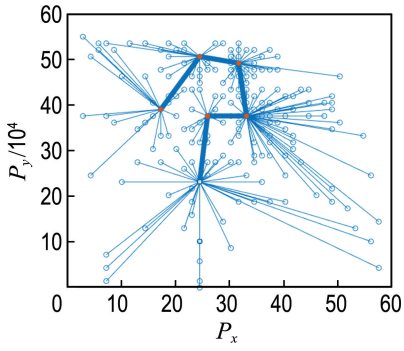


图 7 线型枢纽网络结构

Fig. 7 The structure of linear hub network

枢纽点分布形状更加贴近单分配轴辐式网络,符合实际运输中多个国家间主要港口及腹地港口群间的运输网络模式. 相比单分配轴辐式网络,在枢纽点数量相同情况下,当折扣系数小于 0.90,环型枢纽网络受政策的影响,总成本更低;且环型枢纽网络总成本低于相同折扣系数下的线型枢纽网络总成本.

通过对算例所得结果的比较分析,对于折扣系数的大小应根据国家政策和实际贸易情况制定,而枢纽港的数量可以根据网络总货流量来确定. 在考虑如何降低枢纽网络运输成本时,应将“一带一路”倡议提出后所带来的各国加强贸易、制定优惠政策引起的规模效应折扣纳入其中. 线型、环型枢纽网络结构是基于符合“一带”或“一路”特定网络结构所建立的新型海运枢纽网络,相比单分配轴辐式网络更加适合于“一带一路”上的海运贸易,一方面能够有效降低干线运输成本,通过规模效应集聚贸易量,带动枢纽港建设;另一方面,对于非“一带一路”经济区的各个港口也起到带动作用,这些港口将作为辐节点被纳入线型、环型枢纽网络中,在通过枢纽港进行中转贸易时享受更大的优惠,促进 “一带一路”倡议影响范围的延伸. 环型枢纽网络虽相比于线型枢纽网络总成本更低,但在实际中,还应根据海运网络港口地理位置分布结构的不同来确定构造何种枢纽网络.

根据上述研究,我国在继续推行“一带一路”倡议,建设符合“一带”或“一路”结构特征的线型、环型海运枢纽网络时,应对枢纽港布局进行综合考虑,一方面要根据地理位置、港口吞吐量作为实际参考,重点建设枢纽港、充分发挥政策带来的规模效应,并扩展其辐射范围、带动港口腹地经济发

展；另一方面，应考虑到“一带一路”路线延伸和干线货流量变化，将挖掘有潜力的新兴枢纽港作为可持续发展的一项策略，既缓解原有枢纽港吞吐量饱和、港口竞争激烈的问题，又能扩大我国海运贸易范围，通过枢纽港之间的协调配合加强与沿线经济区、非经济区国家的友好往来.

5　结　语

在“一带一路”倡议影响日益扩大的背景下，本文在求解枢纽网络选址问题上，提出建设符合“一带”或“一路”结构特征的线型、环型枢纽网络模型，同时引入规模效应折扣系数衡量干线运输成本，突出政策环境带来的规模经济效益，比较分析线型、环型枢纽网络与单分配轴辐式网络的不同. 实验结果表明，在发展海运贸易中，改变单分配轴辐式网络，建立具有“一带”或“一路”结构特征的线型、环型枢纽网络是必要的，既符合港口、航线的地理位置分布，又可响应共建“一带一路”的倡议，通过更为优惠的规模效应政策折扣，集中货流量至干线运输，有效降低总成本. 在实际问题中，根据港口间的干线货流量可确定具体的折扣系数以及枢纽点数量，同时应考虑港口枢纽性变化及自身容量限制，对我国及沿线国家枢纽港布局适时调整，追求可持续发展. 本文也进一步论证参与“一带一路”的共建对于周边国家的海运贸易发展具有积极作用.

另外，采用轴辐式网络运输的实例都是基于节点数量规模大的情况，使用遗传算法能够更为有效地求解大规模的数据集. 本文提出的遗传算法对实际问题的解决具有一定的参考意义. 本文并未将枢纽建设成本作为可变因素加以考虑，将在之后的研究中结合实际枢纽建造成本优化枢纽选址问题.

参考文献：

[1] O′KELLY M E. The location of interacting hub facilities [J]. **Transportation Science**, 1986, **20**(2): 92-106.

[2] ABDINNOUR-HELM S. A hybrid heuristic for the uncapacitated hub location problem [J]. **European Journal of Operational Research**, 1998, **106**(2/3): 489-499.

[3] ABDINNOUR-HELM S, VENKATARAMANAN M A. Solution approaches to hub location problems [J]. **Annals of Operations Research**, 1998, **78**(1/2/3/4): 31-50.

[4] O′KELLY M E, CAMPBELL J F, DE CAMARGO R S, *et al*. Multiple allocation hub location model with fixed arc costs [J]. **Geographical Analysis**, 2015, **47**(1): 73-96.

[5] 胡晶晶，胡志华，魏　晨. 考虑枢纽能力选择与均衡利用的轴辐式网络设计[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版)，2015，**38**(8)：1130-1136.
HU Jingjing, HU Zhihua, WEI Chen. Design of hub-and-spoke network in view of balancing utilization and capacity decisions for hubs [J]. **Journal of Hefei University of Technology (Natural Science)**, 2015, **38**(8): 1130-1136. (in Chinese)

[6] 胡青蜜，胡志华，陶　莎. 二级轴辐式零担物流网络设计的资源均衡利用问题[J]. 公路交通科技，2013，**30**(4)：124-131.
HU Qingmi, HU Zhihua, TAO Sha. Resource balanced usage problem for bi-level hub-and-spoke LTL logistics network design [J]. **Journal of Highway and Transportation Research and Development**, 2013, **30**(4): 124-131. (in Chinese)

[7] O′KELLY M E, MILLER H J. The hub network design problem: A review and synthesis [J]. **Journal of Transport Geography**, 1994, **2**(1): 31-40.

[8] DE SÁ E M, DE CAMARGO R S, DE MIRANDA G. An improved Benders decomposition algorithm for the tree of hubs location problem [J]. **European Journal of Operational Research**, 2013, **226**(2): 185-202.

[9] CONTRERAS I, TANASH M, VIDYARTHI N. Exact and heuristic approaches for the cycle hub location problem [J]. **Annals of Operations Research**, 2017, **258**(2): 655-677.

[10] ILIC A, UROSEVIC D, BRIMBERG J, *et al*. A general variable neighborhood search for solving the uncapacitated single allocation p-hub median problem [J]. **European Journal of Operational Research**, 2010, **206**(2): 289-300.

[11] 王静慧. 基于轴辐式网络的快递运输模型与算法研究[D]. 鞍山：辽宁科技大学，2012.
WANG Jinghui. Based on the hub-and-spoke network express transportation models and algorithms [D]. Anshan: University of Science and Technology Liaoning, 2012. (in Chinese)

[12] 赵宇哲. 竞争环境下的轴-辐式集装箱海运网络设计问题[J]. 中国管理科学, 2015, **23**(7):103-112.
ZHAO Yuzhe. Hub-and-spoke container shipping network design in a competitive environment [J]. **Chinese Journal of Management Science**, 2015, **23**(7):103-112. (in Chinese)

[13] 金 敏,鲁华祥. 一种遗传算法与粒子群优化的多子群分层混合算法[J]. 控制理论与应用, 2013, **30**(10):1231-1238.
JIN Min, LU Huaxiang. A multi-subgroup hierarchical hybrid of genetic algorithm and particle swarm optimization [J]. **Control Theory & Applications**, 2013, **30**(10): 1231-1238. (in Chinese)

[14] 许少华,何新贵. 一种基于混沌遗传与粒子群混合优化的过程神经网络训练算法[J]. 控制与决策, 2013, **28**(9):1393-1398.
XU Shaohua, HE Xingui. A training algorithm of process neural networks based on CGA combined with PSO [J]. **Control and Decision**, 2013, **28**(9): 1393-1398. (in Chinese)

[15] KIM H D, PARK C H, YANG H C, *et al*. Genetic algorithm based feature selection method development for pattern recognition [C] // **2006 SICE-ICASE International Joint Conference**. Piscataway: IEEE Computer Society, 2006: 4109107.

[16] LI Peixian, TAN Zhixiang, YAN Lili, *et al*. Time series prediction of mining subsidence based on genetic algorithm neural network [C] // **Proceedings — 2011 International Symposium on Computer Science and Society, ISCCS 2011**. Piscataway: IEEE Computer Society, 2011:83-86.

Comparison research of maritime hub network along Belt and Road Initiatives considering scale effect

YAO Wanying, HU Zhihua*, LIU Chanjuan

(Logistics Research Center, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

Abstract: In order to optimize the maritime hub network of the Maritime Silk Road and promote the implementation of the Belt and Road Initiatives (B&R), based on the traditional hub-spoke maritime network, the structures of the linear and circular hub networks are established separately. With introducing the discount of scale effect, genetic algorithm is used to solve the hub location of different maritime networks. Finally, based on the results, the applicability and total costs of three different network structures, i. e., hub-spoke network, linear hub network and circular hub network, are compared and analyzed. The results show that under the background of the Belt and Road Initiatives, changing the single allocation hub-spoke network and constructing the linear and circular hub network can give full play to the scale effect of policy guidance and reduce total transportation costs. It further proves that the Belt and Road Initiatives have positive effect for the development of maritime trade along the region.

Key words: maritime network; the Belt and Road Initiatives; hub location; scale effect; genetic algorithm