

基于蚁群算法的港口集装箱运输网络径流优化

宋 向 群*, 张 鹏, 郭 子 坚

(大连理工大学 土木水利学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 针对区域性港口集装箱海上运输网络系统的最小费用流问题, 引入新兴的智能仿生蚁群优化算法, 用蚁群在搜索食物源的过程中所体现出来的寻优能力来解决集装箱海上运输网络系统的非线性 NP-C 问题; 构建蚁群优化模型对某外贸经济区域内的集装箱运输网络系统进行优化计算, 结果表明, 所提出的优化模型可以使网络费用流在较短时间内收敛到最优状态, 为下一步合理进行集装箱运输网络的航线配置提供了一个参考依据。

关键词: 蚁群算法; 港口; 集装箱运输; 网络优化; 费用流

中图分类号: U651 文献标识码: A

0 引 言

集装箱港口物流的迅速发展, 带动了作为集装箱海上运输的载体——集装箱船舶的迅速发展。由规模经济性带来的箱流量激增和船舶大型化趋势日益明显。然而, 船舶大型化却提高了航运公司的风险成本。由于大型集装箱船舶航运费用比较昂贵, 对航线决策的失准将致使运输网络的均衡性受到破坏, 或是船舶实载率远不达标, 或是疏运货物滞港时间超期, 两者都将使航运公司遭受巨大的经济损失。由此, 如何根据船舶大型化的发展趋势, 在区域性的港口群中制定合理的船舶营运方案来提高营运经济效益, 达到使整个运输系统的综合运输成本最小、运输规模最大的目标, 已成为航运公司亟待解决的问题。

本研究旨在通过引入人工智能仿生的蚁群优化方法, 以充分实现大型集装箱船的规模效益为前提, 寻找解决集装箱运输网络最大径流最小费用流这一非线性优化问题的有效途径, 为港口集装箱运输网络系统的统一决策调配提供更充实的参考依据。

1 数学模型构建

集装箱运输通过大型转运港和中、小型喂给港的运输方式, 建立起一个由区域性枢纽和次级服务中心组成的运输网络结构, 如图 1。4 000 TEU 及以上的大型集装箱船在区域枢纽进行干

线运输, 较小的船舶用来在区域内集疏集装箱。通过集运枢纽, 船公司可以不用直接采用大型班轮靠港来为远程航运市场服务, 而选择在战略性航运交汇点转运集装箱^[1], 并利用改进的港口设备的效率来节约交换成本。

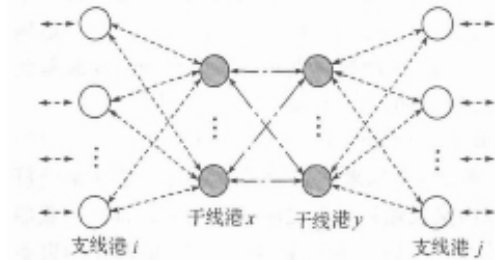


图 1 集装箱海运流向网络体系图

Fig. 1 Network for containers transportation direction

国内外学者从不同角度对港口运输的优化问题开展了许多研究。韩增林等运用模糊数学的方法, 通过对集装箱运输通道进行不同约束条件下的评价来选择最优运输路线^[2]; Baird 通过分析北欧地区集装箱转运港的运营状况来探讨节约转运港运营成本的问题^[3]; Parola 等采用离散模拟模型方法对意大利西北部港口的运输系统进行了分析模拟, 探究可在未来增加港口集装箱流量的措施^[4]; Veenstra 等则对加勒比海沿岸港口的集装箱流进行了分析^[5]。可以看出, 上述研究均着眼于探讨港口运输网络的局部优化问题且地区

收稿日期: 2006-07-15; 修回日期: 2007-10-19.
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50578030).
作者简介: 宋向群*(1959-), 女, 副教授, E-mail: sxqun@126.com.
?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

性显著,而针对区域港口集装箱运输网络整体优化的研究目前还为数不多。

分析集装箱港口运输系统问题的实质,运输网络的综合运输成本主要体现在 5 个方面:

经济性(E)——体现船舶年营运成本最低,包含船舶造价、折旧、保险、维修、燃料、船员工资、企业物料、管理、其他开支及港口收费等费用^[6]。营运成本统一折算在基础运价中,它是运输综合成本计算的基础,是决定综合成本变化的最主要的因素。

快速性(D)——体现在途时间最短,此项考虑货物的时间价值,按照平均折现率来计算货物在途所发生的时间价值。

便利性(O)——体现在库及装卸时间最短,是货物因在库及装卸而导致的时间价值损耗,也按照平均折现率来计算。

安全性(A)——体现货物在途的受损可能性最小,以货物的平均风险费率来计算。

环保性(V)——体现货物运输过程中发生的环境损耗费用最小,由集装箱船的燃料消耗计算所得。

尽管上述几个方面的要求在某一运输方案中难以同时达到最优,但可以将其汇总在综合运输成本 C_t 中,使问题焦点转为求解在满足集装箱流匹配最优时的综合运输成本 C_t 最小问题,即

$$\min C_t = \min C(E + D + O + A + V) \quad (1)$$

据此,将问题的数学模型描述为建立某经济区域内集装箱港口群之间基于箱量、流向、运载船型及其相互转运的运输网络系统,使其在约束条件下的箱流量匹配最优而综合运输成本最小。根据问题的要求,优化目标函数模型表示为

$$\begin{aligned} \min \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n C_{ij}(v_{ij}) = & \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n Q'_{ij}(P'_{ij}d_{ij} + \\ & P_Q i_s t_{ij,1} + P_Q i_s t_{ij,2} + \\ & P_Q \sigma + d_{ij} \gamma) = \\ & \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left[\sum_{x=1}^n \sum_{y=1}^n (Q_{ij} v_{xy}) \times \right. \\ & \left. \left(\frac{P_{xy} d_{xy}}{\eta_{xy}} + P_Q i_s (t_{xy,1} + \right. \right. \\ & \left. \left. t_{xy,2}) + P_Q \sigma + d_{xy} \gamma \right) \right] = \\ & \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left[\sum_{x=1}^n \sum_{y=1}^n (Q_{ij} v_{xy}) \times \right. \\ & \left. \left(\frac{P_{xy} d_{xy}}{\eta_{xy}} + d_{xy} \gamma + \right. \right. \\ & \left. \left. P_Q \left(\frac{i_s}{f_{xy}} + \frac{i_s d_{xy}}{s_p^c} + \sigma \right) \right) \right] \quad (2) \end{aligned}$$

其中

$$P_{xy} = f(Q'_{ij}, d_{ij}, c_{xy}) \quad (3)$$

约束条件:

$$\begin{aligned} v_{xy} = & \begin{cases} 1; & \text{if } Q_{ij} \text{ visited } line_{xy}; \\ 0; & \text{其他} \end{cases}; \\ \forall Q_{OD} \neq 0, & \text{则 } 1 \leq \sum_{x=1}^n \sum_{y=1}^n v_{xy} \leq r - 1; \\ \text{s. t. } & c_{xy} = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}; \\ & d_{ij} = d_{ji}; \\ & i, j \in [1, N], \text{ 且 } i \neq j; \\ & x, y \in [1, N], \text{ 且 } x \neq y \end{aligned} \quad (4)$$

各变量含义如下: P'_{ij} 为 i 港到 j 港的集装箱基础运价[$\$/(\text{n mile} \cdot \text{TEU})$]; Q'_{ij} 为 i 港到 j 港的待运总箱量(TEU),包括生成量和转运量; P_{xy} 为满载下从 x 港运往 y 港的集装箱运价[$\$/(\text{n mile} \cdot \text{TEU})$]; Q_{ij} 为 i 港到 j 港的集装箱生成量预测(TEU); d_{ij} 为两港间海运距离(n mile); P_Q 为单箱货物的平均总价值($\$$); T 为货物的时间损耗(a),包括货物在 x 港与 y 港之间的在途运输耗时间 $t_{xy,1}$ 和在 x 港与 y 港之间的在港滞留时间 $t_{xy,2}$; f_{xy} 为船舶服务频率; s_p 为集装箱船平均航速(kn); c 为集装箱设计船型; η 为船舶实载率; v_{xy} 为 x 和 y 港之间的运输过程关系变量; i_s 、 σ 、 γ 为平均折现率、保险费率和环境损耗费率; r 为货物中转港口约束; N 为网络节点数。

模型中 P_{xy} 、 Q'_{ij} 、 v_{xy} 、 t_{xy} 、 f_{xy} 均未知,且从模型的网络规模来看,关于模型每一个解的线性比较次数有指数多个,即不可能在有限时间内对问题所有的解进行检验,因此采用整数线性规划无法进行求解。从本质上说,该问题属于 NP-C 计算复杂度的组合优化问题^[7]。

2 改进的蚁群算法模型优化与求解方法分析

蚁群算法(ant colony algorithm)是 20 世纪 90 年代由 Dorigo 提出的一种新型模拟仿生优化算法^[8],用蚁群在搜索食物源过程中所体现出来的寻优能力来解决一些复杂系统优化中的 NP 问题,它具有较强的鲁棒性、优良的分布式计算机制、易于与其他方法结合等优点,是一种并行的信息正反馈自我催化方法。

本研究对蚁群算法进行整体改进,使其更适于离散网络的优化计算。首先,进行网络系统的仿生化,将各集装箱港口节点表示为对蚁群具有

不同诱惑力的“食物”，各节点间的海路表示为食物间的路径，使所有港口纳入一个带约束的多点多向连接图中。将 m 只蚂蚁放在 n 个港口的任意起点上 ($1 \leq m \leq n$)，每只蚂蚁趋向于访问具有较高信息素浓度的路径。每个 OD 起终点的运输航线优化方案由蚂蚁群体走过的路径表示，每只蚂蚁所走的路线对应为一个方案可行解。

对于在第 i 个港口点的第 k 只蚂蚁，它以概率 $P_{ij}^k(t)^{[7,8]}$ 选择下一个港口 j ：

$$P_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{\tau_{ij}^a(t) \cdot \eta_{ij}^\beta(t)}{\sum_{s \in L_k} \tau_{is}^a(t) \cdot \eta_{is}^\beta(t)}; & j \in L_k \\ 0; & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

式中： L_k 为蚂蚁 k 下一步允许选择的节点集合； τ_{ij} 为 (i, j) 上信息素量的大小， $\tau_{ij} \in [\tau_{\min}, \tau_{\max}]^{[9]}$ ； η_{ij} 为 (i, j) 边的可见度； U_k 为对于第 k 只蚂蚁来说是不可行的节点的集合； α, β 为信息和能见度的启发式因子。

为了提高蚂蚁在搜索过程中探索新路径的期望，使搜索活动集中于最优解的空间邻域内，这里引入蚁群系统的伪随机比例规则^[10]来选择下一个节点 s ：

$$s = \begin{cases} \arg \max_{j \in L_k} \{[\tau(i, j)]^\alpha \cdot [\eta(i, j)]^\beta\}; & q \leq q_0 \\ S; & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

其中 q 是 $[0, 1]$ 区间均匀分布的随机数， q_0 是一个参数 ($0 \leq q_0 \leq 1$)， S 为根据式 (5) 给出的概率分布所选出的一个随机变量。

参数 q_0 的大小决定了利用先验知识与探索新路径之间的相对重要性：每当一只位于节点 i 的蚂蚁选择下一个将要到达的节点 j 时，它选取一个随机数 $0 \leq q \leq 1$ 。如果 $q \leq q_0$ ，则根据先验知识选择最好的边，否则按式 (5) 的概率选择一条边。

蚂蚁 k 依据转移规则沿着不同的点游历，直至寻至目标点构成了源问题解集中的一个子方案。据此，累积对应路线的集装箱运量。

根据蚁群系统，只有全局最优的蚂蚁才被允许释放信息素来进行全局更新。在所有 m 只蚂蚁都游历完成之后，检索出 m 个子方案中成本最小的那只精英蚂蚁，保存其各种信息并对其路径上的信息素浓度进行全局更新。

信息素全局更新规则如下^[11,12]：

$$\tau(i, j) = (1 - \rho) \cdot \tau(i, j) + \rho \cdot \Delta\tau(i, j) \quad (7)$$
$$\Delta\tau(i, j) = \begin{cases} Q \cdot (f_{\text{gb}})^{-1}; & (i, j) \in R_{\text{gb}} \\ 0; & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

式中： ρ 为信息素挥发因子， $\rho \in (0, 1)$ ，反映蚂蚁之间个体相互影响的强弱； Q 为蚂蚁一次搜索后的信息素总量； f_{gb} 为到目前为止找出的全局最优函数值； R_{gb} 为全局最优路径。

蚁群系统中，蚂蚁在构造路径的同时进行局部更新，应用局部更新规则：

$$\tau(i, j) = (1 - \sigma) \cdot \tau(i, j) + \sigma \cdot \Delta\tau(i, j) \quad (9)$$

其中 $\sigma \in (0, 1)$ 为一个实验参数。局部更新规则的作用是使相应路径的信息素量逐渐减少，以避免蚂蚁收敛到同一路径上。

$\alpha, \beta, \rho, \sigma, Q$ 用实验方法确定最优组合。

算法模型具体计算步骤如下：

Step1 初始化网络，外部读入 OD 运量与节点运距数值作为初始输入，为参数 $\alpha, \beta, \rho, n, m, Q$ 赋初值，为每条边的信息素浓度设初值 $\tau_{ij}(t)$ ，且 $\Delta\tau_{ij} = 0$ ，将蚂蚁置于任意起始节点， U_k 表清零， R_k 表置 - 1。

Step2 将起点 i 于 U_k 表的第一列中置 1 ($k = 1, 2, \dots, m$)，为表列建立索引 s ，构建约束变量 r 。

Step3 蚂蚁 k 根据式 (6)，以类似于轮盘赌^[7]的概率方式选择下一节点 j ，若索引 s 满足约束 r ，则将 j 于 U_k 表第 s 列置 1，并将 j 赋予 R_k 表。在约束的临界条件下判断 j 是否为目标节点，若是，结束当前蚂蚁搜索，根据式 (9) 局部更新路径信息，否则蚂蚁调回起点重新搜索。

Step4 待所有蚂蚁完成循环，判断并保留精英蚂蚁信息，根据式 (7) 和式 (8) 全局更新路径信息，传递至路径信息矩阵 Temp_route。

Step5 网络起终点按设定序列更替，重复 Step2 ~ Step5，并根据最终网络状态为航线配船，计算航线成本与网络总运营成本。

Step6 若未达最大循环次数，且未停滞，规格化所有 U_k 表、 R_k 表与信息素矩阵，转 Step2 进行下一轮搜索。

Step7 输出最优航线及配备船型与网络最小运营成本。

3 优化实例与模拟分析

考虑环太平洋及大西洋部分沿岸港口在内的某区域外贸集装箱港口群，从中选取 20 个港口作为运输网络的节点，见表 1。通过分析各个港口的集装箱货量进行 2015 年集装箱生成量的预测。按照本研究建立的模型进行优化计算，寻求系统集装箱流最优方案。

表 1 区域性外贸港口集装箱运输网络节点

Tab.1 Nodes of the regional foreign trade containers transportation network system of seaports

港口节点	节点代号	节点名称	港口节点	节点代号	节点名称
1	HK	香港	11	BS	釜山
2	KS	高雄	12	SGP	新加坡
3	SZ	深圳	13	VCV	温哥华
4	NB	宁波	14	SA	西雅图
5	SH	上海	15	TCM	塔克玛
6	QD	青岛	16	LA	洛杉矶
7	TJ	天津	17	LB	长滩
8	TK	东京	18	FLK	菲力克斯托
9	YKH	横滨	19	RTD	鹿特丹
10	KB	神户	20	HB	汉堡

根据实际海运,货物中转靠泊次数不超过 2 次,因此航线上的最大节点约束 r 取值为 4;集装箱设计船型 c 取为 3 类,分别为 2 000、4 500 和 8 000 TEU;船型速度 s_p 按 4 000 TEU 以上取为 25 kn,其他取为 19 kn. 模型中的蚂蚁数目依照网络规模与蚂蚁数目之比约等于 1.5 的选择策略

表 2 基于蚁群优化的集装箱运输流径优化结果

Tab.2 Optimal flowing pathway for containers transportation based on ACO

起始港	适配船型 (TEU)	转运港 ①	适配船型 (TEU)	转运港 ②	适配船型 (TEU)	终到港
SZ	c_1	HK	—	—	c_1	KS
SZ	c_1	HK	—	—	c_1	TJ
SZ	c_1	HK	c_2	KB	c_2	QD
SZ	c_2	KB	—	—	c_3	ST
KS	c_2	KB	—	—	c_3	ST
KS	c_2	SGP	—	—	c_2	FLK
NB	c_2	HK	—	—	c_2	FLK
NB	c_3	BS	c_3	KB	c_3	ST
NB	c_3	KB	—	—	c_2	TJ
QD	c_3	BS	c_2	TK	c_3	LB
TJ	c_2	BS	—	—	c_3	LB
TK	c_1	SGP	—	—	c_2	HB
SH	c_2	HK	c_3	SGP	c_3	RTD
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

注:1) c_1 为 2 000 TEU; c_2 为 4 500 TEU; c_3 为 8 000 TEU; 2) 逆向线路省略

表 3 蚁群算法与遗传算法及免疫算法的仿真结果对比

Tab.3 Simulation results of ACO compared with genetic algorithms and immune algorithms

类型	综合运输费用 计算最优解 / 亿元	t_{CPU}/s	较全部直达费用 (6321) 节省 / %	节省费用 / 亿元	收敛所需迭代
遗传算法	6 248	3 650	1.15	73	480(代)
免疫算法	6 206	3 220	1.82	115	400(代)
蚁群算法	6 172	2 450	2.36	149	330(次)

表 2 中转运港 ② 的节点个数较少,原因在于本研究所选网络节点均为位置较好、规模较大的节点,船舶无需挂靠过多港口即可满足运输成本

取为 30,其他算法参数经组合实验,选取如下: $\alpha = 0.1;\beta = 2;\rho = 0.3;\sigma = 0.1;Q = 500$.

程序循环 500 次,方案优化结果见表 2. 适配船型与服务频率为径流优化的辅助约束,网络其他节点间采用直接运输模式.

由表 2 可知,在未来,港口节点 HK、TK、KB、BS、SGP 等将作为主干枢纽港,集散来自于网络边缘其他节点的集装箱量,且枢纽间的转运船舶吨位均在 4 500 TEU 以上,集装箱箱流量较大.而由表 3 可知,经枢纽港转运的最优运输综合费用比节点间直接运输节省 2.36%,约 149 亿元,由此,经过综合运输网络的整体优化,大型船舶运输的规模效益已经初步体现出来,优化效果与预想一致.

因此,对于实际运输网络中的任意港口节点,在运营中都要充分考虑港口自身的地理位置、港口发展定位、集装箱生成量以及船舶运输能力,通过分析选择直运或合理的转运枢纽、选择恰当的运输船舶和服务频率等综合措施来降低相应的运输成本,提高营运效益.

控制的要求.

由表 3 可以看出,蚁群算法较之遗传算法及免疫算法在算法性能及计算结果的最终准确度上

更高,从迭代收敛次数及运行时间上看,该算法能够以较快的速度收敛,非常适合大型复杂网络的组合优化求解。全局收缩速度和局部最优跳出机制比较明显。图 2 为蚁群算法模型的收敛过程。

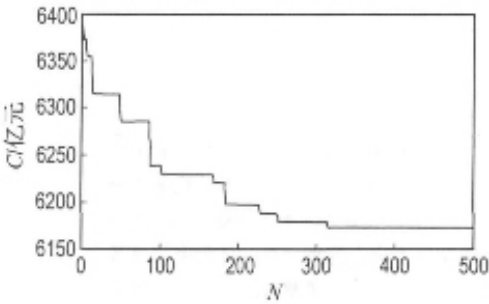


图 2 蚁群算法模型的收敛过程

Fig.2 Convergence process for the model of ant colonies algorithm

4 结 语

集装箱海运网络的合理配置是一个多因素多变化的综合规划问题,复杂多样的运输方式使得运营企业无法在有限时间内运用线性规划方法进行运营方案决策。本研究在分析集装箱运输网络的径流以获得最优成本控制的问题时,将自然仿生的蚁群优化算法予以部分改进同海运集装箱运输网络相结合,将问题逐步转移到蚁群为其特定的食物进行并行搜索的网络模型上来,并进行了仿真计算求解。蚁群算法具有并行搜索的独特特性,能够快速找出多个较优的路线,并在几个精英蚂蚁的相互比较中获得最优解。蚁群算法成功应用在海运网络中,将为实际海运企业针对集装箱运输网络配置的方案决策提供可靠的理论规划依据。

参考文献：

[1] 朱晓宁. 集装箱运输与多式联运[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2005

[2] 韩增林, 安筱鹏, 王 利, 等. 中国国际集装箱运输网络的布局与优化[J]. 地理学报, 2002(4): 479-488

[3] BAIRD A. Optimizing the container transshipment hub location in Northern Europe [J]. J Transport Geography, 2006, 14: 195-214

[4] PAROLA F, SCISMACHEN A. Intermodal container flows in a port system network: Analysis of possible growths via simulation models [J]. Int J Prod Econ, 2005, 97: 75-88

[5] VEENSTRA W, HENRY M, ALEXANDER R. Analyzing container flows in the Caribbean [J]. J Transport Geography, 2005, 13: 295-305

[6] 李树范. 运输船舶可行性分析[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 1990

[7] 段海滨. 蚁群算法原理及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005

[8] DORIGO M. Optimization, learning and natural algorithms [D]. Italy: Politecnico di Milano, 1992

[9] STÜTZLE T, HOOS H. MAX-MIN ant system [J]. Future Generation Comput Syst, 2000, 16(8): 889-914

[10] 张宗永, 孙 静, 谭家华. 蚁群算法的改进及其应用 [J]. 上海交通大学学报, 2002, 36(11): 1564-1567

[11] COLOMI A, DORIGO M, MANIEZZO V. Distributed optimization by ant colonies [C] // VARELA F, BOURGINE P. Proceedings of First European Conference Artificial Life. Despairs': Elsevier, 1991

[12] TOKSARI M D. Ant colony optimization for finding the global minimum [J]. Appl Math and Comput, 2006, 176(1): 308-316

Ant colonies optimization for containers transportation network system of seaports

SONG Xiang-qun*, ZHANG Peng, GUO Zi-jian

(School of Civil and Hydraul. Eng., Dalian Univ. of Technol., Dalian 116024, China)

Abstract: The optimization of total cost for regional containers transportation network system of seaports was focused, and a new reliable intelligent ant colonies optimization algorithm was proposed, which is greatly inspired from real ants and their food seeking behavior to solve the nonlinear NP-complete problems. An ant colonies optimization model for certain containers transportation network system of foreign trade in an economic zone was constructed and the whole process was simulated. The results show that the optimization model constructed is obvious to reduce the integrated cost of containers transportation network, which provides a reference model for containers transportation network layout.

Key words: ant colonies algorithm; port; containers transportation; optimization of network; cost flow