

基于粒子群算法内河船舶运输决策优化——以上海环境物流公司为例

摘要：上海内河航道水网密布，如何提高内河船舶运输效率是内河运输研究的重要内容，运输方案的科学性直接影响了企业营运和内河运行的效率。本文分析了上海内河航道的主要特征，以上海环境物流公司固废集装箱运输为例，以运输成本最优为目标，考虑了运输路线和运输船型对运输成本的影响建立数学决策模型。依据所建的数学模型，通过优先权值的编码解码方式对粒子群（PSO）算法进行改进以便对模型进行求解。通过实验表明，所设计的成本最优决策模型能够帮助企业较好地利用航道资源，降低成本，优化运营策略，具有一定参考价值。

关键词：粒子群；内河；运输；决策

1 引言

上海的内河航道水网密布，而水运也是上海国际航运中心集疏运体系和城乡综合交通系统的重要组成部分，各级政府对内河航运发展以及相关设施的完善高度重视，先后发布了《上海市人民政府关于加快本市内河水运发展意见》、《交通运输部关于推进长江经济带绿色航运发展的指导意见》、《上海市城市总体规划（2017~2035）》等，强调加快互联互通的内河高等级航道网，优化港口布局和功能划分^[1]。如何合理的运用内河运输物流网络，最大化地发挥水路运输的优势势必成为内河运输研究的重要内容。

运输优化问题是一个 NP-hard 问题，主要通过启发搜索算法进行求解。目前，对于水路运输资源利用的研究相对还是比较匮乏的，有学者将遗传算法运用到内河船舶路径优化上，以供需之间的货物运输分配成本最低进行求解^[2]；还有一位学者从上海内河网络进行分析，采用 Dijkstra 算法分析和优化内河结构网格^[3]。而在陆上的车辆运输调度方面，则有许多相关的研究文献，求解算法还包括蚁群算法^[4]、A*算法^[5]等。本文研究了上海内河运输网络的分布特征，从经济成本角度出发研究运输优化问题，考虑了航道对船型的限制，从问题的实际出发对粒子群算法（Particle Swarm optimization, PSO）进行改进，求解始发港到目的港最优的路线和船型，并以上海环境物流公司的固体废弃物运输为例，通过运用本

方法更好利用水运资源进行水运物流组织，降低物流成本。

2 上海市内河航道网络架构

2.1 上海市内河航道特征

上海市内河航道发展的总体框架为“一环十射”，如图 1 所示。所谓“一环十射”干线航道，主要包括黄浦江（巨潮港—分水龙王庙）、赵家沟（随塘河—黄浦江）、大芦线（内河集装箱港区—黄浦江）、大浦线（赵家沟—大治河）、杭申线（浙江省界—分水龙王庙）、苏申外港线（江苏省界—分水龙王庙）、长湖申线（太浦河上海段江苏省界—西泖河）、苏申内港线（江苏省界—宝钢支线铁路桥、宝钢支线铁路桥—吴淞大桥）、平申线（浙江省界—黄浦江）、油墩港（苏申内港线—黄浦江）、罗蕴河（新川杨河水闸—藻浜）、金汇港（金汇港南闸—黄浦江）、川杨河（三甲港水闸—黄浦江）、龙泉港（运石河—黄浦江）。

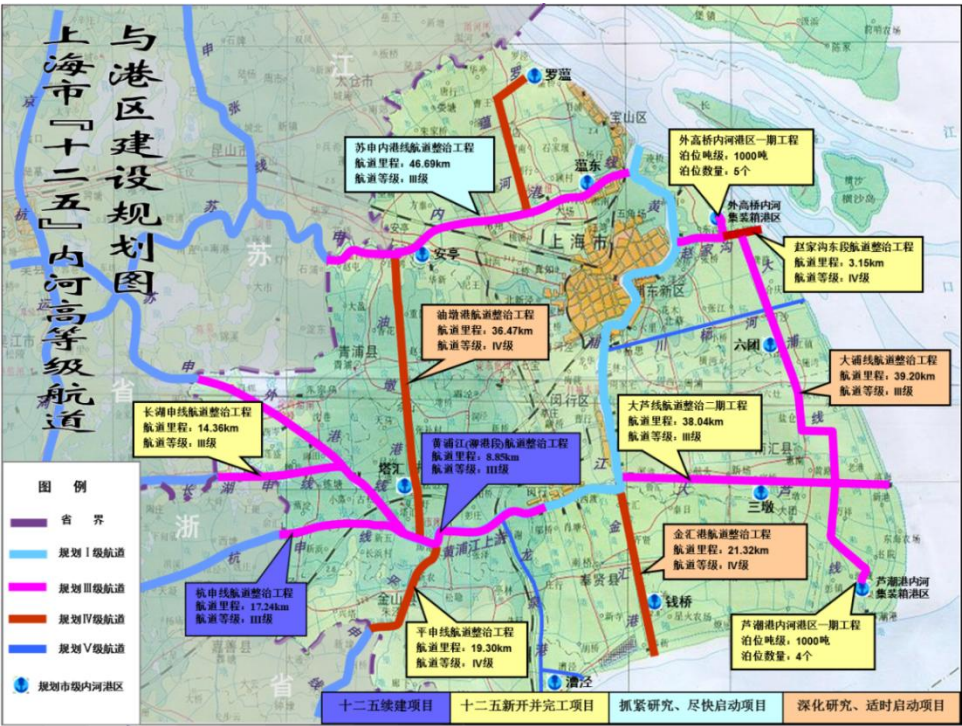


图 1 上海市内河“一环十射”规划图

上海市管辖的内河航道共 2141.0 公里。其中，内河航道 196 条，通航里程 2086 公里，III 级及以上内河航道里程达 90km，占航道总里程 4.3%。含黄浦江下游段（开放水域）航道 75 公里。内河码头总数为 733 座，主要分布在全市 170 多条航道上，分布比较集聚有蕴藻浜、大治河、川杨河、浦东运河等通航条件较好的干线航道上^[6]。上海市内河航道等级偏低，跨河建筑多而低矮，其中桥梁 2822

座，船（闸）55 座，节制闸 27 座，成为内河航道的瓶颈口。

不同等级的内河航道允许通过的船舶吨位是受到限制的，表 1 为中国航道等级划分及对应的航行船舶吨位和富裕水深，所以进行运营时，经营者需要选择合适的船型。

表 1 中国航道等级划分

航道等级	I	II	III	IV	V	VI	VII
船舶吨级(t)	3000	2000	1000	500	300	100	50
富裕水深(m)	0.4~0.5	0.3~0.4	0.3~0.4	0.2~0.3	0.2~0.3	0.2	0.2

根据内河的规划及航道等级的相关规定，同时在百度电子地图上对各河流的主要节点间的距离进行测量，参考旧版文献材料^[7]，重新绘制上海市内河航道网络结构图，如图 2 所示。图中展示了上海市主要的河道名称、河道长度（km）以及航行吨级（t），未标明的节点为航道接口。

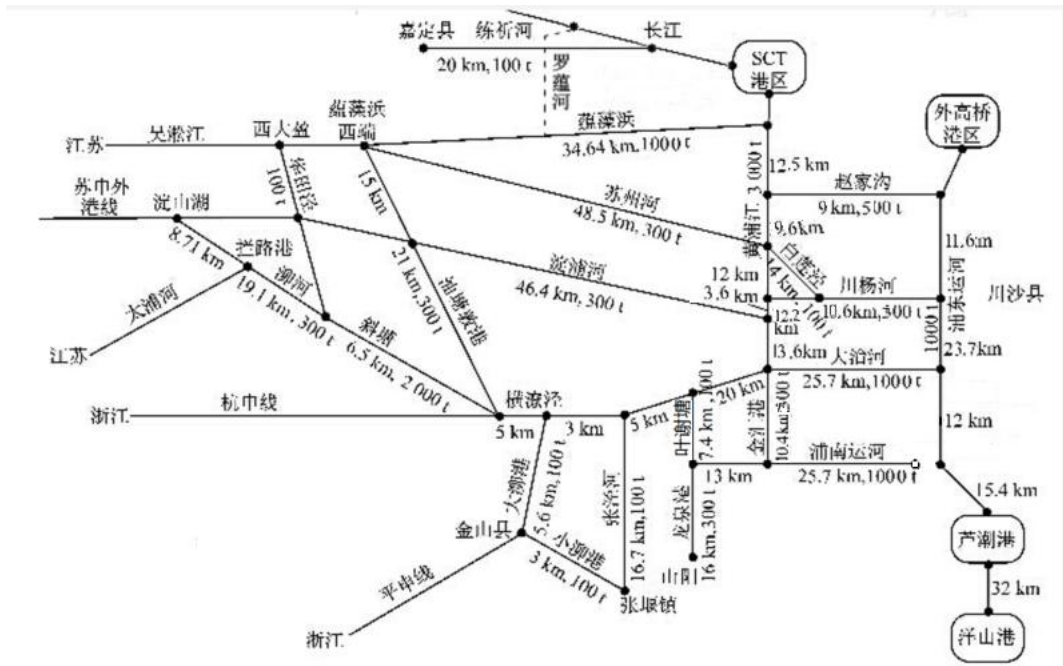


图 2 上海市内河航道网络结构图

2.2 上海市内河航运网的抽象和简化

水路运输跟陆路运输一样，将一定的货物量依据运载工具运输到指定的地方，为了方便后续对水路运输营运方式进行寻优，需要对运输网络进行抽象和简化。根据图 1 和图 2 所示的上海“一环十射”内河运输框图，抽取主要的航道和节点，将图简化为如图 3 所示的内河运输网络结构简化图。对网络中的各节点的

含义进行说明如表 2 所示。

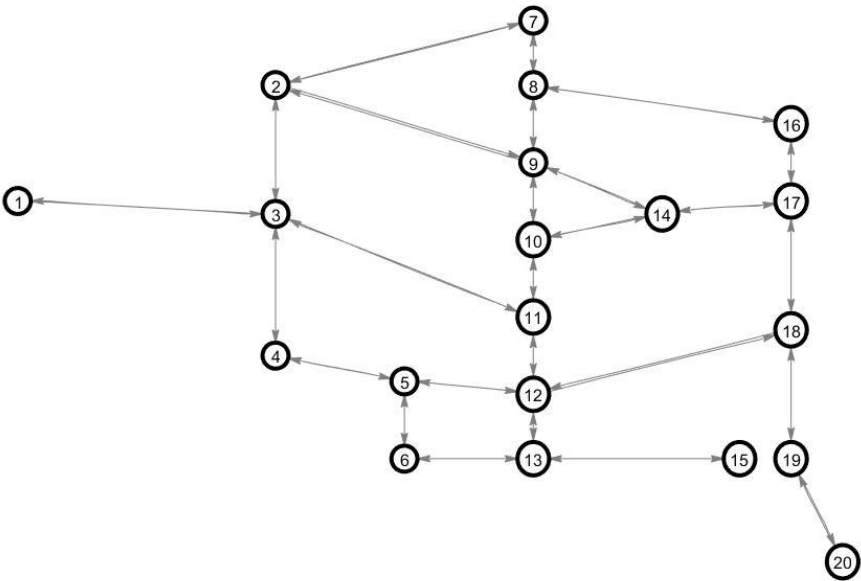


图 3 上海市内河运输网络结构简化图

表 2 网络节点及标号说明

节点	节点含义说明	节点	节点含义说明
1	淀山湖节点	11	大治河、黄浦江节点
2	蕴藻浜河、苏州河、油塘墩港节点	12	大治河、金汇港、黄浦江节点
3	油塘墩港、淀浦河、苏申外港线节点	13	金汇港、浦南运河节点
4	油塘墩港、横潦泾节点	14	白莲泾、川杨河节点
5	叶谢塘、黄浦江节点	15	浦南运河东侧节点
6	叶薄港、浦南运河节点	16	赵家沟、浦东运河节点
7	蕴藻浜河、黄浦江节点	17	川杨河、浦东运河节点
8	赵家沟、黄浦江节点	18	大治河、浦东运河节点
9	川杨河、黄浦江节点	19	浦南运河、浦东运河节点
10	淀浦河、白莲泾、黄浦江节点	20	芦浦节点

3 内河船舶运输决策数学模型

3.1 问题的描述

船舶运输决策数学模型可以描述为由某一始发港向某一特定的目的港航行，航行中会经过像图 3 所示的一些航道和节点。根据不同内河航道的船型限制，每条航道能够通航的船舶类型不一样，不同的船舶类型则产生的运输成本不同。船舶从始发港出发运输到终目的港经过所选的船型只能满足最低等级的航道限制船型要求。为建模型方便，将运输网络用 $G = (V, A, C)$ 来表示，对其参数的定义如下： $V = \{v_0, v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 表示网络的节点集，集合 $N = (0, 1, \dots, n)$ ，式中 v_0 表示网络中的始发港， $\{v_1, v_2, \dots, v_{n-1}\}$ 表示网络中的内河航道之间的节点， v_n 表示目的港， $A = \{e_{ij} \mid e_{ij} = (v_i, v_j), v_i, v_j \in V\}$ 表示网络的弧集， $C = \{c_{ij} \mid (v_i, v_j) \in V\}$ 表示航道 e_{ij} 所能承受的最大船型对应的集装箱运输成本，单位为元/TEU*km。弧 e_{ij} 上的运输距离用 s_{ij} 表示，单位为 km，当节点 v_i 和 v_j 之间不直接相连，则 s_{ij} 的值取无穷大；定义 x_{ij} 为决策变量，取值为 0 或 1。

3.2 模型建立

基于上一节的问题描述，建立以单位集装箱运输成本最优为目标的数学模型为：

$$\text{Min } f = \min (c_{ij} * \sum x_{ij} s_{ij}) \quad (1)$$

$$\sum_{j \in N} x_{0,j} = 1 \quad (2)$$

$$\sum_{i \in N} x_{i,n} = 1 \quad (3)$$

$$\sum_{i \in N} x_{ij} \leq 1, 0 < j < n \quad (4)$$

$$\sum_{j \in N} x_{ij} \leq 1, 0 < i < n \quad (5)$$

$$\sum_{i \in N} x_{ij} + \sum_{i \in N} x_{ji} \neq 1, 0 < j < n \quad (6)$$

式中，公式 1 表示模型的目标函数；公式 (2)、(3) 表示路线从始发港开始，目的港结束；公式 (4)、(5) 表示每个中间的节点存在的到达路线和出发路线不超过一条；公式 (6) 表示对于每个中间节点，有到达路线必有出发路线。

4 粒子群算法设计

4.1 基于粒子群算法的算法流程

本文根据上文建立的模型设计了粒子群算法进行求解，粒子群算法具有易于实现、收敛速度快、参数调整少等优点^[8]。传统的粒子群算法都是求解决策变量连续的优化模型，而前文所建模型的解为离散型决策变量，所以需要粒子群算法进行改进。本文仍然沿用粒子群算法的一般求解步骤，主要通过加入设计的编码解码的方式进行离散决策变量的求解，粒子群算法的计算流程如图 4 所示，步骤描述如下：

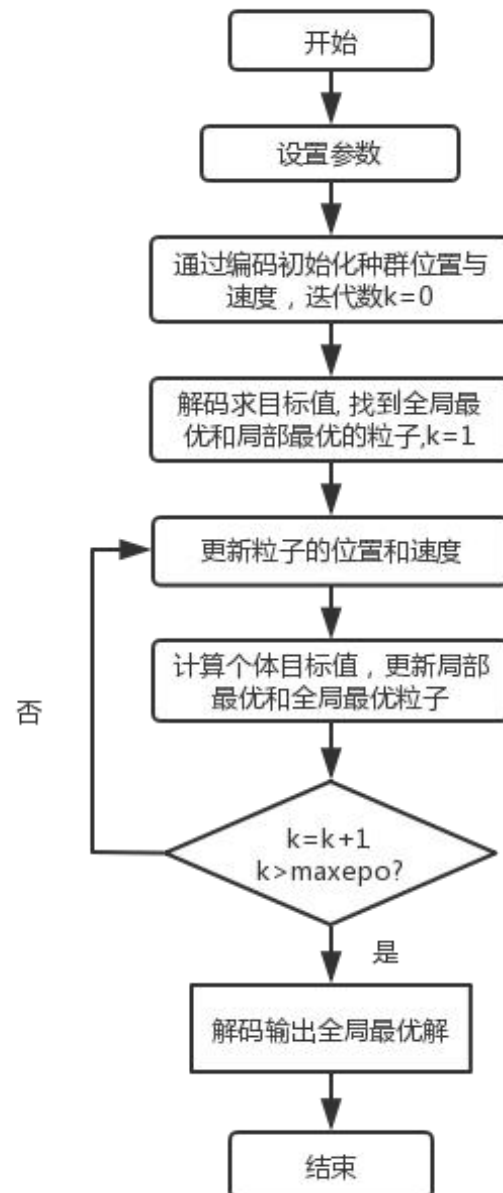


图 4 粒子群算法流程图

步骤 1 程序开始，设置相关参数变量，如粒子数量 n ，粒子的维度 d ，总迭代次数 $\max ep o$ ，还有粒子位置的限制区域 $[X_{\min}, X_{\max}]$ ，粒子速度的限制区域

$[V_{\min}, V_{\max}]$ 等。

步骤2 初始化粒子群，编码方式为通过 $X_{\max} - rand * (X_{\max} - X_{\min})$ 生成每个粒子的初始位置，得到初代粒子群 $XT^k = (X_1^k; X_2^k; \dots; X_n^k)$ ， $X_i^k = (x_{i,1}^k, x_{i,2}^k, \dots, x_{id}^k)$ ，通过 $V_{\max} - rand * (V_{\max} - V_{\min})$ 生成每个粒子的初始速度，得到初代粒子群速度为 $VP^k = (V_1^k; V_2^k; \dots; V_n^k)$ ， $V_i^k = (v_{i,1}^k, v_{i,2}^k, \dots, v_{id}^k)$ ，当前迭代数 $k = 0$ 。

步骤3 对初始粒子解码计算得到目标值为 $Z^k = (z_1^k, z_2^k, \dots, z_n^k)$ ，局部最优值为 $ZP = (zp_1, zp_2, \dots, zp_n)$ ， $zp_i = z_i$ ，每个粒子的局部最优解 $XP_i = (xp_{i,1}, xp_{i,2}, \dots, xp_{i,d})$ ， $i = 1, 2, \dots, n$ ，令 $xp_{ij} = x_{ij}^k$ ，得到全局最优值为 $Zg = \min(zp_1, zp_2, \dots, zp_n)$ ，对应的全局最优解为 $XG = (xg_1, xg_2, \dots, xg_d)$ ，令 $k = k + 1$ 。

步骤4 更新粒子的位置和速度，粒子 i 第 j 维的更新公式为：

$$v_{ij}^k = wv_{ij}^{k-1} + c_1r_1(xp_{ij} - x_{ij}^{k-1}) + c_2r_2(xg_j - x_{ij}^{k-1}) \quad (7)$$

$$x_{ij}^k = x_{ij}^{k-1} + v_{ij}^{k-1} \quad (8)$$

c_1 、 c_2 表示加速度常数，对学习步长进行调整； r_1 、 r_2 为通过 $rand$ 生成的随机数。惯性权重 w 进行更新为：

$$w = w_{\max} - (w_{\max} - w_{\min}) * (k / \maxepo) \quad (9)$$

w_{\max} 和 w_{\min} 分别表示最大或最小惯性权重。

步骤5 通过对新的粒子群进行解码计算适应度值，如果 $z_i^k < zp_i$ ，则 $zp_i = z_i^k$ ， $XP_i = X_i^k$ ，如果 $z_i^k < Zg$ ，则 $Zg = z_i^k$ ， $XG = X_i^k$ ， $i = 1, 2, \dots, n$ 。

步骤6 令 $k = k + 1$ ，判断 $k > \maxepo$ 是否成立？如果是，进行下一步骤，如果否，跳到步骤4。

步骤7 对全局最优解进行解码，输出结果，结束运行。

4.2 粒子编码的解码

解码是本文算法中求解最优解的关键步骤，是将生成的位置编码转化为离散型可行解的过程。所设计的算法采用基于优先级方式对粒子的各个维度进行排序生成基本解。

2	3	4	5	6	7
1.06	1.34	0.54	6.53	1.85	10.5

图 5 解码说明

假如按 4.1 节得到位置编码如图 5 所示，每个位置的数表示优先权值，起点为 1，终点为 6，则编码分别表示节点 2-7 位置的权值，权值越小优先权越高。以图 3 为网络结构图，节点 4 权值为 0.54 最小，但节点 4 与节点 1 不相连，下一个优先节点为 2，该节点也不与节点 1 相连，跳过选择下一节点 3，节点 3 与节点 1 相连，将 3 排在 1 后面，将节点 3 的权值变为最大值限制值 X_{\max} ，进行新一轮比较，节点 4 权值优先并与节点 3 相连，4 排在 3 后面，节点 4 权值变为 X_{\max} ，重头重新对比排列，直到终点加入排列当中结束。这个编码的排列顺序为{1, 3, 4, 5, 6}。然后按这个排列方式进行目标值计算。当进行排列到达不了终点时，则给该编码赋予一个足够大的目标值。

5 实例计算

5.1 基于实例的内河结构网络

以上海环境物流公司固体生活废弃物运输（简称固废运输）为例，组织运营线路如图 6 所示。生活垃圾集装箱是从蕴藻浜码头或徐浦码头直接运往老港码头，空箱返回，而危险品集装箱则可以在蕴藻浜码头、徐浦码头和老港码头间周转运输。

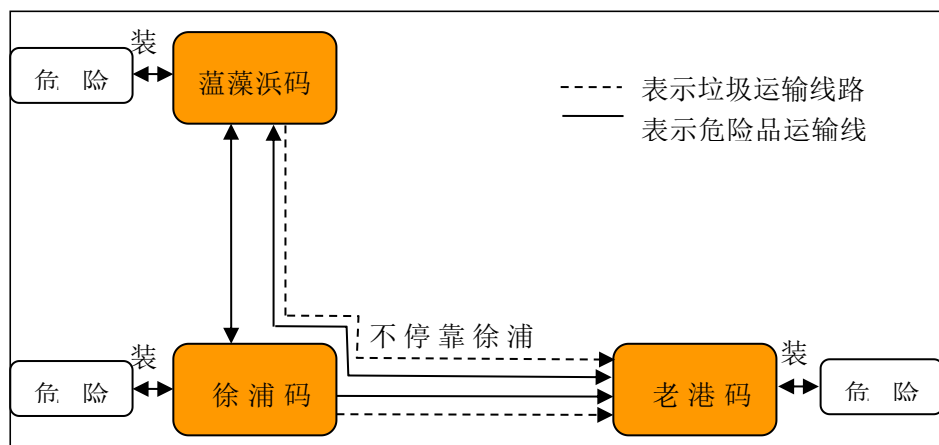


图 6 组织运营线路

蕴藻浜码头基地位于上海市宝山区西泗塘以西、蕴藻浜南岸，距蕴藻浜、黄

浦江交汇处约 5km（见图 7）。徐浦码头基地位于上海市徐汇区黄浦江西岸，徐浦大桥浦西主桥墩南侧，华泾港下游河口处（见图 7）。老港码头基地位于上海市浦东新区老港地区，大治河支流清运河的末端（见图 7）。



图 7 三个码头地理位置图

船舶途经航道包括温藻浜航道、黄浦江航道、大治河、清运河 4 条航道，因受清运河航道限制，最大运营 500t 吨级集装箱船舶。

基于上述描述将三个码头作为新的节点加入加图 3 所示的网络简图当中，通过百度最子地图查找和测距得到关于固废运输的网络结构简图如图 8 所示。

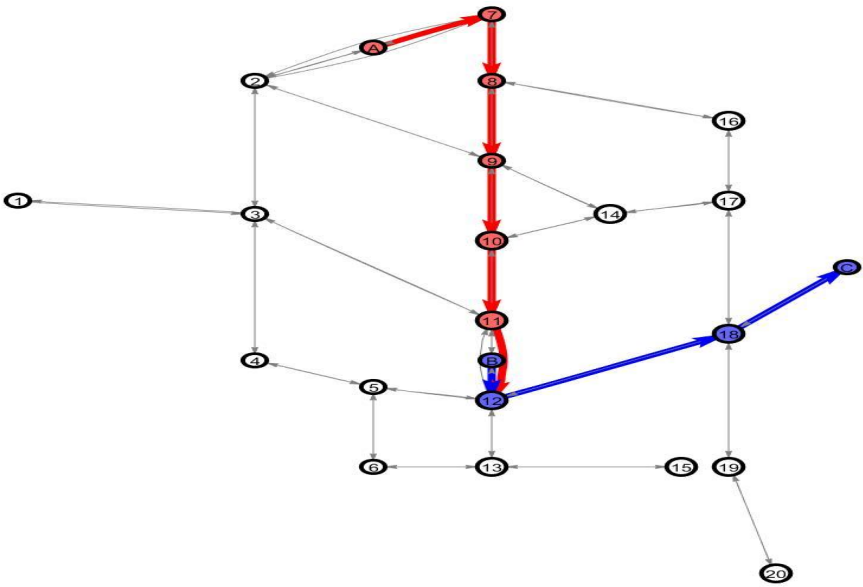


图 8 基于固废运输内河运输网络结构简化图

图中节点 *A* 表示蒹藻浜码头，与节点 2 的距离为 29.3km，与节点 7 的距离为 5.3km；节点 *B* 表示徐浦码头，与节点 11 距离 1.3km，与节点 12 距离 12.5km；节点 *C* 表示老港码头，与节点 18 距离为 16.8 公里。目前，从蒹藻浜码头出发到达老港码头的路线为：*A*→7→8→9→10→11→12→16→*C*，图中蓝色部分所示，从徐浦码头出发到达老港码头的路线为：*B*→12→18→*C*，图中红色部分所示。

5.2 实例模拟试验

按照表 3 确定各吨级的集装箱船型运输每个集装箱单位里程发生的成本，分别计算从节点 *A* 和节点 *B* 抵达节点 *C* 的运行路线和合适的船型。按照第 4 章设计的粒子群优化算法对固废运输路线和船型进行求解，设置每代的粒子数为 100，总的迭代次数为 200。

表 3 各吨级集装箱运费成本

船型	100t	300t	500t	1000t	3000t
运输成本(元 /(TEU.km))	5	3.99	2.89	2.19	1.42

通过计算得到的最优路线如图 9 所示。从蒹藻浜码头出发到达老港码头的路线为：*A*→7→8→16→17→18→*C*，单位集装箱的运输总成本为 228.021 元，总共经过 7 个节点，可选用的最佳船型为 500t。从徐浦码头出发到达老港码头的路线为：*B*→12→18→*C*，单位集装箱的运输总成本为 158.95 元，总共经过 4 个节点，可选用的最佳船型为 500t。

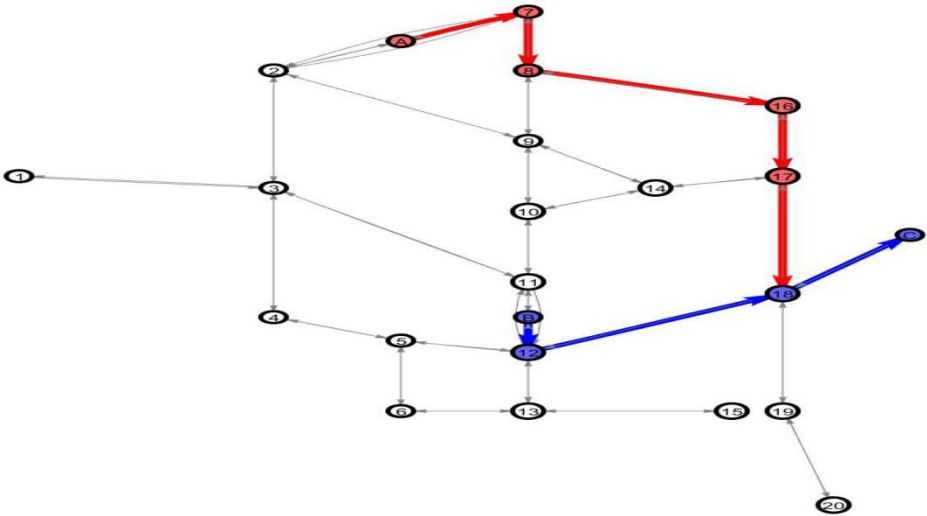


图 9 最优路线示意图

5.3 实验结果分析

通过 5.2 节的实验结果与 5.1 节固废运输原来的营运方式进行对比可以看出，从徐浦码头到达老港码头的路线是一致的。通过计算得到的最优适用船型也一样，同为 500t。但从蕴藻浜码头运送生活垃圾集装箱到老港码头的营运方式不同，将模拟实验得到的结果与原来的营运方式进行对比，如表 3 所示。

表 4 蕴藻浜码头至老港码头营运方式对比

运营方式	路线	最优船型	经过节点数	运输成本（元/TEU）	成本增长（元/TEU）	成本增长率
原方式	A→7→8→9	500t	9	286.399	0	0
	→10→11→12					
实验结果	→16→C	500t	7	228.021	-58.378	-20.383%
	A→7→8→16 →17→18→C					

通过表 4 的实验结果与原来营运方式的各项指标对比可知，通过本文所建立的成本优化模型计算得到从蕴藻浜码头运输到老港码头的营运方式，与原来的营运方式所选择的最优船型相同，同为 500t 集装箱船型，但每个箱子的运输成本只需要 228.021 元/TEU，与原来方式产生的每箱 286.399 元/TEU 相比，成本降低了 58.378 元/TEU，降低幅度达到 20.383%。从成本营运的角度来看，具有更好的营运效率。而且原来营运路线经过的节点总数有 9 个，实验得到的营运路线经过的节点总数有 7 个，一定程度上有助于降低风险。

6 结束语

本文通过分析上海市内河航道的特征，根据内河的分布情况建立内河网络结构简图，然后以运输成本最优为目标函数建立船舶营运决策数学模型，通过优先权值编码解码的粒子群优化算法对模型进行求解。通过上海环境物流公司固废运输的实例进行验证，实验得到的船舶营运方式，可以更充分利用现有航道资源，降低企业在运输服务中的运输成本，对经营者决策具有一定参考价值。

参考文献：

- [1] 方林. 上海内河航运发展评估[J]. 交通与港航. 2020, 7(04), 82-85.
- [2] 沈航. 基于遗传算法的内河船舶路径优化问题研究[J]. 物流技术, 2010, 029(002):133-135.
- [3] 陈飞儿, 张仁颐. 上海港集装箱内河集疏运网络优化[J]. 上海交通大学学报, 2006(06):1019-1023.
- [4] 张成, 凌有铸, 陈孟元. 改进蚁群算法求解移动机器人路径规划[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(011):1758-1764.
- [5] 肖英才. A*算法在露天矿运输道路最优路线的应用[J]. 中国铝业, 2015(1):20-22.
- [6] 张锦文. 上海市内河港区布局规划的思考[J]. 上海城市规划, 2017(4):70-74.
- [7] 龙静. 上海港集装箱内河运输网络规划[D]. 上海交通大学, 2003.
- [8] 贾会群, 魏仲慧, 何昕, 等. 基于改进粒子群算法的路径规划[J]. 农业机械学报, 2018, 49(12):371-377.