

运输时间约束下冷藏集装箱海运网络优化

王文渊, 李实博, 彭云*, 宋向群, 马千里

(大连理工大学 水利工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 以冷藏集装箱为研究对象, 分析生鲜货物的易腐特性和时效要求对冷藏集装箱运输方案的影响, 以运输总成本最小为目标、运输时间为主要约束, 构建冷藏集装箱海运网络优化模型, 研究不同供需组合和运输时间要求下的最优运输方案. 算例结果显示, 对于距离较近的起点-终点(OD)对, 中转运输较直达运输的运输时间平均增长 60% 以上, 运输成本增长 15% 以上, 故选择直达运输. 对于距离较远的 OD 对, 中转运输可实现规模经济效益, 为最优运输方案. 运输时间约束的敏感性分析显示, 短途运输对于运输时间约束变化不敏感, 直达运输相较于中转运输可节约运输成本 10% 以上, 故均选择直达运输; 长途运输受运输时间约束影响较大, 仅在满足条件时才选择中转运输, 否则只选择直达运输.

关键词: 冷藏集装箱; 海运网络; 运输时间; 运输路径; 航线运力

中图分类号: U695 **文献标识码:** A **doi:** 10.7511/dllgxb201803005

0 引言

随着国际生鲜产品贸易量日益增加, 冷链物流业在市场需求和宏观政策的推动下快速增长. 冷藏集装箱具有装卸灵活、货物运输温度稳定、污染低等优点, 在冷链物流中被广泛应用. 大型国际果蔬企业主要依靠雇佣航运公司进行海上运输, 形成多 OD(起点-终点)的冷藏集装箱海运网络, 例如都乐公司、加农集团等, 均在不同国家设有多个产地, 通过冷藏集装箱海运网络销往全球.

温度控制和运输时间是评价冷链物流效率的两个重要指标. 冷藏集装箱可以有效控制温度, 且在合理时间内完成运输任务, 不仅可以满足货物供需平衡, 还能限制运输过程中的货物质量损失, 节约成本, 因此, 运输时间是货物贸易者设计运输方案时考虑的主要因素. 然而, 目前的冷藏集装箱海运还存在运输时间不达标、货物质量损失严重等问题. 因此, 在现有航线结构中, 如何根据货物的运输时间要求以及供需条件等为冷藏集装箱选择合理的运输路径和运量分配以达到总成本最小化, 成为货物贸易者最为关心的问题.

目前, 国内外学者针对集装箱海运网络优化设计等问题开展了大量研究. 张维英等^[1]设计了一种新的分解算法以解决集装箱船的全航线配载问题, 提高了优化模型的求解效率. 宋向群等^[2]研究了集装箱海运网络的费用最小流问题, 并设计了智能蚁群算法对模型进行求解. 计明军等^[3]考虑枢纽港船舶限制时间和支线船舶容量, 对集装箱船舶支线运输航线进行优化. Meng 等^[4-7]考虑中转运输和需求的不确定性以及空箱调运问题, 对短周期航运网络和集装箱运输路径进行优化设计, 并分析了不同航线对集装箱船燃油消耗的影响. Wang 等^[8-10]考虑货物在港时间的不确定性, 并以运输时间期限为主要约束对集装箱班轮航线网络进行优化设计. Zhang 等^[11]对海运交通和港口船舶的统计数据进行了分析, 得出了航季和航线的发展变迁情况, 指出具备散杂货和液体运输能力的航运公司更具市场吸引力. 王雁凤等^[12]考虑碳排放成本对港口轴辐式运输网络进行优化, 求解最优运量和运力配置. 林天倚等^[13]考虑集装箱港口拥堵情况, 建立轴辐式海运网络优化模型,

收稿日期: 2017-10-18; 修回日期: 2018-03-20.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51279026, 51309049); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(DUT17JC29).

作者简介: 王文渊(1984-), 女, 博士, 副教授, E-mail: wangwenyuan@dlut.edu.cn; 彭云*(1988-), 女, 博士, 讲师, E-mail: yun_peng@dlut.edu.cn.

以确定合理的枢纽港选择方案. Lam 等^[14]针对集装箱多式联运网络建立运输成本和运输时间的双目标优化模型,并引入碳排放约束求解最优运输方案. Plum 等^[15]设计了基于服务流的集装箱班轮运输网络以实现运输利润最大化.

现有研究多数以普通集装箱为研究对象,未考虑生鲜货物的易腐特性和时效要求对于运输方案的影响,尚需对现有模型进行细化,结合冷藏集装箱特点进行冷链运输方案优化.为此,本文在现有研究的基础上引入运输时间约束和货物质量损失成本,以总成本最小为目标,建立冷藏集装箱海运网络优化模型,确定在不同供需情况和运输时间约束下的冷藏集装箱运输路径和运量分配,以期为货物贸易者制订运输方案提供理论参考,为港口冷链基础设施建设和航运企业的运输资源配置等问题解决提供借鉴.

1 问题描述

本文基于固定的集装箱航运网络和港口运营水平,考虑运输时间约束和货物质量损失的影响,研究冷藏集装箱的运输路径优化问题. 集装箱海运网络是一个涉及多个主体的复杂网络,其中船公司主要负责设计港口之间的航线并配置相应的集装箱船型,港口则主要负责集装箱的装卸和堆存,货主则需根据船公司的航线和自身的产销需求,设计集装箱的运输路径. 本文从货主的角度出发,在航运网络中的航线和港口运营水平固定的基础上,为每组 OD 之间的冷藏集装箱量设计最优运输方案. 货主需要根据产销需求,决定某一产地运输至某一销地的冷藏集装箱量,同时还要决策其运输路径. 运输路径可以是直达航线,也可以是由多条航线组合而成. 如图 1 所示,航线 1 为港口 1 和港口 2 之间的常规运营航线,航线 2 为港口 2、港口 3 和港口 4 之间的常规运营航线,则由港口 1 至港口 3 的冷藏集装箱运输路径将由两段航线组成,并在港口 2 由航线 1 中转至航线 2. 货主当然希望在满足所有供需要求的前提下,实现总运输成本最小.

与普通集装箱不同,冷藏集装箱在运输过程中会产生货物质量损失,并带来相应的损失成本. 货物质量损失主要与运输时间有关,对于直达运输来说,运输时间为航线中的船舶航行时间,对于

需要中转的运输来说,运输时间还包括冷藏集装箱在中转港的堆存时间,总运输时间越长,则货物质量损失也越高. 因此,为控制货物质量损失,货主对于每一组 OD 设有明确的运输时间约束,所设计的运输路径必须满足运输时间要求,这也导致了任一组 OD 之间的运输路径设计会对其他组 OD 产生影响,进而增加了问题的复杂性. 此外,冷藏集装箱需要在集装箱船的专用箱位进行运输,并且在抵达港口后进入专用堆场存放,因此各个航线的冷藏集装箱运力和港口的冷藏集装箱通过能力也是设计冷藏集装箱运输路径时需要考虑的关键问题.

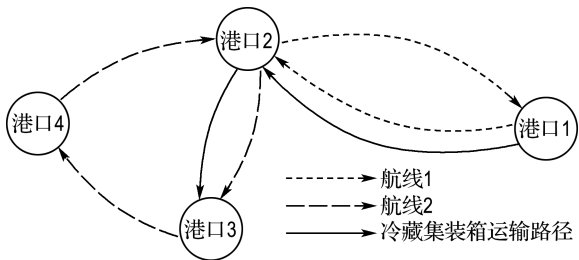


图 1 冷藏集装箱海运网络示意图
Fig. 1 Sketch map of refrigerated container shipping network

2 模型构建与求解

2.1 基本假设

- (1)冷藏集装箱在运输过程中至多中转两次.
- (2)模型中所有的冷藏集装箱均为重箱,不考虑空箱或租赁箱的影响.
- (3)单个冷藏集装箱的货物质量损失按箱内所有货物的平均质量损失计算.

2.2 变量与参数定义

- 2.2.1 参数设置 模型的基本参数定义见表 1.
- 2.2.2 决策变量 模型的决策变量定义见表 2.

2.3 模型建立

以冷藏集装箱运输成本、货物质量损失成本、装卸成本以及堆存成本总和最小为目标,以运输时间、节点通过能力和各弧运力为约束条件,建立优化模型:

$$\min Z = C_t + C_l + C_h + C_s \tag{1}$$
$$C_t = \sum_{o \in O} \sum_{d \in D} \sum_{r \in R_{od}} \sum_{(i,j) \in A} \sum_{h \in H_{ij}} q_{od}^r y_{ij}^r x_{ij}^h C_{ij}^h \tag{2}$$

$$C_1 = \sum_{o \in O} \sum_{d \in D} \sum_{r \in R_{od}} q_{od}^r \psi \left[\sum_{(i,j) \in A} y_{ij}^r \sum_{h \in H_{ij}} x_{ij}^h t_{ij}^h + \sum_{\substack{(k,i),(i,j) \in A \\ h_1 \in H_{ki}, h_2 \in H_{ij}}} y_{ki}^r x_{ki}^{h_1} y_{ij}^r x_{ij}^{h_2} t_i^{h_1, h_2} \right] P \quad (3)$$

$$C_h = \sum_{o \in O} \sum_{d \in D} \sum_{r \in R_{od}} \sum_{(i,j) \in A} q_{od}^r y_{ij}^r (Z_i + Z_j) \quad (4)$$

表 1 参数定义

Tab. 1 Definition of each parameter

参数	定义
O	始发节点集合
T	中转节点集合
D	目的地节点集合
N	海运网络中全部节点的集合, $N = O \cup T \cup D$
A	海运网络中节点之间弧的集合, 对于任意 $(i, j) \in A$, 表示节点 i 和节点 j 之间的弧, 其中 $i, j \in N$
R_{od}	从始发节点 o 至目的地节点 d 可选择的冷藏集装箱运输路径集合, $o \in O, d \in D$
H_{ij}	节点 i 至节点 j 的弧上可选的航线集合, $(i, j) \in A$
G_o	始发节点 o 的冷藏集装箱供应量 (TEU), $o \in O$
G_d	目的地节点 d 的冷藏集装箱需求量 (TEU), $d \in D$
C_{ij}^h	从节点 i 至节点 j 选择航线 h 的单位运输成本 (元 / TEU), $(i, j) \in A, h \in H_{ij}$
t_{ij}^h	从节点 i 至节点 j 选择航线 h 的运输时间 (h), $(i, j) \in A, h \in H_{ij}$
T_{od}	冷藏集装箱从始发节点 o 至目的地节点 d 的规定运输时间 (h), $o \in O, d \in D$
ψ	折算成每小时的冷藏集装箱运输过程中货物质量损失比例
Z_i	冷藏集装箱在节点 i 的装卸成本 (元 / TEU), $i \in N$
B_i	冷藏集装箱在节点 i 的堆存成本 (元 / (TEU · h)), $i \in N$
$t_{i_1}^{h_1, h_2}$	冷藏集装箱在节点 i 由航线 h_1 中转至航线 h_2 产生的在港停留时间 (h), $i \in N$
L_i	运输周期内节点 i 的冷藏集装箱通过能力 (TEU), $i \in N$
P	冷藏集装箱货物价值 (元 / TEU)
L_{ij}^h	节点 i 至节点 j 的弧上航线 h 的冷藏集装箱运力 (TEU), $(i, j) \in A, h \in H_{ij}$

表 2 决策变量定义

Tab. 2 Definition of decision variable

变量	定义
q_{od}^r	经过运输路径 r 从始发节点 o 运输至目的地节点 d 的冷藏集装箱运量 (TEU), $o \in O, d \in D, r \in R_{od}$
y_{ij}^r	运输路径选择变量, 若运输路径 r 包括节点 i 至节点 j 的弧, 则为 1, 否则为 0, $(i, j) \in A, r \in R_{od}$
x_{ij}^h	航线选择变量, 若从节点 i 至节点 j 选择航线 h 进行运输, 则为 1, 否则为 0, $(i, j) \in A, h \in H_{ij}$

$$C_s = \sum_{o \in O} \sum_{d \in D} \sum_{r \in R_{od}} \sum_{\substack{(k,i),(i,j) \in A \\ h_1 \in H_{ki}, h_2 \in H_{ij}}} q_{od}^r B_i \times y_{ki}^r x_{ki}^{h_1} y_{ij}^r x_{ij}^{h_2} t_i^{h_1, h_2} \quad (5)$$

$$\sum_{(i,j) \in A} y_{ij}^r \sum_{h \in H_{ij}} x_{ij}^h t_{ij}^h + \sum_{\substack{(k,i),(i,j) \in A \\ h_1 \in H_{ki}, h_2 \in H_{ij}}} y_{ki}^r x_{ki}^{h_1} y_{ij}^r x_{ij}^{h_2} t_i^{h_1, h_2} \leq T_{od}; \forall r \in R_{od} \quad (6)$$

$$\sum_{d \in D} \sum_{r \in R_{od}} q_{od}^r = G_o; \forall o \in O \quad (7)$$

$$\sum_{o \in O} \sum_{r \in R_{od}} q_{od}^r = G_d; \forall d \in D \quad (8)$$

$$\sum_{o \in O} \sum_{d \in D} \sum_{r \in R_{od}} \sum_{(i,j) \in A} q_{od}^r y_{ij}^r \leq L_i; \forall i \in N \quad (9)$$

$$\sum_{o \in O} G_o = \sum_{d \in D} G_d \quad (10)$$

$$1 \leq \sum_{(i,j) \in A} y_{ij}^r \leq 3; \forall r \in R_{od} \quad (11)$$

$$\sum_{o \in O} \sum_{d \in D} \sum_{r \in R_{od}} q_{od}^r y_{ij}^r x_{ij}^h \leq L_{ij}^h; \forall (i, j) \in A, h \in H_{ij} \quad (12)$$

$$q_{od}^r \geq 0; \forall o \in O, d \in D, r \in R_{od} \quad (13)$$

上述优化模型中式(1)为目标函数, 包括 4 项, 分别为冷藏集装箱运输总成本 C_t 、货物质量损失总成本 C_l 、装卸总成本 C_h 以及堆存总成本 C_s 。

式(6)~(13)为约束条件. 其中, 式(6)表示对于任一组 OD, 其选择的运输路径必须满足运输时间约束, 运输时间包括航线运输时间和中转时的在港停留时间; 式(7)表示对于始发港口, 冷藏集装箱总流出量等于供应量; 式(8)表示对于目的地港口, 冷藏集装箱总流入量等于需求量; 式(9)表示港口冷藏集装箱通过能力约束; 式(10)表示总供应量等于总需求量; 式(11)表示中转次数约束; 式(12)表示任一弧上的冷藏集装箱运量不得超过航线运力; 式(13)表示变量非零约束。

2.4 模型求解

冷藏集装箱海运网络优化模型的规模较为庞大, 各个港口节点之间互相影响, 港口节点数量的增加、港口通过能力的变化和港口吞吐量的变化均会对整体的网络产生影响, 进而影响模型的求解过程. 随着港口节点的增多, 问题处理规模呈现指数型增长的过程, 因此传统的线性方法难以完成求解, 需要根据模型特点设计相应的求解算法。

本文设计了一种改进的遗传算法来进行求解, 在基因编码时对可行域进行精简, 以提高寻优

效率. 首先,当冷藏集装箱海运网络中有 M 个产地和 N 个销地时,优化模型的一个可行解包含 MN 种组合,对于每一种组合,选择 8 位基因对其进行编码,各个基因的含义见图 2. 因此,优化模型的一个可行解含有 $8MN$ 个基因. 在生成基因时,采用随机生成的方式,先生成中转港,再生成两个港口之间的航线,最后生成运量. 若未生成中转港,则代表直达运输. 在基因生成完毕后,立刻计算各个产地至销地的运输时间和对应节点的冷藏集装箱通过量,对于不满足条件的组合剔除并重新生成. 随机生成若干个体作为初始种群,根据判断函数即网络运输总成本评价各个个体的适应度,并择优选择个体进行交叉和变异,在达到最大进化代数后输出最优解.

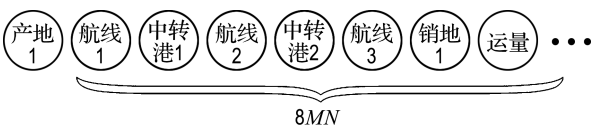


图 2 遗传算法编码示意图

Fig.2 Genetic algorithm coding schematic

- 求解算法的具体步骤如下：
- 步骤 1** 确定冷藏集装箱海运网络规模,输入参数,初始化可行域.
- 步骤 2** 染色体编码,确定产地和销地的组合,并在每组产地和销地之间随机生成中转港和运输航线以及运量.
- 步骤 3** 计算每组产地和销地之间对应的运输时间和各个节点的冷藏集装箱通过量,剔除不满足条件的基因段并重新生成,直至得到一组可行解.
- 步骤 4** 随机生成若干可行解,形成初始种群.
- 步骤 5** 根据判断函数计算种群中每个个体对应的适应度.
- 步骤 6** 选择适应度较好的个体进行交叉遗传.
- 步骤 7** 基因变异.
- 步骤 8** 判断是否达到最大进化代数,是则停止运算,输出最优解. 否则返回步骤 5.

3 实例分析

本文以我国进口东南亚各国的香蕉运输为实

例,选择 10 个主要的集装箱港口为港口节点集合,包括 4 个始发港口、4 个目的地港口和两个中转港口,并选择由全球大型航运企业经营的 24 条常规航线,构成冷藏集装箱海运网络,见图 3.

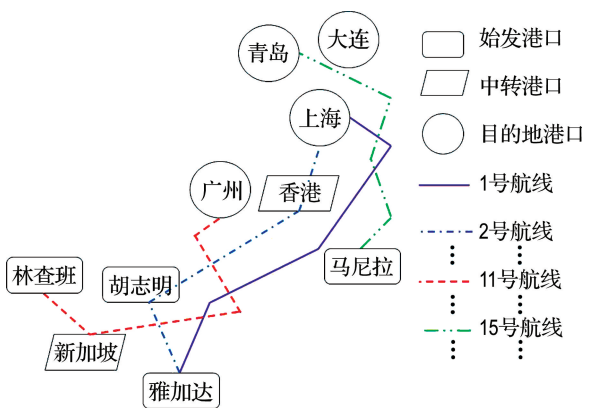


图 3 我国进口东南亚香蕉海运网络示意图

Fig.3 Sketch map of shipping network of China's import of banana from Southeast Asia

3.1 输入参数

根据我国进出口香蕉统计数据和各城市的水果市场季度报告,得出各始发港口的香蕉供应量和各目的地港口的香蕉需求量,折算成为对应的集装箱量,具体数据见表 3. 各航线的运输时间和运力根据航运公司的统计数据确定,如表 4 所示. 各 OD 对之间的运输时间约束取值见表 5.

表 3 各港口冷藏集装箱供需情况
Tab.3 Supply and demand of refrigerated container in each port

始发港口供应量/(10 ³ TEU)				目的地港口需求量/(10 ³ TEU)			
林查班	胡志明	雅加达	马尼拉	大连	上海	广州	青岛
2.4	1.3	1.6	8.0	5.5	4.0	2.0	1.8

表 4 各航线运输时间及运力情况
Tab.4 Transportation time and capacity of each route

航线编号	起点	终点	运输时间/d	运力/TEU
1	雅加达	上海	10	2 500
2	雅加达	上海	12	3 000
3	雅加达	大连	20	5 000
...	...	...	...	...
23	新加坡	广州	6	16 000
24	上海	大连	5	14 000

表 5 各 OD 对之间的运输时间约束
Tab. 5 Transportation time constraints between the OD pairs

始发港口	目的地港口	时间约束/d	始发港口	目的地港口	时间约束/d
林查班	大连	18	马尼拉	大连	15
林查班	广州	10	马尼拉	广州	7
林查班	上海	15	马尼拉	上海	8
林查班	青岛	16	马尼拉	青岛	10
雅加达	大连	16	胡志明	大连	14
雅加达	广州	13	胡志明	广州	7
雅加达	上海	15	胡志明	上海	10
雅加达	青岛	15	胡志明	青岛	12

3.2 结果分析

3.2.1 最优运输方案分析 采用 Java 语言编程实现算法,对优化模型进行求解,得出冷藏集装箱海运网络的最优运输方案,见表 6.

表 6 冷藏集装箱运输方案优化结果
Tab. 6 Optimization results of refrigerated container transportation scheme

始发港口	航线组合	目的地港口	运输时间/d	运量/TEU
林查班	13 号航线经上海中转至 24 号航线	大连	15	700
林查班	11 号航线直达	广州	5	1 700
雅加达	1 号航线经上海中转至 24 号航线	大连	15	1 600
马尼拉	14 号航线经香港中转至 3 号航线	大连	13	3 200
马尼拉	16 号航线直达	上海	5	3 000
马尼拉	15 号航线直达	青岛	6	1 800
胡志明	22 号航线直达	广州	4	300
胡志明	2 号航线直达	上海	8	1 000

分析表 6 结果,对于距离较近、运输时间较短

的 OD 对,如马尼拉至上海、胡志明至广州等,中转运输相较直达运输来说运输时间分别增长 60% 和 70% 以上,使得货物质量损失成本大幅增加,因此冷藏集装箱采用直达的方式运输. 对于距离较远的 OD 对,会采用中转运输的方式运输以实现规模经济效益. 马尼拉至上海的 16 号航线达到运力上限 3 000 TEU,这是由该航线所配置的集装箱船型所决定的,因此还需选择次最优路径即胡志明至上海的 2 号航线运输 1 000 TEU 的冷藏集装箱以满足上海港的需求. 船公司可以考虑为该航线配置更大规模的集装箱船,以吸引更多的冷藏集装箱量,进一步降低网络运输成本.

3.2.2 运输时间约束敏感性分析 选择 3 组典型 OD 对,改变运输时间约束,得到不同运输时间约束下的最优运输路径,见表 7.

分析表 7 结果,对于林查班至大连的最优运输路径,在运输时间约束为 12~14 d 时,中转运输方案不能满足要求,只能选择直达运输;在运输时间约束放宽到 15 d 及以上时,采用中转运输方案可以实现规模经济效益,相较直达运输可节约成本 10.5%. 对于雅加达至大连的最优运输路径,在运输时间约束为 15~16 d 时,直达航线不能满足要求,只能选择中转运输,这是由于直达航线挂靠港口过多,且配置船型较小,造成了运输时间不满足约束;当运输时间约束放宽到 17 d 及以上时,采用直达运输相较中转运输可节约成本 15%,这是由于该组 OD 对的运量较小,难以实现规模经济效益. 对于马尼拉至上海的运输路径,无论运输时间约束放宽到多少天,均采用直达运输的方式,这是由于该组 OD 对运输距离较短,中转运输相较直达可使运输时间增长 60%,成本增加 50%,故不采用中转运输. 3 组 OD 对的中转运

表 7 不同运输时间约束下的最优运输路径

Tab. 7 Optimal transportation path under different transportation time constraints

OD 对	运输时间约束/最优运输路径		
林查班—大连	0~12 d	12~14 d	15 d 及以上
	无路径	3 号航线直达	13 号航线中转至 24 号航线
雅加达—大连	0~15 d	15~16 d	17 d 及以上
	无路径	1 号航线中转至 24 号航线	3 号航线直达
马尼拉—上海	0~4 d	5 d 及以上	
	无路径	16 号航线直达	

输方案均为一次中转,这是由于二次中转相较一次中转运输时间平均可增加 50% 以上,进而造成了较大的货物质量损失,导致运输成本高于一次中转。综合来看,中转过程中的货物质量损失主要是由于冷藏集装箱在港口堆存期间产生的,港口可以通过加强温度控制和提高管理水平等方式,来降低货物质量损失,吸引更多的中转箱量。

4 结论与展望

(1) 对于长途运输,运输时间约束的变化对于路径选择影响较大,仅在满足运输时间约束时才能选择中转的方式进行运输以实现规模经济效益,否则只能选择直达运输。但也存在个别直达航线由于船型配置和挂靠港口数量,运输时间大于中转运输的情况。对于短途运输,最优运输路径均为直达运输,与运输时间约束无关,这是由于直达运输相较中转运输可使运输时间平均降低 35%,可节约运输成本达 10% 以上。

(2) 冷藏集装箱的货物质量损失是货主选择运输路径和中转港口时的重要考虑因素,因此港口可以通过优先装卸冷藏集装箱、配备冷藏集装箱专用集卡、优化冷藏集装箱堆场制冷效率等方式来降低冷藏集装箱在中转过程中的货物质量损失,以吸引更多的箱量。

(3) 算例中马尼拉至上海的直达航线出现了运力达到上限的情况,使得一部分箱量选择其他航线进行运输。航运公司在未来可以考虑为该航线配置更大型的集装箱船,以承担更多的运量,进一步降低海运网络的运输成本。

本文的研究成果可用于货主制订生鲜货物运输方案,也可以为港口冷链基础设施建设提供参考。但本文未考虑冷藏集装箱运输过程中的插电和人工维护成本,冷藏集装箱在港口的作业流程仍有待细化等。在未来应该对现有研究进行拓展和深入,如港口冷链作业系统、港口冷库建设以及冷链配送等问题都有待于进一步的研究。

参考文献:

[1] 张维英,林 焰,纪卓尚,等. 集装箱船全航线预配优化模型与算法研究[J]. 大连理工大学学报, 2008, 48(5):673-678.
ZHANG Weiyang, LIN Yan, JI Zhuoshang, *et al.*

Optimum model and algorithm of containership's pre-stowage planning in full routes [J]. **Journal of Dalian University of Technology**, 2008, 48(5):673-678. (in Chinese)

- [2] 宋向群,张 鹏,郭子坚. 基于蚁群算法的港口集装箱运输网络径流优化[J]. 大连理工大学学报, 2007, 47(6):853-857.
SONG Xiangqun, ZHANG Peng, GUO Zijian. Ant colonies optimization for containers transportation network system of seaports [J]. **Journal of Dalian University of Technology**, 2007, 47(6):853-857. (in Chinese)
- [3] 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.
JI Mingjun, CHEN Zhe, WANG Qingbin. Optimization algorithm of branch transportation route for container ship [J]. **Journal of Traffic and Transportation Engineering**, 2011, 11(4): 68-75. (in Chinese)
- [4] MENG Qiang, WANG Tingsong, WANG Shuaian. Short-term liner ship fleet planning with container transshipment and uncertain container shipment demand [J]. **European Journal of Operational Research**, 2012, 223(1):96-105.
- [5] ZHENG Jianfeng, MENG Qiang, SUN Zhuo. Liner hub-and-spoke shipping network design [J]. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, 2015, 75:32-48.
- [6] MENG Qiang, DU Yuquan, WANG Yadong. Shipping log data based container ship fuel efficiency modeling [J]. **Transportation Research Part B: Methodological**, 2016, 83:207-229.
- [7] MENG Qiang, WANG Shuaian. Liner shipping service network design with empty container repositioning [J]. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, 2011, 47(5): 695-708.
- [8] WANG Shuaian, MENG Qiang. Liner shipping network design with deadlines [J]. **Computers & Operations Research**, 2014, 41(1):140-149.
- [9] WANG Shuaian, MENG Qiang, SUN Zhuo. Container routing in liner shipping [J]. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, 2013, 49(1):1-7.
- [10] WANG Shuaian, MENG Qiang. Liner ship route schedule design with sea contingency time and port

- time uncertainty [J]. **Transportation Research Part B: Methodological**, 2012, **46**(5):615-633.
- [11] ZHANG Yiru, MENG Qiang, ZHANG Liye. Is the Northern Sea Route attractive to shipping companies? Some insights from recent ship traffic data [J]. **Marine Policy**, 2016, **73**:53-60.
- [12] 王雁凤, 黄有方. 考虑碳排放的港口群混合轴辐式运输网络优化[J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2014, **16**(5):42-50.
- WANG Yanfeng, HUANG Youfang. Optimization of hybrid hub-and-spoke based port cluster transportation network considering carbon emission [J]. **Journal of Beijing Institute of Technology (Social Sciences Edition)**, 2014, **16**(5): 42-50. (in Chinese)
- [13] 林天倚, 卢春霞. 基于拥堵控制的轴辐式海运网络枢纽港选择模型[J]. 上海海事大学学报, 2013, **34**(4):59-66.
- LIN Tianyi, LU Chunxia. Hub port selection model of hub-and-spoke shipping network considering congestion control [J]. **Journal of Shanghai Maritime University**, 2013, **34**(4): 59-66. (in Chinese)
- [14] LAM J S, GU Yimiao. A market-oriented approach for intermodal network optimization meeting cost, time and environmental requirements [J]. **International Journal of Production Economics**, 2016, **171**(2):266-274.
- [15] PLUM C E, PISINGER D, SIGURD M M. A service flow model for the liner shipping network design problem [J]. **European Journal of Operational Research**, 2014, **235**(2):378-386.

Optimization of refrigerated container shipping network considering transportation time constraint

WANG Wenyan, LI Shibo, PENG Yun*, SONG Xiangqun, MA Qianli

(School of Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Taking refrigerated container as the research object, the effect of perishable characteristics and aging requirements of fresh goods on the transportation plan of refrigerated containers is studied. With the aim of minimizing the total cost and transportation time as the main constraint, a refrigerated container shipping network optimization model is established to ensure the optimal transportation plan under different combinations of supply and demand and transportation time requirement. The example results show that for origin and destination (OD) with short distance, transportation time of transit transportation increases by more than 60% compared with direct transportation, while the transportation cost increases by more than 15%, so direct transportation is selected. For OD with long distance, transit transportation is the optimal plan, which can achieve economies of scale. The sensitivity analysis of transportation time constraints shows that short distance transportation is insensitive to the change of transportation time constraints, and the transportation cost of direct transportation can be reduced by more than 10% compared with transit transportation, so direct transportation is always chosen when the condition is satisfied. While long distance transportation is greatly influenced by transportation time constraints, only when the transportation time constraints are met can transit transportation be chosen, or it can only choose direct transportation.

Key words: refrigerated container; shipping network; transportation time; transportation path; ship route capacity