

考虑货主选择惯性的班轮运输系统优化模型^①

陈康, 徐鹏飞, 杨忠振*

(大连海事大学交通运输管理学院, 大连 116026)

摘要: 基于需求季节波动背景, 在考虑货主选择惯性的条件下, 以班轮公司收益最大为目标, 构建远洋集装箱运输系统优化模型, 优化航线网络结构、航线配船, 基于需求波动与货主选择惯性特征优化航线网络的调整方案与舱位配置. 基于遗传算法提出一种遗传线性规划混合算法. 计算结果表明, 优化模型能够在考虑运输服务稳定性的要求下, 优化班轮运输系统, 在提高班轮公司收益的同时, 提升货主的服务体验. 最后通过分析计算结果, 证明了模型的实际意义与可靠性.

关键词: 集装箱运输; 需求波动; 货主选择惯性; 网络优化

中图分类号: U491.14 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9807(2017)07-0104-11

0 引言

远洋集装箱运输系统(container ocean-transportation system, COS), 也称干线班轮运输系统, 是由若干大型集装箱船舶在确定的港口间, 按照固定的靠泊顺序, 做周期运行而形成的抽象运输服务系统^[1]. 优秀的 COS 可显著降低系统班轮公司(系统经营人)运营风险、提升航线收益, 为货主节约成本. 不良的 COS 可能导致班轮公司竞争能力下降, 出现亏损、甚至倒闭. 因此, COS 优化设计问题(container ocean-transportation system design problem, COSDP) 始终是产业界和学界关注的热点^[2].

在处理 COSDP 时, 有两个因素不可忽视. 其一为货运需求的季节性波动. 以泛大西洋航线为例, 3月—8月为市场淡季, 货运需求不足, 货运价格低; 12月—次年2月为市场旺季, 货运需求量大, 货运价格高; 9月—11月为过渡阶段^[3], 此时货运需求与货运价格处于中等水平. 为应对这种波动, 班轮公司通常每隔3月—6个月就调整一

次 COS^[4]. 第二个因素为货主的选择惯性. 在外界环境相对稳定的条件下, 选择惯性将引导货主与某班轮公司保持稳定的合作关系^[5,6]. 选择惯性的影响具体表现为, 当班轮公司能够提供稳定的服务时, 货主对班轮公司的选择呈显著的“确定效应”^[7,8], 此时货主对于所选择的班轮公司具有极高的忠诚度, 即使出现更优秀的班轮公司, 货主也不会改变选择. 而当班轮公司的服务水平下降时, 货主则会迅速选择其他替代班轮公司, 且在一段时期内(通常为6月—12个月)不会再选择原班轮公司. 因此各大班轮公司在市场淡季宁可亏损也要确保服务稳定, 减少客户流失. 显然, 在设计 COS 时, 班轮公司除了要考虑挂靠港口、挂靠顺序等基本问题外, 还需要考虑如下问题: 1) 如何根据货运需求的季节性波动调节航运网络; 2) 是否有必要不计成本为全部货主提供持续而稳定的服务, 如无必要, 应如何对货主进行选择.

为了解决上述问题, 需要提出一种考虑货运需求季节波动与货主选择惯性的 COSDP 优化模

① 收稿日期: 2015-11-11; 修订日期: 2017-01-16.

基金项目: 国家自然科学基金青年资助项目(71402013); 教育部人文社会科学研究青年资助项目(14YJC630010); 国家自然科学基金重点资助项目(71431001); 中国博士后科学基金资助项目(2014M551064).

通讯作者: 杨忠振(1964—), 男, 辽宁凌海人, 教授. Email: yangzhongzhen@263.net

型,但回顾已有研究,发现相关文献相当有限.根据早期的研究^[9-11],COSDP由如下三个子问题构成,航线网络构建(SNDP)、船队设计与使用(FDUP)和船舶舱位分配(SDP).其中,SNDP主要研究靠泊港口选择、港口靠泊顺序设定等;FDUP主要探讨船舶类型选择、船舶数量设定以及船舶运作状态的优化等;SDP主要解决如何将有限的船舶舱位分派给各个港口. Shintani等^[12]指出,由于这些问题彼此相互关联、相互影响,因而应当在一个模型框架内解决.近年来很多学者在同时优化上述两个或三个子问题方面做出了各种尝试,提出了许多重要的结论和实用的方法.例如,Agarwal与Ergun^[13]基于时空网拓展提出了一个综合优化模型,同时考虑航线网络设计与船队规划问题. Meng与Wang^[14]基于用户均衡理论,提出了一种综合考虑多集装箱箱型调度与航线网络设计问题的混合整数优化模型.类似的研究还包括,Reinhardt与Pinsinger^[15]; Wang与Meng^[16]; Wang等^[17]; Liu等^[18]; 赵宇哲等^[19]; 李冰州^[20]. 由于这些研究多假设“货运需求固定且已知”,因此给出的方法并不适用于本文提出的问题.针对这个不足,Meng等^[21]展开了研究,提出的模型可在航运网络不变的假设下,根据货运需求波动,动态优化船舶舱位分配方案,计算出各港口间的重箱运量. Meng与Wang^[22]在此基础上做了进一步研究,将FDUP纳入考虑范畴,提出了新的优化模型,可以同时解决FDUP和船舶调度与配置的动态分配问题. Chen等^[23]提出了一种同时考虑SNDP和SDP的方法,但他们假设班轮公司在观测期内不会改变航线网络,也没有考虑货主选择惯性,因此该方法仍有可提高的空间.

基于已有的研究成果,本文提出考虑货主选择惯性与货运需求季节性波动的COSDP优化模型,在允许班轮公司调整航线网络、船舶运营状态、船舶舱位分配计划等参数的条件下,综合考虑SNDP、FDUP和SDP三个问题.为求解该模型,基于遗传算法框架开发了针对COSDP的启发式算法.最后,通过算例对上述模型和算法进行了实验验证,并对计算结果进行分析和讨论.本文提出的模型对于班轮运输企业应对市场波动,科学地构造航线网络和管理货主,提升航线运营收益,

具有参考价值.

1 问题描述

为刻画货运需求季节波动与货主选择惯性对COS的影响,本文对COSDP的三个子问题分别做了调整或简化,提出如下三个新的子问题:航线网络集设计问题(shipping network set design problem, SNDP-II)、考虑网络方案调整的船队规模设计问题(fleet size design problem with taking account of network modification, FSDP)以及考虑货运需求满足率因素的舱位分配问题(slots distribution problem with demand satisfaction rate factor, SDP-II).

1.1 SNDP-II

航线网络是COS的基础要件.本文规定班轮公司可以根据货运波动调整网络.因此,这里不仅需要考虑如何设计航线网络,还必须考虑如何调整航线网络.如果将航线网络的每一次调整都视为一个航线网络的“再设计”过程,便可将航线网络设计与调整联合优化问题视为一个班轮航线网络方案集的设计问题,简称网络集设计问题(SNDP-II),该问题的数学表述如下.

令自然数序列 $[1 \cdots N]$ 表示规划期,其中自然数 t 表示某时段, N 表示规划期总数.令集合 P 表示备选港口集, $G_t = (V_t, E_t)$ 表示 t 时段的航线网络方案.其中 $V_t (V_t \subseteq P)$ 和 E_t 分别表示方案的挂靠港口集和航段集.例如,设 t 时段航线网络方案为:干线航线为港1-港2-港3-港1,港4和港5为喂给港,他们分别与港1和港5相连.此时, V_t 为 $\{1, 2, 3, 4, 5\}$, E_t 为 $\{[1, 2], [2, 3], [3, 1], [1, 4], [4, 1], [3, 5], [5, 3]\}$,这里 $[i, j]$ 表示港口 i 至 j 的航段.另外,令 d_{ij} 表示某班轮公司在 t 时段可获得的由港口 i 至港口 j 的货运需求总量, $D_t = \{d_{ij}\}$ 表示该时段班轮公司可获得的总货运需求矩阵,并定义 $D := \{D_t | t = 1, \cdots, n\}$.基于上述定义,将SNDP-II描述为:在 D, P 已知的条件下,以观测期总收益最大为目标,优化设计航线网络方案集 $G = \{G_t | t = 1, \cdots, N, G_t = (V_t, E_t)\}$.在SNDP-II中决策变量为 $V_t (V_t \subseteq P)$ 和 E_t .

1.2 FSDP

假设船队由同一类船舶构成,且班轮公司无法在规划期内调整船队的构成,但可以改变船舶的运营状态(运营或封存).该假设符合班轮公司对集装箱船队的实际管理状况.另外,若船舶处于运营状态,则假定其在COS中的运营速度为常数,该数值与船舶的类型有关.基于上述假设,可将FSDP表述为,航线网络构建方案已知时,船队规模的决策问题.在各阶段航线网络和航速已知的情况下,COS所需的船舶数量可被简单的计算出来,因此FSDP实际上仅是航线网络集优化问题的衍生问题.另外,由于集装箱船的备选类型有限,船型选择可以通过枚举法解决,因此本文不考虑船型的优化选择问题.

1.3 SDP-II

为了考虑货主选择惯性因素,在传统的COS-*DP*中引入了一个新的决策变量——“运输需求满足率”(satisficing rate of transportation demand, SRTD).SRTD是指班轮公司在某个运输方向(即OD)上实际的运输量与货运需求总量的比值.具体的,若使用 x_{ij} 表示 t 时段内每周由港口 i 至 j 实际运输的TEU量,那么该公司在 t 时段内由港口 i 至 j 方向,用 (i, j) 表示的SRTD(用 s_{ij} 表示)便为 x_{ij}/d_{ij} .此外,令 s_{0ij} 为港口 i 至 j 方向上的SRTD初值.由于 x_{ij} 显然不大于 d_{ij} ,因此 s_{ij} 介于0-1之间.根据上文介绍的货主选择惯性及其影响,并基于李纯青等人的研究^[24],规定 s_{ij} 具有如下性质.

性质1 对于任意 t 与 (i, j) ,若班轮公司能够提供足够的运力,则 $t+1$ 阶段的 $s_{(t+1)ij}$ 保持不变,即

$$\text{if } x_{ij} = s_{ij}d_{ij}, s_{(t+1)ij} \leq s_{ij}, \quad (1)$$

性质2 若班轮公司在 t 时段内出于某种原因(例如,提高航线盈利或降低航线运营成本)放弃部分货运需求,导致SRTD下滑,且在观测期内无法恢复,即

$$\text{if } x_{ij} < s_{ij}d_{ij}, s_{(t+1)ij} \leq x_{ij}/d_{ij}, \quad (2)$$

性质1反映了货主(需求方)在班轮公司(供给方)能够提供稳定服务时的行为,即“不轻易的改变选择”,这主要是因为,人们对损失的规避程度往往大于对相同收益的偏好程度^[25],对于货主而言更换班轮公司的潜在风险大于其所获得的效

用.性质2则反映了货主(需求方)在班轮公司不能稳定服务时的行为,即迅速选择其他替代班轮公司,并形成新的稳定状态.至此SPD-II便可表述为,在货运需求 $D = \{D_t | D_t = \{d_{ij}\}\}$ 、航线网络集设计方案 $G = \{G_t | G_t = (V_t, E_t)\}$ 已知的条件下,以观测期总收益最大为目标,优化重箱运量 x_{ij} 、空箱运量 y_{ij} 以及运输需求满足率 s_{ij} .

1.4 子问题间的内在联系

SNPD-II, FSDP与SDP-II三者相互制约相互影响.如图1所示,一方面,解决SNPD-II是解决FSDP与优化SDP-II的基础,没有网络方案 G_t ,COS所需的船舶数量 sn 无法求出,港口间的合理重箱运量 x_{ij} 也无法得到.另一方面,FSDP与SDP-II对于SNPD-II具有反作用,因为船队规模 sn 、各港口间的重箱运输量 x_{ij} 是计算航线方案收益和运营成本的关键.此外,图1还表明决策变量 s_{ij} 、 x_{ij} 、 G_t 间存在链式关系,这种关系将各时段的航线网络方案关联起来,形成一个整体.显然,此时已无法孤立地讨论每一个 G_t 的优化问题,而必须提出一个优化模型,协同优化所有的 $G_t(t = 1 \dots N)$.

基于上述分析,本文构建了双层模型来解决考虑货运需求季节波动与货主选择惯性的COS优化设计问题,模型简称为COS Design Model (COSDM).图1给出了COSDM中,上下层子模型与SNPD-II, FSDP以及SDP-II之间的关系.具体的,上层子模型筛选最佳的航线网络方案集,并计算船队规模,优化依据由下层模型提供;下层子模型基于上层模型的筛选结果,以总收益最大(即各时期航线网络收益的总和)为目标,优化舱位分配方案和SRTD.

2 COSDM

除了上文已述的假设外,在COSDM中,还使用了如下假设:1)仅考虑20英尺标准集装箱;2)假设船舶在港作业时间均为12小时,不考虑货物装卸量与船舶在港时间内在关系;3)假设COS服务频率固定,为每周1班.基于以上所有假设和分析,对COSDM给出如下数学描述.

上层模型

$$\text{Max } w = \sum_{G_k \in \chi} \rho_k \times (r_k - g_k) \quad (3)$$

$$sn_{kt} = \lceil \sum_{[i,j] \in E_{kt}} (st_{kij} + pt_k) \times \frac{1}{7} \rceil \quad (4)$$

$$sn_{k0} = \sup\{sn_{kt} \mid t = 1, \dots, N\} \quad (5)$$

$$g_k = \sum_t T \cdot C_o \cdot sn_{kt} + \sum_t T \cdot C_p \cdot (sn_{k0} - sn_{kt}) \quad (6)$$

$$\sum_{G_k \in \chi} \rho_k = 1 \quad (7)$$

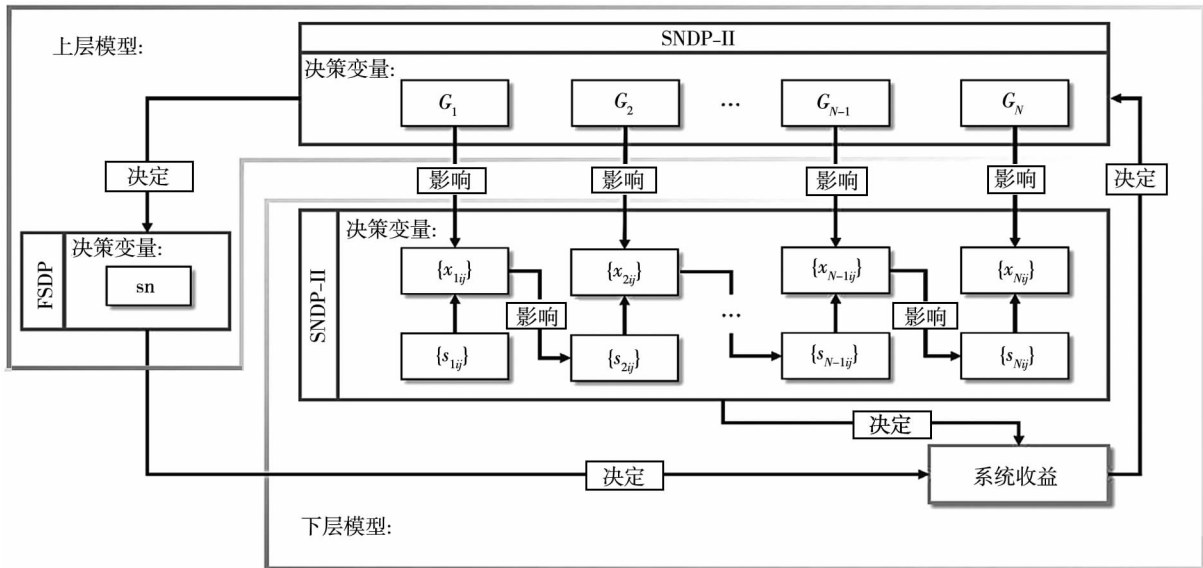


图 1 SNDP-II, FSDP 与 SDP-II 的内在联系

Fig. 1 The relationship between the upper and the lower model

式 (3) 为上层模型的目标函数, 其中 χ 为一个簇集, 表示观测期内全体可行的航线网络集的集合. χ 的元素为集合 $G_k = \{(G_{kt}, S_k) \mid t = 1 \dots N\}$ 这里 k 为网络方案集编号. G_{kt} 表示在 G_k 中时段 t 的航线网络方案, $G_{kt} = (V_{kt}, E_{kt})$, V_{kt} 与 E_{kt} 分别表示 G_{kt} 的靠泊港集与航段集. ρ_k 为 0-1 决策变量, 若 G_k 被选择采用, 则 ρ_k 取 1, 否则为 0. r_k 与 g_k 分别为 G_k 在观测期内的总货运收益与总船队支出, 这里 r_k 由下层模型得到, g_k 由式 (4) — 式 (7) 确定.

式 (4) 与式 (5) 用于计算航线网络方案集 G_k 所需配备船舶数量, 其中 sn_{kt} 和 sn_{k0} 分别表示网络方案 G_{kt} 与航线网络方案集 G_k 所需的船舶数量, $\lceil \cdot \rceil$ 表示向上取整函数. st_{kij} 表示采用 G_k 方案时由港口 i 至港口 j 的船舶航行时间; pt_k 表示在采用 G_k 时, 船舶在港停泊的总时间. 在给定航线方案 G_k 时, 可直接求得 st_{kij} 、 pt_k 与 sn_{kt} . 约束条件 (6) 用于计算方案 G_k 的船队运营成本, 其中 T 为观测时段的单位时长, C_o 与 C_p 分别表示单船日运营成本与封存成本. 约束条件 (7) 表示最终优化方案只能选出一个.

下层模型

Max

$$r_k = \sum_t \frac{T}{7} \sum_{ij} [(R_{ij} - C_{ij}^F) x_{kij} - C_{ij}^E y_{kij}] \quad (8)$$

$$\sum_{(i,j) \in SL_{kt}([i,j])} (x_{k\tilde{i}\tilde{j}} + y_{k\tilde{i}\tilde{j}}) \leq U_k \quad \forall t < N; \quad (9)$$

$$\sum_j (x_{kji} + y_{kji}) = \sum_j (x_{kij} + y_{kij}) \quad \forall i, t \quad (10)$$

$$x_{kij} - d_{ij} s_{kij} \leq 0 \quad \forall i, j, t \quad (11)$$

$$x_{kij} - d_{ij} s_{k(t+1)ij} \geq 0 \quad \forall i, j; \quad \forall t < N \quad (12)$$

$$x_{kij}, y_{kij} \geq 0, s_{kij} \leq s_{k0ij}$$

式 (8) 用于最大化 G_k 的货运收益 r_k . 其中, R_{ij} 表示 t 时段港口 i 至港口 j 的运输成本, x_{kij} 与 y_{kij} 分别 G_k 在 t 时段由港 i 至港 j 的周平均重箱和空箱运量, C_{ij}^F 与 C_{ij}^E 分别表示由港口 i 至港口 j 单位 TEU 重箱和空箱的装卸费用. 式 (8) 中, $\sum_{ij} [(R_{ij} - C_{ij}^F) x_{kij} - C_{ij}^E y_{kij}]$ 表示 G_k 在 t 时段的周平均收益. 式 (7) 表示在任意航段上货运量应小于船舶容量 U_k ; $SL_{kt}(\cdot)$ 映射满足如下定义, $SL_{kt}: [i,j] \rightarrow e_{[i,j]}^{kt}, [i,j] \in E_{kt}$. $[i,j]$ 表示网络方案 G_{kt} 的某航段; $e_{[i,j]}^{kt}$ 为若干运输方向 (OD 对儿) 构成的集合, 这些运输方向上的货物均有可能使

用航段 $[i, j]$, 例如若某 G_{kt} 为港 1 → 港 2 → 港 3 → 港 1. 那么通过航段 $[1, 2]$ 的货物可能包括, 由港 1 至港 2、由港 1 至港 3 的货物、由港 3 至港 2 的货物, $e_{[1, 2]}^{kt} = \{(1, 2), (1, 3), (3, 2)\}$. 显然, 对于一个确定的 G_{kt} , 航段 $[i, j]$ 所对应的 $e_{[i, j]}^{kt}$ 是唯一的, 因此映射 $SL_{kt}(\cdot)$ 的定义合理.

式 (9) 与式 (10) 分别为航段运量约束与集装箱运量均衡约束, 其作用是确保航线网络中各航段的运量不超过运力以及港口的空箱需求平衡. 式 (11) 与式 (12) 等价于式 (1) 和式 (2). 这是因为, 式 (1) 和式 (2) 规定了对于任意不大于 $N-1$ 的时段 t , $x_{kij}/d_{ij} \geq x_{k(t+1)ij}/d_{(t+1)ij}$. 由约束式 (11), $x_{kij} - d_{ij}s_{kij} \leq 0$, $x_{k(t+1)ij} - d_{(t+1)ij}s_{k(t+1)ij} \leq 0$; 根据约束式 (12) 可知 $x_{kij} \geq d_{ij}s_{k(t+1)ij}$; 上述三式联立即可, 满足式 (1) 和式 (2) 的要求. 另外, 值得注意的是下层模型为线性规划问题, 在给定 G_k 的情况下不仅一定存在最优解, 且易于求解. 这意味着可以在 G_k 与航线网络最佳收益间构造一个映射, 即对于一个给定的航线网络结构集, 存在最优的重空箱运输方案和唯一最优收益值. 基于该思想提出如下的算法设计思路.

3 模型求解

COSDP 由多个 NP 难问题(多个网络设计问题)构成, 对此本文基于遗传结构开发了 COSDM 求解算法(ACOSP), 其计算流程为

步骤 1 生成初始种群. 其中, 每个体代表一个网络集设计方案(G_k);

步骤 2 基于 G_k , 求解下层模型(线性规划模型), 获得 G_k 的最大收益, 作为其适应度;

步骤 3 判断是否满足算法终止条件(种群平均适应度与最优适应度间的差异小于 1%), 若不满足, 执行步骤 4, 若满足停止计算;

步骤 4 执行交叉、变异操作, 而后返回步骤 2.

3.1 编码方法

在实践中, 人们通常将航线拆分为“去程”航线和“回程”航线, 而如何定义“去”与“回”则与船舶航行方向有关. 例如, 某亚欧航线“青岛 → 上海 → 菲尼克斯托 → 汉堡 → 上海 → 青岛”, 中国的

班轮公司通常将“青岛 → 上海 → 菲尼克斯托 → 汉堡”定义为去程航线, 而将“汉堡 → 上海 → 青岛”定义为回程航线. 基于此, ACOSP 的编码方法设计如下, 使用 cod_k 表示 G_k 对应的编码, 其由 N 组的子编码 scd_t^k 构成(如图 2 所示). 其中, scd_t^k 描述 t 时段的航线网络 G_{kt} . scd_t^k 由四个序列 seq_{it}^k ($i = 1, \dots, 4$) 组成, 其中 seq_{i1}^k 是一个由自然数 $1 \sim N$ 随机排列构成的序列, 表示某个港口排序; seq_{i2}^k, seq_{i3}^k 与 seq_{i4}^k 均为长度为 N 的 0-1 序列, 分别表示“去程”航线的挂靠港、“回程”的挂靠港以及支线港. 通过解码全部 scd_t^k , 便可获得航线网络方案集 G_k . scd_t^k 的解码方法如下, 设 $seq_{i1}^k = \{6, 1, 5, 2, 8, 3, 7, 4\}$, $seq_{i2}^k = \{1, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 0\}$, $seq_{i3}^k = \{1, 1, 1, 1, 0, 0, 1, 0\}$, $seq_{i4}^k = \{0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 1\}$.

解码步骤 1 确定“去程”航线. 首先根据 seq_{i2}^k 确定“去”航线的挂靠港. 在 seq_{i2}^k 中, 在序列的第一、第三、第四号和第七号位置的数值为 1, 表示编号为 1、3、4、7 的港口被选为去程航线的挂靠港口. 而后, 根据 seq_{i1}^k 确定“去程”航线的港口访问顺序. 在 seq_{i1}^k 中, 编号 1、3、4、7 港口的排列顺序为 1-3-7-4. 至此, 可知去程航线为“1 → 3 → 7 → 4”.

解码步骤 2 确定“回程”航线. 首先根据 seq_{i3}^k 确定“回程”航线的挂靠港. 在 seq_{i3}^k 中, 序列的第一、第二、第三、第四、第七号位置的数值为 1, 这表示编号 1、2、3、4、7 被选为“回程”航线的靠泊港. 而后, 基于 seq_{i1}^k 的逆序确定“回程”航线的港口访问顺序. 在 seq_{i1}^k 的逆序中, 编号 1、2、3、4、7 的排序为 4-7-3-2-1. 至此, 可知“回程”航线为“4 → 7 → 3 → 2 → 1”.

解码步骤 3 确定“支线”航线网络. 在序列 seq_{i4}^k 中, 第五和第八号位置的数值为 1, 这表示编号为 5 和 8 的港口被选做支线港. 而后, 基于成本最低原则确定分别这些支线港口与哪些干线港口链接. 在本例中, 干线挂靠港 1 与港 5 间的运输成本最低, 因此将港 1 与港 5 连接起来, 获得支线航线“1 ↔ 5”, 同理可获得支线航线“8 ↔ 4”.

3.2 交叉与变异操作

ACOSP 采用了两种交叉操作. 其一为个体间交叉操作. 如图 3a 所示, 该操作在父代编码 l

(cod_l) 的子编码 scd_l^l 与来自父代编码 k (cod_k) 的子编码 scd_k^k 间实施. 该操作包括四个环节, 1) 选用顺序交叉算子处理序列 seq_{i1}^l 与 seq_{i1}^k , 2-4) 采用单点交叉算子分别处理另外三组序列 (seq_{i2}^l 与 seq_{i2}^k , seq_{i3}^l 与 seq_{i3}^k , 以及 seq_{i4}^l 与 seq_{i4}^k). 第二种为个体内交叉操作. 如图 3b 所示, 该操作在两

个随机选出的同一父代中的子编码 scd_l^k 与 scd_l^k 间实施, 其操作过程与个体间交叉操作的完全相同. 采用内交叉操作的理由是, 在 COSDP 中, 同属于一个航线网络集的航线网络方案间存在联系 (如图 1 所示), 而内交叉操作则可以体现这种联系.

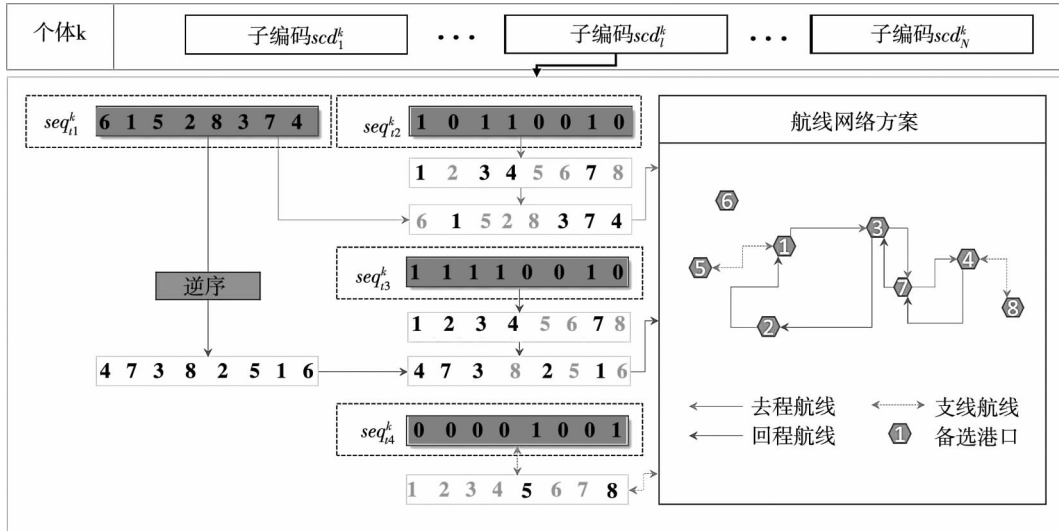


图 2 编码方法
Fig. 2 Coding method

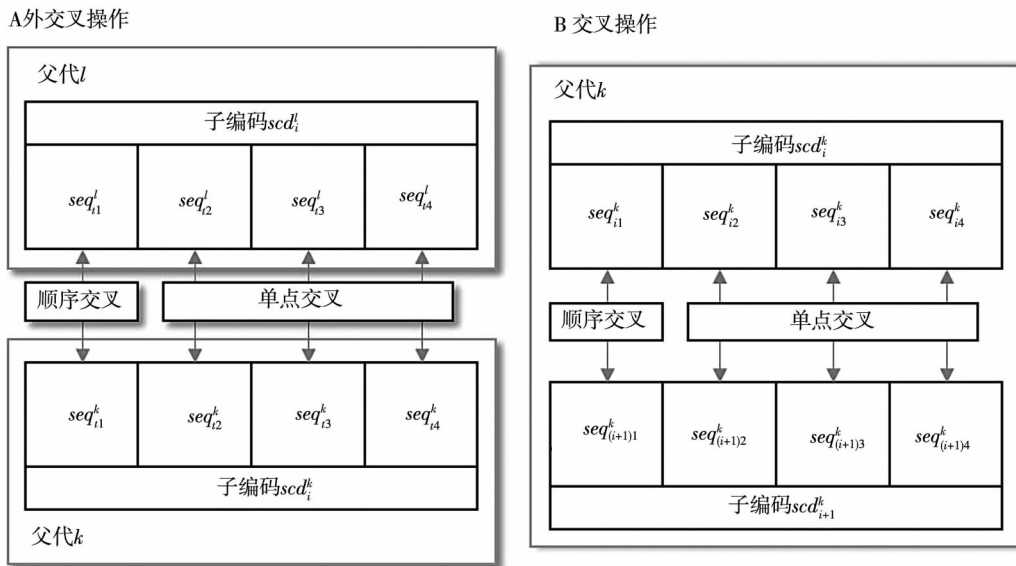


图 3 外交叉与内交叉方法
Fig. 3 Inter-individual crossover operator and inner-individual crossover operator

4 计算实验

4.1 实验数据与设定

备选港口为, 大连港 (1)、天津港 (2)、青岛港

(3)、上海港 (4)、香港 (5)、釜山港 (6)、北九州港 (7)、基隆港 (8)、勒阿弗尔 (9)、菲利克斯托 (10)、汉堡港 (11), 规划期 1 年, 分为三个时段, 时段 1 (Period1), 1 月—4 月 (市场淡旺季过渡时段), 时段 2 (Period2), 5 月—8 月 (市场淡季), 时段 3

(Period3) 9月—12月(市场旺季). 各港口间的货运需求数据源于我国某大型班轮运输企业2014年度的基础数据库. 运价数据源于同期公布的公开运价. 服务频率为每周1班. 关于船舶租金设定如下: 8 000TEU 船舶的日租金为 28 000 美金/天, 13 000TEU 船舶的日租金为 43 000 美金/天, 18 000TEU 船舶的日租金为 56 000 美金/天. 此时, 三类船舶的单位运输成本分别为每天 3.5 美金/TEU、3.31 美金/TEU 和 3.11 美金/TEU. 与船舶有关的其他参数(港口使费、船舶油耗等)采自于 Shintani^[12] 的研究. 在算法设定方面, ACOSP 的最大迭代次数设置为 200, 种群规模设置为 200, 内外交叉概率分别为 0.9 与 0.1, 变异概率为 0.02.

4.2 实验设计与结果分析

实验设定了三个情境, Scenario1 (S1) ——使用中型船舶(8 000TEU) 组建船队; Scenario2 (S2) ——使用大型船舶(13 000TEU) 组建船队; Scenario3 (S3) ——使用超大型船舶(18 000TEU) 组建船队. 针对各情境分别实施 10 次计算, 结果如表 1 所示(COS 的总收益值), 其中 SX-YY 表示在情景 X 下第 YY 次计算获得的航线网络集. 为了表述方便将 SX-YY 在 Period1、Period2 与 Period3 的航线网络方案分别记为 SXYYa、SXYYb 与

SXYYc. 下面, 分析各情境中收益最高的网络方案 S1-06、S2-01、S3-09.

图 4 给出了 S1-06、S2-01、S3-09 的网络结构信息与船队规模. 可以发现, 对于 Period1, 在东亚地区, 不同情境下的航线网络方案(S106a, S201a 和 S309a) 均采用了“单摆”结构, 即去程和回程航线的挂靠港存在交集. 例如, 网络 S106a 的区域 A 部分, 去程和回程航线均挂靠了基隆港(编号 8); 网络 S201a 的区域 B 部分, 去程和回程航线均挂靠了上海港(编号 4) 与基隆港(编号 8); 类似的情况也出现在网络 S309a 的区域 C 中. 采用“单摆”状结构虽会增加船舶靠泊港口次数, 但也能提升货物的周转速度, 提高船舶舱位的使用效率, 进而增强 COS 在不同港口间的运输能力.

与 Period1 相比, Period2 中的航线网络方案(S106b, S201b, S309b) 均有所简化, 网络更多的采用“轴辐式”结构. 例如 S106b 区域 D、E, S201b 区域 F 以及 S309b 区域 G、H、I. 该实验结果符合预期. 因为在市场淡季时段, 货运需求不足, 班轮公司为了保证服务稳定, 被迫亏损运营. 为了减少亏损, 班轮公司倾向于简化网络结构, 从而减少维持运营所需的船舶数量. 采用“轴辐式”结构, 封存部分船舶, 往往成为最好的选择.

表 1 计算结果汇总与分析对象筛选

Fig. 1 The calculation result and the selection of analysis objects

ID	COS 总收益/美元	ID	COS 总收益/美元	ID	COS 总收益/美元
S1-01	87 356 485	S2-01	181 451 946	S3-01	52 207 286
S1-02	84 168 405	S2-02	159 442 779	S3-02	33 552 32
S1-03	58 086 838	S2-03	158 985 774	S3-03	53 300 837
S1-04	71 853 846	S2-04	136 575 881	S3-04	50 360 779
S1-05	82 489 267	S2-05	174 553 053	S3-05	52 806 405
S1-06	87 429 002	S2-06	132 353 299	S3-06	51 750 008
S1-07	85 471 914	S2-07	174 902 834	S3-07	42 553 395
S1-08	72 940 003	S2-08	170 507 540	S3-08	45 460 055
S1-09	75 373 470	S2-09	157 288 934	S3-09	55 493 733
S1-10	68 330 387	S2-10	172 914 753	S3-10	45 363 127

在 Period3 阶段, 情境 1 与情境 2、3 的航线网络方案在结构方面有所差异. 在情境 1 中, 由于运力有限, 班轮公司只能将大部分舱位分配给需

求量更大、收益更高的中国至西欧的货物(此时中国—西欧方向的运输量占 COS 运输总量的 80% 以上). 这导致大量由日、韩至欧洲方向的货

物被放弃,船舶直接挂靠日韩港口已无必要.因此,航线网络 S106c 在东亚地区(区域 J)采用了“轴辐式”结构.然而在情境 2 与情境 3 中,由于使用了大型船舶,运力不足的问题得到解决.此时采用简洁的航线结构更为合理,航线网络便呈现出环状结构特征(如图 4 的 S201c 与 S309c).

在货运量与需求满足率方面,图 5 对比了各情境在不同时段中的服务能力.如图所示,随船舶运输能力提升,与服务能力有关的两个关键指标 OD-pair 数量(图 5.a)与周平均货运量(图 5.b)均有显著提升.图 6 分别给出网络方案集 S1-06、S2-01 与 S3-09 在各阶段、各方向上(OD-pair)的货运需求满足率状况,该图表明船舶运力的提升对于运输服务可靠性有明显的提升作用.具体而言,在采用方案 S1-06 时,观测期内班轮公司为 20 个 OD-pair 提供了持续可靠的运输服务(在观测期内该 OD 的 SRTD 始终不低于 90%),占 OD-pair

总数的 18.18%,为了方便,在下文中该数值被称为可靠服务 OD 比.在采用方案 S2-01 和方案 S3-09 时,可靠服务 OD 比分别为 28.93% 与 52.07%.这说明使用更大的船舶的网络可以为更多的 OD-pair 提供持续可靠的运输服务.由图 6 还能看到,在 Period1 阶段存在部分 OD-pair 的运输服务率不足 100% 的情况,这意味着班轮公司放弃了部分货物.例如在采用方案 S106 时,OD-pair(4,6)、OD-pair(2,6)以及 OD-pair(4,7)的 SRTD 均低于 80%.考虑到本文对 SRTD 变化性质的假设,这意味着本文提出的模型对货运需求满足率实施了优化,即对货主实施了某种程度的选择.在实践中,特别是在中国,班轮公司大多认为运输更多的货物即意味着获得更高的收益.然而实验结果表明,依据需求季节的波动,适当放弃部分货运需求对提高收益可能更有利.

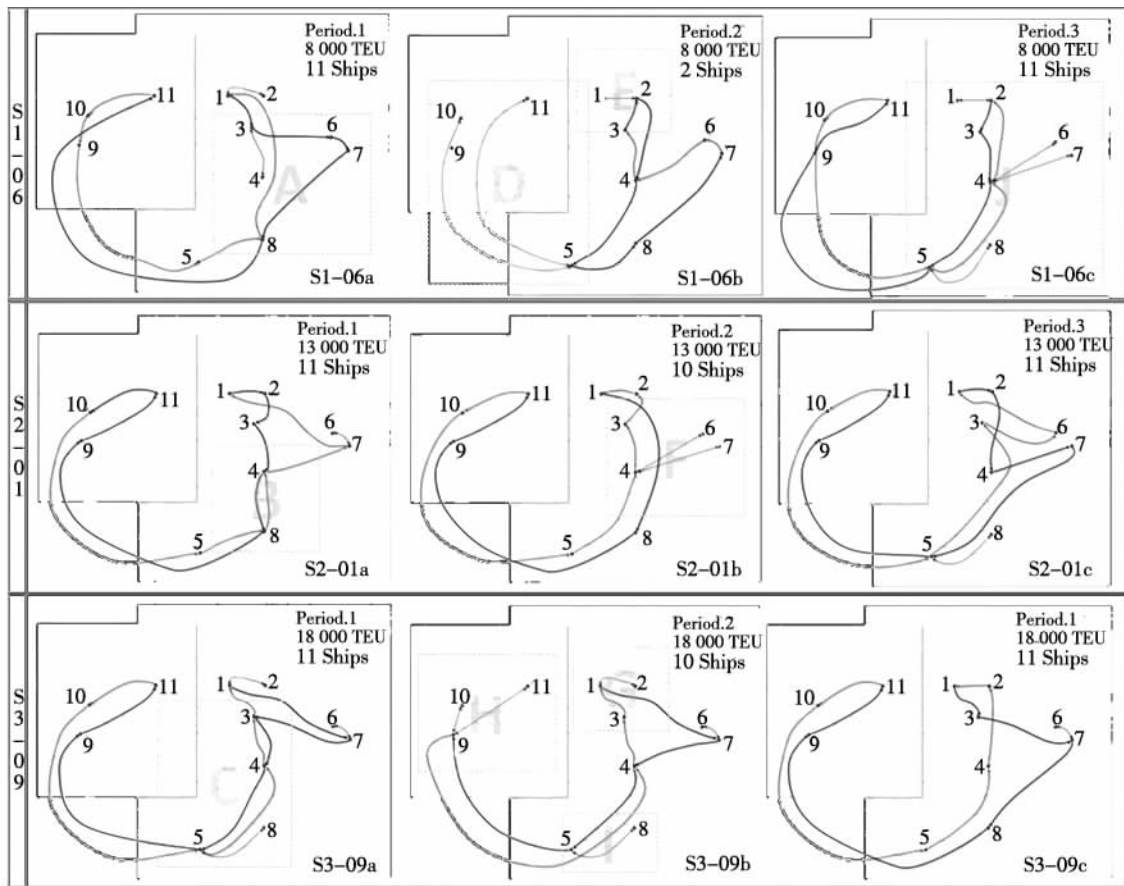


图 4 航线网络集优化方案

Fig. 4 The optimization of the shipping network sets

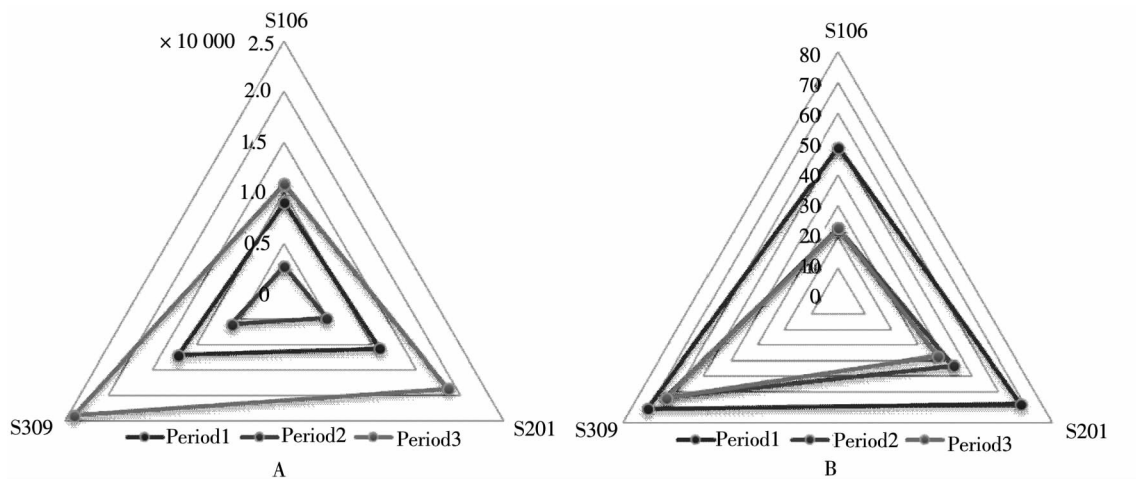


图5 不同阶段服务的OD数量和周平均货运量

Fig. 5 The number of served OD pairs and the amount of transport demand in different cases

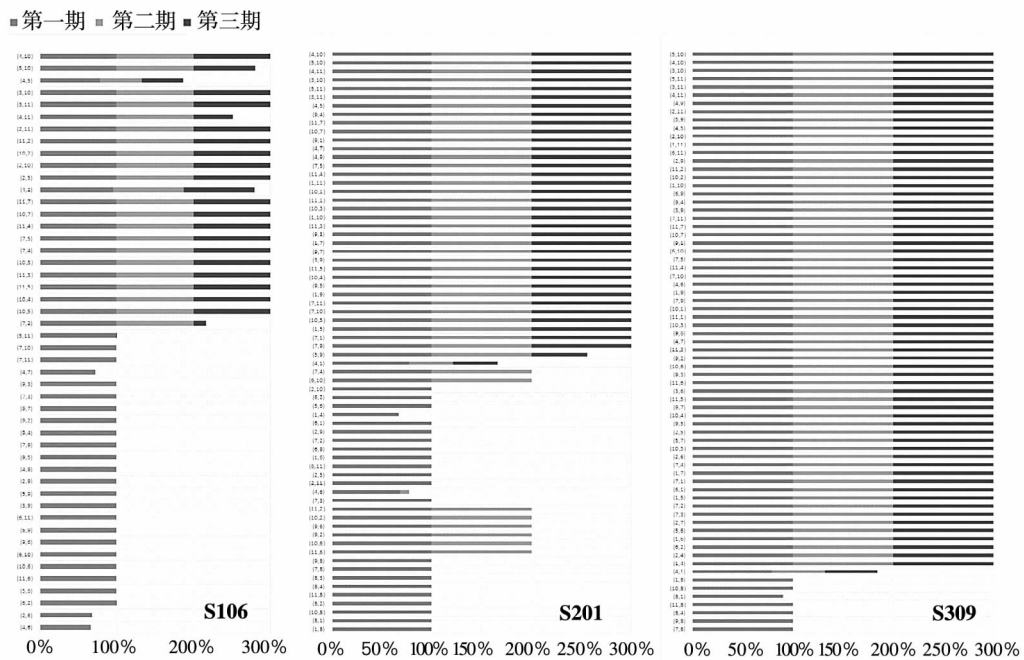


图6 SRTD分阶段状况示意图

Fig. 6 The value of SRTD in each period

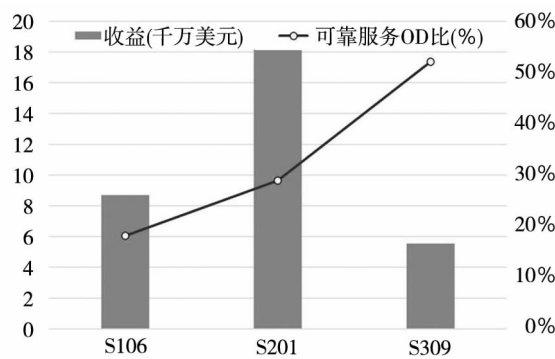


图7 S106、S201与S309航线收益与可靠服务OD比情况

Fig. 7 The service ability and revenue of S106, S201 and S309

最后, 本文从服务能力和盈利能力两个方面对 S106、S201 与 S309 进行比较分析. 图 7 展示了 S1-06、S2-01 与 S3-09 在可靠服务 OD 比与系统收益方面的差异. 可以发现, 方案 S106 的收入在三者中处于中等水平, 可靠服务 OD 比最低; 方案 S201 的收入最高, 可靠服务 OD 比处于中等水平; 方案 S309 的收入最低, 可靠服务 OD 比最高. 由图 7 可以看出, 大型船舶带来的收益显著高于超大型船舶. 超大型船舶在市场旺季虽然可以以较低的单位运输成本运输更多的货物, 但在淡季和淡旺季过渡阶段, 却会遇到运力过剩与日租金过高的问题, 导致航线系统的总收益下滑. 船舶越大, 航线在淡季面临的风险也会越大. 但是, 另一方面, 采用大型船舶却可以显著的提升航运系统服务的稳定性, 对于班轮公司提升服务品质, 占领市场份额具有重要作用. 基于上述分

析, 本文认为班轮公司积极推动船舶大型化的内在动因可能不仅限于追求规模经济和收益最大化, 可能还包括提高服务质量及增加市场占有率.

5 结束语

本文提出了一种新的 COS 优化模型 (COS-DM), 与传统模型的主要区别是考虑了需求波动与货主选择惯性的影响. 为求解该模型, 本文提出了一种基于遗传算法规则的启发式算法 (ACO-SP), 并通过实验验证了算法与模型的有效性. 此外, 通过分析实验结果, 本文从另外一个角度推测了集装箱船舶大型化的新理由, 即现实中班轮公司可能为了保持或提高 COS 服务的稳定性而采用更大的船舶, 该结论对分析 COS 演变具有一定参考价值.

参考文献:

- [1] Yang Z, Chen K, Notteboom T. Optimal design of container liner services: Interactions with the transport demand in ports [J]. *Maritime Economics & Logistics*, 2012, 14(4): 409-434.
- [2] 陈康, 杨忠振. 基于三方博弈的短途班轮航线优化模型 [J]. *交通运输工程学报*, 2011, 11(6): 74-81.
Chen Kang, Yang Zhongzhen. Optimization model of short-distance liner ship route based on tripartite game [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2012, 14(4): 409-434. (in Chinese)
- [3] 卜祥智, 许垒, 赵泉午. 考虑货主价格参照效应的海运运力合同定价策略 [J]. *管理科学学报*, 2012, 15(2): 28-36.
Bu Xiangzhi, Xu Lei, Zhao Quanwu. Study on marine shipping contract allocation and pricing policy under shipper's pricing reference effects [J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2012, 15(2): 28-36. (in Chinese)
- [4] Meng Q, Wang S. Liner shipping service network design with empty container repositioning [J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2011, 47(5): 695-708.
- [5] 杨忠振, 陆婧, 暴虹利. 市场培育期内机场巴士服务可靠性对机场市场份额的影响 [J]. *交通运输工程学报*, 2014, 1(1): 84-89.
Yang Zhongzhen, Lu Jing, Bao Hongli. Influence of airport coach service reliability on airport market share during market cultivation period [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2014, 1(1): 84-89. (in Chinese)
- [6] 杨慧, 宋华明, 周晶. 收益管理环境下乘客有限理性购票行为研究 [J]. *管理科学学报*, 2014, 17(6): 20-27.
Yang Hui, Song Huaming, Zhou Jing. Bounded-rationality purchasing behavior of passengers in revenue management situations [J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2014, 17(6): 20-27. (in Chinese)
- [7] Lu J, Yang Z, Timmermans H, et al. Optimization of airport bus timetable in cultivation period considering passenger dynamic airport choice under conditions of uncertainty [J]. *Transportation Research Part C Emerging Technologies*, 2016, 67: 15-30.
- [8] Tversky A, Kahneman D. Rational choice and the framing of decisions [J]. *Journal of Business*, 1986, 59(4): 251-278.
- [9] Meng Q, Wang S, Andersson H, et al. Containership routing and scheduling in liner shipping: Overview and future research directions [J]. *Transportation Science*, 2013, 48(2): 265-280.
- [10] 许利枝, 汪寿阳. 集装箱港口预测研究方法: 香港港实证研究 [J]. *管理科学学报*, 2015, 18(5): 46-56.
Xu Lizhi, Wang Shouyang. Analysis and forecasting methodology for container port: A case study of Hong Kong port [J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2015, 18(5): 46-56. (in Chinese)

- [11] Christiansen M, Fagerholt K, Nygreen B, et al. Ship routing and scheduling in the new millennium [J]. *European Journal of Operational Research*, 2013, 228(3): 467–483.
- [12] Shintani K, Imai A, Nishimura E, et al. The container shipping network design problem with empty container repositioning [J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2007, 43(1): 39–59.
- [13] Agarwal R, Ergun Ö. Ship scheduling and network design for cargo routing in liner shipping [J]. *Transportation Science*, 2008, 42(2): 175–196.
- [14] Meng Q, Wang X. Intermodal hub-and-spoke network design: Incorporating multiple stakeholders and multi-type containers [J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2011, 45(4): 724–742.
- [15] Reinhardt L B, Pisinger D. A branch and cut algorithm for the container shipping network design problem [J]. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 2012, 24(3): 349–374.
- [16] Wang S, Meng Q. Liner ship route schedule design with sea contingency time and port time uncertainty [J]. *Transport. Research. Part B Methodological*, 2012a, 46(5): 615–633.
- [17] Wang S, Meng Q, Bell M G. Liner ship route capacity utilization estimation with a bounded polyhedral container shipment demand pattern [J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2013, 47(1): 57–76.
- [18] Liu Z, Meng Q, Wang S, et al. Global intermodal liner shipping network design [J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2014, 61(1): 28–39.
- [19] 赵宇哲, 段浩, 匡海波. 考虑 CO₂ 排放的轴-辐式集装箱海运网络设计 [J]. *系统工程学报*, 2015, 30(3): 383–393.
Zhao Yuzhe, Duan Hao, Kuang Haibo. Hub-and-spoke container shipping network design based on CO₂ emissions [J]. *Journal of Systems Engineering*, 2015, 30(3): 383–393. (in Chinese)
- [20] 李冰州. 集装箱班轮二维收益管理在线动态定价策略 [J]. *管理科学学报*, 2012, 15(08): 34–49.
Li Bingzhou. Online dynamic pricing policy for two-dimensional revenue management of container liners [J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2012, 15(08): 34–49. (in Chinese)
- [21] Meng Q, Wang T, Wang S. 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.
- [22] Meng Q, Wang S. Liner ship fleet deployment with week-dependent container shipment demand [J]. *European Journal of Operational Research*, 2012, 222(2): 241–252.
- [23] Chen C, Zeng Q. Designing container shipping network under changing demand and freight rates [J]. *Transport*, 2010, 25(1): 46–57.
- [24] 李纯青, 赵平, 马军平. 零售业回报计划感知价值对客户忠诚的影响 [J]. *管理科学学报*, 2007, 10(4): 90–96.
Li Chunqing, Zhao Ping, Ma Junping. Impact of the value perception of the reward programs on customer loyalty [J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2007, 10(4): 90–96. (in Chinese)

Container shipping system design considering the shipper's choice inertia

CHEN Kang, XU Peng-fei, YANG Zhong-zhen*

Transportation Management College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China

Abstract: This paper introduces an optimization model (COSDM) of Container Ocean-transportation System with the objective of maximizing the profit of a liner company, while taking the seasonal changes of transportation demands and choice inertia of shippers into consideration. COSDM can optimize shipping network design and fleet deployment simultaneously. It also optimizes the plans for shipping network adjustment and for distrust slots in ships based on the fluctuant demand and the characteristics of the shippers' chosen inertia. To solve COSDM, a heuristic algorithm (ACOSP) is put forward by combining Genetic Algorithm and Linear Programming. The experimental results show that COSDM can give an optimized design of the system in consideration of the stability of transporting services. The proposed model also improves the user experiences of the shippers while increasing the profit of the liner company.

Key words: container shipping; demand changes; choice inertia; network optimization