

共享模式下港口群陆侧海铁协同空箱调运策略研究

徐华锋, 王育红, 洪 铖*

(宁波大学 海运学院, 浙江 宁波 315832)

摘要: 基于港口群经济腹地内的海铁联运“低碳”运输服务网络, 提出“共享模式”下的海铁协同集装箱空箱调运策略, 即港口群及其经济腹地范围内, 各铁路货运站资源及空箱资源均为共享的海铁协同空箱调运方案. 以满足港口空箱需求为目标, 构建空箱调运成本目标函数, 建立多周期混合整数规划模型, 对港口群范围内各港口间及港口与铁路货运站间的空箱资源配置方案进行优化; 并以长三角港口群及其腹地内铁路货运站为案例, 对模型进行求解. 结果显示, “共享模式”下的空箱调运方案能够为船公司节省超过 20%的空箱调运成本; 并且在港口群范围内, 以海铁协同作业对空箱资源进行全局优化配置的空箱调运策略可有效提高港口陆侧空箱周转率, 减少船公司空箱租赁量, 从而降低船公司总成本.

关键词: 空箱调运; 海铁联运; 协同; 港口群; 共享模式

中图分类号: U169.62

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2022) 03-0081-08

集装箱空箱调运是一项消耗人力、财力却不直接产生利润的运输活动. 我国集装箱空箱调运成本占承运人平均运营成本 20%以上^[1]. 在后“新冠疫情”时期, 由于国内外疫情防控及效果存在巨大差距, 我国出口贸易激增, 空箱需求空前旺盛. 因此, 在我国港口严重缺箱情况下, 如何提高港口陆侧现有空箱周转效率成了值得关注的问题. 与此同时, 传统内陆集装箱运输系统中, 陆侧的货运站与港口往往是一对一服务关系, 这种传统作业方式无法实时有效地匹配港口实际需求. 因此在多个邻近港口组成的港口群区域内, 有必要以港口群为服务范围, 对空箱进行统一优化配置.

当下的港口陆侧空箱调运多依赖于公路运输, 属于高排放、高污染的运输方式, 且容易造成道路拥堵, 降低公路运输效率, 从而进一步增加碳排放, 形成恶性循环. 目前, 大多数港口群陆侧腹地内都拥有相对完备的铁路运输基础设施, 各铁路货运站节点与各港口均可实现铁路连接且铁路运力充足, 完全具备转化部分公路运输需求的能力. 因此, 以铁路调运为思路, 港口群为服务对象, 对港口群

经济腹地内空箱进行统一优化配置可有效推动交通运输绿色低碳发展.

传统的集装箱空箱调运研究侧重于因贸易不平衡造成的洲际间集装箱始发港与目的港的空箱调运, 属于供给端与需求端的区域间空箱调运, 运输方式为单一海运. 因此, 相关研究主要集中于船队规划^[2]、航运网络设计^[3-4]、航线路径选择^[5]以及不同船公司间合作和联盟内共享空箱资源^[6-7]的空箱调运策略. 港口陆侧空箱调运研究主要涉及单一港口与其腹地区域内的空箱资源优化配置问题, 包括港口与内陆多堆场系统中堆场间空箱调运协同优化研究^[8], 港口腹地区域内铁路运输网络的空重箱流协调与转换研究^[9-10], 内陆集装箱场站选址问题^[11-12], 以及考虑了不同箱种和不同状态箱^[13-14]的使用问题. 在陆海协同空箱调运研究中, Xie 等^[15]研究了港口与铁路之间相互合作的空箱调运策略, 指出空箱共享与合作能给双方带来收益; 邢磊等^[16]着眼于中欧间海陆集装箱综合运输系统, 验证了海铁协同的方式能够有效降低空箱调运成本; Yu 等^[17]研究了由一个海运集装箱码头和一个内陆集

收稿日期: 2021-11-03.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journal.lg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 浙江省“钱江人才计划”D类资助项目(QJD1802022).

第一作者: 徐华锋(1996-), 男, 湖南郴州人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 集装箱运输优化. E-mail: huffie_xu@163.com

*通信作者: 洪铖(1990-), 男, 安徽泾县人, 博士/讲师, 主要研究方向: 供应链网络优化. E-mail: hongcheng@nbu.edu.cn

装箱场站组成的港口与内陆腹地之间的空箱调运问题,研究表明通过内陆空箱资源共享对港口进行补给可以有缓解港口空箱缺箱状况;Zhao 等^[18]将碳排放成本考虑在内,研究在海铁联运背景下随机需求和供给的变化对空箱调运的影响;蔡佳芯等^[19]将港口腹地划分为直接腹地和间接公共腹地,研究了公共腹地对港口群进行空箱补给策略,并证明公共腹地的空箱补给能够有效降低船公司空箱调运总成本。

综上所述,从运输方式的角度来看,目前集装箱空箱调运策略研究主要分为三种,一种是洲际间海上空箱调运,其次是区域内陆侧通过公路或铁路在港口腹地内对空箱资源进行配置优化,最后一种是区域内陆海协同的空箱调运策略研究。而在当前陆海协同的空箱调运策略研究中,大多数研究局限于单一港口与其腹地范围内进行空箱资源调配,少数针对港口群范围内空箱资源整合研究也仅限于公共腹地对多个港口进行空箱补给,其本质还是港口与其直接腹地的空箱服务。

因此,为了提高港口群陆侧经济腹地内的空箱周转效率,减少公路集卡运输空箱造成的道路拥堵和环境污染,有效降低船公司陆侧空箱调运成本,并助力低碳运输发展,本文以港口群及港口群陆侧腹地内所有铁路货运站为空箱物流节点,基于相对低碳的海铁联运服务网络,提出铁路货运站与空箱资源均为共享模式的空箱调运策略,对港口群范围内的空箱资源进行全局优化配置。最后以长三角港口群及其经济腹地为例,选取上海港、宁波舟山港及其经济腹地内的铁路集装箱货运站进行计算,验证模型方案的可行性。

1 问题描述

本文考虑在港口群及其经济腹地内,假设集装箱空箱及铁路货运站资源均为共享,通过相对低碳的铁路运输方式替代公路运输,探索海铁协同空箱调运策略问题。传统港口陆侧范围内的空箱调运策略是在经济腹地范围内的所有货运站只服务于所属港口。如图1所示,铁路货运站A1、A2处于港口A所覆盖的经济腹地内,传统模式中A港口腹地内的铁路货运站只对A港口进行空箱调运服务,对B港口和C港口不进行空箱调运服务;同

理,B1铁路货运站只对B港口进行空箱调运服务,C1、C2铁路货运站只对C港口进行空箱调运服务。

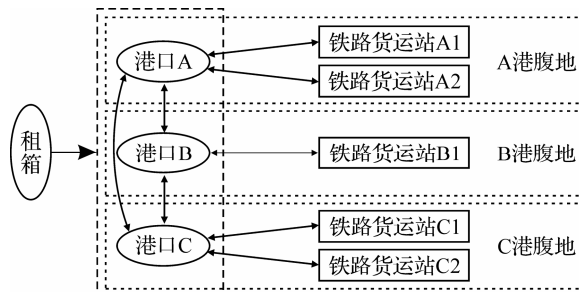


图1 “传统模式”集装箱运输服务网络

但在部分地区中,随着港口群区域一体化建设,整个港口群和其经济腹地内形成了一套完善的铁路交通运输网络,不同港口腹地内的货运站与各非所属港口之间均可实现货物运输。如图2所示,A、B、C港口组成一个港口群,港口群经济腹地范围内的铁路货运站与各个港口为互连状态,货运站A1、A2不仅可以对港口A进行空箱调运服务,还具备对港口B和港口C进行空箱调运服务的运输条件;同理,铁路货运站B1、C1、C2可同时对3个港口进行空箱调运服务。在该背景下,本文提出“共享模式”下的海铁协同空箱调运策略,并从船公司角度,研究多周期下船公司的空箱调运方案,其决策变量为港口群之间的空箱调运量、各港口与港口群范围内各铁路货运站之间的空箱调运量,以及当空箱调运量不能满足港口需求情况下港口的租箱量,通过寻找最优决策变量来降低船公司陆侧空箱运营成本。

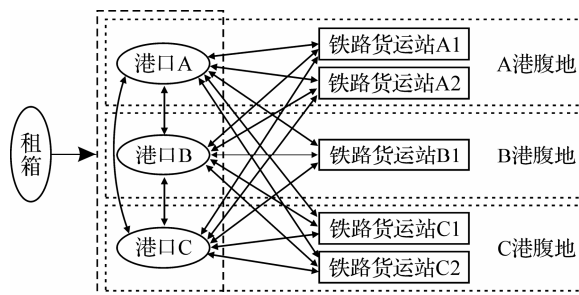


图2 “共享模式”集装箱运输服务网络

2 模型构建

2.1 前提假设

(1)上一周期运进港口的重箱作为本周期港口的空箱供给量,上期由港口运往内陆铁路货运站

的重箱作为本周期内陆铁路集装箱货运站的空箱供给量;

(2)每个铁路集装箱货运站可以服务于多个港口, 为多个港口提供空箱运输与堆存服务;

(3)空箱为共享资源;

(4)内陆运输方式为铁路运输;

(5)租箱只发生在港口, 租箱量没有限制, 所租箱本期內就可到达, 不考虑还箱;

(6)以 TEU 为集装箱计算标准;

(7)当前周期的空箱需求需在上一周期内完成空箱的调运;

(8)当前周期的结束时刻为当期的重箱发货时间点;

(9)空箱从始发地的装箱时间与空箱到港卸箱至装船的时间总和为 3 d;

(10)以 7 d 为 1 个周期.

2.2 符号说明

2.2.1 集合参数

T : 计划周期长度, $t \in T$;

P : 港口群集合, $i, j \in P$;

H : 内陆铁路集装箱货运站集合, $m, n \in H$.

2.2.2 成本参数

(1)调运成本. C_{ij} : 港口间的空箱单位调运成本, 单位: 元·(TEU·km)⁻¹; C_{mi} : 港口 $i \in P$ 与内陆铁路集装箱货运站 $m \in H$ 之间的空箱单位调运成本, 单位: 元·(TEU·km)⁻¹.

(2)堆存成本. $C_{s,i}$: 港口 $i \in P$ 的单位空箱储存成本, 单位: 元·(TEU·d)⁻¹; $C_{s,m}$: 内陆铁路集装箱货运站 $m \in H$ 的单位空箱储存成本, 单位: 元·(TEU·d)⁻¹.

(3)租箱成本. $C_{L,i}$: 港口 $i \in P$ 的单位租箱成本, 单位: 元·(TEU·d)⁻¹.

2.2.3 其他参数

$Q_{0,i}$: 港口 $i \in P$ 的初始空箱存量;

$Q_{0,m}$: 铁路集装箱货运站 $m \in H$ 的初始空箱存量;

$I_{t,i}$: t 周期内, 港口 $i \in P$ 的重箱输入量;

$O_{t,i}$: t 周期内, 港口 $i \in P$ 的重箱输出量, 即 t 时期内港口 $i \in P$ 的空箱需求量;

$O_{t,im}$: t 周期内, 港口 $i \in P$ 运往铁路集装箱货运站 $m \in H$ 的重箱数量;

$W_{\max,i}$: 港口 $i \in P$ 的最大集装箱堆存量;

$W_{\max,m}$: 铁路集装箱货运站 $m \in H$ 的最大集装箱堆存量;

$F_{t,ij}$: t 周期, 港口 $i, j \in P$ 直降的最大集装箱运输量;

$d_{1,ij}$: 港口 i 至港口 j 的航运距离;

$d_{2,ij}$: 货运站 m 至港口 i 的铁路行驶距离;

V_1 : 铁路运行速度;

V_2 : 集装箱船舶航行速度;

$t_{1,ij}$: 港口 i 至港口 j 的航行时间;

$t_{2,ij}$: 铁路集装箱货运站 m 至港口 i 航行时间;

T_a : 一次空箱调运过程中总的空箱装卸时间;

∂_{ij} : 值为 0、1 变量, 当 $E_{t,ij} > 0$ 时, $\partial_{ij} = 1$, 当 $E_{t,ij} = 0$ 时, $\partial_{ij} = 0$;

∂_{mi} : 值为 0、1 变量, 当 $E_{t,mi} > 0$ 时, $\partial_{mj} = 1$, 当 $E_{t,mi} = 0$ 时, $\partial_{mj} = 0$;

M : 无穷大的常数.

2.2.4 决策变量

$E_{t,ij}$: t 周期, 从港口 i 调运到港口 j 的空箱数量;

$L_{t,i}$: t 周期, 在港口 $i \in P$ 的租箱量;

$E_{t,mi}$: t 周期, 内陆铁路集装箱货运站 $m \in H$ 运往港口 $i \in P$ 的空箱数量.

2.2.5 其他变量

$Q_{t,i}$: t 周期, 港口 $i \in P$ 满足需求后港口剩余的空箱量;

$Q_{t,m}$: t 周期, 铁路集装箱货运站 $m \in H$ 满足需求后剩余的空箱量.

2.3 数学模型

根据集装箱班轮运输以周为发班频率的计数规则, 本文以 7 d 为一个周期来构建模型. 模型的目标函数为多周期内, 船公司的陆侧空箱总运营成本 C 最小. 目标函数包括四部分, 分别为港口间的空箱调运总成本 C_1 , 港口与铁路货运站间的空箱调运总成本 C_2 , 港口与铁路货运站的空箱堆存总成本 C_3 , 以及租箱总成本 C_4 .

目标函数:

$$\min C = C_1 + C_2 + C_3 + C_4. \quad (1)$$

港口间的调运成本:

$$C_1 = \sum_{t \in T} \sum_{i \in P} \sum_{j \in P} C_{ij} E_{t,ij} d_{1,ij}. \quad (2)$$

港口与铁路集装箱货运站之间的调运成本:

$$C_2 = \sum_{t \in T} \sum_{i \in P} \sum_{m \in P} C_{mj} E_{t,mj} d_{2,mi} . \quad (3)$$

港口与铁路集装箱货运站的堆存成本:

$$C_3 = \sum_{t \in T} \sum_{m \in H} Q_{t,m} C_{s,m} + \sum_{t \in T} \sum_{i \in P} Q_{t,i} C_{s,i} . \quad (4)$$

租箱成本:

$$C_4 = \sum_{t \in T} \sum_{i \in P} L_{t,i} C_{L,i} . \quad (5)$$

约束条件:

$$Q_{t,i} = Q_{t-1,i} + L_{t,i} + I_{t,i} - \sum_{m \in H} Q_{t-1,im} + \sum_{j \in P} E_{t-1,ij} + \sum_{m \in H} E_{t-1,im} - Q_{t,i} ,$$

$$I_{0,i} = 0, Q_{0,im} = 0, E_{0,ij} = 0, E_{0,im} = 0 , \quad (6)$$

$$Q_{t,m} = Q_{t-1,m} + \sum_{j \in P} Q_{t-1,im} - \sum_{j \in P} E_{t-1,mj} ,$$

$$Q_{0,im} = 0, E_{0,im} = 0 , \quad (7)$$

$$Q_{t,i} \geq 0 , \quad (8)$$

$$Q_{t,m} \geq 0 , \quad (9)$$

$$\sum_{j \in P} E_{t,ij} \leq Q_{t,i} , \quad (10)$$

$$\sum_{j \in P} E_{t,im} \leq Q_{t,m} , \quad (11)$$

$$Q_{t,i} \leq W_{\max,i} , \quad (12)$$

$$Q_{t,m} \leq W_{\max,m} , \quad (13)$$

$$E_{t,ij} \leq F_{t,ij} , \quad (14)$$

$$E_{t,ij}、L_{t,i}、E_{t,im} \text{ 为 } \geq 0 \text{ 的整数}, \quad (15)$$

$$t_{1,ij} = d_{1,ij} / V_1 , \quad (16)$$

$$t_{2,im} = d_{2,im} / V_2 , \quad (17)$$

$$t_{1,ij} \leq 2t - T_a + (1 - \delta_{ij})M , \quad (18)$$

$$t_{1,im} \leq 2t - T_a + (1 - \delta_{im})M . \quad (19)$$

约束条件中, 式(6)中 $Q_{t,i}$ 表示在 t 周期内港口 i 满足需求后的剩余空箱量, 其余为各项参数的初始值约束; 式(7)中 $Q_{t,m}$ 表示 t 周期集装箱铁路货运站 m 的剩余空箱量, 其余为各项参数的初始值约束; 式(8)、(9)表示港口 i 和铁路集装箱货运站 m 满足当前周期 t 的需求后剩余的空箱量 ≥ 0 ; 式(10)表示 t 周期港口 i 调运至港口 j 的空箱数量不超过港口在当前周期内的所有可用空箱量; 式(11)表示 t 周期货运站 m 调运至港口 i 的空箱数量不超过货运站 m 在当前周期内的所有可用空箱量; 式(12)、(13)分别表示在 t 周期内港口 i 和集装箱铁路货运站 m 在满足各自需求后, 所剩余的空箱量不超过其最

大集装箱堆存容量; 式(14)表示在 t 周期内的最大运输能力约束; 式(15)为非负约束; 式(16)、(17)为港口之间的船舶运输时间和货运站与港口之间的铁路运输时间; 式(18)、(19)为空箱运输时间约束.

3 算例分析

3.1 算例描述

长三角作为中国经济社会发展的重要引擎, 贡献了中国近四分之一的 GDP, 拥有全国集装箱吞吐量排名前两位的上海港和宁波舟山港. 根据《长三角洲地区交通运输更高质量一体化发展规划》(图 3), 长三角地区的各集装箱铁路货运站和各港口间均可通过铁路实现互连, 这为本文提出的港口群范围内所有铁路货运站可同时为港口群内任意港口提供空箱调运服务的研究思路提供了先决条件. 因此, 本文以长三角沿海港口群及其长三角地区的经济腹地为例, 选取宁波舟山港、上海港为港口节点; 对上海、江苏、浙江、安徽四省市组成的经济腹地内空箱调运策略进行案例分析.

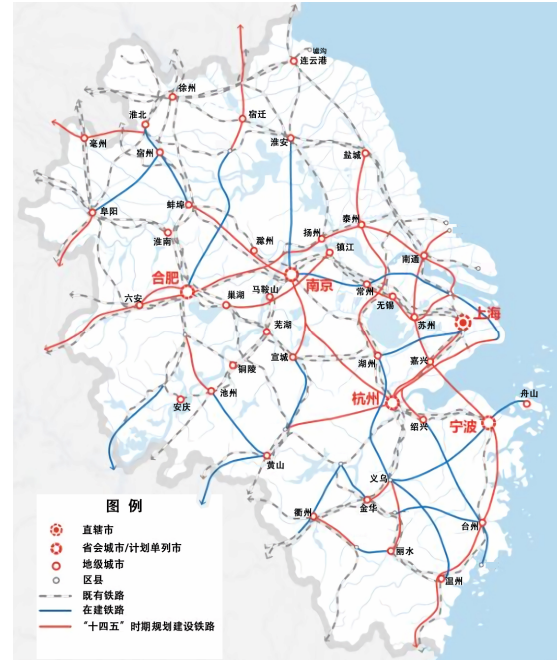


图3 长三角一体化交通规划图

根据各铁路货运站与宁波舟山港和上海港的海铁联运班列开行情况及铁路货运站等级, 选取的铁路货运站如图 4 所示. 其中各铁路货运站与港口的班次开行状态见表 1, 表中数值为 1 代表港口与铁路货运站有海铁联运开行服务, 反之则为 0.

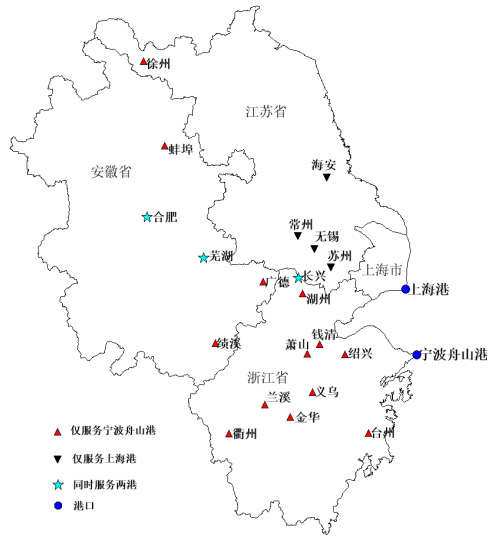


图4 上海港、宁波舟山港腹地内铁路货运站示意图

各铁路货运站与港口之间的周均海铁联运集装箱办理量见表2。各港口与各铁路货运站铁路运输距离见表3。上海港至宁波舟山港的海运距离为328 km, 各港口重箱输入量和重箱输出量见表4。

本文以5个发船周期进行计算, 每个周期为7 d。20英尺标准空箱的海上运输折算价格为0.5元·(TEU·km)⁻¹, 铁路运输为2.5元·(TEU·km)⁻¹, 空箱租赁价格为每周期4500元·TEU⁻¹, 港口及铁路货运站的集装箱堆存费为5元·(TEU·d)⁻¹, 铁路运行速度为100 km·h⁻¹, 集装箱船舶航行速度为27.78 km·h⁻¹。其中铁路货运站的重箱输入量及港口的重箱输入输出量分别设置为服从以表2和表4为均值的正态分布, 并用Python根据正态分布生成随机量。

表1 港口与铁路货运站间班次开行状态

港口	台州	衢州	义乌	绍兴	钱清	金华	萧山	湖州	长兴	兰溪
宁波舟山港	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
上海港	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
港口	合肥	芜湖	广德	绩溪	徐州	蚌埠	海安	苏州	常州	无锡
宁波舟山港	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
上海港	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1

表2 铁路货运站周均集装箱办理量

货运站	台州	衢州	义乌	绍兴	钱清	金华	萧山	湖州	长兴	兰溪
周均办理量	699	941	1 696	2 020	1 506	1 552	927	1 677	536	317
货运站	合肥	芜湖	广德	绩溪	徐州	蚌埠	海安	苏州	常州	无锡
周均办理量	689	517	173	345	168	125	1 004	996	1 024	476

注: 数据来源于《海铁联运简报》及调研统计数据。

表3 港口与铁路货运站间距离

港口	台州	衢州	义乌	绍兴	钱清	金华	萧山	湖州	长兴
宁波舟山港	201	451	317	161	200	365	205	275	286
上海港	591	523	393	349	338	438	337	368	388
港口	兰溪	合肥	芜湖	广德	绩溪	徐州	蚌埠	海安	
宁波舟山港	385	602	524	339	619	1044	880	601	
上海港	583	683	551	432	531	774	610	472	

表4 港口集装箱进出口情况

指标	上海港		宁波舟山港	
	2019年完成箱量	周均完成量	2019年完成箱量	周均完成量
重箱输入量	1 172	22.5	390	7.5
重箱输出量	1 847	35.4	975	18.7

注: 数据来源于《港口统计年鉴》。

3.2 计算结果分析

利用 MATLAB 2014a, 同时结合 CPLEX 12.6.3 对模型进行求解, 运用 Windows 10 操作系统的 i5-8250 CPU 处理器进行运算. 运行结果见表 5.

首先对总成本的组成结构进行分析. 根据表 5 可知, 在空箱运营的成本组成结构中, 租箱成本占比最高, 占总成本的 54.37%, 其次是港-站调运成本、港间调运成本和堆存成本, 平均占比分别为 32.51%、8.59% 和 4.53%. 据统计, 船公司的租箱成本约占集装箱运营成本的 50%^[4], 这与本文的租箱成本占比基本相符. 对于港间调运成本和港-站调运成本而言, 一般是港间调运成本要大于港-站调运成本^[3], 但本文结果却与此相反. 这是因为实际船公司在统计港间调运成本时, 包括了所有海内、外港口间的空箱调运, 而港间调运成本主要集中在洲际间空箱调运中. 国内空箱流动主要在陆侧, 各港之间的海上空箱调运量相对较少, 且运距较短, 因此当以上海港和宁波舟山港为例进行计算时, 其港间空箱调运成本占比要低于港-站调运成本, 最后堆存成本占比最小, 这是因为铁路货运站存在免费堆存期, 且由于我国整体缺箱, 空箱基本处于运营状态, 不会长期堆放.

各项成本变化情况如图 5 所示. 由图 5 可见, 相比于港口群内传统空箱调运作业模式, 共享模式下, 除港-站间的铁路运输成本有所增加外, 其余各项成本都有不同程度下降. 其中港间调运成本和租箱成本下降幅度最大, 降幅分别为 40.68% 和 30.67%, 下降额度分别为 50.84 万元和 207.45 万元. 在传统作业模式中, 港口经济腹地内的铁路货

运站只能为所属港口提供空箱补给服务, 无法为港口群内的其他缺箱港口提供陆侧空箱调运服务, 此时缺箱港口不得不通过更多的港间调箱, 甚至租箱来满足其空箱需求, 这便造成了租箱成本和港间调运成本的增加. 从另一方面来看, 共享模式下的空箱调运策略允许铁路货运站的空箱向任意港口调箱, 陆侧空箱运转更为流畅, 此举尽管会增加港-站调运成本, 但很大程度上减少了空箱的堆存时间, 从而减少了空箱堆存成本. 综上所述, 空箱铁路运输资源共享模式下的空箱调运策略能够为船公司节省 22.88% 的总成本, 证明该种调运策略的有效性.

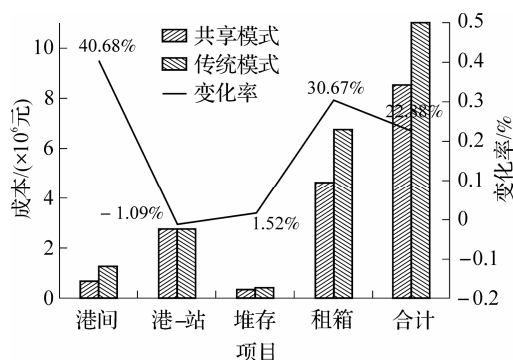


图 5 2 种模式下的空箱运营成本变化

最后对港口与铁路货运站班次开行状态变化进行分析, 求解出铁路开行方案. 由表 6 和图 6 可知, 开行方案发生变化的铁路货运站有钱清站、萧山站、湖州站、徐州站、蚌埠站和海安站. 资源共享模式下, 最初只服务于宁波舟山港的徐州站和蚌埠站不再与宁波港有空箱调运服务, 转而服务于上海港, 主要是与宁波舟山港相比, 徐州站和蚌

表 5 成本计算结果

项目	总成本	港间调运成本	港-站调运成本	堆存成本	租箱成本
共享模式/元	7 957 706	741 280	2 803 554	391 024	4 689 000
占比/%	100	8.59	32.51	4.53	54.37

表 6 “共享模式”下港口与铁路货运站间班次开行状态

港口	台州	衢州	义乌	绍兴	钱清	金华	萧山	湖州	长兴	兰溪
宁波舟山港	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
上海港	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0
港口	合肥	芜湖	广德	绩溪	徐州	蚌埠	海安	苏州	常州	无锡
宁波舟山港	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
上海港	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1

埠站与上海港的铁路运输距离至少缩短了 270 km, 具有较大运距优势, 且徐州站和蚌埠站的海铁联运集装箱运输量较少, 存储下来的空箱可被上海港完全消化; 钱清站、萧山站和湖州站在新的空箱调运策略下, 增设了与上海港的空箱调运服务, 最主要原因是这 3 个铁路货运站的海铁联运集装箱运输量较大, 拥有较多空箱存量, 且与宁波舟山港和上海港的铁路运输距离相差不大, 最大运距差仅为 138 km, 宁波舟山港不具有绝对的运距优势。同理, 海安站也是如此。

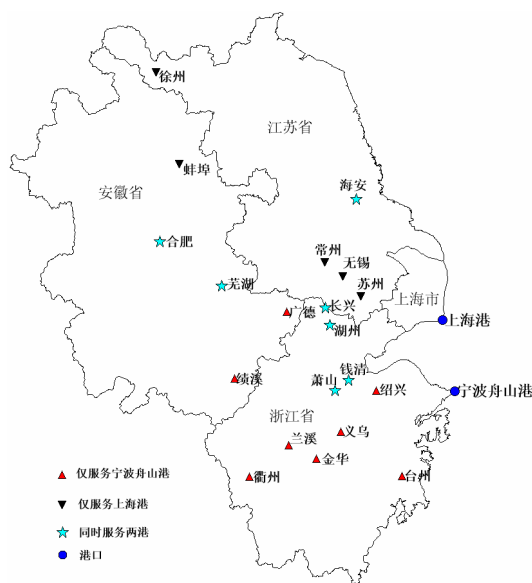


图6 “共享模式”下港口与铁路货运站班次开行状态

4 结论

本文首次提出共享模式下的港口群陆侧海铁协同空箱调运策略优化研究,即在港口群经济腹地范围内,海铁联运运输服务网络互联互通,且各铁路货运站及空箱资源均为共享状态下的海铁协同空箱调运策略。本研究突破了港口陆侧空箱调运传统作业模式下,港口腹地内的铁路货运站只对所属港口提供服务的限制,为船公司提供了一种新的空箱调运思路,使得对港口群陆侧空箱资源的优化配置更为合理。并且通过建立空箱调运的多周期混合整数规划模型,以长三角范围内的港口群为例,验证了该策略的可行性;案例计算结果显示,共享模式下海铁协同的空箱调运策略可为船公司减少 22.88% 的陆侧空箱运营成本。合理的内陆空箱资源配置对于满足港口空箱需求有着

至关重要的作用,因此对船公司和港口群内的各港口而言,通过共享港口群经济腹地内的铁路货运站和空箱,不仅最大程度地降低了港口群内的空箱调运成本,提升了空箱资源周转效率,更对进一步实现“公转铁”提供了全新思路。

参考文献:

- [1] 徐奇, 李娜, 靳志宏. 集装箱重空箱多周期联合调度优化研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2012, 12(1):145-152.
- [2] Song D P, Dong J X. Cargo routing and empty container repositioning in multiple shipping service routes[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2012, 46(10):1556-1575.
- [3] 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.
- [4] Imai A, Shintani K, Papadimitriou S. Multi-port vs. Hub-and-Spoke port calls by container ships[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2009, 45(5):740-757.
- [5] 李建, 韩晓龙. 考虑空箱调运的远洋班轮航线优化[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2016, 41(5):1449-1456.
- [6] 汪传旭, 陈飞燕. 船公司合作下基于多港口物流总成本最优的空箱调运[J]. 系统管理学报, 2016, 25(3):539-545.
- [7] 郭金鑫, 史立, 管明静. 战略联盟下的班轮公司集装箱联合调度问题[J]. 计算机仿真, 2018, 35(6):362-366; 389.
- [8] Dang Q V, Yun W Y, Kopfer H. Positioning empty containers under dependent demand process[J]. Computers & Industrial Engineering, 2012, 62(3):708-715.
- [9] 石红国, 高明瑶. 带时间窗约束的集装箱空箱调运随机机会约束模型研究[J]. 铁道运输与经济, 2020, 42(2): 87-92.
- [10] 段刚, 卢跃荣, 陈莉, 等. 不确定环境下铁路集装箱空箱调运优化研究[J]. 兰州交通大学学报, 2012, 31(6): 97-102.
- [11] Boile M, Theofanis S, Baveja A, et al. Regional repositioning of empty containers[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2008, 2066(1):31-40.
- [12] Lei T L, Church R L. Locating short-term empty-container storage facilities to support port operations: A user optimal approach[J]. Transportation Research Part E:

- Logistics and Transportation Review, 2011, 47(5):738-754.
- [13] 赵雅琦, 胡坚堃, 黄有方. 不确定环境下可折叠集装箱内陆空箱调运优化[J]. 上海海事大学学报, 2018, 39(2): 28-33; 49.
- [14] Hjortnaes T, Wiegman B, Negenborn R, et al. Minimizing cost of empty container repositioning in port hinterlands, while taking repair operations into account[J]. Journal of Transport Geography, 2017, 58:209-219.
- [15] Xie Y Y, Liang X Y, Ma L J. Empty container management and coordination in intermodal transport[J]. European Journal of Operational Research, 2017, 257(1): 223-232.
- [16] 邢磊, 杨珍花, 徐奇, 等. 海陆联运下的中欧班列集装箱空箱调运优化[J]. 大连海事大学学报, 2019, 45(2): 1-8.
- [17] Yu M Z, Fransoo J C, Lee C Y. Detention decisions for empty containers in the hinterland transportation system [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2018, 110:188-208.
- [18] Zhao Y, Xue Q W, Zhang X. Stochastic empty container repositioning problem with CO₂ emission considerations for an intermodal transportation system[J]. Sustainability, 2018, 10(11):4211-4234.
- [19] 蔡佳芯, 邢磊, 靳志宏. 腹地场站共享的区域港口群空箱调运优化[J]. 大连海事大学学报, 2020, 46(3):1-10.

A sharing mode based synergy of sea and rail for repositioning of inland empty containers within port clusters

XU Huafeng, WANG Yuhong, HONG Cheng*

(Faculty of Maritime and Transportation, Ningbo University, Ningbo 315832, China)

Abstract: Incorporating the sea-rail integrated transport service network with low carbon emission, the authors propose a sea-rail synergistic strategy for inland empty container repositioning by adopting the “sharing mode”. It assumes that, within the port cluster and its hinterland, all railway freight transport capacity and empty container resources can be shared upon requests. In order to meet the demand of empty container in ports, the objective function of empty container repositioning cost is defined, while a multi-period mixed integer programming model is established to optimize the allocation scheme of inland empty container resources among ports and port-station corridors. Through the examples given hereby in the ports and their corresponding hinterland railway freight stations in the Yangtze River Delta, the effectiveness of the model has been verified. The results show that, with the contribution of sea-rail synergistic strategy, the empty container repositioning cost in the “sharing mode” can be saved by more than 20% of the initial one for the shipping companies. Research findings suggest that, based on the proposed sharing mode, the optimized resource allocation of inland empty container and rail freight transport capacity will not only improve the turnaround efficiency and reduce its repositioning cost, but also prove to be a great facilitation of modal shift from road to rail.

Key words: empty container repositioning; sea-rail intermodal transport; synergy; port cluster; sharing mode

(责任编辑 章践立)