

文章编号: 1672-4747 (2020) 02-0068-07

基于海铁联运的港口集装箱运输集卡路径选择

户佐安^{1,2}, 孙燕¹, 薛锋^{1,2}

(1. 西南交通大学, 交通运输与物流学院, 成都 611756;

2. 综合交通大数据应用技术国家工程实验室, 成都 611756)

摘要: 为提高集装箱海铁联运在港换装转运的作业效率, 对有铁路专用线引入的集装箱码头集卡路径规划问题进行了研究。分析铁路线进港后的码头集卡作业模式, 以集卡完成运输总时间最短为目标, 建立了带集装箱运输时间窗约束的线性整数规划模型, 并求解了集卡在铁路装卸线、港口堆场、码头泊位三处任务节点的作业路径规划问题。最后以集装箱码头混合作业为例, 设计相关算例, 利用 CPLEX12.0 对模型进行求解, 得到有铁路线引入的港口内集卡作业路径选择结果, 验证模型具有较好的可行性。

关键词: 海铁联运; 内集卡路径; 线性整数规划

中图分类号: U169.6

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1672-4747.2020.02.008

Path Planning of Container Trucks in Ports Based on Sea-rail Transport

HU Zuo-an^{1,2}, SUN Yan¹, XUE Feng^{1,2}

(1. School of Transportation and Logistics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China;

2. National Engineering Laboratory of Integrated Transportation Big Data Application Technology, Chengdu 611756, China)

Abstract: The path planning problems of container trucks for container terminals with railway lines is investigated to improve the operational efficiency of containers during sea-rail transport reloading and transshipment in ports. In this study, the operational modes of container trucks in a port with railway lines is initially analyzed. Subsequently, a linear overall planning model considering the container transportation time window constraints was established to minimize the total transportation time of container trucks. The model can be used to plan a container truck's work path among three loading points: the railway line, port yard, and dock berth. Finally, an experimental example of the mixed operation environment of a container terminal was designed and solved using CPLEX12.0, and the results demonstrate that the model is feasible.

Key words: sea-rail transport; container truck path; linear integer programming

0 引言

海铁联运的运输效率不仅受各种运输方式的

影响,更取决于运输方式之间的衔接效率。集卡作为集装箱在港口进行换装转运的主要水平运输工具,其工作效率极大地影响了集装箱海铁联

收稿日期: 2019-11-18

基金项目: 中国铁路总公司科技研究开发计划重大项目 (2018X003)

作者简介: 户佐安 (1979—), 男, 湖北黄梅人, 副教授, 硕士生导师, 研究方向: 运输组织理论及系统优化, E-mail: huzuoan@home.swjtu.edu.cn

通信作者: 薛锋 (1981—) 男, 山东邹城人, 副教授, 硕士生导师, 研究方向: 运输组织理论及系统优化, E-mail: xuefeng.7@163.com

引文格式: 户佐安, 孙燕, 薛锋. 基于海铁联运的港口集装箱运输集卡路径选择[J]. 交通运输工程与信息学报, 2020, 18(2): 68-74.

运作业。但由于海铁联运基础设施匹配不够,联运实现无缝衔接较差。基于此,2019年9月,国家发改委联合交通运输部、国家铁路局等提出《关于加快推进铁路专用线建设的指导意见》^[1],意见指出在充分利用既有铁路设施基础上,加快铁路专用线建设,打通铁路运输“最后一公里”,提高港口的铁路专用线接入比例。集装箱码头集卡的运输路径也将由泊位—堆场演变为泊位—码头堆场—联运堆场,从而产生新的、复杂的集卡混合作业模式。因此,综合考虑铁路和港口及船公司的运输计划要求,对受作业模式变动影响的港口集卡路径进行规划成为海铁联运亟待解决的新问题。

关于集卡路径问题,国内外不少专家学者针对其在铁路运输、港口转运及公路运输中的作业模式进行过单方面或多种复杂条件下的路径选择、优化研究。对于港口集卡作业路径的优化研究,文献[2]基于时空网络下的港口集卡作业路径分析,建立以总运行成本最小为目标的路径优化模型;文献[3-5]分别以最小化集装箱装卸全过程作业时间及最小化港口集卡运输时间为目标,设计混合粒子群及蚁群算法进行求解;文献[6,7]以集装箱簇为作业单位,考虑集卡运输指派问题,分别研究了考虑集卡运营时间最少和空驶距离最短的路径规划问题,利用改进遗传算法进行求解;文献[8-10]研究了在集装箱码头中集卡与岸桥、堆场机械之间的协调作业问题,考虑了岸桥等待时间以及集装箱运输软时间窗、装卸运输设备工作效率等约束条件;文献[11]以港口集卡消耗燃料成本最小和作业时间最短为目标建立双层规划模型,利用lingo和粒子群算法进行求解;文献[12]以法国勒阿弗尔港为实例,从多式联运角度出发,构建了考虑不确定性约束的RSRP模型。对于海铁联运中的港口集卡路径研究,一部分侧重针对铁路运输集卡路径优化研究。文献[13]研究了铁路集装箱中心站的空闲集卡路径问题,

利用模糊决策理论的方法进行求解;文献[14]针对在铁路集装箱装卸过程中的集卡空、重载问题进行了研究。另一部分则研究了海铁联运背景下铁路装卸线(场)在港口的布局,文献[15]研究了铁路装卸线不同布置形式对港口集疏运的影响,并构建仿真优化模型。

综上,当前港口集卡问题的研究主要在集装箱码头中考虑泊位—堆场之间的短途作业,较少结合疏港铁路线(场)的规划进行延伸研究。既有研究侧重于铁路进行集卡问题研究或者考虑铁路装卸线的港内布置问题,而对有铁路线引入的港口集卡路径问题缺乏研究。随着海铁联运不断发展,尤其在大力倡导铁路专用线进港的背景下,疏港铁路线(场)对港口集卡短途运输作业的影响亟待研究,而对该影响中的集卡路径问题进行研究更具有重要的应用价值。因此,本文以联运堆场、港口堆场、码头泊位三点为集卡往返运输的主要节点,考虑集装箱的运输时间窗,以最小化集卡的总运输时间为目标,建立集装箱码头内集卡路径选择模型,并通过算例验证模型的有效性。

1 海铁联运下港口集卡作业模式

当前铁路专用线进港主要有两种布置:一种是直接横向延伸到码头前沿;另一种是纵向延伸至码头前沿。大部分港口由于联运基础设施建设落后,基本选择在码头后方堆场引入铁路专用线。

海铁联运集装箱到港作业按运输计划主要分为两类:一类是集装箱实现“车船直取”作业;另一类是在港堆存后再离港,即“船舶—堆场—列车”作业模式。集卡作业模式分为单独作业和装卸协同作业,假设集装箱码头装卸同时进行,前者集卡固定负责进口或出口的集装箱运输;后者在泊位、堆场、铁路装卸线处重复往返运输。当卸箱船到达码头后,经由岸桥卸船,再由码头

内集卡运输到堆场进口箱区堆存,或运至联运堆场进行铁路疏港,接着集卡前往堆场出口箱区装载出口集装箱运至装船泊位,或者在联运堆场装上出口集装箱运至码头泊位,再由岸桥装载到出

口船上,完成一次集卡行走循环。然而到港集装箱无论进行“车船直取”还是“船舶—堆场—列车”作业,均包含上述两种集卡作业模式,如图1、图2所示。

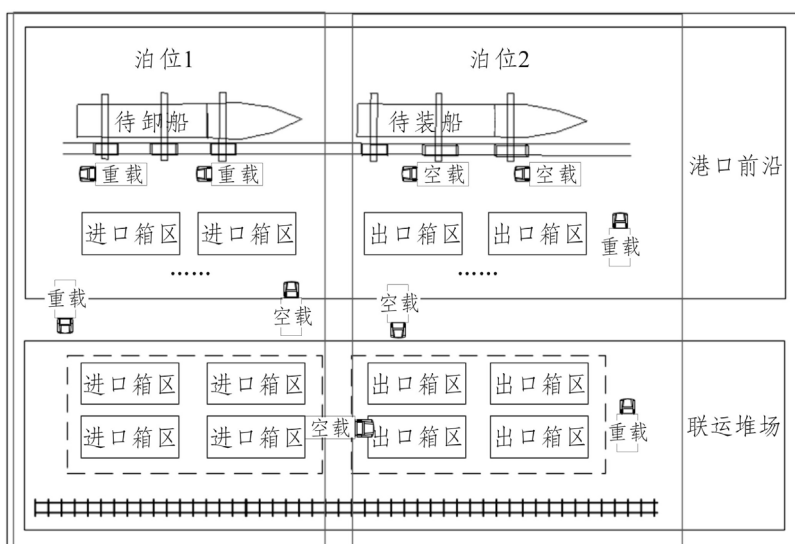


图1 “列车—船舶直取”模式下的集装箱到港作业

Fig. 1 Container arrival operation in the “train-ship” mode

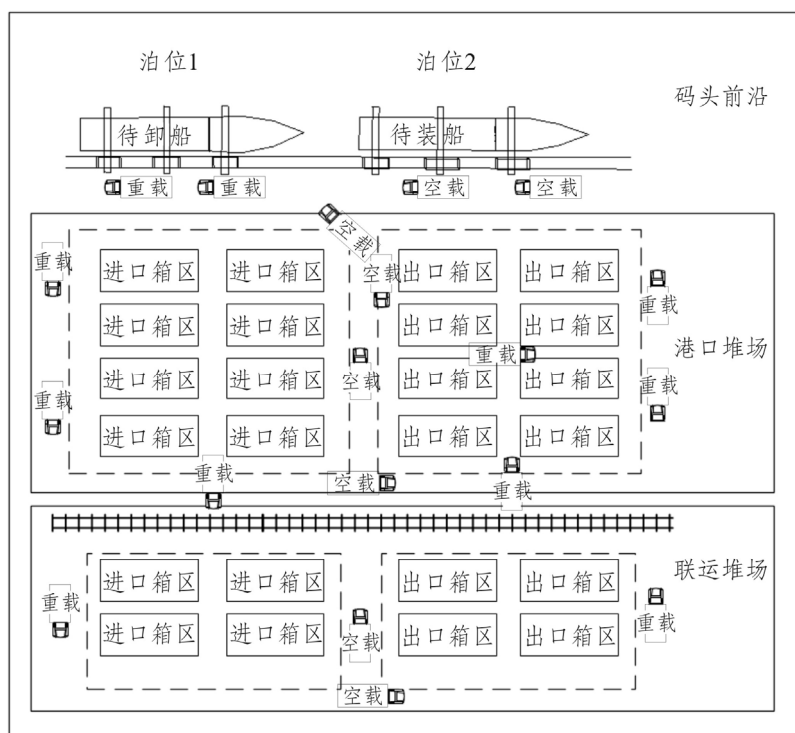


图2 “船舶—堆场—列车”模式下的集卡作业路径

Fig. 2 Container arrival operation in the “ship-yard-train” mode

2 问题描述

有铁路线引入的集装箱码头集卡作业路径情况复杂，为清楚描述集卡在码头泊位和堆场及联运堆场之间的作业关系，对问题界定如下：一艘待卸船舶和一艘待装船舶分别停靠在码头的泊位 1 和泊位 2 上，装卸同步进行；假设每辆集卡一次仅能运输一个 40 英尺集装箱，其装载状况仅为满载或空载；集卡单独作业过程简单，故以集卡装卸协同作业为例，考虑一部分卸船集装箱进行“车船直取”作业，集卡需从泊位 1 装上海运集装箱运至联运进口堆场区，接着空驶至联运出口堆场区提取一个装船箱运至泊位 2，集卡的主要作业路径见表 1；余下卸船集装箱进行“船舶—堆场—列车”作业，集卡需要在码头泊位、堆场及联运堆场之间往返运输，其主要作业路径见表 2。

表 1 集装箱“车船直取”作业模式下集卡作业路径
Tab. 1 Container truck’s work path in the “train-ship” mode

集卡作业模式	作业路径
集卡装卸协同作业	泊位 1—联运堆场进口箱区—联运堆场出口箱区—泊位 2
集卡单独卸载作业	泊位 1—联运堆场进口箱区往返运输
集卡单独装载作业	泊位 2—联运堆场出口箱区往返运输

表 2 集装箱“船舶—堆场—列车”作业模式下集卡作业路径

Tab. 2 Container truck’s work path in the “ship-yard-train” mode

集卡作业模式	作业路径
集卡装卸协同作业	泊位 1—堆场进口箱区—联运堆场进口箱区—联运堆场出口箱区—堆场出口箱区—泊位 2
	泊位 1—堆场进口箱区—堆场出口箱区—泊位 2
集卡单独卸载作业	泊位 1—堆场进口箱区—联运堆场进口箱区往返路径
集卡单独装载作业	泊位 2—堆场出口箱区—联运堆场出口箱区往返路径

3 模型建立

由于每个集装箱货物计划提前已知，集卡装上该集装箱即已确定目的地。基于此，本文以集装箱码头混合作业为例，考虑集装箱装卸同时进行，将集装箱运输起始点、作业路径转为网络图模型 $G(R,E)$ 中的节点和弧长，从而对集卡路径规划问题进行研究。

3.1 基本假设

- 为简化问题方便建模和求解，做出以下假设：
- (1) 集卡在岸桥装卸处不计等待时间；
 - (2) 同一堆场的贝位之间的距离忽略不计；
 - (3) 集装箱货物的信息已知，包括到港货物计划、运输时间窗等；
 - (4) 集卡一次仅能装载一个 40 英尺的集装箱；
 - (5) 集卡在运输过程中行驶速度不变。

3.2 符号说明

将集卡路径问题简化为网络图 $G(R,E)$ ，其中 $R = (0, r, 1, 2, \dots, n)$ 表示进出口箱区（包括联运堆场进出口箱区、堆场进出口箱区）及码头泊位等运输节点集合，0 代表泊位 1， r 代表泊位 2，剩下的节点 $R_0 = R \setminus \{0, r\}$ 代表堆场及联运堆场节点集合。 $E = \{(i, j) : i, j \in R, i \neq j\}$ 是运输弧集，表示集卡的运输路径。集卡集表示为 $K = (1, 2, 3, \dots, k)$ ，其装载情况分为重载和空载两种。

- 其他变量及相关参数设定如下：
- T_k 为第 k 辆集卡完成运输任务所用时间，其中包括重载和空载行驶时间；
 - d_{ij} 为运输任务节点 i 到 j 间的距离，根据泊位与进出口箱区之间的距离计算可得；
 - v 为集卡行驶速度；
 - t_i^k 为在运输节点 i 开始运输的时刻；
 - T_i 为任务节点 i 处的集装箱运输时间；
 - Z_{ij} 为运输弧段 ij 开始运输的时刻；

M 为一足够大的常数；

T_{ij} 为弧 ij 消耗的时间；

t_j^k 为在运输节点 j 的开始时间；

E 为集卡在运输任务点 i 装载集装箱完毕的时刻；

L 为集装箱的计划疏港时间。

定义决策变量：

$$x_{ij}^k = \begin{cases} 1 & \text{集卡在运输任务点 } i \text{ 处卸下集装箱后立刻前往下一个节点 } j \text{ 处运输另一集装箱} \\ 0 & \text{否则} \end{cases}$$

3.3 模型描述

第 k 辆集卡完成运输任务所花费的时间可表示为：

$$T_k = \frac{\sum_{k \in K} \sum_{i,j \in E} d_{ij} x_{ij}^k}{v} \quad (1)$$

故，考虑集卡完成任务总时间最短的目标函数如下：

$$\min \{ \max T_k, k \in K \} \quad (2)$$

约束条件：

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in R_0} x_{ij}^k = 1 \quad \forall i \in R \quad (3)$$

$$\sum_{j \in R_0} x_{ij}^k - \sum_{j \in R_0} x_{ji}^k = 0 \quad \forall i \in R, \forall k \in K \quad (4)$$

$$\sum_{j \in R} x_{0j}^k = 1 \quad \forall k \in K \quad (5)$$

$$\sum_{i \in R} x_{ir}^k = 1 \quad \forall k \in K \quad (6)$$

$$t_i^k + T_i - Z_{ij} + (1 - x_{ij}^k)M \quad \forall i, j \in R, \{i \neq j\} \quad (7)$$

$$Z_{ij} + T_{ij} - t_j^k + (1 - x_{ij}^k)M \quad \forall i, j \in R, \{i \neq j\} \quad (8)$$

$$E - t_i^k - L \quad \forall i \in R, \forall k \in K \quad (9)$$

$$x_{ij}^k \in \{0, 1\} \quad \forall k \in K, \forall (i, j) \in E \quad (10)$$

$$Z_{ij} = 0 \quad \forall (i, j) \in E \quad (11)$$

$$t_i^k = 0 \quad \forall k \in K, \forall (i, j) \in E \quad (12)$$

其中，式 (2) 表示集卡完成任务的行驶总时间最短，取完成节点运输任务时间最长的集卡行驶时间为总时间；式 (3) ~ (12) 为约束条件，约束 (3) 表示每个集装箱都只能被运输一次；约束 (4) 表示每条弧的流量流入与流出保持平衡；约束 (5) 和 (6) 保证每辆集卡都以码头泊位为起始点；约束 (7) (8) 表示运输任务点之间满足时序约束，即任务点 i 完成后，弧 ij 才能开始，接着才能开始任务点 j 的运输；约束 (9) 是满足集装箱运输的时间窗要求，约束 (10) ~ (12) 定义了变量的取值范围。

4 数值算例分析

4.1 算例描述

设计待卸船舶停靠于泊位 1，待装船舶停靠于泊位 2，待进出口总箱量为 15 个 FEU。码头共有 2 个进口集装箱箱区、2 个出口集装箱箱区，分别分布在港口堆场和联运堆场，进出口箱量分别为 8 和 7 个 FEU。箱区与箱区、箱区与泊位之间的距离 d_{ij} 见表 3。集卡的行驶速度 $v = 10$ m/s。

表 3 箱区与箱区、箱区与泊位之间的距离 (单位：m)

Tab. 3 Distance among yard, intermodal yard, and berths (Unit: m)

任务节点	1 (堆场进口箱区)	2 (堆场出口箱区)	3 (联运堆场进口箱区)	4 (联运堆场出口箱区)	0 (泊位 1)
1 (堆场进口箱区)	0	400	600	800	1 400
2 (堆场出口箱区)	400	0	800	600	1 800
3 (联运堆场进口箱区)	600	800	0	400	2 000
4 (联运堆场出口箱区)	800	600	400	0	2 200
r (泊位 2)	2 000	1 600	2 400	2 200	800

假定集卡行驶速度不变，故求解集卡完成运
输任务的总时间最短的路径问题可转换为用节
点间距离所代表的时间花费，从而方便问题求

解。海铁联运集装箱具有运输时限要求，算例中
各运输任务点处集装箱运输时间及运输时间窗
要求见表 4。

表 4 各运输任务点的集装箱运输时间及时间窗

Tab.4 Transport time and time window of containers at the nodes

集装箱编号	出发节点	到达节点	集卡装箱完毕时间 E	集装箱计划疏港时间 L	节点 i 处集装箱运输时间 T_i/s
1	2	r	912	967	160
2	0	1	825	870	140
3	0	3	65	146	200
4	4	2	727	782	60
5	2	r	15	67	160
6	1	3	621	702	60
7	0	3	170	225	200
8	4	r	255	324	220
9	1	3	534	605	60
10	0	3	357	410	200
11	0	1	448	505	140
12	4	r	652	721	220
13	0	3	30	92	200
14	4	2	567	620	60
15	4	r	384	429	220

4.2 结果分析

利用 CPLEX12.0 对算例进行求解，集卡路径分
配结果见表 5，将计算结果进一步分析得到集卡完
成运输任务所产生的空驶距离和重载距离，见表 6。
根据表 5 的计算结果可知，完成算例中的运
输任务需要使用 4 辆集卡。每辆集卡在满足时限
约束条件下，完成了集装箱码头进出口集装箱的
运输任务。通过对计算结果的进一步分析得到集

卡完成集装箱运输所行驶的距离，从而计算出其
空、重载比见表 6。4 辆集卡完成运输任务的空、
重载比均小于等于 1，保证了集卡运能的有效利
用。此外，综合表 5、表 6 的结果进行分析，考
虑集装箱运输的时限要求，有铁路线引入的集装
箱码头普遍采用集卡“作业线”运输模式，即单
独作业，集卡较单一、固定地为码头卸箱或装箱
作业服务。

表 5 集卡路径及完成进出口箱量

Tab.5 Work path of container trucks and total import and export containers

路 径	集装箱运输顺序	运输集装箱路线	进口箱量 (FEU)	出口箱量 (FEU)
1	[0, 7, 11, 9, 6, 2, 0]	泊位 1—联运堆场进口箱区—泊位 1—堆场进口箱区 —联运堆场进口箱区—堆场进口箱区—联运堆场进口 箱区—泊位 1—堆场进口箱区—泊位 1	5	0
2	[0, 3, 8, 4, r]	泊位 1—联运堆场进口箱区—联运堆场出口箱区—泊 位 2—联运堆场出口箱区—堆场出口箱区—泊位 2	1	2
3	[0, 13, 10, 0]	泊位 1—联运堆场进口箱区—泊位 1—联运堆场进口 箱区—泊位 1	2	0
4	[r , 5, 15, 14, 12, 1, r]	泊位 2—堆场出口箱区—泊位 2—联运堆场出口箱区 —泊位 2—联运堆场出口箱区—堆场出口箱区—联运堆 场出口箱区—泊位 2—堆场出口箱区—泊位 2	0	5
累 计			8	7

表 6 集卡行驶距离统计表

Tab.6 Statistics of container truck's travel distance				
集卡 编号	空驶距离 /m	重载距离 /m	路线总 距离/m	空、重载比
1	4600	6800	13200	0.68 : 1
2	2600	4800	9000	0.54 : 1
3	2000	4000	8000	0.5 : 1
4	8200	8200	16400	1 : 1
总计	17400	23800	46600	0.73 : 1

5 结 论

本文提出并针对有铁路专用线引入的集装箱码头集卡路径问题进行研究,以最小化集卡运输总时间为目标函数,建立了考虑集装箱码头混合作业的集卡路径选择模型,并设计算例对模型进行求解。最终结果表明,该模型能够有效求解考虑铁路线引入的港口集卡行走路径,且能较好保证集卡的运能得到充分利用。本研究可用于帮助已接入铁路专用线的港口进行集卡路径规划决策,并为后续港口布置铁路装卸线提供研究基础。本文研究的不足在于没有考虑集卡运输的能耗,在保证集卡尽量重载前提下,结合最小化运输能耗目标进行集卡路径规划将是进一步研究的方向。

参考文献

- [1] 国家发展改革委. 关于加快推进铁路专用线建设的指导意见[Z]. 北京: 国家发展改革委, 2019.
- [2] TSAI F M, LU C C, CHANG Y M. A network model for solving the yard truck routing and scheduling problem[J]. The International Journal of Logistics Management, 2016, 27 (2): 353-370.
- [3] LIU Y, FENG M, SHAHBAZZADE S. The container truck route optimization problem by the hybrid PSO-ACO algorithm[C]//International Conference on Intelligent Computing. Cham: Springer, 2017: 640-648.
- [4] ZHEN L, YU S, WANG S, et al. Scheduling quay cranes and yard trucks for unloading operations in container ports[J]. Annals of Operations Research, 2019, 273 (1-2): 455-478.
- [5] 俞涛. 集装箱码头集卡作业组织优化研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.
- [6] HU X, GUO J, ZHANG Y. Optimal strategies for the yard truck scheduling in container terminal with the consideration of container clusters[J]. Computers & Industrial Engineering, 2019, 137: 106083.
- [7] 梁承姬, 贾帅帅. 考虑集装箱簇边装边卸的港口集卡调度模型求解[J]. 计算机应用研究, 2017, 34 (2): 413-418.
- [8] CAO J X, LEE D H, CHEN J H, et al. The integrated yard truck and yard crane scheduling problem: Benders' decomposition-based methods[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2010, 46 (3): 344-353.
- [9] 计明军, 刘丰硕, 李郭记, 等. 基于装卸协同作业的集装箱码头集卡调度及配置优化[J]. 大连海事大学学报, 2010, 36 (1): 47-50.
- [10] 王铮, 陆游, 张景玲, 等. 面向港口集装箱运输的共享式集卡动态调度[J]. 计算机集成制造系统, 2013, 19 (10): 2607-2614.
- [11] 赵金楼, 黄金虎, 刘馨, 等. 考虑燃料成本的集装箱码头集卡路径优化[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2017, 38 (12): 1985-1990.
- [12] ROUKY N, BOUKACHOUR J, BOUDEBOUS D, et al. A robust metaheuristic for the rail shuttle routing problem with uncertainty: a real case study in the le havre port[J]. The Asian Journal of Shipping and Logistics, 2018, 34 (2): 171-187.
- [13] 丁海涛, 朱晓宁. 基于“作业面”的铁路集装箱中心站集卡路径优化研究[J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2013, 37 (2): 334-338.
- [14] 朱江洪, 肖灵芝, 何山. 铁路集装箱中心站集卡路径优化研究[J]. 物流技术, 2013, 32 (23): 295-298.
- [15] 张涌昊. 集装箱港区铁路装卸线/场布置仿真优化研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2017.

(责任编辑: 李愈)