

考虑碳排放成本的水铁联运集卡路径优化

秦圻, 周兆欣, 鹿洪霞, 王士鹏, 韩洋

(山东交通学院航运学院, 山东 威海 264200)

摘要: 针对水铁联运集装箱港口堆场与铁路作业区的集卡水平运输过程中产生的碳排放问题, 以及集装箱的运输方式的组合, 建立以碳排放成本为目标路径规划模型, 采用变邻域搜索算法对模型进行求解, 得到引入铁路作业区的港口碳排放集卡作业路径的选择结果。通过设计相关算例, 利用 MATLAB 对模型进行求解, 从而得到碳排放成本最小下的最优路径选择结果, 据此说明该模型的可行性。

关键词: 碳排放成本; 水铁联运; 变邻域搜索算法; 最优路径

中图分类号: U691.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006—7973 (2021) 10—0109—03

碳达峰和碳中和是中国乃至全球的共识, 其根本目标是实现工业的高质量发展。由于外集卡集中堆场作业, 消耗了能源, 排放出大量的 CO₂ 以及污染气体, 环境污染也变得更加严重。集卡作为服务于集装箱装卸的工具, 是集装箱码头集港作业流程的关键环节, 合理地优化集卡的调度方案对提高车辆的资源配置、减少碳排放等有

着重要的影响。

在此背景下, 天津港太平洋国际集装箱码头通过完善节能管理机制、健全节能管理制度、执行智能化节能管理方案, 逐步加强能源管理、建设绿色低碳港口^[1]。同时, 郭瑾研究低碳港口形成的机理, 采用 LMDL 分解法分析我国港口碳足迹测算与表层驱动因素, 从而解决

分配、地方发展定位和区域空间交通网络。山东省通过各类国有股权间划转, 以实现组建省级国有港口集团, 并通过重视供应链、物流链的整合和海铁联运铁路流程的重组等形式打造广大的腹地网络, 以期形成区域港口发展合力, 实现资源的优化配置和合理利用, 与区域经济形成联动发展。

山东经验显示我国港口整合已经从港口码头设施整合进入深入化阶段, 即运输、物流、信息和产业体系的区域一体化阶段。在整合过程中, 必须根据港口和区域特征, 制定合适的整合策略和路径, 才能使港口成为区域贸易、经济服务, 构建广阔的腹地网络, 将港口融入到区域发展中去, 使港口和区域得到可持续发展。

参考文献:

[1] 山东省港口集团. 山东省港口集团简介. [EB/OL]. <http://www.sd-port.com/>. 2021-8-18.

[2] 邢相锋, 孙楠, 刘佳良. 山东港口整合战略影响因素分析 [J]. 交通企业管理, 2020, 35(02): 17-19.

[3] 港口网官网. 山东港口集团职能简介. [EB/OL]. <http://www.chinaports.com/portspnews/2509-2019.2021-8-18>.

[4] 港口圈. 青岛港集团股权划转从 100% 变为 49%, 中间发生了什么?. [EB/OL]. <http://www.chinaports.com/portspnews/6424.2020-11-19>.

[5] 微港口网. 青岛港股权变化. [EB/OL]. <http://www.chinaports.com/portspnews/6424.2020-11-19>.

[6] 港口圈官网. 日照港股权变化. [EB/OL]. <http://www.gangkouquan.com/.2020-06-09>.

[7] 中国水运报. 山东港口发力海铁联运实现“快循环”. [EB/OL]. <http://www.zgsyb.com/news.html?aid=572782.2020-10-30>.

[8] 齐鲁晚报. 3 条海上支线架起陆海联动通道, 山东港口一体化改革赋能区域经济. [EB/OL]. http://kxjs.chinaports.org/News_info.htm?id=204209&c=1.2019-10-10.

[9] 大众网. 李奉利: 促进港产城融合发展山东港口集团与济青烟等市要这样合作. [EB/OL]. https://sd.dzwww.com/sdnews/202007/t20200710_6229297.htm.2020-07-10.

[10] 中国港口网. 山东港口资源整合的深层次思考发展. [EB/OL]. <http://www.chinaports.com/portspnews/1285.2019-08-01>.

基金项目: 宁波市软科学研究重大 (招标) 项目 (2019A1002), 国家社会科学基金项目 (19BJL041)。

绿色低碳港口建设的难度^[2]。唐国磊、秦明等人针对集卡调度模式的特征，将碳排放考虑其中，通过定量分析同贝同步的调度方式与集卡配置数量，最终结果是既减少了碳排放，又保证了装卸效率^[3]。戈艳艳、王姗姗通过数据包络方法和方向距离函数处理我国沿海19个港口的面板数据^[4]。喻声频、刘杰通过对比考虑碳排放和不考虑碳排放的多式联运模型，提出运输总成本最小和运输碳排放量最小的多目标0-1规划模型，提出了多式联运的选择方法^[5]。

为此，笔者对上述研究成果进行分析与整合，提出考虑碳排放成本下水铁联运港口集卡装卸作业方案，其目的是调整原传统港口集卡运输方式，引入碳排放成本从而改善集卡装卸作业环境、增强绿色低碳港口的发展概念。

1 碳排放成本计算

集卡的碳排放量与燃油消耗量成正相关的联系，其碳排放量为

$$C_{cartion} = E \cdot \rho_{ij} \cdot d_{ij} \quad (1)$$

式中 $C_{cartion}$ 是碳排放量； E 是碳排放系数， 3.0955kg/L ； d_{ij} 为集卡两节点之间运行的距离； ρ_{ij} 为燃油消耗率。

集卡的燃油消耗率跟速度、载重量有关，且成正相关^[6]，可为

$$\rho_{ij} = av^2 + bv + cl + dvl + e \quad (2)$$

其中， v 是集卡行驶的速度； l 是集卡的载重量，这与集卡空满载有关， a, b, c, d, e 为常数。

以碳排放量作为记税的依据，采用额定税率的形式，碳排放成本为

$$K = C_Z \cdot E \cdot (av^2 + bv + cl + dvl + e) \cdot d_{ij} \quad (3)$$

式中， K 为集卡单位碳排放成本； C_Z 为交通运输业碳税税率。

2 问题描述以及模型建立

2.1 问题描述

目前水铁联运码头采用“船舶-堆场-列车”一种调度模型^[6]。一般包括同贝同步以及单向运输集卡作业过程以及线路，见图1。

2.2 符号与变量

决策变量 X_{imnj} ：集卡运集装箱从泊位1—堆场进口箱区 i —联运进口箱区 n —联运出口箱区 m —堆场出口

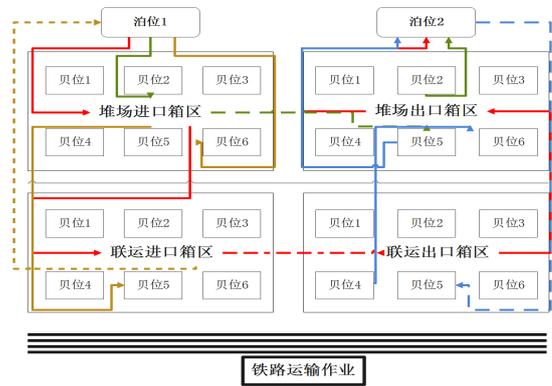


图1 水铁联运集装箱港口平面化作业流程图

箱区 j —泊位2来回次数。 X_{ij} ：集卡运集装箱从泊位1—堆场进口箱区 i —堆场出口箱区 j —泊位2来回次数。

X_{on} ：集卡运集装箱从泊位1—堆场进口箱区 i —联运进口箱区 n 来回次数。 X_{o2m} ：集卡运集装箱从泊位2—联运出口箱区 m —堆场进口箱区 j 来回次数。

G_1 ：待卸进口集装箱总数。 G_2 ：待装出口集装箱总数。 R ：集装箱堆场进口箱区集合 $\{1,2,3,\dots,i\}$ 。 I ：集装箱堆场出口箱区集合 $\{1,2,3,\dots,j\}$ 。 T ：集装箱铁路进口箱区集合 $\{1,2,3,\dots,n\}$ 。 F ：集装箱铁路出口箱区集合 $\{1,2,3,\dots,m\}$ 。 O_1 ：泊位1。 O_2 ：泊位2。 N ：集卡数量。 s ：每辆集卡固定成本。

2.3 基本假设

为了方便建模和模型的求解，做出了如下的假设：
①港口存在待装船与待卸船；②各运输节点运输线路容量足够大；③集卡集装箱保持匀速；④集卡只能运一个40英尺集装箱，满载、空载情况。

2.4 建立模型

由已知的符号说明建立碳排放成本的联运集装箱作业线路优化模型为

$$W = \sum_{i \in R} \sum_{n \in I} \sum_{m \in T} \sum_{j \in F} C_Z E (av^2 + bv + cl_f + dvl_f + e) d_{01i} (X_{imnj} + X_{oin} + X_{ij}) + \sum_{i \in R} \sum_{n \in I} \sum_{m \in T} \sum_{j \in F} C_Z E (av^2 + bv + cl_k + dvl_k + e) d_{01i} (X_{imnj} + X_{ij}) + \sum_{i \in R} \sum_{n \in I} \sum_{m \in T} \sum_{j \in F} C_Z E (av^2 + bv + cl_k + dvl_k + e) d_{02m} (X_{oin}) + \sum_{i \in R} \sum_{n \in I} \sum_{m \in T} \sum_{j \in F} C_Z E (av^2 + bv + cl_f + dvl_f + e) d_{02m} (X_{imnj} + X_{oin} + X_{ij}) + \sum_{m \in T} \sum_{j \in F} C_Z E (av^2 + bv + cl_k + dvl_k + e) d_{02m} (X_{oin}) + NS \quad (4)$$

约束条件为

$$\sum_{i \in R} \sum_{n \in I} \sum_{m \in T} \sum_{j \in F} X_{imnj} + \sum_{i \in R} \sum_{j \in F} X_{ij} + \sum_{i \in R} \sum_{n \in I} X_{oin} = N_1 \quad (5)$$

$$\sum_{i \in R} \sum_{n \in I} \sum_{m \in T} \sum_{j \in F} X_{imnj} + \sum_{i \in R} \sum_{j \in F} X_{ij} + \sum_{m \in T} \sum_{j \in F} X_{o2mj} = N_2 \quad (6)$$

$$\sum_{m \in T} \sum_{j \in F} X_{imnj} + \sum_{j \in F} X_{ij} + X_{oin} \leq Q, i \in R, n \in I \quad (7)$$

$$\sum_{i \in R} \sum_{n \in I} X_{imnj} + \sum_{i \in R} X_{ij} + X_{o2mj} \geq P, m \in T, j \in F \quad (8)$$

其中式子(4)表示集卡完成装卸时最小的碳排放成本;约束条件(5)表示待卸船舶所卸下的集装箱能完成;(6)表示待装船舶所装上的集装箱能完成;(7)确保进口集装箱都能卸下;(8)确保出口集装箱都能装船。

3 求解算法

通过变邻域搜索算法解决此类问题,这种算法由抖动过程和变邻域深度搜索过程组成,其中抖动过程是为了避免陷入局部最优解,邻域结构是满足实际情况。求解步骤如下

- (1) 构建初始解 x_0 , 令最优解 $x_b = x_0$ 。
- (2) 终止条件;否则,随机从 x_b 的任意邻域 Q^c 中选取解 x' 当做变邻域深度搜索的初始解。
- (3) 令 $i=0$, 从而进行变邻域深度搜索。
- (4) 在 x' 的 Q^c 邻域中搜索出局部最优解 x^* 。
- (5) 最终输出 x_b 以及 $W(x_b)$ 。

4 数值分析

假设待卸船舶停靠于泊位1,其中有470个进口箱,待装船舶停靠于泊位2,有440个出口箱。港口有4个堆场进口箱区和4个联运进口箱区以及4个堆场出口箱区和4个联运出口箱区,各进口箱区所能容纳的集装箱数量和出口箱区已堆存的集装箱数量能满足。箱区与泊位、箱区与箱区之间的距离保持在0.6m。集卡的空载燃料消耗率 $\rho_k = 0.32L/km$, 满载燃料消耗率 $\rho_k = 0.8L/km$, 集卡速度 $v = 8m/s$, 每辆集卡固定成本 $S = 4120$ 元, 集卡数 $N = 17$ 辆。

通过变邻域搜索算法对考虑碳排放成本的水铁联运港口中集卡路径优化模型进行求解,从而得到完成吞吐量下的 W 最小的值为50628元,以及所对应的路劲和沿路劲装卸量,由表1所示。

表1 集装箱卡车优化路径、长度以及装卸量表

运输路线	路线长度 km	卸箱量	装箱量
泊位1—堆场进口3—联运进口1—联运出口4—堆场出口1—泊位2	3.20	59	92
泊位1—堆场进口2—联运进口4—联运出口4—堆场出口3—泊位2	2.96	107	101
泊位1—堆场进口2—堆场出口1—泊位2	1.43	32	95
泊位1—堆场进口1—联运进口3—联运出口1—堆场出口2—泊位2	3.60	98	83
泊位1—堆场进口3—堆场出口1—泊位2	1.61	69	73
泊位1—堆场进口1—联运进口4	0.70	43	0
泊位1—堆场进口3—联运进口2	0.56	32	0
总共	14.06	470	440

以最短目标为模型,根据所优化出来的总成本为

46819元^[7]。因此,本文构建的考虑碳排放成本的优化模型得到结果更优。

5 结论

水铁联运集装箱码头集卡路径问题,本文从国家号召的节能减排的角度出发,考虑集卡碳排放这个因素,通过建立集卡碳排放成本的优化模型,得到在完成一次吞吐量的总成本小于传统模型中以集卡路径最短为目标的优化得到的总成本。

在将碳排放转化为联运码头经营成本的情况下,只考虑碳排放成本层次还不够深入,应该可将运输时间、可变成本、不同种类集装箱等角度考虑进去,对水铁联运集装箱港口装卸路径优化问题进一步探究。

参考文献:

- [1] 陈妍. 加强能源管理建设绿色低碳港口 [J]. 集装箱化, 2018,29(07):15-18.
- [2] 郭瑾. 低碳港口形成机理及投资优化研究 [D]. 大连海事大学, 2020.
- [3] 唐国磊, 秦明, 李翔. 集卡调度方式对集装箱港区碳排放的影响 [J]. 水运工程, 2019(06):46-51+62.
- [4] 戈艳艳, 王姗姗. 考虑碳排放的港口全要素生产率及影响因素分析 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2021,21(02):22-29.
- [5] 喻声频, 刘杰. 考虑碳排放的多式联运路径优化 [J]. 交通节能与环保, 2018,14(06):38-41+78.
- [6] 吴丽荣, 胡祥培, 饶卫振. 考虑燃料消耗率的车辆路径问题模型与求解 [J]. 系统工程学报, 2013,28(06):804-811.
- [7] 赵金楼, 黄金虎, 刘馨. 集装箱码头的集卡两阶段路径优化研究 [J]. 中国管理科学, 2017(4): 152-157.

基金项目: 山东交通学院 2021 年研究生科技创新项目 (2021YK02)。