

文章编号: 1003-1421(2021)06-0080-07 中图分类号: F532.4 文献标识码: A
DOI: 10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.2021.06.13

基于双层规划的海铁联运班列 编组数量研究

Research on the Number of Train Formations in Sea-Rail Intermodal
Transportation Based on Bi-level Programming

邓夕贵¹, 朱逸凡², 雷智鹞², 潘志刚¹, 张 恬¹

DENG Xigui¹, ZHU Yifan², LEI Zhiyi², PAN Zhigang¹, ZHANG Tian¹

(1. 中国港湾工程有限责任公司 西非区域分公司, 科特迪瓦 阿比让 06BP6687; 2 河海大学 港口海岸
与近海工程学院, 江苏 南京 210098)

(1. Western Africa Regional Company, China Harbour Engineering Company Ltd., Abidjan 06BP6687, Ivory Coast;
2. College of Harbour Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu, China)

摘 要: 海铁联运集装箱班列是海铁联运系统中的重要组成部分, 集装箱班列的
开行方案直接影响集装箱在港口的滞留时间。从海铁联运衔接过程出发, 对铁路
班列与集装箱港口需求对接及关键要素进行分析。从最小化海铁联运集装箱在港
口的滞留时间和最小化班列的开行成本 2 个方面构建双层模型, 以上海洋山港为
例, 以到港的集装箱船舶和集装箱班列为研究对象, 基于铁路班列运行线路和船
舶到离港计划, 优化到港船舶卸箱顺序和班列编组数量、开行顺序, 解决堆场作
业协调优化等问题, 并为码头装卸集装箱的调度方案提供支持。

关键词: 海铁联运; 集装箱班列; 编组数量; 双层规划; 集装箱码头

Abstract: Sea-rail intermodal container block trains constitute an important part of a sea-rail
intermodal transportation system, and the operation scheme of container block trains directly
influences the detention time of containers in port. With regard to the connection process of sea-
rail intermodal transportation, this paper analyzed the coordination between railway block trains
and the demand from container ports and discussed key elements. A bi-level programming model
was constructed for the shortest detention time of containers in port and the lowest operation cost
of block trains. With the Yangshan Port in Shanghai as an example, this paper took the container
ships arriving at port and container block trains as the research objects. It studied the routes of
railway block trains and the arrival and departure schedules of ships to optimize the unloading
sequence of the ships arriving at port, the number of train formations and the operation sequence
of container block trains, thus coordinating and optimizing yard operation and supporting the
scheduling scheme of container loading and unloading.

Keywords: Sea-Rail Intermodal Transportation; Container Block Train; Number of Train
Formations; Bi-level Programming; Container Terminal

0 引言

经济全球化促使各国之间的贸易往来日益频繁,货物运输需求激增。为了更好地满足运输需求,大部分跨国公司选择海运运输方式,再通过铁路、公路疏散至内陆。针对海铁联运系统的研究,现有文献多集中在海铁联运各个子系统的协同优化和海铁联运集装箱班列优化方面。Hu 等^[1]采用整数线性规划模型,对集装箱码头、集装箱码头堆场、港口铁路站、铁路向腹地的交叉运输进行了规划,并提出一种禁忌搜索算法,在实际的案例和不同的需求场景中,验证了该算法的实用性。Schepler 等^[2]从码头船舶、铁路和卡车的调度出发,合理优化集装箱在码头之间的运输流程,最大程度地减少集装箱在港口的加权周转时间。Tierney 等^[3]提出一个整数规划模型,对海铁联运系统中的车辆和集装箱的流动过程用时空图进行建模,通过减少车辆和集装箱的运输时间为港口的调度和决策提供重要信息。Zhao 等^[4]考虑港站转运能力、铁路运力等因素,建立集装箱配送组织模型,最大程度地减少港口内部集装箱的总滞留时间。唐亚龙^[5]以海铁联运集装箱的周转时间最短为目标优化班列的开行方案。王如义等^[6]从班列定点集结和班列定编集结的角度出发,分析2种集结方式内在影响因素的变化规律,并以定点集结为研究对象,研究其最小编组数量。李红雨^[7]研究定点集结班列集结的周期频率,并与原班列计划的集结方案进行成本比较,进而选出最优班列集结方案。王建军^[8]对班列机车的运输能力以及运行班列的区段通过能力进行计算,论述定点集结在技术上和经济上的优缺点。

针对海铁联运集装箱班列开行问题,在已有研究的基础上,将集装箱在港口的滞留时间和班列开行的成本作为目标函数,优

化海铁联运集装箱在船舶上的卸箱顺序和班列开行的编组数量、开行频率,建立多目标规划模型,在保证海铁联运集装箱运输需求的基础上,实现降低班列开行成本和集装箱在港滞留时间的目标,并以上海洋山港为例,用遗传算法对模型进行求解。

1 海铁联运需求分析

1.1 海铁联运系统衔接过程

海铁联运系统的衔接过程根据港站设置分为2种情况,一种是港站设置在港口内部,另一种是港站设置在港站外部。以第1种为例,其运输流程大致可以分为3个阶段,分别为水路运输阶段、港口内部的运输阶段和铁路运输阶段。港站在港口内部的运输流程如图1所示。

1.2 铁路班列与集装箱港口需求对接分析

目前,铁路班列集结模式主要有定编集结、定点集结2种,定点集结又分为完全定点集结、放宽条件下的定点集结。定编集结是指按班列编组计划规定的编组内容和班列运行图规定的长度标准或重量标准编组班列^[7]。定编集结模式下,集装箱在港滞留时间相对较长,而集装箱班列开行列数相

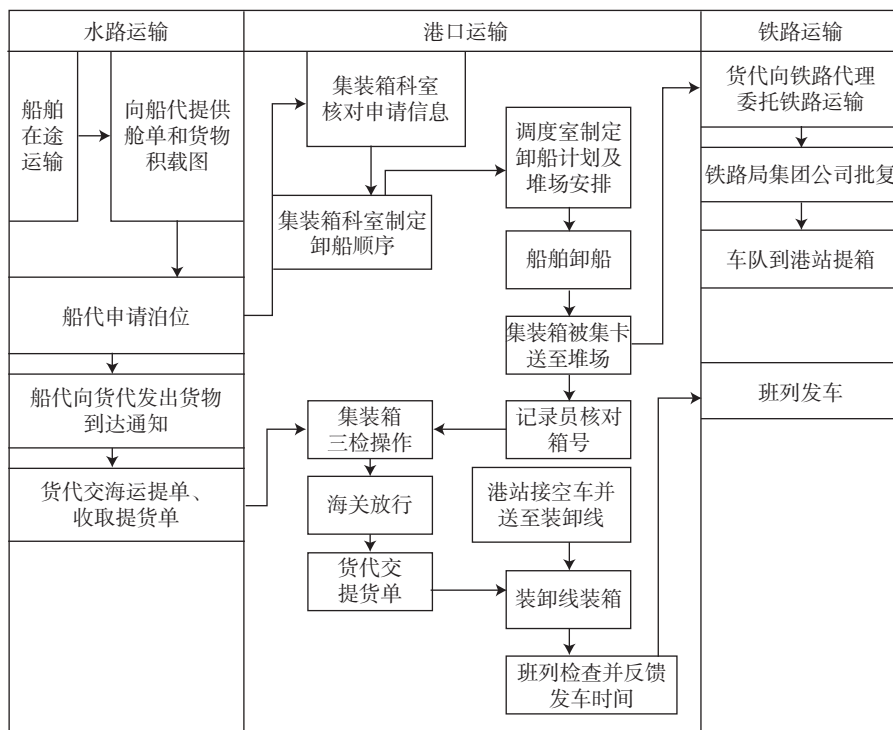


图1 港站在港口内部的运输流程图

Fig.1 Transportation flow chart of port stations inside ports

比定点集结会相对较少。

定点集结是指按班列运行图所规定的时刻停止集结，进行编组出发作业^[8]，若采用完全定点集结模式，在一定条件下允许班列欠轴发车，当到达集结完毕时间时，无论集结多少货车，均进行编组出发作业。但是，由于没有最小编成辆数的限制，且到达车流随机性较强，容易导致班列编成辆数小于最大编成辆数，造成机车能力浪费。

相对于定点集结模式，放宽条件下的定点集结模式对集结完毕时的集结车数具有一定的要求。该种集结模式下，到达车列集结完毕时间时，集结的车数须不小于该模式所规定的最小编成辆数，才能编组出发，否则继续集结等待，直至满足最小编成辆数要求。放宽条件下的定点集结模式相比定编集结，具有更强的适应性。

1.3 海铁联运关键要素分析

海铁联运系统涉及的主体有港口和港站，港口方注重时间上的衔接，力求尽快实现集装箱从船舶到班列的转运工作。港站方注重运量上的衔接，力求设计的海铁联运开行方案既能让堆场的集装箱及时转运至对应的班列，也能提高铁路部门的经济效益；港站在设计班列开行方案时主要考虑运行区段、编组内容、开行频次、运行时刻等方面因素。

综合考虑上述两者的利益，从最小化集装箱在港滞留时间和最小化班列开行成本入手，对船舶的卸箱时间和班列的开行方案进行优化。将上述问题抽象为数学问题，主体为多艘船舶、多趟开往不同去向的班列；目标为减少集装箱在港滞留时间和减少班列开行成本；研究周期为港口方指定的船舶停泊靠泊计划的时间长度，一般为 7d；优化目标为海铁联运的集装箱卸船顺序、班列开行频率、班列编组数量。

考虑到班列开行方案中班列的作业节点、甩挂计划及运行径路优化的困难，只对班列的开行频次和编组数量进行优化，以实现集装箱快速转运的目标。

2 模型构建

2.1 最小化海铁联运集装箱在港口的滞留时间

研究将问题界定为 S 艘船舶 (S 为船舶集合，

船舶编号用 s 表示)， N 列班列 (N 为班列集合，班列编号用 n 表示) 和 D 个班列去向 (D 为班列的去向集合，班列去向编号用 d 表示) 共同组成海铁联运班列开行的问题。决策变量如表 1 所示，其余参数如表 2 所示。同时，假定海铁联运集装箱滞留时间为其从船舶开始卸下的时间至其对应去向班列开始开行的时间，主要包括岸吊作业时间、码头堆场堆存时间、集装箱在港口的运输时间及集装箱集结时间。

表 1 决策变量
Tab.1 Decision variables

| | |
|----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| T_{ij} | 对应于第 j 列班列的海铁联运箱在船舶 i 的开始卸箱时间 |
| x_{ij} | 第 j 列班列装有第 i 艘船舶海铁联运的集装箱数量 |
| m_{fj} | f 去向的第 j 列班列的编成数量 |
| x_{fj} | $x_{fj} = \begin{cases} 0 & f \text{ 去向第 } j \text{ 列班列不开行} \\ 1 & f \text{ 去向第 } j \text{ 列班列开行} \end{cases}$ |

表 2 其余参数
Tab.2 Rest parameters

| | |
|-----------|-----------------------------------|
| h_i | 第 i 艘船舶海铁联运集装箱的数量 (TEU) |
| T_{ij}' | 对应于第 i 艘船舶的海铁联运箱，第 j 列班列出发的时间 |
| a_{ij} | 第 j 列班列对应的第 i 艘船舶开始卸船的时间 |
| b_{ij} | 第 j 列班列对应的第 i 艘船舶结束卸船的时间 |
| q_j | 堆场初始堆存的属于班列 j 的海铁联运箱量 |
| q_j' | 被集卡装入堆场的属于班列 j 海铁联运箱量 |
| q_j'' | 被集卡取出堆场属于班列 j 的海铁联运箱量 |
| Q | 堆场的最大堆存能力 |
| t_{ij} | 集装箱各种装卸作业时间 |
| c_x | 海铁联运集装箱在港口的滞留时间成本系数 |
| c_a | 班列开行的固定成本系数 |
| c_b | 班列开行的变动成本系数 |
| c_d | 班列开行欠轴成本系数 |
| \bar{m} | 标准集装箱的平均质量 |
| \bar{t} | 集装箱平均在堆场的堆存时间 |
| n_{if} | 船舶 i 上送往 f 去向班列的集装箱最大转运时间 |
| m_{fa} | f 去向班列最大编成编组数量 |
| m_{fb} | f 去向班列最小编成编组数量 |

对于港口方而言，减少集装箱在港口的滞留时间可以缓解码头堆场的堆存压力，也可以缩短海铁联运的衔接时间。合理地缩短集装箱在港口的滞留

时间,需要在保证每艘船舶上的集装箱能够匹配到对应去向班列的基础上,通过调整集装箱在船舶的卸箱顺序来实现。例如,船舶 s 上有 d_1, d_2 和 d_3 去向的海铁联运集装箱,对应的卸箱时间为 T_1, T_2 和 T_3 ,对应于船舶开始卸船时间之后的开往 d_1, d_2 和 d_3 去向的第1个出发的集装箱班列 n_1, n_2 和 n_3 ,每个班列对应的开行时间为 t_1, t_2 和 t_3 ,如果 $t_3 < t_1 < t_2$,此时不同去向的集装箱的卸箱时间应满足 $T_3 < T_1 < T_2$,这样可以减少集装箱在港口的滞留时间。上述方案,主要是在船舶离港之前让暂时不需要班列转运的集装箱停放在船舶上,让需要转运的集装箱尽快由集卡送至港站进行编组出发,从整体上减少海铁联运集装箱在港口的滞留时间。

因此,从港口方的角度出发,需要合理优化海铁联运集装箱从船舶的开始卸箱时间,方能减少集装箱在港口的滞留成本。用海铁联运集装箱在港口的滞留成本作为衡量海铁联运系统衔接可靠性的的重要度量,把最小化集装箱的滞留成本作为其目标函数。

上层规划模型目标函数如下。

$$\min \omega_1 = c_x \cdot \sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^n (T'_{ij} - T_{ij}) \cdot x_{ij} \quad (1)$$

上述目标函数的约束条件如下。

海铁联运集装箱卸箱的时间必须在船舶的装卸箱时间范围以内。

$$a_{ij} < T_{ij} < b_{ij} \quad \forall i \in S, \forall j \in N \quad (2)$$

海铁联运集装箱卸箱的总花费时间必须在船舶的装卸箱时间范围以内。

$$a_{ij} < T_{ij} + x_{ij} \cdot t_{ij} < b_{ij} \quad \forall i \in S, \forall j \in N \quad (3)$$

所有班列装有某条船舶 i 的海铁联运集装箱量应等于船舶 i 所有的海铁联运集装箱量。

$$\sum_{j \in N} x_{ij} = h_i \quad \forall i \in S, \forall j \in N \quad (4)$$

去往 f 方向的海铁联运所有的集装箱的时间值必须在某一个转运时间之内。

$$\sum_{j \in f} x_{ij} \cdot (T'_{ij} - T_{ij}) \leq n_{ij} \quad (5)$$

船舶 i 去往集装箱班列 j 上的海铁联运集装箱卸箱后的时间不超过班列开始出发的时间。

$$T_{ij} + t_{ij} \times x_{ij} < T'_{ij} \quad (6)$$

2.2 最小化班列的开行成本

对于铁路方,班列的开行成本是其进行班列开行方案设计的重要因素,当班列需要转运的海铁联运集装箱数量过少时,将影响开行班列的经济效益。因此,在对班列开行方案设计时,应合理对班列的开行频率和班列的编组数量进行优化,以有效降低班列开行成本和班列欠轴率。对应的下层规划模型目标函数如下。

$$\min \omega_2 = \sum_{f \in F} \sum_{j \in N} x_{fj} \cdot c_a + \sum_{j \in F} \sum_{j \in N} x_{fj} \cdot c_b \cdot m_{fj} + \sum_{f \in F} \sum_{j \in N} (m_{fa} - x_{fj}) \cdot c_d + (k_1 + k_2) \cdot \bar{m} \cdot \bar{t} \cdot (q_j + \sum_{j \in N} q'_j - \sum_{j \in N} q''_j) \quad (7)$$

式中: k_1 为集装箱堆存成本系数; k_2 为集装箱持有成本系数(集装箱滞留以后,每小时所占用的资金成本、服务成本、仓储空间成本以及风险成本)。

上述目标函数的约束条件如下。

堆场堆存的能力约束

$$q_j + \sum_{j \in N} q'_j - \sum_{j \in N} q''_j \leq Q \quad (8)$$

2个目标函数共同的约束条件如下。

f 去向的第 j 列班列上对应第 i 艘船舶的海铁联运集装箱不应超过船舶上运往 f 方向的海铁联运集装箱数量。

$$0 \leq x_{ij} \leq x_{if} \quad \forall i \in M, \forall j \in f \quad (9)$$

集装箱班列装载的海铁联运箱量应等于班列的最大装箱量。

$$\sum_{i \in S} x_{ij} = m_{fi} \cdot x_{fj} \quad \forall f \in F, \forall i \in S, j \in N \quad (10)$$

去往 f 方向的所有班列装有船舶 i 的海铁联运集装箱量不应超过船舶上运往 f 方向的海铁联运集装箱数量。

$$\sum_{j \in f} x_{ij} \leq x_{if} \quad \forall i \in S, \forall j \in N \quad (11)$$

变量的取值约束为

$$m_{fa} \leq m_{fj} \leq m_{fa} \quad m_{fj} \in N^+, \forall f \in F, \forall j \in N \quad (12)$$

$$x_{ij} \in N^+ \quad i \in S, j \in N \quad (13)$$

$$x_{fj} \in \{0, 1\} \quad (14)$$

目标函数(1)为最小化海铁联运集装箱在港口的滞留成本,目的是提高海铁联运各个子系统的衔接可靠性,求解的是海铁联运集装箱在船舶上的卸

箱顺序；目标函数(2)为最小化海铁联运班列的开行成本，目的是考虑铁路部门的经济利益，综合开行班列的固定成本和变动成本。如果想减少海铁联运集装箱在港口的滞留时间，减少目标函数(1)的大小，意味着班列开行频率和班列编组数量的增加，则会导致目标函数(2)的增大，因此2个目标函数在优化上有矛盾之处，且2个目标函数分别代表着港口和铁路部门的利益，故很难将2个目标合为1个目标来解决。

双层规划模型为NP-Hard问题，当周期内船舶数量、开行班列过多时，难以求得最优解，一般尝试智能算法来解决，采用遗传算法解决上述问题。对遗传算法的编码部分选择二进制编码，在上述模型中，先确定开行班列的编组数量和开行频率，结合约束条件，生成船舶上集装箱的卸箱时间和班列上的船舶箱流，并将时间和箱流转为二进制。

3 案例分析

上海港位于长江入口处，凭借其优越的地理位置成为我国东部沿海的重要大港。上海港由多个港区组成，其中洋山港区主要负责来自国际的集装箱的转运业务，洋山港开发了四期码头。考虑到三期、四期码头运营时间较短，选择一期和二期码头作为实例分析对象，对到达码头的船舶及港站的集装箱班列进行分析，得到模型基础数据，再用遗传算法求解。

3.1 铁路运行线路分析

芦潮港站与洋山港相距40 km，是离洋山港区最近的港站。芦潮港的班列在南翔站进行改编、集结并重新编组出发。集装箱班列相关数据如表3所示。

表3 集装箱班列相关数据

Tab.3 Relevant data of container block trains

| 目的站 | 始发时间 | 班列运行时间/min | 开行频率/(列/d) |
|------|-------|------------|------------|
| 株洲北 | 19:33 | 2 020 | 2 |
| 王家营西 | 7:59 | 5 299 | 2 |
| 大红门 | 2:35 | 3 666 | 2 |
| 吉山 | 22:00 | 3 198 | 2 |
| 吐鲁番 | 4:40 | 7 532 | 1 |

假设上述集装箱班列为单层集装箱班列，并且一辆车可以承载2个20 ft标准箱。芦潮港站与南翔站之间的距离100 km，两站之间通过浦东铁路线相连，运行时间大约1 h。芦潮港站的集装箱车组到站后，作业时间大约1 h。因此，对应于芦潮港站的集装箱集结车组实际的出发时间要比南翔站的集装箱班列的发车时间提前2 h，可以得到芦潮港站集装箱车组的出发时间。芦潮港站铁路运行径路为：经过南翔到达乔司站，在乔司站再分为3条线路。第1条线路由乔司到达株洲北，途经金华、鹰潭。第2条线路由乔司到聊城北，聊城北再分为2个方向，一个到丰台，再到大红门；另一个到吉山，途经向塘西、赣州东、龙川北。第3条线路由乔司到芜湖东，芜湖东再分为2个方向，一个到王家营西，途经郑州北、贵阳南；另一个到吐鲁番，途经新丰镇、迎水桥、武威南、嘉峪关、哈密、鄯善。

上述班列停靠站大致可以分为3类。第1类为需要装载和卸载集装箱的车站，这类车站班列的停留时间为2 h；第2类为只进行装载集装箱或者卸载集装箱作业的车站，这类车站的停留时间小于2 h；第3类为装卸量很少的车站，主要负责对集装箱班列进行检修作业。班列停靠站分类数据如表4所示。

表4 班列停靠站分类数据

Tab.4 Classified data of train stops

| 班列终点站 | 第1类 | 第2类 | 第3类 |
|-------|----------------|---------------------|------------|
| 株洲北 | 鹰潭、株洲北 | | 乔司、金华东 |
| 王家营西 | 鹰潭、王家营西 | 乔司(装)、郑州北(卸)、贵阳南(卸) | 金华东 |
| 大红门 | 大红门、丰台 | 乔司(装) | 聊城北 |
| 吉山 | 向塘西、吉山 | 乔司(装)、鹰潭(卸)、龙川北(卸) | 金华东、赣州东 |
| 吐鲁番 | 乔司、合肥东、吐鲁番、新丰镇 | 芜湖东(装)、迎水桥(卸)、鄯善(卸) | 武威南、嘉峪关、哈密 |

根据上述站点分类,得到各类别停靠站的卸箱比率,第1类:第2类:第3类为2:1:0,从而可以得到各个班列每条船舶海铁联运集装箱的比例。

3.2 到港船舶分析

考虑到港口方在船舶进港5天前会制定船舶进离港计划,铁路方为了与港口的船舶进离港计划相匹配,应制定5日运输计划,因此选定研究周期为5d。根据港口方制定的船舶进离港计划,到港船舶靠泊计划如表5所示。

表5 到港船舶靠泊计划
Tab.5 Berthing plan for arriving ships

| 泊位 | 船舶名称 | 预计进港时间 | 预计离港时间 |
|----|---------|------------------|------------------|
| 1 | 达飞美总新泽西 | 2019-12-25 14:00 | 2019-12-26 11:00 |
| 1 | 勋城 | 2019-12-26 18:00 | 2019-12-27 6:00 |
| 1 | 阿联酋萨娜 | 2019-12-27 13:30 | 2019-12-27 19:30 |
| 1 | 达飞巴拿马 | 2019-12-28 20:30 | 2019-12-29 9:00 |
| 1 | 中远海运银河 | 2019-12-29 11:00 | 2019-12-31 3:00 |
| 2 | 东方柏林 | 2019-12-25 7:30 | 2019-12-26 6:00 |
| 2 | 中海大西洋 | 2019-12-27 14:00 | 2019-12-28 9:00 |
| 2 | 长成 | 2019-12-29 11:00 | 2019-12-30 10:30 |
| 3 | 正福 | 2019-12-25 16:00 | 2019-12-26 8:30 |
| 3 | 达飞雅克约瑟夫 | 2019-12-26 23:00 | 2019-12-27 9:00 |
| 3 | 中远非洲 | 2019-12-27 18:30 | 2019-12-28 7:00 |
| 3 | 达飞科伦巴 | 2019-12-29 8:30 | 2019-12-30 9:00 |
| 4 | 中远诚信 | 2019-12-25 10:30 | 2019-12-26 20:30 |
| 4 | 中远丹麦 | 2019-12-26 21:30 | 2019-12-27 21:00 |
| 4 | 达飞马斯卡 | 2019-12-28 4:00 | 2019-12-29 9:00 |
| 5 | 达飞阿肯色州 | 2019-12-26 13:30 | 2019-12-27 13:30 |
| 5 | 长钦 | 2019-12-27 23:30 | 2019-12-28 11:30 |
| 5 | 达飞珀加索斯 | 2019-12-29 12:00 | 2019-12-30 3:30 |
| 6 | 达飞鲁道夫 | 2019-12-27 5:30 | 2019-12-28 6:00 |
| 6 | 中远汉堡 | 2019-12-28 16:00 | 2019-12-29 20:30 |
| 7 | 达飞罗斯福 | 2019-12-27 23:00 | 2019-12-28 10:00 |
| 7 | 中远波士顿 | 2019-12-28 13:30 | 2019-12-29 13:30 |
| 7 | 商船三井灯塔 | 2019-12-30 19:00 | 2019-12-31 19:00 |

注:数据来源于上海国际港务(集团)股份有限公司官网。

3.3 参数计算

3.3.1 班列开行费用

班列开行成本主要包括机车公里费用、机车小时费用、班列乘务组费用、燃油费用^[9],具体的公式如下。

机车公里费用 c_1 为

$$c_1 = L(1 + \rho_1)\xi_1 \quad (15)$$

式中: L 为集装箱运行线路总长度, km; ρ_1 为机车辅助走行率; ξ_1 为机车公里费用率, 元/km。

机车小时费用 c_2 为

$$c_2 = \frac{L}{v}(1 + \rho_2)\xi_2 \quad (16)$$

式中: v 为集装箱班列运行速度, km/h; ρ_2 为机车沿线走行率; ξ_2 为机车小时费用率, 元/h。

班列乘务组费用 c_3 为

$$c_3 = \frac{L}{v}(1 + \rho_2)(1 + \rho_3)k_3 \quad (17)$$

式中: ρ_3 为班列乘务组时间系数; k_3 为班列乘务组小时费用率, 元/h。

燃油费用 c_4 为

$$c_4 = \frac{D[G_0 + m(2\partial + \partial_0)]LK_4}{10\,000} \quad (18)$$

式中: D 为每万总重吨公里燃油消耗定额; G_0 为机车质量, t; m 为集装箱班列的编组数量; ∂ 为 20 ft 标准集装箱的平均质量, t; ∂_0 为车底质量, t; K_4 为燃油费用率, 元/t·km。

3.3.2 班列开行欠轴损失

班列欠轴开行的损失包括机车牵引力浪费造成的损失和铁路运行区段线路能力浪费造成的损失, 班列开行欠轴损失 c_5 计算公式如下^[10]。

$$c_5 = (m_a - m_j) \cdot \xi_1 \cdot L + (m_a - m_j) \cdot \xi_2 \cdot \frac{L}{v} \quad (19)$$

式中: m_a 为班列开行的满轴编组数量; m_j 为班列的编组数量。

3.4 求解结果分析

以上海国际港务(集团)股份有限公司官网数据作为模型的基础数据, 通过目标函数(1)以及参数取值得到集装箱的滞留成本, 通过目标函数(2)得到班列的开行成本, 通过遗传算法求解出相应结果。班列最优编组数量如表6所示。

相较于传统的定编集结开行方案, 该开行方案灵活性更强, 将部分需要迅速转运的集装箱优先从船舶卸箱, 部分不需要迅速转运的集装箱停留在船舶上, 缓解堆场堆存压力, 减少集装箱在港口滞留时间。上述案例借助模型求解, 通过目标函数可以得到集装箱的卸箱时间并实现集装箱与班列的

表6 班列最优编组数量

Tab.6 Table of optimal number of train formations

| 班列名称 | 开行时间 | 编组数量 |
|----------|------------------|------|
| 芦潮港—株洲北 | 2019-12-25 17:33 | 25 |
| 芦潮港—吉山 | 2019-12-25 20:00 | 25 |
| 芦潮港—大红门 | 2019-12-26 0:35 | 0 |
| 芦潮港—吐鲁番 | 2019-12-26 2:40 | 0 |
| 芦潮港—王家营西 | 2019-12-26 5:59 | 25 |
| 芦潮港—吐鲁番 | 2019-12-27 2:40 | 36 |
| 芦潮港—株洲北 | 2019-12-27 17:33 | 25 |
| 芦潮港—吉山 | 2019-12-27 20:00 | 25 |
| 芦潮港—大红门 | 2019-12-28 0:35 | 25 |
| 芦潮港—吐鲁番 | 2019-12-28 2:40 | 0 |
| 芦潮港—王家营西 | 2019-12-28 5:59 | 29 |
| 芦潮港—吐鲁番 | 2019-12-29 2:40 | 48 |
| 芦潮港—株洲北 | 2019-12-29 17:33 | 28 |
| 芦潮港—吉山 | 2019-12-29 20:00 | 43 |
| 芦潮港—大红门 | 2019-12-30 0:35 | 26 |
| 芦潮港—吐鲁番 | 2019-12-30 2:40 | 41 |
| 芦潮港—王家营西 | 2019-12-30 5:59 | 35 |

最优匹配，通过班列的开行时间和集装箱的卸箱时间进一步得到集装箱在港的平均滞留时间为 8.3 h，在一定程度上实现了“无缝衔接”。当研究周期前期的船舶较少时，由于运往株洲的集装箱数量较多，运往大红门的集装箱数量较少，通过优先转运运往株洲北、吉山的集装箱来降低集装箱的滞留成本，而开往大红门、吐鲁番的班列选择不开行来降低开行成本，研究周期后期的班列通过增加编组数量装载前期运往大红门的集装箱以缓解码头堆场的堆存压力，进而减少班列的开行成本。

4 结束语

针对集装箱海铁联运作业流程复杂的特点，分别从港口、港站的角度建立了以集装箱在港口的滞留时间最短和海铁联运班列开行成本最小的多目标整数规划模型，并用遗传算法对模型进行求解，同时考虑到港口和港站在堆场和运输工具方面的能力限制，将到港的集装箱进行合理分配，进而为码头装卸作业以及港站的班列开行方案设计提供决策支持。后续可以进一步研究集装箱班列的作业节点、甩挂计划、运行径路、到港箱流的波动性，以及船舶卸箱顺序与堆场作业协调优化等问题，从

多变量、多目标的角度对模型进行优化协同，更高效地促成港口、港站、班列合理的资源配置，进而更好地实现海铁联运的无缝衔接。

参考文献:

[1] HUQ, CORMAN F, WIEGMANS B, et al. A TabuSearch Algorithm to Solve the Integrated Planning of Container on an Inter-terminal Network Connected with a Hinterland Rail Network[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2018(91): 15-36.

[2] SCHEPLER X, BALEV S, MICHEL S, et al. Global Planning in a Multi-terminal and Multi-modal Maritime Container Port[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2017(100): 38-62.

[3] TIERNEY K, VOSS S, STAHLBOCK R. A Mathematical Model of Inter-terminal Transportation[J]. European Journal of Operational Research, 2014, 235(2): 448-460.

[4] ZHAO J, ZHU XU, LIU Y, et al. A Practical Model for Inbound Container Distribution Organization in Rail-Water Transshipping Terminal[J]. Journal of Control Science and Engineering, 2018(1): 1-11.

[5] 唐亚龙. 集装箱海铁联运班列开行方案研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2013.

[6] 王如义, 王慈光, 景云, 等. 定点发车模式中最小编成辆数的研究[J]. 铁道运输与经济, 2009, 31(8): 85-88.

WANG Ruyi, WANG Ciguang, JING Yun, et al. Study on the Minimum Number of Cars in Fixed-point Departure Mode[J]. Railway Transport and Economy, 2009, 31(8): 85-88.

[7] 李红雨. 基于差量成本的铁路货车集结模式分析研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.

[8] 王建军. 货车定点集结技术可行性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2007.

[9] 毕守锋. 铁路运营经济效益指标及其关联分析研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.

[10] 黄兴建, 王伟. 编组站开行欠轴列车的经济性研究[J]. 中国铁路, 2016(6): 43-46.

收稿日期: 2020-07-12
基金项目: 国家自然科学基金项目(41401120; 51409088)
责任编辑: 张婷钰