

# 基于箱流波动的集装箱中心站直达班列 开行方案优化

李冰, 边梦琳, 轩华

(郑州大学 管理学院, 河南 郑州 450001)

**摘要:** 研究一类契合箱流波动的铁路集装箱中心站直达班列开行方案优化问题。以班列始发集结车小时和沿途改编车小时消耗最小为目标, 考虑中心站改编能力和箱流组织方案唯一等限制, 利用统计时段内集装箱流日均值, 构建基于箱流日均数据的中心站直达班列开行方案优化模型。进而直接利用集装箱流波动数据, 构建基于箱流动态数据的中心站直达班列开行方案优化模型。然后开发概率约束的确定性转化方法, 并设计基于车流序列优选—更新—接续的元启发式求解过程。最后, 设计实验场景对箱流日均数据模型和箱流动态数据模型的中心站直达班列开行方案进行比对。结果表明: 集装箱流在 $\pm 10\%$ 、 $\pm 15\%$ 、 $\pm 20\%$ 和 $\pm 25\%$ 波动区间, 日均数据模型的稳定性分别为 77.2%、72.4%、68.4%和 51.6%, 动态数据模型的稳定性分别为 96.0%、92.8%、88.2%和 77.2%, 动态数据模型适应性更强。

**关键词:** 集装箱中心站; 直达班列; 开行方案; 列车改编

中图分类号: U292.3

文献标志码: A

## Optimization of Operation Scheme of Through Train from Container Central Station Considering Container Throughput Fluctuation

LI Bing, BIAN Menglin, XUAN Hua

(School of Management, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** The optimization of operation scheme of through freight train from container central station considering fluctuating container throughput is proposed. The objective function intends to minimize the total time of container accumulation and train reformation. The model considers some constraints including the station classification capacity, the classification tracks number, and the container flow formation scheme uniqueness. The

daily average container throughput is counted, and the formation plan of through freight train from container central station with certain container throughput is obtained. Then, the daily dynamic container throughput is directly adopted to establish the operation scheme of through freight train from container central station with fluctuating container throughput. Afterwards, a method of transforming random constraints to deterministic constraints is developed to deal with the daily dynamic container throughput, and a meta-heuristic based on filtering-updating-connecting wagon flow sequence is given to obtain the container train operation scheme. Finally, the experimental scenarios are given to test the through train operation scheme models with daily average container throughput and daily dynamic container throughput. Under the container throughput fluctuation range of  $\pm 10\%$ ,  $\pm 15\%$ ,  $\pm 20\%$ , and  $\pm 25\%$ , the feasibility measure of the model with daily average container throughput is respectively 77.2%, 72.4%, 68.4%, and 51.6%. However, the feasibility measure of the model with daily dynamic container throughput arrives at respectively 96.0%, 92.8%, 88.2%, and 77.2%. Obviously, the latter has more advantages.

**Keywords:** container central station; through train; operation scheme; train reformation

随着全球经济逐步复苏, 集装箱运输需求大增, 港口拥堵、一箱难求、运价大幅上涨, 在需求复苏、航运紧张和运价上涨三重压力下, 铁路集装箱班列成为保障供应链的重要支撑, 其开行数量大幅增长。

国际形势的瞬息万变使集装箱航运通道畅通性和运价稳定性无法得到保障, 进而导致铁路集装箱需求波动频繁。不稳定的集装箱需求势必会造成铁

收稿日期: 2023-01-12

基金项目: 国家社会科学基金(24BJY113)

第一作者: 李冰, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为运输组织优化。E-mail: lbings@zhu.edu.cn



论文  
拓展  
介绍

路用车量频繁变化,进而铁路管理部门需要不断调整班列开行方案以应对变化的运用车使用量。面对这一运输新形势,如何编制契合箱流波动情景下的铁路集装箱中心站直达班列开行方案、最大限度降低频繁变更班列开行方案对铁路运输管理工作带来的影响,成为当下亟待解决的难题。

集装箱班列开行方案组织优化方面的研究工作主要从不同目标设定与影响因素考虑的角度展开。彭其渊等<sup>[1]</sup>对影响集装箱班列编组计划制定的相关因素进行分析,建立节点站班列集结时间模型。闫海峰等<sup>[2]</sup>以箱小时消耗最小为目标,优化集装箱班列开行方案。李梦潇等<sup>[3]</sup>和柴甜甜等<sup>[4]</sup>以集装箱班列车小时消耗最小为目标构建数学模型,分别对中心站间班列、中心站和专办站间班列开行方案优化问题进行研究。江星雨等<sup>[5]</sup>以集装箱班列运输总成本最小为目标,研究直达班列开行方案的综合优化问题。兰泽康等<sup>[6]</sup>考虑车底和集装箱的周转,以运营费用最少为目标,研究中欧班列运输服务网络综合优化问题。闫伟等<sup>[7]</sup>分析了中欧班列铁路集装箱运输不同开行模式,并建立集装箱班列开行方案优化模型。Xia等<sup>[8]</sup>将集装箱日需求量划分为正常、拥挤和不足3种需求情景,以运输时间、剩余集装箱数和运行列车数量最小为目标,构建多目标开行方案优化模型。魏玉光等<sup>[9]</sup>针对我国集装箱运输组织模式现存问题,提出集装箱旅客化快捷运输组织模式,并对其可行性进行分析。夏阳<sup>[10-11]</sup>分别以运输成本最小、箱流换乘次数与运输成本之和最小为目标,探索集装箱旅客化运输组织模式下的中心站直达班列与专办站直达班列开行方案综合优化问题。张小强等<sup>[12]</sup>以运输收益最大化为目标,构建集装箱班列运价与开行决策综合优化模型。计明军等<sup>[13]</sup>对集装箱运输与定价联合优化问题进行研究,综合优化不同运输价格下的班列开行方案。

本文针对集装箱流波动现实,以中心站集装箱班列集结车小时与沿途改编车小时消耗最小为目标,考虑中心站改编能力和箱流组织方案唯一等约束,分别构建基于箱流日均数据和箱流动态数据的中心站直达班列开行方案组织优化模型。设计基于概率约束的确定性转化方法,并给出基于车流序列优选—更新—接续的元启发式求解策略。最后设计实验场景对所提模型与方法进行测试比对。

## 1 问题描述

### 1.1 铁路集装箱运输市场分析

我国铁路集装箱运输市场中,集装箱与其他货物混编的普通货物列车仍然是集装箱运输的主体部分。利用直达班列发送集装箱的数量仅占铁路集装箱发送总量的20%左右,尚有较大提升空间。

随着我国铁路货运场站基础设施的逐步完善和技术设备的更新改造,高附加值、特色化的百货运输市场逐步打开,集装箱发运量占货运装车总量比例逐步攀升,在很多车站,单日集装箱装车量纪录不断刷新。为了满足快速增长的集装箱运输需求,建设了数量众多的铁路集装箱专办站与中心站。铁路运输企业与稳定适箱货源企业建立战略联盟,组织开行基于大客户战略的铁路集装箱直达班列;与货代公司联合开展货源组织,开行基于物流合作的铁路集装箱直达班列;加强铁路运输与港口、航空的衔接,开行基于港航合作的联运集装箱直达班列;依托“一带一路”倡议,组织开行固定车次、线路、班期和运行时刻的国际集装箱直达班列。目前已经开行的中欧集装箱班列已通达欧洲20多个国家、超过200个城市。中俄、中亚、中老集装箱班列市场正在加速拓展。

### 1.2 铁路集装箱班列组织模式

办理集装箱班列的车站主要包括专办站和中心站。专办站分布在具有稳定集装箱货源的工业站和港湾站,配备有装卸搬运集装箱的机械设备、硬化场地及铁路专用线,但因不具备整列编解技术装备,只能办理本站箱流作业,无法形成吸引区,相对作业量较少。中心站分布在大型交通枢纽城市,具有整列编解技术装备和装卸仓储设施,作业量大,主要办理吸引区范围内集装箱业务,并吸收无法在专办站办理的集装箱流。目前我国共设置有北京、哈尔滨、沈阳、成都、重庆、西安、郑州、武汉、昆明、乌鲁木齐、兰州、上海、青岛、大连、宁波、天津、广州和深圳18个铁路集装箱中心站。由此形成了集装箱专办站直达班列和集装箱中心站直达班列2种主要的集装箱运输组织模式。

### 1.3 专办站集装箱直达班列

专办站直达班列是在货源地所在专办站,根据集装箱流组织情况安排密集装车,将大体去向相近的集装箱车组编入同一班列,到达卸车站后,本地车组办理卸车作业,未到达目的地的远程中转车组送往临近中心站,编入中心站集装箱班列完成接续运

输任务。

#### 1.4 中心站集装箱直达班列

中心站直达班列是将吸引区内车流、未被专办站直达班列吸收的车流、专办站直达班列到达目的卸车站解体后的远程中转车流,送至相邻中心站,进行集结等待,并将大体去向相近的车流以不同组合方式编入同一班列,待列车满轴后由中心站发出,到达目的中心站后办理列车解体,其中本地集装箱车组直接送往卸车站卸车,而未到达目的地的有调中转集装箱车组则在中心站继续集结等待编入后续列车,完成接续运输任务。

专办站直达班列虽然可节省沿途中转作业时间,但往往在始发站等待时间较长,只有在货源非常充足的地区才能组织开行,不具有辐射区,也无法服务沿线运输需求与经济发展,从而在整个铁路集装箱运输组织工作中所占比重较低。相较而言,集装箱中心站直达班列不仅是专办站直达班列的自然延伸,而且开行形式灵活,能有效集聚吸引区车流、吸引沿途车站车流,促进中心站区域与铁路沿线经济发展,从而成为了铁路集装箱运输组织工作中的主要组织模式。

## 2 模型建立

### 2.1 符号变量

为构建模型,引入以下集合、参量与变量。

#### 2.1.1 集合

$P$ 为集装箱中心站集合,记为 $P=\{p|p=1,2,\dots,\tilde{p}\}$ , $\tilde{p}$ 为集装箱中心站总数; $Q_p$ 为中心站 $p$ 的后方中心站集合,记为 $Q_p=\{q|q=1,2,\dots,\tilde{q}\}$ , $\tilde{q}$ 为中心站 $p$ 的后方站总数; $E_p$ 为中心站 $p$ 的前方中心站集合,记为 $E_p=\{e|e=1,2,\dots,\tilde{e}\}$ , $\tilde{e}$ 为中心站 $p$ 的前方站总数; $H$ 为统计时段,记为 $\{h|h=1,\dots,\tilde{h}\}$ , $\tilde{h}$ 为统计时段总数。

#### 2.1.2 参量

$\zeta_p$ 为中心站 $p$ 一昼夜最大改编货车数, $p \in P$ ;  $l_p$ 为中心站 $p$ 的改编能力利用系数,即中心站 $p$ 扣除预留改编能力后的折扣系数, $l_p \in [0,1]$ , $p \in P$ ;  $C_p$ 为中心站 $p$ 的货车集结参数, $p \in P$ ;  $t_p$ 为单位货车在中心站 $p$ 无改编通过节省的小时数, $p \in P$ ;  $\theta$ 为单位货车装载集装箱的数量; $m$ 为集装箱班列的平均编成辆数; $a_{h,ij}$ 为统计时段 $h$ 内由中心站 $i$ 产生并发往 $j$ 的集装箱

数, $i, j \in P, h \in H$ 。

#### 2.1.3 决策变量

$x_{ij}$ 为箱流 $a_{h,ij}$ 沿途无改编判别变量, $x_{ij}=1$ 表示箱流 $a_{h,ij}$ 随集装箱班列由中心站 $i$ 发往 $j$ ,沿途不改编,否则 $x_{ij}=0$ ;  $x_{k,ij}$ 为箱流 $a_{h,ij}$ 沿途改编判别变量, $x_{k,ij}=1$ 表示箱流 $a_{h,ij}$ 随集装箱班列由中心站 $i$ 出发,经 $k$ 站改编后随其他集装箱班列发往中心站 $j$ ,否则 $x_{k,ij}=0$ 。

### 2.2 基于箱流日均数据的中心站直达班列方案优化

#### 2.2.1 箱流—车流转换过程

为便于班列集结车小时和改编车小时计算,引入始发终到车流、实际车流和吸引车流3个中间变量,将原始箱流数据转换为车流数据。

$n_{h,ij}$ 为统计时段 $h$ 内由中心站 $i$ 产生并发往 $j$ 的始发终到车流量, $i, j \in P, h \in H$ ,显然 $n_{h,ij} = a_{h,ij} / \theta$ 。 $f_{h,ij}$ 为统计时段 $h$ 内一昼夜由中心站 $i$ 发往 $j$ 的实际车流量,由两部分组成,即中心站 $i$ 产生并发往 $j$ 的始发终到车流和 $i$ 后方站产生经 $i$ 改编发往 $j$ 的中转车流, $i, j \in P, h \in H$ ,显然 $f_{h,ij} = n_{h,ij} + \sum_{s \in Q_i} x_{i,sj} f_{h,sj}$ 。 $g_{h,ij}$ 为统计时段 $h$ 内中心站 $i$ 到 $j$ 去向一昼夜吸引车流,由三部分组成,即中心站 $i$ 产生并发往 $j$ 的始发终到车流、中心站 $i$ 产生经 $j$ 改编后并发往 $j$ 前方站的始发远程车流、中心站 $i$ 后方站产生经 $i$ 改编后发往 $j$ 及 $j$ 前方站的中转远程车流, $i, j \in P, h \in H$ ,显然 $g_{h,ij} = x_{ij} f_{h,ij} + \sum_{v \in E_j} x_{j,iv} f_{h,iv}$ 。

#### 2.2.2 日均数据计算

为便于模型求解,引入统计时段内箱流日均值 $\bar{a}_{ij}$ 、始发终到车流日均值 $\bar{n}_{ij}$ 、实际车流日均值 $\bar{f}_{ij}$ 和吸引车流日均值 $\bar{g}_{ij}$ 数据,从而解决动态变化的日箱流量无法处理的问题。这里, $\bar{a}_{ij} = \sum_{h \in H} a_{h,ij} / \tilde{h}$ , $\bar{n}_{ij} = \sum_{h \in H} n_{h,ij} / \tilde{h}$ , $\bar{f}_{ij} = \sum_{h \in H} f_{h,ij} / \tilde{h}$ , $\bar{g}_{ij} = \sum_{h \in H} g_{h,ij} / \tilde{h}$ 。

#### 2.2.3 模型构建

在组织开行集装箱班列的过程中,为避免班列欠轴运行,要求班列集结至一定辆数才能发出,这一集结过程会产生相应的集结车小时消耗;同时,如果集装箱班列需要在沿途中心站进行中转改编作业,会产生沿途改编车小时消耗。本文以集装箱中心站直达班列编成站集结车小时和改编站改编车小时消耗最小为目标,考虑中心站改编能力和箱流组织方案唯一等约束,构建基于箱流日均数据的中心站直

达班列开行方案优化(operation scheme model with average data, OSM-AD)模型,为

$$\min Z = \sum_{i \in P} \sum_{j \in P} C_i \cdot m \cdot x_{ij} + \sum_{i \in P} \sum_{j \in P} \sum_{k \in P} \bar{f}_{ij} \cdot x_{k,ij} \cdot t_k \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{i \in Q_k} \sum_{j \in E_k} \bar{f}_{ij} \cdot x_{k,ij} \leq \zeta_k l_k, k \in P \quad (2)$$

$$\bar{n}_{ij} = \bar{a}_{ij} / \theta, i, j \in P \quad (3)$$

$$\bar{f}_{ij} = \bar{n}_{ij} + \sum_{s \in Q_i} x_{i,sj} \cdot \bar{f}_{sj}, i, j \in P \quad (4)$$

$$x_{ij} + x_{k,ij} = 1, i \in Q_k, j \in E_k, k \in P \quad (5)$$

$$x_{k,ij} \leq x_{ik}, i \in Q_k, j \in E_k, k \in P \quad (6)$$

$$x_{ij}, x_{k,ij} \in \{0, 1\}, i, k, j \in P \quad (7)$$

模型中目标函数由两部分组成,第1部分为集装箱班列集结车小时消耗,第2部分为集装箱班列改编车小时消耗;式(2)为中心站改编能力约束,即中心站实际改编货车数不能超过该站的最大改编能力;式(3)为集装箱流与车流的转换约束;式(4)为车流接续归并约束,即实际车流数等于始发终到车流和中转改编车流之和;式(5)为箱流组织方案唯一性约束,即同一支箱流只能选择直达或改编一种组织方案;式(6)为箱流改编逻辑约束,即对于中心站*i*发往*j*的箱流,若选择在沿途中心站*k*改编,需要存在中心站*i*发往*k*的直达去向箱流;式(7)为决策变量取值约束。

### 2.3 基于箱流动态数据的中心站直达班列方案优化

为获得更好的模型求解效果,引入直接处理动态箱流数据的方法,对箱流日均数据模型中的目标函数设置和中心站改编能力约束进行改造。

#### 2.3.1 基于劣质解接受率的高耗时方案接受约束表达

考虑集装箱流的波动,设定波动箱流下优化模型的高耗时开行方案接受率为 $\eta$ ,对箱流日均数据模型的目标函数(1)进行改造。对统计时段内 $\tilde{h}$ 个开行方案按照耗时从低到高的升序排列,将位次占比在 $\eta$ 之后的开行方案定义为高耗时开行方案。进而给出高耗时开行方案接受约束,如式(8)所示:

$$\Pr \left\{ \sum_{i \in P} \sum_{j \in P} C_i \cdot m \cdot x_{ij} + \sum_{i \in P} \sum_{j \in P} \sum_{k \in P} f_{h,ij} \cdot x_{k,ij} \cdot t_k \leq G \right\} \geq \eta, h \in H \quad (8)$$

这里*G*为高耗时开行方案耗时值集合,即位次占比在 $\eta$ 之后的开行方案耗时值集合。式(8)表示利用箱流动态数据模型得到的开行方案耗时高于统计时段内 $\eta \cdot \tilde{h}$ 个开行方案耗时的概率不低于 $\eta$ 。为提高求解质量,采用最大允许范围内接受劣质解的策略,允

许一些高耗时开行方案存在。由此,设定较高的劣质解接受率,即 $\eta$ 的取值在 $[0.9, 1.0]$ 这一范围内。

#### 2.3.2 考虑箱流波动的中心站改编能力约束改造

设定开行方案中心站改编能力满足率为 $\lambda$ ,对箱流日均数据模型的中心站改编能力约束式(2)进行改造,如式(9)所示:

$$\Pr \left\{ \sum_{i \in Q_k} \sum_{j \in E_k} f_{h,ij} \cdot x_{k,ij} \leq \zeta_k l_k \right\} \geq \lambda, k \in P, h \in H \quad (9)$$

式(9)表示 $\tilde{h}$ 个统计时段内集装箱中心站直达班列开行方案满足中心站改编能力的概率不低于 $\lambda$ ,即满足中心站改编能力的开行方案数不少于 $\lambda \cdot \tilde{h}$ 。设定 $\lambda$ 取值范围为 $[0.9, 1.0]$ ,保证求得的开行方案更大程度上满足中心站改编能力要求。

综上,得到基于箱流动态数据的集装箱中心站直达班列开行方案优化模型(operation scheme model with dynamic data, OSM-DD),为

$$\min G \quad (10)$$

$$\text{s.t.} \quad \text{式(5)—(9)}$$

$$n_{h,ij} = a_{h,ij} / \theta, i, j \in P, h \in H \quad (11)$$

$$f_{h,ij} = n_{h,ij} + \sum_{s \in Q_i} x_{i,sj} \cdot f_{h,sj}, i, j \in P, h \in H \quad (12)$$

式(10)表示取耗时值最低的高耗时开行方案为箱流波动模型的最优开行方案;式(11)表示统计时段*h*内集装箱流与车流的转换约束;式(12)表示统计时段*h*内车流接续归并约束。

### 2.4 箱流动态数据模型的概率约束确定性转化

在箱流动态数据模型中,约束式(8)和(9)表述为随机约束违反概率形式,无明晰的数学解析表达式,造成模型无法直接求解。故对箱流数据进行扩充,并基于高耗时方案的接受率和中心站改编能力满足率,将概率约束式进行确定性转化。

#### 2.4.1 基于离散均匀分布的箱流数据扩充

考虑到统计时段内难以获取足够数量的集装箱流数据,故采用数值模拟方法进行数据扩充。

步骤1 选取中心站*i*到中心站*j*的箱流数据 $a_{h,ij}$ ,统计其在*H*时段内的最小箱流量 $u_1$ 和最大箱流量 $u_2$ 。因离散均匀分布具有各离散取值点在取值区间内发生概率相同的特性,故利用该分布描述随机变量 $a_{h,ij}$ 的概率分布,记为 $a_{h,ij} \sim U(u_1, u_2)$ 。

步骤2 随机生成 $\tilde{R}$ 个 $[0, 1]$ 之间的随机数,记为 $R = \{r | 0 \leq r \leq 1\}$ 。 $\tilde{R}$ 为随机数的个数,要求 $\tilde{R} \gg \tilde{h}$ 。

步骤3 利用离散均匀分布临界值 $u_1$ 和 $u_2$ ,使用公式 $a_{h,ij} = ru_1 + (1-r)u_2$ 模拟生成 $\tilde{R}$ 个新的箱流数

据  $a_{r,ij}$ , 进而得到波动箱流扩充数据集, 记为  $A_R$ 。

### 2.4.2 基于高耗时方案接受率的目标函数处理

设置高耗时方案接受率, 保证箱流动态数据模型求得的高耗时方案在一定程度上被采用。并基于高耗时方案接受率计算开行方案对扩充数据集的最小高耗时目标函数值。

步骤 1 根据高耗时开行方案接受率  $\eta$  计算扩充波动箱流接受数。令  $\omega = \lceil \eta \cdot \tilde{R} \rceil$ ,  $\lceil \eta \cdot \tilde{R} \rceil$  为不小于  $\eta \cdot \tilde{R}$  的最小正整数。

步骤 2 将集合  $A_R$  中  $\tilde{R}$  个箱流扩充数据依次代入箱流日均数据模型的目标函数式(1), 计算目标函数值, 记为  $\{Z'_1, \dots, Z'_R\}$ 。

步骤 3 将目标函数值从小到大排序, 记为  $\{Z'_1, \dots, Z'_\omega, \dots, Z'_R\}$ , 其中  $\{Z'_1, \dots, Z'_\omega\}$  为高耗时方案目标函数值, 输出最小高耗时方案目标函数值  $Z'_\omega$ 。

### 2.4.3 基于扩充数据集的方案改编能力满足率计算

为判断开行方案满足中心站改编能力的概率是否达到预期标准, 采用以下步骤计算方案改编能力约束满足率。

步骤 1 将需计算改编能力满足率的开行方案代入箱流日均数据模型的约束式(2)。

步骤 2 依次从扩充箱流数据集  $A_R$  中选取箱流数据  $a_{r,ij}$ , 代入箱流日均数据模型的约束式(2), 判断是否满足中心站改编能力约束, 并记录满足车站改编能力约束的扩充箱流数据数。即判断每次代入的箱流数据  $a_{r,ij}$  是否在车站的改编能力范围内。

步骤 3 计算开行方案车站改编能力满足率, 即满足中心站改编能力约束的扩充箱流数据数在总扩充箱流数据  $\tilde{R}$  中的占比。

## 3 优化求解策略

设计基于车流序列优选—更新—接续的元启发式 (Meta-heuristic based on filtering-updating-connecting wagon flow sequence, MH&FUC) 对箱流日均数据和动态数据模型进行求解。该策略首先生成车流序列发送方案集合; 进而利用设定的优选规模, 进行车流序列发送方案选取, 生成车流序列优选发送方案集; 然后利用基于车流片段互换的一次更新和基于自扰动的二次更新完成车流序列的迭代更新; 最后依据无改编运行最远原则将其转化为车流序列接续方案, 并根据车小时消耗筛选出符合预期满足率水平的车流序列接续方案, 即为集装箱班列开行方案。

### 3.1 车流序列初始发送方案集生成

(1) 单支车流的无改编发送方案表达。将箱流转换为车流后, 箱流的沿途无改编判别变量  $x_{ij}$  和沿途改编判别变量  $x_{k,ij}$  同样可用来判别转换后的车流采用何种方式运输。故用沿途无改编判别变量  $x_{ij}$  和沿途改编判别变量  $x_{k,ij}$  表述车流随集装箱班列由中心站  $i$  无改编发往中心站  $j$ 。为便于问题表述, 车流统一记为  $n_{ij}$ , 求解箱流日均数据模型时表示日均数据, 求解动态数据模型时表示动态数据, 以下步骤采取相同的表述形式。如图 1 所示。

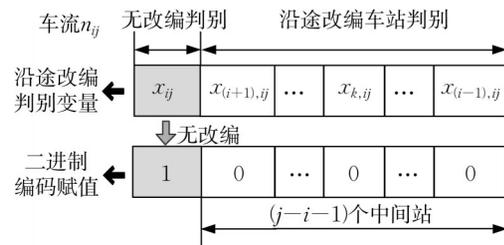


图 1 单支车流无改编发送方案编码表达

Fig. 1 Encoding scheme of wagon flow routing without reclassification on its itinerary

(2) 单支车流的单次改编发送方案表达。车流  $n_{ij}$  随集装箱班列由中心站  $i$  出发, 在途中站  $k$  改编后发往中心站  $j$ , 如图 2 所示。

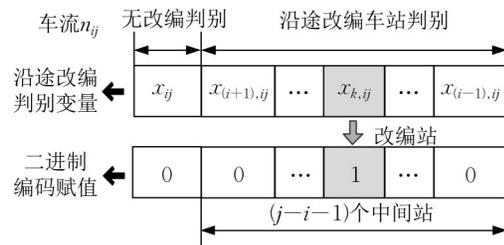


图 2 单支车流途中单次改编发送方案编码表达

Fig. 2 Encoding scheme of wagon flow routing with one reclassification on its itinerary

(3) 基于编成站与目的站的车流序列。任意 2 个集装箱中心站间均可产生 O-D 车流, 则  $\tilde{p}$  个中心站间最多可产生  $C_{\tilde{p}}^2 = \pi$  支车流。对  $\pi$  支车流按照编成站与目的站的前后衔接顺序进行排列, 如图 3 所示。

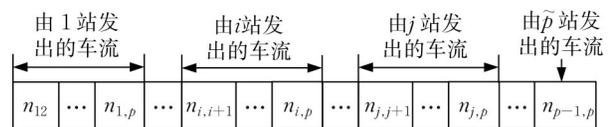


图 3 基于编成站与目的站的车流序列集

Fig. 3 Wagon flow sequence set sorted by the order of departure station and destination station

(4) 车流序列发送方案表达。从车流序列中依次选取单支车流  $n_{ij}$ , 并按式(1)中方法进行无改编发送方案编码表达, 或按式(2)中方法进行单次改编发送方案编码表达, 从而生成车流序列发送方案。

(5) 车流序列发送方案集合生成。设定车流序列发送方案规模为  $\aleph$ 。利用式(4)生成车流序列发送方案, 并代入中心站改编能力约束式(2), 判断方案是否可行。若方案可行, 则保留至初始方案集合, 否则重新生成车流序列发送方案。重复上述过程, 直至生成  $\aleph$  个发送方案, 构成车流序列发送方案集合  $A$ 。

### 3.2 车流序列优选发送方案集生成

(1) 初始化参数设置。设置迭代次数  $\Omega$ , 用  $\delta$  标记当前执行次数, 当  $\delta=1$  时,  $X(\delta)=A$ 。

(2) 车流序列发送方案优选。日均数据模型求解时, 设定优选集合规模为  $\xi$ , 将车流序列发送方案集  $X(\delta)$  中各车流序列代入式(1), 计算其目标函数值并按照从小到大的升序排列, 将前  $\xi$  个函数值对应的方案选入优选集合, 记为  $X_{\xi}(\delta)$ 。

动态数据模型求解时, 设定优选集合规模为  $\xi$ , 利用2.4节的方法计算  $X(\delta)$  中各车流序列的最小高耗时目标函数值。给出方案优选概率, 按顺序累进计算  $X(\delta)$  中各方案的最小高耗时目标函数倒数累进值与所有方案倒数总值的比值, 将累进值与总值比值大于优选概率的最后一个方案选入优选集合。执行优选步骤  $\xi$  次, 形成优选方案集合  $X_{\xi}(\delta)$ 。

### 3.3 车流序列更新优化

(1) 基于车流片段互换的一次更新。设定车流片段互换率为  $\rho$ 。从优选方案集合  $X_{\xi}(\delta)$  中随机选取2个车流序列并确定相同位置的车流片段, 生成  $[0, 1]$  之间的随机数与方案互换率比较。若小于互换率  $\rho$ , 则交换车流片段编码方案。对优选集合  $X_{\xi}(\delta)$  中其余方案均执行相同操作, 得到一次更新车流序列集合  $X_{1,\xi}(\sigma)$ 。

(2) 基于自扰动的车流序列二次更新。设定方案自扰动率  $\epsilon$ 。从一次更新集合  $X_{1,\xi}(\sigma)$  中逐一选取车流序列并随机确定车流片段, 生成  $[0, 1]$  之间的随机数与方案自扰动率比较。若小于自扰动率  $\epsilon$ , 则改变所选车流片段编码方案中1的位置, 同时确保该支车流片段的编码中仅有一个1。对一次更新集合  $X_{1,\xi}(\sigma)$  中其余方案均执行相同操作, 得到二次更新车流序列集合  $X_{2,\xi}(\sigma)$ 。

### 3.4 车流序列接续方案生成

(1) 可行车流序列集合生成。日均数据模型求解时, 二次更新车流序列集合  $X_{2,\xi}(\sigma)$  即为可行车流

序列集合, 记为  $X_{\#,\xi}(\sigma)$ 。动态数据模型求解时, 利用车流扩充数据确定其可行车流序列集合。从二次更新方案集合  $X_{2,\xi}(\sigma)$  中依次选取车流序列, 并从箱流扩充数据集  $A_R$  中选择扩充箱流数据  $a_{r,ij}$ , 代入中心站改编能力约束式(2), 计算基于扩充数据集的箱流序列车站改编能力满足率, 选取满足率大于中心站改编能力满足率  $\lambda$  的车流序列进入可行车流序列集合, 记为  $X_{\#,\xi}(\sigma)$ 。

(2) 基于无改编运行最远的车流接续方案。从  $X_{\#,\xi}(\sigma)$  中依次选取车流序列, 依据无改编运行最远原则形成车流接续发送方案, 即车流  $n_{ij}$  在  $k$  站改编后, 依据无改编运行最远原则选取  $k$  站始发车流进行合并, 从而形成车流序列接续方案集合  $X_{\#,\xi}(\sigma)$ , 如图4所示。

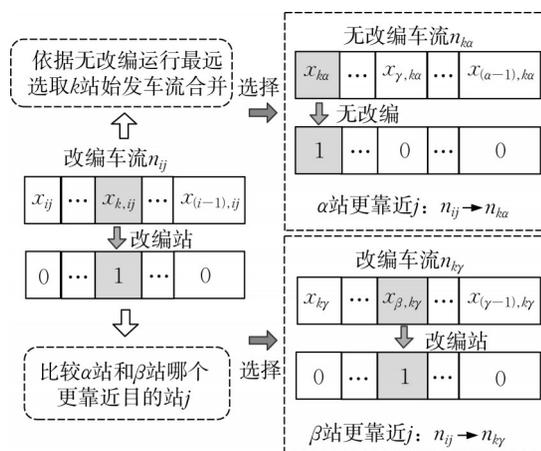


图4 基于无改编运行最远的车流序列接续方案

Fig. 4 Wagon flow sequence connection scheme based on farthest running distance without reclassification on its itinerary

(3) 基于车小时消耗的最优方案筛选。将车流序列接续方案集合  $X_{\#,\xi}(\sigma)$  中各方案代入目标函数式(1)计算车小时消耗, 选取车小时消耗最小的车流序列接续方案, 进入最优方案集合, 记为  $X_{\text{best}}(\sigma)$ 。

(4) 车流序列接续方案输出。当  $\delta < \Omega$  时, 令  $\delta = \delta + 1$ ,  $X(\delta) = X_{2,\xi}(\sigma - 1)$ , 转至3.2节的车流序列发送方案优选。否则算法停止, 输出最优方案集合  $X_{\text{best}}(\sigma)$  中车小时消耗最小的车流序列接续方案  $X_{\text{best}}$ , 即为集装箱班列开行方案。

## 4 实验验证及结果分析

### 4.1 实验场景

构建由9个集装箱中心站组成的实验路网, 各

中心站对应编号为1~9,如图5所示。为便于更直观地体现编制集装箱班列时考虑箱流波动实际的必要性,假设路网通过能力不受限制。各中心站集结系数、无改编通过节省时间及改编能力如表1所示;统计时段内各O-D间箱流日均值如表2所示。集装箱班列编成辆数为50,货车装载集装箱数为2。

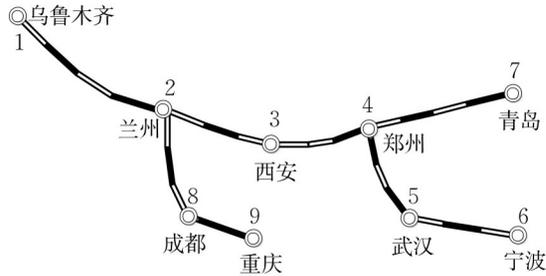


图5 实验测试路网

Fig. 5 Railway network for testing experiment

#### 4.2 箱流数据波动区间设置

因统计时段内获得的箱流数据不足,故对其进行扩充。以表2所示的日均集装箱数为均值分别设置±10%、±15%、±20%和±25%扩充区间,以离散均匀分布函数表述集装箱流波动情况,如表3所示。

进而,设置箱流数据波动规模 $\tilde{R}=100$ ,利用基

表1 中心站相关参数

Tab. 1 Relevant parameters of container central station

中心站编号	集结系数	无改编通过节省时间/h	改编能力/(车·d <sup>-1</sup> )
1	10.5	2.3	200
2	11.0	2.5	220
3	10.0	2.0	170
4	11.2	1.5	200
5	10.1	2.5	210
6	10.3	2.0	190
7	10.7	2.4	180
8	11.1	3.0	200
9	10.0	2.1	210

表2 各O-D间统计时段内集装箱流均值

Tab. 2 Average value of container throughput between O and D pair in statistical time period

单位:箱·d<sup>-1</sup>

箱流	均值	箱流	均值	箱流	均值
$\bar{a}_{1,2}$	110	$\bar{a}_{2,3}$	100	$\bar{a}_{3,5}$	104
$\bar{a}_{1,3}$	136	$\bar{a}_{2,4}$	114	$\bar{a}_{3,6}$	100
$\bar{a}_{1,4}$	100	$\bar{a}_{2,5}$	130	$\bar{a}_{3,7}$	120
$\bar{a}_{1,5}$	106	$\bar{a}_{2,6}$	120	$\bar{a}_{4,5}$	126
$\bar{a}_{1,6}$	124	$\bar{a}_{2,7}$	104	$\bar{a}_{4,6}$	116
$\bar{a}_{1,7}$	120	$\bar{a}_{2,8}$	90	$\bar{a}_{4,7}$	100
$\bar{a}_{1,8}$	116	$\bar{a}_{2,9}$	100	$\bar{a}_{5,6}$	122
$\bar{a}_{1,9}$	110	$\bar{a}_{3,4}$	110	$\bar{a}_{8,9}$	108

表3 不同波动区间下的箱流分布

Tab. 3 Distribution of container throughput in different fluctuation ranges between O and D pair (unit: container per day)

单位:箱·d<sup>-1</sup>

箱流	±10%波动	±15%波动	±20%波动	±25%波动
$a_{1,2}$	U(99,121)	U(93,127)	U(88,132)	U(82,138)
$a_{1,3}$	U(122,150)	U(116,156)	U(109,163)	U(102,170)
$a_{1,4}$	U(90,110)	U(85,115)	U(80,120)	U(75,125)
$a_{1,5}$	U(95,117)	U(90,122)	U(85,127)	U(79,133)
$a_{1,6}$	U(112,136)	U(105,143)	U(99,149)	U(93,155)
$a_{1,7}$	U(108,132)	U(102,138)	U(96,144)	U(90,150)
$a_{1,8}$	U(104,128)	U(99,133)	U(93,139)	U(87,145)
$a_{1,9}$	U(99,121)	U(93,127)	U(88,132)	U(82,138)
$a_{2,3}$	U(90,110)	U(85,115)	U(80,120)	U(75,125)
$a_{2,4}$	U(103,125)	U(97,131)	U(91,137)	U(85,143)
$a_{2,5}$	U(117,143)	U(110,150)	U(104,156)	U(97,163)
$a_{2,6}$	U(108,132)	U(102,138)	U(96,144)	U(90,150)
$a_{2,7}$	U(94,114)	U(88,120)	U(83,125)	U(78,130)
$a_{2,8}$	U(81,99)	U(76,104)	U(72,108)	U(67,113)
$a_{2,9}$	U(90,110)	U(85,115)	U(80,120)	U(75,125)
$a_{3,4}$	U(99,121)	U(93,127)	U(88,132)	U(82,138)
$a_{3,5}$	U(94,114)	U(88,120)	U(83,125)	U(78,130)
$a_{3,6}$	U(90,110)	U(85,115)	U(80,120)	U(75,125)
$a_{3,7}$	U(108,132)	U(102,138)	U(96,144)	U(90,150)
$a_{4,5}$	U(113,139)	U(107,145)	U(101,151)	U(94,158)
$a_{4,6}$	U(104,128)	U(99,133)	U(93,139)	U(87,145)
$a_{4,7}$	U(90,110)	U(85,115)	U(80,120)	U(75,125)
$a_{5,6}$	U(110,134)	U(104,140)	U(98,146)	U(91,153)
$a_{8,9}$	U(97,119)	U(92,124)	U(87,129)	U(81,135)

于离散均匀分布的箱流数据扩充方法对各中心站间 24 支箱流  $a_{1,2} \sim a_{8,9}$  进行扩充,从而得到波动数据分布如图 6—9 所示。图中,各支箱流的箱线图顶端线、中间线和底端线分别表示箱流波动数据的最大值、中位数和最小值。分别给出基于箱流日均数据模型的班列开行方案优化实验和基于箱流动态数据模型的班列开行方案优化实验的 2 组测试。

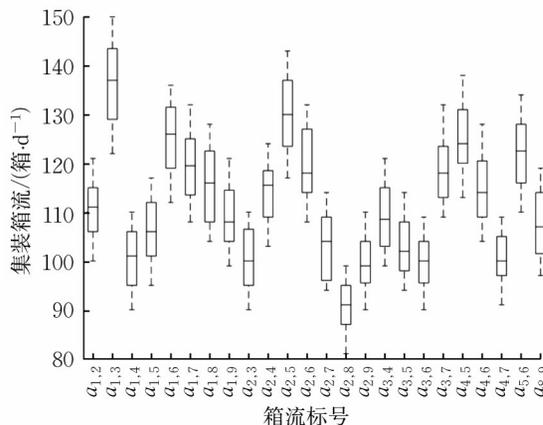


图 6 基于±10%波动区间的箱流数据分布

Fig. 6 Distribution illustration of container throughput within a fluctuation range of  $\pm 10\%$  between O and D pair

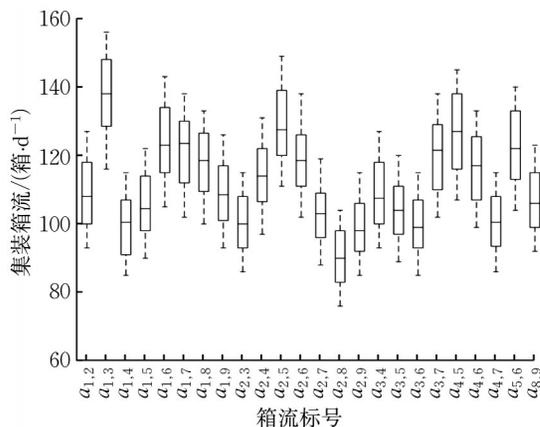


图 7 基于±15%波动区间的箱流数据分布

Fig. 7 Distribution illustration of container throughput within a fluctuation range of  $\pm 15\%$  between O and D pair

#### 4.3 基于箱流日均数据模型的班列开行方案

利用 Microsoft Visual C++ 对算法进行编程,在 Intel(R) Core(TM) i5-8250U CPU(1.60GHz) 的微机运行,初始车流序列发送方案集合规模  $\approx$  和优选集合规模  $\xi$  均为 100、最大迭代次数  $\Omega$  为 100、箱流片段互换率  $\rho$  为 0.9、自扰率  $\varepsilon$  为 0.1。

将表 2 中箱流均值代入箱流日均数据模型,利

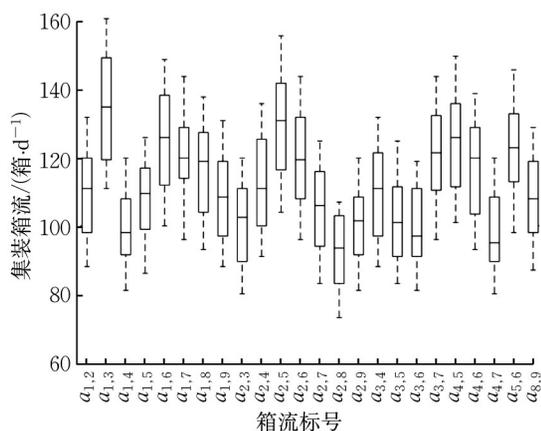


图 8 基于±20%波动区间的箱流数据分布

Fig. 8 Distribution illustration of container throughput within a fluctuation range of  $\pm 20\%$  between O and D pair

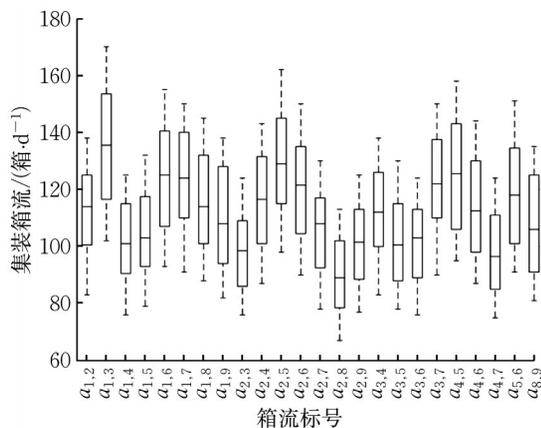


图 9 基于±25%波动区间的箱流数据分布

Fig. 9 Distribution illustration of container throughput within a fluctuation range of  $\pm 25\%$  between O and D pair

用基于车流序列优选—更新—接续的元启发式 (MH&FUC) 求解问题,得到集装箱中心站直达班列开行方案如表 4 所示,相应的开行方案示意图如图 10 所示。此开行方案对应的集装箱班列集结和改编时间消耗为 9 480.5 车·h。

按表 3 给出的集装箱流  $\pm 10\%$ 、 $\pm 15\%$ 、 $\pm 20\%$  和  $\pm 25\%$  波动 4 个测试区间,对箱流日均数据模型所得开行方案的稳定性(即开行方案的路网能力满足率)进行测试评估。利用波动箱流扩充数据集,计算方案中心站改编能力满足率,测试结果如表 5 所示。由表 5 可知,随着箱流波动幅度增大,箱流日均数据模型所求开行方案的稳定性快速下降,即开行方案的车站改编能力满足率越来越小。

表 4 箱流日均数据模型对应的班列开行方案

Tab. 4 Train operation scheme obtained by solving OSM-AD

列车编号	O—D 区间	车流组合	开行频次/(列·d <sup>-1</sup> )	开行间隔/(h·列 <sup>-1</sup> )
1	1—2	$n_{12}$	2	12.0
2	1—3	$n_{13}+n_{14}$	3	8.0
3	1—5	$n_{15}$	2	12.0
4	1—6	$n_{16}$	2	12.0
5	1—7	$n_{17}$	2	12.0
6	1—8	$n_{18}+n_{19}$	3	8.0
7	2—3	$n_{23}+n_{24}+n_{27}$	4	6.0
8	2—5	$n_{25}+n_{26}$	3	8.0
9	2—8	$n_{28}+n_{29}$	2	12.0
10	3—4	$n_{34}+n_{14}+n_{24}$	4	6.0
11	3—5	$n_{35}+n_{36}$	3	8.0
12	3—7	$n_{37}+n_{27}$	3	8.0
13	4—5	$n_{45}+n_{46}$	3	8.0
14	4—7	$n_{47}$	1	24.0
15	5—6	$n_{56}+n_{26}+n_{36}+n_{46}$	5	4.8
16	8—9	$n_{89}+n_{19}+n_{29}$	4	6.0

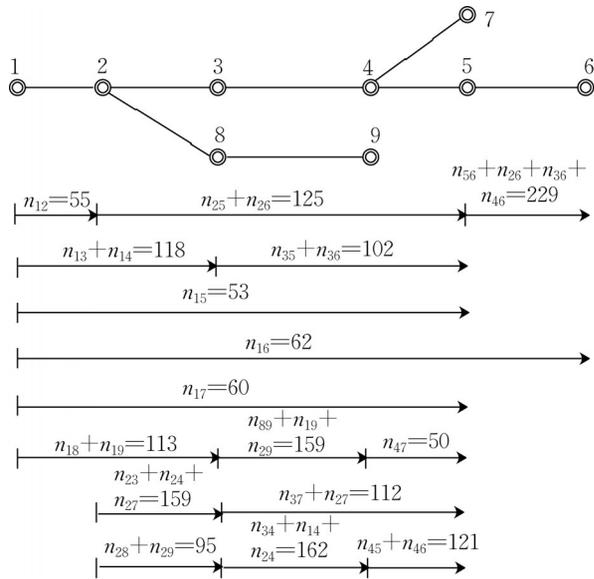


图 10 箱流日均数据模型对应的班列开行方案示意

Fig. 10 Illustration of train operation scheme obtained by solving OSM-AD

表 5 不同箱流数据波动区间下日均数据模型的稳定性

Tab. 5 Stability measure of OSM-AD in different container flow data fluctuation ranges

箱流数据波动区间	箱流日均数据模型稳定性/%
±10%	77.20
±15%	72.40
±20%	68.40
±25%	51.60

4.4 基于箱流动态数据模型的班列开行方案

将±10%区间箱流波动数据导入动态数据模型,设置中心站改编能力满足率λ为0.9,高耗时方

案接受率η为0.95,其他参数设置同箱流日均数据模型。

利用波动箱流扩充数据集,对箱流动态数据模型进行确定性转化,进而利用基于车流序列优选—更新—接续的元启发式(MH&FUC)求解问题,得到中心站直达班列开行方案如表6所示,相应的开行方案示意图如图11所示。该开行方案对应集装箱班列集结和改编时间消耗为10 694车·h。

表 6 箱流波动数据模型对应的班列开行方案

Tab. 6 Train operation scheme obtained by solving OSM-DD

列车编号	O—D 区间	车流组合	开行频次次/(列·d <sup>-1</sup> )	开行间隔/(h·列 <sup>-1</sup> )
1	1—2	$n_{12}$	2	12
2	1—3	$n_{13}+n_{16}$	3	8
3	1—4	$n_{14}+n_{15}+n_{17}$	4	6
4	1—8	$n_{18}+n_{19}$	3	8
5	2—3	$n_{23}+n_{26}$	3	8
6	2—4	$n_{24}+n_{27}$	3	8
7	2—5	$n_{25}$	2	12
8	2—8	$n_{28}+n_{29}$	2	12
9	3—4	$n_{34}$	1	24
10	3—5	$n_{35}$	2	12
11	3—6	$n_{36}+n_{16}+n_{26}$	4	6
12	3—7	$n_{37}$	2	12
13	4—5	$n_{45}+n_{15}+n_{46}$	4	6
14	4—7	$n_{47}+n_{17}+n_{27}$	4	6
15	5—6	$n_{56}+n_{46}$	3	8
16	8—9	$n_{89}+n_{19}+n_{29}$	4	6

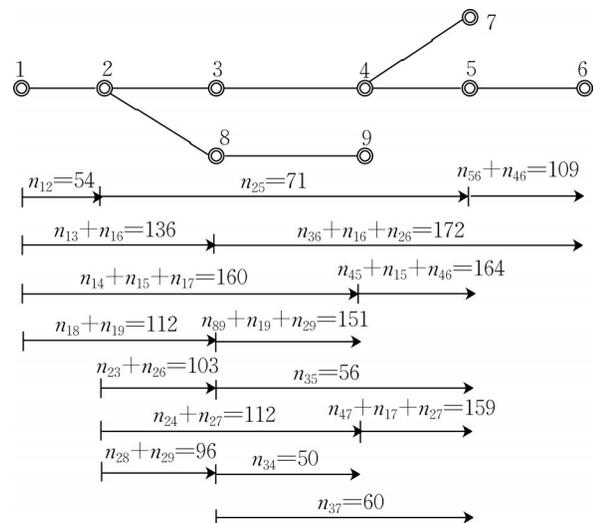


图 11 箱流波动数据模型对应的班列开行方案示意

Fig. 11 Illustration of train operation scheme obtained by solving OSM-DD

同样以表3给出的集装箱流±10%、±15%、±20%和±25%波动4个测试区间,对箱流动态数

据模型所求开行方案的稳定性进行测试。利用波动箱流扩充数据集,计算方案车站改编能力满足率,测试结果如表7所示。由表7可知,随着箱流波动幅度增大,箱流动态数据模型所求开行方案的稳定性能保持更高的水平。

**表7 不同箱流数据波动区间下动态数据模型的稳定性**  
**Tab.7 Stability measure of OSM-DD in different container flow data fluctuation ranges**

箱流数据波动区间	箱流动态数据模型稳定性/%
±10%	96.00
±15%	92.80
±20%	88.20
±25%	77.20

进一步对比表5和表7中测试结果可知:在相同实验环境下,箱流日均数据模型与箱流动态数据模型相比,后者的开行方案稳定性更高。以±10%波动区间为例,箱流日均数据模型的开行方案稳定性为77.2%,箱流动态数据模型的开行方案稳定性为96%,后者相对前者稳定性提高18.8%。因此,编制集装箱班列开行方案时,箱流动态数据模型得到的方案更能适应实际工作需要,降低班列开行方案与实际工作之间的偏差。

#### 4.5 开行方案稳定性与数据波动区间的关系

将±10%、±15%、±20%和±25%区间箱流波动数据导入动态数据模型,分别求出列车开行方案,并利用不同波动区间数据对日均数据模型与动态数据模型的开行方案稳定性进行测试评估。每组波动区间数据进行10次测试,取平均值记入表8。由数据可知:箱流动态数据模型导入的箱流波动区间越大,所得开行方案的适应性越高。故在编制集装箱班列开行方案时,导入更大波动区间箱流数据可有效提高开行方案适应度。

**表8 不同箱流数据波动区间下的开行方案稳定性**  
**Tab.8 Comparison of train operation scheme obtained by solving OSM-AD and OSM-DD in different container flow data fluctuation ranges**

采用模型	箱流波动 ±10%	箱流波动 ±15%	箱流波动 ±20%	箱流波动 ±25%
日均数据模型	77.20	72.40	68.40	51.60
±10%波动数据模型	96.00	92.80	88.20	77.20
±15%波动数据模型	100.00	98.80	95.40	89.20
±20%波动数据模型	100.00	100.00	98.90	95.80
±25%波动数据模型	100.00	100.00	100.00	99.20

## 5 结语

研究一类基于箱流波动的集装箱中心站直达班列开行方案优化问题。以班列始发集结和沿途改编时间消耗最少为目标,考虑中心站改编能力和箱流组织方案唯一等约束,利用统计时段内集装箱流日均值,构建箱流日均数据模型OSM&AD。在此基础上,又构建了直接利用箱流波动数据的动态数据模型OSM&DD。为求解动态数据模型并提高其模型适用度,以离散均匀分布对箱流数据进行扩充,并对动态数据模型中的概率约束进行确定性转化。进而设计基于车流序列优选—更新—接续的元启发式(MH&FUC)求解策略。最后设计实验场景对所提模型与方法进行测试比对,结果表明箱流动态数据模型适应性更强。

#### 作者贡献声明:

李冰:设计研究思路和论文框架,负责建模和算法设计,指导论文撰写。

边梦琳:算法的编程实现,完成实验设计与实施,负责论文文字与图表修改完善。

轩华:模型构建与算法设计指导。

#### 参考文献:

- [1] 彭其渊,闫海峰,周勇. 集装箱班列编组计划相关因素分析[J]. 中国铁道科学,2003,24(5):121.  
PENG Qiyuan, YAN Haifeng, ZHOU Yong. Analysis of factors relevant to formation plan of container blocks [J]. China Railway Science, 2003, 24(5): 121.
- [2] 闫海峰,彭其渊,谭云江. 结点间集装箱班列开行方案优化模型及算法[J]. 中国铁道科学,2008,29(1):97.  
YAN Haifeng, PENG Qiyuan, TAN Yunjiang. Optimization model and algorithm of block container trains formation plan between railway network container freight stations [J]. China Railway Science, 2008, 29(1): 97.
- [3] 李梦潇,徐石,马国忠. 铁路集装箱中心站班列编组方案数学模型[J]. 大连交通大学学报,2012,33(3):13.  
LI Mengxiao, XU Shi, MA Guozhong. Study on mathematical models of formation plan of block trains of railway container central stations [J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2012, 33(3): 13.
- [4] 柴甜甜,王慈光,杜连涛. 集装箱中心站和专办站开行方案研究[J]. 铁道货运,2010,28(4):43.  
CHAI Tiantian, WANG Ciguang, DU Liantao. Research on optimization of central container station and secondly handling station [J]. Railway Freight Transport, 2010, 28(4): 43.

(下转第1630页)