

考虑多编组站协调分工的枢纽重空车流组织优化

李冰[†], 邓素佳, 轩华

(郑州大学 管理工程学院, 郑州市 450001)

摘要: 本文研究一类考虑多编组站协调分工的枢纽重空车流组织优化问题。基于枢纽内各编组站到达、解体、集结、编组、发车及转站能力限制,以重空车流进站走行、出站走行、转站走行、解体及集结总费用最小化为目标,构建数学模型。鉴于传统算法求解大规模线性规划效率低下,故设计两阶段综合求解策略。该方法根据到发约束组生成列车-编组站匹配方案,利用解集编约束组对匹配方案进行初次调整,再利用转站约束对匹配方案进行二次调整,从而得到列车-编组站初始匹配方案集合。在此基础上,对列车-编组站匹配方案进行编码,设置优选因子并据此从初始匹配方案集合中筛选出优选方案集,给出嵌入替换-自变异-交互更新的异步循环启发式,从而完成对优选方案集的群体迭代寻优。设计实验场景,对模型的准确性以及所提方法的有效性进行验证。

关键词: 铁路枢纽; 编组站; 重空车; 车流组织; 优选方案集; 异步更新

中图分类号: N945

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2021.1002

Heavy and empty wagon flow assignment with work division among multi-marshalling stations in railway terminal

LI Bing[†], DENG Sujia, XUAN Hua

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

Abstract: The heavy and empty wagon flow assignment with work division among multi-marshalling stations in railway terminal is presented. The problem is formulated as a linear programming model which considers some constraints indicating train arrival and departure, train breakup and makeup, wagons accumulation and wagons transshipping between different marshalling stations. The objective function makes minimization of the total cost of heavy and empty wagons entering, leaving, transshipping and accumulation. Using traditional method for solving the large scale linear programming model is difficult and inefficient. A novel two-stage comprehensive optimization procedure is given and is abbreviated as TSCOP. We propose a solving procedure to match train and marshalling station. The matching scheme is given by the capacity constraints group denoting train arrival and departure, and then the matching scheme is firstly updated by the capacity constraints group denoting train breakup, accumulation and makeup. And then the matching scheme is secondly updated by the capacity constraint denoting wagons transshipping. So the initial matching scheme set can be obtained. Moreover the matching scheme is coded as natural number sequence. The selection ratio is given and is adopted to choose a certain number of schemes to set up the filtered scheme set. An asynchronous iteration heuristic with replacing, variation and exchange operation is provided to find the optimal matching scheme from the filtered scheme set. The experimental scenarios are given to test the accuracy of the model and the effectiveness of the proposed heuristic.

Keywords: railway terminal; marshalling station; heavy and empty wagon; wagon flow assignment; the filtered scheme set; asynchronous iteration heuristic

0 引言

铁路枢纽是庞大而复杂的系统,是国家交通运输网的重要组成部分。在具有大量客货流发生、消失和中转的大城市、大工业区都可能形成铁路枢纽。枢纽系统中的列流和车流是系统的主动实体,编组

站和装卸站等设备为被动实体。枢纽车流通过路网干线大运转列车接入编组站,然后在编组站办理有调中转和无调中转作业、在装卸站办理本地作业车取送与装卸作业,进而组成新的大运转列车发往路网。枢纽车流组织的主要任务就是对编组站、装卸

收稿日期: 2021-06-08; 修回日期: 2021-10-27.

基金项目: 河南省教育厅哲学社会科学研究重大项目(2022-YYZD-24); 河南省哲学社会科学规划项目(2021BJJ087); 河南省科技攻关计划项目(202102310310); 国家自然科学基金项目(U1604150, U1804151).

[†]通讯作者. E-mail: lbings@zzu.edu.cn.

站所担负的各项工作进行协调分配,以达到减少车辆重复改编、降低运营成本、提升枢纽效率的目标。

目前对铁路枢纽车流组织的研究工作主要集中在面向单编组站铁路枢纽的小运转列车开行、本地作业车取送及枢纽日常工作组织等方面,对拥有多编组站的大型铁路枢纽的研究工作开展相对不足。

铁路枢纽小运转列车开行方面,严余松等^[1]研究小运转列车运行方案和径路选择协同优化问题,以列车运行、车流等待消耗最小为目标建立模型,并用遗传算法求解。毕明凯等^[2]研究枢纽小运转列车径路优化问题,以列车运营成本和货物装卸费用最小化为目标构建模型,并用 CPLEX 软件求解。严余松等^[3]通过分析枢纽小运转列车组织原则,给出了构建网络流模型的方法和求解步骤。黎浩东等^[4]研究枢纽内班列车流组织优化问题,基于班列车流组织服务网络构建模型,并利用 CPLEX 软件求解。李冰等^[5]研究枢纽小运转货物作业系统优化问题,以调机早到等待和晚到惩罚成本、运营成本最小化为目标构建模型,并给出启发式求解策略。

铁路枢纽作业车取送方面,郭垂江^[6]研究取送车调车作业计划编制问题,以调机总走行时间最小为优化目标,建立数学模型,并提出改进禁忌搜索算法进行求解。牟峰等^[7]通过分析取送车作业问题的特点,将合理的取送批次与取送顺序结合,构建了取送车问题的一般模型。张文晰等^[8]研究树枝型专用线直达车流取送问题,构建以调机在装卸区总停留时间最短为目标函数的整数规划模型,并设计隐枚举算法进行求解。Jaehn 等^[9]研究了铁路专用线取送调车优化问题,建立了取送调车混合整数规划模型,并提出多项式时间求解算法。Li 等^[10]利用仿真方法对铁路树枝形专用线取送车问题展开研究。

铁路枢纽工作组织方面,牛惠民^[11,12]综合分析枢纽内直通车流、到解车流和始发车流的作业过程,研究重空车流协调优化、枢纽运用合理利用问题,基于枢纽资源约束分别构建模型,并用遗传算法求解。Schasfoort 等^[13]考虑列车到达时间不确定性,研究铁路站场的列车实时分配问题,构建以最小化列车延迟时间为目标的模型,利用启发式算法求解。

本文研究一类考虑多编组站协调分工的枢纽重空车流组织优化问题(Heavy and empty wagon flow assignment with work division among multi-marshalling stations in railway terminal,简称 HEWFA)。以列车走行、解体及集结总费用最小作为优化目标,构造线性模型,给出两阶段综合求解策略(Two-stage

comprehensive optimization procedure,简称 TSCOP)。该策略首先利用起作用约束组生成列车-编组站初始匹配方案集合;进而,给出嵌入替换-自变异-交互更新的异步循环启发式来完成匹配方案迭代寻优。

1 问题建模

1.1 问题描述

多编组站铁路枢纽重空车流组织优化问题可描述为:铁路枢纽由多个编组站组成,到达枢纽的列车包括直通列车和到解列车,由枢纽发出的列车包括重车始发列车、空车始发列车和空重混编始发列车。直通列车经进入特定编组站出发场,办理无调作业后离开枢纽;到解列车进入特定编组站到达场后,其中无转站终到重空车流直接送往装卸站,无转站中转车流直接送往调车场集结待编,转站中转车流转往其他编组站调车场集结待编;始发重车列车和空重混编列车由无转站中转流、转站中转流和地方重车流编组而成,始发空车列车由地方空车流编组而成。本文以车流走行、解体 and 集结总费用最小为目标,合理安排直通、到解列车接入编组站、始发列车出发编组站,从而减少车流重复改编、提高枢纽运营效率。车流组织如图 1 所示。

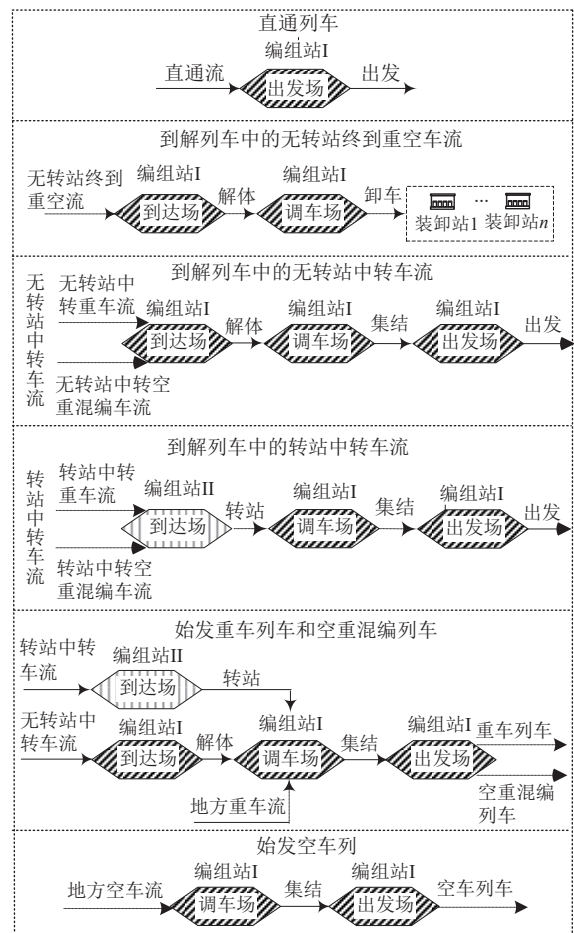


图 1 多编组站铁路枢纽重空车流组织

1.2 符号说明

1) 集合

B : 铁路枢纽内编组站集合, 记为 $B = \{b \mid b = 1, \dots, \bar{b}\}$ 。

D : 枢纽铁路方向集合, 记为 $D = \{d \mid d = 1, \dots, \bar{d}\}$ 。

R : 到解列车 (包括到解重车列车和空重混编列车) 编号集合, 记为 $R = \{r \mid r = 1, \dots, \bar{r}\}$ 。

T : 直通列车编号集合, 记为 $T = \{t \mid t = 1, \dots, \bar{t}\}$ 。

H : 始发重车列车和空重混编列车编号集合, 记为 $H = \{h \mid h = 1, \dots, \bar{h}\}$ 。

E : 始发空车列车编号集合, 记为 $E = \{e \mid e = 1, \dots, \bar{e}\}$ 。

F : 始发列车编号集合, 记为 $F = \{f \mid f = 1, \dots, \bar{f}\}$, $H \cup E = F$ 。

G : 到解列车中重空车组编号集合, 记为 $G = \{g \mid g = 1, \dots, \bar{g}\}$ 。

A : 始发重车列车和空重混编列车包含的重空车组编号集合, 记为 $A = \{a \mid a = 1, \dots, \bar{a}\}$ 。

Γ : 车组性质, 记为 $\Gamma = \{\tau \mid \tau = 0, 1\}$, $\tau = 0$ 表示地方车组, $\tau = 1$ 表示中转车组。

P : 装卸点集合, 记为 $P = \{p \mid p = 1, \dots, \bar{p}\}$ 。

K : 枢纽内空车车种集合, 记为 $K = \{\text{棚车, 平车, 敞车, 罐车, 保温车}\}$ 。

B_d : 方向 d 衔接的编组站集合, $B_d \in B$ 。

2) 参数

r_d : d 方向接入的到解列车总数。

t_d : d 方向接入的直通列车总数。

f_d : d 方向发出的始发列车总数。

h_d : d 方向始发重车 (空重混编) 列车总数。

e_d : d 方向发出的始发空车列车总数。

q_r : 到解列车 r 中车组总数。

q_h : 始发重车 (空重混编) 列车 h 中车组总数。

$n_{dr}^{\tau g}$: d 方向接入的到解列车 r 中 τ 性质重车组 g 的货车数。

$n_{dr}^{\tau gk}$: d 方向接入的到解列车 r 中 k 类型 τ 性质空车组 g 的货车数。

$n_{dh}^{\tau a}$: d 方向发出的始发重车列车或空重混编列车 h 中重车组 a 的货车数。

$n_{dh}^{\tau ak}$: d 方向发出的始发空重混编列车 h 中 k 类型空车组 a 的货车数。

$C_1(b) \sim C_5(b)$: 编组站 b 的到达能力、解体能力、集结能力、编组能力及出发能力。

N : 枢纽允许转站货车数。

m : 列车平均编成辆数。

q_p^k : 装卸点 p 对 k 类型空车需求量 (排出量)。

l_d^b : 列车由方向 d 接入编组站 b 的走行距离。

$\tilde{l}_d^b$: 列车由方向 d 离开编组站 b 的走行距离。

$l_b^{b^*}$: 编组站 b 与另一编组站 b^* 的距离。

α : 车·公里和费用之间的转化系数。

β_b : 在编组站 b 集结重车时每车集结费用。

γ_b : 在编组站 b 集结空车时每车集结费用。

v_b : 每车在编组站 b 解体时的费用。

$v_b^{b^*}$: 每车从编组站 b 转到 b^* 重复解体费用。

3) 决策变量

x_{dt}^b : 为 d 方向接入的直通列车分配的编组站判别变量。 $x_{dt}^b = 1$ 表示 d 方向接入的直通列车 t 在编组站 b 进行作业, 否则 $x_{dt}^b = 0$ 。

y_{dr}^b : 为 d 方向接入的到解列车分配的编组站判别变量。 $y_{dr}^b = 1$ 表示 d 方向接入的到解列车 r 在编组站 b 进行作业, 否则 $y_{dr}^b = 0$ 。

w_{dh}^b : 为 d 方向发出的始发重车列车和空重混编列车分配的编组站判别变量。 $w_{dh}^b = 1$ 表示 d 方向发出的始发重车列车 (空重混编列车) h 由编组站 b 编发, 否则 $w_{dh}^b = 0$ 。

ϵ_{de}^{kb} : 为 d 方向发出的始发空车列车分配的编组站判别变量。 $\epsilon_{de}^{kb} = 1$ 表示 d 方向发出的 k 类型空车列车 e 由编组站 b 编发, 否则 $\epsilon_{de}^{kb} = 0$ 。

$\theta_{rg}^{bb^*}$: 中转重车组转站判别变量。 $\theta_{rg}^{bb^*} = 1$ 表示列车 r 中车组 g 从编组站 b 转到 b^* , 否则 $\theta_{rg}^{bb^*} = 0$ 。

$\theta_{rgk}^{bb^*}$: 中转空车组转站判别变量。 $\theta_{rgk}^{bb^*} = 1$ 表示列车 r 中 k 类型空车组 g 从编组站 b 转到 b^* , 否则 $\theta_{rgk}^{bb^*} = 0$ 。

1.3 枢纽车流构成分析

直通列车在办理无调作业后离开枢纽, 其车流构成无变化; 到解列车进入编组站后分解为无转站终到重空车流、转站中转车流、无转站中转车流; 始发列车可细分为始发重车列车、始发空重混编列车和始发空车列车三种, 其中始发重车列车和空重混编列车由转站中转车流、无转站中转车流以及地方重车流组成, 始发空车列车由地方空车流组成。地方重 (空) 车流为在装卸站完成装车 (卸车) 作业后随挂运列车运出枢纽的重载 (排空) 货车。

(1) 无转站终到重空车流: 由 d 方向接入编组站 b 的终到重空货车数

$$u_{db}^1 = \sum_{r=1}^{r_d} \sum_{g=1}^{q_r} y_{dr}^b (n_{dr}^{0g} + \sum_{k \in K} n_{gr}^{0gk}) \quad (1)$$

(2) 转站中转车流: 由 d 方向接入编组站 b 并转至相异编组站 b^* 的转站货车数

$$u_{dbb^*}^2 = \sum_{r=1}^{r_d} \sum_{g=1}^{q_r} (\theta_{rg}^{bb^*} n_{dr}^{1g} + \sum_{k \in K} \theta_{rgk}^{bb^*} n_{dr}^{1gk}) \quad (2)$$

(3) 无转站中转车流: 由 d 方向接入编组站 b 且无转站的重空货车数

$$u_{db}^3 = u_{db}^{2*} - u_{dbb^*}^2 \quad (3)$$

u_{db}^{2*} 表示转站中转车流和无转站中转车流中重空货车数, $u_{db}^{2*} = \sum_{r=1}^{r_d} \sum_{g=1}^{q_r} y_{dr}^b (n_{dr}^{1g} + \sum_{k \in K} n_{dr}^{1gk})$ 。

(4) 地方重车流: 由各装卸站取至编组站 b 并发往 d 方向的地方重车数

$$u_{db}^4 = \sum_{h=1}^{h_d} w_{dh}^b \sum_{a=1}^{q_h} a_{dh}^{0a} \quad (4)$$

(5) 始发重车流及空重混编车流: 由编组站 b 编组后从 d 方向发出的始发重车流及空重混编车流中重空货车数为

$$u_{db}^5 = u_{dbb^*}^2 + u_{db}^3 + u_{db}^4 \quad (5)$$

(6) 始发空车流: 由编组站 b 编组后从 d 方向发出的始发空车流中空车数

$$u_{db}^6 = \sum_{e=1}^{e_d} \sum_{k \in K} \epsilon_{de}^{kb} m \quad (6)$$

(7) 直通车流: 由 d 方向接入编组站 b 的直通货车数

$$u_{db} = \sum_{t=1}^{t_d} x_{dt}^b m \quad (7)$$

(8) 到解车流: 由 d 方向接入编组站 b 的到解货车数

$$\bar{u}_{db} = u_{db}^1 + u_{dbb^*}^2 + u_{db}^3 \quad (8)$$

(9) 始发车流: 由编组站 b 编组后从 d 方向发出的始发货车数

$$\tilde{u}_{dh} = u_{db}^5 + u_{db}^6 \quad (9)$$

1.4 目标函数设置

将车流进站走行、出站走行、转站走行、解体及货车集结总费用最小化作为优化目标。

(1) 进站走行费用

$$Z_1 = \sum_{d=1}^{\bar{d}} \sum_{b=1}^{\bar{b}} u_{db} l_d^b \alpha + \sum_{d=1}^{\bar{d}} \sum_{b=1}^{\bar{b}} \bar{u}_{db} l_d^b \alpha \quad (10)$$

Z_1 包含直通车流和到解车流进站走行费用。

(2) 出站走行费用

$$Z_2 = \sum_{d=1}^{\bar{d}} \sum_{b=1}^{\bar{b}} u_{db} \tilde{l}_d^b \alpha + \sum_{d=1}^{\bar{d}} \sum_{b=1}^{\bar{b}} \tilde{u}_{db} \tilde{l}_d^b \alpha \quad (11)$$

Z_2 包含直通车流和始发车流出站走行费用。

(3) 转站走行费用

$$Z_3 = \sum_{b=1}^{\bar{b}} \sum_{b^*=1}^{\bar{b}} u_{dbb^*}^2 l_b^{b^*} \alpha \quad (12)$$

Z_3 仅含转站中转车流转站走行费用。

(4) 解体费用

$$Z_4 = \sum_{d=1}^{\bar{d}} \sum_{b=1}^{\bar{b}} \bar{u}_{db} v_b + \sum_{b=1}^{\bar{b}} \sum_{b^*=1}^{\bar{b}} u_{dbb^*}^2 v_b^{b^*} \quad (13)$$

Z_4 含到解车流解体和转站车流重复解体费用。

(5) 集结费用

$$Z_5 = \sum_{d=1}^{\bar{d}} \sum_{b=1}^{\bar{b}} u_{db}^5 \beta_b + \sum_{d=1}^{\bar{d}} \sum_{b=1}^{\bar{b}} u_{db}^6 \gamma_b \quad (14)$$

Z_5 包含始发重车流 (空重混编车流) 集结费用和始发空车流集结费用。

1.5 优化模型构建

$$\min Z = Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 + Z_5 \quad (15)$$

$$s.t. \sum_{d=1}^{\bar{d}} \bar{u}_{db} \leq C_1(b), b \in B \quad (16)$$

$$\sum_{d=1}^{\bar{d}} \tilde{u}_{db} + \sum_{d=1}^{\bar{d}} u_{db} \leq C_5(b), b \in B \quad (17)$$

$$\sum_{d=1}^{\bar{d}} (\bar{u}_{db} + u_{db}^{2*}) \leq C_2(b), b \in B \quad (18)$$

$$\sum_{d=1}^{\bar{d}} \tilde{u}_{db} \leq C_3(b), b \in B \quad (19)$$

$$\sum_{d=1}^{\bar{d}} \tilde{u}_{db} \leq C_4(b), b \in B \quad (20)$$

$$\sum_{d=1}^{\bar{d}} \sum_{b=1}^{\bar{b}} \sum_{b^*=1}^{\bar{b}} u_{dbb^*}^2 \leq N \quad (21)$$

$$\sum_{b=1}^{\bar{b}} \sum_{d=1}^{\bar{d}} \sum_{e=1}^{e_d} \epsilon_{de}^{kb} m + \sum_{d=1}^{\bar{d}} \sum_{h=1}^{h_d} \sum_{a=1}^{q_h} (n_{dh}^{0ak} + n_{dh}^{1ak}) +$$

$$\sum_{p=1}^{\bar{p}} q_p^k = \sum_{d=1}^{\bar{d}} \sum_{r=1}^{r_d} \sum_{g=1}^{q_g} (n_{dr}^{0gk} + n_{dr}^{1gk}), k \in K \quad (22)$$

$$\sum_{b \in B_d} x_{dt}^b = 1, t \in T, d \in D \quad (23)$$

$$\sum_{b \in B_d} y_{dr}^b = 1, r \in R, d \in D \quad (24)$$

$$\sum_{b \in B_d} w_{dh}^b = 1, h \in H, d \in D \quad (25)$$

$$\sum_{b \in B_d} \epsilon_{de}^{kb} = 1, e \in E, d \in D, k \in K \quad (26)$$

$$x_{dt}^b, y_{dr}^b, w_{dh}^b, \epsilon_{de}^{kb}, \theta_{rg}^{bb^*}, \theta_{rgk}^{bb^*} \in \{0, 1\} \quad (27)$$

式 (15) 表示车流进站走行、出站走行、转站走

行、解体及集结总费用最小化; 式 (16) ~ (17) 为编组站到达、出发能力约束, 要求编组站办理相应作业的货车数不超过到达、出发能力; 式 (18) ~ (20) 为编组站解体、集结、编组能力约束, 要求编组站办理相应作业的货车数不超过解体、集结、编组能力; 式 (21) 为转站能力约束, 要求编组站间转站货车数之和不超过转站能力; 式 (22) 为空车流量平衡约束; 式 (23) ~ (26) 为直通列车、到解列车以及三种始发列车编组站选择约束, 要求某方向接发的列车只能选择该方向衔接的一个编组站进行作业; 式 (27) 为变量取值约束。

2 优化求解策略

鉴于模型的大规模线性规划形式, 传统算法求解效率低, 故本文根据问题与模型特点, 提出两阶段综合求解策略 (Two-stage comprehensive optimization procedure, 简称 TSCOP)。该策略首先利用模型中的起作用约束组生成列车-编组站初始匹配方案集合; 进而利用嵌入替换-自变异-交互操作的异步更新过程完成列车-编组站初始匹配方案集合优化。

2.1 基于起作用约束组的列车-编组站匹配

枢纽内编组站到发能力、解集编能力和转站能力决定着列车接入编组站的选择。模型中到发约束组 (16) ~ (17)、解集编约束组 (18) ~ (20) 和转站约束 (21) 对应上述三种能力限制, 影响列车-编组站匹配方案的产生, 称其为起作用约束组。首先根据到发约束组生成列车-编组站匹配方案, 然后利用解集编约束组对匹配方案初次调整, 最后根据转站约束对匹配方案再次调整。基于起作用约束组的列车-编组站匹配过程 (Matching train and yard with active constraints group, 简称 MTY-ACG) 如下:

阶段 1 基于到发约束组的列车-编组站匹配

步骤 1.1 基于到达能力的到解列车-编组站匹配

同一方向到达的到解列车可接入的编组站集合相同, 故根据接入方向将到解列车编号 $1 \sim \bar{r}$ 划分为 $\bar{d}$ 个列车子段, 第 $d(d = 1, \dots, \bar{d})$ 个列车子段有 r_d 列到解列车。设第一个列车子段的 r_1 列到解列车可接入的编组站集合为 $\{I, II, III\}$ 。从集合中选取编组站 i , 并生成小于该编组站到达能力的随机整数 ρ_i , 从该列车子段中随机选取 ρ_i 列到解列车分配给编组站 i 。要求为三个编组站生成的对应随机整数之和 $\rho_1 + \rho_2 + \rho_3$ 等于 r_1 , 进而得到第一个列车子段的到解列车-编组站匹配方案。对其余列车子段重复上述操作, 得到 $\bar{r}$ 列到解列车-编组站匹配方案 $B(R)$ 。

步骤 1.2 基于出发能力的始发列车-编组站匹配

根据发出方向将始发列车编号 $1 \sim \bar{f}$ 划分为 $\bar{d}$ 个列车子段, 第 d 个列车子段有 f_d 列始发列车。参照步骤 1.1, 依次为各个列车子段的始发列车选取编组站, 得到始发列车-编组站匹配方案 $B(F)$ 。

步骤 1.3 基于出发能力的直通列车-编组站匹配

根据接入方向将直通列车编号 $1 \sim \bar{t}$ 划分为 $\bar{d}$ 个列车子段, 第 d 个列车子段有 t_d 列始发列车。参照步骤 1.1, 依次为各个列车子段的直通列车选取编组站, 得到 $\bar{t}$ 列直通列车-编组站匹配方案 $B(T)$ 。

步骤 1.4 列车-编组站匹配方案生成

合并 $B(R)$ 、 $B(F)$ 、 $B(T)$, 得到列车-编组站匹配方案 s , 记为 $s = [B(R), B(F), B(T)]$ 。

阶段 2 基于解集编约束组的匹配初次调整

步骤 2.1 中转车组属性标记生成

根据列车-编组站匹配方案 s , 给每个中转车组一个属性标记, 记为 $\{\text{中转车组的货车数, 中转车组接入的编组站, 中转车组编发的编组站}\}$ 。

步骤 2.2 基于解集编能力的匹配初次调整

(1) 基于解体能力的到解列车-编组站匹配调整

根据解体能力约束 (18) 调整方案 $B(R)$ 。统计该方案中接入编组站 b 的到解列车数, 记为 π_b , 则在编组站 b 一次解体的货车数为 $\pi_b \cdot m$; 根据中转车组属性标记, 找出接入与编发编组站不一致的车组, 求出在编组站 b 二次解体的货车数, 记为 π_b ; 则编组站 b 解体的总货车数为 $\pi_b \cdot m + \pi_b$, 比较它和编组站解体能力 $C_2(b)$ 大小。若对任一编组站有 $\pi_b \cdot m + \pi_b \leq C_2(b)$, 则保留 $B(R)$ 。反之, 将接入该编组站的到解列车调整到其它编组站, 并重新判断, 直至生成满足各编组站解体能力的新方案 $B(R)$ 。

(2) 基于集编能力的始发列车-编组站匹配调整

根据集编能力约束组 (19) ~ (20) 调整方案 $B(F)$ 。统计该方案中由编组站 b 编发的始发列车数, 记为 Λ_b , 则在该编组站集结并编组的货车数为 $\Lambda_b \cdot m$ 。分别比较它和集结能力 $C_3(b)$ 及编组能力 $C_4(b)$ 大小。若对于任一编组站, 均满足 $\Lambda_b \cdot m \leq C_3(b)$ 且 $\Lambda_b \cdot m \leq C_4(b)$, 则保留 $B(F)$ 。反之, 则将匹配方案 $B(F)$ 中由该编组站编发的始发列车调整到其它编组站, 并重新进行判断, 直至生成满足各编组站集编能力的新方案 $B(F)$ 。

阶段 3 基于转站约束的匹配再次调整

利用转站能力约束 (21) 对调整后的匹配方案 s 进行再调整。根据中转车组属性标记, 找出接入和编发编组站不一致的转站车组, 求出总转站货车数, 记为 $\tilde{N}$, 比较 $\tilde{N}$ 与允许转站货车数 N 大小。若

$\tilde{N} > N$, 则基于到发约束组重新生成列车-编组站匹配方案, 并对新方案初次调整, 对调整后的方案重新判断, 直至满足转站约束。反之, 则保留原方案 s 。

阶段4 列车-编组站初始匹配方案集合生成

设置初始匹配方案集合规模为 Ω , 重复上述步骤, 直至得到 Ω 个可行匹配方案, 构成列车-编组站初始匹配方案集合 S , 记为 $S = \{s_i | i = 1, 2, \dots, \Omega\}$ 。

2.2 基于异步循环更新的迭代寻优过程

基于群体智能寻优思路, 设计嵌入替换-自变异-交互更新的异步循环启发式 (Asynchronous iteration heuristic embedding replacing, variation and exchange operation, 简称 AIH-RVE)。该过程引入列车-编组站匹配方案的自然数编码, 基于优选因子选择匹配方案进入优选方案集, 并对优选方案集进行最优方案、精英方案和劣势方案的三级划分。群体寻优过程中, 执行替换-自变异-交互三次更新, 利用终止规则完成迭代寻优。步骤如下:

阶段1 基于优选因子与三级划分的优选方案集

步骤1.1 列车-编组站匹配方案的自然数编码

根据问题特点, 对列车-编组站匹配方案采用 $1 \sim \bar{b}$ 的自然数编码, $\bar{b}$ 为枢纽内编组站总数, 其中自然数“1”表示该列车选择编组站 I 作业, 自然数“2”~“ $\bar{b}$ ”的含义类似。

步骤1.2 基于优选因子的优选方案集生成

定义适应度函数为目标函数的倒数, 即 $\phi(s) = 1/Z(s)$ 。设置优选因子为 λ , 利用 2.1 生成 Ω 个匹配方案, 计算适应度值, 并按适应度值降序排列, 选取前 ϖ ($\varpi = \Omega \cdot \lambda$) 个匹配方案进入优选方案集。

步骤1.3 基于三级划分的优选方案集

(1) 优选方案集的三级划分

将优选方案集中的 ϖ 个方案根据适应度值降序排列。选取第一个方案作为最优方案 s^{best} 。选取前 ψ 个方案作为精英方案, 进入精英方案集合中, 剩余方案进入劣势方案集合中, 劣势方案数量为 ξ 。

(2) 精英-劣势方案匹配

计算第 i 个精英方案的适应度值 $\phi(i)$, 通过式 (28) 得到标准化适应度值 $\tilde{\phi}(i)$, 将其代入精英-劣势方案匹配公式 (29) 中得到第 i 个精英方案所分配的劣势方案数量 $Num(i)$, $\text{round}[]$ 表示四舍五入取整。

$$\tilde{\phi}(i) = \phi(i) / \sum_{i=1}^{\psi} \phi(i), i = 1, 2, \dots, \psi \quad (28)$$

$$Num(i) = \text{round}[\tilde{\phi}(i) \cdot \xi] \quad (29)$$

步骤1.4 优选方案集更新机制

设置最大迭代次数为 j^{max} , 交叉概率为 P_c , 变

异概率为 P_m 。对优选方案集执行替换-自变异-交互三次更新, 直至达到最大迭代次数。

阶段2 优选方案集的三次更新过程

步骤2.1 基于精英方案的替换更新

对每一劣势方案, 随机选择两个替换点, 用对应精英方案中两个替换点之间的编组站替换劣势方案中两点之间的编组站, 从而得到新劣势方案。计算新劣势方案适应度值, 若大于原精英方案适应度值, 则新劣势方案变为精英方案。

步骤2.2 基于劣势方案的自变异更新

对变异概率 P_m 按照线性递增方式进行动态调整: $P_m = P_m^{\min} + (P_m^{\max} - P_m^{\min})j/j^{\max}$, 其中 $P_m^{\max}, P_m^{\min} \in (0, 1)$, 迭代次数 $j \in [1, j^{\max}]$ 。产生一个 $(0, 1)$ 间的随机数 rand , 将其与 P_m 进行比较, 若 $\text{rand} < P_m$, 则对劣势方案进行单点变异, 在每一劣势方案中随机选取一个变异点, 把该变异点上对应的编组站换成其他编组站。

步骤2.3 基于最优方案的交互更新

对交叉概率 P_c 按照线性递增方式进行动态调整: $P_c = P_c^{\min} + (P_c^{\max} - P_c^{\min})j/j^{\max}$, 其中 $P_c^{\max}, P_c^{\min} \in (0, 1)$, 迭代次数 $j \in [1, j^{\max}]$ 。产生一个 $(0, 1)$ 间的随机数 rand2 , 将其与 P_c 进行比较, 若 $\text{rand2} < P_c$, 则将精英和劣势方案分别与最优方案交叉, 随机选取两个交叉点, 将最优方案和精英方案 (劣势方案) 中两个交叉点对应的编组站进行互换。

阶段3 最优列车-编组站匹配方案输出

重复更新过程直至达到最大迭代次数 j^{max} , 输出最优列车-编组站匹配方案 s^{best} 。

3 实验验证及结果分析

3.1 实验场景

参阅国内外多编组站大型铁路枢纽布局与日常运营数据^[14-16], 构造数值实验场景如下: 铁路枢纽内分布有 I、II 和 III 三个编组站, 有六个铁路衔接方向, 计划时段内共有 90 列到发列车, 设定车公里和费用间的转化系数 $\alpha = 0.09$ 元/车公里, 枢纽转站能力 $N = 550$ 车/日。其它数据见附录 A。

3.2 算法参数设置

为验证 TSCOP 方法的高效性, 引入遗传算法 GA、离散粒子群算法 DPSO 进行对比。因 GA、DPSO 仅能实现迭代寻优, 故基于起作用约束组的列车-编组站匹配过程 (MTY-ACG) 来产生初始匹配方案。从而将两种对比算法记为 ACG-GA、ACG-DPSO。

利用 Microsoft Visual C++ 对算法进行编程, 在 Intel(R) Core(TM) i5-8250U CPU(1.60GHz) 微机上的运

行。对三种算法关键参数进行调试,根据调试结果,令 TSCOP 的交叉概率随迭代次数增加在 0.5 至 1 之间递增取值、变异概率随迭代次数增加在 0 至 1 之间递增取值;令 ACG-GA 的交叉概率为 0.95、变异概率为 0.1,ACG-DPSO 的惯性权重为 0.8、自我学习因子为 0.9、群体学习因子为 0.9。三种算法最大迭代次数均为 200,匹配方案集合规模均为 15。

3.3 小规模实验测试对比

本节分别使用 IBM CPLEX、ACG-GA、ACG-DPSO 和 TSCOP 求解模型。考虑到实际使用效果,将 CPLEX 运行时间上限设置为 2000s,“*”表示 CPLEX

在限定时间内得到的满意解,“#”表示 CPLEX 未找到可行解。表 1 中的实验算例来源于附录 A,考虑到 CPLEX 求解规模与时间限制,对附录 A 中数据进行处理,将其转化为能被 IBM CPLEX 在限定时间内求解的小规模算例。转化方法为从附录 A 所示的算例中随机选取 45 列到发列车数据。

实验结果如表 1 所示,表中最后三列分别表示 ACG-GA、ACG-DPSO 和 TSCOP 三种算法满意解与 CPLEX 最优解的相对差值,并分别记为 δ_1 、 δ_2 和 δ_3 ,相对差值=(每种算法满意解 - CPLEX 最优解)/CPLEX 最优解 $\times 100\%$ 。

表 1 CPLEX 与三种算法实验测试对比

算例	CPLEX		ACG-GA		ACG-DPSO		TSCOP		相对差值		
列车规模	最优解	Time/s	满意解	Time/s	满意解	Time/s	满意解	Time/s	$\delta_1(\%)$	$\delta_2(\%)$	$\delta_3(\%)$
20	1864.3	496.4	1864.3	47.5	1864.3	34.9	1864.3	41.0	0.00	0.00	0.00
25	2621.8	1358.1	2621.8	79.9	2623.2	51.6	2621.8	58.5	0.00	0.05	0.00
30	2796.5*	2000.0	2778.4	92.2	2807.4	78.4	2754.0	87.3	-0.65	0.39	-1.52
35	3356.2*	2000.0	3325.7	115.8	3336.0	71.3	3274.5	106.2	-0.91	-0.60	-2.43
40	3910.7*	2000.0	3821.4	131.6	3861.9	84.1	3752.1	121.1	-2.28	-1.25	-4.06
45	#	2000.0	4569.5	143.0	4618.2	103.0	4480.2	117.3	#	#	#
平均值	2909.9	1642.4	3163.5	101.7	3185.2	70.6	3124.5	88.6	-0.77	-0.28	-1.6

由表 1 可以得出以下结论:

(1) 针对 20 列和 25 列到发列车规模的算例,CPLEX 能够在 2000s 限定时间内找到最优解,此时 ACG-GA、ACG-DPSO 和 TSCOP 三种算法与 CPLEX 计算出的结果十分接近,并且这三种算法的求解效率要高于 CPLEX。

(2) 针对 30 列、35 列和 40 列到发列车规模的算例,CPLEX 无法在 2000s 限定时间内得到最优解,仅能得到满意解。相对 CPLEX 求解结果而言,随着算例规模扩大,ACG-GA 和 TSCOP 两种算法的求解效率和寻优能力优势更加明显。

(3) 当到发列车规模达到 45 时,CPLEX 不能在 2000s 限定时间内找到可行解,然而 ACG-GA、ACG-DPSO 和 TSCOP 三种算法均可以在较短时间内找到满意解。三种算法中 TSCOP 的求解质量整体要高于另外两种算法。

3.4 大规模实验测试对比

当到发列车规模增加到 45 列以上时,鉴于 CPLEX 求解器已无法在合理限定时间内找到任何可行解。故针对附录 A 中 90 列到发列车的大规模算例,本节采用 ACG-GA、ACG-DPSO 和 TSCOP 三种算法进行求解,并对算法运行结果进行对比,如表 2~ 表 5 所示。

表 2 三种算法求解出的到解列车-编组站匹配方案

列车 编号	接入编组站				列车 编号	接入编组站				列车 编号	接入编组站			
	ACG- GA	ACG- DPSO	ACG- TSCOP	ACG- OP		ACG- GA	ACG- DPSO	ACG- TSCOP	ACG- OP		ACG- GA	ACG- DPSO	ACG- TSCOP	ACG- OP
1	II	III	I	I	13	I	I	I	I	25	III	III	III	III
2	I	II	I	I	14	I	I	I	I	26	II	III	III	III
3	I	I	I	I	15	I	II	II	II	27	I	II	I	I
4	I	I	I	I	16	I	I	II	II	28	II	II	II	II
5	I	I	I	I	17	I	I	I	I	29	II	II	II	II
6	I	II	I	I	18	II	I	II	II	30	II	I	I	I
7	I	I	I	I	19	I	I	I	I	31	III	III	III	III
8	II	II	I	I	20	II	I	I	I	32	I	I	III	III
9	I	I	I	I	21	I	I	III	III	33	III	III	III	III
10	I	I	III	III	22	I	I	II	II	34	I	I	I	I
11	I	I	I	I	23	I	I	II	II	35	II	II	II	II
12	I	II	II	II	24	III	I	I	I	36	II	II	II	II

表 3 三种算法求解出的始发列车-编组站匹配方案

列车 编号	编发编组站				列车 编号	编发编组站				列车 编号	编发编组站			
	ACG- GA	ACG- DPSO	ACG- TSCOP	ACG- OP		ACG- GA	ACG- DPSO	ACG- TSCOP	ACG- OP		ACG- GA	ACG- DPSO	ACG- TSCOP	ACG- OP
1	I	I	I	I	13	II	II	I	I	25	I	II	I	I
2	II	II	II	II	14	II	II	II	II	26	I	I	I	I
3	I	I	I	I	15	I	I	II	II	27	III	III	III	III
4	I	I	I	I	16	I	I	III	III	28	II	III	III	III
5	II	II	II	II	17	I	I	I	I	29	II	II	II	II
6	I	I	I	I	18	III	I	I	I	30	II	II	II	II
7	III	III	I	I	19	I	III	II	II	31	II	II	II	II
8	I	III	II	II	20	I	I	I	I	32	I	I	I	I
9	III	III	III	III	21	I	III	III	III	33	III	III	III	III
10	I	I	I	I	22	II	I	II	II	34	I	I	I	I
11	II	I	I	I	23	II	II	II	II	35	I	I	I	I
12	I	I	I	I	24	III	III	III	III	36	II	II	II	II

表 4 三种算法求解出的直通列车-编组站匹配方案

列车 编号	接发编组站			列车 编号	接发编组站			列车 编号	接发编组站		
	ACG- -GA	ACG- DPSO	TSC OP		ACG- -GA	ACG- DPSO	TSC OP		ACG- -GA	ACG- DPSO	TSC OP
1	I	II	I	7	II	I	II	13	III	III	III
2	II	I	I	8	III	I	III	14	I	II	III
3	III	I	III	9	III	I	II	15	I	II	I
4	III	III	II	10	II	II	III	16	I	I	I
5	I	III	I	11	II	II	III	17	I	I	I
6	I	I	I	12	II	II	II	18	II	II	II

表 5 转站中转货车数（车）及总费用（元）

算法	ACG-GA	ACG-DPSO	TSCOP
转站中转货车数	452	512	387
总费用	12496.7	13077.1	11505.5

中转货车数共计 1483 车，由表 5 可得 ACG-GA 求解出转站中转车数为 452 车，占中转货车数的 30.48%；ACG-DPSO 求解出转站中转车数为 512 车，占中转货车数的 34.52%；TSCOP 求解出转站中转车数为 387 车，占中转货车数的 26.10%，占比分别比 ACG-GA 减少了 4.38%，比 ACG-DPSO 减少了 8.42%，从而在一定程度上降低了交换车流重复解体及走行费用。三种算法求解质量排序为：TSCOP>ACG-GA>ACG-DPSO。

4 结论

对于多编组站铁路枢纽来说，确定合理的到发列车-编组站匹配方案对减少交换车数、降低枢纽运营费用、提高枢纽效率具有重要意义。本文针对多编组站铁路枢纽车流组织问题，充分考虑各编组站作业能力限制，组建以车流走行、解体及集结总费用最小为优化目标的模型，针对模型特点提出两阶段方法进行求解，得出合理的到发列车-编组站匹配方案，并通过算例验证了所提方法的有效性。本文所研究铁路枢纽编组站为单向编组站，上下行方向的改编车流共用一套调车系统。未来研究将聚焦更为复杂的双向编组站铁路枢纽系统，该系统内的编组站拥有上行和下行方向两套调车系统，这将会对枢纽车流组织工作带来更为复杂的影响。

附录 A

表 6~ 表 11 分别表示到解列车车组构成、始发列车车组构成、各方向接发列车信息、各方向列车进出枢纽走行距离、编组站间距离、编组站作业能力及费用。表 6 和表 7 中不同车组编号表示不同去向，0 为本地作业车组，为区分重空车组，在空车组编号后加 c。

表 6 到解列车车组构成表

列车 编号	车组 编号	货车 辆数	列车 编号	车组 编号	货车 辆数
1	0/1/2	12/16/22	19	0/40/41c	5/30/15
2	0/3/4	4/17/29	20	0/42/43c	13/24/13
3	0/5/6	13/15/22	21	0/44	13/37
4	0/7/8	11/18/21	22	0/45/46	7/21/22
5	0/9/10/11	4/16/19/11	23	47/48/49	13/18/19
6	0/12	12/38	24	0/50/51c	5/16/29
7	0/13	15/35	25	0/52/53	4/17/29
8	0/14/15	5/15/30	26	0/54	10/40
9	0/16/17/18	8/12/8/22	27	0/55/56	7/21/22
10	0/19/20/21	18/6/20/6	28	0/57/58	5/20/25
11	0/22/23	13/14/23	29	0/59	10/40
12	0/24/25	15/10/25	30	0/60	9/41
13	0/26/27/28	13/15/11/11	31	0/61	12/38
14	0/29/30	16/18/16	32	62/63/64c	5/15/30
15	0/31	19/31	33	65/66/67	7/19/24
16	32/33/34	10/24/16	34	0/68/69	12/16/22
17	0/35/36c/37	4/18/12/16	35	0/70	11/39
18	0/38/39	12/16/22	36	71/72/73	6/16/28

表 7 始发列车车组构成表

列车 编号	车组 编号	货车 辆数	列车 编号	车组 编号	货车 辆数
1	0/4/72	5/29/16	19	0/25/56	3/25/22
2	1/22/57	16/14/20	20	0/26/27/55	3/15/11/21
3	7/8/11	18/21/11	21	0/34/64c	4/16/30
4	13/41c	35/15	22	0/39/48	10/22/18
5	2/73	22/28	23	0/49/58	6/19/25
6	0c	50	24	36c/61	12/38
7	0c	50	25	0/12/71	6/38/6
8	0/31/43c	6/31/13	26	14/47/69	15/13/22
9	0/20/67	6/20/24	27	0/16/38/66	3/12/16/19
10	0/5/40	5/15/30	28	0/17/54	2/8/40
11	0/18/42	4/22/24	29	0/19/70	5/6/39
12	3/50/52	17/16/17	30	0c	50
13	0/9/15	4/16/30	31	0c	50
14	32/59	10/40	32	29/30/68	18/16/16
15	0/33/45	5/24/21	33	0/24/37/65	17/10/16/7
16	0/28/44	2/11/37	34	0/21/60	3/6/41
17	0/6/46	6/22/22	35	0/35/53	3/18/29
18	0/10/51c	2/19/29	36	0/23/62/63	7/23/5/15

表 8 各方向接发列车信息表

列车编号	铁路方向					
	1	2	3	4	5	6
到解列车	1-12	13-20	21-26	27-30	31-34	35-36
始发列车	1-10	11-23	24-29	30-32	33-35	36
直通列车接入	1-5	6-9	10-14	15-16	17	18
直通列车发出	7,18	10-11,13-16	1-4,8-9	17	5-6	12

表 9 各方向列车进/出枢纽走行距离（公里）

编组站	铁路方向					
	1	2	3	4	5	6
I	3/4	36/35	40/44	12/14	9/7	12/15
II	34/32	6/7	25/24	18/12	25/25	10/13
III	38/34	28/28	5/8	16/15	30/29	22/22

表 10 编组站间距离 (公里)

编组站	I	II	III	衔接方向
I	0	27	36	1,2,3,4,5
II	27	0	24	1,2,3,4,6
III	36	24	0	1,2,3,5

表 11 编组站作业能力 (车/日) 及费用 (元/车)

编组站	到达能力	解体能力	集结能力	编组能力	出发能力	集结能力	集结能力	解体能力	重复解体能力
I	1800	2200	1950	2100	2150	0.12	0.10	1.06	0.81
II	900	950	800	800	900	0.15	0.12	1.09	0.83
III	950	1000	850	950	1000	0.13	0.11	1.08	0.82

参考文献 (References)

- [1] 严余松, 唐莉, 严余伟等. 枢纽小运转列车 0-1 规划模型及其遗传算法 [J]. 系统工程, 2000, 18 (6): 67-70. (Yan Y S, Tang L, Yan Y W, et al. An 0-1 integer programming model on the organization of transship trains in railway terminal and its genetic algorithms[J]. System Engineering, 2000, 18(6): 67-70.)
- [2] 毕明凯, 何世伟, 陈胜波等. 铁路枢纽小运转列车径路优化 [J]. 大连交通大学学报, 2015, 36 (4): 1-4. (Bi M K, He S W, Chen S B, et al. Routing optimization study of local train in railway terminal[J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2015, 36(4): 1-4.)
- [3] 严余松, 朱松年, 杜文. 枢纽小运转组织的网络流优化模型 [J]. 西南交通大学学报, 2001, 36 (2): 117-120. (Yan Y S, Zhu S N, Du W. Network flow models for organization of transship trains in railway terminals[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2001, 36(2): 117-120.)
- [4] 黎浩东, 宋瑞, 呼志刚. 铁路枢纽内班列车流的组织优化研究 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2014, 14 (5): 147-153. (Li H D, Song R, Hu Z G. Optimization of car flow organization for regular train in railway hub[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2014, 14(5): 147-153.)
- [5] 李冰, 张志宁, 轩华. 基于树枝形铁路专用线网络的小运转货物作业系统优化 [J]. 系统管理学报, 2021, 30 (2): 201-214. (Li B, Zhang Z N, Xuan H. Optimization of local freight train transship system based on branch-shaped siding network[J]. Journal of System & Management, 2021, 30(2): 201-214.)
- [6] 郭垂江. 基于阶段计划的取送车调车作业计划编制优化研究 [J]. 铁道学报, 2019, 41 (10): 10-16. (Guo C J. Research on Optimization of formulation for shunting operation plan of placing-in and taking-out wagon based on phase plan[J]. Journal of the China Railway Society, 2019, 41(10): 10-16.)
- [7] 牟峰, 王慈光, 薛锋. 铁路车站取送车作业问题的一般模型 [J]. 中国铁道科学, 2011, 32 (5): 114-118. (Mu F, Wang C G, Xue F. Generic model and algorithm for scheme of placing-in and taking-out of wagons in branch-shaped freight operation sites[J]. China Railway Science, 2011, 32(5): 114-118.)
- [8] 张文晰, 陈崇双, 薛锋等. 树枝形专用线直达车流取送车模型及算法 [J]. 铁道学报, 2014, 36 (6): 1-8. (Zhang W X, Chen C S, Xue F, et al. Model and algorithm of taking-out and placing-in shunting of through wagon flow on branch-shaped sidings [J]. Journal of the China Railway Society, 2014, 36(6): 1-8.)
- [9] Jaehn F, Otto A, Selfried K. Shunting operations at flat yards: retrieving freight railcars from storage tracks[J]. Or Spectrum, 2018, 40(2): 367-393.
- [10] Li B, Qu W Y, Xuan H, Xu C Q, Wang X Y, Geng Y F. Shunting strategy for placing-in and taking-out wagons on branch-shaped freight operation network with simulation method [J]. Journal of Advanced Transportation, 2020, 2020(1): 1-25.
- [11] 牛惠民. 铁路枢纽重空车流组织的协调优化模型及遗传算法 [J]. 铁道学报, 2001, 23 (4): 12-16. (Niu H M. A model for cooperative optimization of heavy and empty traffic organization in railway hubs using genetic algorithm[J]. Journal of the China Railway Society, 2001, 23(4): 12-16.)
- [12] 牛惠民, 胡安洲. 铁路枢纽运能资源合理利用的多目标优化模型 [J]. 系统工程学报, 2000, 15 (2): 119-123. (Niu H M, Hu A Z. Multi-objective optimization model for rational exploitation of transport capacity resources in railway hub[J]. Journal of Systems Engineering, 2000, 15(2): 119-123.)
- [13] Schasfoort B B W, Gkiotsalitis K, Eikenbroek O A L, et al. A dynamic model for real-time track assignment at railway yards[J]. Journal of Rail Transport Planning & Management, 2020(14): 100198.
- [14] 周天杰. 武汉铁路枢纽总图规划再思考 [J]. 铁道标准设计, 2014, 58 (3): 1-4. (Zhou T J. Further research on overall planning of Wuhan railway terminal[J]. Railway Standard Design, 2014, 58(3): 1-4.)
- [15] 高明明. 北京铁路枢纽货运系统布局规划研究 [J]. 铁道工程学报, 2010, 27 (4): 101-106. (Gao M M. Research on the arrangement planning for freight traffic system of Beijing railway terminal[J]. Journal of Railway Engineering Society. 2010, 27(4): 101-106.)
- [16] Marinov M, Giovanni L D, Bellisai G, et al. Analysis of rail yard and terminal performances[J]. Journal of Transport Literature, 2014, 8: 178-200.

作者简介

李冰 (1976—), 男, 教授, 博士生导师, 从事运输组织优化等研究, E-mail: lbing@zzu.edu.cn;

邓素佳 (1996—), 女, 硕士研究生, 从事运输组织优化与控制的研究, E-mail: dengsujia@outlook.com;

轩华 (1979—), 女, 教授, 从事物流优化与控制等研究, E-mail: hxuan@zzu.edu.cn.