

## 考虑空车调配协调的货物列车开行方案优化研究

刘晓伟<sup>1a,1b,1c</sup>, 晏启鹏<sup>1a,2</sup>, 倪少权<sup>\*1a,1b,1c</sup>, 吕苗苗<sup>1a,1b,1c</sup>, 吕红霞<sup>1a,1b,1c</sup>

(1. 西南交通大学, a. 交通运输与物流学院, b. 综合交通运输智能化国家地方联合工程实验室, c. 综合交通大数据应用技术国家工程实验室, 成都 610031; 2. 四川旅游学院, 成都 610100)

**摘要:** 为实现空车调配与货物列车开行方案协调优化, 结合基本运行图架构与车流径路, 构建货运时空服务拓展网络。考虑配空与装卸取送、集编发等环节的时间接续要求, 节点与区段不对流空车要求, 以重车流全程运送与空车配送等广义总费用最少为目标, 建立整数规划弧路模型。针对既有算法设计局限性, 结合重车或空车配空的时间接续要求, 提出将不同的 $k$ 短路重车流方案与空车配空方案相关联的改进可行解构造方法, 设计混合差分进化求解算法。实例研究表明, 考虑空车调配进行重车、空车流组织协调优化, 能够减少空车走行费用, 及时满足装车需求, 有效保证作业车流配合中转车流集结编组及时挂线, 提高方案可实施性。

**关键词:** 铁路运输; 列车开行方案; 差分进化算法; 空车调配; 时空网络

## Railway Freight Transportation Service Network Design Problem with Empty Car Distribution

LIU Xiao-wei<sup>1a,1b,1c</sup>, YAN Qi-peng<sup>1a,2</sup>, NI Shao-quan<sup>\*1a,1b,1c</sup>,  
LV Miao-miao<sup>1a,1b,1c</sup>, LV Hong-xia<sup>1a,1b,1c</sup>

(1a. School of Transportation and Logistics, 1b. National and Local Joint Engineering Laboratory of Comprehensive Intelligent Transportation, 1c. National Engineering Laboratory of Integrated Transportation Big Data Application Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. Sichuan Tourism University, Chengdu 610100, China)

**Abstract:** This paper addresses a dynamic service network design problem for freight transportation on Chinese railway networks with single-block train services. To improve the efficient utilization of rolling-stock, a multi-commodity flow model with path-based variables is proposed to integrate car-to-block assignment, train scheduling, freight routing and empty car redistribution, considering the unitary rule and in-tree rule of loaded car, the limits of empty car flow. A space-time network is constructed with the basic train diagram and wagon-flow routing. A hybrid differential evolution algorithm is used to solve the model. An initial feasible solution is constructed by  $k$ -shortest path, greedy and annealing strategies. A practical case is presented to prove the validity of the model and algorithm.

**Keywords:** railway transportation; train operation plan; differential evolution algorithm; empty car distribution; space-time network

## 0 引言

目前, 国内铁路货运组织方法, 存在一定的局限性, 即列车编组计划与运行图等基本计划编制是以计划车流为基础, 而计划车流无法反映基于货运营销与动态需求确定的日常动态车流, 使得在日常

调度中按基本计划要求为日常车流分段规划的运送方案尚需优化, 加之运送方案规划未考虑运到期限要求, 受动态车流及列车满轴开行要求影响兑现困难, 导致车流挂线不确定, 规划方案难以适应货主动态需求和运到期限要求。因此, 文献[1]借鉴客

收稿日期: 2020-05-26

修回日期: 2021-01-21

录用日期: 2021-01-22

基金项目: 国家重点研发计划/National Key Research and Development Program of China (2017YFB1200702); 国家自然科学基金/National Natural Science Foundation of China (52072314); 四川省科技计划项目/Sichuan Science and Technology Program (2020YFH0035)。

作者简介: 刘晓伟(1981-), 男, 湖北南漳人, 博士生。

\*通信作者: nishaoquan@126.com

运组织理念提出动态规划型运输组织思想,即依据基本计划与货运营销,基于近期(周、日)动态车流与运到期限要求,调整编组方案与安排运行线等资源,制定车流全程运送方案,滚动编制货物列车开行方案、列车运行计划、机车车辆运用计划等动态运输计划,作为日常调度依据,实现按图行车。加拿大等国外铁路以分组列车形式为主的规划型运输组织方法<sup>[2]</sup>,不完全适应国内以单组列车形式为主的运营特点。

货物列车开行方案是基于动态车流进行编组计划调整与列车运行方案综合优化,确定列车径路与编组内容、开行频率及时段,为后续安排运行线确定列车运行计划提供依据,属于动态服务网络设计问题<sup>[3]</sup>;列车运行方案是在基本运行图架构<sup>[4]</sup>中为列车挑选合适区段线。实际中,空车调配及时与否直接影响货物装卸取送作业、车流开始集结时段及列车集结过程,其合理性也将影响货物列车开行方案优劣,要求两者协调优化。

既有研究主要集中于空车调配、列车开行方案优化问题,较少涉及两者综合优化研究。国内学者基于多阶段<sup>[5]</sup>、多时点<sup>[6]</sup>优化策略,国外学者考虑市场动态需求<sup>[7-8]</sup>、基于列车时刻表<sup>[9-10]</sup>研究空车调配问题。关于列车开行方案的研究成果,可参考文献[4]分析,其考虑车流改编方案唯一性与树形改编要求、运到期限等约束,优化列车开行方案,但未考虑空车调配协调问题。两者综合优化研究较少,HAGHANI<sup>[11]</sup>以美国铁路为例,研究列车径路、编组计划与空车分布的综合优化;ANDERSEN等<sup>[12]</sup>以欧盟铁路为例,考虑多类型车辆周转的货运服务网络设计问题,但国外铁路较少考虑车流不可拆分与树形改编要求。文献[13]针对国内铁路,考虑车辆周转设计铁路动态服务网络,未考虑车流树形改编要求、车站能力限制以及节点与区段不对流空车约束。本文以单组列车形式为主,考虑空车调配协调研究货物列车开行方案优化问题;以文献[4]为基础,在目标中考虑空车配送费用,结合配空与装卸取送、集编发的时间接续要求、节点与区段不对流空车要求,进行重空车流组织优化。

为避免引入空车调配因素导致车流组织方案数量激增和求解复杂度增加的问题,基于车流时空服务径路构建弧路模型;借鉴文献[14]中 $k$ 短路算法快速搜索重车、空车流时空服务径路可行集,减小问题规模。结合重车或空车配空的时间接续要求,将不同的 $k$ 短路重车流方案与空车配空方案相

关联,改进文献[4]的可行解构造方法,设计混合差分进化求解算法。

## 1 基于时空网络的重车、空车流动态组织过程分析

为分析空车调配对动态车流组织过程的影响,根据文献[6]配空与装运关系描述,拓展文献[4]中基于离散时空网络方法构建的货运时空服务网络,结合基本运行图架构与车流径路,确定网络结构,引入货场时空节点,重车装取与送卸弧及空车取送弧,刻画配空与装卸取送、集编发的时间接续关系,分析各重车、空车流在网络中寻路过程,将车流按一定规则分配到合理时空服务弧上,确定重车流时空服务径路与空车配送方案,新增集合和参数如表1所示,重车、空车动态组织过程如图1所示。

图1中, $i_1, i_2, \dots, i_8, i_9$ 为不同时空节点,假定装卸车、取送车等四项作业时长均为1个时段,可依据实际情况调整;假设长途车流 $d_{\overline{S_3 S_4}}$ 在 $S_3$ 站改编,当空车充足,其与短途车流 $d_{\overline{S_1 S_3}}$ 、 $d_{\overline{S_3 S_4}}$ 分别选择第2,2,6时段开始集结, $d_{\overline{S_3 S_4}}$ 车流时空运送方案为 $d_{\overline{S_3 S_4}}\{i_1, i_2, i_3, i_4, i_5\}$ ;当 $S_3$ 站空车不足, $d_{\overline{S_3 S_4}}$ 装车将受影响,一方面,选择开行空车直达列车 $E_{\overline{S_2 S_3}}$ 为 $S_3$ 站提供空车,则各车流方案不变,空车调配费用随之增加;另一方面,利用到站车流 $d_{\overline{S_2 S_3}}$ 完成卸车,进行重车配空, $d_{\overline{S_3 S_4}}$ 将在第9时段开始集结, $d_{\overline{S_3 S_4}}$ 方案变为 $d_{\overline{S_3 S_4}}\{i_1, i_2, i_3, i_4, i_8, i_9\}$ ,车流集结等待费用随之增加。显然,考虑空车调配协调,决策配空方案,对作业车流配合中转车流集结编组及时挂线产生重要影响。

## 2 模型构建

### 2.1 模型假设

(1) 快运、装车地直达列车编组方案和运行线安排已确定,空车直达列车方案未知,主要研究空车直达列车、技术直达列车和相邻编组站间的列车编组方案与运行线安排综合优化。

(2) 车流OD量、运到期限要求、车流径路已知;车流起运时段未知,即开始集结时段未知,需根据重车、空车流组织和时间窗要求进行决策。

(3) 基本运行图架构已确定,按时段描述区段通过能力;根据实际数据,采用单元时段换算,近似描述各弧时长。

(4) 实际中车流不允许拆分且需满足改编方案

唯一性,可以假定车流需要满足时空服务径路唯一性要求。另外,不考虑空车车种和重空混编方式,

表1 时空网络与车流的集合与参数

Table 1 Sets and parameters of space-time service network and wagon-flow

时空网络与车流	相关集合与参数
货物时空服务网络 $G_{S,T} = \{N_T, A_T\}$	根据文献[4]定义,货运物理网络为 $G = \{S, V\}$ 、货运服务网络为 $G_s = \{N, A\}$ , 其中 $s \in S$ 、 $v \in V$ 、 $n \in N$ 、 $a \in A$ 分别表示技术站、站间区段、服务节点、服务弧;以此为基础,结合各站对应的时空节点 IN 和 OUT 点,引入货运时空节点 FS, 构建新的货运时空服务网络 $G_{S,T} = \{N_T, A_T\}$ , 其中, $n_t \in N_T$ 为时段 $t \in T$ 内时空节点; $a_t \in A_T$ 为时段 $t \in T$ 内以 $n_t$ 为起点的时空服务弧,起点、终点分别为 $n_{a_t,+}$ 、 $n_{a_t,-}$
$A_T, A_T(n)$ $N_T(n)$	$A_T$ 包括文献[4]的到达列车等待改编弧集 $A_W$ , 出发列车的车流在站停留弧集 $A_{WA}$ , 列车改编作业弧集 $A_C$ , 列车运行时空弧集 $A_R$ , 还包括车流装取弧集 $A_{LP}$ 与送卸弧集 $A_{UD}$ , 空车取、送弧集 $A_{PE}$ , $A_{DE}$ , 后4类弧长为相应装卸取送作业时间,各类弧长与能力均以 $T_{a_t}, C_{a_t}$ 表示; $A_T(n)$ 包含 $n \in N$ 对应的 $A_C(n), A_W(n), A_{WA}(n), A_{LP}(n), A_{UD}(n), A_{PE}(n), A_{DE}(n)$ ; $N_T(n)$ 包含 $n \in N$ 映射的 $N_{T,IN}(n), N_{T,OUT}(n)$ 及货场点集 $N_{T,FS}(n)$
$A_C(n), T_{n,ct},$ $C_{c,n,t}, R_{n,t}, \gamma_n$	$a_t \in A_C(n)$ 的 $T_{a_t}$ 与 $C_{a_t}$ 为车站 $n$ 改编作业时间 $T_{n,ct}$ 与时段 $t$ 内改编作业能力 $C_{c,n,t}$ (车·时段 <sup>-1</sup> ), 令 $R_{n,t}$ 为时段 $t$ 内 $n$ 站能承受的最大改编车数(车·h <sup>-1</sup> ), 即改编弧 $a_t \in A_C(n)$ 的能力; $\gamma_n$ 为改编能力利用系数, 有 $C_{c,n,t} = \gamma_n R_{n,t}$
$A_W(n), C_{w,n,t}$ $A_{WA}(n), C_{wa,n,t}, \beta_n$ $L_{n,t}, L'_{n,t}$	$a_t \in A_W(n)$ 与 $a_t \in A_{WA}(n)$ 的 $T_{a_t}$ 皆为单元时长,前者 $C_{w,n,t}$ (车·时段 <sup>-1</sup> ) 根据时段 $t$ 内车站 $n$ 的到发线数量 $L'_{n,t}$ (条·h <sup>-1</sup> ) 与列车到达情况确定;后者 $C_{wa,n,t}$ (车·时段 <sup>-1</sup> ) 根据 $t$ 内 $n$ 站的分类线数量 $L_{n,t}$ (条·h <sup>-1</sup> ) 与列车出发情况确定; $\beta_n$ 为单条分类线存车能力
$A_R, m_{a_t}$ $m_{E,a_t}, m, m_E$ $A_R(a), T_a$	$a_t \in A_R$ 的 $T_{a_t}$ 为该弧的列车运行时间, $C_{a_t}$ 分为单位列车最大编组重车辆数 $m_{a_t}$ 或空车辆数 $m_{E,a_t}$ (车·列 <sup>-1</sup> ), 令 $m_{a_t} = m, m_{E,a_t} = m_E$ ; $a_t \in A_R(a)$ 指 $a \in A$ 对应的时空运行弧集, 有 $n_{a_t,+} \in N_{T,OUT}(n_{a_t,+}), n_{a_t,-} \in N_{T,IN}(n_{a_t,-})$ ; $T_a$ 为 $a$ 上列车运行时长
$Y_{ES,t,n}, T_{n,la},$ $T_{n,ul}, T_{n,pe}, T_{n,de}$	$Y_{ES,t,n}$ 为时段 $t$ 内 $n$ 站货场的空车存量, 初始时段 $t_0$ 空车存量 $Y_{ES,t_0,n}$ 已知, $T_{n,la}, T_{n,ul}, T_{n,pe}, T_{n,de}$ 分别为 $n$ 站的装车、卸车、取车、送车作业时间(h)
车流 $d \in D$	车流量为 $Q_d$ , 起点、终点分别为 $n_{d,+}, n_{d,-}$ , 开始集结时间窗为 $[t_d, t'_d]$ , $t_d$ 为最早开始集结时段; $t'_d$ 为最晚到达时段, 车流径路 $\bar{p}_d^*$ 是由 $a \in \bar{p}_d^*$ 和 $n \in N_{\bar{p}_d^*}$ 构成
$P_d, P_{ds},$ $P_{ds}', P_{a_t}$	$P_d$ 为车流 $d$ 时空服务径路集, $p \in P_{ds} \subset P_d$ 为 $d$ 全程运送时空服务径路, 由 $a_t \in A_{LP} \cup A_{UD} \cup A_W \cup A_{WA} \cup A_C \cup A_R$ 组成; $p \in P_{ds} \subset P_d$ 为虚拟时空服务径路, 指无法为 $d$ 提供合适运输服务; $P_{a_t}'$ 表示包含 $a_t$ 的车流时空服务径路集
$c_p, \theta, F_{p_{ds}}$	$c_p$ 为车流时空径路费用, 当车流 $d$ 选择 $p \in P_{ds} \subset P_d$ 时, $c_p = \theta Q_d \sum_{t \in T} \sum_{a_t \in p} T_{a_t}$ , 由所含的 $a_t \in A_T$ 确定, 包含车流改编与走行费用、到后待解与编后待发的延迟费用、装卸取送费用, $\theta$ 为单位车小时与人民币转换系数; 当 $d$ 选择 $p \in P_{ds} \subset P_d$ 时, $c_p = Q_d F_{p_{ds}}$ 为惩罚费用, $F_{p_{ds}}$ 为虚拟径路上单位车流量的惩罚成本(元·车 <sup>-1</sup> )

## 2.2 决策变量与中间变量

$x_p \in \{0, 1\}$  为重车流  $d \in D$  是否选择时空服务径路  $p \in P_d$  运送;  $x_{d,a} \in \{0, 1\}$  为车流  $d$  是否选择列车运行弧  $a$ ;  $x_{E,ij} \in \{0, 1\}$  为节点  $i, j \in N$  之间是否开行空车直达列车;  $y_{E,a_t}$  为选择时段  $t$  内时空弧  $a_t$  的空车流量;  $f_{a_t} \in Z_0^+, f'_{E,a_t} \in Z_0^+$  为时段  $t \in T$  内运行时空弧  $a_t \in A_R$  上行重车流、空车流列车的频率,  $Z_0^+$  为正

整数集;  $z_{a,n',\bar{p}_{d(n)}^*} \in \{0, 1\}$  为相同到站车流的树形运输决策变量<sup>[4]</sup>, 若终点为  $n$  站的车流  $d$ , 在同一技术站  $n' \in N_{\bar{p}_{d(n)}^*}$  改编后, 选择列车运行弧  $a \in \bar{p}_{d(n)}^* \cap A_{n',+}$ , 即  $n'$  站 ( $n_{a_t,+}$  站) 的后续改变站为  $n_{a_t,-}$  站时,  $z_{a,n',\bar{p}_{d(n)}^*} = 1$ ; 否则,  $z_{a,n',\bar{p}_{d(n)}^*} = 0$ 。其中,  $\bar{p}_{d(n)}^*$  为终点为  $n$  站的车流  $d$  的车流径路, 显然  $\bar{p}_{d(n)}^* = \bar{p}_d^*$ ;  $N_{\bar{p}_{d(n)}^*}$  为  $\bar{p}_{d(n)}^*$  所含车站集。

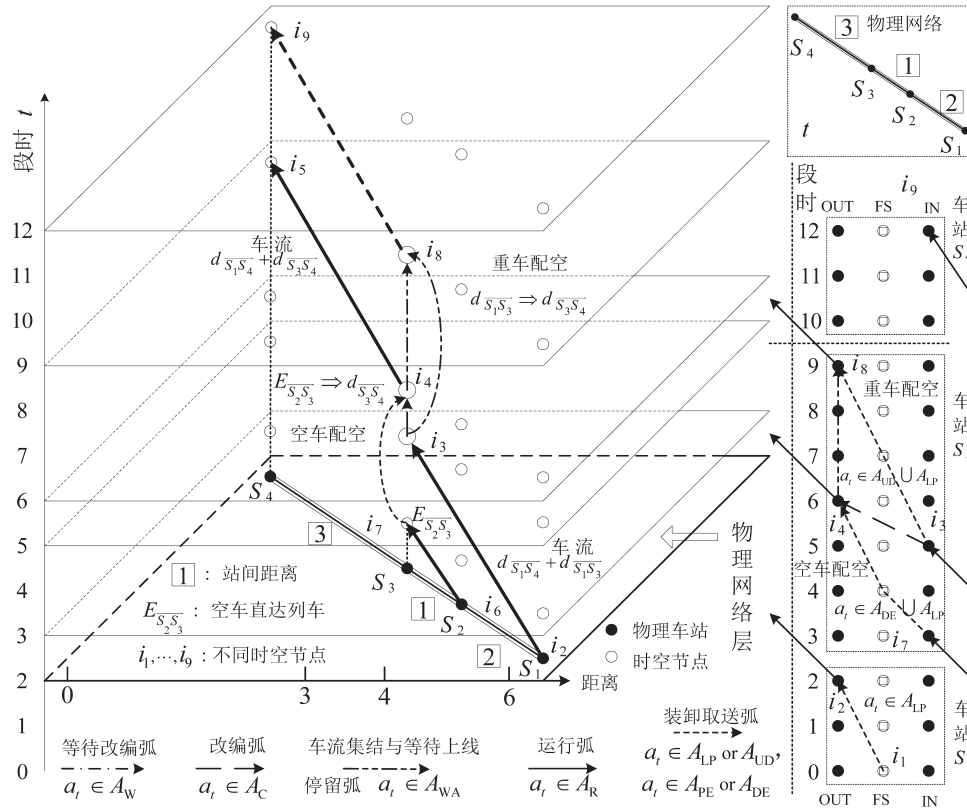


图1 货运时空服务网络与车流时空服务路径

Fig. 1 Car space-time path in freight transportation space-time service network

同时,引入中间变量  $X_{E,h} \in \{0,1\}$ ,  $\bar{X}_{E,h} \in \{0,1\}$  表示节点  $h \in N$  是否为空车需求点、供给点, 有  $X_{E,h} = \begin{cases} 1, \sum_{i \in N} x_{E,i,h} > 0 \\ 0, \text{其他} \end{cases}$ ,  $\bar{X}_{E,h} = \begin{cases} 1, \sum_{j \in N} x_{E,h,j} > 0 \\ 0, \text{其他} \end{cases}$ ; 采用

指示变量  $g_{v,a}, g_{\bar{v},a}$  表示运行弧  $a$  与区段  $v \in V$  关联性, 有:  $g_{v,a} = \begin{cases} 1, \text{运行弧} a \text{正向通过区段} v \\ 0, \text{其他} \end{cases}$

$g_{\bar{v},a} = \begin{cases} 1, \text{运行弧} a \text{反向通过区段} v \\ 0, \text{其他} \end{cases}$ ; 引入中间变量

$Z_{E,a_v} \in \{0,1\}$ ,  $\bar{Z}_{E,a_v} \in \{0,1\}$  表示区段  $v \in V$  上是否存在

正向,反向空车流,有:  $Z_{E,a_v} = \begin{cases} 1, \sum_{a \in A} g_{v,a} x_{E,i,j} > 0 \\ 0, \text{其他} \end{cases}$ , 其中  $a:a=(i,j)$  表示以

$i, j$  为起点、终点的服务弧。

## 2.3 模型建立

$$\min \left[ \sum_{d \in D} \sum_{p \in P_d} c_p x_p + \sum_{t \in T} \sum_{a_i \in A_R} \theta T_{a_i} \gamma_{E,a_i} + \sum_{t \in T} \sum_{a_i \in A_R} F_{a_i} (f_{a_i}^+ + f_{E,a_i}^-) \right] \quad (1)$$

$$\sum_{p \in P_d} x_p = 1, \forall d \in D \quad (2)$$

$$\sum_{a \in \bar{P}_{d(n)}^* \cap A_{n,+}} z_{a,n',\bar{P}_{d(n)}} \leq 1, \forall d \in D; n = n_{d,-}; n' \in N_{\bar{P}_{d(n)}} \quad (3)$$

$$x_{d,a} \leq z_{a,n',\bar{P}_{d(n)}}, \forall d \in D; n = n_{d,-}; n' \in N_{\bar{P}_{d(n)}}; a \in \bar{P}_{d(n)}^* \cap A_{n,+} \quad (4)$$

$$x_p \leq x_{d,a}, \forall d \in D; a \in \bar{P}_{d(n)}^*; a_i \in A_R(a); p \in P_{a_i}^* \cap P_d \quad (5)$$

$$X_{E,h} + \bar{X}_{E,h} = 1, \forall h \in N \quad (6)$$

$$Z_{E,a_v} + \bar{Z}_{E,a_v} = 1, \forall v \in V \quad (7)$$

$$\gamma_{E,a_i} \leq x_{E,i,j}, \forall i, j \in N; t \in T; a_i \in A_R; n_{a_i,+} \in N_{T,\text{OUT}}(i); n_{a_i,-} \in N_{T,\text{IN}}(j) \quad (8)$$

$$Y_{ES,t,n} + \sum_{\substack{a_{i_1} \in A^+(n_{i_2}); \\ n_{i_2} \in N_{T,\text{IN}}(n)}} \gamma_{E,a_{i_1}} + \sum_{\substack{d \in D: \\ n_{d,-} = n; \\ p \in P_d \cap P_{a_{i_3}}'; \\ a_{i_3} \in A_{UD}(n)}} Q_d x_p = Y_{ES,t+1,n} + \sum_{\substack{a_{i_4} \in A^+(n_{i_5}); \\ n_{i_5} \in N_{T,\text{OUT}}(n)}} \gamma_{E,a_{i_4}} + \sum_{\substack{d \in D: \\ n_{d,+} = n; \\ p \in P_d \cap P_{a_{i_5}}'; \\ a_{i_5} \in A_{LP}(n)}} Q_d x_p, \quad (9)$$

$$\forall n \in N; t, t_1, \dots, t_5 \in T, t_1 < t_2, t_2 = t - T_{n,\text{de}}, t_3 = t - T_{n,\text{ul}}, t_4 = t + T_{n,\text{pc}}, t_5 = t + T_{n,\text{la}} + T_{n,\text{pc}}$$



$$\eta f_{a_i} m_{a_i} \leq \sum_{\substack{p \in P'_{a_i} \\ d: p \in P_d}} Q_d x_p \leq f_{a_i} m_{a_i}, \forall a_i \in A_R; t \in T \quad (10)$$

$$\eta f_{E, a_i} m_{E, a_i} \leq y_{E, a_i} \leq f_{E, a_i} m_{E, a_i}, \forall a_i \in A_R; t \in T \quad (11)$$

$$\sum_{a_i \in A_R(a)} g_{v, a} (f_{a_i} + f_{E, a_i}) \leq C_{v, t}, \quad (12)$$

$$\forall v \in V; t \in T; t_1 = t - T_{v, a}^{\text{interval}}; a \in A$$

$$\sum_{a_i \in A_R(a)} g_{\bar{v}, a} (f_{a_i} + f_{E, a_i}) \leq C_{\bar{v}, t}, \quad (13)$$

$$\forall v \in V; t \in T; t_1 = t - T_{\bar{v}, a}^{\text{interval}}; a \in A$$

$$\sum_{\substack{p \in P'_{a_i} \\ d: p \in P_d}} Q_d x_p \leq C_{a_i}, \quad \forall a_i \in A_C(n); t \in T; n \in N \quad (14)$$

$$\sum_{\substack{p \in P'_{a_i} \\ d: p \in P_d}} Q_d x_p \leq C_{w, n, t} = m \left( L'_{n, t} - \sum_{a_i \in A_R(a)} f_{a_i} \right), \quad (15)$$

$$\forall a_i \in A_W(n); n \in N; t \in T; a \in A_{n, -}; t_1 = t - T_a$$

$$\sum_{\substack{p \in P'_{a_i} \\ d: p \in P_d}} Q_d x_p \leq C_{wa, n, t} = \beta_n (L'_{n, t} - \sum_{a_i \in A_R(a)} f_{a_i}), \quad (16)$$

$$\forall a_i \in A_{WA}(n); n \in N; t \in T; a \in A_{n, +}$$

式(1)为动态车流组织优化模型目标,使规划期内重车流径路费用、空车走行费用、列车开行费用的广义总费用最小; $a'_i \in A_R$ 、 $a''_i \in A_R$ 均为运行时空弧, $T_{a'_i}$ 为 $a'_i \in A_R$ 上列车运行时长,单位列车开行费用 $F_{a'_i} = \alpha + T_{a'_i} F'_{a'_i}$ , $\alpha$ 为单位列车固定开行费用(元·车<sup>-1</sup>); $F'_{a'_i}$ 指运行时空弧 $a'_i \in A_R$ 上单位列车每运行1时段的燃油费用(元·时段<sup>-1</sup>)。式(2)为重车流时空服务径路唯一性约束。式(3)、式(4)为车流改编径路唯一性约束与树形改编约束。式(5)为重车流选择列车运行弧与时空服务径路的关联约束,

当车流 $d$ 选择运行弧 $a$ 时,才能选择包含 $a$ 对应的运行时空弧 $a_i \in A_R(a)$ 的时空服务径路 $p \in P'_{a_i} \cap P_d$ 。式(6)、式(7)为节点与区段不对流空车约束,节点 $h \in N$ 不允许同时存在到达、出发空车流,且区段 $v \in V$ 不允许同时存在正向、反向空车流。式(8)为空车流选择列车运行弧与运行时空弧的关联约束,当节点 $i, j \in N$ 允许开行空车直达列车,空车流才可选择 $n_{a_i, +} \in N_{T, \text{OUT}}(i), n_{a_j, -} \in N_{T, \text{IN}}(j)$ 的运行时空弧 $a_i \in A_R$ 。式(9)为重车、空车流转关联约束<sup>[11]</sup>,是时段 $t$ 内 $n$ 站的空车分配决策,左侧为空车供应,即时段 $t$ 内 $n$ 站空车存量、到达空车量与完成卸车的到站重车流量三者之和;右侧为空车需求,即时段 $t+1$ 内 $n$ 站空车存量、时段 $t$ 内 $n$ 站为其他站配送的空车量与开始装车重车流量三者之和。式(10)、式(11)为列车运行时空弧的运输能力约束, $\eta m_{a_i}, \eta m_{E, a_i}$ 分别为 $a_i \in A_R$ 上单位列车最小重车或空车编组辆数; $d: p \in P_d$ 为车流 $d$ 通过时空服务径路 $p$ ,即两者相关联。式(12)、式(13)为区段通过能力约束, $T_{v, a}^{\text{interval}}, T_{\bar{v}, a}^{\text{interval}}$ 指列车运行弧 $a$ 若需正向或反向途经区段 $v$ ,其通过 $v$ 的后方全部区段所需时长; $C_{v, t}, C_{\bar{v}, t}$ 指时段 $t$ 内区段 $v$ 的正向、反向通过能力(列)。式(14)~式(16)为技术站能力约束,依次指改编作业能力、到发线与分类线数约束。

### 3 算法设计

通过表2建模特点分析可知,本文模型引入的空车调配约束较复杂,既有算法<sup>[4,13]</sup>均难以快速有效处理,故本文结合重车或空车配空的时间接续要求,通过 $k$ 短路搜索与可行解构造,将退火机制引入差分进化算法(DE)进行求解。

表2 本文建模特点分析

Table 2 Model characteristic of this paper

文献	模型	目标函数	约束条件	求解方法
文献[4]	点弧模型	列车开行与重车流径路费用(走行、改编与延迟费用,虚拟弧惩罚费用)的总费用最小	车流动态性、改编方案唯一性与树形改编要求;运行弧与线站能力、运到期限	模拟退火算法
文献[13]	弧路模型	运输弧(列车开行)费用、货流与车辆流的运输径路费用的总费用最小	基于改编方案唯一性、运到期限构建货流径路;运输弧能力、弧上货流量与车辆流量关联约束	分支-定价-切割算法
本文	弧路模型	列车开行费用、重车流径路费用、空车走行费用的广义总费用最小	在文献[4]基础上,进一步考虑配空与装卸取送、集编发的时间接续要求;节点与区段不对流空车约束	混合差分进化算法

(1)  $k$  短路搜索与可行解构造  
借鉴文献[14]中 $k$  短路算法搜索重车、空车流

时空服务径路可行集,以减小问题规模。并结合重车或空车配空的时间接续要求,将不同的 $k$  短路重

车流方案与空车配空方案相关联,引入贪婪策略、退火策略,改进文献[4]的可行解构造方法,可行解构造流程如图2所示。

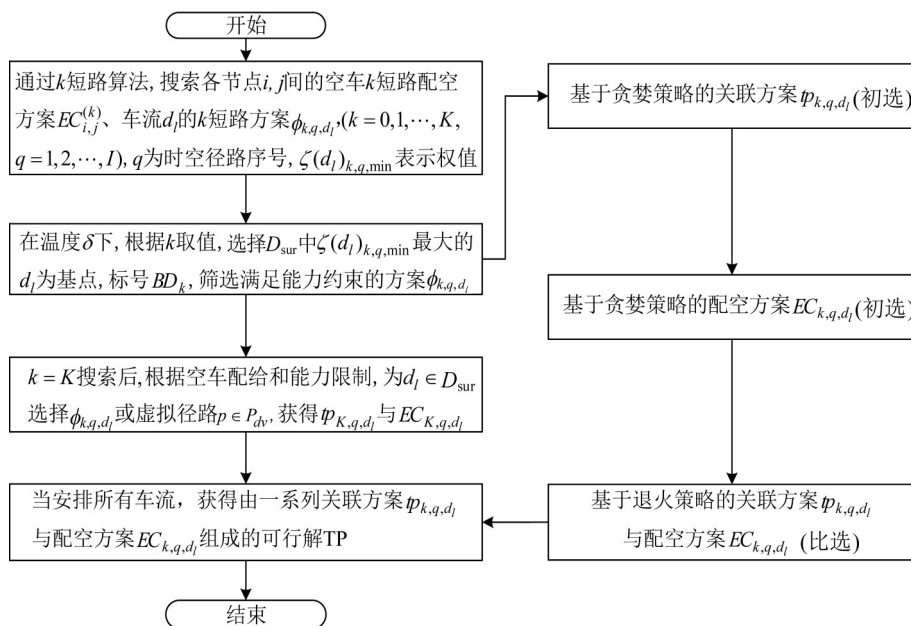


图 2 可行解构造流程

Fig. 2 Flow diagram of constructing feasible solution

### ① 基于贪婪策略的关联与配空方案初选

当  $k$  值确定,若基点或关联车流  $d_i$  起点站空车充足,则根据不同时空径路序号  $q$  值,分别以  $\phi_{k,q,d_i}$  为起点,按重车流约束与合并开行要求,以关联方案费用增长最小、列车开行费用节省最大为原则,依次筛选关联车流  $d_{i, \text{RD}}$ ,确定关联方案  $tp_{k,q,d_i}$ ;否则,按配空要求,以重车配空优先、空车配空次之的原则和配空方案费用排序,为各配空方案设置配空策略编码  $k'_d \in K_d$ ,选择  $k'_d$  最小的配空方案  $EC_{k,q,d_i}$ 。

### ② 基于退火策略的关联与配空方案比选

以相同  $k$  值,不同  $q$  值的车流  $d_l$  方案  $\phi_{k,q,d_l}$  为起点,形成不同关联方案  $tp_{k,q,d_l}$  与配空方案  $EC_{k,q,d_l}$ , 即方案  $IC_{k,q,d_l}$ , 以概率  $\psi_{k,q,d_l} = \exp\left[-(\zeta_{k,q,d_l} - \zeta_{\min})/\delta\right]$  选择较优方案  $IC_{k,q,d_l}$ , 其中,  $\zeta_{k,q,d_l}, \zeta_{\min}$  为各方案  $IC_{k,q,d_l}$  权值与最小权值,  $\delta$  为当前温度。

## (2) 编码与初始种群

根据可行解构造中车流  $d_i$  运送方案  $\phi_{k,q,d_i}$ , ( $k=0,1,2,\dots,K; q=1,2,3,\dots,I$ ) 的时空径路序号  $q$  以及配空策略编码  $k'_{d_i} \in K_{d_i}$ , 设计个体实数编码方案:  $[Y_{d_1}, Y_{d_2}, \dots, Y_{d_l}, \dots, Y_{d_{n-1}}, Y_{d_n}, Y'_{d_1}, Y'_{d_2}, \dots, Y'_{d_l}, \dots, Y'_{d_{n-1}}, Y'_{d_n}], \forall d_l \in D, 1 \leq Y_{d_l} \leq I+1, 0 \leq Y'_{d_l} \leq K_{d_l}+1$ , 其中,  $I+1$  为虚拟径路方案,  $K_{d_l}+1$  表示不需要配空, 并以概率  $\psi_{k,q,d_i}$  随机选择方案  $IC_{k,q,d_i}$ , 获得规模为

 $N_{\text{ns}}$  的初始种群。

### (3) 算子设计与算法流程

算法流程如图3所示。

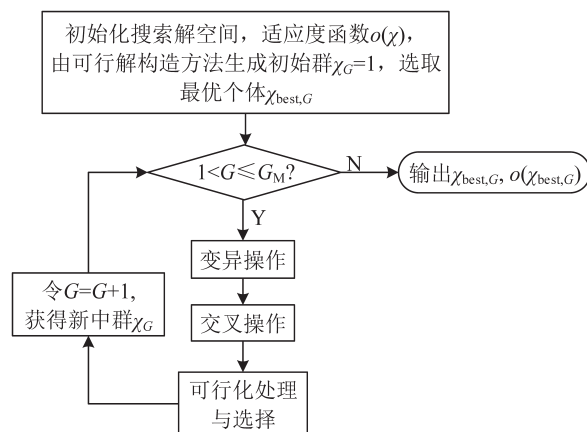


图3 混合差分进化算法(HYDE)的算子设计与流程

Fig. 3 Operator design and framework of hybrid differential evolution algorithm

采用常用的 DE/best/1 变异策略及交叉、选择策略,  $G_m$  为最大迭代次数, 计算式为

$$\begin{aligned} \gamma_{\tau,G} &= \chi_{\text{best},G} + F \cdot (\chi_{r1,G} - \chi_{r2,G}), \\ \forall \tau &= 1, 2, \dots, N_{\text{ds}}, F \in (0, 1) \end{aligned} \quad (17)$$

体;变异率  $F=0.7$ ;rand表示随机数; $D$ 表示车流集合;交叉率  $CR=0.1$ ;  $\chi_{\tau,l,G}$ ,  $\gamma_{\tau,l,G}$ ,  $U_{\tau,l,G}$  分别为个体  $\chi_{\tau,G}$  中对应第  $l$  支车流运送方案与配空方案的  $l$  列原始、变异、交叉后编码。

$$\chi_{\tau,G+1} = \begin{cases} U_{\tau,G}, & o(U_{\tau,G}) < o(\chi_{\tau,G}) \\ \chi_{\tau,G}, & \text{其他} \end{cases}, \forall \tau = 1, 2, \dots, N_{ps} \quad (19)$$

当变异交叉新个体  $\chi_{\tau,G}$  不满足约束,需先根据  $\chi_{\tau,G}$  编码确定车流  $d_l$  改编调整方案和配空策略  $k'_{d_l}$ , 按可行解构造方法获得新解;当配空策略  $k'_{d_l}$  无效时,则选  $k'_{d_l}$  最小的可行配空方案。由于可行解构造引入退火策略,故该策略将影响DE算法。

#### 4 案例分析

以我国东北地区某局部铁路网为例<sup>[4]</sup>,对本文模型及算法进行验证。路网中有19个站,主要参数详见文献[4]与图4,车流径路与区段通过能力、车流OD量与车站初始空车存量,限于篇幅不予罗列。规划期设为  $T=72\text{h}$ ;  $\theta=50\text{元}\cdot\text{车}\cdot\text{h}^{-1}$ ;  $\alpha=3000\text{元}\cdot\text{列}^{-1}$ ;  $m=50\text{车}$ ;  $m_E=60\text{车}$ ;  $F'_{a_i}=500\text{元}\cdot\text{h}^{-1}$ ;  $F_{p_{a_i}}=1000\text{元}\cdot\text{车}^{-1}$ ;  $\eta=0.9$ ;  $\beta_n=200\text{车}\cdot\text{条}^{-1}$ ;  $\gamma_n=0.8$ 。路网结构及相关参数如图4所示。

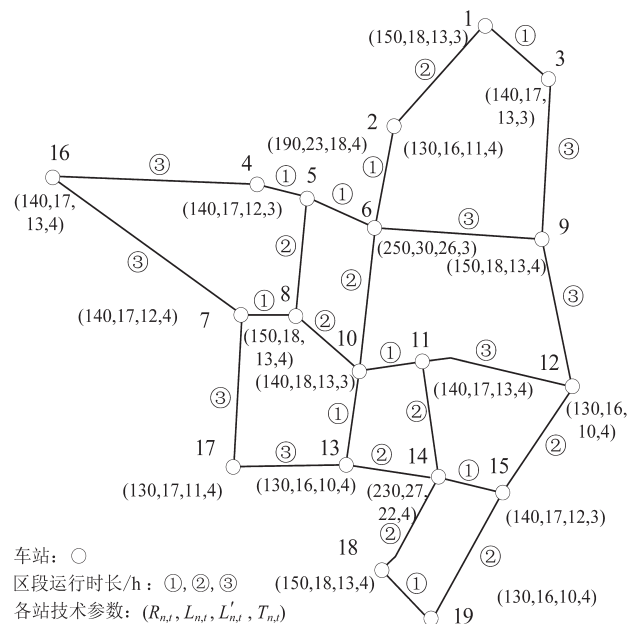


图4 路网结构及相关参数

Fig. 4 Structure schematic diagram of railway network and relevant parameters

##### (1) 空车调配影响分析

以线路  $\{1, 2, 6, 10, 13, 14\}$  和  $\{7, 8, 10, 11, 12\}$  组成的“十字”子路网为例,根据表3的车流量,假定所有车流的最晚到达时段  $t'_d$  为16,分别求解空车充足与空车不足情景下的优化方案。若空车充足,优化方案目标值为283500,如图5所示。

表3 子路网的车流OD量

Table 3 Wagon-flow volume in sub-network

编号	起讫点	车流量	$t_d$	编号	起讫点	车流量	$t_d$
$\bar{A}$	1→13	40	7	$\bar{I}$	1→10	10	1
$\bar{B}$	1→6	10	7	$\bar{J}$	2→11	33	6
$\bar{C}$	2→14	35	7	$\bar{K}$	2→6	17	6
$\bar{D}$	2→12	15	7	$\bar{L}$	2→8	27	7
$\bar{E}$	6→13	10	13	$\bar{M}$	2→6	23	7
$\bar{F}$	7→12	35	7	$\bar{N}$	6→8	23	13
$\bar{G}$	7→14	15	7	$\bar{O}$	6→10	40	7
$\bar{H}$	1→6	40	1	$\bar{P}$	6→11	17	10

若空车不足,假定空车存量及装卸取送作业时间如表4所示,则需空车调配和调整图5的方案,引起部分列车开行时段变化及车流集结等待时间增加,优化方案如图6所示,目标值增加18150。

配空方案如下:

① 采用空车配空,车站2初始空车存量为90辆,列车  $\bar{J}+\bar{K}$  在第6时段发出,占用50辆空车,需从车站1在时段1发出空车直达列车1,调配空车60辆,满足列车  $\bar{C}+\bar{D}$ 、 $\bar{L}+\bar{M}$  装车需求,保证在时

段7、9及时发车。为满足车站7的列车  $\bar{F}+\bar{G}$  装车需求,需从车站8在时段1发出空车直达列车2。

② 采用重车配空,由于空车直达列车1,占用区段1→2在时段1的能力,列车  $\bar{H}+\bar{I}$  需时段2出发,时段5到达车站6;车流  $\bar{O}$  占用车站6的40辆空车存量,与中转车流  $\bar{I}$  组成列车  $\bar{O}+\bar{I}$  发出;而到站车流  $\bar{H}$  经送卸车作业,为车流  $\bar{P}$ 、 $\bar{N}$  提供空车,使得车流  $\bar{P}$  在时段11才能完成集结,故中转车流  $\bar{J}$  需要多集结等待1个时段,与其组成列车  $\bar{J}+\bar{P}$  发出。

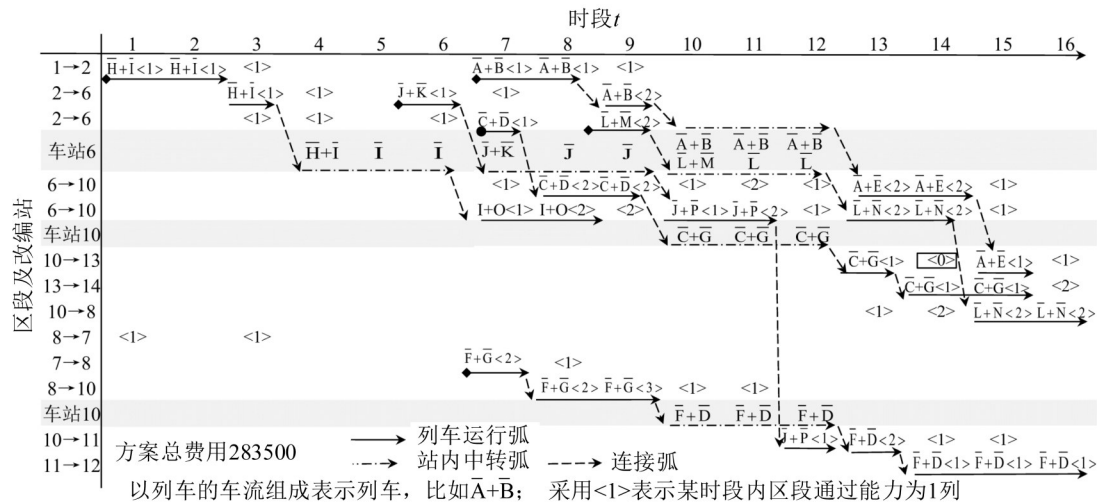


图5 空车充足情形下的优化方案  
Fig. 5 Optimization planning without considering empty car distribution

表4 子路网各站初始空车存量及装卸取送作业时间  
Table 4 Empty car distribution and relevant parameters in sub-network

车站	1	2	6	7	8	10	11	12	13	14
时段1内 空车存量/辆	160	90	50	0	80	10	50	80	45	70
作业时间	各站取车、送车作业均为1 h					各站装车、卸车作业均为2 h				

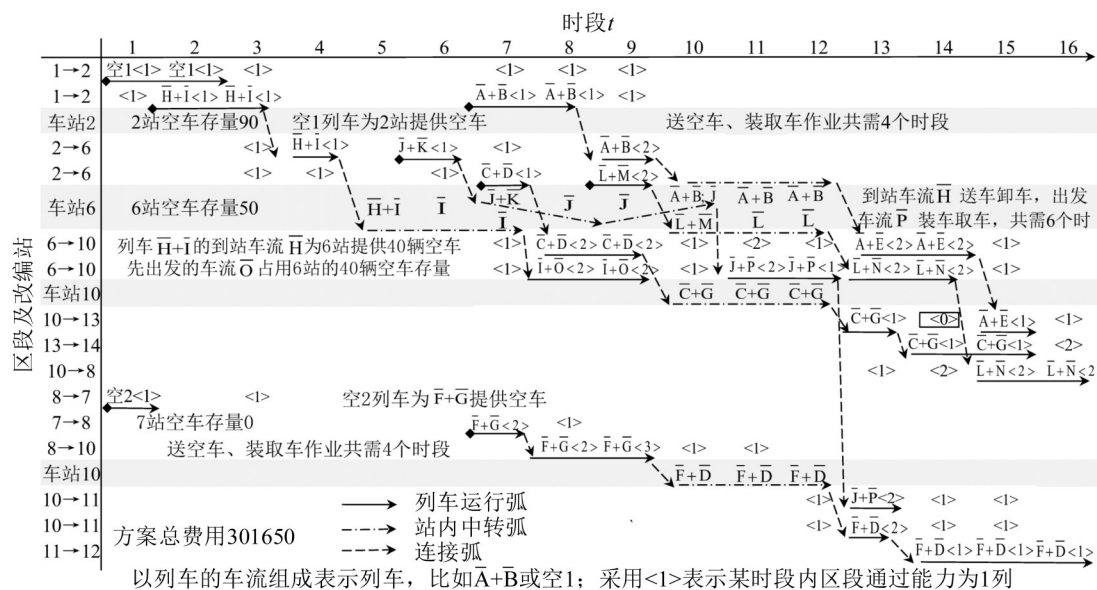


图6 空车不足情形下的优化方案  
Fig. 6 Optimization planning when considering empty car distribution

若未考虑空车调配与列车开行方案协调,比如车站1在时段2发出空车直达列车1,将无法及时满足列车 $\bar{C}+\bar{D}$ 、 $\bar{L}+\bar{M}$ 装车需求,导致其中一列延误发车,增加额外等待费用。将两者综合优化,有助于合理安排配空方案,减少空车走行费用,及时满足装车需求,有效保证作业车流配合中转车流集结编组及时挂线,提高方案可实施性。

(2) 算法效果分析  
HYDE 算法采用 C # 编程,其中:  $K=10$ ,  $K_d=20$ ,  $I=30$ ,  $N_{ps}=20$ ,  $CR=0.1$ ,  $F=0.7$ ,在 CPU 为 Intel Core E6550, 2.33 GHz×2, 8 G 内存的 PC 机上运行,算法求解性能如表5所示。  
当算例规模较小时,CPLEX、SA 及 HYDE 算法均可获得全局最优解。当算例规模扩大时,CPLEX



算法无法在限定时间求得全局最优解;SA算法收敛速度快,但易于陷入局部最优;HYDE算法收敛

较快,求解质量更优。

表5 算法求解性能分析

Table 5 Performance analysis of algorithms

算例概况				CPLEX		SA (模拟退火) <sup>[4]</sup>		HYDE(本文算法)	
算例	车站	车流	T	求解时间/s	目标值/ $10^3$	求解时间/s	目标值/ $10^3$	求解时间/s	目标值/ $10^3$
I	10	16	16	195	301.65	49	301.65	56	301.65
II	10	50	24	7200		435	1123.05	527	990.65
III	14	80	48	7200		691	1972.35	752	1791.10
IV	19	100	72	7200		975	2612.06	1266	2367.15

基于算例IV的SA、HYDE算法收敛对比如图7所示。

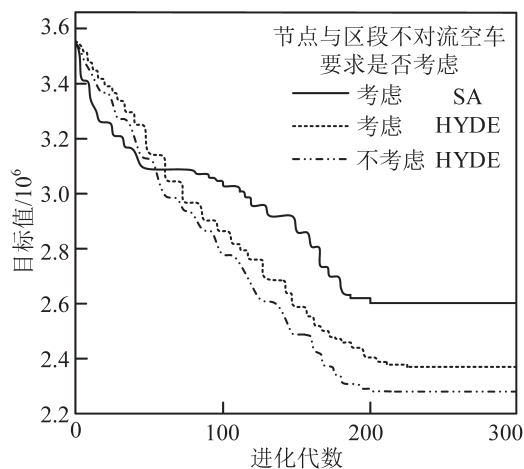


图7 基于算例IV的SA、HYDE算法收敛对比

Fig. 7 Convergence curve of algorithm

不考虑节点与区段不对流空车约束,目标值减小,表明该要求对优化方案造成重要影响;HYDE算法能有效处理该约束,获得更切实际的优化方案。

## 5 结论

为实现空车调配与列车开行方案协调优化,本文考虑配空与装卸取送、集编发的时间接续要求、节点与区段不对流空车要求,构建切合实际的整数规划弧路模型,同时决策列车径路与编组内容、开行时段与频率及空车调配方案等。依据重车、空车流方案的关联性与编码设计,设计混合差分进化求解算法,有效平衡种群多样性与收敛速度。算例结果表明,模型和算法有效,有助于减少空车走行费用,及时满足装车需求,协调车流组织各环节,提高方案可实施性,保证流线结合与运到期限。

## 参考文献

[1] 倪少权,张杰,等.市场导向动态列车运行图协同编制

理论及系统设计[M].北京:科学出版社,2019.[NI S Q, ZHANG J, et al. Theoretical methods and system design for market-oriented and dynamic train scheduling[M]. Beijing: Science Press, 2019.]

- [2] IRELAND P, CASE R, FALLIS J, et al. The canadian pacific railway transforms operations by using models to develop its operating plans[J]. Interfaces, 2004, 34(1): 5-14.
- [3] CRAINIC T G. Service network design in freight transportation[J]. European Journal of Operation Research, 2000, 122(2): 272-288.
- [4] 刘晓伟,仇戈,等.考虑车流时空分布不均衡的货物列车开行方案优化研究[J].交通运输系统工程与信息, 2019, 19(2): 137-145. [LIU X W, QIU G, et al. Freight transportation service network design problem with unbalanced spatio-temporal distribution of wagon-flow[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2019, 19(2): 137-145.]
- [5] 梁栋,林柏梁.铁路空车调整的多阶段策略优化模型研究[J].铁道学报, 2007, 29(1): 1-6. [LIANG D, LIN B L. Research on the multi-stage optimization model of empty railcar distribution[J]. Journal of China Railway Society, 2007, 29(1): 1-6.]
- [6] 王波,荣朝和,等.铁路空车调配的多时点优化模型研究[J].交通运输系统工程与信息, 2015, 15(5): 157-163, 171. [WANG B, RONG C H, et al. Multi-time point optimization model for empty railcar distribution[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2015, 15(5): 157-163, 171.]
- [7] KIKUCHI S. Empty freight car dispatching model under freight car pool concept[J]. Transportation Research Part B, 1985, 19(2): 169-185.
- [8] GLICKMAN T S, SHERALI H D. Large scale network distribution of pooled empty freight cars over time, with limited substitution and equitable benefits[J]. Transportation Research Part B, 1985, 19(2): 85-94.
- [9] HOLMBERG K, JOBORN M, et al. Improved empty freight car distribution[J]. Transportation Science, 1998, 32(2): 163-173.

下转第204页

- [5] FELIPE Á, ORTUÑO MT, RIGHINI G, et al. A heuristic approach for the green vehicle routing problem with multiple technologies and partial recharges[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2014(71): 111–128.
- [6] KESKIN M, ÇATAY B. Partial recharge strategies for the electric vehicle routing problem with time windows[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2016(65): 111–127.
- [7] HIERMANN G, PUCHINGER J, ROPKE S, et al. The electric fleet size and mix vehicle routing problem with time windows and recharging stations[J]. *European Journal of Operational Research*, 2016, 252(3): 995–1018.
- [8] MAHMOUDI M, ZHOU X. Finding optimal solutions for vehicle routing problem with pickup and delivery services with time windows: A dynamic programming approach based on state-space-time network representations[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2016(89): 19–42.
- [9] YANG S, NING L, SHANG P, et al. Augmented Lagrangian relaxation approach for logistics vehicle routing problem with mixed backhauls and time windows [J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2020, 135: 101891.
- [10] GRIPPO L, SCIANDRONE M. On the convergence of the block nonlinear Gauss-Seidel method under convex constraints[J]. *Operations research letters*, 2000, 26(3): 127–136.

---

上接第 188 页

- [10] JOBORN M, CRAINIC T G, et al. Economies of scale in empty freight car distribution in scheduled railways[J]. *Transportation Science*, 2004, 38(2): 121–134.
- [11] HAGHANU A. Formulation and solution of a combined train routing and makeup, and empty car distribution model[J]. *Transportation Research Part B*, 1989, 23(6): 433–452.
- [12] ANDERSEN J, CRAINIC T G, CHRISTIANSEN M. Service network design with management and coordination of multiple fleets[J]. *European Journal of Operational Research*, 2009, 193(2): 377–389.
- [13] 王保华, 何世伟. 考虑车辆周转的铁路动态货运服务网络设计优化模型及其分支-定价-切割算法[J]. *铁道学报*, 2018, 40(2): 8–14. [WANG B H, HE S W. Optimization model and branch-price-cut algorithm for design of railway dynamic freight service network considering rolling stock management[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2018, 40(2): 8–14.]
- [14] JHA K C, AHUJA R K, SAHIN G. New approaches for solving the block-to-train assignment problem[J]. *Networks*, 2008, 51(1): 48–62.

---

上接第 195 页

- [11] 成卫青, 卢艳红. 一种基于最大最小距离和SSE的自适应聚类算法[J]. *南京邮电大学学报(自然科学版)*, 2015, 35(2): 102–107. [CHENG W Q, LU Y H. Adaptive clustering algorithm based on maximum and minimum distances, and SSE[J]. *Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications (Natural Science)*, 2015, 35(2): 102–107.]