文章编号：1003-1421(2026)11-0081-10
引用格式：罗志友，罗常津，王大伟，等. 铁路网空重车流协同推算优化方法研究[J]. 铁道运输与经济，2026，48(11)：81-90，107.
LUO Zhiyou，LUO Changjin，WANG Dawei，et al. Research on Collaborative Calculation Optimization Method of Empty and Loaded Wagon-Flow in Railway Network[J]. Railway Transport and Economy，2026，48(11)：81-90，107.

铁路网空重车流协同推算优化方法研究

罗志友[1]，罗常津[2]，王大伟[3]，马　亮[4]，汤夏平[5]

(1.中国铁路上海局集团有限公司 芜湖东站，安徽 芜湖　241000；2.中国铁道科学研究院集团有限公司 电子计算技术研究所，北京　100081；3.中国铁路沈阳局集团有限公司 物流事业部，辽宁 沈阳　110001；4.西南交通大学 信息科学与技术学院，四川 成都　611756；5.西南交通大学 四川省列车运行控制技术工程研究中心，四川 成都　611756)

摘　要：路网车流推算与瓶颈区段车流疏解是铁路货运车流组织的前提与关键，开展相关研究有助于铁路调度部门准确、全面、实时地掌握车流的分布状态并制定合理、高效的车流组织方案、空车调配计划、列车运行计划等。结合离散时空网络建模方法，构建路网空重车流协同推算模型，以车流走行成本最少与装车计划完成率最高为目标，考虑最大通过能力、装卸站空车供需平衡等限制条件，并设计混合禁忌搜索-遗传算法求解模型。以一个设计的局域路网为背景进行算例分析，求解路网车流分配结果，验证模型与算法的有效性。

关键词：铁路运输；车流推算；离散时空网络；混合禁忌搜索-遗传算法
中图分类号：U292.3　　**文献标识码**：A　　**DOI**：10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.20250609004

Collaborative Calculation Optimization Method of Empty and Loaded Wagon Flows in Railway Network

LUO Zhiyou[1]，LUO Changjin[2]，WANG Dawei[3]，MA Liang[4]，TANG Xiaping[5]

(1. Wuhudong Station, China Railway Shanghai Group Co., Ltd., Wuhu 241000, Anhui, China; 2. Institute of Computing Technologies, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China; 3. Logistics Department, China Railway Shenyang Group Co., Ltd., Shenyang 110001, Liaoning, China; 4. School of Information Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, Sichuan, China; 5. Sichuan Engineering Research Center for Train Operation Control Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, Sichuan, China)

Abstract: Railway network wagonflow estimation and bottlenecksegment congestion relief are prerequisites and key elements for organizing freight wagon flows. Studying these issues enables railway dispatching departments to accurately, comprehensively, and in real time master the wagon-flow distribution and to formulate reasonable, efficient wagon-flow organization schemes, emptycar allocation plans, and trainoperation schedules. Combining a discrete spatiotemporal network modeling method, a collaborative model was constructed for estimating empty and loaded wagon-flow across the network. The model was to minimize wagon-flow movement costs while maximizing the completion rate of loading plans, subject to constraints such as maximum carrying

收稿日期：2025-06-09
通信作者：罗常津(1981—)，男，北京人，中国铁道科学研究院集团有限公司电子计算技术研究所正高级工程师。
基金项目：中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划课题(N2025X030)

capacity and emptycar supplydemand balance at loading/unloading stations. A hybrid tabu search-genetic algorithm was designed to solve the model. Taking a designed local railway network as a case study, the wagon-flow distribution results were computed to verify the effectiveness of the proposed model and algorithm.

Keywords: Railway Transportation; Wagon-Flow Estimation; Discrete Spatio-Temporal Network; Hybrid Tabu Search-Genetic Algorithm

0　引言

铁路车流推算是指对未来铁路网络上或特定车站内的车流动态进行预测和计算的过程。根据范围不同可以分为路网车流推算与车站车流推算，路网车流推算主要针对整个或者局部铁路运输网络，对车辆在路网中流动情况进行预测和推算的过程，主要关注铁路路网空重车流的整体运行态势，包括各铁路局集团公司分界站的空重车交接，空车调配方案以及路网车流径路选择等。路网车流推算的结果可以给出未来某一时刻路网车流的具体分布情况，为铁路运输部门提供全局性的车流分布信息，指导运输计划的制定、车流的合理调整以及运输资源的充分利用，从而提升路网的整体运输能力，保障车流在铁路运输网络中的合理、高效运行。

当前研究主要针对铁路网空车流调配、重车流推算、编组站车流推算等问题进行研究。单武[1]建立了多阶段动态空车调整模型，并设计了模拟退火启发式算法进行求解。张红斌等[2]以通过对长期和近短期车流运行轨迹历史数据的统计，生成车流径路选择偏好参数表，可反映路网中多种复杂因素对于车流径路选择的影响，但未引入时空网络，推算精度有限。王斌等[3]提出一种基于流计算的车流推算架构模型，将推算过程分解为多个子任务流进行并行处理，以保证车流推算处理结果的及时性和有效性。为提升货运作业和车流状态的准确把握与推算能力，廖志林等[4]研究设计了铁路车流推算及监测系统，实现铁路车流推算及监测手段自动化、智能化管理。Zhu 等[5]聚焦运行干扰下的动态重调度，构建模型调整时刻表与路径，但仅针对重车路径调整，未考虑空重车之间的转化关系。马海彬等[6] 依托运筹学理论和模拟退火算法思想，设计了车流径路智能调整算法——泛动均衡法，实现了运输距离、车流强度、路网能力条件约束下的车流径路智能化编制。李栋[7]根据铁路货物运输的关键环节，将区域铁路重空车流分布态势细分为车流构成、车流输送、车站作业、分界口作业等4项子态势，提出了优化驱动的区域铁路重空车流分布态势推演方法，实现对推演周期内任意时刻的区域铁路重空车流分布态势的预测。何文晖[8]考虑空车调配对满足装车需求的影响，基于动态协同编制优化重车开行方案与空车调配方案的思想，以重车运输作业时间与装车需求误差时间最小化为目标，建立动态货物列车开行方案编制优化模型，并设计了两阶段遗传-禁忌搜索算法。白鹏斌等[9]基于车种代用原则构建空重车分配模型并设计蚁群算法求解模型，但未考虑时段化调度需求，无法适配铁路作业调度的动态性。赵凤娟等[10]提出以高附加值货流改编次数最少为目标的改编链优化模型，但考虑的目标较为单一，无法适配铁路实际生产需求。徐禾颖等[11]基于重载铁路装车站对到达空车的需求，研究面向重车列组合优化的空车调配问题。柳佳音[12]提出了通过推算车流分布状态并计算路网瓶颈识别指标的动态运能瓶颈识别方法，构建了考虑空车供需结构的动态车流推算模型。朱芮奇[13]建立了编组站车流推算的动态配流优化模型。薛锋等[14]为解决铁路车流分配与径路优化模型中的难约束问题，避免群智能算法在应对该问题时难以求解的不足，提出了一种基于改进灰狼算法的约束优化方法。文献[15]研制了一种铁路实时车流推算方法及设备，提高了车流预测的准确性和可靠性。

综上，既有关于车流推算的研究大多只是单方面地考虑重车或者空车，缺乏对空重车流转化机制的分析，且多数采用连续型时空网络或无时空网络，模型规模大、求解难，无法适配铁路“时段化动态调度”场景，从而导致推算结果不全面、不准确。

1　问题描述

路网车流推算的结果为任意时刻路网的车流分布情况，普通的铁路物理网络只能体现出各车站之间的连接关系，无法准确描述路网中的车流运行情况与接续关系，因此，在物理网络的基础之上，有必要构建时空网络，将空间与时间结合起来，以准确地描述路网中的车流分布情况。按刻度划分，时空网络可以分为连续型时空网络与离散型时空网络。连续型时空网络在时间上是连续的，可以精确到任一时刻；而离散型时空网络在时间上是离散的，按照一定的间隔将时间划分为若干部分，形成时间节点集合，每个时间节点代表了其所在的这一段时间[9-10]。

研究采用离散时空网络方法建立路网中空重车流协同推算模型，示例路网如图1所示，构建该路网所对应的离散时空网络，路网中共包含5个车站以及6个区间，各区间上数字表示单位距离，用于判断走行路径的长短。

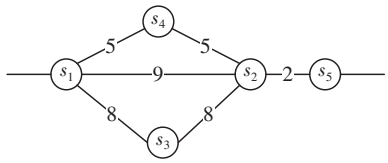


图1　示例路网

Fig.1　Example railway network

时间层面的划分方面，假设推算周期为1 d，将1 d划分为相等的若干时段，根据现行阶段计划的持续时间，确定划分时间标准为3 h，即将整个推算周期等距划分为8个时段，则在时间层面上包含8个节点，由此可得出整个时空网络中共有40个节点。

在离散时空网络构建完成后，规定每支车流的走行路径只能在最短走行路径与次短走行路径中选择。路网车流信息如表1所示，将表1中的3支车流添加至时空网络中，示例车流时空网络模型如图2所示。

设定列车恰好在一个时段内通过一个区间，在图2所示时空网络模型中，共有40个节点以及11条弧段，代表车流可选的走行弧段，在路网通过能力范围内，车流不同走行路径会产生不同的运输时间。因此，离散时空网络建模可以十分清晰地描

表1　路网车流信息

Tab.1　Railway network train flow information

编号	弧线颜色	OD	可走行路径
1	绿色	$s_1 \rightarrow s_3$	$s_1 \rightarrow s_3$，$s_1 \rightarrow s_2 \rightarrow s_3$
2	蓝色	$s_1 \rightarrow s_5$	$s_1 \rightarrow s_2 \rightarrow s_5$，$s_1 \rightarrow s_4 \rightarrow s_2 \rightarrow s_5$
3	红色	$s_2 \rightarrow s_4$	$s_2 \rightarrow s_4$，$s_2 \rightarrow s_1 \rightarrow s_4$

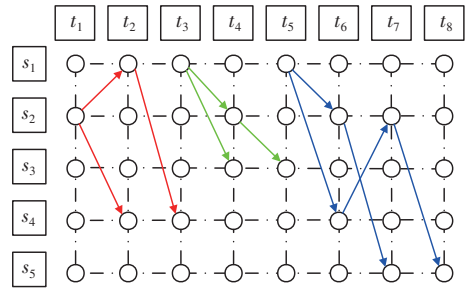


图2　示例车流时空网络模型

Fig.2　Sample wagon spatio-temporal network model

述在推算时间内路网中各车流的走行路径与在各车站的到发时间。在后续的研究中，将研究车流量在时空网络上各弧段的优化分配方法，以实现路网中的车流推算。

2　空重车流协同推算模型

2.1　变量与参数定义

模型输入为从列车调度指挥系统、确报系统、现车系统等获得的各车站出发车流信息、空车需求量以及铁路网络基础参数等，输出为推算周期内路网中的车流分配情况，相关参数及变量如下。

（1）路网基础参数定义。路网基础参数一般固定不变，可通过查询相关资料获取。S为路网中车站集合；s_i为第i个车站；S^{G}为空车供给站集合；$s_{i'}$为第i'个供给车站；S^{X}为空车需求站集合；$s_{i''}$为第i''个需求车站；$b_{1,2}$为站s_1与站s_2的连接关系，$b_{1,2}=1$表示有连接，否则为无连接；$r_{1,2}$为站s_1与站s_2之间的最短运输时间，min；$g_{1,2}$为站s_1与站s_2区间的最大通过能力，车，由区间通过能力与列车平均编组车辆数相乘得到；$g_i^{\max}$为站s_i最大存车能力，车；$g_i^{\min}$为站s_i的最低运用车保有量，车。

（2）离散时空网络相关参数定义。记$T=\{t_1, t_2, \cdots, t_{N^T}\}$为决策时段集合，$N^T$为总的时段数，$t_j$为第$j$个决策时段；$V$为由路网车站集合与时段集合形成的时空网络节点集合，v_k为第k个节点；A为

时空网络弧段集合，α_l为第l个弧段，$\alpha_{1,2}$为节点k_1至节点k_2的一条有向弧段，A_k^+为以节点k为终点的弧段集合，A_k^-为以节点k为起点的弧段集合，c_l为弧段α_l的最大通过能力；p_l^{E}为单位空车通过弧段α_l所需要的走行成本，p_l^{H}为单位重车通过弧段α_l所需要的走行成本。离散时空网络相关参数定义在离散时空网络构建完成后确定，同样属于固定参数。

（3）车流相关参数定义。W为总的车流集合，W^{E}为空车流集合，W^{H}为重车流集合；N_m为车流w_m所含车辆数，车；$d_{m,i}$为整数变量，若车流w_m的到站为站s_i，则$d_{m,i}=N_m$，反之$d_{m,i}=0$；$f_{m,i}$为整数变量，若车流w_m的发站为站i，则$f_{m,i}=N_m$，反之$f_{m,i}=0$；p_m为车流w_m的可行走行路径集合，p_m^1为最短走行路径，p_m^2为次短走行路径；$f_{i,j}$为t_j时段s_i站的现车数量。车流相关参数随时发生变化，属于动态参数，可由相关铁路信息系统获取。

（4）货运计划相关参数定义。包括出发计划与装车计划等信息。记$Q_{i,j}^{\mathrm{E}}$为站s_i在t_j时段可以进行配空作业的空车数量，车；$F_{i,j}^{\mathrm{E}}$为站s_i在t_j时段实际出发的空车数量，车；$B_{i,j}^{\mathrm{E}}$为站s_i在t_j时段总共产生的空车数量，车；$B_{i,j}^{\mathrm{H}}$为站s_i在t_j时段总共产生的重车数量，车；$X_{i,j}^{\mathrm{E}}$为站s_i在t_j时段所需求的空车数量。货运计划参数同样属于动态参数，可由运货五系统获取。

（5）决策变量定义。本模型的输出为推算周期内路网中的车流分配情况，设定0-1决策变量o_{mjl}，当车流w_m第t_j时段在a_l弧段上时取1，反之取0；在此基础上进一步细分为重车流与空车流，记o_{mjl}^{E}为空车流的决策变量，同理记o_{mjl}^{H}为重车流决策变量。同时设定连续决策变量$u_{i',i'',j}$，表示在t_j时段中，空车供给站$s_{i'}$向空车需求站$s_{i''}$调配的空车数，车。

2.2　约束条件

（1）空车供给站流量平衡约束。空车供给站s_i在t_j时段可供给的空车数，一部分源于前一时段的结余空车，而上一时段的结余空车可由上一时段可供给空车减去实际出发空车所得，实际出发空车数即为以站s_i为起点的弧段上的空车总流量；另一部分源于站内卸车作业产生的空车，并且所有的车站都需要有一个最低的运用车保有量，空车供需模型如图3所示。横轴代表整个推算周期，其中实线代表经过一个时段，虚线代表经过若干时段。

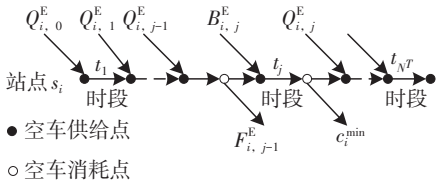


图3　空车供需模型

Fig.3　Empty car supply and demand model

根据图3所示关系，得出空车供给站s_i在t_j时段可供给的空车数$Q_{i,j}^{\mathrm{E}}$的计算表达式如式(1)所示。

$$Q_{i,j}^{\mathrm{E}}=Q_{i,j-1}^{\mathrm{E}}-F_{i,j-1}^{\mathrm{E}}-g_i^{\min}+B_{i,j}^{\mathrm{E}} \tag{1}$$

其中站s_i在初始时段的空车可供给量$Q_{i,0}^{\mathrm{E}}$由以往的车流推算数据获取，作为初始数据输入。

某时段站s_i出发的空车数等于该时段以s_i为起点的弧段上且为始发车流的空车流总数，即有如下等量关系。

$$F_{i,j-1}^{\mathrm{E}}=\sum_{s_{i'}\in A_i^-}\sum_{w_m\in W}(F_{i',j-1}^{\mathrm{E}}\times f_{m,i'}) \tag{2}$$

且根据空重车流的转换关系，车站在某时段产生的空车数应当等于本时段内到达并进行卸车作业的重车数，即有如下等量关系。

$$B_{i,j}^{\mathrm{E}}=\sum_{S_{i'}\in A_i^+}\sum_{w_m\in W}(F_{i',j-1}^{\mathrm{H}}\times d_{m,i'}) \tag{3}$$

将$F_{i,j-1}^{\mathrm{E}}$与$B_{i,j}^{\mathrm{E}}$代入式(1)中，可得到

$$Q_{i,j}^{\mathrm{E}}=Q_{i,j-1}^{\mathrm{E}}-\sum_{s_{i'}\in A_i^-}\sum_{w_m\in W}(F_{i',j-1}^{\mathrm{E}}\times f_{m,i'})+\sum_{s_{i'}\in A_i^+}\sum_{w_m\in W}(F_{i',j-1}^{\mathrm{H}}\times d_{m,i'})-g_{\min}^i \tag{4}$$

此外，在任意时段内，站s_i向外调配的空车数应当小于等于$Q_{i,j}^{\mathrm{E}}$。

$$\sum_{s_{i'}\in S}u_{i,i',j}\leqslant Q_{i,j}^{\mathrm{E}}\qquad\forall t_j\in T \tag{5}$$

（2）空车需求站流量约束。在任意时段t_j内，运至装车站s_i的空车数应当满足该站的装车计划，即运到空车数应当大于等于计划装车数。

$$\sum_{l\in A_i^+}\sum_{w_m\in W}(o_{mjl}^{\mathrm{E}}\times f_{m,i})\geqslant X_{i,j}^{\mathrm{E}}\qquad\forall t_j\in T \tag{6}$$

在该时段到达$s_{i'}$站的空车流，可能是由某个空车供给站s_i在之前的时段向$s_{i'}$站发出的，存在以下流量关系。

$$\sum_{s_i\in s^c}u_{i,i',(t_j-d_{i,i'})}=\sum_{l\in A_{i'}^+}\sum_{w_m\in W}(o_{mjl}^{\mathrm{E}}\times f_{m,i'})\qquad\forall t_j\in T,\ t_j\geqslant d_{i,i'} \tag{7}$$

（3）弧段通过能力约束。在任意时段t_j内，每条弧段上的车流量总和应当小于该弧段的最大通过

能力。

$$\sum_{w_m \in W}(o_{mjl} \times N_m) \leqslant c_l \qquad \forall t_j \in T,\ \forall a_l \in A \tag{8}$$

（4）车站存车能力约束。在任意时段t_j内，车站s_i内的现车数量等于上一时段的结余现车量减去本时段发车数F_t，加上本时段接车数J_t。

$$N_{i,\,j} = N_{i,\,j-1} - F_t + J_t \tag{9}$$

式中：N_i^0为站s_i在初始时间t_0的现车数据。

如图3所示，s_i站发车数等于本时段以s_i为起点的弧段上且为始发车流的车流量，接车数等于上一时段以s_i为终点的弧段上且为终到车流的车流量，等量关系如式(10)和式(11)所示。

$$F_t = \sum_{a_l \in A_i^-}\sum_{w_m \in W}(o_{mjl}^{\mathrm{E}} \times f_{m,\,i}) \tag{10}$$

$$J_t = \sum_{a_l \in A_i^+}\sum_{w_m \in W}(o_{m(j-1)l}^{\mathrm{E}} \times d_{m,\,i}) \tag{11}$$

将F_t与J_t代入式(9)中，可得出式(12)。

$$N_{i,\,j} = N_{i,\,j-1} - \sum_{a_l \in A_i^-}\sum_{w_m \in W}(o_{mjl} \times f_{m,\,i}) + \sum_{a_l \in A_i^+}\sum_{w_m \in W}(o_{m(j-1)l} \times d_{m,\,i}) \tag{12}$$

在任意时段内，车站内的车辆数均不应大于最大存车能力。

$$N_{i,\,j} \leqslant g_i^{\max} \qquad \forall s_i \in S,\ t_j \in T \tag{13}$$

（5）流量守恒约束。等量关系如式(14)所示。

$$\sum_{a_l \in A_i^+}\sum_{w_m \in W}(\neg d_{m,\,i} \times o_{m(j-1)l}) = \sum_{a_l \in A_i^-}\sum_{w_m \in W}(\neg d_{m,\,i} \times o_{mjl}) \qquad \forall t_j \in T \tag{14}$$

其中，$\neg d_{m,\,i}$为$d_{m,\,i}$逻辑取反，若$d_{m,\,i}=0$，表示站s_i不是车流w_m的终到站，则该车流出发时的车辆数应与到达时相等。

（6）路径选择约束。为缓解某些区间或车站的运输压力，在不影响效率的前提下车流在特定情况下可以选择备选路径绕行。设定路网中车流$w_m \in W$只能选择最短走行路径p_m^1，与次短走行路径p_m^2，设最短走行路径的长度为l_m^1，次短走行路径的长度为l_m^2，设定整数集合$L_m = \{l_m^1,\ l_m^2\}$，则有以下约束。

$$\sum_{a_l \in A}\sum_{t_j \in T} o_{mjl} \in L_m \qquad \forall w_m \in W \tag{15}$$

（7）车流类型约束。在模型假设中提到车流无法混编，则一支车流不能既是重车又是空车，则存在以下约束。

$$o_{m^{\mathrm{E}}jl}^{\mathrm{E}} + o_{m^{\mathrm{H}}jl}^{\mathrm{H}} \leqslant 1 \qquad \forall w_{m^{\mathrm{E}}} \in W^{\mathrm{E}},\ \forall w_{m^{\mathrm{H}}} \in W^{\mathrm{H}},\ \forall t_j \in T,\ \forall a_l \in A \tag{16}$$

（8）决策变量约束。o_{mjl}为0-1决策变量，只能取0或1；而e_{eij}^t表示i站向j站配送的空车数，其值应当为非负整数，存在以下约束。

$$o_{mjl} \in \{0,\ 1\} \qquad \forall t_j \in T,\ w_m \in W,\ a \in Au_{i',\,i'',\,j} \geqslant 0 \quad \forall s_{i'},\ s_{i''} \in S,\ t_j \in T \tag{17}$$

2.3　目标函数

空重车流协同推算问题，一般以推算周期内的总运输成本最低为目标函数，在本模型中，成本一般指的是货物列车走行距离的成本，总成本又可以细分为重车流走行成本与空车流走行成本，总成本的数学表达式如式(18)所示，其中P^{E}为空车总走行成本，元/列车公里；P^{H}为重车总走行成本，元/列车公里。

$$\min Z_1 = P^{\mathrm{E}} + P^{\mathrm{H}} \tag{18}$$

空重车总走行成本等于空重车流总量与单位走行成本的乘积，而空重车流总量等于所有时段、所有弧段上的总车流数，如式(19)、式(20)所示。

$$P^{\mathrm{E}} = \sum_{t_j \in T}\sum_{a_l \in A}\sum_{w_m \in W^E}(o_{mjl}^{\mathrm{E}} \times N_m \times p_l^{\mathrm{E}}) \tag{19}$$

$$P^{\mathrm{H}} = \sum_{t_j \in T}\sum_{a_l \in A}\sum_{w_m \in W^H}(o_{mjl}^{\mathrm{H}} \times N_m \times p_l^{\mathrm{H}}) \tag{20}$$

将P^{E}以及P^{H}代入式(18)中，可得出式(21)。

$$\min Z_1 = \sum_{t_j \in T}\sum_{a_l \in A}\sum_{w_m \in W^E}(o_{mjl}^{\mathrm{E}} \times N_m \times p_l^{\mathrm{E}}) + \sum_{t_j \in T}\sum_{a_l \in A}\sum_{w_m \in W^H}(o_{mjl}^{\mathrm{H}} \times N_m \times p_l^{\mathrm{H}}) \tag{21}$$

此外，由于空车供应不及时，以及技术作业延误等原因，会导致在某些时段中，一部分车站无法完成相应的运输任务。因此，为使得优化结果满足路网运输效率最高的需求，要使运输需求最大程度地兑现，即各装车站的重车产生数要尽可能接近其空车需求数，数学表达式如式(22)所示。

$$\min Z_2 = \sum_{t_j \in T}\sum_{s_i \in S}|X_{i,\,j}^{\mathrm{E}} - B_{i,\,j}^{\mathrm{H}}| \tag{22}$$

本模型的2个目标，分别是总成本最小与空车需求和空车兑现差值最小，两者均为极小化目标，且可以通过成本单位来调整2个目标属于同一数量级，满足线性加权的前提。对总走行成本Z_1与空车需求兑现差值Z_2分别进行离差标准化处理，得到标准化后的目标值Z_1^*和Z_2^*如下。

$$Z_1^* = \frac{Z_1 - Z_{1\min}}{Z_{1\max} - Z_{1\min}} \tag{23}$$

$$Z_2^* = \frac{Z_2 - Z_{2\min}}{Z_{2\max} - Z_{2\min}} \tag{24}$$

式中：$Z_{1\max}$，$Z_{1\min}$为总走行成本的最大、最小值，元/列车公里；$Z_{2\max}$，$Z_{2\min}$为空车需求兑现差值的最大、最小值，元/列车公里，由路网基础参数与车流数据测算得到。为方便分析可以通过设置权重的方式将以上2个目标函数整合为一个单目标函数。

$$\min Z = \alpha_1 \times Z_1^* + \alpha_2 \times Z_2^* \tag{25}$$

与站内车流推算不同，路网车流推算的2个目标函数不存在明显的优先级之分，因此可以用加权和方法转换为单一目标函数，并且$\alpha_1 + \alpha_2 = 1$。而在实际的铁路运输过程中，车流走行的总成本与车站装车计划完成率的价值也是动态变化的，应当在不同的场景下做出具体分析，从而确定具体的权重值。

3　模型分析及求解算法

3.1　模型分析

模型包括2类决策变量，包括时空网络中重车流分布、空车流分布以及空车调配方案，空车流分布又受到空车调配方案的影响；由式(25)可得，模型的目标函数包括路网车辆总走行成本最少和车站运输任务兑现程度最高2部分，第1部分由路网车流分布决定，第2部分则由空车调配方案决定。因此，模型可以看作为在路网通过能力限制以及运输资源限制之下，对空车调配方案以及车流径路选择的综合考虑。

研究结合遗传算法与禁忌搜索算法的优点，使用混合禁忌搜索-遗传算法对模型进行求解。

3.2　求解算法

混合禁忌搜索-遗传算法是启发式算法的一种。首先采用遗传算法在解空间中进行全局搜索，快速定位至可能存在最优解的区域，将得到的解作为禁忌搜索的初始解，继续进行局部优化，进一步优化解的质量。这样既防止了遗传算法陷入局部最优，又解决了禁忌搜索算法过于依赖初始解的问题，兼顾了局部搜索与全局搜索，提高了找到全局最优解的概率。

3.2.1　编码设计

本模型的决策变量可归结为空车调配方案与车流路径选择2种，空车调配方案选择就近分配的原则。对于车流路径选择，染色体编码方法如图4所示，对于每支车流$\forall w_m \in W$，用0表示选择最短路径p_m^1，用1表示选择次短路径p_m^2，以此类推，则每一支车流的路径选择变量记为$o_m^W \in \{0, 1\}$。令单个染色体表示一个完整的车流路径选择方案，其长度等于车流总数。

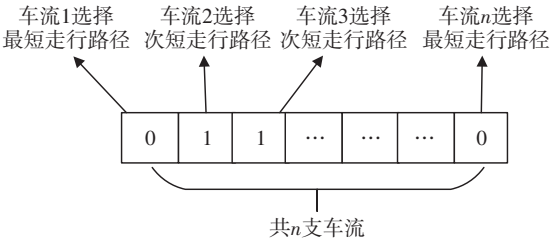


图4　染色体编码方法

Fig.4　Chromosome coding method

3.2.2　禁忌表设计

禁忌表是禁忌搜索算法的核心，用于记录近期访问过的解或解的某些属性，防止算法陷入循环。设计禁忌表如下。

（1）禁忌对象。记录最近发生变化的车流编号以及变化后的路径选择结果。例如在某次迭代后，车流w_m的路径选择结果o_m^W从$v_{m,1}^W$变为$v_{m,2}^W$，则生成禁忌对象$(m, v_{m,1}^W)$，并加入禁忌表中。

（2）禁忌表结构。采用循环队列的方法实现禁忌表，规定禁忌表大小，当禁忌表满后，则移除最早进入禁忌表的禁忌对象。

（3）藐视规则。当在禁忌表中的某个禁忌对象所产生的解优于当前最优解时，则允许接受该禁忌对象。

（4）禁忌期限。设定禁忌期限为T代，即某个禁忌对象在T次迭代内不能再次被选择，在禁忌期限结束后，从禁忌表中移除该禁忌对象。

3.2.3　遗传算法部分设计

算法中的遗传算法部分设计如下所示。

（1）种群初始化。设定种群大小为N，每个个体代表一个车流分配方案，为个体中每个编码随机分配0和1。

（2）适应度函数设计。反映当前解的优劣程度，适应度函数如下。

$$f(x) = -(Z_x + \beta_1 \times C_1 + \beta_2 \times C_2) \tag{26}$$

式中：Z_x为以x方案进行车流分配时目标函数Z的

取值；C_1为区间通过能力超限数；C_2为未能满足的空车需求数；β_1与β_2分别为惩罚系数，区间通过能力超限原则上是不被允许的，因此β_1取一个较大值。

（3）选择操作。用于保存种群中的优质个体，采用轮盘赌选择法，种群中个体被选择的概率与其适应度成正比。

（4）交叉操作。用于产生新个体，设定交叉概率，采用均匀交叉策略。

（5）变异操作。用于维持种群多样性，设定变异概率，采用位翻转变异。

3.2.4　算法流程

模型求解算法流程如图5所示。基于计算时段站内车流推算结果初始化各车站出发重车流集合，结合历史推演数据与装车计划，分别确定各供给站可供给空车量与需求站空车需求量；随后遵循就近调配原则，结合区间运输耗时的时序约束，将各时段生成的空车匹配对应时段后的空车需求，完成空车OD分配，构建空车流集合与整体空重车流集合。在此基础上，依托路网拓扑结构，采用Dijkstra算法求解各支车流的最短、次短路径并完成路径编码，通过随机选取路径生成算法候选解，循环迭代，得到路网车流推算结果。

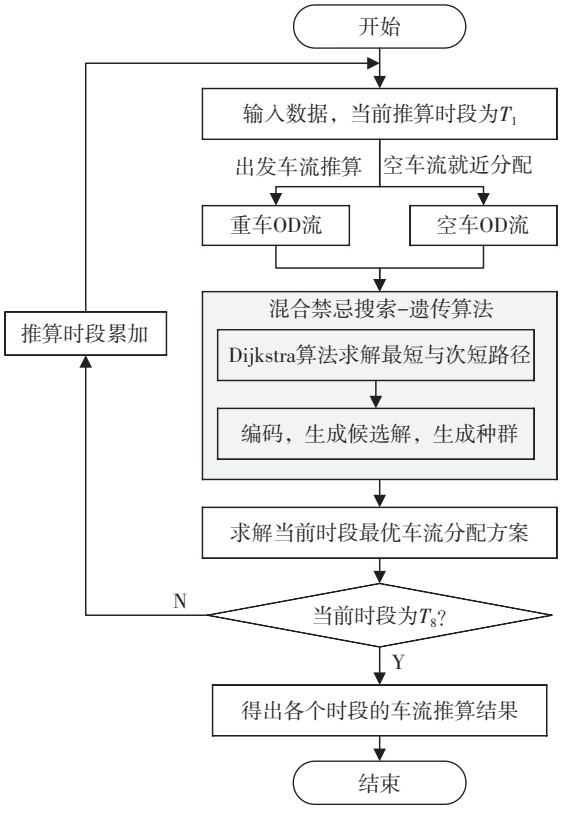


图5　模型求解算法流程

Fig.5　Model solving algorithm flow

4　算例分析

4.1　输入数据

局部路网结构图如图6所示，该路网共包含30个车站与52条区间，区间通过能力如表2所示。

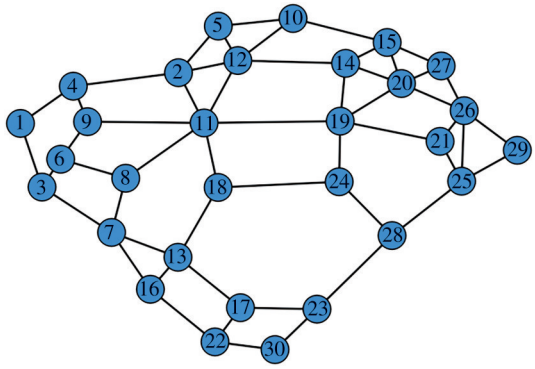


图6　局部路网结构图

Fig.6　Local railway network structure

根据车站出发车流推算的结果以及就近分配的空车调配方案，获取在T_1时段出发重车如表3所示，T_1时段出发空车如表4所示。

4.2　模型与算法参数设计

（1）车流推算模型参数设置。基础参数方面，参考货运日计划、班计划的划分习惯，设定推算总时间为2 d，分为8个离散时段T_1—T_8，每个时段的持续时间为6 h，T_1时段为当日6:00—12:00，以此类推，建立离散时空网络，其余参数由铁路信息化系统获取。

目标函数方面，在铁路运输中，单位重车运输的成本一般要大于单位空车运输，设定单位重车运输成本C_l^{H}为10，单位空车运输成本C_l^{E}为5。基于局域路网的车流数据、运输成本数据与装车计划数据，通过熵权法计算2个目标函数的信息熵与权重系数，消除主观赋值偏差，经测算设定权重参数α_1为0.8，α_2为0.2。

（2）混合禁忌搜索-遗传算法参数设置。遗传算法方面，种群数量为50，交叉概率为0.8，策略为均匀交叉，变异概率为0.1，策略为位翻转变异，利用轮盘赌选择法，每次迭代保留适应度前10的个体。适应度函数中惩罚系数β_1为10 000，β_2为200。

表2　区间通过能力　车

Tab.2　Section passing capacity

序号	区间	通过能力	序号	区间	通过能力
1	1—3	300	27	13—18	600
2	1—4	350	28	14—15	150
3	2—4	450	29	14—19	600
4	2—5	250	30	14—20	200
5	2—11	360	31	15—20	150
6	2—12	200	32	15—27	250
7	3—6	200	33	16—22	300
8	3—7	400	34	17—22	650
9	4—9	450	35	17—23	350
10	5—10	500	36	18—24	650
11	5—12	240	37	19—20	550
12	6—8	280	38	19—21	660
13	6—9	200	39	19—24	500
14	7—8	200	40	20—26	300
15	7—13	200	41	20—27	200
16	7—16	200	42	21—25	400
17	8—11	350	43	21—26	300
18	9—11	450	44	22—30	200
19	10—12	200	45	23—28	350
20	10—15	350	46	23—30	200
21	11—12	350	47	24—28	450
22	11—18	600	48	25—26	200
23	11—19	580	49	25—28	350
24	12—14	420	50	25—29	250
25	13—16	200	51	26—27	200
26	13—17	400	52	26—29	150

禁忌搜索算法方面，禁忌表长度为10，邻域定义为进行一次位翻转，邻域大小为20，藐视准则为当前解优于最优解。

混合策略方面，为方便处理，将动态变化的K值设为固定值10，即遗传算法每迭代10次后进行一次禁忌搜索算法；算法结束条件为迭代次数超过1 000或者连续15代最优解未发生变化。

4.3　车流推算结果分析

根据以上输入数据，进一步求解路网各区间的车流分配结果，通过调用上文所述混合禁忌搜索–遗传算法对模型进行求解，可得出T_1时段所有出发空重车流的最优路径选择结果如表5所示，输出结果中第n位表示第n支车流的路径选择结果，0表示选择最短路径运行，1表示选择次短路径运行。

从表5可以看出，在不超出区间最大通过能力的前提下，只有k_{45}车流选择次短路径运行，有98.3%的出发车流选择最短路径运行。同时所有的

表3　T_1时段出发重车　车

Tab.3　Departure loaded wagons in T_1 period

序号	OD	车流量	序号	OD	车流量
k_1	1—11	46	k_2	1—22	91
k_3	2—27	56	k_4	2—18	78
k_5	2—21	73	k_6	2—26	68
k_7	3—13	44	k_8	3—19	80
k_9	3—24	83	k_{10}	4—9	67
k_{11}	4—16	79	k_{12}	4—28	49
k_{13}	5—20	53	k_{14}	5—29	52
k_{15}	6—14	92	k_{16}	6—30	85
k_{17}	7—26	49	k_{18}	7—16	53
k_{19}	8—20	41	k_{20}	8—25	74
k_{21}	9—1	75	k_{22}	9—3	50
k_{23}	9—18	55	k_{24}	10—28	42
k_{25}	10—18	95	k_{26}	11—24	48
k_{27}	11—23	77	k_{28}	12—21	70
k_{29}	12—24	57	k_{30}	13—20	51
k_{31}	13—30	58	k_{32}	14—21	60
k_{33}	14—29	92	k_{34}	14—25	90
k_{35}	15—28	40	k_{36}	15—22	66
k_{37}	16—8	48	k_{38}	16—20	60
k_{39}	17—27	76	k_{40}	17—2	71
k_{41}	17—15	62	k_{42}	18—5	65
k_{43}	18—7	115	k_{44}	18—28	60
k_{45}	19—9	120	k_{46}	19—5	70
k_{47}	19—27	62	k_{48}	19—25	38
k_{49}	19—13	30	k_{50}	21—12	43
k_{51}	22—1	89	k_{52}	22—23	78
k_{53}	25—19	78	k_{54}	25—22	54
k_{55}	26—10	61	k_{56}	28—1	67
k_{57}	28—23	84	k_{58}	28—18	43
k_{59}	30—27	72	k_{60}	30—10	97

表4　T_1时段出发空车　车

Tab.4　Departure empty wagons in T_1 period

序号	OD	车流量	序号	OD	车流量
e_1	19—14	91	e_2	9—2	57
e_3	12—10	80	e_4	11—5	59
e_5	16—17	98	e_6	30—23	78
e_7	1—4	68	e_8	16—13	55
e_9	29—28	86	e_{10}	29—21	79

表5　车流路径选择结果

Tab.5　Wagon-flow path selection results

车流序号	路径选择结果
$k_1 - k_{10}$	0000000000
$k_{11} - k_{20}$	0000000000
$k_{21} - k_{30}$	0000000000
$k_{31} - k_{40}$	0000000000
$k_{41} - k_{50}$	0000100000
$k_{51} - k_{60}$	0000000000
$e_1 - e_{10}$	0000000000

空车流均选择最短路径，即能够在规定时间内到达空车需求站，符合上文所述总货运成本最小与运输计划完成率最大的协同目标，并同时考虑路网的最大通过能力。具体来看，k_{45}车流的最短路径为“19→20→14→9”，其中区间19—20的最大通过能力为550车，T_1时段该区间已分配k_{32}，k_{37}等车流共计490车，剩余通过能力仅60车，无法容纳120车的k_{45}车流，因此车流选择绕行，且从目标函数来看，k_{45}车流绕行时，目标函数为43 575，而k_{32}与k_{37}绕行时目标函数的值分别为44 820与45 690，所以k_{45}车流绕行时造成的损失最小，证明了提出的模型与算法的有效性，能够很好地模拟路网车流情况，给出最优的车流分配方法。

根据出发车流的OD与路径选择情况，路网车流推算结果如图7所示，其中弧段上的数字代表车流编号与车流量，清晰地反映了各区间与车站的拥堵程度。此外，图中所示车流在一个时段内通过一个区间，在下一个时段内成为路网现存车流，继续影响着下一时段出发车流的路径选择结果。

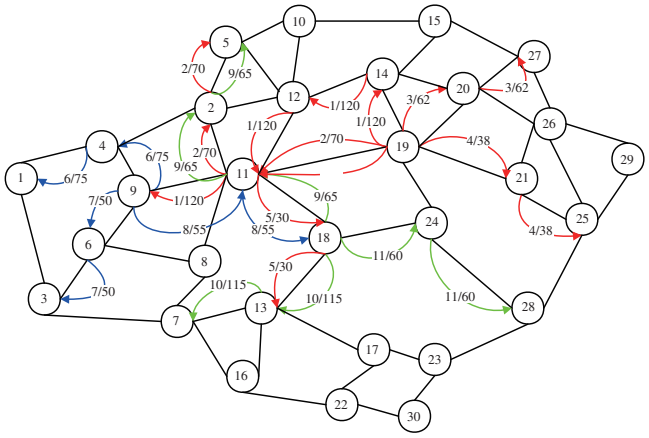


图7　路网车流推算结果

Fig.7　Railway network wagon-flow prediction results

适应度函数如式(26)所示，设迭代次数为300次，每次迭代保留高适应度个体，淘汰低适应度个体，混合禁忌搜索-遗传算法收敛曲线如图8所示。

由图8可以看出，混合禁忌搜索-遗传算法当迭代至第60代左右时，适应度函数已趋于收敛，此时适应度函数取值为-58 202，可视为已经找到最优解。

采用单一遗传算法以及单一禁忌搜索算法对模型进行求解，与混合禁忌搜索算法所求的结果进行对比，算法对比如表6所示。

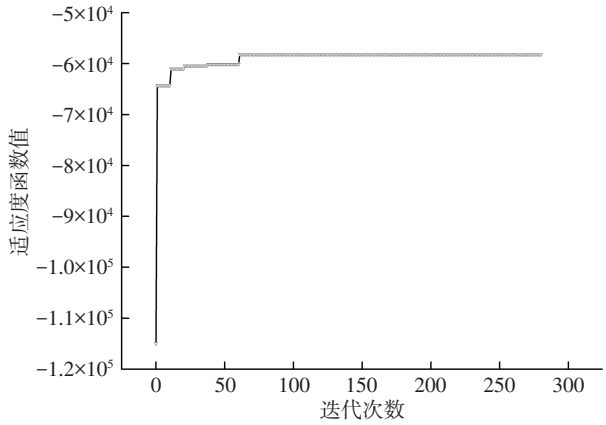


图8　混合禁忌搜索-遗传算法收敛曲线

Fig.8　Convergence curve of hybrid tabu search-genetic algorithm

表6　算法对比

Tab.6　Algorithm comparison

算法	总走行花费/元	装车计划完成率/%	迭代次数/次
遗传算法	43 575	96.5	234
禁忌搜索算法	43 575	96.5	195
混合禁忌搜索-遗传算法	43 575	96.5	60

由表6所示，几种算法均能找到最优解，而混合禁忌搜索-遗传算法相较于单一算法，效率有了较大的提高，在迭代60代后收敛。遗传算法全局搜索快速定位最优解区域，禁忌搜索局部优化跳出局部最优，两者结合使迭代次数较单一遗传算法和单一禁忌搜索算法分别减少约74.4%和69.2%，体现了混合禁忌搜索-遗传算法的高效性，能够在较大求解空间中快速求得最优解。

空重车流协同推算模型与混合禁忌搜索-遗传算法具有良好的通用性与可扩展性，可适配真实大规模铁路路网的车流推算需求。首先，离散时空网络的构建方法可根据真实路网的车站、区间数量灵活扩展，约束条件可根据真实路网的运输组织要求进一步完善。其次，混合禁忌搜索-遗传算法的编码方式、遗传操作、禁忌表设计可根据大规模路网的车流数量调整参数，如增大种群数量、优化禁忌表长度等，保证算法的求解效率。在参数层面，模型中的区间通过能力、车站存车能力、单位走行成本等参数可直接替换为真实路网的实际运营数据，无需对模型结构做大幅调整。实际应用中，可结合铁路调度指挥系统、确报系统的真实数据，对模型与算法进行小幅校准，即可实现真实大规模路网的

空重车流协同推算。

5　结论

（1）构建的离散时空网络模型有效适配铁路“时段化动态调度”场景，通过将时间离散为6 h时段、空间抽象为弧-点结构，相较于连续时空网络大幅降低模型计算复杂度，同时能精准描述空重车流的时空走行特征与接续关系，为路网空重车流协同推算提供了高效的建模方法。

（2）设计的多约束空重车流协同推算模型，综合考虑空车供需平衡、区间通过能力、车站存车能力等约束，采用“就近分配+路径选择”的协同机制，实现了总走行成本最小与装车计划完成率最高的双目标优化，为铁路调度部门制定车流组织方案、空车调配计划提供量化依据。

（3）提出的混合禁忌搜索-遗传算法融合了遗传算法的全局搜索能力与禁忌搜索的局部优化能力，相较于单一遗传算法、单一禁忌搜索算法，迭代次数减少约64%，在60代即可收敛至最优解，为大规模路网车流推算提供了高效的求解方案，具有良好的工程应用价值。

后续将进一步细分时间粒度，并综合考虑空车车种、运输优先级、施工维护等实际因素，以提高车流推算的精度与复杂场景的适用性。

参考文献：

[1] 单　武. 多阶段空车调整方法在车流推算系统中的应用研究[J]. 铁路计算机应用，2016，25(6)：5-8.
SHAN Wu. Railway Multi-Stage Empty Car Adjustment Method Applied to Car Flow Estimation System[J]. Railway Computer Application，2016，25(6)：5-8.

[2] 张红斌，李　军，金福才. 基于车流径路选择偏好的铁路车流运行径路动态预测方法研究[J]. 铁路计算机应用，2021，30(4)：31-35.
ZHANG Hongbin，LI Jun，JIN Fucai. Research on Dynamic Prediction Method of Railway Wagon Flow Routing Based on Wagon Flow Route Selection Preference[J]. Railway Computer Application，2021，30(4)：31-35.

[3] 王　斌，金福才，谢玉霞. 一种基于流计算的铁路车流推算架构模型研究[J]. 铁道运输与经济，2018，40(7)：86-89.
WANG Bin，JIN Fucai，XIE Yuxia. A Train Flow Estimation Architecture Model Based on Stream Computing[J]. Railway Transport and Economy，2018，40(7)：86-89.

[4] 廖志林，胡文斌，方立海，等. 铁路车流推算及监测系统的设计与研究[J]. 铁道货运，2020(2)：12-16，35.
LIAO Zhilin，HU Wenbin，FANG Lihai，et al. A Study on Design and Analysis of the Railway Traffic Flow Calculation and Monitoring System[J]. Railway Freight Transport，2020(2)：12-16，35.

[5] ZHU Y Q，GOVERDE R M P. Dynamic Railway Timetable Rescheduling for Multiple Connected Disruptions[J]. Transportation Research Part C：Emerging Technologies，2021，125：103080.

[6] 马海彬，张　锐，葛名威，等. 考虑路网能力约束的铁路货车车流径路智能编制方法探索与实践[J]. 铁道运输与经济，2026，48(5)：195-205，225.
MA Haibin，ZHANG Rui，GE Mingwei，et al. Exploration and Practice on Intelligent Compilation Method of Railway Freight Car Flow Routes Considering Railway Network Capacity[J]. Railway Transport and Economy，2026，48(5)：195-205，225.

[7] 李　栋. 区域铁路重空车流分布态势评估及推演方法研究[D]. 成都：西南交通大学，2022.

[8] 何文晖. 神华铁路动态货物列车开行方案编制优化技术[D]. 成都：西南交通大学，2022.

[9] 白鹏斌，魏玉光，刘柄全. 基于车种代用的铁路网空重车调配优化研究[J]. 铁道运输与经济，2023，45(3)：38-43.
BAI Pengbin，WEI Yuguang，LIU Bingquan. Research on Optimal Adjustment of Empty and Loaded Cars in Railway Network Based on Car Type Substitution[J]. Railway Transport and Economy，2023，45(3)：38-43.

[10] 赵凤娟，朱　涛，姜秀山. 货物列车编组计划可视化应用研究[J]. 铁路计算机应用，2023，32(5)：6-10.
ZHAO Fengjuan，ZHU Tao，JIANG Xiushan. Visualization Application for Freight Train Formation Plan[J]. Railway Computer Application，2023，32(5)：6-10.

[11] 徐禾颖，吕红霞，吕苗苗，等. 重载铁路装车端空车调配优化研究[J]. 交通运输系统工程与信息，2023，23(1)：141-151.
XU Heying，LYU Hongxia，LYU Miaomiao，et al. Optimization of Empty Car Distribution in Loading End of

（下转第107页）