文章编号：1003-1421(2026)11-0055-09
引用格式：赵海涵，景云，许景，等.考虑铁路平行通道的动卧列车运行图和天窗设置协同优化研究[J].铁道运输与经济，2026，48(11)：55-63.
ZHAO Haihan，JING Yun，XU Jing，et al. Research on Collaborative Optimization of High Speed Sleeper Train Working Diagrams and Maintenance Windows Considering Railway Parallel Corridors[J]. Railway Transport and Economy，2026，48(11)：55-63.

考虑铁路平行通道的动卧列车运行图和天窗设置协同优化研究

赵海涵[1]，景　云[1]，许　景[1]，郭思冶[2]，崔朝晖[3]

(1.北京交通大学 交通运输学院，北京　100044；2.交通运输部科学研究院 综合运输研究中心，北京　100029；3.中国国家铁路集团有限公司 运输调度指挥中心，北京　100844)

摘　要：针对高速铁路动卧列车运行图与天窗长期时空冲突问题，现行缓解措施通常需压缩天窗时间，潜在地威胁天窗作业及长期行车安全。为此，研究提出一种在冲突时段组织动卧列车通过铁路平行通道跨线运行的核心策略。通过分层时空网络建模方法，以动卧列车总旅行时间最小为目标函数，考虑动卧列车最佳发到时间窗口、夜间天窗开设最短时长约束，构建了铁路平行通道下动卧列车运行图与天窗设置的协同优化模型，并设计了自适应大邻域搜索算法进行求解。采用京广铁路平行通道算例验证了模型与算法的有效性，结果表明，在确保动卧列车于最优始发终到时间窗口运行且旅行时间最小化的前提下，该策略可保障所有区间天窗作业时间恢复至240 min，动卧列车平均旅行时间为729 min。研究证实，跨线运行策略能有效规避因天窗时间压缩带来的安全隐患，充足保障天窗作业时间，显著拓展动卧列车的开行空间，为未来复杂路网条件下动卧列车运行图优化提供了新思路。

关键词：高速铁路动卧列车；天窗；时空资源冲突；铁路平行通道；自适应大邻域搜索算法

中图分类号：U292.41　　**文献标识码：**A　　**DOI：**10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.20250714004

Research on Collaborative Optimization of High Speed Sleeper Train Working Diagrams and Maintenance Windows Considering Railway Parallel Corridors

ZHAO Haihan[1]，JING Yun[1]，XU Jing[1]，GUO Siye[2]，CUI Zhaohui[3]

(1. School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. Integrated Transportation Research Center, China Academy of Transportation Sciences, Beijing 100029, China; 3. Traffic Control Center, China State Railway Group Co., Ltd., Beijing 100844, China)

Abstract: Current mitigation measures for the persistent space-time conflict between high speed sleeper train working diagrams and maintenance windows often necessitate compressing maintenance

收稿日期：2025-07-14
通信作者：景云(1981—)，男，陕西宝鸡人，北京交通大学交通运输学院教授。
基金项目：国家自然科学基金-联合基金项目(U2368212)；北京交通大学自然科学类思源博士后科研启动基金项目(KTXKBH25001532)

time, potentially threatening maintenance operations and long-term operational safety. To address this issue, this paper proposed a core strategy of organizing cross-line operations for sleeper trains through railway parallel corridors during conflict periods. Using a hierarchical spatiotemporal network modeling approach, a collaborative optimization model for sleeper train working diagrams and maintenance window setting under railway parallel corridors was constructed, aiming to minimize the total travel time of sleeper trains while considering constraints such as optimal departure and arrival time windows for sleeper trains and minimum nighttime maintenance duration. Furthermore, an adaptive large neighborhood search algorithm was designed to solve the model. The effectiveness of the model and algorithm was validated using a case study of the parallel corridor of the Beijing–Guangzhou Railway. The results show that, on the premise of ensuring sleeper trains operate within their optimal departure and arrival time windows and minimizing travel time, the strategy can guarantee the restoration of maintenance window operations across all sections to 240 min, with an average sleeper train travel time of 729 min. The study confirms that the cross-line operation strategy can effectively mitigate safety risks caused by compressed maintenance windows, sufficiently safeguard maintenance operation time, significantly expand the operational space for sleeper trains, and provide a new approach for optimizing sleeper train working diagrams under future complex network conditions.

Keywords: High Speed Railway Sleeper Train; Maintenance Window; Space-Time Conflict; Railway Parallel Corridor; Adaptive Large Neighborhood Search Algorithm

0　引言

高速铁路动卧列车(以下简称“动卧列车”)是一种夕发朝至的铁路客运产品，由铁路部门为满足长途旅客的夜间出行需求而开设，通常于周末运行，以丰富客运服务类型。动卧列车通常在当日19:00—22:00始发，次日6:00—9:00终到，总在途时间7~15 h，但动卧列车将和高速铁路天窗时间段(0:00—6:00)产生时空冲突。鉴于此，中国国家铁路集团有限公司(以下简称“国铁集团”)在动卧列车开行日将垂直天窗时长要求从不少于240 min调整为不少于180 min，以减少动卧列车与天窗检修时间的冲突。然而，缩短天窗时间并不能完全解决天窗与动卧列车运行图之间的冲突问题，且施工前后均有列车通行，增加了施工事故风险，对长期运输安全性产生不利影响。因此，动卧列车的时刻表需要与沿线的天窗时间进行平衡。

为解决动卧列车运行图与天窗的时空冲突问题，已有很多国内外学者对列车运行图和天窗协同优化展开研究。在列车运行图与天窗协同优化模型构建中，徐长安等[1]、张春田[2]、石赟等[3]建立了列车运行图和天窗的协同优化模型，多以列车等线时间最短、列车旅行时间最短、天窗时间最长、列车运行图排布最紧密等为目标函数，涉及双目标函数时，采用线性加权或约束转化法进行转化，最终采用CPLEX、GUROBI、启发式算法进行求解；Lidén[4]、Nijland等[5]在列车时刻表和天窗协同优化模型的基础上，加入对维修资源的考虑，对不同数量的维修人员和不同位置的维修基地等多种情况进行求解，验证了模型的有效性。在列车运行图与天窗协同优化模型深化中，穆策等[6]将维修作业虚拟为一列列车，将维修限速约束纳入协同优化模型中。Zhang等[7]将双线铁路的邻线列车限速纳入协同优化模型中。Zhang等[8]将车站线路的利用情况纳入协同优化模型中，完善协同优化模型。袁博等[9]将天窗单元分为“车站天窗”与“区间天窗”，使得到的维修计划和运行图更贴合生产情况。张哲铭等[10]微观化处理铁路线，将车站和区间的线路细化为若干的行车资源单元，使求解协同优化模型得到的运行图更符合实际。于婕[11]针对普速铁路客货混跑的繁忙干线能力紧张问题，提出以货物列车为主的协同优化区段通过能力的方法。

随着铁路网络化运营加深，线路之间的相互影响越来越大，部分学者从平行通道或局部路网的角度对天窗展开成网优化研究。在铁路平行通道内的天窗优化中，宋凯文[12]将天窗拓展到铁路平行通道中，建立了普速铁路和高速铁路的联合优化模型。石浩林[13]考虑到跨线列车对天窗的影响，分别构建了考虑普速铁路天窗方案的高速铁路天窗方案优化模型和考虑高速跨线列车的普速铁路天窗方案优化

模型。在铁路局部路网的天窗优化研究中，Luan等[14]建立了拥有5个车站2条线路的小型铁路网络，完成了维修天窗和列车时刻表的协同优化。闫小红[15]建立了面向全路网的天窗与开行方案的协同优化模型，可以找出路网中能力最紧张的区间并优先安排天窗。

综上所述，现有研究对动卧列车运行图与天窗设置的协同优化多聚焦于单线场景，较少统筹考虑铁路平行通道资源。典型策略为压缩天窗时长并采用分段垂直天窗模式，可保障列车准点到达，但以牺牲天窗维修质量与效率为代价，不利于长期行车安全。因此，研究旨在构建动卧列车运行图与高速铁路天窗设置的联合优化模型，依托平行通道组织列车跨线至普速铁路运行，规避运行图与天窗的时空冲突，设计自适应大邻域搜索算法进行求解，并在京广铁路(北京—广州)平行通道进行验证，有助于拓展动卧列车开行线路范围，提升铁路客运收益，同时为确定动卧列车运行图提供一种新方式。

1　问题描述

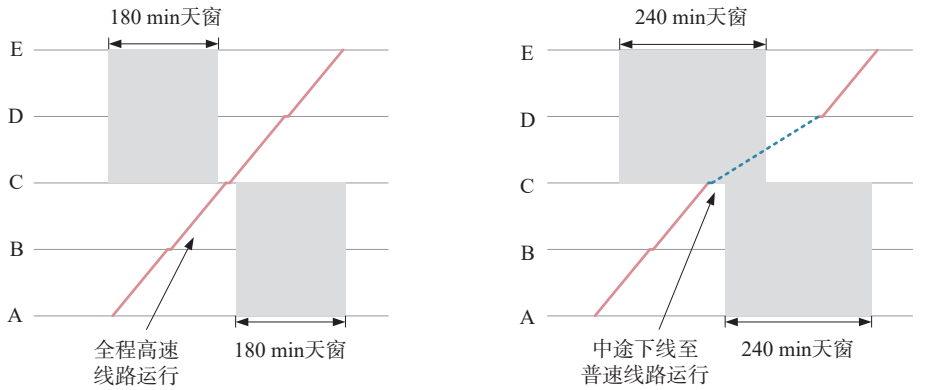
不同维度的动卧列车运行图和天窗优化方法如图1所示。如图1a所示，现行动卧列车运营模式下，为保障动卧列车开行，高速铁路垂直天窗时长由不少于240 min压缩至不少于180 min。此调整虽使列车得以利用天窗间隙通过，却显著牺牲了天窗维修质量与效率，破坏了天窗连贯性，对天窗施工构成安全隐患的同时降低了天窗质量，对长期行车安全产生不利影响。

如图1b所示，若维持天窗时长限制为不少于240 min，则会阻碍动卧列车运行。此时，组织列车跨线至普速铁路运行，并在天窗封锁已解除的区段适时跨回高速铁路，可有效规避动卧列车运行图与高速铁路天窗的时空冲突。

当前日趋完善的高速铁路与普速铁路网络，形成了众多由功能相似、起讫点相同且路径基本重合的2条及以上干线构成的铁路平行通道。受建设时序与等级差异影响，各线路通常维持独立的站点体系，但部分城市通过共用站场或联络线等技术手段，实现了高速站与普速站的互联互通，为跨线运行奠定了关键物理基础。

动车组卧铺列车仅在周五至周一开行。在此期间，高速线路每日0:00—6:00需开设不少于240 min的分段垂直天窗，显著制约了动卧列车的开行空间。然而，普速线路干线(集中修时段除外)于周五至周日不设天窗作业，周五至周日的非天窗时段恰与动卧列车主要运行时段重叠。这一时间窗口与上述平行通道的物理基础相结合，为动卧列车与高速铁路天窗冲突时跨线至普速铁路运行提供了可行性。

基于上述背景，本研究旨在解决的核心问题为：在已知铁路平行通道线路参数及既有列车铺画方案的前提下，依托已建成的铁路平行通道基础设施，通过科学合理的运输组织策略，同步优化动卧列车时刻表与高速铁路天窗设置方案，在满足天窗最小开设时长要求的约束条件下，实现动卧列车总旅行时间最小化。



a　单线协同优化
a　Collaborative optimization on a single line

b　平行通道协同优化
b　Collaborative optimization in parallel channels

图1　不同维度的动卧列车运行图和天窗优化方法

Fig.1　Optimization methods for sleeper train working diagrams and maintenance windows in different dimensions

2　模型构建

2.1　分层时空网络

时空网络模型能够精确地表达车流在时空网络中的状态，其绘制结果能够更加精确地描述研究对象的位移特征，在列车调度以及列车运行图编制问题中得到了广泛应用。但单层时空网络不能精确地描绘高速铁路列车运行图、普速铁路列车运行图以及高速铁路动卧列车在线路间的跨线过程，因此，本章将建立以1 min为时间间隔，时间跨度为1 440 min的双层时空网络$G=(N, A)$，N为时空网络中的时空节点，A为时空网络中节点间的连线构成的时空弧。在双层时空网络模型中，上层为高速铁路层，下层为普速铁路层，可以清晰地表达高速铁路动卧列车的路线选择。分层时空网络示意图如图2所示，清晰地描述了某列车从h站始发，经由$h+2$站跨线至$c+2$站，随后由$c+3$站跨线至$h+3$站并运行至$h+5$站终到的全过程。

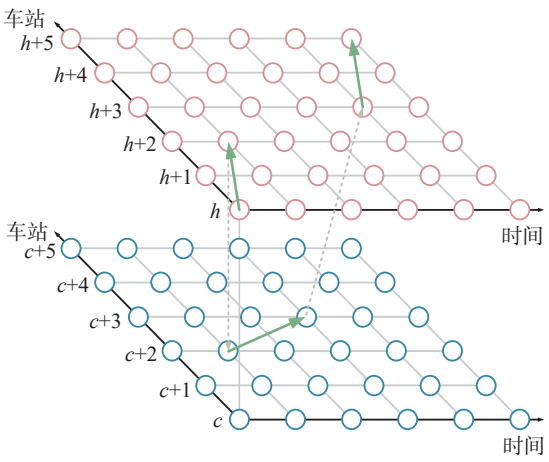


图2　分层时空网络示意图

Fig.2　Schematic diagram of hierarchical spatiotemporal network

2.2　模型假设

模型进行如下假设。

（1）不考虑车站内部的天窗。

（2）不考虑施工分区或供电臂对天窗区段划分的影响。

（3）所有动卧列车数量、交路以及停站方案提前给定。

（4）各车站不同时到发时间间隔已知、跨线时间已知、到发线能力充足。

（5）列车运行上下行方向相互独立、互不干扰。

2.3　目标函数

在铁路平行通道运营背景下，动卧列车需满足出发与到达时间窗约束。为提升运输效率并缩短旅客在途时间，需在满足时间窗约束前提下最小化运行时间。另一方面，针对天窗设置，优化目标是将天窗时长恢复至基准值240 min。过长天窗时段既降低维修资源利用效率，又迫使动卧列车过早跨线至普速铁路运行，既增加其后续返回高速铁路的难度，又加剧对普速铁路既有行车秩序的干扰。因此，需协同优化动卧列车的时刻表与天窗设置时间，以权衡运行线和天窗之间的冲突。鉴于天窗时长只需要固定为不少于4 h，本研究将其作为约束条件，而不纳入目标函数。为综合平衡动卧列车的运行效率与天窗约束的影响，以最小化铁路平行通道中所有动卧列车的总旅行时间为核心优化目标，其具体计算方式如式(1)所示。

$$\min F=\sum_{a'\in A^{\mathrm{in}}_{h_{e-\mathrm{end}}}} t^{\mathrm{aft}}_{a'}x^{a'}_{e}-\sum_{a\in A^{\mathrm{out}}_{h_{e-\mathrm{start}}}} t^{\mathrm{bef}}_{a}x^{a}_{e}\qquad \forall e\in E \tag{1}$$

式中：E为所有待安排的动卧列车的集合；x^{a}_{e}为动卧列车e是否占用时空弧a的0–1决策变量，若占用为1，否则为0；t^{bef}_{a}为时空弧a的前端时刻；t^{aft}_{a}为时空弧a的后端时刻；$A^{\mathrm{in}}_{h_{e-\mathrm{end}}}$为所有到达动卧列车$e$终到车站$h_{e-\mathrm{end}}$的时空弧集合；$A^{\mathrm{out}}_{h_{e-\mathrm{start}}}$为所有离开动卧列车$e$始发车站$h_{e-\mathrm{start}}$的时空弧集合。

2.4　约束条件

（1）流量平衡约束。对于任意动卧列车，需在时空网络中选取从始发站到终到站的连续时空网络弧，如式(2)所示。

$$\sum_{a\in A^{\mathrm{in}}_{s}} x^{a}_{e}-\sum_{a\in A^{\mathrm{out}}_{s}} x^{a}_{e}=\begin{cases}1 & s=h_{e-\mathrm{end}}\\ 0 & \text{其他}\\ -1 & s=h_{e-\mathrm{start}}\end{cases}\qquad \forall e\in E,\ \forall s\in S \tag{2}$$

式中：S为铁路平行通道中所有车站的集合；A^{in}_{s}为所有到达s站的时空弧集合；A^{out}_{s}为所有离开s站的时空弧集合；$h_{e-\mathrm{start}}$为动卧列车e的始发车站；$h_{e-\mathrm{end}}$为动卧列车e的到达车站。

（2）动卧列车出发和到达时间约束。为实现动卧列车旅行时间最优化，需满足所有从动卧列车出发站发出的时空弧出发时间均处于最佳时间出发窗口内，同时所有抵达动卧列车到达站的时空弧到达

时间均处于最佳到达时间窗口内，如式(3)—(4)所示。

$$t_{e-\text{start}}^{\text{low}} \leqslant t_a^{\text{bef}} \leqslant t_{e-\text{start}}^{\text{up}} \qquad \forall e \in E,\ \forall a \in A_{h_{e-\text{start}}}^{\text{out}} \tag{3}$$

$$t_{e-\text{end}}^{\text{low}} \leqslant t_a^{\text{aft}} \leqslant t_{e-\text{end}}^{\text{up}} \qquad \forall e \in E,\ \forall a \in A_{h_{e-\text{end}}}^{\text{in}} \tag{4}$$

式中：$t_{e-\text{start}}^{\text{low}}$为动卧列车$e$出发时间窗口的下限时刻；$t_{e-\text{start}}^{\text{up}}$为动卧列车$e$出发时间窗口的上限时刻；$t_{e-\text{end}}^{\text{low}}$为动卧列车$e$到达时间窗口的下限时刻；$t_{e-\text{end}}^{\text{up}}$为动卧列车$e$到达时间窗口的上限时刻。

（3）动卧列车停站约束。动卧列车在任意车站的停站时间既不能短于在该车站的最短停站时间，也不能长于在该车站的最长停站时间，如式(5)所示。

$$t_{e,\,s}^{\text{low}} \leqslant (t_{a'}^{\text{bef}} x_e^{a'} - t_a^{\text{aft}} x_e^a) \leqslant t_{e,\,s}^{\text{up}} \qquad \forall s \in S,\ \forall e \in E,\ \forall a \in A_s^{\text{in}},\ \forall a' \in A_s^{\text{out}} \tag{5}$$

式中：$t_{e,\,s}^{\text{low}}$为动卧列车e在s站停站的最短时长，min；$t_{e,\,s}^{\text{up}}$为动卧列车e在s站停站的最长时长，min。

（4）动卧列车区间速度约束。动卧列车在高速铁路与普速铁路的运行过程中，需依据线路属性制定差异化的速度约束条件，即任意时空弧的前后端时间差须处于对应线路属性的速度区间范围内，如式(6)—(7)所示。

$$v_h^{\min} \leqslant \frac{60 l_{hh+1}}{t_a^{\text{aft}} - t_a^{\text{bef}}} \leqslant v_h^{\max} \qquad \forall h,\ h+1 \in S_h;\ \forall a \in A_h^{\text{out}} \cap A_{h+1}^{\text{in}};\ \forall e \in E \tag{6}$$

$$v_c^{\min} \leqslant \frac{60 l_{cc+1}}{t_a^{\text{aft}} - t_a^{\text{bef}}} \leqslant v_c^{\max} \qquad \forall c,\ c+1 \in S_c;\ \forall a \in A_c^{\text{out}} \cap A_{c+1}^{\text{in}};\ \forall e \in E \tag{7}$$

式中：S_h为高速铁路车站集合；S_c为普速铁路车站集合；l_{hh+1}代表高速铁路车站h和车站$h+1$构成区间的里程长度，km；l_{cc+1}代表普速铁路车站c和车站$c+1$构成区间的里程长度，km；$v_h^{\min}$为动卧列车在高速线路运行的最小速度，km/h；$v_h^{\max}$为动卧列车在高速线路运行的最大速度，km/h；$v_c^{\min}$为动卧列车在普速线路运行的最小速度，km/h；$v_c^{\max}$为动卧列车在普速线路运行的最大速度，km/h。

（5）天窗开始时间和结束时间约束。根据国铁集团相关运营规范，高速铁路天窗的开设时段需满足严格的时间窗口约束，如式(8)—(9)所示。

$$y_{m_{hh+1}}^{\text{start}} \geqslant t_{\text{mw}}^{\text{low}} \qquad \forall m_{hh+1} \in M_h \tag{8}$$

$$y_{m_{hh+1}}^{\text{end}} \leqslant t_{\text{mw}}^{\text{up}} \qquad \forall m_{hh+1} \in M_h \tag{9}$$

式中：M_h为高速铁路中任意2个相邻车站构成区间的天窗集合；$y_{m_{hh+1}}^{\text{start}}$为区间天窗$m_{hh+1}$开始时刻整数决策变量，时间跨度为15 min，即取值范围为[0，15，30，45，…]；$y_{m_{hh+1}}^{\text{end}}$为区间天窗$m_{hh+1}$结束时刻整数决策变量，时间跨度为15 min，即取值范围为[0，15，30，45，…]；$t_{\text{mw}}^{\text{low}}$为高速铁路夜间天窗的最早开始时刻；$t_{\text{mw}}^{\text{up}}$为高速铁路夜间天窗的最晚结束时刻。

（6）天窗开设时长约束。根据高速铁路运营安全规范，天窗开设需满足最低时长约束要求，如式(10)所示。

$$y_{m_{hh+1}}^{\text{end}} - y_{m_{hh+1}}^{\text{start}} \geqslant t_{\text{mw}}^{\min} \qquad \forall m_{hh+1} \in M_h \tag{10}$$

式中：$t_{\text{mw}}^{\min}$为高速铁路夜间天窗的最短开设时长，min。

（7）间隔约束。为保障铁路运输安全与调度秩序，车站需满足在任意连续的间隔时刻内，被占用的离开时空弧和到达时空弧均不超过1个，如式(11)和式(12)所示。

$$\sum_{r \in R} \sum_{a \in A_s^{\text{out}}} \sum_{t_a^{\text{bef}} \in [i,\ i + t_{\text{sep}}^{\text{dep}}]} x_r^a \leqslant 1 \qquad \forall i \in [0,\ 1\,440 - t_{\text{sep}}^{\text{dep}}],\ \forall s \in S \tag{11}$$

$$\sum_{r \in R} \sum_{a \in A_s^{\text{in}}} \sum_{t_a^{\text{aft}} \in [i,\ i + t_{\text{sep}}^{\text{arr}}]} x_r^a \leqslant 1 \qquad \forall i \in [0,\ 1\,440 - t_{\text{sep}}^{\text{dep}}],\ \forall s \in S \tag{12}$$

式中：R为平行通道中所有列车的集合；i为时空网络中时间点的索引；$t_{\text{sep}}^{\text{dep}}$为不同时出发间隔时长，min；$t_{\text{sep}}^{\text{arr}}$为不同时到达间隔时长，min；$x_r^a$为列车$r$是否占用时空弧$a$的逻辑变量，若占用则为1，否则为0，且满足$r = e$时，$x_r^a = x_e^a$。

（8）区间禁止越行约束。在任意相邻车站构成的区间内，后出发列车不得先于先出发列车到达下一车站，如式(13)所示。

$$x_r^a + x_{r'}^{a'} \begin{cases} \leqslant 2 & (t_{a'}^{\text{bef}} - t_a^{\text{bef}})(t_{a'}^{\text{aft}} - t_a^{\text{aft}}) \geqslant 0 \\ \leqslant 1 & \text{其他} \end{cases} \qquad \forall s,\ s+1 \in S;\ \forall r,\ r' \in R;\ \forall a,\ a' \in (A_s^{\text{out}} \cap A_{s+1}^{\text{in}}) \tag{13}$$

（9）天窗和运行线冲突约束。在天窗期及前后安全间隔期内，为确保行车安全，所有涉及该区间的出发、到达及途经时空弧均禁止使用，如式(14)和式(15)所示。

$$\sum_{t_a^{\text{bef}} \in [y_{m_{h_s h_{s+1}}}^{\text{start}} - t_{\text{mw}}^{\text{safe}},\ y_{m_{h_s h_{s+1}}}^{\text{end}} + t_{\text{mw}}^{\text{safe}}]} x_r^a = 0 \qquad \forall s,\ s+1 \in S;\ \forall r \in R;\ \forall a \in (A_s^{\text{out}} \cap A_{s+1}^{\text{in}}) \tag{14}$$

$$\sum_{(t_a^{\mathrm{bef}} \leqslant y^{\mathrm{start}}_{m_{h_s h_{s+1}}} - t^{\mathrm{safe}}_{\mathrm{mw}}) \wedge (t_a^{\mathrm{aft}} \geqslant y^{\mathrm{start}}_{m_{h_s h_{s+1}}} - t^{\mathrm{safe}}_{\mathrm{mw}})} x_r^a = 0 \qquad \forall s,\ s+1 \in S;$$

$$\forall r \in R;\ \forall a \in (A_s^{\mathrm{out}} \cap A_{s+1}^{\mathrm{in}}) \tag{15}$$

式中：$t_{\mathrm{mw}}^{\mathrm{safe}}$为天窗安全间隔时长，min。

3　算法设计

针对构建的多变量整数线性规划模型，其解空间规模随着变量和约束数量的增加呈指数型增长，难以采用GUROBI等在规定时间内求解。自适应大邻域搜索算法凭借独特的破坏、修复机制，能够实现从劣解空间向高质量解空间的有效搜索，该算法对初始解质量具有较低的依赖性，并且能够显著提升搜索效率与解的质量。因此，采用自适应大邻域搜索算法进行求解。

算法详细步骤如下。

步骤1：读取铁路平行通道中的车站及区间数据、初始列车时刻表；设定自适应大邻域搜索算法的破坏算子(随机移除算子、相似移除算子、最差移除算子)与修复算子(后悔修复算子、带噪声随机修复算子、带噪声贪婪修复算子)，并赋予各算子初始权重；基于上述设定生成初始解。

步骤2：依据预设的算子权重，随机选取一个破坏算子与一个修复算子，对当前解进行操作，生成新解。

步骤3：从运行图可行性角度对新解进行评估，若新解较当前解有所改进，则接受该新解；随后进一步检查新解对应的运行图是否可行，若可行，则进入步骤4，否则返回步骤2重新修改解。

步骤4：将通过步骤3检查的可行解更新为当前最优解，并计算对应的最优目标函数值。

步骤5：再次根据算子权重，选取破坏算子与修复算子，对当前解进行修改，生成新一轮新解。

步骤6：检查新一轮新解对应的运行图是否可行，若可行，则进一步比较其目标函数值与当前最优目标函数值；若新解的目标函数值更优，则更新最优解及最优目标函数值。

步骤7：每次完成新解评估后，依据评估结果对各算子权重进行动态更新。

步骤8：判断在连续若干次迭代过程中，最优解是否未发生改进，若未改进，则输出当前最优解及对应的最优目标函数值，算法终止；否则返回步骤5，继续执行迭代优化。

自适应大邻域搜索算法流程图如图3所示。

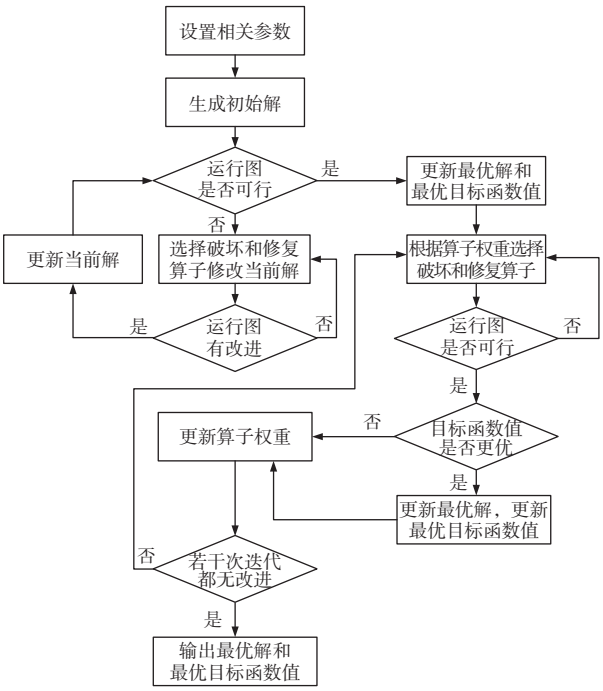


图3　自适应大邻域搜索算法流程图

Fig.3　Flowchart of adaptive large neighborhood search algorithm

4　算例分析

4.1　实验描述

京广高速铁路(北京南—广州南)与京广铁路2条线路是南北走向的铁路交通大动脉，其平行通道途经省会城市最多、连接其他线路最多、运输最繁忙，具有极其重要的战略地位，以下统称京广铁路平行通道。本章以京广铁路平行通道为例验证所提出的高速铁路动卧列车运行图与天窗设置协同优化模型和求解算法的有效性。算法利用Python3.12编写，在具有Intel(R) Core(TM) i7-9750H CPU @ 2.60 GHz CPU，8.00 GB RAM，Microsoft Windows11(64位)操作系统的计算机上实现。

在本算例的京广铁路平行通道研究中，选取北京及其他5个省会城市作为研究对象，每个城市均设置高速车站和普速车站各1座且二者都支持动卧列车跨线运行。选取开行频次较高的25列普速列车和90列高速列车构成的运行图作为基础进行动卧列车运行图铺画。高速铁路动卧列车在北京的出发时间窗口设置为[19:00，22:00]，到达广州的时

间窗口设置为[6:00，9:00]，在高速线路上运行的速度范围设置为180~250 km/h；在普速线路上运行的速度范围设置为110~180 km/h，列车运行方向仅考虑北京至广州单向，所有车站出发到达间隔时间均设置为3 min，动卧列车在任意车站的跨线时间设置为10 min。京广铁路平行通道示意图如图4所示。

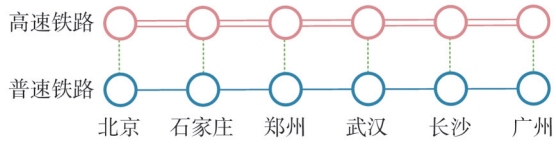


图4　京广铁路平行通道示意图

Fig.4　Schematic diagram of parallel corridor of Beijing-Guangzhou Railway

4.2　数值实验

在数值实验中，安排4列北京至广州方向的高速铁路动卧列车分别命名为N1，N3，N5，N7进入京广铁路平行通道中进行计算求解。其中，每列动卧列车在石家庄站的最短停车时间为3 min，郑州站的最短停车时间为4 min，武汉站、长沙站的最短停车时间为0 min。自适应大邻域搜索算法10 000次迭代无改进时退出求解。

目标函数迭代趋势如图5所示。其中，最优目标函数为2 916 min，动卧列车平均旅行时间为729 min。最优解的动卧列车时刻表如表1所示，最优解的天窗设置方案如表2所示。

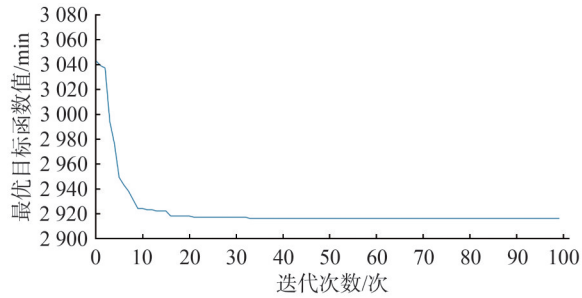


图5　目标函数迭代趋势

Fig.5　Iterative trend of objective function

表2　最优解的天窗设置方案

Tab.2　Optimal maintenance window setting scheme

区段名称	天窗开始时间	天窗结束时间	天窗持续时长/min
北京—石家庄	0:00	5:15	315
石家庄—郑州	0:00	4:30	270
郑州—武汉	2:00	6:00	240
武汉—长沙	0:00	4:00	240
长沙—广州	0:15	4:30	255

4.3　结果分析

将4.2数值实验中求解得到的列车时刻表和天窗设置方案数据汇入到基础运行图中得到新增动卧列车后的普速铁路运行图和高速铁路运行图，新增动卧列车之后的高速铁路运行图如图6所示，新增动卧列车后的普速铁路运行图如图7所示。

根据图6、图7可以看出，被加入到列车运行图的4列动卧列车主要分为2种明显的运行模式。

（1）类型一(N1，N5)。这类列车的始发时间集中在20:00前后，终到时间集中在8:00前。这类列车的主要特征是在郑州—武汉区段开设天窗之前抵达武汉站，鉴于此时武汉—长沙区段开设天窗时间不久，若在站内等待天窗结束将显著延长运行时间，因此选择跨线至普速铁路继续运行，在抵达长沙站后，考虑到长沙—广州区段距离较长，为了保障列车在最佳终到时间窗口内，动卧列车需转回高速线路完成运输任务。

对于类型一的列车，在开设动卧列车时可以提升发车时刻离散度，以实现客源时空分布优化，提高客流吸引力。对于发车时间较早的动卧列车，需要更低的速度即可在郑州—武汉区段开设天窗前抵达武汉站，因此可以采用在小站越行的方式降低对高速铁路本线列车的影响，在武汉—长沙普速铁路区段中运行时需注意和普速铁路本线列车的速度配合，减少对普速本线列车的干扰，在长沙—广州区

表1　最优解的动卧列车时刻表

Tab.1　Sleeper train operation timetable of optimal solution

车次	北京	石家庄		郑州		武汉		长沙		广州
	离开	到达	离开	到达	离开	到达	离开	到达	离开	到达
N1	19:48	21:11	21:14	23:00	23:04	1:44	1:44	5:01	5:01	7:51
N3	20:07	21:17	21:20	23:11	23:15	4:02	4:02	5:30	5:30	8:20
N5	19:33	20:49	20:52	22:55	22:59	1:35	1:35	4:57	4:57	7:47
N7	20:18	21:25	21:28	23:30	23:34	4:07	4:07	5:34	5:34	8:24

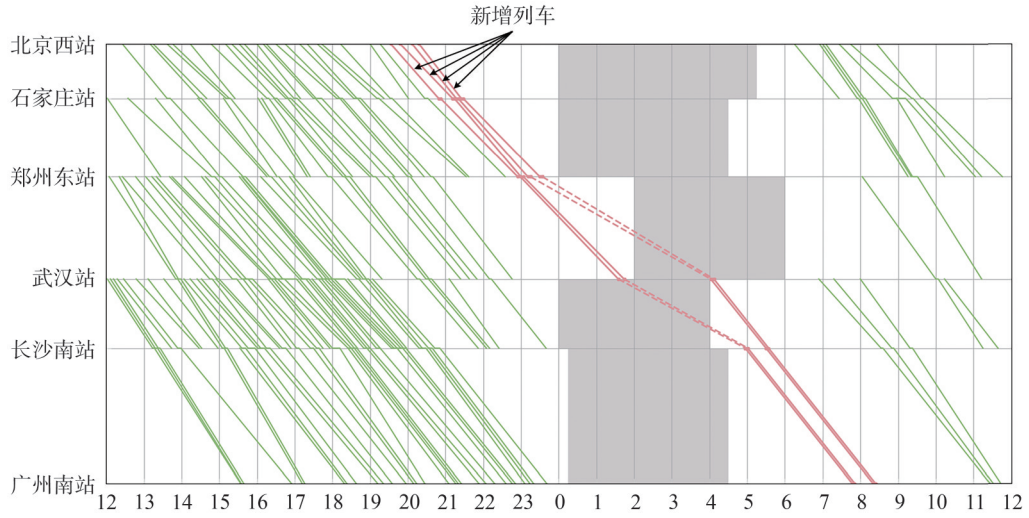


图6　新增动卧列车之后的高速铁路运行图

Fig.6　High speed railway working diagram after addition of sleeper trains

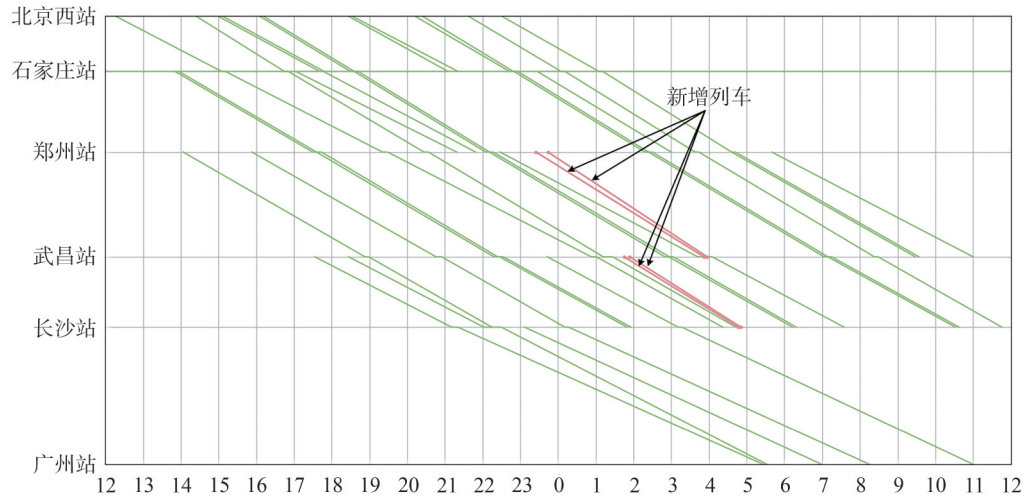


图7　新增动卧列车后的普速铁路运行图

Fig.7　Conventional railway working diagram after addition of sleeper trains

段运行时，可以采用调整运行速度的方式灵活调整终到广州的时间。

（2）类型二(N3，N7)。这类列车的始发时间同样集中在20:00前后，终到时间更接近终到时间窗的下限9:00。这类列车的主要特征是在郑州—武汉区段开设天窗之前抵达郑州站后立即转入普速线路运行。考虑到郑州—武汉区段里程较长，且这类列车的出发时间较晚，为了保障列车在最佳终到时间窗口内，列车需在武汉站转回高速线路并适当提升运行速度完成运输任务。

对于类型二的列车，始发时间可以调整得相对较晚，在动卧列车开设中可以结合类型一开设以吸引更多的运输客流，因其在郑州—武汉普速铁路区段中需要适当提速运行，因此对普速铁路运行会造成更大的干扰，部分本线列车可能需要在车站中等待动卧列车越行，当夜间的普速铁路列车较多时，类型二的动卧列车不再适合开行。

5　结束语

针对平行铁路通道系统中高速铁路动卧列车调度与天窗时空资源协同配置的联合优化问题展开系统研究，构建了基于铁路平行通道的动卧列车运行图与天窗协同优化模型，并采用自适应大邻域搜索算法求解。在京广铁路平行通道案例中，该方案在保障高速铁路天窗不少于240 min的前提下，实现了4列动卧列车的优化铺画，平均旅行时间为

729 min，验证了模型与算法的有效性。研究提出的2种运行模式呈现出不同的时空特征：类型一倾向于在前半程利用高速铁路争取时间、中段通过跨普速铁路规避天窗、后段适时转回高速铁路以保障终到时间窗；类型二则强调更早跨入普速铁路，且后段需在高速铁路提速以追赶终到时间窗。通过合理推广动卧列车跨线运行策略，可有效避免压缩天窗带来的安全隐患，同时为更多铁路平行通道开行跨线列车提供了可行路径，提升了铁路夜间长途客运能力和客票收入。研究成果为未来复杂路网条件下动卧列车运行图的制定提供了重要参考。

参考文献：

[1] 徐长安，李晟东，李斯涵，等. 高铁夕发朝至列车开行与天窗设置协同优化[J]. 西南交通大学学报，2021(4)：744-751.
XU Chang'an，LI Shengdong，LI Sihan，et al. Collaborative Optimization for Overnight Train Operation and Maintenance Window Setting of High Speed Railways[J]. Journal of Southwest Jiaotong University，2021(4)：744-751.

[2] 张春田. 成网条件下铁路列车运行图编制与调整优化方法研究[D]. 北京：北京交通大学，2022.

[3] 石　赟，牟海波，黄志鹏，等. 考虑跨线列车的运行图与天窗一体化模型与算法[J]. 铁道科学与工程学报，2024，21(5)：1761-1773.
SHI Yun，MU Haibo，HUANG Zhipeng，et al. Integrated Optimization Model and Algorithm for Timetable and Maintenance Window Considering Cross-Line Trains[J]. Journal of Railway Science and Engineering，2024，21(5)：1761-1773.

[4] LIDÉN T. Coordinating Maintenance Windows and Train Traffic：A Case Study[J]. Public Transport，2020，12(2)：261-298.

[5] NIJLAND F，GKIOTSALITIS K，VAN BERKUM E C. Improving Railway Maintenance Schedules by Considering Hindrance and Capacity Constraints[J]. Transportation Research Part C：Emerging Technologies，2021，126：103108.

[6] 穆　策，孟令云，廖正文，等. 维修天窗与列车运行图一体化编制模型[J]. 铁道科学与工程学报，2018，15(8)：2155-2162.
MU Ce，MENG Lingyun，LIAO Zhengwen，et al. Integrated Optimization Model on Maintenance Time Window and Train Timetabling[J]. Journal of Railway Science and Engineering，2018，15(8)：2155-2162.

[7] ZHANG Y X，D'ARIANO A，HE B S，et al. Microscopic Optimization Model and Algorithm for Integrating Train Timetabling and Track Maintenance Task Scheduling[J]. Transportation Research Part B：Methodological，2019，127：237-278.

[8] ZHANG Q，LUSBY R M，SHANG P，et al. A Heuristic Approach to Integrate Train Timetabling，Platforming，and Railway Network Maintenance Scheduling Decisions[J]. Transportation Research Part B：Methodological，2022，158：210-238.

[9] 袁　博，李海鹰，廖正文. 高速铁路动卧开行日列车运行图与维修天窗协调优化[J]. 铁道科学与工程学报，2024，21(4)：1309-1319.
YUAN Bo，LI Haiying，LIAO Zhengwen. Integrated Optimization on Train Timetabling and Maintenance Time for the Operation Day of High Speed Sleeper Trains[J]. Journal of Railway Science and Engineering，2024，21(4)：1309-1319.

[10] 张哲铭，何世伟，李光晔，等. 考虑Pareto最优的列车运行图与维修天窗协调优化[J]. 铁道科学与工程学报，2024，21(3)：949-958.
ZHANG Zheming，HE Shiwei，LI Guangye，et al. Coordinated Optimization of Train Timetable and Maintenance Skylight Considering Pareto Optimality[J]. Journal of Railway Science and Engineering，2024，21(3)：949-958.

[11] 于　婕. 繁忙铁路干线施工天窗与列车运行图协同优化研究[D]. 北京：北京交通大学，2020.

[12] 宋凯文. 基于车站与线路能力协调的路网天窗优化方案研究[D]. 兰州：兰州交通大学，2021.

[13] 石浩林. 双网融合条件下铁路天窗方案协调优化模型及算法研究[D]. 兰州：兰州交通大学，2023.

[14] LUAN X J，MIAO J R，MENG L Y，et al. Integrated Optimization on Train Scheduling and Preventive Maintenance Time Slots Planning[J]. Transportation Research Part C：Emerging Technologies，2017，80：329-359.

[15] 闫小红. 高速铁路夕发朝至列车开行方案优化[D]. 北京：北京交通大学，2020.

(责任编辑　魏　然)