

考虑动车组周转和到发线运用的高铁列车运行多计划协同调整

周敏¹ 顾灏璇¹ 董海荣¹ 刘仁伟² 刘瑄¹

摘要 随着我国高速铁路快速发展,“八纵八横”高铁网加密成型,呈现出运行环境复杂、行车密度高及长交路跨线运营等典型特征.一旦遭受大风、红光带、接触网挂异物和设备故障等突发事件,则将导致列车偏离运行计划,进而影响到发线运用和动车组(Electric multiple units, EMU)周转计划.如何在调整运行图的同时保证动车组和到发线运用的可行性是提高列车运行调整效率的关键.针对区间双向中断场景下到发线运用冲突和动车组接续计划失效问题,采用取消列车、变更列车到发时刻、更换到发线、备用动车组接续等策略对运行图、动车组和到发线运用计划进行调整.基于事件-活动网络建立考虑动车组接续和到发线运用的列车运行协同调整模型,设计两阶段求解方法对模型求解.运用京津城际实际数据对模型和方法进行仿真验证,结果表明相比于先到先服务(First come, first served, FCFS)策略,多计划协同调整策略能有效降低列车晚点时间.与整体求解方法相比,两阶段求解方法能够保证模型求得解的质量且有效提高模型求解效率.

关键词 多计划协同调整, 动车组周转, 到发线运用, 事件-活动网络, 两阶段求解方法

引用格式 周敏, 顾灏璇, 董海荣, 刘仁伟, 刘瑄. 考虑动车组周转和到发线运用的高铁列车运行多计划协同调整. 自动化学报, 2024, 50(8): 1577–1588

DOI 10.16383/j.aas.c230379

Multi-plan Collaborative Rescheduling of High-speed Train Operation Considering the Utilization of Rolling Stock and Arrival and Departure Tracks

ZHOU Min¹ GU Hao-Xuan¹ DONG Hai-Rong¹ LIU Ren-Wei² LIU Xuan¹

Abstract With the rapid development of high-speed railways in China, the “eight vertical and eight horizontal” high-speed railway network has become denser, presenting typical characteristics such as complex operating environments, high train densities, and long-distance cross-line operations. Once facing sudden events as strong winds, red light bands, foreign objects on overhead lines and equipment failures, trains will deviate from the operating plan, which in turn affects the departure line operation and electric multiple units (EMUs) turnover plan. Ensuring the feasibility of EMUs and departure line operations while adjusting timetable is crucial to improving the efficiency of train operation adjustments. To address departure line operations conflicts and EMU connection plans failure under the scenario of bidirectional interruptions between sections, strategies as canceling trains, changing train departure times, switching departure lines, backup EMU connections are employed to adjust timetable, EMUs, and departure line operation plans. A train operation coordination adjustment model considering EMU connections and departure line operations is established based on event-activity network, a two-stage solving method is designed to solve the model. The model and method are validated using actual data from Beijing-Tianjin intercity railway, the results show that compared to “first come, first served (FCFS)” strategy, multi-plan coordination adjustment method can effectively reduce train delay time. Compared with overall solving method, the two-stage solving method can ensure the model solution quality and effectively improve the model solving efficiency.

Key words Multi-plan collaborative rescheduling, utilization of rolling stock, arrival and departure track utilization, event-activity network, two-stage solution

Citation Zhou Min, Gu Hao-Xuan, Dong Hai-Rong, Liu Ren-Wei, Liu Xuan. Multi-plan collaborative rescheduling of high-speed train operation considering the utilization of rolling stock and arrival and departure tracks. *Acta Automatica Sinica*, 2024, 50(8): 1577–1588

收稿日期 2023-06-18 录用日期 2023-11-19

Manuscript received June 18, 2023; accepted November 19, 2023

国家自然科学基金(61925302, U2368204, 62103033)资助

Supported by National Natural Science Foundation of China (61925302, U2368204, 62103033)

本文责任编辑 杨涛

Recommended by Associate Editor YANG Tao

1. 北京交通大学自动化与智能学院 北京 100044 2. 中国铁路北京局集团有限公司 北京 100860

高速铁路具有高效便捷、安全可靠、快速通达和环境友好等优点,在综合交通运输体系中发挥着不可替代的作用^[1-2].截止 2023 年底,我国高速铁路运营里程突破 4.5 万公里,已建成世界上最大且唯

1. School of Automation and Intelligence, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044 2. China Railway Beijing Group Co., Ltd., Beijing 100860

一的高速铁路运营网络. 随着路网规模的不断扩大, 呈现出超大客流常态化、运输能力极限化和随机扰动多源化等新特征. 一旦系统受到大风、接触网挂异物、红光带等突发事件导致区间临时中断, 极易造成路网列车大面积延误, 对高速铁路正常运营产生巨大的影响^[3]. 例如: 2021 年 5 月 1 日, 受京广高铁定州东至保定东间接触网挂异物影响, 导致无法按照既定的动车组周转计划及到发线运用计划执行, 造成北京西站始发 16 列车取消、百余列车延误, 大量旅客滞留车站超 5 小时. 这些突发事件极易导致列车晚点停运、乘客满意度下降, 严重时甚至带来生命财产重大损失, 造成恶劣的社会影响. 如何快速地制定优化调度方案, 对动车组和线路资源等进行动态调整, 减少恢复正常运营的时间, 是保障高速铁路高效运行的关键.

近年来, 区间临时中断条件下列车运行调整问题受到国内外学者的关注. Zhou 等^[4]针对中断导致延误传播至相邻调度区段的场景, 以列车到达延误时间、列车在交接站发车延误时间和列车总晚点次数为目标建立了高铁多调度区段运行图协同调整混合整数线性规划模型, 生成列车到发时刻及发车顺序的调整方案. Zhu 等^[5]针对不确定干扰下的区间双线线路同时中断场景, 将列车运行调整问题等价为滚动时域两阶段随机规划问题, 并基于荷兰部分铁路对随机规划方法进行试验, 同时与确定性滚动时域算法进行比较. Veelenturf 等^[6]建立了整数线性规划模型来解决在大规模中断后的列车运行调整问题, 模型以最小化取消列车数量、列车延误为目标, 考虑了车站容量及动车组库存量等. Reynolds 等^[7]提出一种基于数据驱动的可变速度列车运行调整模型, 并将该模型与其他模型从求解时间等层面进行对比, 同时还比较了变速度与不变速度模型解的质量. Zhan 等^[8]针对区间单方向中断情况下的列车运行调整问题设计了一种混合整数规划模型来决策列车的出发通过中断区间的顺序、列车在各个站的出发到达时刻及是否取消列车任务. 同时还探究了三种重要的列车调整策略并进行建模对比, 采用滚动时域算法对模型进行分解, 降低了求解规模. 针对干扰条件下的列车开行方案进行优化, 吴兴堂等^[9]建立了以提升经济效益和网络负载均衡为目标的非线性混合整数规划模型, 并采用基于遗传算法和粒子群算法的两阶段混合搜索求解算法进行求解. 综上所述, 已有研究大多是针对列车运行调整问题, 以列车总晚点时间为目标, 从宏观层面考虑车站容量及动车组库存等问题, 并不能真实体现动车组运用及到发线运用对列车运行调整产生的影响.

从微观角度出发, Meng 等^[10]提出一种考虑到

发线运用的列车运行调整模型, 以到发线运用均衡及最小化总延误时间为目标, 采用人工蜂群算法进行求解. Zhang 等^[11]提出一种股道紧急维护与列车运行调整协同实时优化策略, 该策略不仅能够针对股道紧急维护进行在线决策, 还可同时对由维护引起的列车延误进行实时调整. 文献^[12]运用时空网络构建了能够同时进行列车路径及运行图调整的整数规划模型, 并采用拉格朗日松弛方法将原始的大规模复杂问题分解为顺序单列车调整子问题, 最后采用标准的标签纠正算法以获得可行解. Lu 等^[13]针对车站到发线运用调整问题, 提出基于冲突度的能够适应多种联锁机制的列车停站与运行调整问题模型, 并采用基于滚动时域思想的遗传算法及 CPLEX 进行求解. 针对列车停站计划及运行图优化问题, Yang 等^[14]提出一种协同优化方法, 以最小化总停站时间和总延误时间为目标, 建立多目标混合整数线性规划模型, 并采用 CPLEX 求解器进行求解. Zhang 等^[15]针对干扰的不确定性问题设计了一种基于信息更新的单线铁路实时优化调整策略, 考虑列车出发到达时间、列车次序及停站计划构建了混合整数线性优化模型, 并采用基于场景机遇约束的模型预测控制算法来降低求解时间, 最后与经典调整策略进行对比来验证模型的可行性. 彭其渊等^[16]在考虑到发线与咽喉区进路综合运用优化的前提下, 以列车运行晚点和车站作业秩序影响两方面最小化为目标, 建立了混合整数线性规划模型. 将该问题分解为到发线运用方案编制子问题和列车到发时刻调整子问题, 并设计了基于分支定界的算法框架来满足调整的实时性. Liu 等^[17]从实际列车运行调整问题出发, 在运行图调整的同时考虑到发线运用调整, 基于事件-活动网络构建了基于场景的机会约束模型, 并采用交替方向乘子法 (Alternating direction method of multipliers, ADMM) 对模型进行求解. 通过考虑车站到发线运用的问题使模型结果更加符合客观实际列车运营场景, 但由于未考虑动车组周转的问题很可能出现调整后的结果在动车组运用方面不可行, 造成动车组资源的浪费.

针对突发事件导致动车组运用无法按计划执行的问题, Zhou 等^[18]建立了一种列车运行图与动车组运用的协同调整混合整数线性规划模型, 模型中考虑动车组的灵活编组模式, 并采用基于可变领域搜索的遗传算法进行求解. 文献^[19]提出一种变邻域搜索算法来解决动车组运用调整的问题, 模型中考虑了列车顺序、乘客舒适度等因素. 为解决模型过度复杂而导致求解时间较长的情况, Wang 等^[20]研究了在完全中断情景下考虑运行图及动车组周转

协同的城市轨道列车调整, 考虑最大可用动车组数量约束、动车组周转约束及动车组接续约束建立多目标混合整数线性规划模型, 以最小化时刻表偏离量、取消列车数量等为目标, 采用两阶段算法进行求解以提高模型计算效率. 周晓昭等^[21]以列车运行总晚点时间最小、晚点波及到的列车数量最少为目标建立考虑动车组接续的列车运行调整模型, 采用基于和声搜索算法针对 4 种不同延误场景对所建立的模型进行仿真验证. 史峰等^[22]研究了考虑动车组周转与到发线运用的列车运行图优化问题, 所建立的优化模型以最小化动车组接续时间与列车运行总时间为目标, 运用匈牙利算法对所建立的优化模型进行求解. 文献^[23]建立了以优化动车组接续质量目标的列车运行调整模型, 模型中考虑动车组接续对列车车站作业计划的影响, 采用紧凑接续算法对模型进行求解. 论文所建立的模型能够在一定程度上缓解车站咽喉区的压力并有效提高动车组接续的质量. 占曙光^[24]针对区间部分中断情况建立了考虑动车组接续的列车运行调整模型, 从宏观层面考虑车站容量问题, 采用 CPLEX 对模型进行求解, 并基于京沪铁路运营数据对模型进行多场景测试. 石敏涵等^[25]通过考虑列车停站方案、列车运行图以及动车组接续计划三者之间的关系, 构建了双层协同优化模型, 上层模型优化旅客需求满足程度及运营成本, 下层优化动车组运用指标, 并设计双层启发式算法进行求解. 王斌等^[26]提出一种考虑动车组周转和到发线运用的综合优化模型, 该模型以最小化动车组使用数量为目标, 综合考虑动车组的接续关系及列车占用到发线的相容性, 同步得到可行的高速铁路动车组周转方案和到发线运用方案.

综上所述, 现有文献多集中于研究考虑动车组接续或考虑车站到发线运用的列车运行调整, 在两者结合方面通常侧重于计划优化, 较少考虑突发情况下的多计划协同调整. 针对我国高铁成网跨线运营的现状, 严重干扰条件下考虑动车组周转及到发线运用调整的列车运行多计划协同调整的高铁调度的核心问题之一. 动车组作为重要的移动设施, 在每个动车段或动车所配属的数量均有限. 严重干扰条件下部分列车可能会被取消运行, 影响车站到发线运用计划, 导致高铁运营效率降低. 因此, 在运行图调整的基础上综合考虑动车组周转及到发线运用调整具有重要的理论和实际意义. 本文针对区间双向中断场景下的车站到发线与动车组接续协同优化问题, 基于事件-活动网络构建了考虑取消列车、变更到发站时间、更换列车到发线、使用备用动车组等策略的列车运行多计划协同调整模型, 设计了两阶段求解方法以提高模型求解的实时性和效率.

1 问题描述

当高铁受到大风、红光带、接触网挂异物和设备故障等突发事件影响而导致区间临时中断, 造成列车长时间延误, 最终导致本线列车无法按计划时刻表运行, 终到动车组无法按计划进行接续, 需要调度员对列车运行图、动车组运用计划和车站作业计划进行调整. 然而, 仅通过调整运行图难以满足实际调度的需求, 协同考虑到发线的运用以及动车组的周转, 可以降低突发事件造成的影响, 提升调整计划的可行性.

图 1 和图 2 给出了区间上下行线路同时中断条件下考虑车站到发线运用与动车组接续的列车运行调整问题的描述. 图 1 为宏观描述的高铁路线, 图中圆圈代表一个车站, 两个圆圈代表具有折返能力的车站, 红色块为发生中断的区间. 图 2 以下行为例, 将中断区间前的两个车站从微观层面进行展开, 其中 S_i 共有两条下行接车股道: 3 股道、5 股道以及一条正线 I 股道; S_{i-1} 共有三条下行接车股道: 3 股道、5 股道、7 股道以及一条正线 I 股道. 假设三列追踪运行的列车分别计划占用车站 S_i 的 3 股道、5 股道与 3 股道, 此时由于受到干扰导致车站 S_i 前方区间中断, 原计划在车站 S_i 发车的列车无法按计划发车而被迫在站停留, 导致第三辆车无法按原计划从车站 S_{i-1} 前往车站 S_i , 造成列车终到晚点而影响动车组周转.

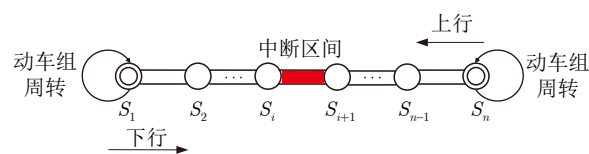


图 1 具有中断区间的双线线路

Fig.1 The double-line railway with interruption section

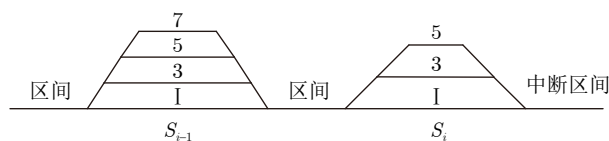


图 2 区间中断条件下的车站示意图

Fig.2 Diagram of station with interruption section

区间上下行线路同时中断条件下调度员需要综合考虑车站到发线运用与动车组周转等问题进行列车运行图的调整, 降低线路通行能力失效情况下列车延误, 提升恢复正常运营的时间. 通过调整车站到发线运用计划改变列车在车站的计划接发车时刻和列车计划占用的到发线以避免不同列车计划间的冲突, 通过调整动车组运用计划改变始发终到列车

通过调整动车组运用计划改变始发终到列车的车站接续计划来减少列车无可用车组承担运行任务的情况。

为了降低多计划协同调整问题的复杂度,给出如下 4 个合理假设:

- 1) 列车计划运行图、到发线运用计划和动车组交路计划均已知;
- 2) 双线铁路中的上下行列车运行互不干扰,且不考虑列车反向运行;
- 3) 服役动车组均具有良好运行状态,且不考虑动车组检修;
- 4) 列车停站作业可以占用车站内同方向除正线以外的其他到发线。

2 模型构建

2.1 事件-活动网络模型

本文提出一种基于事件-活动网络的多计划协同调整模型构建方法. 事件包括列车在车站的出发事件、到达事件、到发事件和动车组库存事件. 其中, 动车组库存事件表示每一个具有始发终到能力的车站的动车组库存情况 (备用的动车组的数量、备用的每辆动车的类型等). 活动包括列车活动、间隔活动、车站活动和接续活动. 其中, 列车活动包括一列列车在两个相邻的车站之间的前一车站出发事件与后一车站到达事件之间的活动以及同一车站内的到达事件与出发事件之间的活动; 间隔活动为两列车在同一区间内的运行间隔活动, 如区间始端车站两列车的出发间隔活动以及区间末端车站两列车的到达间隔活动; 车站活动为两同向列车在同一车站的到达、出发之间的间隔活动, 如两列车在车站的到达间隔活动和出发间隔活动与到发间隔活动; 接续活动为各类行车资源之间的循环利用的活动, 如动车组接续活动. 动车组接续活动既包括上行和下行动车组之间的接续活动, 又包括备用动车组与始发列车之间的接续活动. 为了更好地描述所建立的事件-活动网络模型, 结合图 3 进行详细说明。

假设所建立的事件-活动网络模型中包含 3 个车站 (车站 1 ~ 3) 和 2 辆列车 ($T1$ 和 $T2$). 图中每一个圆圈代表列车的一个事件, 每一条带箭头的线条代表列车的一个活动. 具体而言, 圆圈可分为三种: 列车在车站的出发事件、到达事件和动车组库存事件; 带箭头的粗直线代表列车在相邻两个车站到达事件与出发事件组成的活动; 带箭头的细直线代表列车在车站的出发事件与到达事件组成的活动; 带箭头的虚线代表相邻的两列车在相同的车站内的出发事件与出发事件、到达事件与到达事件或出发

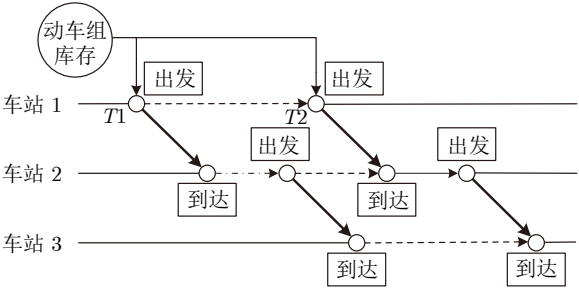


图 3 事件-活动网络

Fig.3 Event-activity network

事件与到达事件组成的活动; 带箭头的点划线代表动车组接续活动。

2.2 参数定义

模型中所涉及的决策变量及参数分别如表 1 和表 2 所示。

表 1 决策变量定义			
Table 1 Definition of decision variables			
序号	决策变量	含义	类型
1	x_e	事件 e 发生的实际时刻	整数
2	y_t	列车 t 是否被取消运行	0-1
3	φ_a	列车停站活动 a 是否发生	0-1
4	λ_a	两列车之间的顺序活动	0-1
5	$\theta_{t,s}^p$	列车 t 在 s 站是否占用 p 股道	0-1
6	δ_{t_e,t_f}^p	两列车是否占用相同到发线 p	0-1

表 2 参数定义		
Table 2 Definition of parameters		
序号	参数	定义
1	T	列车集合, $t \in T$
2	S	车站集合, $s \in S$
3	P	车站股道集合, $p \in P$
4	E	事件集合, $e \in E$
5	$E_{\text{origin}}^{\text{dep}}$	始发站列车的出发事件
6	A	活动集合, $a \in A$
7	A_{rol}	动车组接续活动集合
8	t_e	与事件 e 相关联的列车
9	p_e	事件 e 计划发生时刻
10	M	足够大的正整数
11	$\omega_1, \omega_2, \omega_3$	目标函数惩罚系数
12	L_a	活动 a 最小间隔时间

2.3 目标函数

考虑区间中断场景, 在满足以上约束的前提下,

模型的优化目标分为两个部分: 取消列车数量及列车总晚点最小和动车组运用计划偏离原计划程度最小. 首先, 当列车遇到中断而发生晚点时, 为将列车晚点传播的影响降至最低, 应尽量减少列车总延误时间, 同时由于取消列车会对之后的接续计划产生较大影响, 所以也应尽量减少取消列车的数量, 即

$$\min \omega_1 \sum_{t \in T} \sum_{s \in S} y_{t,s} + \omega_2 \sum_{e \in E} [x_e - p_e] \quad (1)$$

式中, y_t 为取消列车决策变量, 当 $y_t = 1$ 时表示列车 t 取消运行; $\sum_{t \in T} \sum_{s \in S} y_{t,s}$ 表示取消列车的数量; x_e 表示事件 e 调整后发生时间; p_e 表示事件 e 计划发生时间; $\sum_{e \in E} [x_e - p_e]$ 表示事件 e 偏离原计划的程度; ω_1 和 ω_2 为惩罚系数. 由于取消原计划开行的列车对运营影响较大, 故 ω_1 的取值一般远大于 ω_2 . 另外, 为方便客运组织, 需保证动车组运用计划偏离原计划程度最小, 即列车尽量选择计划动车组进行接续, 即

$$\min \omega_3 \sum_{a \in A_{\text{rol}}} |ck1_a - ck2_a| \quad (2)$$

式中, $ck1_a$ 为动车组接续决策变量, 当 $ck1_a = 1$ 时表示调整后动车组承担列车的接续任务; $ck2_a$ 表示计划中动车组是否承担列车接续任务; $\omega_3 \sum_{a \in A_{\text{rol}}} |ck1_a - ck2_a|$ 表示动车组运用计划偏离原计划程度, ω_3 为惩罚系数. ω_2 与 ω_3 的取值取决于具体的运营场景及调度人员的经验, 如果 ω_2 大于 ω_3 , 表明在调整过程中更加注重总延误对列车运行计划的影响. 相反, 若 ω_2 小于 ω_3 则表示在调整过程中更加注重动车组运用计划偏离原计划的程度对列车运行计划的影响. 为得到最终明确的列车运行调整方案, 同时避免多个目标函数对模型求解所造成的难度, 本文将上述两部分之和作为最终的目标函数.

2.4 约束条件

2.4.1 列车出发时间约束

在列车运行调整过程中, 若将列车在站出发时间提前则可能造成旅客错过列车, 导致铁路运输服务质量和乘客满意度下降. 因此, 在调整时应保证列车调整之后的出发事件发生时刻要晚于计划时刻或与计划时刻相同, 该约束条件为

$$x_e \geq p_e, \quad \forall e \in E \quad (3)$$

2.4.2 列车间隔时间约束

1) 停站时间约束

若原计划中列车在该站需要停车, 则需保证列车在车站的停站间隔时间满足最短要求时间. 其中,

最短停站时间是指列车完成旅客乘降等技术作业所需要的时间, 该约束条件为

$$L_a \leq x_{e_1} - x_{e_2} + (1 - \varphi_a) \times M \leq M, \quad \forall a \in A^{\text{sta}} \quad (4)$$

约束中, e_1 表示列车在车站的出发事件, e_2 表示列车在车站的到达事件, M 表示一个足够大的正整数, A^{sta} 代表一个列车在一个车站的出发事件与到达事件的活动组成的活动集合, L_a 根据列车活动的不同而含义不同, 此处代表列车停站最短作业时间.

2) 区间运行时间约束

区间运行时间是指将列车理想化, 使其以能力范围内的最高速度在区间行驶花费的时间. 本约束条件保证区间运行间隔时间大于或等于最短要求时间, 即

$$x_f - x_e \geq L_a, \quad \forall a = (e, f) \in A^{\text{sec}} \quad (5)$$

其中, A^{sec} 代表一个列车在一个车站的到达事件与在前一车站的出发事件的活动组成的活动集合, L_a 代表列车在区间行驶需要满足的最短区间运行时间.

3) 到达和出发间隔时间约束

为了保证车站作业安全, 相邻两列车在车站的到达间隔时间和出发间隔时间需满足最短时间约束, 其具体数学表达式为

$$x_f - x_e + (1 - \lambda_a) \times M \geq L_a, \quad \forall a = (e, f) \in A^t \quad (6)$$

式中, A^t 代表两同向列车在同一车站的到达或出发事件的间隔活动组成的活动集合, e 和 f 表示组成活动 a 的两列不同列车在相同车站的到达和出发事件, 根据活动 a 种类的不同可分以下两种情况:

a) 当活动 a 表示同向列车到达活动或出发活动时 (其中包括停站列车和通过列车);

b) 当 e 表示到达活动, f 表示出发活动时 (L_a 的含义如图 4 所示).

2.4.3 列车顺序约束

在运行过程中的两列车必然存在一定的顺序. 约束式 (7) 和式 (8) 保证相邻两辆列车必然存在到发顺序, 且不允许列车在区间越行.

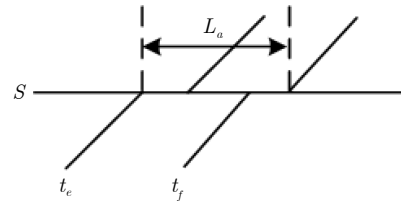


图 4 到达列车与出发列车

Fig. 4 Arriving and departing trains

$$\lambda_a + \lambda_{a'} = 1, \forall a = (e, f) \in A^t, \forall a' = (f, e) \in A^t \quad (7)$$

$$\lambda_a = \lambda_{a'}, \forall (a, a') \in B \quad (8)$$

式 (7) 中, 变量 λ 因活动 a 的不同而代表的含义不同. 当 a 和 a' 分别为到达活动和出发活动时, λ_a 和 $\lambda_{a'}$ 分别表示两相邻列车在车站的到达顺序和出发顺序; 式 (8) 中, a 为列车在区间前一个车站的出发活动, a' 为列车在区间后一个车站的到达活动, 其中 (a, a') 为顺序活动对, 表示相邻两个顺序活动, B 为所有顺序活动对的集合.

2.4.4 取消列车约束

当发生严重干扰时, 对列车影响数量较多且范围较大, 此时调度员可能采取取消列车运行线策略来减小延误传播范围, 即将被取消的列车运行线移出考虑的范围之外. 该约束条件为

$$M \times y_t \leq x_e - p_e \leq M, \forall e \in E, \forall t \in T \quad (9)$$

2.4.5 动车组基本约束

为计算调整后动车组运用计划与原计划的偏移量, 需要将所有动车组原接续计划输入模型, 如式 (10) 所示. 同时, 在动车组运用计划调整过程中, 需要为每一条列车运行线分配动车组, 否则该运行线会因无动车组承担而被取消. 其中 $A_{\text{rol}}(e)$ 代表与事件 e 相关联的动车组接续活动集合. 约束式 (11) 保证了每一辆始发列车或者被动车组承担或者被取消运行. 另外, 按规定每一列动车组最多承担一辆列车的运行任务. 约束式 (12) 表示每一辆动车组至多承担一辆列车的运行任务, 这是因为部分动车组在承担完本次任务后无后续接续任务.

$$ck2_a = 1, \forall a \in A_{\text{rol}}(e), e \in E_{\text{origin}}^{\text{dep}} \quad (10)$$

$$y_t + \sum_{a \in A_{\text{rol}}(e)} ck1_a = 1, \forall t \in T, \forall e \in E_{\text{origin}}^{\text{dep}} \quad (11)$$

$$\sum_{a \in A_{\text{rol}}(e)} ck1_a \leq 1, \forall e \in E_{\text{origin}}^{\text{dep}} \quad (12)$$

2.4.6 动车组接续约束

动车组在完成一条运行线的任务后, 在开始承担下一条运行线任务前需要一定的时间来完成整备作业和旅客乘降. 故在动车组承担列车接续任务的情况下, 需满足动车组最小接续时间. 该约束条件为

$$x_f - x_e + (1 - ck1_a) \times M \geq L_a, \quad \forall a = (e, f) \in A_{\text{rol}} \quad (13)$$

式中, e 和 f 表示两列车的动车组接续活动, L_a 表示动车组最小接续时间, 其含义如图 5 所示.

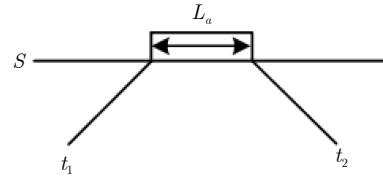


图 5 动车组接续示意图

Fig.5 EMU connection diagram

2.4.7 到发线运用基本约束

根据相关规定, 列车在站使用到发线需满足到发线占用唯一性约束, 即列车在站停车, 必须选择一条股道, 若不停车, 只能选择正线股道通过. 该约束条件为

$$\sum_{p \in P^s} \theta_{t,s}^p = 1, \quad \forall t \in T, \forall s \in S, \forall p \in P \quad (14)$$

式中, p 为车站 s 的到发线集合 P^s 中可用到发线. 当列车办理通过作业时, p 只能选择正线; 当列车办理停站作业时, p 可以选择除正线外的其他到发线. 此处建立模型时可用 if-else 条件来对模型进行约束.

2.4.8 到发线运用相容性约束

列车办理停站作业后需要占用一条到发线, 按规定一条到发线同一时间只能被一列车占用. 约束式 (15) 保证使用同一股道的两辆列车在作业时间上满足一定时间间隔要求, 即

$$x_f + (2 - \delta_{t_e, t_f, s}^p - \lambda_a) \times M \geq x_e + L_a, \quad \forall a = (e, f) \in A_{\text{rol}} \quad (15)$$

式中, e 代表先占用到发线列车的出发事件, f 代表后占用到发线列车的到达事件. 此约束表示占用同一到发线的两列车, 后一列车开始占用到发线的时刻要在前一列车车尾完全出清到发线之后. 此处 L_a^s 指列车从到发线发车到列车尾部完全出清到发线需要的时间.

2.4.9 中断场景约束

当发生突发事件造成区间上下行线路临时失去通行能力时, 列车在此期间无法通过区间而只能在车站待避. 约束式 (16) 可以保证列车只能在中断结束之后才发车.

$$0 \leq x_e - T_{\text{end}} + (1 - \theta) \times M \leq 2 \times M - (1 - y_t) \times M, \quad \forall e \in E, \forall t \in T \quad (16)$$

3 求解方法

3.1 线性化处理

由于非线性项的存在, 本文所建立的考虑动车组与乘务运用的高速列车运行多计划协同调整模型为混合整数非线性模型. 考虑到将非线性约束采用线性化手段进行处理, 针对目标函数中绝对值非线性项, 设计 0-1 变量 ck_a 来实现目标函数线性化, 具体线性化步骤为

$$ck1_a - ck2_a \leq ck_a, \quad \forall a \in A_{rol} \quad (17)$$

$$ck2_a - ck1_a \leq ck_a, \quad \forall a \in A_{rol} \quad (18)$$

将 ck_a 替换式 (2) 中的 $|ck1_a - ck2_a|$ 即可实现线性化.

3.2 两阶段求解方法

本文构建的考虑动车组和到发线运用的高速列车运行协同调整模型是一个具有非线性目标函数的混合整数规划模型, 随着问题规模的扩大, 求解难度呈指数级增加. 考虑到实际调整过程中的时效性需求, 本文提出一种两阶段优化方法, 将问题分解为中断开始前阶段和中断开始后阶段以降低求解规模, 实时为调度员提供可靠列车运行调整方案. 车站到发线运用计划调整与动车组运用计划调整相关约束是造成模型规模大的主要原因, 也是模型求解的难点所在, 并且该问题在干扰开始之后的时段表现十分突出. 因此, 将原问题求解分为两个阶段: 第 1 阶段忽略干扰开始后时段的到发线运用相关约束与动车组运用相关约束进行求解; 第 2 阶段将第 1 阶段获得的干扰开始之前的调整方案固定, 完整考虑干扰开始后的到发线运用相关约束与动车组运用相关约束, 对原问题重新进行求解得到整个问题的可行方案. 两阶段求解方法具体步骤如下:

步骤 1. 第 1 阶段仅对干扰开始之前的列车考虑车站到发线运用计划调整与动车组运用计划调整相关约束 (即约束 (11) ~ (15)), 假设干扰开始之后的列车不受车站到发线运用与动车组运用相关约束限制, 对原问题进行求解, 获得调整后的列车运行图、到发线运用计划与动车组运用计划.

步骤 2. 第 2 阶段将第 1 阶段获得的干扰开始之前的行车资源计划固定, 基于调整后的列车运行图及资源使用情况, 对干扰开始之后的列车考虑车站到发线运用计划调整与动车组运用计划调整相关约束 (即约束 (11) ~ (15)), 重新对原问题进行求解, 获得调整后的列车运行图、到发线运用计划与动车组运用计划.

通过分析设计的两阶段优化方法可知: 在第 1 阶段不考虑干扰开始之后时段到发线运用计划调整与动车组运用计划调整相关约束可有效降低模型规模和求解难度; 第 2 阶段相比于整体求解, 固定第 1 阶段获得的行车资源计划后, 求解难度也得到明显缓解. 由于固定第 1 阶段的调整结果, 可能会导致算法求解的结果质量下降, 并不一定能获得原问题的全局最优解. 综上, 本文采用两阶段求解方法对构建模型进行求解.

4 算例分析

4.1 算例描述和参数设置

为验证所构建模型的可行性, 本文以中国铁路北京局集团有限公司管辖的京津城际铁路为例, 根据列车实际运行数据进行算例验证. 选取北京南站至滨海站共计 11 个车站、10 个区间的部分列车对模型进行验证, 其中滨海站至北京南站为上行方向, 北京南站至滨海站为下行方向.

列车计划时刻表中共包含 31 列列车, 其中上行列车 16 列, 下行列车 15 列. 在上行列车中有 6 列列车只从天津城际场至北京南站, 下行列车中有 5 列列车只从北京南站至天津城际场. 模型中所定义的相关参数取值如表 3 所示. 针对本文提出的调整模型, 选取中断场景对模型进行验证, 中断发生时间为早上 9:20 至早上 11:00, 共计 100 min, 发生地点为北京南站至亦庄站之间的区间且上下行线路同时中断.

表 3 相关参数取值
Table 3 Values of relative parameters

序号	参数	取值
1	列车最小停站时间 L_a	2 min
2	同向列车最小到发间隔 L_a	3 min
3	占用相同股道列车最小安全间隔 L_a	2 min
4	动车组最小接续时间 L_a	15 min
5	北京南站备用动车组	9 列
6	滨海站备用动车组	3 列
7	M	1 440 min
8	ω_1	1 000
9	ω_2	1
10	ω_3	1

4.2 结果分析

通过 Python 调用 CPLEX 12.10 教育版, 并在处理器为 Intel (R) Core (TM) i7-9750H @2.60 GHz, 内存为 16 GB, 操作系统为 Window10 的电脑上对所构建的模型及求解方法实现. 为测试所提出

模型和设计算法的可行性和有效性,本文设计了如下的对比实验.

1) 考虑动车组和到发线运用的协同调整

基于设定的中断场景,采用本文设计的两阶段求解方法对构建模型进行求解,求解结果如图 6 与表 4 所示,图中蓝色线为下行列车,红色线为上行列车,带箭头的连接线代表备用动车组接续活动,不带箭头的连接线代表终到动车组接续活动.表 4 记录了包括上下行 31 辆列车调整后的始发及终到时刻、计划停站方案及后续接续列车,其中列车编号中 D 代表下行列车, U 代表上行列车.第 2、3 列的括号代表列车始发、终到时间与计划时间不一致且括号内的数据为计划时间.如果列车在某站的到发线被调整,则第 4 列的数据中,在这个车站调整后的到发线号后面,用括号内的股道号标明这列列车在此车站计划运用的到发线.最后一列中,如果

列车的后续接续列车与计划的不一致,则计划的后续接续列车由括号内的列车编号表示.停站方案记录了每辆列车计划占用的股道,其中奇数代表下行到发线,偶数代表上行到发线,数字 1 与 2 为正线,其他数字随到发线离正线距离逐渐递增.

根据表 4 的数据可知:

a) 由于受到线路中断的影响,导致多列列车延误,其中列车 D10、D12、D13、D14 占用股道产生冲突,为疏解冲突,根据相应约束将列车 D10、D12、D14 安排至其他股道进行接发车作业.

b) 由于上行列车 U5 的动车组受中断影响而无法接续担当下行列车 D11 的运行任务,为了保证调整后动车组运用计划尽量不偏离原始运用计划,此时将列车 D11 在首站的出发时间延长至 U5 到达该站之后.可以看出在区间中断条件下,当动车组库存不足时,部分列车会选择推后出发时间而不至于

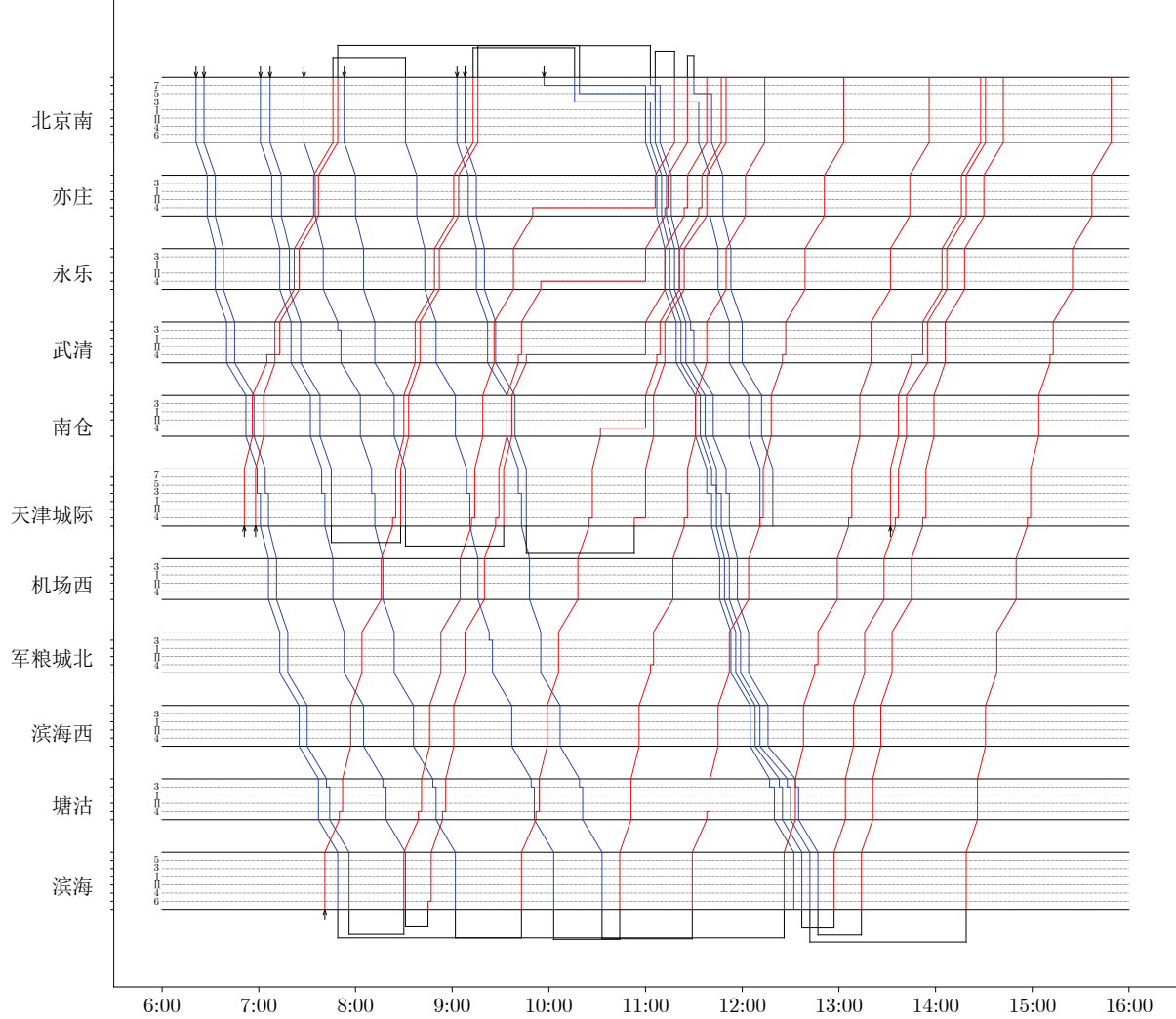


图 6 调整后的列车时刻表
Fig.6 Rescheduled train timetable

表 4 调整后列车运行计划
Table 4 The rescheduled train plans

列车编号	始发时刻	终到时刻	停站方案	后续列车
D1	06:21	07:17	51 111 511 113	U3
D2	06:26	07:29	51 111 711 133	U5
D3	07:01	08:04	51 111 711 133	U6
D4	07:07	07:45 (07:37)	311 117	U4
D5	07:28	09:02 (08:37)	311 313(7)11 133	U8
D6	07:53	08:31 (08:23)	311 113	U7
D7	08:31	10:03 (09:41)	311 113(7)13 133	U9
D8	09:03	10:33 (10:06)	311 113(7)11 133	U11
D9	09:08	09:46 (09:38)	311 113	U10
D10	11:09 (09:25)	12:42 (10:28)	511 113(5)11 135	U16(-)
D11	11:33 (09:46)	12:11 (10:16)	311 113	—
D12	11:00 (09:57)	12:32 (11:00)	7(5)11 113(5)11 135	-(U12)
D13	11:03 (10:16)	12:37 (11:23)	3(5)1 111 511 135	U13
D14	11:09 (10:52)	12:47 (12:02)	7(5)11 313(7)11(3)133	U14
D15	11:41 (11:30)	12:19 (12:00)	5(3)11 113	—
U1	06:51	07:49 (07:33)	424 226	D10 (D6)
U2	06:58	07:46 (07:28)	422 226	D7
U3	07:41	09:13 (08:44)	44 222 422 226	D13 (D8)
U4	08:28 (08:25)	09:16 (08:55)	422 226	D14
U5	08:30	11:18 (09:33)	6 422 242 224(2)6	D11
U6	08:47 (08:45)	11:26 (09:55)	442 224 244(2)4(2)6	D15
U7	09:32 (09:30)	11:38 (10:00)	424(2)24(2)4	-(D13)
U8	09:43	11:47 (10:53)	4 422 244(2)424(2)4	—
U9	10:44	12:14 (11:47)	42 242 422 226	—
U10	11:00 (10:53)	11:50 (11:23)	422 226	—
U11	11:29	13:03 (12:39)	64 222 424 226	—
U12	12:26	13:56 (13:29)	62 242 422 226	—
U13	12:57	14:31 (13:52)	4 222 242(4)2 226	—
U14	13:14	14:42 (14:09)	62 222 422 226	—
U15	13:32	14:28 (14:14)	424 226	—
U16	14:19	15:49 (15:22)	62 222 424 226	—

被取消。

2) 不同中断场景下考虑不同策略的协同调整

为验证协同调整模型的有效性, 将本文提出的取消列车、变更列车到发时刻、更换到发线、备用动车组接续等组合策略与先到先服务 (First come, first served, FCFS) 策略进行比较。得到的结果如表 5 所示, 其中符号 P^o 与 P^d 所在的两列分别代表在某一中断场景下组合策略相对 FCFS 在目标值与列车总延误上的减少的比例。表 5 中中断场景 (9:20, 1, 100) 表示早上 9 点 20 分在 1 区间 (北京南至亦庄之间区间) 发生区间中断持续时间为 100 min。图 7 展示了不同中断场景下的组合策略与 FCFS

的目标函数及列车总延误。

对于测试的场景, 对比表 5 中组合策略与 FCFS 的结果数据以及图 7 中柱体的高度, 本文所提出的组合策略虽然在求解时间上大于 FCFS 策略, 但都能在有效时间内求出最优或近似最优解, 并且解的质量在各个干扰场景下都比 FCFS 策略更优。然而, 目标函数降低的程度并不明显, 这是因为在所取的京津城际部分列车中越行车辆数量较少, 若将京津城际线路一整天列车运营数量考虑其中, 此情况将会得到明显改善。

3) 两阶段求解方法求解质量分析

为分析本文所设计的两阶段求解方法求解质

表 5 不同中断场景下考虑不同策略的列车运行调整
Table 5 Train reschedule considering different strategies under different interruption scenarios

中断场景	策略	目标值	P^o (%)	求解时间 (s)	取消列车数量 (列)	列车总延误时间 (s)	P^d (%)
(9:20, 1, 100)	组合策略	13 080	2.35	159.0	0	12 905	2.37
(9:20, 1, 100)	FCFS	13 388		47.3	0	13 211	
(9:00, 2, 90)	组合策略	13 303	2.55	361.0	0	13 173	2.31
(9:00, 2, 90)	FCFS	13 642		73.8	0	13 478	
(10:00, 4, 60)	组合策略	7 821	0.06	17.0	0	7 671	0.33
(10:00, 4, 60)	FCFS	7 826		6.9	0	7 696	
(11:00, 3, 30)	组合策略	5 994	0.21	3.0	0	5 864	0.21
(11:00, 3, 30)	FCFS	6 007		2.7	0	5 876	

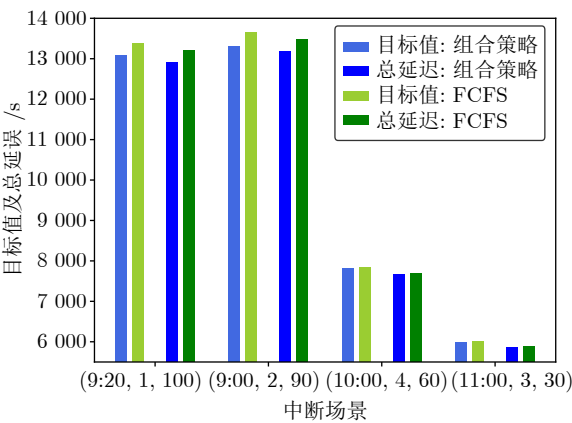


图 7 不同中断场景下不同策略的结果
Fig. 7 The results of different strategies under different interruption scenarios

量, 在不同干扰场景下且动车组库存相同情况下, 将两阶段求解方法与整体求解方法 (CPLEX 求解) 进行对比分析. 各干扰场景下两阶段求解结果已在表 5 中展示, 整体求解结果如表 6 所示. 图 8 对不同场景下两阶段求解与整体求解的时间进行对比.

由于二者在某些场景下的求解时间的数量级差异较大, 图 8 中的纵轴为对数坐标轴.

通过对比表中的数据可以看出, 本文所设计的两阶段求解方法求得的解的质量与整体求解方法求得的解的质量相差不大, 但前者求解的效率相比于后者得到明显提高. 对于部分干扰场景而言, 两阶段方法求得的解的质量甚至略高于整体求解方法, 这是因为在列车密集区间发生干扰后, 模型规模随列车数量呈指数级增大, CPLEX 求解器很难在一

表 6 各中断场景下整体求解结果
Table 6 The overall solution results under each interruption scenario

中断场景	求解方法	目标值	求解时间 (s)	取消列车数量 (列)	总延误时间 (s)
(9:20, 1, 100)	整体求解	12 382	4 180	0	12 362
(9:00, 2, 90)	整体求解	12 453	5 304	0	12 269
(10:00, 4, 60)	整体求解	7 510	53	0	7 395
(11:00, 3, 30)	整体求解	5 896	5	0	5 786

表 7 不同权重系数下模型求解结果对比
Table 7 Comparison of solution results under different weight coefficients

ω_1	ω_2	ω_3	目标值	取消列车数 (列)	总延误时间 (s)	求解时间 (s)
1	1	1	12 819	0	12 723	330.0
1	10	1	127 865	0	12 767	425.0
1	100	1	1 278 215	0	12 767	359.5
1	1 000	1	12 796 015	0	12 795	314.0
10	1	1	12 819	0	12 723	326.0
100	1	1	12 819	0	12 723	319.0
1 000	1	1	12 819	0	12 726	307.0
1	1	10	17 214	3	17 064	251.8
1	1	100	18 130	3	17 223	227.0
1	1	1 000	25 463	3	19 585	605.7

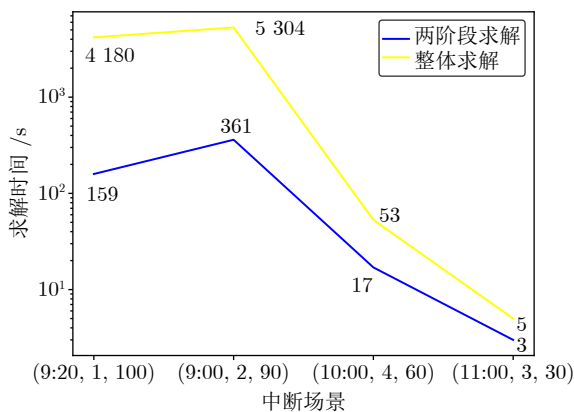


图 8 求解时间

Fig.8 Solution time

定时间内求得最优解。

4) 不同系数下解的质量分析

本文构建的模型目标函数中采用非负权重系数的方法将三个目标进行归一化。为探究不同系数对模型的影响且获得合适的系数值, 本节将两个系数固定, 然后探究另一个系数对解的质量的影响, 分析结果如表 7 所示。通过分析计算结果可以发现, 不同权重系数对解的质量有一定影响, 若取消列车的权重较大, 会使因晚点而无法接续的动车组的首站出发时间延迟至接续动车组到达该站之后, 且满足最小接续时间限制, 这就使得列车的总晚点量增加, 以至于减少取消列车的数量; 相应地, 若列车晚点或动车组偏离原计划程度权重系数较大时, 会使列车取消数量增加。同时, 随着列车晚点权重系数的增加, 解的质量基本保持不变, 可认为 ω_2 对解的质量影响较小, 而 ω_1 与 ω_3 之间存在一个平衡, 调度员在决策时应结合现场实际情况综合评估列车晚点和取消列车对旅客服务质量的影响。

5 结束语

针对区间双向同时中断条件下的高速列车运行协同调整问题, 本文基于事件-活动网络构建了考虑动车组和到发线运用的列车运行协同调整混合整数规划模型, 并通过线性化方法将模型中非线性约束做线性化处理后, 采用两阶段求解方法进行求解。结合京津城际铁路实际运营数据验证模型和求解方法的可行性和有效性。本文所建立的模型能够有效解决动车组接续、到发线运用与列车运行图协同调整问题, 调整列车运行图的同时, 可获得可行的动车组周转及到发线运用方案。相比于传统的 FCFS 策略, 本文所提出的组合策略能够在列车总延误、偏离原计划程度等方面降低区间中断带来的影响。同时, 本文设计的两阶段求解算法能够有效降低问题规模, 在较短时间内获得近似最优解。考虑到实

际问题的复杂性, 本文仅对区间双向中断场景进行了研究, 在未来的研究中可以将模型应用于多种扰动场景, 研究大规模复杂路网下的多专业协同调整方法, 进一步解决路网层面的多计划协同调整问题。

References

- Ning Bin, Dong Hai-Rong, Zheng Wei, Xun Jing, Gao Shi-Gen, Wang Hong-Wei, et al. Integration of train control and online rescheduling for high-speed railways: Challenges and future. *Acta Automatica Sinica*, 2019, 45(12): 2208–2217 (宁滨, 董海荣, 郑伟, 荀径, 高士根, 王洪伟, 等. 高速铁路运行控制与动态调度一体化的现状与展望. *自动化学报*, 2019, 45(12): 2208–2217)
- Lin Peng, Tian Yu, Yuan Zhi-Ming, Zhang Qi, Dong Hai-Rong, Song Hai-Feng, et al. Operation and maintenance of high-speed railway signaling system: Hierarchical structure model. *Acta Automatica Sinica*, 2022, 48(1): 152–161 (林鹏, 田宇, 袁志明, 张琦, 董海荣, 宋海峰, 等. 高速铁路信号系统运维分层架构模型研究. *自动化学报*, 2022, 48(1): 152–161)
- Liu Hao-Yu, He Shi-Bo, Chen Ji-Ming. Data-driven adaptive adjustment strategy for strong wind alarm in high-speed railway. *Acta Automatica Sinica*, 2019, 45(12): 2242–2250 (刘昊宇, 贺诗波, 陈积明. 数据驱动的高速铁路强风报警自适应解除策略. *自动化学报*, 2019, 45(12): 2242–2250)
- Zhou M, Dong H R, Liu X, Zhang H J, Wang F Y. Integrated timetable rescheduling for multidispatching sections of high-speed railways during large-scale disruptions. *IEEE Transactions on Computational Social Systems*, 2022, 9(2): 366–375
- Zhu Y Q, Goverde R M P. Dynamic and robust timetable rescheduling for uncertain railway disruptions. *Journal of Rail Transport Planning and Management*, 2020, 15: Article No. 100196
- Veelenturf L P, Kidd M P, Cacchiani V, Kroon L G, Toth P. A railway timetable rescheduling approach for handling large-scale disruptions. *Transportation Science*, 2016, 50(3): 841–862
- Reynolds E, Maher S J. A data-driven, variable-speed model for the train timetable rescheduling problem. *Computers & Operations Research*, 2022, 142: Article No. 105719
- Zhan S G, Kroon L G, Zhao J, Peng Q Y. A rolling horizon approach to the high speed train rescheduling problem in case of a partial segment blockage. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2016, 95: 32–61
- Wu Xing-Tang, Yang Ming-Kun, Wang Hong-Wei, Zhou Min, Lv Jin-Hu, Dong Hai-Rong. Load-balancing oriented line plan optimization for a high-speed railway network. *Acta Automatica Sinica*, 2022, 48(2): 492–503 (吴兴堂, 杨明坤, 王洪伟, 周敏, 吕金虎, 董海荣. 面向负载均衡的高铁路网列车开行方案优化方法. *自动化学报*, 2022, 48(2): 492–503)
- Meng X L, Wang Y H, Xiang W L, Jia L M. An integrated model for train rescheduling and station track assignment. *IET Intelligent Transport Systems*, 2021, 15(1): 17–30
- Zhang H M, Li S K, Wang Y H, Yang L X, Gao Z Y. Collaborative real-time optimization strategy for train rescheduling and track emergency maintenance of high-speed railway: A Lagrangian relaxation-based decomposition algorithm. *Omega*, 2021, 102: Article No. 102371
- Meng L Y, Zhou X S. Simultaneous train rerouting and rescheduling on an N-track network: A model reformulation with network-based cumulative flow variables. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2014, 67: 208–234
- Lu G Y, Ning J, Liu X B, Nie Y. Train platforming and rescheduling with flexible interlocking mechanisms: An aggregate approach. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2022, 159: Article No. 102622
- Yang L X, Qi J G, Li S K, Gao Y. Collaborative optimization for train scheduling and train stop planning on high-speed railways. *Omega*, 2016, 64: 57–76
- Zhang H M, Li S K, Wang Y H, Wang Y H, Yang L X. Real-time optimization strategy for single-track high-speed train rescheduling with disturbance uncertainties: A scenario-based chance-constrained model predictive control approach. *Com-*

puters & Operations Research, 2021, **127**: Article No. 105135

- 16 Peng Qi-Yuan, Ning Jia, Lu Gong-Yuan. Model and algorithm for train platform scheme rescheduling at large high-speed railway station. *Journal of the China Railway Society*, 2019, **41**(1): 10–19
(彭其渊, 宁佳, 鲁工圆. 大型高铁客运站到发线运用调整模型及算法. 铁道学报, 2019, **41**(1): 10–19)
- 17 Liu X, Zhou M, Dong H R, Wu X T, Li Y D, Wang F Y. ADMM-based joint rescheduling method for high-speed railway timetabling and platforming in case of uncertain perturbation. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2023, **152**: Article No. 104150
- 18 Zhou H S, Qi J G, Yang L X, Shi J G, Pan H C, Gao Y. Joint optimization of train timetabling and rolling stock circulation planning: A novel flexible train composition mode. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2022, **162**: 352–385
- 19 Hoogervorst R, Dollevoet T, Maróti G, Huisman D. A variable neighborhood search heuristic for rolling stock rescheduling. *EURO Journal on Transportation and Logistics*, 2021, **10**: Article No. 100032
- 20 Wang Y H, Zhao K Q, D'Ariano A, Niu R, Li S K, Luan X J. Real-time integrated train rescheduling and rolling stock circulation planning for a metro line under disruptions. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2021, **152**: 87–117
- 21 Zhou Xiao-Zhao, Zhang Qi, Xu Wei, Wang Tao, Song Peng-Fei. Intelligent adjustment method for train operation diagram with consideration of motor train set connection. *Journal of the China Railway Society*, 2018, **40**(8): 19–27
(周晓昭, 张琦, 许伟, 王涛, 宋鹏飞. 考虑动车组接续的列车运行图智能调整方法. 铁道学报, 2018, **40**(8): 19–27)
- 22 Shi Feng, Wei Tang-Jian, Zhou Wen-Liang, Luo Xiang. Optimization method for train diagram of high-speed railway considering the turnover of multiple units and the utilization of arrival-departure tracks. *China Railway Science*, 2012, **33**(2): 107–114
(史峰, 魏堂建, 周文梁, 罗湘. 考虑动车组周转和到发线运用的高速铁路列车运行图优化方法. 中国铁道科学, 2012, **33**(2): 107–114)
- 23 Shi Chang-Qing. High-speed Railway Train Diagram Adjustment Based on Train-set Connection Optimization [Master thesis], Southwest Jiaotong University, China, 2015.
(史常庆. 基于动车组接续优化的高速铁路列车运行图调整研究. [硕士学位论文], 西南交通大学, 中国, 2015.)
- 24 Zhan Shu-Guang. Real-time high speed train rescheduling considering the multiple units connecting. *Journal of Transportation Engineering and Information*, 2020, **18**(2): 1–9, 38
(占曙光. 考虑动车组接续优化的高速铁路列车运行实时调整. 交通运输工程与信息学报, 2020, **18**(2): 1–9, 38)
- 25 Shi Min-Han, Lv Hong-Xia, Ni Shao-Quan, Lv Miao-Miao. Bi-level optimization model for high-speed railway train operation diagram considering multifactor cooperation. *Journal of Transportation Engineering and Information*, 2022, **20**(2): 125–135
(石敏涵, 吕红霞, 倪少权, 吕苗苗. 考虑要素协同的高铁列车运行图双层优化模型. 交通运输工程与信息学报, 2022, **20**(2): 125–135)
- 26 Wang Bin, Huang Ling, Zheng Ya-Jing, Zhang Lu-Sheng. Comprehensive optimization for turnover of multiple units and utilization of arrival-departure track. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2018, **18**(3): 175–181
(王斌, 黄玲, 郑亚晶, 张鲁生. 动车组周转和到发线运用方案的综合优化研究. 交通运输系统工程与信息, 2018, **18**(3): 175–181)



周 敏 北京交通大学自动化与智能学院副教授. 2019 年获得北京交通大学交通信息工程及控制专业博士学位. 主要研究方向为高铁智能优化与调度, 人群应急管控.

E-mail: zhmin@bjtu.edu.cn

(ZHOU Min Associate professor at the School of Automation and Intelligence, Beijing

Jiaotong University. He received his Ph.D. degree in traffic information engineering and control from Beijing Jiaotong University in 2019. His research interest covers intelligent optimization and scheduling for high-speed railways, and crowd emergency management and control.)



顾灏璇 北京交通大学自动化与智能学院硕士研究生. 主要研究方向为高铁智能优化与调度.

(GU Hao-Xuan Master student at the School of Automation and Intelligence, Beijing Jiaotong University. His research interest covers intelligent optimization and scheduling for high-speed railways.)



董海荣 北京交通大学自动化与智能学院教授. 主要研究方向为智能交通系统建模优化, 自主感知与协同控制, 人工智能. 本文通信作者.

E-mail: hrdong@bjtu.edu.cn

(DONG Hai-Rong Professor at the School of Automation and Intelligence, Beijing Jiaotong University. Her research interest covers modeling and optimization of intelligent transportation systems, autonomous perception and cooperative control, and artificial intelligence. Corresponding author of this paper.)



刘仁伟 中国铁路北京局集团有限公司高级工程师. 主要研究方向为高铁行车调度与运输管理.

(LIU Ren-Wei Senior engineer at China Railway Beijing Group Co., Ltd.. His research interest covers high-speed rail operation rescheduling and transportation management.)



刘 瑄 北京交通大学自动化与智能学院博士研究生. 主要研究方向为列车速度曲线优化, 智能调度.

(LIU Xuan Ph.D. candidate at the School of Automation and Intelligence, Beijing Jiaotong University. His research interest covers train speed profile optimization and intelligent rescheduling.)