

文章编号: 1001-4632 (2026) 04-0220-11

引用格式: 张琦, 王旭兰, 鲍薪宇, 等. 考虑旅客退改签行为的高铁列车运行计划调整方法[J]. 中国铁道科学, 2026, 47(4): 220-230.

Citation: Zhang Qi, Wang Xulan, Bao Xinyu, et al. Rescheduling method for high-speed railway train operation plans considering passenger refund and rebooking behavior[J]. China Railway Science, 2026, 47(4): 220-230.

考虑旅客退改签行为的高铁列车运行计划调整方法

张 琦¹, 王旭兰¹, 鲍薪宇¹, 李 华²

(1. 北京交通大学 交通运输学院, 北京 100044;

2. 中国铁路上海局集团有限公司 客运部, 上海 200071)

摘 要: 面向高速铁路单向突发运营中断场景, 提出 1 种考虑旅客退改签行为的列车运行计划调整方法。首先, 基于列车运行图与动车组接续关系一体化调整的建模思想, 以旅客对列车停运和延误的接受度量化表征旅客退改签行为, 实现中断场景下客流重分配; 其次, 通过动车组数量平衡与接续约束保证车底运用的连续性, 构建以最小化客票收入损失为目标的混合整数线性规划模型, 综合决策列车延迟发车、停运、交路重组与热备车启用等协同调整方案, 并配套制定兼顾旅客接受度的改签策略, 为运营中断应急处置提供系统性解决方案; 最后, 采用商业优化软件 Gurobi 对模型进行求解, 并选取沪宁城际铁路开展案例分析。结果表明: 所提方法在不同运营中断场景下均能生成高质量的运行计划调整方案; 与传统“尽快恢复按图行车”方法相比, 采用该方法生成的调整方案可使列车总延误时间缩短 165 min, 客票收入损失减少 23.2%, 且整体方案的完整性与实用性更优, 证明该方法的可行性与有效性。

关键词: 高速铁路; 列车运行一体化调整; 列车运行图; 动车组交路计划; 旅客退改签行为

中图分类号: U292.8 **文献标识码:** A

doi: 10.3969/j.issn.1001-4632.2026.04.17

随着高速铁路网规模扩大和运输组织复杂性持续提升, 运营中断对列车运行、动车组运用及旅客运输组织的影响日益增强。中断发生后, 列车晚点、停运等扰动不仅会在线路层面传播, 还可能通过动车组接续关系扩大影响范围, 并引发旅客退改签及客流积压等问题。传统的分阶段独立调整方法或依赖人工经验的调整方式已难以适应快速、精准的协同调整需要。因此, 面向运营中断场景的列车运行计划协同调整成为亟待解决的关键问题。

针对上述问题, 部分学者已展开诸多研究。既有研究依据线路中断场景可分为双向中断与单向中断。在双向中断场景下, 相关学者提出列车停运和时刻调整方法^[1-2]; Zhu 等^[3]进一步考虑了调整停站方案等多种调整手段。在单向中断场景下, 相关学者提出列车运行顺序和时刻表调整策略^[4-6]; 李晓娟等^[7]考虑了调整停站方案; Zhang 等^[8]提出

组织列车迂回运行策略。在运行图调整基础上, 李登辉等^[9]基于给定调整图调整交路, 考虑动车组空驶调拨/回送和热备动车组启用。近年来, 相关研究进一步拓展为运行图与动车组交路一体化调整。王泽宇^[10]提出启用热备车调整策略, 以整交路为单位进行调整。大多数研究在优化建模中综合考虑动车组类型^[13]、接续及时间^[11-13]等相关约束。

除行车调度层面的运行图调整和动车组交路优化外, 旅客出行体验与出行成本也是高铁中断调度优化的核心考量指标, 既有研究通常将中断导致的旅客延误或额外成本^[14-16]作为目标函数。在此基础上, 部分研究进一步细化旅客出行行为, 将路径重选、旅客改签及旅客重分配等决策纳入研究范畴。Binder 等^[17]允许旅客直接选择新径路并计算其广义出行时间; Zhan 等^[18]通过路径效用刻画受

收稿日期: 2026-01-16; 修订日期: 2026-07-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (72471023, 52372300, 62003027); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (2026JBZX017)

第一作者: 张 琦 (1982—), 女, 山西太原人, 副教授, 博士。E-mail: qzhang6@bjtu.edu.cn

影响旅客的改签决策；Hong等^[19]在满足列车运力约束的前提下，将受列车取消影响的旅客重新分配至后续列车；刘洋等^[20]在前继列车晚点下考虑客流在可替代换乘列车间的分配。

综上可知，现有高铁运营中断下列车运行计划调整研究多围绕运行图、动车组交路开展独立优化，虽少量成果实现了二者协同调整，但普遍存在调整粒度粗放、未充分考虑动车组数量约束等问题。同时，对于不同中断场景下旅客的自主退票和改签等行为尚缺乏完整精准的刻画，导致对客流流失与客票收入损失的量化预估精度不足。鉴于此，本文提出1种考虑旅客退改签行为的列车运行计划调整方法，综合考虑始发终到动车组数量平衡与接续约束保证车底运用的连续性，引入旅客对不同停运或延误列车的接受度以量化表征旅客退改签行为，构建以最小化客票收入损失为目标的列车运行调整模型，为运营中断应急处置提供系统性解决方案。

1 问题描述

针对上述列车运行调整问题，构造场景如图1所示。假定区间B—C因突发事件造成上行方向单向中断，列车G2被迫中断运行，G4列车可能停运或延迟发车，原计划与其存在交路接续的G5和G7可能关联延误，G8及后续列车也可能由于前序列车延迟发车出现不同程度延误。由于下行方向可正常行车，有必要通过动车组接续关系调整或启用热备动车组保障受关联影响的列车正常开行。

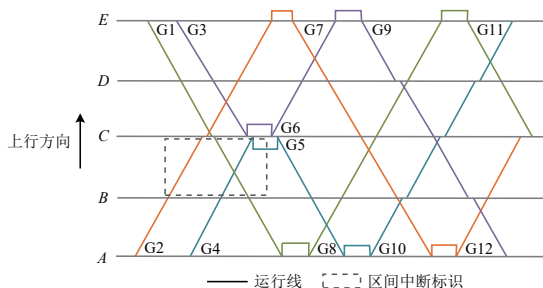


图1 上行方向区间中断场景下初始运行图

同时，中断导致的列车延误、延时发车、停运等运行调整会影响旅客行程，引发退改签行为，进而造成客流流失及客票收入损失。对旅客出行选择逻辑作出如下假设：旅客首先根据延误接受度决定是否保留原行程；若原车次停运，则在满足起讫点(OD)一致性、时间可行性及剩余席位约束的候

选车次中寻求改签，最终能否改签成功取决于改签接受度，即改签后晚到时间需处于可接受范围内，超出阈值则选择退票。因此，旅客退改签行为主要受延误接受度与改签接受度影响。已有研究^[21]表明：当高铁延误不超过30 min时，旅客倾向于按原计划乘车，而延误超过30 min后，旅客退票意愿显著上升；提高改签接受度则有助于促进改签、减少客流流失。旅客延误接受度与列车晚点时长直接相关，改签接受度则取决于改签后列车的晚到时间。可通过连接离散样本点，构建刻画2类接受度变化趋势的分段函数，如图2所示。图中：列车延误时间为 t_a 时，对应延误接受度为 p_a ；改签车次的晚到时间为 t_b 时，对应改签接受度为 p_b 。

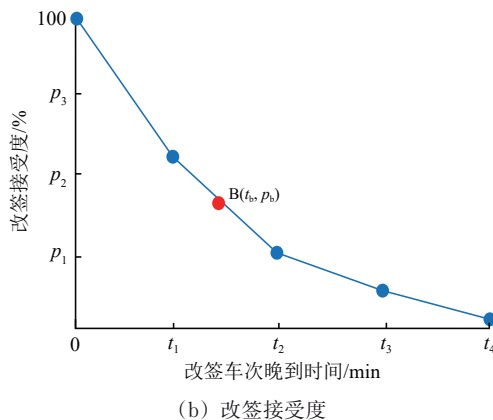
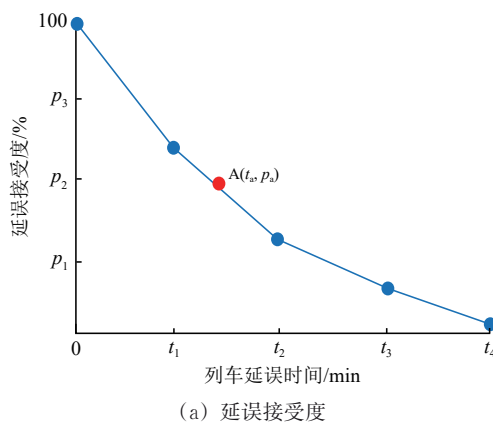


图2 旅客接受度分段函数

对于调整过程中可能采取的列车延时发车和停运策略，应先判断相应车次相关旅客对延误和改签的接受度，再校验平行替代车次的剩余载客能力，对旅客退改签及客流在相关车次的重新分配进行预估，从而保障调整方案的客运服务水平并控制客票收入损失。在单向中断场景下，为最大限度利用对向正常运行条件，保障动车组有效接续，需对运行图与动车组交路进行一体化调整，并在调整过程中

约束各具备始发、终到作业功能车站的到发车底数量,以满足后续车底的正常运用需求。

2 数学模型

2.1 模型假设与参数说明

本模型的基础假设为:①旅客在中断发生后通过铁路部门可完全知悉各车次停运及延误时长等信息;②在运行调整过程中,所有未停运列车的停站方案保持不变;③未受单向中断直接影响、已配备动车组且计划在中断结束前发车的列车,按原计划开行。

定义如下参数: R 为车次集合, $r \in R$; R^{up} 和 R^{dn} 分别为上行和下行车次集合; T 为动车组编组集合, $t \in T$; R^g 为不改变图定时刻的车次集合; $R_{t,j}^a$ 和 $R_{t,j}^z$ 分别为编组类型 t 下,以车站 j 作为始发站和终到站的车次集合; K 为时段集合, $k \in K$; X 为旅客群体集合,将乘坐同一列车且具有相同OD的旅客视为1个旅客群体, $x \in X$; S 为车次运行区间集合, $s \in S$; $X_{r,s}$ 为车次 r 在区间 s 上的旅客群体集合; J 为车站集合, $j \in J$; J_r 为车次 r 的全部途经车站集合; J_r^p 为车次 r 的所有通过车站集合; $J_{r,x}$ 为车次 r 的旅客群体停站集合; J^{az} 为具备始发、终到作业功能的车站集合; t^a 和 t^z 分别为线路中断的开始和结束时刻; $n_{t,j}^a$ 和 $n_{t,j}^z$ 分别为编组类型 t 下,以车站 j 作为始发站和终到站的车次数量; $n_{t,j}^{\text{da}}$ 和 $n_{t,j}^{\text{dz}}$ 分别为编组类型 t 下,以车站 j 作为始发站的当日和次日动车组数量; Q_x 为旅客群体 x 的人数; A_r 为担当车次 r 的动车组坐席上限; $t_{r,j}^{\text{min}}$ 为车次 r 在车站 j 的最短停靠时间; t^{max} 为车站的最长停靠时间; $t_{t,j}^{\text{up}}$ 和 $t_{t,j}^{\text{dn}}$ 分别为上行和下行车次 r 在相邻车站内的固定运行时间; N_r 为车次 r 的图定编组类型; $t_{r,j}^{\text{dt}}$ 和 $t_{r,j}^{\text{at}}$ 分别为车次 r 在车站 j 的图定发车和到达时刻; $S_{r,j}$ 为0-1参数,若车次 r 在车站 j 停站,该参数取值为1,否则取值为0; j^{pre} 为中断区间前序车站索引; j_r^a 和 j_r^z 分别为车次 r 以车站 j 作为始发站和终到站的索引; j_x^a 和 j_x^z 分别为旅客群体 x 以车站 j 作为始发站和终到站的索引; $t^{\text{pr,min}}$ 和 $t^{\text{pr,max}}$ 分别为车底到达本车次终点站后执行下一车次所需的最小整备时间和最长停留时间; t_k 为时段 k 的右时刻; I_1 和 I_2 分别为相邻车次的出发和到达间隔时间; U_x 为旅客群体 x 的客票票价; $P_{k,x}^{\text{la}}$ 为时段 k 旅客 x 的延误接受度; M_1 为充分大的正数,模型算例设定其取值为1

440; M 为1个极大值; β 为退票补偿系数。

在建模过程中引入以下变量: $Q_{r',r,x}^s$ 为车次 r 的旅客群体 x 被实际分到车次 r' 上的数量; L_x 为旅客群体 x 的延误接受度; G_x 为旅客群体 x 同意改签至后续列车的概率; t_x^{la} 为旅客群体 x 原本所乘列车的实际延误时间; $O_{r,r',s}$ 为0-1变量,若区间 s 内车次 r 运行在 r' 之前,该变量取值为1,否则取值为0; C_r 为0-1变量,若车次 r 未被取消,该变量取值为1,否则取值为0; $t_{r,j}^{\text{dr}}$ 和 $t_{r,j}^{\text{ar}}$ 分别为车次 r 在车站 j 的实际发车和到达时刻; $M_{r',r,x}$ 为0-1变量,若车次 r 的旅客群体 x 被车次 r' 担当,该变量取值为1,否则取值为0; $r_{r,r'}$ 为0-1变量,若车次 r 的动车组接续执行车次 r' ,该变量取值为1,否则取值为0。

2.2 目标函数

中断发生后产生的客票收入损失主要由2部分构成:一是旅客无法接受延误而主动退票带来的收入流失;二是车次取消后旅客改签失败造成的收入损失。 Z_1 和 Z_2 分别对应第1种和第2种情况下的客票收入损失金额。为使客票收入损失最小,设置目标函数 Z 为

$$Z = \min(Z_1 + Z_2) \quad (1)$$

其中,

$$\begin{aligned} Z_1 &= \sum_{r \in R} \sum_{x \in X} Q_x U_x C_r (1 - L_x) \\ Z_2 &= \sum_{r \in R} \sum_{x \in X} \beta Q_x U_x (1 - C_r) - \\ &\quad \sum_{r \in R, r \neq r'} \sum_{r' \in R} \sum_{x \in X} \beta U_x Q_{r',r,x}^s \end{aligned}$$

2.3 约束条件

1) 列车运行图层面相关约束

若某车次未受当前中断直接影响,本身配备动车组车底且计划在中断结束前发车,则将其设为固定车次,需要确保该类车次不被取消,且规定其时刻表保持不变。该约束为

$$C_r = 1 \quad \forall r \in R^g \quad (2)$$

$$t_{r,j}^{\text{dr}} - t_{r,j}^{\text{dt}} = 0 \quad \forall r \in R^g, j \in J_r \quad (3)$$

$$t_{r,j}^{\text{ar}} - t_{r,j}^{\text{at}} = 0 \quad \forall r \in R^g, j \in J_r \quad (4)$$

中断发生时已发出的列车若取消,将面临清客、现场旅客组织、对向正线折返等操作困难,故不予取消,其在始发车站的时刻表也需要保持不变。该约束为

$$C_r = 1 \quad \forall r \in R, t_{r,j_r^a}^{\text{dt}} \leq t^a \quad (5)$$

$$t_{r,j_r^a}^{\text{dr}} - t_{r,j_r^a}^{\text{dt}} = 0 \quad \forall r \in R, t_{r,j_r^a}^{\text{dt}} \leq t^a \quad (6)$$

$$t_{r,j_r^a}^{\text{ar}} - t_{r,j_r^a}^{\text{at}} = 0 \quad \forall r \in R, t_{r,j_r^a}^{\text{dt}} \leq t^a \quad (7)$$

中断区间前序车站具有最早发车时刻约束,中断结束前该站禁止发车。该约束为

$$t_{r,j}^{\text{dr}} - t^z \geq -M(1 - C_r) \quad \forall r \in R, t^a \leq t_{r,j}^{\text{dt}} \leq t^z \quad (8)$$

若车次在中断后被取消, C_r 取值为0, 通过含有参数 M_1 的约束, 使该车次的实际到发时刻在数学上等效于图定到发时刻延后24 h, 不再影响当日的车次运行调整; 若未取消, C_r 取值为1, 表示车次实际到发时刻均晚于图定时刻, 且其满足当日时间范围约束。该组约束表达式为

$$M_1(1 - C_r) \leq t_{r,j}^{\text{dr}} - t_{r,j}^{\text{dt}} \leq M_1 \quad \forall r \in R, j \in J_r \quad (9)$$

$$M_1(1 - C_r) \leq t_{r,j}^{\text{ar}} - t_{r,j}^{\text{at}} \leq M_1 \quad \forall r \in R, j \in J_r \quad (10)$$

$$t_{r,j}^{\text{dr}} \leq M_1 + M(1 - C_r) \quad \forall r \in R, j \in J_r \quad (11)$$

$$t_{r,j}^{\text{ar}} \leq M_1 + M(1 - C_r) \quad \forall r \in R, j \in J_r \quad (12)$$

对于通过站, 列车不应设置停站时间。其中, 若车次发车时刻早于中断开始时刻, 则除中断前序车站外, 其余通过站均需满足此约束。对应的约束表达式为

$$t_{r,j}^{\text{dr}} - t_{r,j}^{\text{ar}} = 0 \quad \forall r \in R, j \in J_r^{\text{p}} \quad (13)$$

$$t_{r,j}^{\text{dr}} - t_{r,j}^{\text{ar}} = 0 \quad \forall r \in R, j \in J_r^{\text{p}} \setminus \{j^{\text{pre}}\}, t_{r,j}^{\text{dt}} \leq t^a \quad (14)$$

上下行列车在区间的纯运行时间均固定, 禁止区间慢行, 以维持行车秩序稳定。该约束为

$$t_{r,j+1}^{\text{ar}} = t_{r,j}^{\text{dr}} + t_{r,j}^{\text{up}} \quad \forall r \in R^{\text{up}}, j \in J_r \quad (15)$$

为满足旅客乘降需求, 列车需满足最小停站时间。同时, 为避免股道占用时间过长影响整体运行效率, 除中断前序车站外, 其余车站的停站时间应受最大时长限制。该约束为

$$t_{r,j}^{\text{dr}} - t_{r,j}^{\text{ar}} \geq t_{r,j}^{\text{min}} \quad \forall r \in R, j \in J_r \quad (16)$$

$$t_{r,j}^{\text{dr}} - t_{r,j}^{\text{ar}} \leq t_{r,j}^{\text{max}} \quad \forall r \in R^{\text{dn}}, j \in J_r \quad (17)$$

$$t_{r,j}^{\text{dr}} - t_{r,j}^{\text{ar}} \leq t_{r,j}^{\text{max}} \quad \forall r \in R^{\text{up}}, j \in J_r \setminus (J_r^{\text{p}} \cup \{j^{\text{pre}}\}) \quad (18)$$

根据两上行列车在某区间的运行顺序计算其到达和出发的间隔时间, 需要保证其满足最小安全间隔要求, 并确保运行顺序唯一。该约束为

$$t_{r',j}^{\text{dr}} - t_{r,j}^{\text{dr}} + M(1 - O_{r,r',s}) \geq I_1 \quad \forall r, r' \in R^{\text{up}}, r \neq r', s \in S, j \in J_r \quad (19)$$

$$t_{r',j+1}^{\text{ar}} - t_{r,j+1}^{\text{ar}} + M(1 - O_{r,r',s}) \geq I_2 \quad \forall r, r' \in R^{\text{up}}, r \neq r', s \in S, j \in J_r \quad (20)$$

$$O_{r,r',s} + O_{r',r,s} = 1 \quad \forall r, r' \in R^{\text{up}}, r \neq r', s \in S \quad (21)$$

2) 动车组交路层面相关约束

若两车次构成动车组交路接续关系, 则二者均不得取消。该约束为

$$C_r + C_{r'} \leq 2 + M(1 - r_{r,r'}) \quad \forall r, r' \in R, r \neq r' \quad (22)$$

$$C_r + C_{r'} \geq 2 - M(1 - r_{r,r'}) \quad \forall r, r' \in R, r \neq r' \quad (23)$$

动车组指派具有唯一性, 需要限定任一车次最多只能有一列前继车次为其提供动车组, 并且该车次最多只能有一列后继车次接续使用其动车组。该约束为

$$\sum_{r' \in R} r_{r,r'} \leq 1 \quad \forall r \in R \quad (24)$$

$$\sum_{r \in R} r_{r,r'} \leq 1 \quad \forall r' \in R \quad (25)$$

若2个车次存在接续关系, 需要满足3项基础约束。其中, 空间接续约束规定存在接续关系的相邻车次, 其前一车次的终到站须与后一车次的始发站相同; 车型匹配约束规定只有车型相同的动车组担当的车次方可构成接续关系; 时间接续约束规定动车组在连续担当车次之间的整备时间需处于给定的合理区间内。该组约束表达式为

$$r_{r,r'} = 0 \quad \forall r, r' \in R, r \neq r', j_r^z - j_{r'}^a \neq 0 \quad (26)$$

$$r_{r,r'} = 0 \quad \forall r, r' \in R, r \neq r', N_r - N_{r'} \neq 0 \quad (27)$$

$$t_{r',j_r'}^{\text{ar}} - t_{r,j_r}^{\text{dr}} \leq t^{\text{pr,max}} + M(1 - r_{r,r'}) \quad \forall r, r' \in R, r \neq r' \quad (28)$$

$$t_{r',j_r'}^{\text{ar}} - t_{r,j_r}^{\text{dr}} \geq t^{\text{pr,min}} - M(1 - r_{r,r'}) \quad \forall r, r' \in R, r \neq r' \quad (29)$$

为保证动车组交路的车底数量平衡, 对各具备始发、终到作业功能车站可用于始发交路的动车组数量(包括原有车底和热备车)设置上限约束。同时, 为满足中断调整结束后下一阶段列车运行需求, 各具备始发、终到作业功能车站保有的车底数量不得低于下一阶段计划始发车次的需求下限。该约束为

$$n_{t,j}^{\text{ra}} - \sum_{r \in R_{t,j}^{\text{ra}}} (1 - C_r) - \sum_{r \in R, r \neq r' \in R_{t,j}^{\text{ra}}} r_{r,r'} \leq n_{t,j}^{\text{da}} \quad \forall j \in J^{\text{az}}, t \in T \quad (30)$$

$$n_{t,j}^{\text{rz}} - \sum_{r \in R_{t,j}^{\text{rz}}} (1 - C_r) - \sum_{r \in R, r \neq r' \in R_{t,j}^{\text{rz}}} r_{r,r'} \geq n_{t,j}^{\text{dz}} \quad \forall j \in J^{\text{az}}, t \in T \quad (31)$$

3) 客流重分配层面相关约束

对于拟取消车次, 可供旅客改签的备选车次仅能为调整后保留开行的列车。该约束为

$$C_{r'} - C_r \geq 1 - M(1 - M_{r',r,x}) \quad \forall r, r' \in R, r \neq r', x \in X \quad (32)$$

$$C_{r'} - C_r \leq 1 + M(1 - M_{r',r,x}) \quad \forall r, r' \in R, r \neq r', x \in X \quad (33)$$

为确保旅客乘降安排有序,规定每一旅客群体仅能被分配至1个实际开行的车次。该约束为

$$\sum_{r' \in R} M_{r',r,x} \leq 1 \quad \forall r \in R, r \neq r', x \in X \quad (34)$$

旅客若改签,需要满足基础约束:若某车次为停运列车旅客办理改签,则该车次须在对应旅客群体的始发站与终到站均办理停靠业务;仅当停运列车旅客抵达车站后,方可启动跨车次改签通道。该组约束表达式为

$$2 - M(1 - M_{r',r,x}) \leq S_{r',j_x} + S_{r',j_x} \leq 2 + M(1 - M_{r',r,x}) \quad \forall r, r' \in R, r \neq r', x \in X \quad (35)$$

$$t_{r',j}^{\text{ar}} - t_{r',j}^{\text{at}} \geq -M(1 - M_{r',r,x}) \quad \forall r, r' \in R, r \neq r', j \in J_{r,x} \cap J_{r',x} \quad (36)$$

延误时间与旅客接受度之间存在函数关系:当实际延误时间处于某范围时,对应唯一旅客延误接受概率。旅客改签接受度遵循同一函数逻辑。该约束为

$$t_x^{\text{la}} = t_{r,j_x}^{\text{ar}} - t_{r,j_x}^{\text{at}} \quad \forall r \in R, x \in X \quad (37)$$

$$L_x = P_{k,x}^{\text{la}} \quad \forall k \in K, x \in X, t_x^{\text{la}} \in [t_{k-1}, t_k] \quad (38)$$

旅客实际改签数量受坐席数影响,列车某运行区间可改签剩余坐席数为列车在该区间的总坐席数与因接受延误滞留于该区间的旅客人数之差。该剩余坐席既可能来源于初始空置席位,也可能来源于旅客流失释放的运力,且其总量须不小于所有被分配至该车次的改签旅客人数总和。该约束为

$$A_r - \sum_{x \in X_{r,s}} Q_x L_x \geq \sum_{r' \in R, r' \neq r} \sum_{x \in X_{r',s}} Q_{r',x}^s \quad \forall s \in S, r \in R \quad (39)$$

单一旅客群体的实际改签人数上限不得超过该群体中接受延误的旅客总数,该约束为

$$Q_{r',r,x}^s \leq Q_x M_{r',r,x} G_x \quad \forall r, r' \in R, r \neq r', x \in X \quad (40)$$

2.4 线性化

旅客的延误接受度分段函数关系如图3所示。

对任意时段 $k \in K$, 其对应时间区间为 $[t_{k-1}, t_k)$, 其中 t_{k-1} 和 t_k 分别为该时段的起始、终止时刻, 引入延误接受度参数 $a_{k,x}^{\text{la}}$ 与 $b_{k,x}^{\text{la}}$, 旅客延误时间 t_x^{la} 与旅客延误接受度 L_x 存在的分段函数关系为

$$L_x = -a_{k,x}^{\text{la}} t_x^{\text{la}} + b_{k,x}^{\text{la}}, t_x^{\text{la}} \in [t_{k-1}, t_k] \quad (41)$$

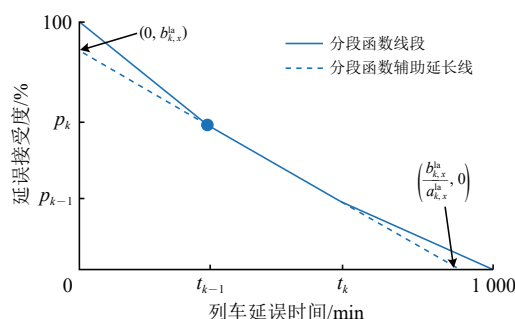


图3 旅客延误接受度分段函数示意图

因 t_x^{la} 作为约束条件时与决策变量 t_{r,j_x}^{ar} 存在耦合性,需对其进行线性化以求解。先引入中间0-1变量 $Z_{k,x}^{\text{la}}$, 若旅客群体 x 的列车延误时间处于某个时段 $[t_{k-1}, t_k)$ 内, $Z_{k,x}^{\text{la}}$ 取值为1, 否则取值为0, 变量耦合关系约束为

$$\sum_{k=1}^K Z_{k,x}^{\text{la}} t_{k-1} \leq t_x^{\text{la}} \leq \sum_{k=1}^K Z_{k,x}^{\text{la}} t_k \quad \forall x \in X \quad (42)$$

$$\sum_{k=1}^K Z_{k,x}^{\text{la}} = 1 \quad \forall x \in X \quad (43)$$

当 $Z_{k,x}^{\text{la}}$ 取值为1时, 旅客延误接受度 L_x 的取值可以线性化处理。该约束为

$$-a_{k,x}^{\text{la}} t_x^{\text{la}} + b_{k,x}^{\text{la}} - M(1 - Z_{k,x}^{\text{la}}) \leq L_x \leq -a_{k,x}^{\text{la}} t_x^{\text{la}} + b_{k,x}^{\text{la}} + M(1 - Z_{k,x}^{\text{la}}) \quad \forall x \in X, k \in K \quad (44)$$

上述约束条件线性化后,该模型转化为严格的混合整数线性规划模型,可以采用商业求解器直接求解。

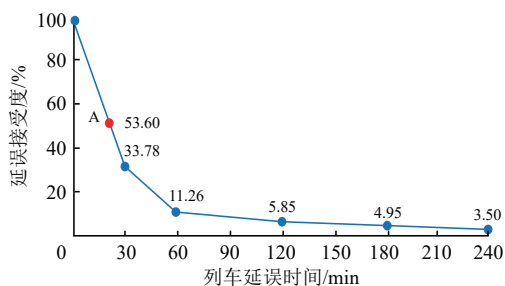
3 案例分析

3.1 案例基础数据

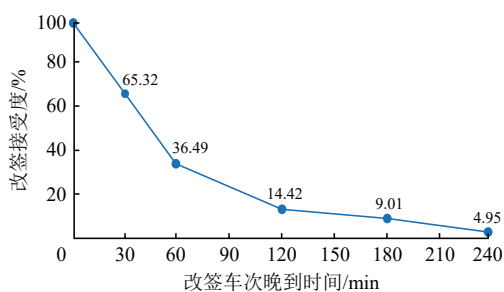
为验证模型的有效性,以沪宁城际铁路为例,根据列车实际运行数据进行案例验证。选取上海站至南京站共计17个车站、16个区间的部分本线列车对模型进行验证,其中上海站至南京站为上行方向,反之为下行方向。列车计划时刻表中共包含36列列车,其中上行列车为17列,下行列车为19列。设置中断发生时间为上午7:00—10:00,共计180 min,发生地点为苏州—苏州新区的区间上行方向线路。模型中涉及的参数取值如下:大编组动车组容量为1220人·列⁻¹;小编组动车组容量为610人·列⁻¹;车底接续的最大停留时间为60 min;车底接续的最小整备时间为15 min;大型始发终到车站热备车数量为3列;小型始发终到车站热备车

数量为1列；相邻列车出发和到达间隔时间为3 min；退票补偿系数为1； M_1 为1 440； M 为100 000。

为获取旅客对延误与改签的接受度，采用基于情境的陈述偏好（Stated Preference, SP）调查方法，通过线上问卷调查方式采集数据。调查共回收问卷222份，均为有效问卷。统计结果显示旅客延误接受度与出行时间、列车延误时间之间存在关系，旅客改签接受度与到达时间和列车延误时间相关。研究首先依据旅客特征进行分类：延误接受度按旅行时长分为4类（1 h以内、1~3 h、3~5 h、5 h以上）；改签接受度按计划到达时段分为4类（10:00前、10:00—14:00、14:00—18:00、18:00后）。针对不同类型旅客群体绘制延误/改签接受概率散点图，每个点的取值均来源于SP调查结果，连接相邻散点构建分段函数图像。旅客延误与改签接受度量化曲线如图4所示。以旅客延误接受度为例，图中A点的坐标为（21，53.6），表示当列车延误时间为21 min时，该群体中有53.60%的旅客



(a) 出行时间1 h内旅客延误接受度



(b) 上午10:00前到达旅客改签接受度

图4 旅客延误与改签接受度量化曲线

倾向于继续等待并乘坐原计划列车，其余旅客则选择退票。

3.2 案例结果

3.2.1 单场景调整结果

文中所有案例均在配置为Intel(R)Core(TM) i5-10210U CPU（基频1.60 GHz，最大睿频2.11 GHz）的计算机上采用优化求解器Gurobi 12.0求解，求解器参数为默认设置。将上述原始数据及模型相关参数输入求解器，所得运行结果见表1。由表1可知，该模型可在110.12 s得到最优解。

表1 运行结果

	Z /元	Z_1 /元	Z_2 /元	求解时间/s
中断调整模型	270 497	231 605	38 892	110.12

调整后的运行图如图5所示，图中虚线表示原计划运行图中被取消及改变运行时间的车次运行

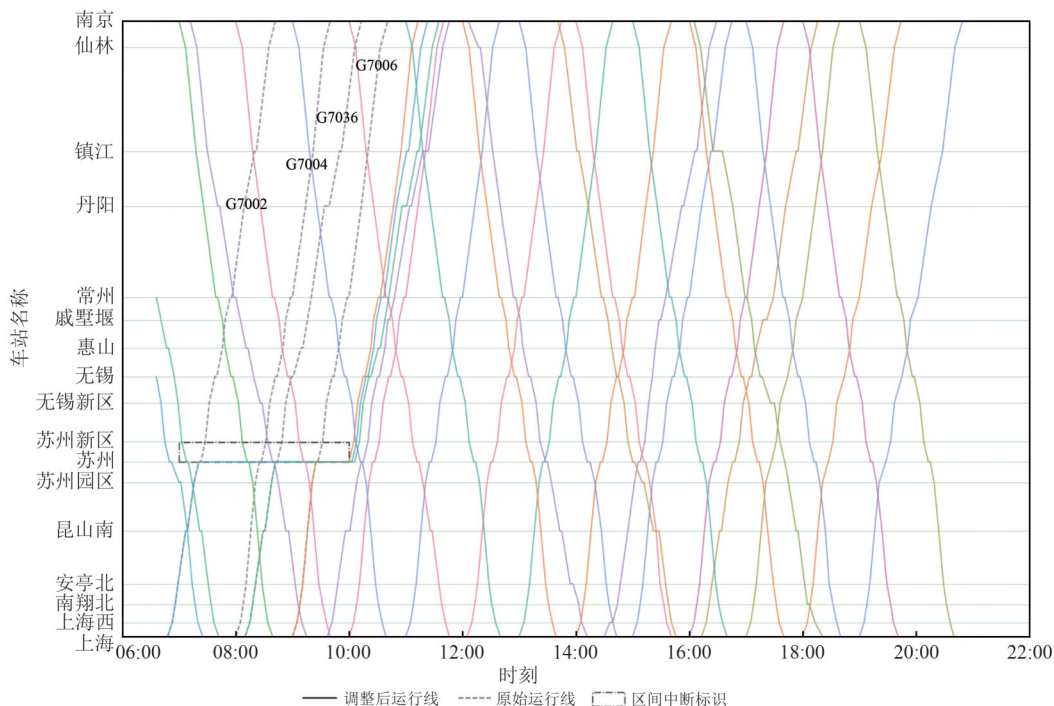


图5 调整后列车运行图

线。由图 5 可知，列车运行调整结果为车次 G7006 停运，车次 G7002，G7004 和 G7036 调整运行时刻，由于停站方案相同，G7004 在上海—苏州的运行时刻与 G7006 保持一致，为旅客提供了最大限度的改签接续条件。

整体交路接续关系发生改变，其变化情况如图

6 所示。由图 6 可知，以原交路 G7002—G7005—G7010—G7013—G7018—G7021—G7026 为例，调整后 G7005—G7010—G7013—G7018—G7021 保留，G7026 车次单独运行，G7002 车次则与其他车次形成新的交路接续关系。



图 6 交路接续关系变化

具备始发、终到作业功能车站的车底数量对比情况见表 2。由表 2 可知，调整后始发车底数量未

表 2 具备始发、终到作业功能车站的车底数量对比

	始发车底				终到车底			
	小编组		大编组		小编组		大编组	
	原始	调整后	原始	调整后	原始	调整后	原始	调整后
上海站	0	0	4	3	1	1	2	5
无锡站	0	0	2	1	0	0	0	0
常州站	1	1	1	0	0	0	0	0
南京站	3	3	5	5	3	3	2	4

超出原计划数量，终到车底数量未低于原计划数量，满足车底数量约束要求。其中，上海站启用 2 组热备车，南京站启用 3 组热备车。

由于 G7006 取消，依据退改签行为和剩余坐席，生成的改签方案见表 3。由表 3 可知，G7006 停运共形成 11 组旅客 OD 改签方案，受影响旅客总计 1 366 人，成功改签 969 人，累计挽回客票收入损失 80 224 元。

综上所述，该模型能够在较短时间内得到中断后的调整方案，并将调整影响范围控制在 4 列列

表 3 G7006 停运改签方案

旅客 OD 编号	改签后车次	旅客 OD	原旅客总数/人	改签人数/人	挽回客票收入损失/元
1	G7002	无锡—常州	27	16	288
2		苏州—无锡	18	11	231
3		无锡—南京	156	100	8 600
4		常州—南京	170	109	6 867
6		苏州—南京	276	177	18 585
7	G7004	苏州—常州	13	8	328
8		上海—无锡	79	49	3 038
9		上海—南京	291	187	27 863
10		上海—常州	60	37	3 108
11		上海—苏州	276	276	11 316
总计			1 366	969	80 224

车，其中仅停运 1 列列车。同时，交路接续关系调整后，实际方案满足当日始发和终到车站车底数量限制，在中断突发场景下具有较强的工程实践性。此外，模型生成的改签方案可挽回较多旅客，相应挽回的客票收入损失也较为可观。

3.2.2 不同中断场景调整结果

运营中断条件下的运行调整难度可能受到中断发生地点、发生时刻和持续时间等因素的影响。结合沪宁城际铁路的基本情况，选取运营中断的发生地点、发生时刻和持续时间 3 个变量设计多组场

景，各场景对应参数设置如下：场景 1 为苏州—苏州新区，7:00，60 min；场景 2 为苏州—苏州新区，12:00，60 min；场景 3 为苏州—苏州新区，7:00，240 min；场景 4 为苏州—苏州新区，12:00，240 min；场景 5 为戚墅堰—常州，7:00，60 min；场景 6 为戚墅堰—常州，12:00，60 min；场景 7 为戚墅堰—常州，7:00，240 min；场景 8 为戚墅堰—常州，12:00，240 min。求解结果见表 4。表中， Z_3 为不考虑改签时由于车次取消导致的直接客票损失。

表 4 不同中断场景下模型求解结果

场景编号	变量数	约束数	Z /元	总延误时间/min	Z_1 /元	停运车次/列	Z_3 /元	Z_2 /元	改签人数/人	求解时间/s
场景 1	15 996	35 385	68 555	70	68 555	0	0	0	0	67.54
场景 2	7 110	17 084	36 222	31	36 222	0	0	0	0	27.78
场景 3	14 275	33 112	478 258	587	349 513	2	221 176	128 745	1 289	259.18
场景 4	7 111	16 872	384 319	460	261 855	2	230 406	122 464	1 535	183.34
场景 5	15 871	34 934	16 149	13	16 149	0	0	0	0	58.05
场景 6	6 771	16 340	3 497	4	3 497	0	0	0	0	17.05
场景 7	15 268	34 339	376 046	891	203 463	2	232 093	172 583	959	229.98
场景 8	6 737	16 089	292 704	257	138 478	2	203 554	154 226	622	56.24

由表 4 可知，不同运营中断场景对调整结果影响不同。场景 3 目标函数值最大，表明繁忙区段、较早发生且持续时间较长的中断需要更多停运和延误措施，从而造成更大的客票收入损失。相比之下，持续 60 min 的中断场景均未出现列车停运，说明模型倾向于通过延误调整恢复运输秩序，以降低停运带来的连锁影响。

场景 4 和场景 7 虽停运列车数量相同，但考虑旅客改签后，其客票收入损失和改签成功人数存在

明显差异，表明模型能够反映旅客退改签行为对调整方案的影响。在求解效率方面，所有场景均可在 259.18 s 内获得最优解，能够支持调整方案的及时反馈。

3.2.3 不同调整方法对比

当中断发生时，传统调整方法一般倾向于“尽快恢复按图行车”，主要调整策略包括延迟发车与启用热备车。传统方法与所提方法的调整结果见表 5。

表 5 调整方法结果对比

	总延误时间/min	延误车次/列	Z_1 /元	Z_2 /元	Z /元	总目标降幅/%
传统方法	503	4	352 035	0	352 035	0
本文方法	338	3	231 605	38 892	270 497	23.2

由表 5 可知：传统方法虽不产生停运损失，但需通过更多列车延误维持运输组织；与传统方法相比，所提调整方法生成的调整方案列车总延误时间缩短 165 min，客票收入损失减少 23.2%。表明所提方法在减少延误和控制损失方面更具优势。

除上述量化指标对比外，从方案可行性层面进一步分析两阶段法存在的短板：固定运行图后难以形成可行的动车组交路接续方案；若满足交路需求，则需在南京站和上海站各增配 1 列长编组热备

车，成本高且可操作性较差。与之相比，本文运行图与动车组交路一体化调整方法能够直接生成可行方案，具有更好的应急响应能力和调整效率。

3.3 参数敏感性分析

3.3.1 接受度时段划分粒度

在既有模型框架下，设置 30，60 和 120 min 这 3 种旅客接受度划分粒度，对比模型求解结果见表 6。由表 6 可知：模型在不同粒度下均能实现收益与服务水平间的综合权衡，整体优化趋势及关键指

表6 各时间划分粒度下求解结果

编号	粒度/min	取消车次	Z/元	总延误时间/min	Z ₁ /元	总改签人数/人	Z ₂ /元	求解时间/s
1	30	G7006	270 497	338	231 605	969	38 892	110.12
2	60	G7004	260 123	277	179 942	476	80 181	89.18
3	120	G7004	215 351	301	144 944	593	70 407	75.90
4	60	G7006	267 968	338	231 357	993	36 611	102.07
5	120	G7006	221 434	361	196 704	1 113	24 730	50.78

标变化具有良好一致性,体现出较强的稳健性。从机理层面分析,30 min粒度划分方式更为精细,能够较为准确地反映旅客行为特征;综合权衡模型刻画精度与计算效率,选取30 min作为旅客接受度划分粒度。

3.3.2 退票补偿系数

退票补偿系数 β 设置不同取值,模型计算结果见表7。由表7可知,模型的总目标值随退票补偿系数的增加而上升,在既定中断条件下,调整方案保持稳定,而客票收入损失增加,能够有效反映经济成本变化。

表7 不同补偿参数下运行结果对比

β	Z/元	延误时间/min	Z ₁ /元	改签人数/人	Z ₂ /元	求解时间/s
1.00	270 497	338	231 605	969	38 892	110.12
1.10	274 386	338	231 605	970	42 781	101.60
1.15	276 331	338	231 605	970	44 726	98.89
1.20	278 275	338	231 605	970	46 670	72.87

4 结 语

本文面向高速铁路单向突发运营中断场景,提出列车运行图与动车组交路一体化调整方法,实现运行调整与车底运用的协同优化,并同步生成旅客改签方案。通过量化旅客因延误、停运等产生的差异化退改签行为,所提方法支持列车运行计划调整结果更贴近实际客流反馈,有助于在突发运营中断中控制客票收入损失,为从服务补救角度调整方案提供决策支持。

将所提方法应用于实际案例进行验证。与传统“尽快恢复按图行车”方法相比,采用所提方法生成的调整方案列车总延误时间缩短165 min,客票收入损失减少23.2%。方案可行性优于分阶段调整方法,在保证求解效率的同时实现更优的综合调度效果。该方法能够在复杂中断场景下快速生成高质量调整方案,有效控制客票收入损失,提升列车运行调整方案的编制效率与适用性。

参 考 文 献

- [1] Zhan Shuguang, Wong S C, Peng Qiyuan, et al. Train stop deployment planning in the case of complete blockage: an integer linear programming model[J]. Journal of Transportation Safety & Security, 2021, 13(10): 1066-1092.
- [2] 邓念,彭其渊,占曙光.干扰条件下高速铁路列车运行实时调整问题研究[J].交通运输系统工程与信息,2017,17(4): 118-123.
Deng Nian, Peng Qiyuan, Zhan Shuguang. Real-time train rescheduling on high-speed railway under disruption condition [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2017, 17(4): 118-123.
- [3] Zhu Yongqiu, Goverde R M P. Integrated timetable rescheduling and passenger reassignment during railway disruptions [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2020, 140: 282-314.
- [4] Yang Wanlu, Liu Linyu, Yuan Haofeng, et al. Unified scheduling model for high-speed train timetable optimization and rescheduling based on deep reinforcement learning[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2025, 26(6), 8178-8193.
- [5] 庄河,何世伟,戴杨铖.高速铁路列车运行调整的模型及其策略优化方法[J].中国铁道科学,2017,38(2):118-126.
Zhuang He, He Shiwei, Dai Yangcheng. Train operation adjustment model and strategy optimization method for high speed railway[J]. China Railway Science, 2017, 38(2): 118-126.
- [6] 闫璐,张琦,丁舒忻,等.基于双目标优化的高速铁路列车运行调整[J].中国铁道科学,2022,43(2):161-171.
Yan Lu, Zhang Qi, Ding Shuxin, et al. High speed railway train operation adjustment based on bi-objective optimization

- [J]. China Railway Science, 2022, 43(2): 161-171.
- [7] 李晓娟, 韩宝明, 李得伟, 等. 基于转换极大代数和序优化的高速列车运行调整方法[J]. 中国铁道科学, 2013, 34(6): 124-130.
- Li Xiaojuan, Han Baoming, Li Dewei, et al. Method for high speed train operation adjustment based on switching max plus-linear system and ordinal optimization[J]. China Railway Science, 2013, 34(6): 124-130.
- [8] Zhang Chuntian, Gao Yuan, Cacchiani V, et al. Train rescheduling for large-scale disruptions in a large-scale railway network[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2023, 174: 102786.
- [9] 李登辉, 彭其渊, 赵军, 等. 区间中断下给定调整图的高速铁路动车组运用调整优化[J]. 铁道学报, 2023, 45(10): 21-33.
- Li Denghui, Peng Qiyuan, Zhao Jun, et al. Rolling stock rescheduling in high-speed railway with given rescheduled timetable under segment blockage[J]. Journal of the China Railway Society, 2023, 45(10): 21-33.
- [10] 王泽宇. 动车运用与列车运行计划调整一体化协同优化方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2022.
- Wang Zeyu. Research on integrated rescheduling method about high-speed railway train operation plan and train-set circulation plan[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2022.
- [11] 赵文强, 周磊山, 白紫熙, 等. 中断条件下高铁列车运行调整优化模型与算法研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2025, 22(3): 979-990.
- Zhao Wenqiang, Zhou Leishan, Bai Zixi, et al. Optimization model and algorithm for high-speed railway train operation adjustment under disruptions conditions[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2025, 22(3): 979-990.
- [12] 周敏, 顾灏璇, 董海荣, 等. 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[J]. 自动化学报, 2024, 50(8): 1577-1588.
- Zhou Min, Gu Haoxuan, Dong Hairong, et al. Multi-plan collaborative rescheduling of high-speed train operation considering the utilization of rolling stock and arrival and departure tracks[J]. Acta Automatica Sinica, 2024, 50(8): 1577-1588.
- [13] 洪鑫. 高速铁路列车运行调整一体化优化方法[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
- Hong Xin. Integrated optimization of high-speed railway train rescheduling[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.
- [14] Xiu Cong, Pan Jinyi, D'ariano A, et al. Passenger service-oriented timetable rescheduling for large-scale disruptions in a railway network: a heuristic-based alternating direction method of multipliers[J]. Omega, 2024, 125: 103040.
- [15] Zhu Yongqiu, Goverde R M P. Railway timetable rescheduling with flexible stopping and flexible short-turning during disruptions[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2019, 123: 149-181.
- [16] Zhang Pu, Zhao Peng, Qiao Ke, et al. A multistage decision optimization approach for train timetable rescheduling under uncertain disruptions in a high-speed railway network[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2023, 24(6): 6307-6321.
- [17] Binder S, Maknoon Y, Bierlaire M. The multi-objective railway timetable rescheduling problem[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2017, 78: 78-94.
- [18] Zhan Shuguang, Wong S C, Shang Pan, et al. Integrated railway timetable rescheduling and dynamic passenger routing during a complete blockage[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2021, 143: 86-123.
- [19] Hong Xin, Meng Lingyun, D'ariano A, et al. Integrated optimization of capacitated train rescheduling and passenger reassignment under disruptions[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2021, 125: 103025.
- [20] 刘洋, 王志美. 前继列车晚点条件下换乘客流的接续方案优化[J]. 北京交通大学学报, 2024, 48(1): 147-158.
- Liu Yang, Wang Zhimei. Optimization of transfer passenger flow connection schemes under conditions of previous train delays[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2024, 48(1): 147-158.
- [21] 雷爱国, 胡启洲, 吴啸宇, 等. 不完全信息下高铁晚点与乘客选择行为博弈模型[J]. 吉林大学学报(工学版), 2024, 54(12): 3496-3504.
- Lei Aiguo, Hu Qizhou, Wu Xiaoyu, et al. Game model of high-speed railway delay and passenger choice behavior under incomplete information[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2024, 54(12): 3496-3504.

Rescheduling method for high-speed railway train operation plans considering passenger refund and rebooking behavior

Zhang Qi¹, Wang Xulan¹, Bao Xinyu¹, Li Hua²

(1. School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. Passenger Transport Department, China Railway Shanghai Group Co., Ltd., Shanghai 200071, China)

Abstract: Regarding the unidirectional sudden operational disruptions in high-speed railway, a train operation rescheduling method that considers passenger ticket refund and rebooking behavior is proposed. First, based on the modeling idea of an integrated adjustment for train timetables and electric multiple unit (EMU) connection plans, the passenger acceptance of train cancellations and delays is taken to quantify passenger refund and rebooking behavior, thus enabling passenger flow reassignment under disruptions. Subsequently, with the goal of minimizing ticket revenue loss, a mixed-integer linear programming model is constructed to ensure the continuity of rolling stock utilization through the incorporation of EMU inventory balance and connection constraints. The model jointly determines coordinated rescheduling schemes such as train departure delays, service cancellations, circulation reconfiguration, and deployment of standby EMUs, and formulates corresponding rebooking strategies based on passenger acceptance to provide systemic solutions for emergency response of operational disruption. Finally, the proposed model is solved using the commercial optimization solver Gurobi, and case studies based on the Shanghai-Nanjing Intercity Railway are conducted. The results demonstrate that the proposed method can generate high-quality rescheduling plans under various operational disruptions. Compared with the conventional strategy aimed at “rapid timetable recovery”, the adoption of rescheduling plan generated by the proposed method can reduce the total train delay by 165 min and ticket revenue loss by 23.2%. Moreover, the overall scheme exhibits better completeness and practical applicability, verifying the feasibility and effectiveness of the method.

Key words: High-speed railway; Integrated train rescheduling; Train timetable; EMU circulation plan; Passenger ticket refund and rebooking behavior

(责任编辑 杨婧婕)