doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2025.06.006

考虑乘客服务水平的跨线区域虚拟编组列车调控一体化方法

吴学良[1]，刘君卿[2,3]，傅　泽[2,3]，吕继东[2,3]

（1. 北京地铁运营有限公司，北京 100101；2. 北京交通大学先进轨道交通自主运行全国重点实验室，北京 100044；3. 北京交通大学自动化与智能学院，北京 100044）

摘　要：随着城市轨道交通网络的不断扩展，跨线运行区域逐渐演变为制约运力提升的重要瓶颈。为缓解高峰期乘客滞留现象，提出一种服务导向的虚拟编组列车调控一体化方法。首先构建基于牵引制动特性与状态转化规则的列车动力学模型，并引入乘客优先等级提出乘客导向的纳什均衡博弈框架，实现列车运行策略的协调优化。然后设计兼顾乘客旅行时间与站台滞留人数两个核心指标的目标优化函数，最后以重庆轨道交通 4 号线-环线-5 号线交汇区为研究对象，构建 8 组典型运行场景，对虚拟编组策略、移动闭塞策略、“先到先服务”(First Come First Serve，FCFS)策略进行了仿真验证，并分析客流量变化对优化效果的影响。研究结果表明：在高峰运行条件下，相较于传统的 FCFS 策略与基于移动闭塞的博弈方法，本文方法可分别减少约 3%的乘客出行时间成本及约 30%后续站台乘客的等待时间成本，显著提升跨线运行区段的运输效率和乘客满意度；在不同客流条件下，本文方法均能有效减少站台滞留人数，且在高峰时段的改善幅度约为 30%，优势更为显著。研究成果可以为城市轨道交通从“运能导向”向“乘客导向”的转型提供方法支撑。

关键词：轨道交通；虚拟编组；博弈论；跨线运行区域；调控一体化；纳什均衡博弈

中图分类号：U231　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1672-6073(2025)06-0040-08

Integrated Scheduling and Control of Virtual Coupling Trains in Junction Areas with Consideration of Passenger Service Quality

WU Xueliang[1], LIU Junqing[2,3], FU Ze[2,3], LYU Jidong[2,3]

(1. Beijing Mass Transit Railway Operation Co., Ltd., Beijing 100101; 2. State Key Laboratory of Advanced Rail Autonomous Operation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044; 3. School of Automation and Intelligence, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044)

Abstract: As urban rail transit networks continue to expand, junction areas in cross-line operations have increasingly become critical bottlenecks limiting capacity improvement. To alleviate passenger congestion during peak hours, this paper proposes a virtually coupled train coordination and scheduling method that incorporates passenger service level considerations. A train dynamics model is first established based on traction-braking characteristics and state transition rules. Then, a passenger- oriented Nash equilibrium game framework is constructed by introducing passenger priority levels to achieve coordinated optimization of train operation strategies. Furthermore, a bi-objective optimization function is formulated to balance two key indicators: passenger travel time and platform crowding. Finally, taking the junction area of Chongqing Rail Transit Lines 4, Loop Line, and Line 5 as

收稿日期：2025-03-24　修回日期：2025-07-07

第一作者：吴学良，男，本科，工程师，从事城轨调度指挥工作，wuhao050802@sina.com

通信作者：吕继东，男，博士，教授，主要从事交通智能控制与优化研究，jdlv@bjtu.edu.cn

基金项目：中央高校基本科研业务费项目(2022JBQY001)；先进轨道交通自主运行全国重点实验室自主课题(RAO2023ZZ001)

引用格式：吴学良，刘君卿，傅泽，等. 考虑乘客服务水平的跨线区域虚拟编组列车调控一体化方法[J]. 都市快轨交通，2025，38(6)：40–47.

WU Xueliang, LIU Junqing, FU Ze, et al. Integrated scheduling and control of virtual coupling trains in junction areas with consideration of passenger service quality[J]. Urban rapid rail transit, 2025, 38(6): 40–47.

the research object, eight typical operation scenarios are constructed to conduct simulation verification of the virtual coupling strategy, moving block strategy, and First Come First Serve (FCFS) strategy, and the impact of passenger flow changes on optimization effectiveness is analyzed. Simulation results demonstrate that, under peak operating conditions, the proposed method reduces passenger travel time cost by approximately 3% and platform congestion by around 30% compared to the traditional First Come First Serve (FCFS) strategy and the moving block-based game approach, significantly enhancing transportation efficiency and passenger satisfaction in cross-line operation zones.

Keywords: rail transit; virtual coupling; game theory; junction; integrated scheduling and control; NASH equilibrium game

城市轨道交通凭借其节约土地、运载能力强、快速准时、环保等特点，已成为缓解我国城市交通拥堵问题的重要解决方案。截至 2024 年末，在全国已开通城市轨道交通的城市中，运营线路超过 4 条且设有 3 座及以上换乘站的城市达到 28 个，占比高达 48.28%[1]。随着我国城市轨道交通网络规模的持续扩大，既有物理连挂运行方式在跨线区段通过能力不足问题日益凸显，已成为制约城轨系统运力提升的瓶颈[2-3]。列车通过道岔区段需等待前车通过并完成道岔转换，易造成拥堵。虚拟编组技术可将两列同向列车视为一组协同控制，能有效提升跨线区域通过能力与乘客服务水平。因此，开展虚拟编组下列车通行序列与运行速度的协同优化研究，对于提升轨道交通运营效率具有显著的实际应用价值。

目前国内外针对虚拟编组的相关研究主要集中在列车间的控制与通信的实现方面[4-5]。QUAGLIETTA 等[6]提出了一种多状态列车跟随模型，旨在通过虚拟编组来提升关键基础设施瓶颈区域的通行能力。余江枫[7]提出了一种基于模型预测控制(model predictive control，MPC)的虚拟编组列车集中式控制方法实现了对虚拟编组列车组的稳定控制。DUAN 等[8]提出了一种基于移动闭塞和车车通信的虚拟编组列车运行控制方法，突破了车地通信延迟瓶颈。陈凯[9]提出了一种基于车车通信和车辆-信号系统融合的虚拟重联方案，从而实现虚拟重联列车的闭环同步控制。跨线运行区域是运力提升瓶颈和冲突高发区，列车在此区域的通过次序与运行优化已成为国内外关注的重点。WANG 等[10]提出了一种基于合作博弈和改进粒子群优化算法的方法，用于解决虚拟编组列车在咽喉区处的快速耦合问题。张琳[11]围绕铁路咽喉区进路与到发线分配问题构建了优化问题并设计了多种改进算法进行求解。乔木等[12]针对市域铁路出入线接轨站咽喉区作业复杂、交叉多的问题，提出了一套适用于该类型车站的咽喉通过能力计算方法并在实例中验证了其有效性。

然而现有虚拟编组研究较少关注跨线区域的通行效率，且通常在道岔后编组未能发挥列车协同通过的优势。同时运行图优化多从宏观层面调整列车次序与进路，缺乏对道岔处微观控制策略的研究。因此，亟须在道岔前优化编组位置与时机，以编组形式同步通过道岔，提升咽喉通行效率。

综上，本文在虚拟编组条件下展开对跨线区域列车调度的建模与优化研究。通过引入乘客优先等级及其候车时间等因素，构建纳什均衡博弈框架，实现跨线运行条件下列车调度策略的协调优化，进而有效降低乘客出行成本，缓解后续车站的客流滞留压力。

1 问题描述及模型构建

1.1 问题描述

本文旨在探讨在跨线运行区域不同通行次序与编组策略对乘客在站台等待时间的影响。因此，研究聚焦于跨线运行的关键区域，其结构如图 1 所示，涵盖交汇道岔以及道岔之后的首个车站。方向 A 上有列车 T_1 和 T_2 以移动闭塞方式追踪运行，方向 B 上有一列车 T_3。图 1 中：v_1、v_2、v_3 分别表示列车 T_1、T_2、T_3 在无岔区段的速度；D_A、D_B 分别表示 A、B 方向的道岔区段长度；v_{switch} 表示道岔区段的限速；S_{T_1} 、S_{T_3} 分别表示列车 T_1、T_2 与道岔区段起始点的距离。

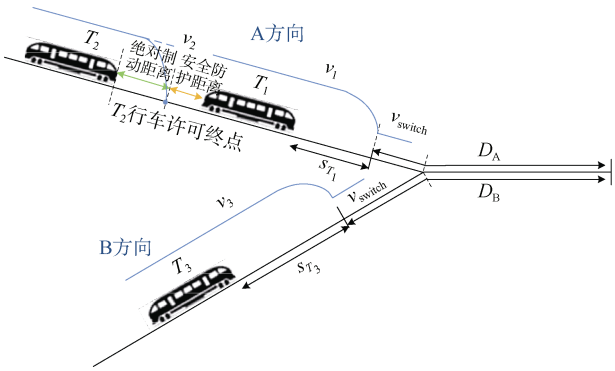


图 1　跨线运行区域结构

Figure 1　The structure of the junction area

1.2 模型构建

本文通过分析列车受力和安全约束，建立列车跨线运行的数学模型，重点对虚拟编组过程中的速度控制策略进行三阶段建模与分析。

为建立清晰的数学模型，现提出以下基本假设：将列车简化为质点模型，忽略其实际长度对运行的影响；设在固定发车间隔时段内候车乘客数量符合均匀分布特征；所有乘客均严格执行下车优先乘降流程。

1.2.1 跨线区域列车动力学模型

本文以距离为自变量将线路划分为 k 段固定长度为 Δs 的区段。在每个区段的起始位置，列车根据控制策略确定该区段的加速度，并以匀加速运动运行通过该区段。运动学模型的约束条件主要包括以下方面。

1) 列车基础动力学模型。根据牛顿运动学原理，可建立列车运行过程中时空变换关系的动力学模型为

$$s_i(k)=k\times\Delta s \tag{1}$$

$$a_i(k)=\frac{F_i(k)-R_i(k)}{m_i} \tag{2}$$

$$v_i(k+1)=\sqrt{2a_i(k+1)\times\Delta s+[v_i(k)]^2} \tag{3}$$

$$t_i(k+1)=t_i(k)+\frac{\Delta s}{\overline{v}_i(k)} \tag{4}$$

式中，$s_i(k)$表示列车 i 在第 k 段的位置；$a_i(k)$表示列车 i 在第 k 段的加速度；$F_i(k)$表示列车 i 在第 k 段的牵引力或制动力；$R_i(k)$表示列车 i 在第 k 段的合成阻力；m_i表示列车 i 的质量；$t_i(k)$表示列车 i 在第 k 段运行的时间；$v_i(k)$表示列车 i 在第 k 段的速度；$\overline{v}_i(k)$表示列车 i 在第 k 段的平均速度。

2) 加速度约束。列车运行过程中的加速度受到牵引/制动系统性能及线路条件的约束，加速度 $a_i(k)$取值范围需满足的约束条件为

$$a_i(k)\in[a_{\mathrm{de}},a_{\mathrm{acc}}] \tag{5}$$

式中，a_{de}为最大制动加速度；a_{acc}为最大牵引加速度。

3) 速度约束。列车在区段的速度 $v_i(k)$需满足的约束条件为

$$v_i(k)\in[0,v_{\max}],k\in S_{\mathrm{l,p}}/S_{\mathrm{p,f}} \tag{6}$$

式中，$v_{\max}$为区段最大速度；$S_{\mathrm{l,p}}$为前一站到跨线运行区域道岔起始处的无岔区段线路；$S_{\mathrm{p,f}}$为跨线运行区域道岔结束处到后一站的无岔区段线路。

列车在道岔区段的速度 $v_i(k)$需满足的动态约束条件为

$$v_i(k)\in[0,v_{\mathrm{switch}}],k\in S_{\mathrm{p}} \tag{7}$$

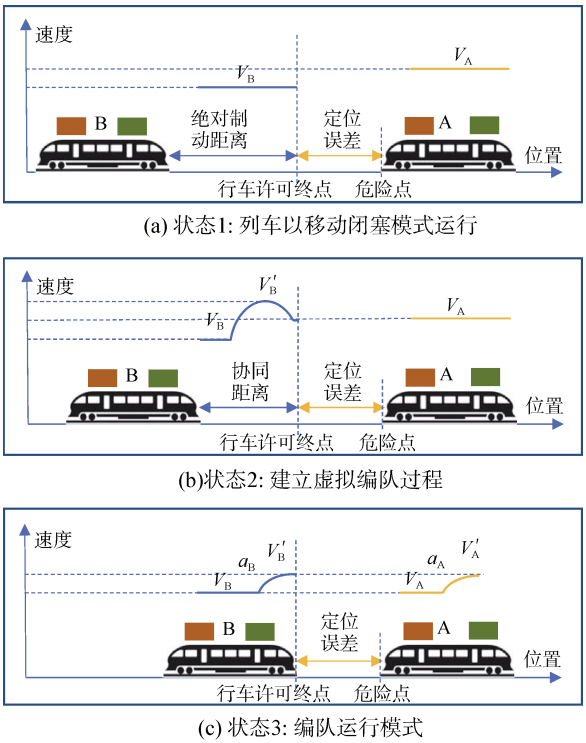
式中，v_{switch}为道岔区段限速；S_{p}为跨线运行区域道岔线路。

4) 安全防护约束。在列车的行驶过程中，安全间隔的设定需要同时考虑防护距离 X_{safe}与绝对制动的安全距离 X_{braking}。而在虚拟编组条件下，系统仅需保持安全防护距离 X_{safe}。在此 $\delta_{T_1,T_2}(k)$代表在第 k 段 T_1与 T_2的编组情况，若两列车处于编组状态则为 1，否则为 0。两车间的安全防护约束如下：

$$s_{i+1}(k)\geqslant s_i(k)+X_{\mathrm{safe}}+X_{\mathrm{braking}}\times\left(1-\delta_{T_1,T_2}(k)\right) \tag{8}$$

1.2.2 虚拟编组列车动力学模型

图 2 展示了虚拟编组过程的动态演化。在初始阶段，列车按照移动闭塞模式行驶，此时后车的行车许可根据前车末端位置与防护间距之和计算得出。当需要编组时，后车首先加速以达到超越前车的巡航速度，继而保持恒速运行以缩短车间距离。当接近前车时，后车实施减速控制以实现速度同步，最终将两车间距稳定在安全防护距离范围内，完成向虚拟编组运行模式的过渡。图 2 中：a_{A}、a_{B}表示列车的加速度；V_{A}、V_{B}表示列车的初始速度；V'_{A}、V'_{B}表示列车加速后的速度。



(a) 状态1: 列车以移动闭塞模式运行

(b)状态2: 建立虚拟编队过程

(c) 状态3: 编队运行模式

图 2 列车编组过程

Figure 2 The Process of virtual coupling

虚拟编组过程可分为 3 个连续阶段(其中 t_{coupling}表示整个编组过程的时间)。①加速阶段 t^1_{coupling}：后车 T_2加速至无岔区段限速 $v_{\max}$的时间；②巡航阶段 t^2_{coupling}：T_2保持 $v_{\max}$匀速追赶前车的时间；③减速阶段 t^3_{coupling}：T_2减速至与前车 T_1同步的时间。t_{coupling}的表达式为

$$t_{\text{coupling}} = t^1_{\text{coupling}} + t^2_{\text{coupling}} + t^3_{\text{coupling}} \tag{9}$$

t^1_{coupling} 和 t^3_{coupling} 可以由起止速度和加速度计算，即

$$t^1_{\text{coupling}} = \frac{v_{\max} - v_2}{a_{\text{acc}}} \tag{10}$$

$$t^3_{\text{coupling}} = \frac{v_1 - v_{\max}}{a_{\text{de}}} \tag{11}$$

t^2_{coupling} 则由编组过程中走行距离 X_{coupling} 和列车编组的时间联立方程得到，即

$$t^2_{\text{coupling}} = \frac{X_{\text{coupling}} - X_{\text{braking}}}{v_1} - t^1_{\text{coupling}} - t^3_{\text{coupling}} \tag{12}$$

$$X_{\text{coupling}} = t^2_{\text{coupling}} v_{\max} + \frac{v^2_{\max} - v^2_2}{2a_{\text{acc}}} + \frac{v^2_1 - v^2_{\max}}{2a_{\text{de}}} \tag{13}$$

$$t^2_{\text{coupling}} = \frac{v_1\left(t^1_{\text{coupling}} + t^3_{\text{coupling}}\right) - \frac{v^2_{\max} - v^2_2}{2a_{\max}} - \frac{v^2_1 - v^2_{\max}}{2a_{\text{de}}} + X_{\text{braking}}}{v_{\max} - v_1} \tag{14}$$

2 算法设计

在跨线运行区域列车调度中，不同列车因资源有限存在潜在竞争，需兼顾运行计划与乘客服务。模型应综合考虑停站时间、运行速度及乘客分布，动态优化发车间隔与运行时序，提升列车网络整体运行效率与乘客满意度。因此，该问题不仅关涉资源配置与调度策略优化，更体现了服务导向下的系统协同控制需求。

2.1 列车博弈策略

为便于模型理解与应用，表 1 系统归纳了本文使用的关键参数及其定义说明。

表 1 本文的符号与参数

Table 1 The variable and parameter used in this paper

符号	描述
$\boldsymbol{I}$	列车集合
i	列车索引，$i \in \boldsymbol{I}$
$\boldsymbol{R}$	乘客分级集合
r	乘客分级索引，$r \in \boldsymbol{R}$
T_i	第 i 个到站的列车
$n_{T_i,j}$	列车 T_i 上优先级为 j 的乘客人数
$p_{T_i,j}$	列车 T_i 上优先级为 j 的乘客权重系数
a_{T_i}	列车 T_i 到站时刻
d_{T_i}	列车 T_i 离站时刻
l_{T_i}	列车 T_i 出站后站台剩余候车人数

续表

符号	描述
w_{T_i}	列车 T_i 停靠前站台等候乘客人数
δ	车站的乘客进站速率
$C_{\max}$	列车最大载客能力
b_{T_i}	列车 T_i 到站下车人数
α_{T_i}	乘客下车比例系数

在非合作博弈理论中，在已知约束条件下参与者为了自身收益最大化会选择最优策略，直至达到收益均衡的状态。在面向乘客的列车跨线运行场景中，可借助非合作博弈模型描述列车在共享线路区间内的竞争状态。本文构建的纳什均衡博弈表示为：$G_2 = \{\boldsymbol{I}; H_1, H_2, \cdots, H_i; J_1, J_2, \cdots, J_i\}$。其中 I 表示参与者集合；i 表示参与者数量；H 表示各参与者的策略集合；J 为相应的成本函数。每位参与者拥有独立的策略空间，多个策略空间组合构成完整的联合博弈策略空间。

为明确列车通过通道的先后次序，本文设定了列车 T_1、T_2、T_3 的策略，分别为 σ_1、σ_2、σ_3，具体定义为

$$\sigma_1 = \{\text{按原速运行, 等待} T_3 \text{通过后进入道岔区段}\}$$

$$\sigma_2 = \{\text{与} T_1 \text{不进行编组, 与} T_1 \text{进行编组}\}$$

$$\sigma_3 = \begin{Bmatrix}\text{按原速运行, 等待} T_1 \text{通过后进入道岔区段,}\\ \text{等待} T_2 \text{通过后进入道岔区段}\end{Bmatrix}$$

其中，列车 T_1 与 T_3 的策略关键在于通行顺序的选择，而 T_2 的策略则更多关注是否与其他列车编组运行。通过对参与者策略空间的定义，可以明确其在决策中的可选策略。这些策略的差异会直接决定列车的通过顺序和整体运行效率，并进一步作用于乘客服务水平。因此，构建合理的策略空间并考虑多方因素的协调，是提升运行效率和服务质量的关键。

2.2 博弈成本矩阵

成本函数用于衡量列车策略产生的代价，旨在通过博弈求解达到成本均衡。在基于乘客服务质量的列车协同优化模型中，收益函数的构建需要准确刻画多列车间的博弈竞争特性，从而确保调度方案的最优性。

为刻画列车在不同策略组合下的竞争关系，本文构建了三方纳什均衡博弈的成本函数矩阵。列车 T_1、T_2、T_3 分别拥有若干可选策略：①T_1 的策略包括按原速运行或等待其他列车通过后进入道岔区段；②T_2 的策略包括与 T_1 不进行编组、与 T_1 进行编组或等待 T_3 通过后进入道岔区段；③T_3 的策略包括按原速运行、等待 T_1 通过后进入道岔区段或等待 T_2 通过后进入道岔区段。

在此基础上，不同策略组合下各列车的博弈成本可表示为 $J_{p,q}^{T_i}$，其中上标 T_i 表示列车编号，下标 p，q 分别表示列车 T_2 与 T_3 所采取的策略编号。每一策略组合对应一组三列成本值 $\left(J_{p,q}^{T_1},J_{p,q}^{T_2},J_{p,q}^{T_3}\right)$，反映三列车在该策略组合下的个体收益或代价。通过求解此成本矩阵的最优组合，可获得系统的纳什均衡点，实现跨线运行区列车通行次序与编组方式的协调最优。

从乘客出行需求出发，建立了双目标优化函数，分别针对在途乘客和候车乘客的差异化需求进行建模。具体而言，在途乘客的优化目标聚焦于行程时间的最小化，而候车乘客的优化目标则致力于缩短站台滞留时长。对于参与调度的各列车 T_i 目标函数为

$$J_{p,q}^{T_i}=\omega_1 Z_{i,1}+\omega_2 Z_{i,2} \tag{15}$$

式中，$Z_{i,1}$ 反映乘客在该区段内的行程耗时；$Z_{i,2}$ 代表因运行调整导致的站台积压乘客数；ω_1 和 ω_2 分别为两部分目标的权重。为了在优化过程中保障两部分目标在同一数量级上具有可比性，本文根据实际调度数据与单位量纲差异，对 ω_1 和 ω_2 进行了合理选取。

针对列车乘客构成特点，本文建立了分级评价体系。如表 2 所示，根据乘客属性特征将其划分为 4 个优先级类别。

表 2　乘客优先级等级

Table 2　Passenger priority levels

等级	乘客	描述
1	特殊需求乘客	包括有临时下车需求的乘客，如身体突发状况、紧急就医等需求的乘客
2	弱势群体	包括残疾人、孕妇、老年人及携婴儿车或轮椅的行动不便乘客
3	定期乘客	包括定期乘坐城轨上下班的乘客与商务乘客，其对出行效率和舒适度要求较高
4	一般乘客	无特殊需求的一般乘客，是轨道交通的主要服务对象

该区段乘客总旅行时间可量化为各优先级乘客数量与对应列车到站时间的加权求和，即

$$Z_{i,1}=\sum_{r\in \boldsymbol{R}} p_{T_i,r}\times n_{T_i,r}\times a_{T_i} \tag{16}$$

列车在站台停靠时，当待乘数量超出车厢可用载客量时，会导致部分乘客无法上车而出现滞留。为提高运输效率，模型需最大化乘客上车量，即

$$l_{T_i}=\max\left\{\left(w_{T_i}-c_{T_i}\right),0\right\},\forall i\in \boldsymbol{I} \tag{17}$$

式中，c_{T_i} 为乘客下车后车厢剩余客容量。车站候车乘客 w_{T_i} 由两部分组成：前次列车离站滞留未登车的乘客，以及候车期间新到达车站的乘客。本文采用均匀分布模型描述站台乘客到达过程，即

$$w_{T_i}=l_{T_{i-1}}+\delta\cdot\left(a_{T_i}-d_{T_{i-1}}\right),\forall i\in \boldsymbol{I} \tag{18}$$

列车当前的剩余载客容量可通过列车最大载客量减去车上现有乘客数，再加上本站下车的乘客数来计算，即

$$c_{T_i}=C_{\max}-\sum_{r\in R} n_{T_i,r}+b_{T_i},\forall i\in \boldsymbol{I} \tag{19}$$

本文基于历史 OD 数据建立下车乘客比例模型，则该列车在车站的下车乘客数等于该系数乘以车上各优先级乘客数的总和，即

$$b_{T_i}=\alpha_{T_i}\times\sum_{r\in R} n_{T_i,r},\forall i\in \boldsymbol{I} \tag{20}$$

列车运行调整导致的站台滞留乘客数可表示为

$$Z_{i,2}=l_{T_i} \tag{21}$$

2.3　纳什均衡点及其含义

在构建的列车运行博弈模型中，各参与列车通过策略选择追求 2 个优化目标：最小化到站时间和避免触发紧急制动。当博弈成本矩阵确定后，系统将达到纳什均衡状态，此时任何单方面改变策略都无法获得额外收益。该均衡状态满足以下数学定义：

在一个给定的 i 列车策略型博弈 $G=\{\boldsymbol{I};H_1,H_2,\cdots,H_i;J_1,J_2,\cdots,J_i\}$ 中，策略组合 $\sigma^*=\left(\sigma_1^*,\sigma_2^*,\cdots,\sigma_i^*\right)$ 构成纳什均衡，当且仅当 $i\in N,\sigma_i\in H$，满足：

$$J_i\left(\sigma_i^*,\sigma_{-i}^*\right)\geqslant J_i\left(\sigma_{-i}^*,\sigma_i^*\right) \tag{22}$$

式中：σ_i^* 表示参与者 i 在纳什均衡状态下采取的最优策略；σ_{-i}^* 除参与者 i 之外，所有其他参与者的均衡策略组合。

换而言之，σ^* 是纳什均衡当且仅当每个 σ_i^* 都是下列优化问题的解：

$$\sigma_i^*\in\arg\max J_i\left(\sigma_i^*,\sigma_{-i}^*\right),i\in \boldsymbol{I} \tag{23}$$

纳什均衡点在本文中为跨线区域列车运行次序和编组状态的稳定性分析提供了理论框架，其核心价值在于通过策略稳定性确保任何列车单方面改变策略都无法获得额外收益。具体分析如下。

1）策略最优性与系统均衡。纳什均衡点 $\sigma^*=\left(\sigma_1^*,\sigma_2^*,\cdots,\sigma_i^*\right)$ 从数学角度定义了一种在博弈系统中稳定存在的策略组合状态。在该状态下，任意列车 $i\in \boldsymbol{I}$ 对其他列车已确定的策略组合 σ_{-i}^* 时，其当前所

采取的策略 σ_i^* 是在自身可行策略集合 $\boldsymbol{H}$ 中使成本函数 $J_i\left(\sigma_{-i}^*,\sigma_i^*\right)$ 达到最小的解，即式(22)所示。保证了调度系统中每个列车个体的运行策略在博弈意义下的最优性与收敛性，从而实现列车间非合作条件下的整体均衡。纳什均衡不仅反映出系统中个体行为的最优化，也体现出系统在约束条件下达到的稳定运行状态。

2) 运营优化与资源调配。纳什均衡点为调度管理提供了科学的决策依据，通过分析列车间的策略博弈关系，优化列车运行次序和编组方案，从而提升跨线区域的整体通行效率。

3) 风险管控与效能优化。纳什均衡机制通过建立安全约束下的最优决策框架，使列车在通过道岔区段时能够自主权衡运行效率与安全间隔要求，实现系统整体性能的优化。

3 仿真验证与分析

以重庆轨道交通 4 号线-环线-5 号线为研究对象，涉及的实际参数如表 3 所示。本文设计了 8 组差异化测试场景，如表 4 所示。通过调整列车运行参数(包括位置坐标、运行速度)和各优先级乘客分布比例构建实验方案。采用 Matlab 仿真验证了虚拟编组纳什均衡方法的有效性，并重点分析了站台客流量波动和乘客优先级权重两个关键因素对系统性能的影响规律。

表 3 本文基本参数数值

Table 3 The parameter in this paper

符号	描述	数值
D_{A}	A 方向道岔区段长度	800 m
D_{A}	B 方向道岔区段长度	805 m
Δs	线路最小决策单元长度	1 m
m_1	列车 T_1 的质量	196 t
m_2	列车 T_2 的质量	188 t
m_3	列车 T_3 的质量	191 t
v_{switch}	道岔区段限速	9 m/s
$v_{\max}$	无岔区段限速	27.8 m/s
a_{acc}	最大牵引加速度	1.4 m/s^2
a_{de}	最大制动加速度	–0.9 m/s^2
X_{braking}	绝对制动距离	800 m
X_{safe}	追踪防护间隔	100 m
t_{switch}	道岔转换时间	11 s
v_1	列车 T_1 在区间的初始速度	25 m/s
v_2	列车 T_2 在区间的初始速度	24 m/s
v_3	列车 T_3 在区间的初始速度	25.5 m/s
δ	车站的乘客进站速率	4.3 人/s
$C_{\max}$	列车最大载客能力	1800 人
α_{T_i}	乘客下车比例系数	0.2
ω_1	目标函数中乘客旅行时间的权重	1
ω_2	目标函数中站台滞留乘客数的权重	1000

表 4 不同仿真场景下列车初始条件与乘客分布

Table 4 Initial conditions of trains and passenger distribution in different simulation scenarios

序号	列车	位置/m	速度/(m/s)	各优先级人数
1	T_1	9 000.0	25.0	5，30，1 283，118
	T_2	9 800.0	24.0	0，0，1 513，220
	T_3	9 100.0	25.5	0，100，1 276，302
2	T_1	4 000.0	25.0	0，0，1 513，220
	T_2	14 000.0	24.0	5，30，1 283，118
	T_3	11 000.0	25.5	10，50，1 276，302
3	T_1	11 000.0	25.0	5，30，1 283，118
	T_2	11 800.0	24.0	0，0，1 513，220
	T_3	9 000.0	25.5	0，100，1 276，302
4	T_1	9 000.0	25.0	0，0，1 513，220
	T_2	11 500.0	24.0	5，30，1 283，118
	T_3	9 000.0	25.5	10，50，1 276，302

3.1 方法性能分析

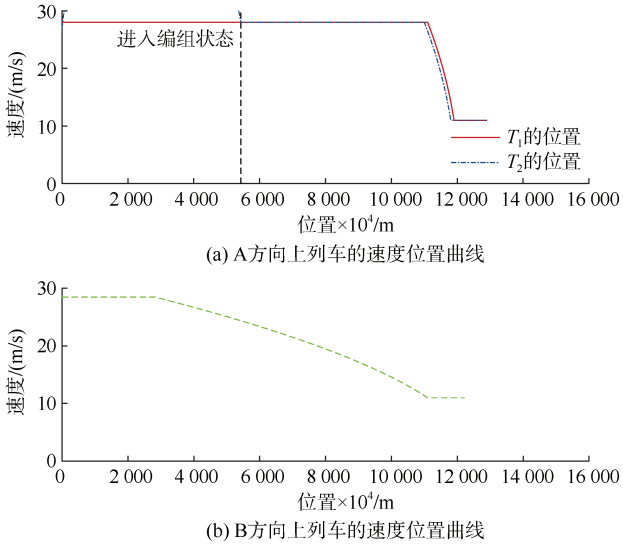
基于以上 8 组典型运行场景的对比实验，本文对虚拟编组纳什均衡、移动闭塞纳什均衡及 FCFS 方法 3 种控制策略进行了测试，其实验数据详见表 5，得到的仿真结果如图 3 和图 4 所示。

由表 5 可知：本文提出的虚拟编组优化策略在性能指标上展现出明显优势，相较于 FCFS 方法，能够实现乘客出行时间减少 3.24%，同时将站台等待降低

表 5 本文的部分案例有效性验证结果

Table 5 The effectiveness verification results of some cases in this paper

序号	方法	到达时间	滞留人数	编组
1	虚拟编组	[735，745，866]	1 387	是
	移动闭塞	[735，984，840]	3 768	否
	FCFS 方法	[735，984，840]	3 768	否
2	虚拟编组	[535，916，805]	2 963	否
	移动闭塞	[535，916，805]	2 963	否
	FCFS 方法	[535，916，805]	2 963	否
3	虚拟编组	[851，860，740]	2 323	是
	移动闭塞	[851，933，740]	3 902	否
	FCFS 方法	[851，933，740]	3 902	否
4	虚拟编组	[818，848，707]	3 392	否
	移动闭塞	[818，848，707]	3 392	否
	FCFS 方法	[81，848，707]	3 392	否

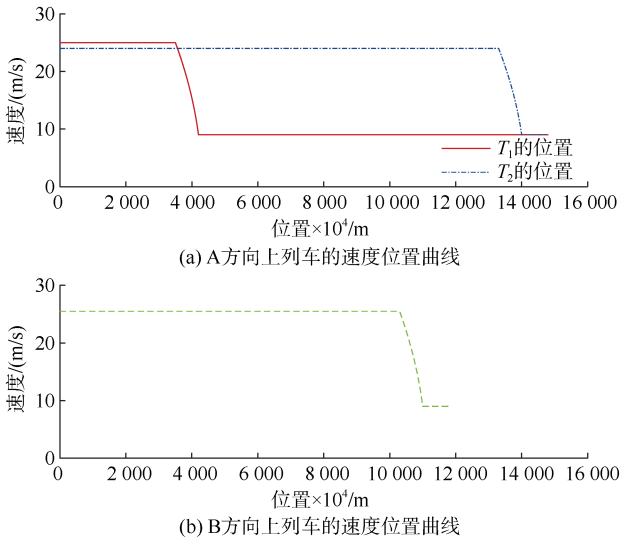


(a) A方向上列车的速度位置曲线

(b) B方向上列车的速度位置曲线

图 3 列车 T_1 和 T_2 虚拟编组通过咽喉区的速度位置曲线

Figure 3 Speed-position curves of virtually coupled trains T_1 and T_2 passing through the throat area



(a) A方向上列车的速度位置曲线

(b) B方向上列车的速度位置曲线

图 4 列车 T_1 和 T_2 分别通过咽喉区的速度位置曲线

Figure 4 Speed-position curves of T_1 and T_2 passing through the throat area separately

30.91%。这是因为，FCFS 方法仅基于先到先服务原则，既未考虑乘客优先级差异，也未能利用同向列车编组通过道岔的时间优势。而本文提出的虚拟编组方法通过统筹考虑乘客优先级、列车通行次序和是否编组等关键因素，实现了动态优化调度，在降低运营成本的同时提升了运行效率和服务质量。

相较于移动闭塞方案，本文提出的方法可降低出行时间成本 2.69%和站台等待成本 29.70%。传统方案在以下场景中存在明显局限：①需要频繁建立和解锁进路的复杂道岔区段；②同向列车具备编组条件但未实施编组的情况。而虚拟编组方法通过优化列车协同通过策略，在这些场景中展现出显著优势。值得注意的是，当列车间距过大或编组条件不满足时，3 种方法的性能趋于一致。

3.2 参数敏感性分析

站台客流量受时段、天气、地理位置及节假日等因素影响，呈现显著时空差异性。本文通过调节乘客进站速率参数，量化分析客流量变化对滞留人数的敏感性影响。

基于上述的 8 组案例开展仿真，仿真结果见表 6。当客流量为 1、5、10、20 人/s 时，该方法较传统移动闭塞模式分别实现了 25.19%、29.75%、29.91%和 30.03%的滞留人数降幅。整体降幅达 25%～30%，且随客流量增加趋近上限，验证了该方法在高峰时段的优势，但极端客流下仍存在 30%的性能极限。因此为确保站台运行秩序和乘客服务质量，在实际运营中需要统筹考虑客流特征、设备状态等关键因素，制定针对性的高峰时段应对方案。

表 6 不同客流量下两种方法的滞留人数对比

Table 6 Passenger congestion under different flow rates

序号	方法	客流量			
		1 人/s	5 人/s	10 人/s	20 人/s
1	虚拟编组	0	1 783	4 977	11 366
	移动闭塞	49	4 273	11 873	26 488
2	虚拟编组	0	1 749	4 944	11 333
	移动闭塞	202	4 298	12 201	26 714
3	虚拟编组	0	3 193	8 486	19 073
	移动闭塞	0	3 193	8 486	19 073
4	虚拟编组	74	3 620	8 913	19 499
	移动闭塞	74	3 620	8 913	19 499
5	虚拟编组	233	2 819	6 823	14 829
	移动闭塞	251	5 394	12 847	28 293
6	虚拟编组	199	2 753	6 756	14 763
	移动闭塞	224	5 307	12 494	28 395
7	虚拟编组	200	3 974	9 847	21 593
	移动闭塞	200	3 974	9 847	21 593
8	虚拟编组	167	4 121	9 994	21 740
	移动闭塞	167	4 121	9 994	21 740

为评估目标权重对优化结果的影响，本文通过调节乘客旅行时间与站台滞留人数的权重系数 ω_1 和 ω_2 进行实验。使用上述案例中的第 1 组进行实验，结果如图 5 所示。

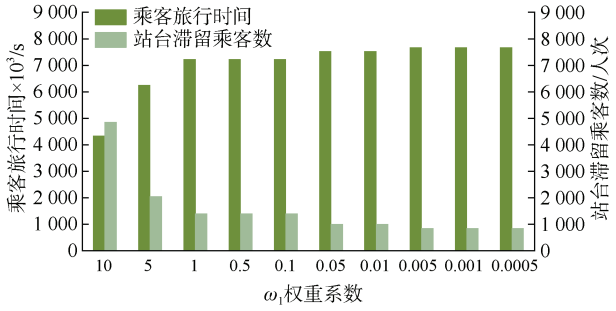


图 5　目标权重对实验结果的影响分析

Figure 5　Analysis of the influence of target weights on experimental results

由图 5 可知：①当乘客旅行时间权重从 1 变到 10，乘客旅行时间明显降低，但同时伴随着站台滞留乘客由 1 387 人增加至 4 837 人，增长近 250%。这一现象表明在该权重区间内，目标函数对权重的变化表现出较高的敏感性，即系统调度更加偏向于降低列车上乘客的旅行成本，进而牺牲了站台服务质量。②当乘客旅行时间权重在 0.5 到 0.0005 的范围内变化时，两项目标的数值变化相对平稳，乘客旅行时间维持在 7 200 至 7 600 区间，站台滞留人数稳定在约 800 至 1 300 人，呈现出更为均衡的调度效果。则该区间内的权重设置可为系统运行提供折中配置参考。

因此，将权重系数设为可调输入，可使调度员根据实际需求灵活调整目标优先级，实现不同运行条件下的最优调度，提升系统的适应性与灵活性。

4　结论

1) 本文针对跨线运行区域列车调度中存在的运力瓶颈和乘客滞留问题，提出了一种创新性的虚拟编组列车协同控制方法。通过将纳什均衡博弈理论引入列车调控系统，建立了综合考虑列车运行效率和乘客服务水平的优化模型。

2) 相较于传统 FCFS 方法，本文提出的方法可分别实现 3.24%的乘客旅行成本降低和 30.91%的站台等待成本优化；与移动闭塞模式相比，则分别取得 2.68%和 29.70%的对应指标提升。

3) 在客流高峰时段，所提出的方法可减少约 30%的站台滞留人数。通过调节目标权重系数的实验分析表明，系统响应呈现预期的敏感性特征，即当增大某项指标的权重系数时，其对应性能指标可获得相应改善。在应用中，调度人员可以根据实际运营需求，通过权重配置来优化不同维度的服务指标。

参考文献

[1] 中国城市轨道交通协会. 城市轨道交通 2024 年度统计和分析报告[R]. 北京, 2025.
China Association of Metros. Annual statistics and analysis report of urban rail transit in 2024[R]. Beijing, 2025.

[2] SU S, SHE J F, LI K C, et al. A nonlinear safety equilibrium spacing-based model predictive control for virtually coupled train set over gradient terrains[J]. IEEE transactions on transportation electrification, 2021, 8(2): 2810-2824.

[3] EMUNDS T, NIEßEN N. Evaluating railway junction infrastructure: a queueing-based, timetable-independent analysis[J]. Transportation research part C: emerging technologies, 2024, 165: 104704.

[4] FELEZ J, VAQUERO-SERRANO M A. Virtual coupling in railways: a comprehensive review[J]. Machines, 2023, 11(5): 521.

[5] WU Q, GE X H, HAN Q L, et al. Dynamics and control simulation of railway virtual coupling[J]. Vehicle system dynamics, 2023, 61(9): 2292-2316.

[6] QUAGLIETTA E, WANG M, GOVERDE R M P. A multi-state train-following model for the analysis of virtual coupling railway operations[J]. Journal of rail transport planning & management, 2020, 15: 100195.

[7] 佘江枫. 基于模型预测控制的虚拟编组列车集中式控制方法[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
SHE Jiangfeng. A centralized control method for virtually coupled train set based on model predictive control[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.

[8] DUAN H X, YANG Y N, DUAN Y, et al. Research on virtual coupling train operations based on moving-block and vehicle-to-vehicle communication[J]. Journal of physics: conference series, 2020, 1631(1): 012004.

[9] 陈凯. 基于车车通信的虚拟重联技术研究[J]. 都市快轨交通, 2023, 36(1): 22-27.
CHEN Kai. Research of virtual coupling technology based on vehicle-to-vehicle communication[J]. Urban rapid rail transit, 2023, 36(1): 22-27.

[10] WANG Q, CHAI M, LIU H J, et al. Optimized control of virtual coupling at junctions: a cooperative game-based approach[J]. Actuators, 2021, 10(9): 207.

[11] 张琳. 高速铁路客运站进路和到发线分配优化方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2022.
ZHANG Lin. Research on optimization method of route and track platform distribution of passenger station of high-speed railway[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2022.

[12] 乔木, 姚丽萍. 市域(郊)铁路出入线接轨站咽喉通过能力计算研究[J]. 铁道运输与经济, 2023, 45(12): 28-35.
QIAO Mu, YAO Liping. Study on throat area carrying capacity calculation of urban (suburban) railway entrance and exit line junction stations[J]. Railway transport and economy, 2023, 45(12): 28-35.

（编辑：王艳菊）