

面向冲突化解的双线交汇区段列车编队 双层优化模型

宁 正¹, 张 雷², 何积丰²

(1. 同济大学 上海市轨道交通结构耐久与系统安全重点实验室, 上海 201804; 2. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要: 针对虚拟编组列车在双线交汇区段上面临的冲突与通过效率问题, 提出了多种速度组编协调策略。将列车汇入时间、次序、编队组合和速度序列决策集成在双层优化模型中, 上层模型优化通过效率, 下层模型提高编队质量; 设计双层嵌套粒子群算法, 将汇入时间作为双层模型的中间交互变量, 使列车群能根据环境需求收敛于不同队形。仿真结果表明, 加入协调速度优化可以提高组编过程效率, 双层编队模型可以在确保编队结构稳定性和均衡性的同时提高既有线路通过率。

关键词: 虚拟编组; 列车编队方法; 双层优化模型; 冲突化解; 编队协调

中图分类号: U268.6

文献标志码: A

intermediate interactive variable between the two layers, enabling the convergence of train formations to different configurations based on environmental demands. Simulation results demonstrate that the inclusion of coordinated speed optimization can enhance the efficiency of the coupling process. The bi-level optimization model can increase the throughput efficiency of existing lines while ensuring the stability and balance of marshaling structures.

Keywords: virtual coupling; train marshaling method; bi-level optimization model; conflict resolution; marshaling coordination

Virtual Coupling Train Marshaling Bi-level Optimization Model for Conflict Resolution at Junctions

NING Zheng¹, ZHANG Lei², HE Jifeng²

(1. Shanghai Key Laboratory of Rail Infrastructure Durability and System Safety, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: In addressing the conflicts and throughput efficiency issues for virtual train formations at junctions, various marshaling coordination strategies were proposed. The train merging timing, sequence, formation composition, and speed sequence decisions were integrated into a bi-level optimization model. The upper-layer model optimizes the throughput efficiency, while the lower-layer model improves the virtual coupling formation quality. A bi-level nested particle swarm algorithm was designed, with the train merging time serving as an

通过传统措施优化既有线路或更新改造基础设施, 都难以直接解决轨道交通需求超限与不均衡问题^[1]。现有研究表明, 虚拟编组技术具有突破线路的设计通过能力限制的潜力^[2-3]。为了评估虚拟编组技术的适用性, Aoun 等^[4]的研究结果表明, 虚拟编组技术的市场竞争力与线路的饱和度呈现正相关关系。Nold 等^[5]将虚拟编组联挂与传统的机械联挂方式进行了对比, 在巡航速度下虚拟编组技术具有动态耦合的突出优势, 可以减少 34% 的旅行时间。Di Meo 等^[6]也提出了相似观点。Schumann^[7]和 Yong 等^[8]对虚拟编组技术在不同场景下的应用进行了仿真实验。结果表明, 虚拟编组技术可以根据不同环境提高车队的运行密度, 尤其在双线交汇的瓶颈区段^[9]。虚拟编组技术首先要解决编组车队的稳定控制问题, 因此多数学者聚焦于可变参数和最优控制策略设计, 保证车队的安全运行^[10-11]。Ketphat 等^[12]考虑实际列车运行中的干扰因素, 对影响编队效率

收稿日期: 2022-12-30

基金项目: 国家自然科学基金(52172329); 同济大学交叉学科研究项目(2022-5-YB-06)

第一作者: 宁 正, 博士生, 主要研究方向为轨道交通运行组织及控制。

E-mail: 2010759@tongji.edu.cn

通信作者: 张 雷, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为人工智能及系统安全。

E-mail: reizhg@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

的动态间隔进行了修正。Schwerdfeger等^[13]基于闭塞间隔和运行时刻表,通过调整虚拟编组列车的编队运行过程和列车最晚接受的到达时间,优化了轨道的最大容量。Liu等^[14]通过优化固定数目列车编队耦合与解耦次数来满足车站的需求,提高既有线路的通过能力。曹源等^[15]采用虚拟编组技术建立了基于客流的列车动态编组非线性规划调度模型,降低了病毒在轨道交通上的传播风险。

进入编组状态时,一般要求只有领航列车接收控制中心的信息,而跟随列车根据领航列车指令运行^[16]。因此,编组过程需要提前获取列车属性(领航列车还是跟随列车)、列车编组位置(列车所属车队以及列车在所属车队中的位置)等编队计划信息。编队计划是协同列车关系与线路资源占用的决策化问题,尤其面对合并交汇等复杂的线路结构,需要考虑外在环境和内部系统制约因素的相互影响。合理的列车编队结构才有机会发挥虚拟编组技术的巨大优势。虽然目前轨道交通领域相关研究工作主要聚焦于编组的安全控制过程,但是相似问题在货运汽车领域已经得到充分研究^[17]。因此,提出了一种列车编队结构决策方法,考虑轨道交通系统的周期性运行、多限制、计划性等特点,通过计算编队列车汇

合时间、设计编队结构,提高既有线路的通过能力。针对双线交汇区段协调运行过程中可能存在的冲突,建立双层优化模型。上层模型优化列车群的通过效率,从而化解潜在冲突;下层模型优化列车编队过程,从而提高编队质量。

1 列车编队过程

双线交汇区段是指来自不同分支线路方向的列车经过道岔控制通过路径时,共用的部分轨道区段。既有系统主要采取降低分支线路服务频率以保证交汇区段安全间隔的措施,避免线路冲突^[18]。例如,当汇合线路的设计通过能力最小时间间隔为2.5 min时,两分支线路等比例发车,每个分支方向必须保证5.0 min的运行周期。如图1a所示,既有系统以绝对制动距离计算移动权限,需要与前车保持较大行车间隔,即使交汇线路保持最紧凑的运营方案,分支线路也要保证较大的运行周期,从而产生运能瓶颈。虚拟编组技术通过支持编组内部的相对制动距离,如图1b所示,减少必要的行车间隔,为解决双线交汇区段的瓶颈问题提供了新的解决方案。

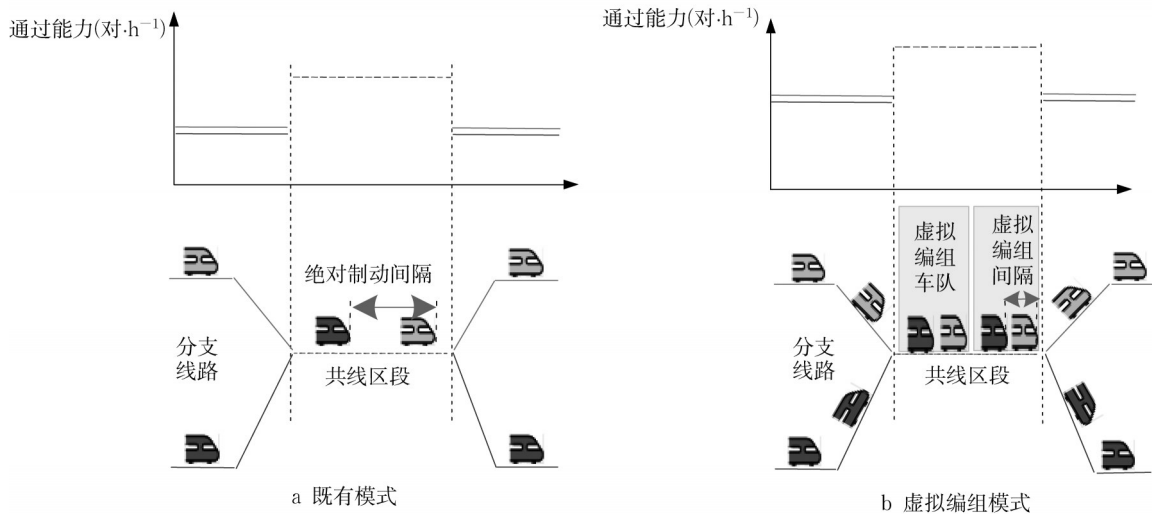


图1 既有模式和虚拟编组技术通过能力对比

Fig.1 Comprison of the capacity of rail systems between existing mode and virtual coupling technology

虚拟编组需要一系列协调过程,以实现列车在非编组独立运行、组编协调、编组运行、解编运行等多状态之间的转换,其中组编过程是影响虚拟编组效率的关键^[16]。当接收到组编指令时,列车协调相对速度以进入相对制动的防护距离内,直到车队中的所有列车满足组编条件,转入组编运行状态。因此,需要根据轨

道交通系统的特点和约束,确定列车组成不同车队的效率。考虑到轨道交通经常采用周期性运行图并通过设置冗余时间提高服务质量和运营效率,本研究允许所有列车在一定范围内调整进入交汇区段的时间,以增加列车对虚拟编组的适应性。如图2所示, $T_{1,0}$ 和 $T_{2,0}$ 分别表示分支线路上的运行周期(服务间隔),列车可

以在发车时间窗内选择合适的汇入时间; α 表示不同支线路的首车发车时间偏移, α 的变化会影响不同分支线路列车的汇入次序。例如,当分支线路列车数目分别

为 m, n 时,会产生 $(m+n)!/(m!+n!)$ 种次序。合理的汇入时间和次序以及编队组合,可以避免在汇入过程中产生的安全冲突并提高通过效率。

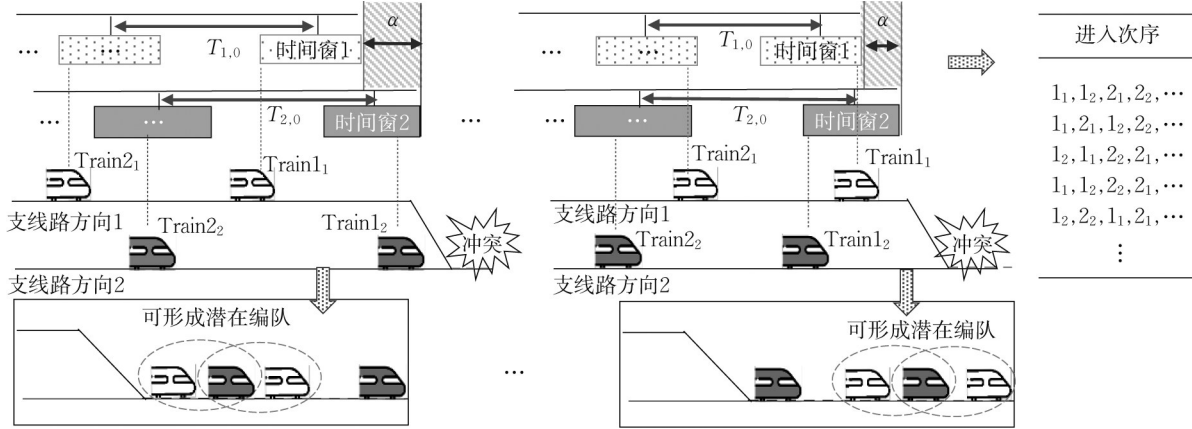


图2 周期性服务的双线交汇列车潜在车队形成过程

Fig.2 Potential marshaling formation of periodic service trains operating at junctions

2 问题假设与数学描述

为简化问题,阐述本研究中提出的基本观点,作出如下假设:

(1)基于同质化列车,假设列车在恒定的牵引和制动加速度下行驶。

(2)考虑既有系统站台长度的影响,只聚焦于2辆列车编队的场景,其中车队中的第1辆列车为领航列车,第2辆列车为跟随列车。

(3)为了提高虚拟编组适应性,基于缓冲时间设置时间窗,但时间窗不宜设置过大,以免改变列车在支线的运行次序。在共线交汇区段列车以先进先出的顺序通过。

(4)由于列车可以通过增加速度差在较短时间内退出编组,因此只聚焦于产生运能瓶颈的汇入过程,汇入时间为列车进入共线区段的时间。

问题相关变量及参数如下:

(1)集合。 R 表示线路方向集合,双线交汇区段是指由道岔连接的2个不同方向支线路的列车驶入的同一共线路段, $R=\{r|r=1,2\}$,设定索引 r 标识线路方向。 I_r 表示来自不同方向汇入交汇共线区段的列车集合, $I_r=\{i_r|i_r=1,2,\dots,|I_r|\}$, i_r 表示从方向 r 进入双线交汇区段的列车 i , i_r+1 表示 i_r 后汇入共线区段的接续列车。 τ 表示时间窗集合, $\tau=\{\tau_i|i_r \in I_r\}$, τ_i 是列车 i_r 所属的时间窗。

(2)参数。 S_{vc} 为安全耦合间隔, v_{cru} 为线路设计

巡航速度, $v_{lim,min}$ 为道岔区段限制速度的最小值, $v_{lim,max}$ 为道岔区段限制速度的最大值, a_{tra} 为列车的常用牵引加速度, L_{train} 为列车长度, L_{length} 为交汇区段长度, m 为列车质量, H_{vc} 为列车编队内部间隔, H_0 为交汇区段的涉及通过间隔(编队外部的行车间隔), t_{work} 为道岔工作时间。

(3)中间变量。 $t_{i_r,coor}$ 表示列车 i_r 的组编协调时间, T_{i_r,i_r+1} 表示列车 i_r 与列车 (i_r+1) 进入交汇区段的时间间隔, $t_{i_r,coor}$ 表示当列车 i_r 为领航列车时所需要的协调时间, $t_{i_r,pass}$ 表示列车 i_r 通过交汇区段的时间, $t_{i_r,wcu}$ 表示列车 i_r 以非组编方式通过交汇区段的时间, $t_{i_r,wde}$ 表示列车 i_r 需要与后车成编组通过交汇区段的时间, $L_{i_r,vc}$ 表示列车 i_r 需要的协调距离, $L_{i_r,vcl}$ 表示列车 i_r 为领航车时的组编协调距离, $L_{i_r,vcl}$ 表示列车 i_r 为跟随列车时的组编协调距离, $L_{i_r,cru}$ 表示列车 i_r 不需要组编时的协调距离, L_{coor} 表示列车群的协调距离之和, \bar{v}_{i_r} 表示列车 i_r 通过交汇区段的平均速度, θ_{i_r} 表示列车 i_r 的编队属性权重。

(4)决策变量。 t_{i_r} 表示列车 i_r 的汇入时间,进一步可以根据汇入时间确定列车次序; $v_{i_r,vc}$ 表示列车 i_r 通过道岔区段的实际速度; c_{i_r} 表示列车 i_r 所在编队的位置属性权重。

组编过程中列车要完成从独立运行到编队运行的状态转移。协调策略是一种速度轨迹规划方法,使独立列车能根据接收的编队信息,减小与组队列车间的速度差并缩短行车间隔,以达到耦合条件。

Liu等^[19]提出了后车爬升到更高速度,然后再降速减小速度差的追赶策略以缩短行车间隔。直接应用该策略会产生较大的速度波动。此外,实际中列车一般以接近最大轨道速度的巡航速度作为理想组编速度,难以通过后车加速的方式缩短间隔。

考虑到双线交汇道岔区段存在限速,借用自然降速过程完成组编过程。因此,提出了一种前车等待的多速度协调策略,在保证可行性的同时提高线路利用率。如图3所示,编队中的最后一辆车出清道岔区段进入交汇区段后,以最优速度曲线加速至巡航速度 v_{cru} ,从而提高整个车队的通过效率;车队中的前行列车在道岔区段限制速度范围 $[v_{\text{lim},\min}, v_{\text{lim},\max}]$ 内选择合适的速度 $v_{i,\text{vc}}$,延时加速一段时间后,再依次选择合适的时间加速,直到车队中最后加速的领航列车加速至理想耦合速度,车队达到组编运行条件。每列车协调时间 $t_{i,\text{coor}}$ 是根据编队组成以及队内每辆列车的汇入时间 t_i 确定的。所提出的协调策略可以使列车速度接近巡航速度,此时列车之间的距离接近耦合距离,即列车可以在 $t_i +$

$$L_{i+1,\text{vcf}} = \frac{v_{\text{cru}}(a_{\text{tra}}S_{\text{vc}} - a_{\text{tra}}v_{i,\text{vc}}(t_{i+1} - t_i) - (v_{\text{cru}} - v_{i,\text{vc}})^2 - a_{\text{tra}}L_{\text{train}})}{a_{\text{tra}}(v_{i,\text{vc}} - v_{\text{cru}})} + \frac{v_{\text{cru}}^2 - v_{i,\text{vc}}^2}{2a_{\text{tra}}} + \frac{v_{\text{cru}} - v_{i,\text{vc}}}{a_{\text{tra}}} \quad (6)$$

$$L_{i,\text{cru}} = \frac{v_{\text{cru}}^2 - v_{i,\text{vc}}^2}{2a_{\text{tra}}} \quad (7)$$

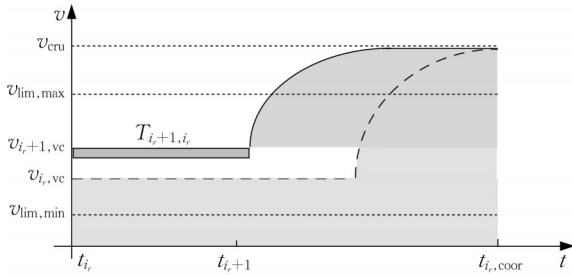


图3 交汇区段的车队组编协调策略

Fig.3 Coordination strategy of train marshaling formation at junctions

根据列车编队过程和协调策略,汇入时间和编队组合除了互相影响,还影响车队通过双线交汇区段的通过效率。根据列车编队属性(是否需要编队)和在编队中的位置不同(是否为领航列车),列车所需协调过程和通过时间的计算模型不同。因此,定义二值函数 c_i 表示列车位置权重。当列车 i_r 为跟随列车时, $c_i = 1$;当列车 i_r 为领航列车时, $c_i = 0$ 。当 $c_i = 0$ 时,定义二值函数 θ_i 为列车 i_r 的编队属性权重,令 $\theta_i = c_i + c_{i+1}$ 。如表1所示,若 $\theta_i = 1$,则表明

$t_{i,\text{coor}}$ 时刻达到耦合状态。设列车 i_r 是领航列车,列车 $(i_r + 1)$ 是车队中最后一辆跟随列车,协调距离计算式如下所示:

$$L_{i_r+1,\text{vc}} - L_{i_r,\text{vc}} = L_{\text{train}} + S_{\text{vc}} \quad (1)$$

$$L_{i_r,\text{vcf}} = \frac{v_{\text{cru}}^2 - v_{i_r,\text{vc}}^2}{2a_{\text{tra}}} + \left(t_{i_r,\text{coor}} - \frac{v_{\text{cru}} - v_{i_r,\text{vc}}}{a_{\text{tra}}} \right) v_{\text{lim},\min} \quad (2)$$

$$L_{i_r+1,\text{vcf}} = \frac{v_{\text{cru}}^2 - v_{i_r,\text{vc}}^2}{2a_{\text{tra}}} + \left(t_i + t_{i_r,\text{coor}} - t_{i_r+1} - \frac{v_{\text{cru}} - v_{i_r,\text{vc}}}{a_{\text{tra}}} \right) v_{\text{cru}} \quad (3)$$

将式(2)和式(3)代入式(1),可得以下协调时间和协调距离计算式:

$$t_{i_r,\text{coor}} = \frac{(a_{\text{tra}}t_{i_r+1} - a_{\text{tra}}t_i - 2v_{i_r,\text{vc}})v_{\text{cru}} + \frac{v_{\text{cru}}^2 + v_{i_r,\text{vc}}^2 - a_{\text{tra}}S_{\text{vc}} - a_{\text{tra}}L_{\text{train}}}{a_{\text{tra}}(v_{\text{cru}} - v_{i_r,\text{vc}})}}{a_{\text{tra}}(v_{\text{cru}} - v_{i_r,\text{vc}})} \quad (4)$$

$$L_{i_r,\text{vcf}} = \frac{v_{\text{cru}}^2 - v_{i_r,\text{vc}}^2}{2a_{\text{tra}}} + \frac{v_{\text{cru}}(v_{\text{cru}}t_{i_r+1} - v_{\text{cru}}t_i - S_{\text{vc}} - L_{\text{train}})}{v_{\text{cru}} - v_{i_r,\text{vc}}} \quad (5)$$

$c_{i+1} = 1$,也就是说列车 $(i_r + 1)$ 是跟随列车,此时列车 i_r 是车队中的领航列车,需要采用领航列车的编队协调计算方法;若 $\theta_i = 0$,则表明 $c_{i+1} = 0$,此时列车 i_r 是单元素领航列车,即以不编组的方式通过交汇区段。

表1 列车编队属性和编队位置的二值函数表示

Tab.1 Binarization function used to characterize the attributes and positions of train in the train marshaling process

列车编队属性	领航列车-独立	领航列车-编队	编队跟随列车
协调过程 速度变化	直接加速不协调	延迟加速协调	直接加速协调
c_i	0	0	1
θ_i	0	1	—
协调距离 $L_{i,\text{vc}}$	$L_{i,\text{cru}}$	$L_{i,\text{vcf}}$	$L_{i,\text{vcf}}$
通过总时间	$t_{i,\text{wecu}}$	$t_{i,\text{wde}}$	$t_{i,\text{wecu}}$

3 列车编队双层优化模型

列车编队过程需要同时满足运输需求和运行控制系统的限制,优化目标涉及2个互相制约的主体。因此,提出了列车编队双层优化模型。上层模型优化列车汇入时间和编队属性及位置,提高系统效率;

下层模型通过优化列车的编队属性、编队位置和编队速度提高编队的质量,汇入时间是中间变量。

3.1 下层优化模型

列车通过编队协调获得与相邻列车合作组队的机会,但受编队条件限制,组队过程中部分车辆需要额外行程时间付出,编队优化的目的是列车更合理地组成车队,避免过长编队协调距离而造成的资源浪费,或导致安全冲突。下层模型从协调过程、编队稳定性和编队均衡性3个方面定义编队指标,目标函数如下所示:

$$Z_{\text{down}} = \min(\alpha_{\text{down}} L_{\text{coor}} + \beta_{\text{down}} R_v + \gamma_{\text{down}} B) \quad (8)$$

式中: R_v 、 B 分别为列车群的相对动能、编队均衡性子目标; α_{down} 、 β_{down} 、 γ_{down} 分别为3个目标归一化的权重系数。

列车在编队中的位置和编队属性不同,其协调距离不同,协调距离越长意味着需要编队的两列车与理想耦合条件的偏差越大。根据编队属性权重定义列车群的编队协调距离,计算式如下所示:

$$L_{\text{coor}} = \sum_{i_r=2}^{|I_r|} c_{i_r} L_{i_r, \text{cru}} + (1 - c_{i_r})(\theta_{i_r} L_{i_r, \text{vcl}} + (1 - \theta_{i_r}) L_{i_r, \text{vcl}}), i_r \in I_r, r \in R \quad (9)$$

列车在组编过程中需要进行速度协调以满足耦合条件,多速度的协调过程提高了列车组编潜力,但

是相邻列车间的速度分布不均衡性增加了列车追踪控制的复杂度,将会降低列车编队过程的稳定性。因此,引入相对动能(TRKE)^[19]概念,一方面可以评价列车编队的风险程度,另一方面可以进一步映射速度波动性。编队总体相对动能为

$$R_v(t) = \sum_{i_r=2}^{|I_r|} m(v_{i_r}(t) - v_{i_r-1}(t))^2, i_r \in I_r, r \in R \quad (10)$$

本研究主要聚焦于编队协调过程,列车组编过程速度变化主要是由为列车通过道岔区段选择的耦合速度不同而产生的,所以将相对动能中的瞬时速度替换为协调过程中的列车平均运行速度,即:

$$R_v = \sum_{i_r=2}^{|I_r|} m(\bar{v}_{i_r} - \bar{v}_{i_r-1})^2, i_r \in I_r, r \in R \quad (11)$$

$$\bar{v}_{i_r} = \frac{L_{i_r, \text{vc}}}{t_{i_r, \text{coor}}} \quad (12)$$

线路采用单一编组时,多采用行车间隔的标准差作为均衡性评价指标^[20],提高运营服务质量;采用虚拟编组在交汇区段形成多编组车列时,为保证服务水平和车辆运用效率,需要提高大小编组均衡性^[21]。如图4所示,即使通过能力(平均行车间隔)和大小编组数目一样,不同编组分布方式也会呈现不同的服务水平。

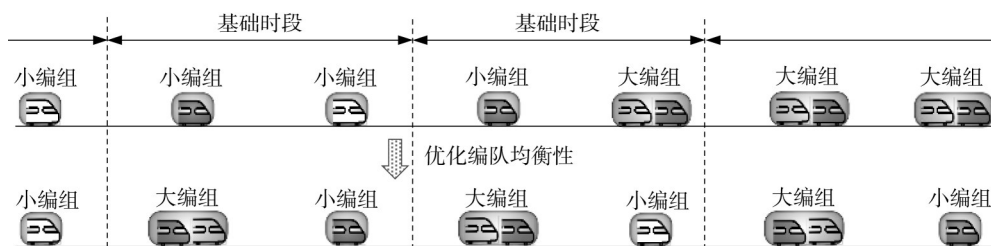


图4 编队均衡性优化示意图

Fig.4 Schematic diagram of formation equilibrium optimization

定义编队不均衡度指标为基础时段内的平均输送能力标准差,计算式如下所示:

$$B = \sqrt{\frac{1}{|b|} \sum_{j=1}^{|b|} \left(P_j - \frac{\sum_{j=1}^{|b|} P_j}{|b|} \right)^2} \quad (13)$$

式中: $|b|$ 是单位时段内划分的基础时段数目; $P_j = (1/\bar{H}_b) \bar{\zeta} P_{\text{train}}$ 表示基础时段内的平均输送能力,是基础时段通过能力(平均行车间隔 \bar{H}_b 的倒数)与列车平均编组数 $\bar{\zeta}$ 和车辆定员 P_{train} 的乘积。标准差越小,编队越均衡。

下层优化列车协调过程中必须满足以下约束:

$$c_{1_r} = 0 \quad (14)$$

$$(1 - c_{i_r}) + (1 - c_{i_r+1}) \leq 1, i_r \in I_r, r \in R \quad (15)$$

$$L_{i_r, \text{vc}} < L_{\text{length}}, i_r \in I_r, r \in R \quad (16)$$

$$v_{\text{lim, min}} \leq v_{i_r, \text{vc}} \leq v_{\text{lim, max}}, i_r \in I_r, r \in R \quad (17)$$

3.2 上层优化模型

上层模型目标是列车组成车队以提高通过交汇区段的效率,目标函数为:

$$Z_{\text{up}} = \min \sum_{i_r=1}^{|I_r|} c_{i_r} t_{i_r, \text{wcr}} + (1 - c_{i_r})(\theta_{i_r} t_{i_r, \text{wde}} + (1 - \theta_{i_r}) t_{i_r, \text{wcr}}), i_r \in I_r, r \in R \quad (18)$$

$$t_{i_r, \text{wde}} = t_{i_r} + L_{i_r, \text{vcl}} + \frac{L_{\text{length}} - L_{i_r, \text{vcl}}}{v_{\text{cru}}} \quad (19)$$

$$t_{i_r, \text{wcru}} = t_{i_r} + \frac{v_{\text{cru}} - v_{i_r, \text{vc}}}{a_{\text{tra}}} + \frac{L_{\text{length}} - (v_{\text{cru}}^2 - v_{i_r, \text{vc}}^2)/2a_{\text{tra}}}{v_{\text{cru}}} \quad (20)$$

s.t.

$$c_{i_r} = 0$$

$$(1 - c_{i_r}) + (1 - c_{i_r+1}) \leq 1, i_r \in I_r, r \in R$$

$$L_{i_r, \text{vc}} < L_{\text{length}}, i_r \in I_r, r \in R$$

$$v_{\text{lim}, \text{min}} \leq v_{i_r, \text{vc}} \leq v_{\text{lim}, \text{max}}, i_r \in I_r, r \in R$$

$$t_{i_r} \leq \tau_{i_r}, \forall i_r \in I_r, r \in R \quad (21)$$

$$t_{i_r+1} - t_{i_r} - ((1 - c_{i_r})H_{\text{vc}} + c_{i_r}H_0) \geq 0, \forall i_r \in I_r, r \in R \quad (22)$$

$$t_{(i+1)_1} - t_{i_2} - t_{\text{work}} \geq 0, \forall i_r \in I_r \quad (23)$$

$$t_{(i+1)_2} - t_{i_1} - t_{\text{work}} \geq 0, \forall i_r \in I_r \quad (24)$$

$$t_{i_r} + t_{i_r, \text{pass}} < t_{i_r+1} + t_{i_r+1, \text{pass}}, \forall i_r \in I_r, r \in R \quad (25)$$

$$\sum_{i_r=1}^{|I_r|} c_{i_r} t_{i_r, \text{wcru}} + (1 - c_{i_r})(\theta_{i_r} t_{i_r, \text{wde}} + (1 - \theta_{i_r}) t_{i_r, \text{wcru}}) \leq \sum_{i_r=1}^{|I_r|} t_{i_r} + (i_r - 1)H_0 + t_{i_r, \text{wcru}} \quad (26)$$

上层目标要满足下层目标约束;式(21)限制了每列车只能在规定发车时间窗内出发;式(22)表示相邻列车必须满足运行间隔要求,当相邻列车为同一个车队时要满足编组 H_{vc} ,不在同一个编队时,编队之间常态间隔 H_0 ;式(23)和式(24)表示相邻列车来自不同方向时,发车时间必须大于道岔工作时间;式(25)表示一般线路不考虑越行,列车在交汇区段必须保证先进先出的原则,因此当列车进入交汇区段之后,必须依次通过交汇区段;式(26)表示列车以组编方式通过交汇区段的时间必须小于不组编方式所需的时间。

4 求解算法

双层规划问题属于双层递阶结构的系统优化问题,具有非凸和不可微性,是典型的NP-hard问题。列车编队优化模型中不但上下层目标和决策变量相互影响,而且决策变量(汇入时间和列车编队属性)与位置相互限制,所以基于粒子群算法设计双层嵌套启发式方法进行求解,如图5所示。

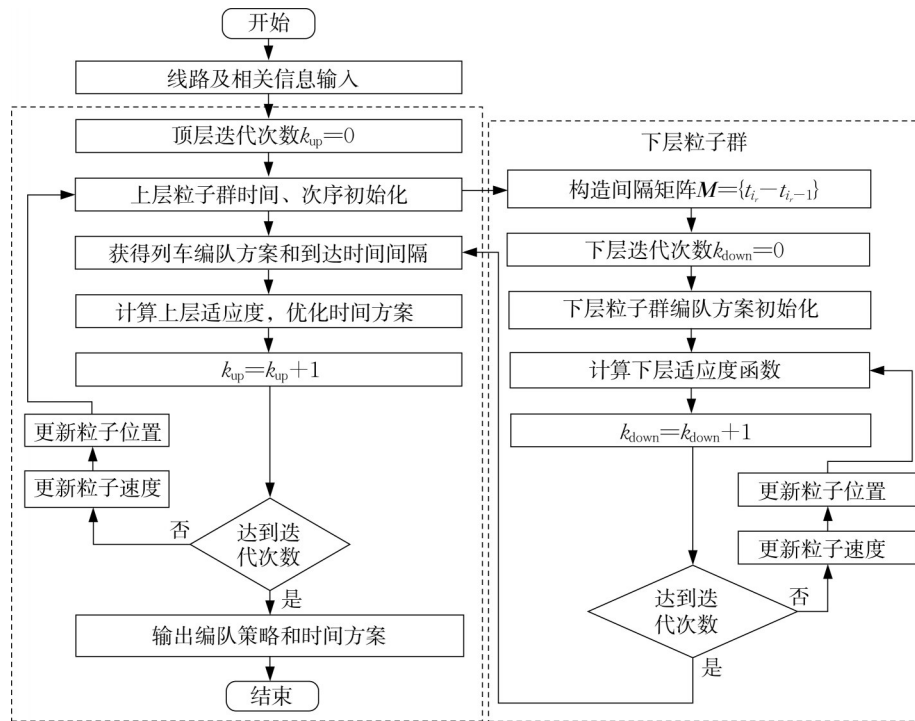


图5 基于双层嵌套粒子群算法的列车编队模型求解流程

Fig.5 Flow chart of train marshaling modeling based on bi-level nested particle swarm algorithm

步骤1 输入迭代次数、种群大小、更新速度等参数,线路信息、列车参数、发车时间窗和服务周期等系统信息参数以及相应的约束条件。

步骤2 上层粒子群生成的初始种群表示汇入时

间,作为上层粒子和传递粒子,传入下层粒子群算法。

步骤3 下层粒子群步骤中根据上层传入的汇入时间,构建列车时间间隔矩阵,并生成下层粒子群初

始种群,表示列车编队属性、编队位置和编队速度。

步骤4 对下层模型进行编队适应度计算,优化列车编队协调距离、编队安全性和大小编队均衡性。

步骤5 返回列车编队属性和下层适应度函数值,计算上层模型车队通过适应度,并检验上层模型约束。

步骤6 对上层粒子的速度和位置利用交叉变异进行更新处理,形成新的粒子,再传入下层模型。

步骤7 直到迭代至上下层设置的最大迭代次

数,否则迭代次数加1,并转到步骤3。

5 仿真算例分析

5.1 仿真基础数据

应用仿真案例说明所提方法的有效性。选取上海地铁某线路的双线交汇区段进行模型验证,算法所需相关参数如表2所示。

表2 仿真数据

Tab.2 Simulation data

H_0/s	H_{vc}/s	$v_{cu}/(m \cdot s^{-1})$	$v_{lim}/(m \cdot s^{-1})$	$a_{tra}/(m \cdot s^{-2})$	t_{work}/s	L_{length}/km	S_{vc}/m	L_{train}/m
100	10	22	9	0.8	38	2	50	120

5.2 结果分析

5.2.1 算法收敛性与迭代结果

为讨论双层嵌套粒子群算法的收敛性,设置首车汇入时间偏离 $\alpha=0s$,各支线路以1:1的方式发车, $T_{1,0}=T_{2,0}=120s$ 。上层种群数目为30,最大迭代次数为300;下层种群数目为30,最大迭代次数为300。粒子群算法的收敛过程如图6所示,算法可以在较小迭代次数内收敛。

5.2.2 列车编队优化结果和效益

根据基础仿真数据,各支线路以1:1的方式发车,随着首车发车时间偏移和运行周期增加,编队结构优化的列车群在交汇区段通过时间较既有模式提升,如图7a所示。仿真结果表明,在较小的运行周期和首车时间偏移范围内,列车组成编队可以有效提高交汇区段的通过能力。受发车时间窗的限制,当支线路列车周期小于120s时,列车难以组成车队,而当列车在支线路的基础周期大于170s时,组编运

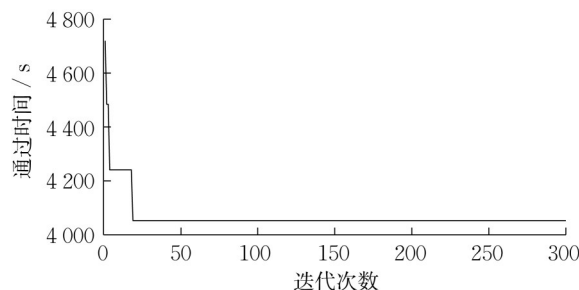
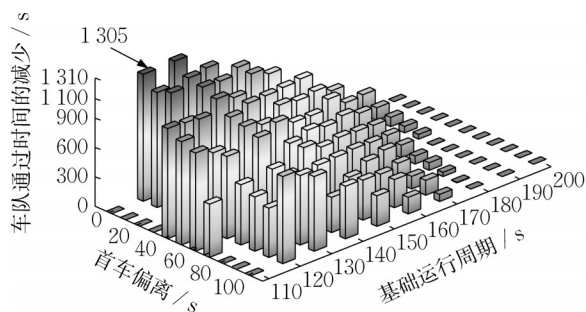


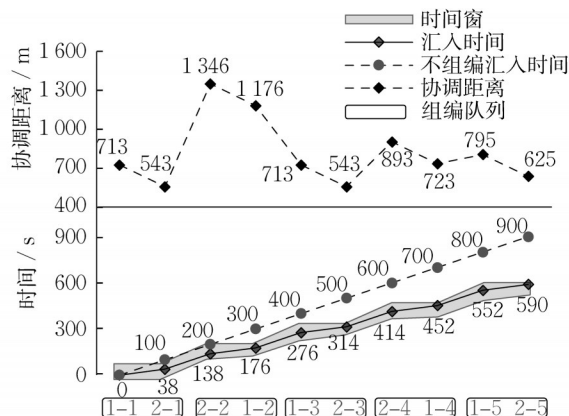
图6 双层嵌套粒子群算法的计算结果与迭代过程

Fig.6 Calculation results and iterative process of bi-level nested particle swarm algorithm

行的收益就不再明显。时间偏移 $\alpha=0s$ 和运行周期 $T_{1,0}=T_{2,0}=120s$ 时列车编队结果如图7b所示。当交汇区段通过能力确定时,若不组编则分支线路至少要保证2倍的交汇区段服务间隔,相比之下组编方式可以使列车在分支线路以120~179s的服务周期内发车,并在交汇区段获得不同程度的通过效率提升。



a 相比于既有模式列车编队总体通过时间的减少



b 优化后的列车编队结果

图7 列车编队效益和编队结果

Fig.7 Train marshaling efficiency and results

5.2.3 组编协调速度与编队优化分析

根据列车编队模型,协调速度与编队效率呈现非线性关系。为讨论协调速度对列车编队效率的影响,当 $\alpha=0$ s和运行周期 $T_{1,0}=T_{2,0}=130$ s时,对可选范围内固定组编协调速度所计算的编队模型进行仿真。编队结果如图 8 所示,与双层编队模型计算的可变协调速度下的列车通过时间进行了对比。仿真结果表明,可变协调速度下的组编运行在多场景下具有更优效率,但不是固定协调速度越大编队效果越好,在固定协调速度为 $12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时接近可变协调速度优化效果。

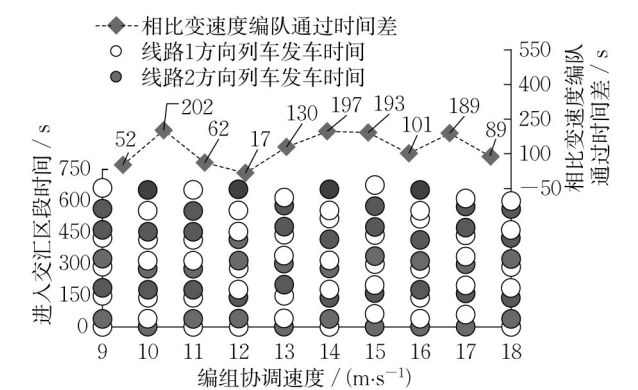


图 8 固定协调速度与变速度列车编队通过时间差
Fig.8 Difference of traveling time between trains with fixed and variable coordination speeds

5.2.4 编队质量与编队效果分析

通过双层优化模型的嵌套交互过程,可以在优化通过效率的同时提高编队质量。与只优化上层通过效率时的结果进行对比,结果如图 9 所示。随着运行周期和首车时间偏移的增加,考虑编队质量的双层优化模型有更优的通过效率。上层优化模型较双层优化模型效果最好的情况是: $\alpha=80$ s,运行周期 $T_{1,0}=T_{2,0}=120$ s,此时 2 种编队方法的编队属性和编队指标结果如表 3 所示。其中,编队属性表示列车所属车队、在车队中的位置。虽然双层优化模型延长了部分列车通过时间,但是具有更优的编队稳定性和均衡性。

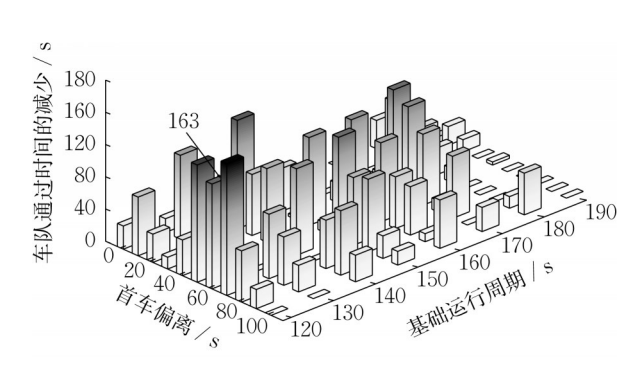


图 9 上层优化模型比双层优化模型通过时间的减少
Fig.9 Traveling time reduction of upper optimization model compared with bi-level optimization model

表 3 双层编队与单层编队模型结果对比

Tab.3 Comparison of results between upper optimization model and bi-level optimization model															
汇入时间/s		协调速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)		编队属性		协调距离/m		总通过时间/s		总相对动能		不均衡性		总协调距离/m	
仅上层	双层	仅上层	双层	仅上层	双层	仅上层	双层	仅上层	双层	仅上层	双层	仅上层	双层	仅上层	双层
11	43	16	9	(1,1)	(1,1)	197	1 445								
111	113	14	10	(2,1)	(1,2)	1 919	1 275								
157	213	13	12	(2,2)	(2,1)	1 749	972								
257	251	12	13	(3,1)	(2,2)	1 589	802								
302	351	9	10	(3,2)	(3,1)	1 419	1 159								
402	389	14	10	(4,1)	(3,2)	1 012	989	4 634	4 798	119	26	0.66	0	8 538	8 887
440	489	9	10	(4,2)	(4,1)	842	713								
540	527	14	13	(5,1)	(4,2)	795	543								
640	627	12	12	(6,1)	(5,1)	625	1 346								
740	665	17	11	(7,1)	(5,2)	213	1 176								

6 结语

针对虚拟编组列车在双线交汇区段上的冲突化解与通过效率问题,提出了多种速度组编协调策略,并建立了考虑运输需求和系统限制的列车编队双层优化模型,同时优化列车编队效率和编队质量。结果表明:所提的双层嵌套粒子群算法可以在较小迭代次数内得到

稳定解,在较小的运行周期和首车时间偏移范围内列车组成编队,较既有模式有效提高交汇区段的通过能力;协调速度与编队效率呈现非线性关系,可变协调速度的组编运行在多场景下具有更优效率;相比仅优化通过效率的编队模型,考虑编队质量的双层优化模型虽然在部分场景下延长了列车通过时间,但是可以提高虚拟编组编队稳定性和均衡性。

作者贡献声明:

宁 正:模型算法提出,最终版本修订。

张 雷:研究问题提出,框架设计。

何积丰:学术指导。

参考文献:

- [1] HALTUF M. Shift2Rail JU from member state's point of view [J]. *Transportation Research Procedia*, 2016, 14: 1819.
- [2] FANG T, CHEN J, ZHANG Y. Content-aware multi-subtask offloading: a coalition formation game-theoretic approach [J]. *IEEE Communications Letters*, 2021, 25(8): 2664.
- [3] LIU Y, LIU R, WEI C, *et al.* Distributed model predictive control strategy for constrained high-speed virtually coupled train set [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, 71(1): 171.
- [4] AOUN J, QUAGLIETTA E, GOVERDE R M, *et al.* A hybrid Delphi-AHP multi-criteria analysis of moving block and virtual coupling railway signaling [J]. *Transportation Research, Part C: Emerging Technologies*, 2021, 129: 103250.
- [5] NOLD M, CORMAN F. Dynamic train unit coupling and decoupling at cruising speed: systematic classification, operational potentials, and research agenda [J]. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 2021, 18: 100241.
- [6] DI MEO C, VAIO M D, FLAMMINI F, *et al.* ERTMS/ETCS virtual coupling: proof of concept and numerical analysis [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2020, 21(6): 2545.
- [7] SCHUMANN T. Increase of capacity on the Shinkansen high-speed line using virtual coupling [J]. *International Journal of Transport Development and Integration*, 2017, 1(4):666.
- [8] YONG Z, SIRUI Z. Typical train virtual coupling scenario modeling and analysis of train control system based on vehicle-vehicle communication [C]//IEEE 6th International Conference on Control Science and Systems Engineering (ICCSSE). Piscataway: IEEE, 2020: 143-148.
- [9] PAN J, PENG Q, ZHAN S, *et al.* Multiscenario-based train headway analysis under virtual coupling system [J]. *Journal of Advanced Transportation*, 2021, 2021: 1.
- [10] LIU Y, OU D, YANG Y, *et al.* A method for maintaining virtually coupled states of train convoys [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 2023, 237(2): 243.
- [11] ZHANG Y, WANG H. Topological manifold-based monitoring method for train-centric virtual coupling control systems [J]. *IET Intelligent Transport Systems*, 2020, 14(2): 91.
- [12] KETPHAT N, WHITEING A, LIU R. State movement for controlling trains operating under the virtual coupling system [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 2022, 236(2): 172.
- [13] SCHWERDFEGER S, OTTO A, BOYSEN N. Rail platooning: scheduling trains along a rail corridor with rapid-shunting facilities [J]. *European Journal of Operational Research*, 2021, 294(2): 760.
- [14] LIU L, WANG P, WANG Y, *et al.* Dynamic train formation and dispatching for rail transit based on virtually coupled train set [C]//2019 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC). Piscataway: IEEE, 2019: 2823-2828.
- [15] 曹源, 温佳坤, 马连川. 重大疫情下的列车动态编组与调度 [J]. *交通运输工程学报*, 2020, 20(3): 120.
CAO Yuan, WEN Jiakun, MA Lianchuan. Dynamic marshalling and scheduling of trains in major epidemics [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2020, 20(3): 120.
- [16] 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.
- [17] 杨安安, 汪波, 陈艳艳, 等. 基于能力影响的城市轨道交通跨线列车开行方案研究 [J]. *交通运输系统工程与信息*, 2017, 17(6):221.
YANG An'an, WANG Bo, CHEN Yanyan, *et al.* Plan of cross-line train in urban rail transit based on the capacity influence [J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2017, 17(6):221.
- [18] LIANG K-Y, MARTENSSON J, JOHANSSON K H. Heavy-duty vehicle platoon formation for fuel efficiency [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2016, 17(4): 1051.
- [19] LIU H, YANG L, YANG H. Cooperative optimal control of the following operation of high-speed trains [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, 23(10): 17744.
- [20] XUN J, CHEN M, LIU Y, *et al.* An overspeed protection mechanism for virtual coupling in railway [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 187400.
- [21] 赵子洪. 面向服务间隔时间的列车运行图优化方法研究 [J]. *铁道运输与经济*, 2019, 41(7): 33.
ZHAO Zihong. A research on train diagram optimization method oriented to service interval time [J]. *Railway Transport and Economy*, 2019, 41(7): 33.