

doi:10.11835/j.issn.1000.582X.2023.07.009

# 新型列控系统列车追踪间隔的优化及效能评估

朱爱红<sup>1</sup>, 何明明<sup>1</sup>, 袁小梅<sup>2</sup>, 舒豪<sup>3</sup>

(1. 兰州交通大学自动化与电气工程学院, 兰州 730070; 2. 西安铁路集团西安高铁基础设施段, 西安 710018; 3. 兰州铁路集团银川电务段, 银川 750021)

**摘要:**为了解决地铁列车运力不足, 缩短列车追踪间隔, 提出了新型列控系统、相对移动闭塞和协同运行三者相结合的方法, 构建了列车通信协同运行模型。在该模型下, 精细化前后列车冲突区域, 对正线和站后折返最小追踪间隔分别优化建模, 提出缩短追踪间隔的行车策略。经实际线路仿真计算, 相比基于通信的列车运行控制系统(communication based train control, CBTC)列车通过能力提升了 32.3%, 且 4A 编组可以满足 79.9 s 的行车间隔。考虑缩短行车间隔对运营效能的影响, 将运营效能量化为运输率、满载率、单位能耗、等车时间, 对不同行车方案进行评估。结果表明, 对于单向小时断面客流量小于 6.4 万的线路, 通过调节行车间隔, 4A 编组在满足满载率下, 比 6A、8A 编组能耗更小, 等车时间更短。

**关键词:**新型列控系统; 城市轨道交通; 优化模型; 追踪间隔; 效能评估

**中图分类号:** U284.48; U292.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-582X(2023)07-086-11

## Optimization and efficiency evaluation of new train control system of headway

ZHU Aihong<sup>1</sup>, HE Mingming<sup>1</sup>, YUAN Xiaomei<sup>2</sup>, SHU Hao<sup>3</sup>

(1. School of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, P. R. China; 2. Xi'an High-speed Railway Section, Xi'an Railway Bureau, Xi'an 710018, P. R. China; 3. Yinchuan Signal & Communication District, Lanzhou Railway Bureau, Yinchuan 750021, P. R. China)

**Abstract:** In order to solve the problem of subway train capacity shortage and reduce the train headway, a method combining a new train control system, relative mobile blocking and cooperative operation is proposed. A cooperative operation model for train communication is constructed, which focuses on refining the conflict area between the front and rear trains. Additionally, the model optimizes and models the minimum headway of the mainline and the turnaround after the station. A driving strategy is also proposed to further shorten the headway. Through simulation calculations on an actual line, it is found that the train passing capacity improves by 32.3% compared with the Communication Based Train Control System. Furthermore, the 4A marshaling can achieve a headway of 79.9 s. Considering the impact of shortening the headway on operational efficiency, the operational efficiency is quantified as transportation rate, full load rate, unit energy consumption, waiting time, and different driving schemes are evaluated. The results indicate that for lines with a one-way hourly passenger flow of less

收稿日期: 2021-03-12 网络出版日期: 2022-11-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52162050); 中国国家铁路集团科技研究开发计划系统性重大项目(P2021T003)。

Supported by National Natural Science Foundation of China (52162050), Systematic major project of Science and Technology research and Development Plan of China Railway (P2021T003).

作者简介: 朱爱红(1969—), 女, 副教授, 主要从事交通信息及控制方向研究, (E-mail) 791338890@qq.com。

than 64 000, the 4A marshaling scheme consumes less energy compared to the 6A and 8A marshaling schemes, and reduces the waiting time when the full load rate is satisfied.

**Keywords:** new train control system; urban rail transit; optimization model; headway; efficacy evaluation

随着城市化的发展,在出行集中的早晚高峰时期,地铁列车满载率居高不下,乘客滞留现象普遍存在<sup>[1]</sup>。解决地铁列车运力不匹配,关键就在于缩短追踪间隔,同时还需考虑缩短追踪间隔对运营效能的影响。近年来,随着新型列控系统的研发和逐步成熟<sup>[2-4]</sup>,缩短追踪间隔有了新的研究方向。蔡伯根等<sup>[5]</sup>设计了一种动态间隔可调整的列控系统架构,提出三级告警机制的列车追踪预警方法,用于列车追踪间隔的安全监控。付文秀等<sup>[6]</sup>提出了基于强化学习的新型列控系统区间行车间隔控制方法,在相对移动闭塞下追求列车区间运行过程中速度的自适应调节。Schumann<sup>[7]</sup>提出在列车运行中建立列车的虚拟重联,将虚拟重联后的多组列车当作一组列车在运行,提高线路运营效率。吴殿华等<sup>[8]</sup>分析并计算了基于车车通信列车运行控制系统(vehicle based train control system, VBTC)的折返能力。

基于新型列控系统,现有研究的动态间隔控制在列车追踪运行中,未考虑过站和折返的追踪;安全保障旨在预警防控,没有再建安全联控;列车折返能力旨在折返区的精细化计算,缺乏对整条线路运能的研究。文中根据VBTC系统的特点,结合列控和行车条件来研究全线动态间隔和安全联控问题,提出无需编组的列车协同运行模型;再分别对列车正线、站后折返最小追踪间隔进行优化建模,缩短追踪间隔,并匹配各区段运能;最后,将运营效能量化为运输率、满载率、单位能耗和等车时间,验证缩短追踪间隔对运营效能的优势。

## 1 列车通信协同运行

新型列控系统的特点是互相通信的列车可以共享速度、位置、加速度等信息,通过对象控制器(object controller, OC)采集和控制地面设备<sup>[9]</sup>。其研究方向是列车可以结合线路、行车计划和前后列车信息自主运行<sup>[10]</sup>。多列车协同运行能够增大线路行车密度,提高线路的运载能力<sup>[11]</sup>。文中将在列车自主运行中构建列车通信协同运行模型。

### 1.1 确定移动授权终点

移动授权(movement authority, MA)终点位置的确定直接影响列车追踪间隔。MA延伸的终点是由车载系统判定的行车障碍物所决定的。由于新型列控系统中MA的生成由车载系统自主完成,缩短了通信链路,增加了可靠性、实时性<sup>[12]</sup>,下面将行车障碍物区分为静态障碍物和动态障碍物来讨论其MA终点。

将列车车载系统在线路上未锁定资源(道岔、虚拟轨道区段、屏蔽门、信号点等)、未建立车车通信链路的前车和线路入侵异物等判定为静态障碍物。MA计算终点是静态障碍物,列车制动曲线终点在静态障碍物前方,与障碍物保留一定的安全距离。静态障碍物MA计算示意图,如图1所示。

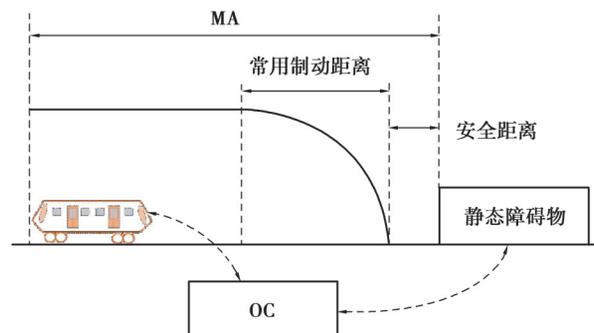


图1 静态障碍物MA计算示意图

Fig. 1 Static obstacle MA calculation diagram

将完成车车通信链路的前车判定为动态障碍物,后车MA的计算终点是前车预定紧急制动停车后车尾的位置,列车制动曲线的终点在前车停车后其尾部的前方,与前车车尾留有一定的安全距离。动态障碍物移动授权计算示意图,如图2所示。此时,前后车为相对移动闭塞行车制式。

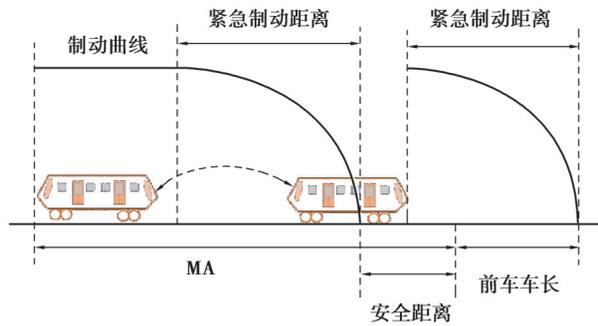


图2 动态障碍物移动授权计算示意图

Fig. 2 Dynamic obstacle MA calculation diagram

### 1.2 构建列车通信协同运行模型

列车通信协同运行模型,如图3所示。在列车运行过程中,采用三级安全联控模式。首先,列车根据行车计划和临时调度周期性地更新规划的行车路径,一是为锁定路径提供规划,二是确保与线路上其它列车在路径上无时空冲突。然后,列车按照规划路径周期性地从前往后依次占用并控制线路设备,线路设备状态符合行车条件后锁定路径。列车路径锁定不考虑正常的前车占用,如1车、3车的路径锁定,越过前车分别至冲突道岔和列车的通信边界,前后列车共同锁定不冲突设备,可提高行车效率,也可提前得知设备状态保证安全。最后,根据不同类型的障碍物,按1.1节计算MA,列车周期性地探寻车车通信范围内前后方的唯一相邻列车。无车或车车通信不畅通,列车按绝对移动闭塞大间隔自主运行;有车且通信良好,建立车车通信链路,前后列车按相对移动闭塞小间隔行车。小间隔行车时,后车可根据前车的实时状态信息,调整两车相对速度和追踪间隔,达到前后列车协同运行。

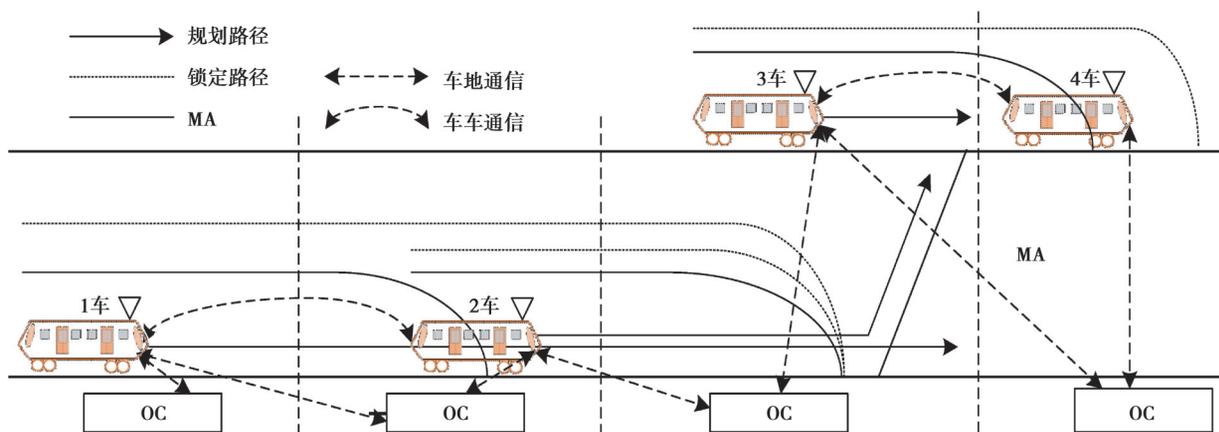


图3 列车通信协同运行模型

Fig. 3 Train communication cooperative operation model

在列车通信协同运行模型中,对于地铁列车,出库时可自主管控线路资源并实时调整本车的速度、相对位置和加速度,提升地铁列车出库能力;折返和过站时,可精细化站台和道岔冲突区域,缩短行车间隔;区间运行时,可根据运营需求实时调整行车策略。

## 2 最小追踪间隔

地铁列车的通过能力由正线通过能力和折返能力决定。正线通过能力和折返能力的核心是追踪间隔。在通信协同运行模型中,分别对列车正线最小追踪间隔和折返最小追踪间隔进行优化建模,并写出各区段最小追踪间隔的表达式。

### 2.1 构建正线最小追踪间隔模型

正线最小追踪间隔分为区间最小追踪间隔和过站最小追踪间隔。区间最小追踪间隔模型如图 4 所示。最小追踪间隔的计算场景为前车一旦紧急制动,后车通过车车通信得到前车的制动信息,立即采取紧急制动,两车须始终保持安全距离。

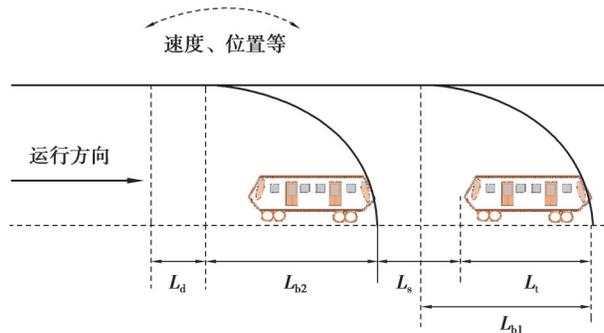


图 4 区间最小追踪间隔模型

Fig. 4 Section minimum headway model

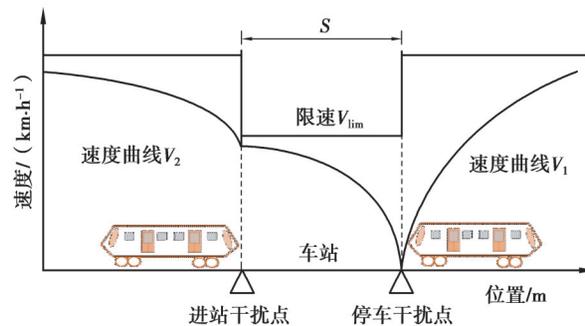


图 5 过站最小追踪间隔模型

Fig. 5 Passing station minimum headway model

区间最小追踪间隔距离  $L_Q$  和区间最小追踪间隔  $T_Q$  可表示为

$$L_Q = L_d + L_{b2} + L_s + L_t - L_{b1}, \quad (1)$$

$$T_Q = \frac{L_s + L_t}{v_2} + \frac{v_2}{a_2} - \frac{v_1}{a_1} + t_d, \quad (2)$$

式中:  $L_d$  为后车通信及反应的走行距离;  $L_s$  为安全距离;  $L_t$  为列车车长;  $L_{b1}$  为前车紧急制动距离;  $L_{b2}$  为后车紧急制动距离;  $v_1$  为前车速度;  $v_2$  为后车速度;  $a_1$  为前车紧急制动减速度;  $a_2$  表示后车紧急制动减速度;  $t_d$  表示后车通信及反应的时间。

过站最小追踪间隔模型如图 5 所示。在车站有效长度两侧分别设置进站干扰点和停车干扰点。最小追踪间隔的计算场景为前车越过停车干扰点后,后车方可进入进站干扰点。过站最小追踪间隔  $T_G$  由前车停车时间  $T_{halt}$ 、前车启动越过停车点的时间  $T_{out}$  和后车从进站干扰点到停车点停车的时间  $T_{in}$  三部分组成。分别表示为

$$T_G = T_{out} + T_{halt} + T_{in}, \quad (3)$$

$$T_{\text{out}} = \sqrt{\frac{2L_1}{a_1}}, \quad (4)$$

$$T_{\text{in}} = \sqrt{\frac{2S}{a_2}}, \quad (5)$$

式中: $S$ 为进站干扰点到停车点的距离; $a_1$ 为前车加速度, $a_2$ 为后车减速度; $L_1$ 为前车车长。

列车经过进站干扰点停车时,速度过大无法保证安全停车,速度过小影响过站追踪间隔,需限制进站速度。进站速度  $V_{\text{lim}}$  为

$$V_{\text{lim}} = \sqrt{2a_2S}, \quad (6)$$

式中: $S$ 为进站干扰点与停车点的距离; $a_2$ 为后车的减速度。

## 2.2 构建折返最小追踪间隔模型

常见地铁折返站有站前折返和站后折返。对于同等规模车站,一般站后折返要明显优于站前折返<sup>[13]</sup>。只计算站后折返最小追踪间隔。站后折返最小追踪间隔模型,如图6所示。为精细化折返冲突区域,折返站增设虚拟信号点。将列车锁定的信号虚拟点作为轨旁设备,实时与列车通信并交换位置信息。虚拟信号点  $A$ 、 $B$  分别为道岔直股和弯股的岔前及岔后分界点,虚拟信号停车点1、停车点2和停车点3均设在岔前5 m处。最小追踪间隔的计算场景为前车越过虚拟信号点  $B$  后,后车控制1#道岔转换并给出表示,附加道岔故障的安全距离,后车方可进入虚拟信号点  $A$ 。

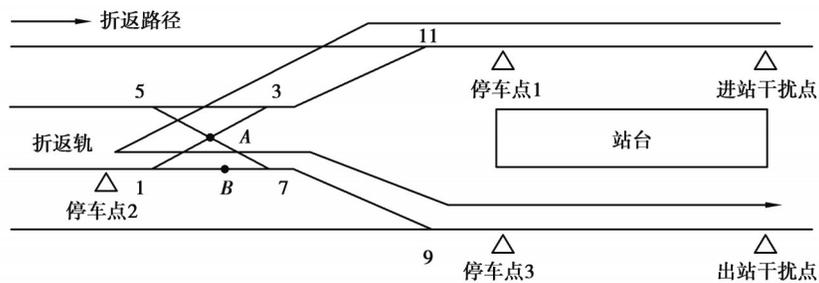


图6 站后折返最小追踪间隔模型

Fig. 6 Station-end turn-back minimum headway model

站后折返最小追踪间隔示意,如图7所示。折返最小追踪间隔  $T_z$  由4部分组成,分别为前车从  $A$  点到越过停车点2的时间  $t_2$ 、1#道岔从反位转到定位的时间  $t_3$ 、前车从停车点2越过  $B$  点的时间  $t_4$  和前车离开  $B$  点后车到达  $A$  点的时间  $t_6$ ,表达式为

$$T_z = t_2 + t_3 + t_4 + t_6, \quad (7)$$

$$t_2 = \sqrt{\frac{2l_1}{a_{11}}} + \frac{L_1 + L_t - l_1}{v_1}, \quad (8)$$

$$t_4 = \sqrt{\frac{2l_2}{a_{12}}} + \frac{L_2 + L_t - l_2}{v_1}, \quad (9)$$

$$t_6 = t_c + \frac{v_2}{2a_2} + t_d, \quad (10)$$

式中: $l_1$ 为前车制动距离; $l_2$ 为前车启动加速距离; $a_{11}$ 为前车制动减速度; $a_{12}$ 为前车启动加速度; $a_2$ 为后车紧急制动减速度; $L_1$ 为  $A$  点到停车点2的距离; $L_2$ 为停车点2到  $B$  点的距离; $L_t$ 为前车车长; $v_1$ 为前车岔区速度; $v_2$ 为后车岔区速度; $t_c$ 为后车控制道岔从定位转换到反位的时间; $t_d$ 表示通信及反应时间。

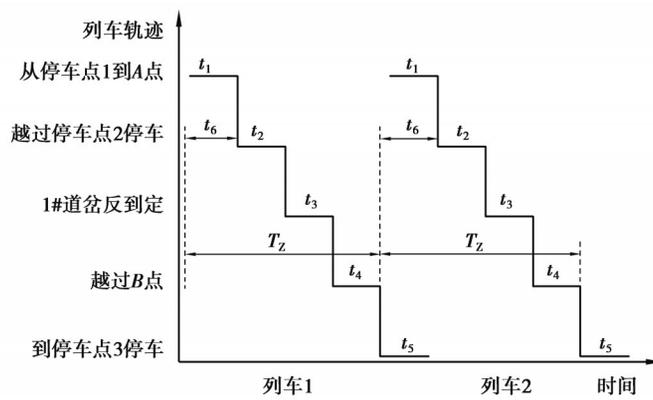


图 7 站后折返最小追踪间隔示意图

Fig. 7 Station-end turn-back minimum headway diagram

### 3 案例分析

根据实际线路数据,分析影响最小追踪间隔的因素,采用 Matlab 平台对上述模型进行仿真优化。量化运营效能,根据具体客运量评估不同列车编组和行车间隔的运营效能,分析追踪间隔对运营效能的影响。

#### 3.1 追踪间隔优化

选取某市地铁线路 A 进行研究,线路有 14 个车站,终端均为站后折返。选取最不利车站和折返站来仿真计算各个区段的最小追踪间隔。假设,前车和后车的性能均一致且协同运行,根据图 6 设定折返站参数,仿真参数如表 1 所示。

表 1 土建、车辆仿真参数

Table 1 Civil engineering and vehicle simulation parameters

土建参数	取值	车辆参数	取值
区间允许速度	80 km/h	车长	140 m
岔区允许速度	35 km/h	最大加速度	0.8 m/s <sup>2</sup>
进站干扰点 1 到停车点	145 m	常用制动减速度	0.8 m/s <sup>2</sup>
停车点 1 到 A 点	116.4 m	紧急制动减速度	0.9 m/s <sup>2</sup>
A 点到停车点 2	18.8 m	通信及反应时间	3 s
停车点 2 到 B 点	18.8 m	安全距离	55 m
B 点到停车点 3	116.4 m	列车编组	6 A
道岔转换时间	11 s	列车停站时间	30 s

对于区间最小追踪间隔模型,根据式(2)可知,在安全距离、通信及反应时间和紧急制动加速度特定条件下,影响列车追踪间隔的动态因素有列车速度和前后列车相对速度。列车区间最小追踪间隔曲线如图 8 所示,车长为 6A 编组,速度分别取前车速度的 0.8 倍、1.0 倍和 1.2 倍。可见,当两列车速度越大或后车速度比前车速度越大时,均能缩小区间追踪间隔。

对于过站最小追踪间隔模型,根据式(3)~式(5)可知,在车站长度和停站时间特定条件下,影响列车追踪间隔的动态因素有列车加速度和列车车长。列车过站最小追踪间隔曲线如图 9 所示,当列车加速度越大或列车编组越短时,均能缩小区间追踪间隔。

对于站后折返追踪间隔模型,根据式(8)~式(10)可知,在土建、列车最大加速度、通信及反应时间特点条件下,影响列车追踪间隔的动态因素有列车岔区的允许速度和列车的编组长度。列车站后折返最小追踪间隔曲线如图 10 所示。列车编组长度越短,追踪间隔越小;过岔速度小于 35 km/h 时,过岔速度越大,追踪间隔越小。

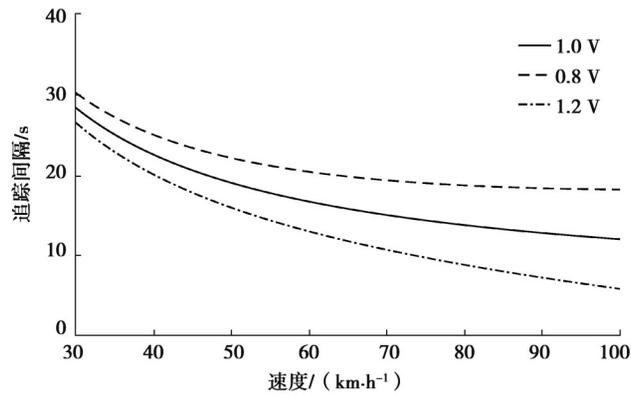


图8 列车区间最小追踪间隔曲线

Fig. 8 Train section minimum headway curve

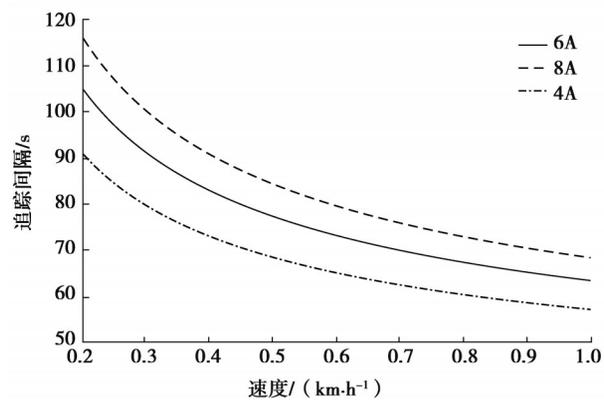


图9 列车过站最小追踪间隔曲线

Fig. 9 Train passing station minimum headway curve

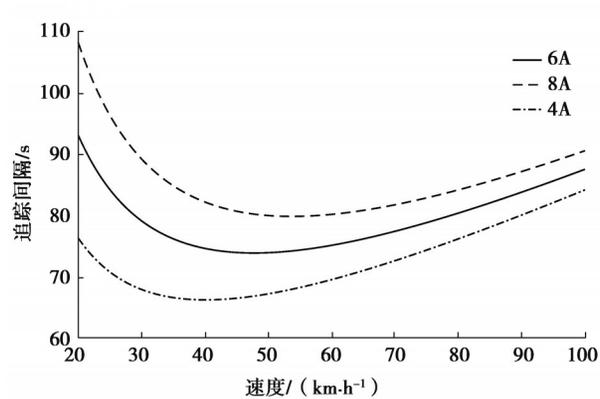


图10 列车站后折返最小追踪间隔曲线

Fig. 10 Train Station-end turn-back minimum headway curve

根据图8~图10拟定各区段最小追踪间隔行车策略。列车区间追踪运行时,前后列车以相同最大速度运行;列车过站追踪运行时,前车以最大加速度启动出站;出站后,后车以限定最大速度进站,直到停车点;列车站后折返追踪运行时,列车到达折返轨停车点前和启动离开折返轨都以最大加速度运行,岔区以道岔弯股最大允许速度运行。

根据表1的参数及拟定的行车策略,仿真计算列车通信协同模型下各区段最小追踪间隔。同等条件下,仿真计算CBTC系统中各区段最小追踪间隔。各区段最小追踪间隔仿真计算结果,如表2所示。

表2 最小追踪间隔仿真计算结果  
Table 2 Simulation results of minimum headway

追踪间隔/%	CBTC	新型列控	节时/%
区间最小追踪间隔 $T_Q$	38.6	13.8	64.2
过站最小追踪间隔 $T_G$	85.4	67.4	21.1
站后折返最小追踪间隔 $T_Z$	112.5	76.2	32.3

在列车追踪运行的情况下,计算线路通过能力  $N_{\max}$  的一般公式为 3 600 s 与列车最小追踪间隔  $t$  的比值为

$$N_{\max} = \frac{3\ 600}{t} \quad (11)$$

由表2可知,通信协同模型中,折返追踪间隔 76.2 s 为此线路的最小追踪间隔,代入式(11)得出线路通过能力为 47 车/h,相比 CBTC 系统,线路通过能力提升了 32.3%。过站最小追踪间隔与折返最小追踪间隔相差 8.8 s,列车可适当减小进出站加速度,既可以增加舒适度,也可以匹配区间行车策略,常见的区间行车策略是混合控制策略<sup>[4]</sup>。区间最小追踪间隔与折返最小追踪间隔相差 62.4 s,列车可根据具体差值调节行车策略,也可为意外事故的调度提供弹性空间,匹配折返追踪间隔。

### 3.2 追踪间隔效能评估

基于运营成本和客流服务,不同的客流量需对应不同行车间隔和不同列车编组<sup>[15]</sup>。综合图9和图10可知,随着列车编组的变短,列车最小追踪间隔也明显变短。4A 编组列车的最小追踪间隔是 66.6 s,按 120% 的安全裕量,可满足 79.9 s 的行车间隔。同理可得,6A、8A 编组列车分别可满足 91.4 s、101.9 s 的行车间隔。将运营效能量化为运输率、满载率、单位能耗、等车时间 4 个指标,来讨论缩短追踪间隔对运营效能的影响。选取上例线路中最大客流量 A 站的单向小时断面客流量进行仿真分析,参数如表3所示。

表3 客流、行车参数  
Table 3 Passenger flow and train operation organization parameters

客流参数	取值	行车参数	取值
高峰单向小时断面客流量	6.13 万	列车编组	4 A、6 A、8 A
平峰单向小时断面客流量	4.87 万	$k$	0.1 kW·h
低峰单向小时断面客流量	2.95 万	$e_{\text{单}}$	120 kW·h
乘客质量	60 kg	$\lambda_{\max}$	129%

运输率是指列车对一定乘客量的运输能力。对于地铁列车,客流量会规律性地出现高峰期、平峰期和低谷期。对不同客流量匹配不同行车间隔、不同列车编组,既可以满足乘客需求,又可以避免运输力浪费。运输率  $\mu$  可表达为单位时间内乘客运输量  $Q$  与列车运输能力  $M$  的比值。对于 A 型列车为

$$\begin{cases} M = 310 \times \lambda_{\max} \times n \times N, \\ \mu = \frac{Q}{M} \times 100\%; \end{cases} \quad (12)$$

式中: $\lambda_{\max}$  表示最大满载率,取 129%; $n$  表示编组节数; $N$  表示每小时发出去的列车对数。

满载率是指列车运载乘客的满载程度。满载率越高,代表列车乘载的旅客数量越多,意味着列车利用率越高。但过高的满载率会造成服务水平下降,也容易造成延误、安全等问题。根据地铁设计规范的规定,对于 A 型地铁列车,定员载客 310 人/节,超员载客 432 人/节。满载率  $\lambda$  可表达为每节实际承载量  $P$  与每节定员数量之间的比值。

$$\lambda = \frac{P}{310} \times 100\% \quad (13)$$

单位能耗是指列车在线路运行中每小时的电力消耗。一般情况下,在电力消耗当中列车的牵引耗电量

占整个运营过程中电力消耗的40%~60%，列车牵引能耗可看做克服乘客质量和克服列车自身质量两部分，前者视为有用功，后者视为无用功。根据相关研究，无论A型车还是B型车，无论车辆编组如何，列车总质量与列车牵引能耗呈线性关系<sup>[6]</sup>。单位能耗 $e$ 可表达为列车在线路运行1 h消耗的总能量。

$$e = e_{\text{单}} \times n \times N + k \times Q, \quad (14)$$

式中： $e_{\text{单}}$ 表示每小时空载节均能耗； $k$ 表示每增加一位乘客，牵引力每小时增加的能耗。

等车时间是指每位乘客在站台平均等待的时间。当站台无滞留乘客时，等车时间由行车间隔决定，根据概率分布，乘客的等车时间取行车间隔的1/2。对于运营效能而言，运输率已经涵盖了乘客滞留问题，而且滞留乘客相对客运量相当小，此处不再考虑。等车时间 $\tau$ 可表达为行车间隔 $T$ 的1/2。

$$\tau = \frac{T}{2}. \quad (15)$$

根据表3参数和可满足的行车间隔，分别对高峰期、平峰期、低峰期客流量拟定行车方案，如4A-1.5 min表示4节A型编组列车，发车间隔为1.5 min，间隔梯度取30 s。仿真计算不同方案的运输率、满载率、单位能耗和等车时间，结果如表4~表6所示。可见，在高峰期，4A编组行车间隔1.5 min时，没有乘客滞留，能耗最小，等车时间最短，比较拥挤；在平峰期，4A编组行车间隔1.5 min时，没有乘客滞留，等车时间最短，不拥挤，能耗只比6A编组行车间隔2.5 min大；在低峰期，4A编组行车间隔2 min时，没有乘客滞留，不拥挤，等车时间最短；4A编组行车间隔2.5 min时，没有乘客滞留，不拥挤，能耗最小。

综上所述，缩短追踪间隔后，4A编组可以满足最大线路单向小时断面6.4万以下的客运量，且4A编组对运行效能的优化更加灵敏，通过合理调整行车间隔，更易获得最优的运营效能。

表4 高峰期6.13万客流量不同方案的效能评估

Table 4 Efficiency evaluation of different schemes for peak passenger flow of 61,300

行车方案	运输能力 $M$ /万人	运输率 $\mu$	满载率 $\lambda$	单位能耗 $e$ /GWh	等车时间 $\tau$ /min
4A-1.5 min	6.4	95.8%	123.6%	25.3	0.75
4A-2 min	4.8	>1			
4A-2.5 min	3.8	>1			
6A-2 min	7.2	85.1%	109.9%	27.7	1.00
6A-2.5 min	5.7	>1			
6A-3 min	4.8	>1			
8A-2 min	9.6	63.9%	82.4%	34.9	1.00
8A-2.5 min	7.6	79.8%	103.0%	29.2	1.25
8A-3 min	6.4	95.8%	123.6%	25.3	1.50

表5 平峰期4.87万客运量不同方案的效能评估

Table 5 Efficiency evaluation of different schemes for flat peak passenger flow of 48,700

行车方案	运输能力 $M$ /万人	运输率 $\mu$	满载率 $\lambda$	单位能耗 $e$ /GWh	等车时间 $\tau$ /min
4A-1.5 min	6.4	76.1%	98.2%	24.1	0.75
4A-2 min	4.8	>1			
4A-2.5 min	3.8	>1			
6A-2 min	7.2	67.6%	87.3%	26.5	1.00
6A-2.5 min	5.7	84.5%	109.1%	22.2	1.75
6A-3 min	4.8	>1			
8A-2 min	9.6	50.7%	65.5%	33.7	1.00
8A-2.5 min	7.6	63.4%	81.8%	27.9	1.75
8A-3 min	6.4	76.1%	98.2%	24.1	1.50

表6 低峰期2.95万客运量不同方案的效能评估

Table 6 Efficiency evaluation of different schemes for low peak passenger flow of 29,500

行车方案	运输能力 $M$ /万人	运输率 $\mu$	满载率 $\lambda$	单位能耗 $e$ /GWh	等车时间 $\tau$ /min
4A-1.5 min	6.4	<0.5			
4A-2 min	4.8	61.5%	79.3%	17.4	1.00
4A-2.5 min	3.8	76.8%	99.1%	14.5	1.25
6A-2 min	7.2	<0.5			
6A-2.5 min	5.7	51.2%	66.1%	20.2	1.25
6A-3 min	4.8	61.5%	79.3%	17.4	1.50
8A-2 min	9.6	<0.5			
8A-2.5 min	7.6	<0.5			
8A-3 min	6.4	<0.5			

## 4 结 论

1)对列车自主运行设计了三级安全联控,共同保障行车安全。将车车通信的前车看做动态障碍物,计算移动授权时采用相对移动闭塞,后车移动授权终点可越过前车尾,从而缩短追踪间隔。后车根据前车实时信息,可实现与前车通信协同运行。

2)将前后列车过站冲突区域和折返冲突区域精细化建模,建立的最小追踪间隔模型通过仿真计算,可以满足案例线路4A编组66.6s的最小追踪间隔。区间最小追踪间隔远小于站后折返最小追踪间隔,可为线路事故提供弹性空间,避免列车延误影响后面列车。

3)通过不同编组和不同行车间隔方案对高峰期、平峰期和低峰期客运量的仿真计算,得出4A编组可以满足单向小时断面6.4万以下的客运量,运营效能优于6A和8A编组,可见短编组、小间隔的行车方案运营效能更优。

## 参考文献

- [ 1 ] 郇宁,张金萌,姚恩建.考虑效率与公平的城轨网络客流协同控制优化模型[J].东南大学学报(自然科学版),2020,50(6):1148-1155.  
Huan N, Zhang J M, Yao E J. Coordinated optimization model for passenger flow control in metro network considering both efficiency and equity[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2020, 50(6): 1148-1155.(in Chinese)
- [ 2 ] Liu Y, Yuan L. Research on train control system based on train to train communication[C]//2018 International Conference on Intelligent Rail Transportation (ICIRT). December 12-14, 2018, Singapore. IEEE, 2019: 1-5.
- [ 3 ] 张强,孙军国.基于车车通信的列车控制系统:CN110775110A[P].2020-02-11.  
Zhang Q, Sun J G. Train control system based on train-train communication: CN110775110A[P]. 2020-02-11.(in Chinese).
- [ 4 ] Zhao J H, Liu J, Ni S J, et al. Enhancing transmission on hybrid precoding based train-to-train communication[J]. Mobile Networks and Applications, 2020, 25(5): 2082-2091.
- [ 5 ] 蔡伯根,朱强,上官伟,等.动态间隔可调整的列控系统自主感知关键技术及应用[J].北京交通大学学报,2019,43(1):31-41.  
Cai B G, Zhu Q, Shangguan W, et al. Key technology and application of autonomous sensing for train control system with adjustable dynamic interval[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2019, 43(1): 31-41.(in Chinese)
- [ 6 ] 付文秀,李亚,吕继东,等.基于强化学习的新型列控系统区间行车间隔控制方法[J].北京交通大学学报,2021,45(5):63-73.  
Fu W X, Li Y, Lyu J D, et al. A new interval control method for train control system based on reinforcement learning[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2021, 45(5): 63-73.(in Chinese)
- [ 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): 666-676.

- [ 8 ] 吴殿华, 范永华, 李聪. 基于车车通信的城市轨道交通列车控制系统折返能力分析[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(4): 50-52.  
Wu D H, Fan Y H, Li C. Turn-back performance analysis of train-to-train based urban rail transit train control system[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(4): 50-52.(in Chinese)
- [ 9 ] Unterhuber P, Sand S, Fiebig U C, et al. Path loss models for train-to-train communications in typical high speed railway environments[J]. IET Microwaves, Antennas & Propagation, 2018, 12(4): 492-500.
- [ 10 ] Flammini F, Marrone S, Nardone R, et al. Towards railway virtual coupling[C]//2018 IEEE International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC). November 7-9, 2018, Nottingham, UK. IEEE, 2019: 1-6.
- [ 11 ] Muniandi G. Blockchain-enabled virtual coupling of automatic train operation fitted mainline trains for railway traffic conflict control[J]. IET Intelligent Transport Systems, 2020, 14(6): 611-619.
- [ 12 ] Yuan C, Ma L C, Ma W G. Mobile target tracking based on hybrid open-loop monocular vision motion control strategy[J]. Discrete Dynamics in Nature and Society, 2015, 2015: 1-10.
- [ 13 ] 张雨洁, 王文波. 地铁折返站折返能力计算及其参考图研究[J]. 铁道标准设计, 2020, 64(11): 141-148.  
Zhang Y J, Wang W B. In-depth study and reference diagram of metro turn-back station capacity[J]. Railway Standard Design, 2020, 64(11): 141-148.(in Chinese)
- [ 14 ] 徐凯, 吴磊, 赵梅. 多种群分层联合优化的城轨列车ATO研究[J]. 铁道学报, 2018, 40(6): 90-96.  
Xu K, Wu L, Zhao M. Study on urban rail train ATO based on unified optimization of multi-swarm hierarchical structure[J]. Journal of the China Railway Society, 2018, 40(6): 90-96.(in Chinese)
- [ 15 ] Azadi Moghaddam Arani A, Jolai F, Nasiri M M. A multi-commodity network flow model for railway capacity optimization in case of line blockage[J]. International Journal of Rail Transportation, 2019, 7(4): 297-320.
- [ 16 ] 常旭. 基于节能和面向乘客服务的城市轨道交通车辆选型模型研究[D]. 西安: 长安大学。  
Chang X. Study on the model of urban rail transit vehicle selection based on energy saving and service of passenger[D]. Xi'an: Changan University. (in Chinese)

(编辑 陈移峰)