

城市轨道交通移动闭塞列控系统列车追踪间隔研究<sup>\*</sup>闫丽霞<sup>1</sup> 高云波<sup>1</sup> 李云骢<sup>2</sup>

(1. 兰州交通大学自动化与电气工程学院, 730070, 兰州;

2. 北京通号城市轨道交通技术有限公司, 100070, 北京//第一作者, 硕士研究生)

**摘 要** 目前, 基于通信的移动闭塞列控系统作为轨道交通列控系统的主要发展方向, 在一定程度上缩短了列车之间的追踪间隔。追踪间隔的计算是列车生成移动授权的前提。列控系统中移动授权的发布由区域控制器来完成。列控系统中由于追踪模式的不同, 列车追踪间隔也会有差异, 从而影响移动授权生成, 影响行车效率。分析了列车移动授权生成原理, 研究了列车区间追踪场景下绝对追踪模式和相对追踪模式下的列车追踪间隔, 并进行了仿真。仿真分析结果表明: 相对追踪模式下列车生成的移动授权更大, 可以进一步缩小列车追踪间隔; 绝对追踪模式存在最优追踪速度。

**关键词** 城市轨道交通; 移动闭塞; 列控系统; 追踪间隔; 移动授权; 最优速度

**中图分类号** U231.7

DOI:10.16037/j.1007-869x.2020.03.009

## Train Tracking Interval of Moving Block Train Control System in Urban Rail Transit

YAN Lixia, GAO Yunbo, LI Yuncong

**Abstract** At present, the moving block train control system based on communication represents the main development direction of rail transit train control system, which shortens the train tracking interval to some extent. The calculation of the tracking interval is a prerequisite for the train to generate the mobile authorization, and the release of which in the train control system is completed by the zone controller (ZC). Due to different tracking modes in train control system, the train tracking intervals are also different, which will affect the generation of mobile authorization and the train operation efficiency. In this paper, the principle of train movement authorization generation is analyzed, the train tracking interval under absolute tracking mode and relative tracking mode in the train interval tracking scenario are studied and simulated respectively. The simulation analysis results show that the relative tracking mode can further reduce the train tracking interval, while the absolute tracking mode has the optimal tracking speed.

**Key words** urban rail transit; moving block; train control system; tracking interval; movement authority; optimal speed

**First-author's address** School of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, 730070, Lanzhou, China

目前, 城市轨道交通使用的列车控制系统主要有固定闭塞列控系统和移动闭塞列控系统<sup>[1]</sup>两种。与固定闭塞系统相比, 移动闭塞列控系统从很大程度上缩小了列车追踪间隔, 提高了行车效率, 是目前城市轨道交通列控系统的发展方向。

列车追踪间隔是制定列车运行图的重要组成部分。它作为列车发布移动授权(MA)的主要依据, 是列控系统最重要的性能指标之一<sup>[2-3]</sup>。列控系统中区域控制器(ZC)根据车载设备发送的本列车信息, 结合前行列车的信息实时计算追踪列车的移动授权, 从而为列车运行提供安全保障。移动授权是指列车运行过程中从列车头部到前方障碍物之间允许列车前行的一段距离<sup>[4]</sup>, 列车追踪运行过程中障碍物主要指前行列车。

## 1 列控系统 MA 生成原理

移动闭塞列控系统 MA 生成原理如图 1 所示。在移动闭塞列控系统中, ZC 根据接收到的本列车位置信息, 结合前行列车发送的位置信息, 得到列车运行前方的目标点信息, 从而进行 MA 的计算, 同时将计算完成的 MA 发送给车载设备。车载设备收到 MA 信息后, 根据一次连续式速度-距离曲线列车安全制动模型, 计算列车紧急制动触发速度, 并进行实时监督。当列车实际运行速度超过紧急制动触发速度时立即紧急制动, 从而保证列车在 MA 范围内安全停车。列车 MA 的含义如图 2 所示。

<sup>\*</sup> 2018 年兰州交通大学-天津大学创新基金项目(2018059)

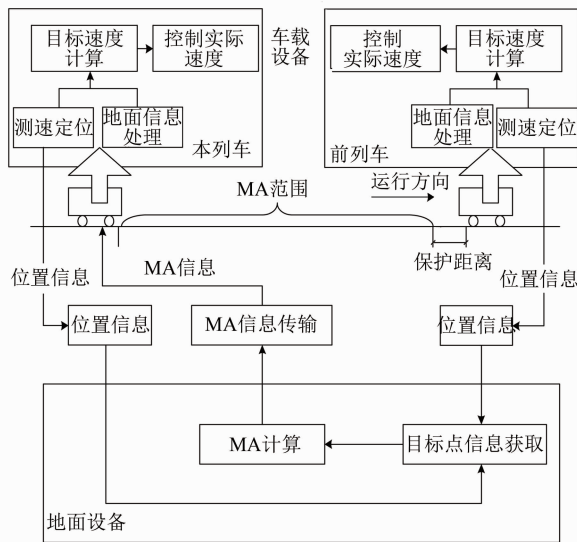


图1 移动闭塞列控系统 MA 生成原理

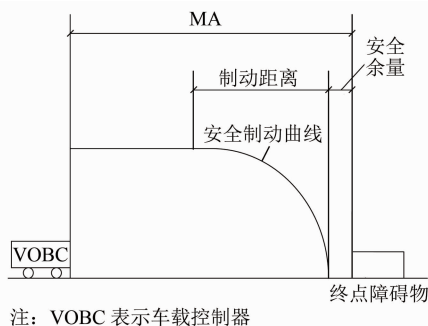


图2 列车 MA 的含义示意图

MA 的生成为列车提供了行车许可,列车正常运行时不能越过授权的移动闭塞分区。图2中列车运行前方终点障碍物包括进路终点、站台、列车等。一般情况下移动授权依据列车位置与运行方向、进路状态、前行列车位置等因素确定<sup>[5]</sup>。

列车追踪运行时,为防止列车碰撞,在计算 MA 时把列车运行前方进路上的其他列车看作障碍物。MA 就是在追踪列车之间形成追踪间隔,从而对行车安全起到防护作用。列车追踪间隔的计算为列车发布移动授权提供了依据。

## 2 列控系统列车追踪间隔计算

移动闭塞列控系统中,多辆列车在轨道上追踪运行时,追踪列车以运行前方列车车尾作为追踪目标点,从而保证列车在安全间隔内的行车安全。最小追踪间隔指后车速度不因前车受影响、以正常速度行驶到前车相同位置的时间间隔;最小追踪距离指最小追踪间隔下的列车间距离<sup>[6]</sup>。列车区间

追踪间隔计算有绝对追踪方式和相对追踪方式两种。出于安全考虑,目前列控系统列车追踪间隔的计算只考虑绝对追踪模型。

### 2.1 列车追踪间隔影响因素分析

列车追踪运行时,追踪间隔是动态变化的,且受如下众多因素的影响。

1) 闭塞制式:闭塞制式是决定追踪间隔的最主要的因素。为了减小追踪间隔、提高行车密度以满足高密度人流出行的需求,城市轨道交通中一般采用移动闭塞制式,并将固定闭塞作为信号系统的后备模式以保证设备故障时系统的安全性和可靠性<sup>[7]</sup>。

2) 线路因素:主要包括线路设计(是否是折返站)、线路限速、坡度及曲线半径等。

3) 进路类型:进路类型主要指通过进路、折返进路等。一般情况下列车进站时需要一定的停站时间,列车折返时也比较耗时,因而会影响列车追踪间隔。

4) 车辆性能:车辆性能是影响列车追踪间隔的另一个重要因素,主要包括牵引/制动性能、最高速度等。

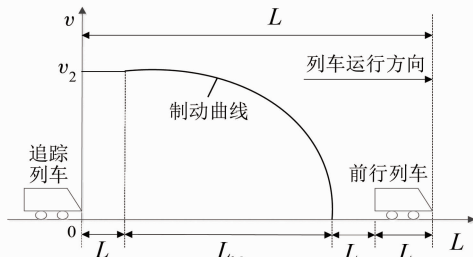
5) 信息传输时延:列控系统中实时进行着信息交互,移动授权信息经过无线通信系统下发到相应列车。列车运行过程中如果在一定时间内未收到前车的相关信息,将会采取制动以保证行车安全,列车不必要的制动会影响列车追踪间隔。

6) 定位技术:要得到实时、准确的列车位置信息,须依赖于精准的定位技术。

### 2.2 列车区间绝对追踪模型

绝对追踪模式只考虑前行列车的位置,不考虑其速度信息(前行列车相当于静态障碍物)。该模式下列车绝对追踪示意如图3所示。

此时  $L$  可以表示为:



注:  $v$  表示列车运行速度;  $L$  表示列车追踪间隔距离;  $L_r$  表示反应时间  $t_r$  (包括司机与车载设备) 内列车的走行距离;  $L_{b2}$  表示追踪列车以速度  $v_2$  开始制动运行的距离;  $L_s$  表示预留的列车安全距离;  $L_t$  表示列车长度

图3 区间列车绝对追踪模式示意图

$$L = L_r + L_b + L_s + L_t \tag{1}$$

则列车追踪间隔时间  $t$  表示为：

$$t = \frac{v_2}{a_2} + \frac{L_s + L_t + L_r}{v_2} \tag{2}$$

式中：  
 $a_2$ ——追踪列车的常用制动减速度。

### 2.3 列车区间相对追踪模型

在实际列车追踪运行过程中,前行列车的位置和速度都在实时发生变化<sup>[9]</sup>。相对追踪模型同时考虑了这两种列车信息的变化(前行列车相当于动态障碍物)。该模式下列车追踪间隔示意如图 4 所示。

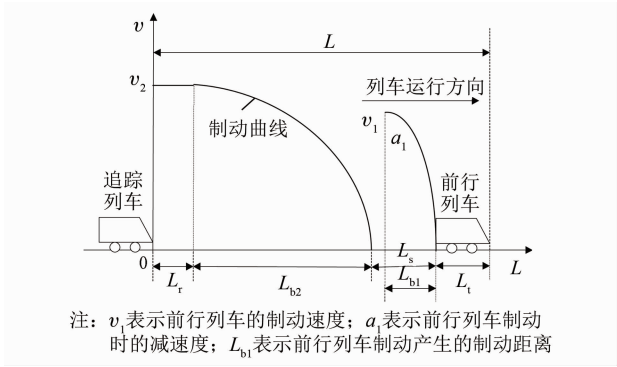


图 4 区间列车相对追踪模式示意图

由图 4 可知,该模式下的  $L$  与绝对追踪模式相比,考虑了  $v_1$ , 因此在计算  $L$  时亦需考虑  $L_{b1}$ 。

此时  $L$  可以表示为：

$$L = L_r + L_{b2} + L_s + L_t - L_{b1} \tag{3}$$

则  $t$  表示为：

$$t = \frac{v_2}{a_2} + \frac{L_s + L_t + L_r}{v_2} - \frac{v_1}{a_1} \tag{4}$$

相对追踪模式下,追踪列车的部分制动距离被前车占用,随着列车的运行,占用部分可以在追踪列车到来之前逐渐出清。该模式中,若  $v_1 \leq v_2$ ,追踪列车在考虑  $t$  时,追踪列车制动点相比绝对位置追踪模式有一定延迟,可以进一步缩小  $t$  (也称为“撞软墙”模式);若两站间距离很长,且  $v_1 > v_2$  时,追踪列车在不超速的情况下,可以不减速行驶甚至可以加速,直到行驶至制动点时再采取制动措施,追踪列车制动点进一步延迟,从而更大程度地缩小了  $t$  (也称为“撞大软墙”模式)。

相对追踪模式下,追踪列车的 MA 相比绝对追踪模式有向前延伸的部分,且延伸的部分被前行列车占用。如果前行列车不能及时出清区段,或因故

非正常制动,则很可能会造成列车相撞事故,因而其安全性与绝对追踪模式相比有待提高<sup>[10]</sup>。该模式下若列车间直接通信能够实现将可大大提高其安全性,D2D (Device-to-Device, 终端直通信)技术的发展将为列车相对追踪模式的应用提供支撑。

### 3 仿真分析

根据上文建立的列车区间追踪模型,采用 Matlab 仿真工具对两种模型下的  $t$  进行求解。选取的列车区间追踪模型参数如表 1 所示。

表 1 列车区间追踪模型参数

参数	取值
$L_t/\text{m}$	117.0
$L_r/\text{m}$	60.0
$L_s/\text{m}$	100.0
$a_1/(\text{m/s}^2)$	1.0
$a_2/(\text{m/s}^2)$	0.8
$T_r/\text{s}$	1.0

仿真计算中,  $v_2 = v_{\max}$ 。区间绝对追踪模式下,  $v$  与  $t$  之间的关系如图 5 所示。

由图 5 可知,  $t$  与  $v_{\max}$  呈非线性关系,  $t$  随着列车最大允许运行速度  $v_{\max}$  的增大先减小后增大,  $t$  与  $v_{\max}$  均存在最优值。在表 1 所列的仿真参数情况下,列车在区间内的最小追踪间隔时间  $t_{\min}$  为 32.94 s,此时追踪列车速度为 47 km/h。

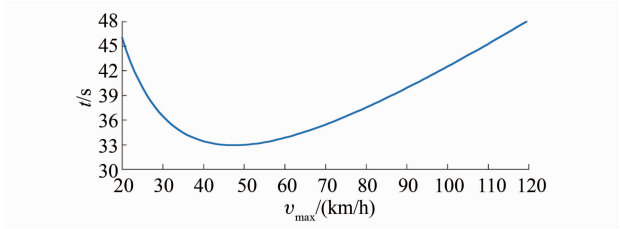


图 5 区间列车绝对追踪模式曲线

对于区间相对追踪模式的仿真,假设追踪列车和前行列车的参数、性能均一致,即两车有相同的制动减速度,取  $a_2 = a_1 = 0.8 \text{ m/s}^2$ 。由上文分析可知,该模式下前行列车与追踪列车之间的速度关系可以分为 3 种情况:  $v_1 < v_2$ ,  $v_1 = v_2$ ,  $v_1 > v_2$ 。仿真过程中两车之间的速度关系取值如图 6 所示。

由图 6 分析可知：

1) 在相对速度追踪模式下,由于充分利用了前行列车的制动距离,且前行列车的制动与前行列车速度密切相关,因此前行列车速度将会影响追踪列车之间的最小追踪间隔；

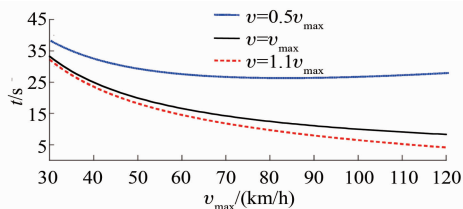


图6 区间列车相对追踪模式曲线

2) 随着  $v_1$  增大,追踪列车的最小追踪间隔时间不断减小,即  $v_1$  越大,追踪列车可以利用前行列车的制动距离越多;

3) 在相对速度追踪模式下, $v_1$  大于或等于  $v_2$  时, $t$  较小;

4) 在相对速度追踪模式下,前行列车以大于  $v_2$  的速度运行(即“撞大软墙”模式)时,产生的  $t$  最小。

根据仿真分析结果,提出减小  $t$  的措施如下:

1) 列车在区间以绝对追踪模式运行时,追踪列车最大允许速度存在最优值,因此可以在不超过速度限制的前提下调整其运行速度,以最优追踪速度运行;

2) 在相对速度追踪模式下,前行列车速度大于或等于追踪列车速度时, $t$  较小。因此可以在保证安全性的前提下,调整前后车的运行速度关系;

3) 车-地信息传输时延、司机及设备反应时间也会影响  $t$ ,因此提高车载设备性能、减小信息传输时延也能在一定程度上减小  $t$ 。

## 4 结语

$t$  是衡量移动闭塞列控系统下列车通过能力的

(上接第33页)

1) 路径查询:为乘客提供有效路径查询,避免发生乘客按原有清分路径无法抵达目的地站的情况,方便乘客出行,可提高城市轨道交通服务质量。

2) 精细化运营:能更加精确地统计各线路首末班车以及常态化和临时开设的加班车等的相关客流数据,从而以数据为驱动,提供数字化的运营建议。根据改进清分模型得到的加班车进出站客流统计相关系列报表已在上海轨道交通票务清分中心报表系统中应用。

## 4 结语

本文介绍了上海轨道交通现有的基于正态分

一项重要指标, $t$  的减小能有效提高列车的运行效率。列车 MA 的发布与  $t$  的计算密切相关。随着通信技术的发展,列车间直接通信的实现,可以为列车提供更可靠的防碰撞技术,相对速度追踪模式下的不安全因素也可以得到大幅度降低,相对追踪模式的应用可以使  $t$  进一步缩小。

## 参考文献

- [1] 李想,徐霄.CBTC 系统移动闭塞制式研究[J].城市轨道交通研究,2015(2): 24.
- [2] 李伟,唐涛,王呈,等.无线通信延迟对城市轨道交通 CBTC 列车追踪间隔影响研究[J].铁道学报,2017(7): 73.
- [3] 田长海,张守帅,张岳松,等.高速铁路列车追踪间隔时间研究[J].铁道学报,2015(10): 1.
- [4] 郜春海.基于通信的列车运行控制(CBTC)系统[M].北京:中国铁道出版社,2018.
- [5] 吴曦.城市轨道交通移动授权设计与实现[D].成都:西南交通大学,2014.
- [6] 田志鹏.移动自动闭塞的列车追踪控制优化研究[D].兰州:兰州交通大学,2016.
- [7] 何成才,杨海.CBTC 系统中移动闭塞与后备模式追踪间隔研究[J].成都:西南交通大学学报(自然科学版),2012(3): 446.
- [8] 辛亚江.移动闭塞模式的研究[D].成都:西南交通大学,2017.
- [9] 朱鹏飞.高速铁路列车追踪行车模拟研究与分析[D].成都:西南交通大学,2013.
- [10] 从亚闻.基于移动闭塞的移动授权生成机制研究[D].成都:西南交通大学,2011.
- [11] 刘文慧,苗建瑞.基于闭塞时间理论的移动闭塞追踪间隔时间特性研究[J].山东科技,2018(6): 55.
- [12] 辛亚江.移动闭塞下列车在区间追踪运行的研究[J].铁道通信信号,2016(9): 5.

(收稿日期:2018-11-22)

布的“K 短路径”清分模型,并在此基础上设计了可达路径判断规则及路径权重算法,指出改进模型对提供轨道交通票务收益清分准确度的社会意义和经济意义,并给出示例及应用推广。

## 参考文献

- [1] 王明中.城市轨道交通一票(卡)换乘票务清分系统的研究与实现[D].上海:上海交通大学,2004.
- [2] 黄胜,孟世聪,胡幼华.轨道交通系统票务清分算法[J].计算机应用研究,2004(6): 104.
- [3] 袁菲,张祎达,张健颖.基于改进 PSL-Logit 模型的城市轨道交通票务清分方法[J].交通世界,2019(27): 158.

(收稿日期:2018-04-08)