

基于动能转换的虚拟编组列车动态最小安全间隔

常 鸣^{1,2}, 崔 科³, 王维旸², 汪小勇³

(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. 卡斯柯信号有限公司, 上海 200072; 3. 上海轨道交通无人驾驶列控系统工程技术研究中心, 上海 200072)

摘要: 根据安全制动模型, 提出一种基于能量转换的虚拟编组列车安全防护方法。将实际项目数据作为前车的运行曲线, 仿真计算了后车根据能量转换防护方法所能达到的最小安全间隔, 并讨论了制动响应时间和制动能力对安全间隔的影响。结果表明, 前后车的紧急制动率差异是决定安全间隔的关键因素。

关键词: 城市轨道交通; 虚拟编组列车; 自动列车控制; 列车自动保护(ATP); 安全制动距离

中图分类号: U284.48

文献标志码: A

Dynamic Minimum Safety Distance of Virtual Coupled Trains Based on Kinetic-potential Energy Conversion

CHANG Ming^{1,2}, CUI Ke³, WANG Weiyang², WANG Xiaoyong³

(1. Shanghai Key Laboratory of Rail Infrastructure Durability and System Safety, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. CASCO Signal Co., Ltd., Shanghai 200072, China; 3. Shanghai Engineering Research Center of Driverless Train Control System for Railway Transportation, Shanghai 200072, China;)

Abstract: In this paper, a train safety protection method based on energy conversion is proposed according to the safety braking model. Taking actual project data as the leading train's operating curve, the minimum safe distance of the following train using the energy conversion protection method is simulated. Additionally, the impact of braking response time and braking capability on the safe distance is discussed. The results indicate that the difference in emergency braking rates between the leading and following trains is the key factor of the safe distance determination.

Keywords: urban rail transit; virtual coupled train; automatic train control; automatic train protection(ATP);

safety braking distance

随着计算机和通信技术的发展, 轨道交通列车自动控制系统的效率不断提升。在城市轨道交通领域, 基于通信的列车控制(CBTC)系统已成为主流信号制式, 新一代以车-车通信为特征的列车自主运行系统(TACS)也在深圳地铁 20 号线投入运营^[1]。然而, 由于客流的时空不均衡, 很多线路存在早晚高峰运力不足、低谷时段运力浪费的运能不匹配问题。根据客流分布, 列车分时段进行重联摘解的灵活编组运营方式被认为是解决这一问题的重要方法, 并已在上海轨道交通 16 号线得到应用^[2-4]。

通过车间通信和协同控制实现列车虚拟编组的运行技术成为近年来的研究热点。该理念始于 Bock 等^[5]在 2000 年的设想, 列车类似汽车般由独立模块构成, 每个模块有自己的动力系统, 通过相互通信, 组合为一个智能自主的编组。2014 年, 欧洲 Shift2Rail 项目组认为, 虚拟编组是未来铁路重要的演进方向^[6]。2016 年, Mitchell^[7]阐述了虚拟编组的基本概念, 并探讨其可行性、安全性和有效性。2022 年, Stickel 等^[8]通过问卷和访谈调研了参与 Shift2Rail 项目的 150 位专家, 从制动性能、通信技术、列车测速定位、与既有信号系统的互操作性等方面评估虚拟编组在高铁、市域铁路、地铁、轻轨以及货运领域应用的可能性。

不同于既有 CBTC 系统和 TACS 采用的绝对制动距离安全防护方法, 虚拟编组采用相对制动距离原则进行防护。1998 年, Ning^[9]给出了移动闭塞系统中绝对制动距离和相对制动距离的数学模型。以虚拟编组方式运行时, 后车的自动列车保护(ATP)系统根据前车的运行速度、最大制动能力、线路坡度

收稿日期: 2023-01-17

基金项目: 国家自然科学基金(52172329); 上海市自然科学基金(22ZR1422200)

第一作者: 常 鸣, 博士生, 高级工程师, 主要研究方向为轨道交通列车安全控制。

E-mail: changming@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

条件等因素,计算自身紧急制动曲线与前车最大制动曲线的相对制动距离,作为两车的最小安全间隔。与依据绝对制动距离原则将前车尾部按照零速点监控的既有系统相比,虚拟编组能够缩短前后车的最小间隔,提高追踪效率^[10]。

关于虚拟编组安全间隔的计算,Chen等^[11]提出了一种以虚拟编组列车编队总相对动能最小化为最优控制目标对编队中的列车实施制动的防撞控制方法。Xun等^[12]针对虚拟编组的超速防护机制,提出了一种基于相对坐标的限速差计算方法和相对动能最小化的碰撞缓解方法,并考虑了列车的制动性能差异。Zhou等^[13]探讨了安全制动保护和编队环境下的协同控制方法,在满足跟随车与领车安全车速限制的条件下,能够保持40 m的跟踪间隔。Quaglietta等^[14]分析了影响列车间隔的定位误差、通信延迟、制动响应误差等因素,引入动态安全裕量概念,异常发生时依旧能保持安全距离。

从安全制动模型出发,分别基于列车动力学特性和动势能转换原理提出了适用于虚拟编组列车的最小安全间隔计算方法,在最不利情况下保证列车安全。结合实际工程项目的列车运行数据,对基于动势能转换的防护方法进行数值仿真,并探讨影响虚拟编组内列车最小安全间隔的时间和制动力因素。

1 列车绝对制动距离安全模型

在既有CBTC系统列车追踪运行的场景中,后

车的移动授权终点是前车车尾位置,ATP系统认为此处的限速为零。后车ATP系统根据自身实时位置和速度,假定在最不利条件下输出紧急制动,估算列车停车后是否会冒进限制点。如果冒进,就说明存在追尾的风险,应立即输出紧急制动,否则无须输出紧急制动^[15]。

根据IEEE 1474.1标准^[16]定义的安全制动模型,ATP系统输出紧急制动指令后,应考虑牵引切除、空走、制动施加3个过程。以图1为例,后车T2输出紧急制动,在牵引切除时间 T_{21} 内,列车以最大牵引加速度 $a_{2, Trc, Max}$ 从 X_{20} 运行到 X_{21} ,车速从 v_{20} 增加到 v_{21} ;之后为空走过程,持续 T_{22} 时间,此过程中牵引已切除但制动尚未施加,受惯性影响列车依然向前运行,车头位置从 X_{21} 到 X_{22} ,车速从 v_{21} 变为 v_{22} ;此后进入制动过程,受紧急制动影响 v_{22} 减速到零。所有过程均应考虑线路坡度 $G_1 \sim G_3$ 对列车速度的影响。计算中用到的参数定义如表1所示。

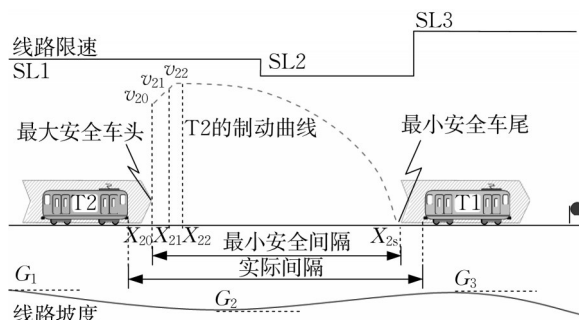


图1 CBTC系统中ATP原理示意图

Fig.1 Illustration of ATP mechanism in CBTC system

表1 参数说明

Tab.1 Parameters and notations

前车 T1	后车 T2	参数含义	前车 T1	后车 T2	参数含义
	T_{21}	牵引切除的最大时间		X_{21}	牵引切除后的列车位置
	T_{22}	从牵引切除到制动施加的空走时间		v_{21}	牵引切除后的列车速度
	$a_{2, Trc, Max}$	最大牵引加速度		X_{22}	牵引切除和空走时间后的位置
$a_{1, Brk, Max}$		最大制动减速度		v_{22}	牵引切除和空走时间后的速度
	$a_{2, GEb}$	最小紧急制动减速度	X_{1s}	X_{2s}	制动后列车停车位置
$a_{1, Grad}$	$a_{2, Grad}$	受线路坡度影响的减速度	T_{1s}	T_{2s}	从初始到列车停车的总时间
X_{10}	X_{20}	初始列车位置	L_{T1}	L_{T2}	考虑定位误差后的车长
v_{10}	v_{20}	初始列车速度			

后车的初始速度 v_{20} 和初始位置 X_{20} 分别为后车ATP系统考虑测速误差的最大安全速度和最大安全车头位置;限制点 X_{2s} 是前车的最小安全车尾位置。相关列车参数,如后车的牵引切除和空走时间应取可能的最大值,而最小紧急制动减速度应采用最保守估计值。

2 虚拟编组列车相对制动距离安全模型

虚拟编组的安全理念是基于前车运行速度不会突然降为零的假定,因此后可依据相对制动距离

原则计算与前车的安全间距。将后车的移动授权终点由前车尾部延伸至前车所能达到的最大减速度制动停车的车尾位置,如图2中的 X_{1s} 点。可能的实现方式是后车周期性获知(通过与前车直接通信或轨旁设备中转)前车的位置、速度、最大制动减速度等参数,结合线路坡度信息,估算出前车以最大减速度制动至停车的运行轨迹。后车ATP系统据此进行防护,确保不会发生追尾。

对比图2和图1可知,后车根据相对制动距离原则计算的移动授权可延伸超过初始时刻前车的车尾位置,从而缩短了两车的安全间隔。

根据运动学公式,后车ATP系统可以计算出前车以及自身的运行曲线。假设 $T_0=0$ 时刻,获知前车尾的位置和速度为 (X_{10}, v_{10}) ,并假定前车制动直至停车。根据故障导向安全原则,后车ATP系统应低估本车的制动能力,计算时取本车的最小紧急制动减速度;在考虑前车时,应认为其牵引切除和空走过程时间均为零,并按照最大制动减速度估算其制动过程。后车对前车的位置 X_{T1} 和速度 v_{T1} 进行估算,可分别由下式进行描述:

$$X_{T1}(t) = \begin{cases} X_{10} + v_{10}t + \frac{1}{2}(a_{1,Brk,Max} + a_{1,Grad})t^2, & t \in [0, T_{1s}] \\ X_{1s}, & t > T_{1s} \end{cases} \quad (1)$$

$$v_{T1}(t) = \begin{cases} v_{10} + (a_{1,Brk,Max} + a_{1,Grad})t, & t \in [0, T_{1s}] \\ 0, & t > T_{1s} \end{cases} \quad (2)$$

根据安全制动模型^[16],后车车头位置 X_{T2} 和速度 v_{T2} 的变化过程可分别由下式进行描述:

$$X_{T2}(t) = \begin{cases} X_{20} + v_{20}t + \frac{1}{2}(a_{2,Trc,Max} + a_{2,Grad})t^2, & t \in [0, T_{21}] \\ X_{21} + v_{21}(t - T_{21}) + \frac{1}{2}a_{2,Grad}(t - T_{21})^2, & t \in (T_{21}, T_{21} + T_{22}] \\ X_{22} + v_{22}(t - T_{21} - T_{22}) + \frac{1}{2}(a_{2,GEB} + a_{2,Grad})(t - T_{21} - T_{22})^2, & t \in (T_{21} + T_{22}, T_{2s}] \\ X_{2s}, & t > T_{2s} \end{cases} \quad (3)$$

$$v_{T2}(t) = \begin{cases} v_{20} + (a_{2,Trc,Max} + a_{2,Grad})t, & t \in [0, T_{21}] \\ v_{21} + a_{2,Grad}(t - T_{21}), & t \in (T_{21}, T_{21} + T_{22}] \\ v_{22} + (a_{2,GEB} + a_{2,Grad})(t - T_{21} - T_{22}), & t \in (T_{21} + T_{22}, T_{2s}] \\ 0, & t > T_{2s} \end{cases} \quad (4)$$

假设 $t = T_C$ 时刻发生追尾,即从初始时刻 T_0 开始,两车经过相同时间, T_2 车头和 T_1 车尾运行到相同的位置 X_C ,且 T_2 车速 v_{C2} 大于等于 T_1 车速 v_{C1} ,可用下式定义:

$$\begin{cases} X_C = X_{T1}(T_C) = X_{T2}(T_C), 0 < X_C \leq \min(X_{1s}, X_{2s}) \\ v_{C2}(T_C) \geq v_{C1}(T_C), T_C \geq 0 \end{cases} \quad (5)$$

联立式(1)和式(3),判断是否在定义域范围内存在 X_C 的解;联立式(2)和式(4),可得到碰撞发生

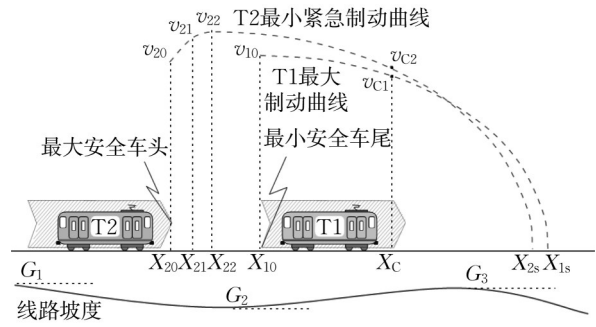


图2 基于相对制动距离原则的安全防护示意图

Fig.2 Illustration of train safety protection based on the principle of relative braking distance

时的车速关系。如果 X_C 有效,就说明可能发生碰撞,后车ATP系统应立即输出紧急制动,否则无须紧急制动。

然而, T_2 的车头位置和速度是分段函数,需要判定碰撞发生在 $[0, T_{21}]$ 、 $(T_{21}, T_{21} + T_{22}]$ 、 $(T_{21} + T_{22}, T_{2s}]$ 中的哪个阶段,才能根据相应式求解。考虑现代地铁列车性能较好,牵引切除和空走时间均在1s内,如果 $X_{22} > X_{10}$,就判断追尾。因此,可将式(3)、(4)简化为:

$$X_{T2}(t) = \begin{cases} X_{22}, t \in [0, T_{21} + T_{22}] \\ X_{22} + v_{22}(t - T_{21} - T_{22}) + \frac{1}{2}(a_{2, \text{GEB}} + a_{2, \text{Grad}})(t - T_{21} - T_{22})^2, t \in (T_{21} + T_{22}, T_{2s}] \\ X_{2s}, t > T_{2s} \end{cases} \quad (6)$$

$$v_{T2}(t) = \begin{cases} v_{22}, t \in [0, T_{21} + T_{22}] \\ v_{22} + (a_{2, \text{GEB}} + a_{2, \text{Grad}})(t - T_{21} - T_{22}), t \in (T_{21} + T_{22}, T_{2s}] \\ 0, t > T_{2s} \end{cases} \quad (7)$$

此外,坡度加速度 $a_{1, \text{Grad}}$ 和 $a_{2, \text{Grad}}$ 与线路位置有关,ATP系统需要根据列车制动后所处的位置选取不同的坡度加速度,将前述计算进一步分段求解,这将导致求解过程非常繁琐。

3 基于动势能转换的安全间隔计算

3.1 列车制动过程动势能转换

为简化运动学曲线计算中的分段处理,可将ATP系统基于速度的防护转换为基于能量的防护^[17]。根据安全制动模型定义的过程,不同阶段外力做功对列车动能的影响可表示为

$$E_k = E_{k0} + W_g + W_{\text{trc}} + W_{\text{brk}} \quad (8)$$

式中: E_k 为紧急制动过程中的列车动能; E_{k0} 为列车初始动能; W_g 为全过程中的重力做功(上坡做负功,下坡做正功); W_{trc} 为牵引切除阶段的最大牵引力做功(正功); W_{brk} 为紧急制动施加后的制动力做功(负功)。

ATP系统需计算移动授权范围内各限制点的最大允许动能。限制点为线路限速变化点SL1、SL2、SL3(见图1),或者移动授权终点等。根据限速,可计算出限制动能,如下所示:

$$E_{\text{limt}} = \frac{1}{2} m_{\text{train}} v_{\text{limt}}^2 + \frac{1}{2} \frac{J}{R^2} v_{\text{limt}}^2 \quad (9)$$

式中: E_{limt} 为限制点的列车动能限制值; m_{train} 为列车质量; v_{limt} 为限制点列车限速; J 为列车转动惯量; R 为车轮半径。引入 $\beta = 1 + J/(m_{\text{train}} R^2)$,表示列车旋转质量系数,将式(9)简化为

$$E_{\text{limt}} = \frac{1}{2} \beta m_{\text{train}} v_{\text{limt}}^2 \quad (10)$$

车载ATP系统可根据式(8)计算,如果立即施加紧急制动,就将列车运行至前方SL1、SL2等限制点时剩余的动能与限制点的限制动能 E_{limt} 进行比较,判断下式是否成立:

$$E_{k0} + W_g + W_{\text{trc}} + W_{\text{brk}} \leq E_{\text{limt}} \quad (11)$$

如果式(11)对于所有限制点均成立,就表明列车处于安全状态,无须输出紧急制动;若有任意一个限制点不满足式(11),则应立即输出紧急制动。

基于动势能转换的能量监控方式无须处理繁琐的分段运动学方程。此外,对于固定线路参数,如坡度等,可作为能量变化点进行离线计算并存在线路地图内,进一步减少在线运算量。

3.2 基于动势能转换的最小安全间隔计算

考虑虚拟编组的场景,如图3所示,可根据前车车尾位置 X_{10} 计算此处前车的动能。将前后车参数代入式(10),可得到 X_{10} 处的动能,如下所示:

$$E_{T1}(X_{10}) = \frac{1}{2} \beta_{T1} m_{T1} v_{10}^2 \quad (12)$$

式中: m_{T1} 为前车质量; β_{T1} 为前车旋转质量系数。

仅以 $E_{T1}(X_{10})$ 作为后车到 X_{10} 点的限制动能,无法保证安全。原因有以下两点:一方面,最不利情况下,后车T2的紧急制动力没有T1的最大制动力强,从 X_{10} 开始制动,T2的制动距离更长,导致追尾;另一方面,坡度对两车的作用范围不同,T2车头从 X_{10} 至停车的过程中,重力对于前后车做功的区域存在差异,如图3所示。因此,需要考虑这2个因素带来的额外能量限制。

问题可转换为:两车从相同的位置 X_{10} 制动,经过各自的制动力和重力做功,到达 X_s 时动能均为零,求在 X_{10} 点处T2的限制动能 $E_{\text{limt}}(X_{10})$ 。 $E_{\text{limt}}(X_{10})$ 的计算式如下所示:

$$E_{\text{limt}}(X_{10}) = E_{T1}(X_{10}) - \Delta W_{\text{brk}} - \Delta W_g \quad (13)$$

式中: ΔW_{brk} 表示从 $X_{10} \rightarrow X_s$ 过程中,两车制动力的差异; ΔW_g 表示重力对两车做功的差异。 ΔW_{brk} 的计算式如下所示:

$$\Delta W_{\text{brk}} = (m_{T2} \beta_{T2} a_{2, \text{GEB}} - m_{T1} \beta_{T1} a_{1, \text{Brk, Max}})(X_s - X_{10}) \quad (14)$$

式中: m_{T2} 、 β_{T2} 分别为后车质量和旋转质量系数; X_s 为T1从 X_{10} 位置以 v_{10} 为初速度,以最大制动减速度 $a_{1, \text{Brk, Max}}$ 制动停车后车尾的位置。该位置可以由前

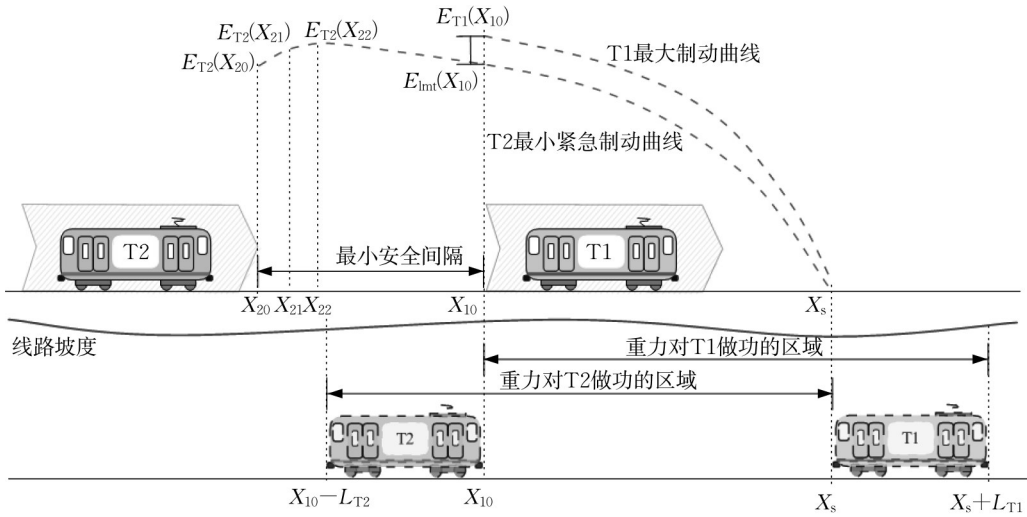


图 3 虚拟编组列车能量计算示意图

Fig.3 Illustration of train energy calculation for virtual coupling

车计算得到并告知后车。

对于城市轨道交通线路,如果列车类型是同质的,就可认为车重、旋转质量系数、车轮半径等参数均相同,故可将式(14)化简为

$$\Delta W_{brk} = m_{T2} \beta_{T2} (a_{2, GEB} - a_{1, Brk, Max}) (X_s - X_{10}) \quad (15)$$

$$\Delta W_g = \left(-m_{T2} g \int_{X_{10}-L_{T2}}^{X_s} G(x) dx \right) - \left(-m_{T1} g \int_{X_{10}}^{X_s+L_{T1}} G(x) dx \right) = \left(-m_{T2} g \int_{X_{10}-L_{T2}}^{X_{10}} G(x) dx - m_{T2} g \int_{X_{10}}^{X_s} G(x) dx \right) - \left(-m_{T1} g \int_{X_{10}}^{X_s} G(x) dx - m_{T1} g \int_{X_s}^{X_s+L_{T1}} G(x) dx \right) \quad (16)$$

式中: $G(x)$ 表示对应位置的坡度。

如果为同质列车, $X_{10} \rightarrow X_s$ 阶段坡度对于前后两车做的功就可以相互抵消,式(16)可以进一步化简为

$$\Delta W_g = m_{T2} g \left(\int_{X_s}^{X_s+L_{T1}} G(x) dx - \int_{X_{10}-L_{T2}}^{X_{10}} G(x) dx \right) \quad (17)$$

因此,将式(15)、(17)代入式(13),就能得到 $E_{lm}(X_{10})$,即在虚拟编组条件下,后车保证不超过前车停车点 X_s 时 X_{10} 点的限制动能。

综上,可以得到以下基于能量守恒的虚拟编组列车安全保护方法:

(1) 车载 ATP 系统已知所在列车以及线路上可能运行的所有类型列车的运行参数。

(2) 获取前车当前(即 T_0 时刻)的车尾位置 X_{10} 、速度 v_{10} 、以最大制动力制动的停车点位置 X_s 。

(3) 根据式(12)计算出前车尾部的动能 $E_{T1}(X_{10})$ 。

(4) 对于异质列车,可将式(14)、(16)代入式

从图3可以看出,在 $(X_{10} - L_{T2})$ 至 X_{10} 区域内,重力仅对 T2 做功,其中 L_{T2} 为考虑最大定位误差后的后车车长;在 X_s 至 $(X_s + L_{T1})$ 区域内,重力仅对 T1 做功,其中 L_{T1} 为考虑最大定位误差后的前车车长;在 X_{10} 至 X_s 区域内,坡度对两车均做功。因此, ΔW_g 可表示为

(13), 计算出前车尾部对于后车的限制动能 $E_{lm}(X_{10})$ 。

(5) 对于同质列车,可将式(15)、(17)代入式(13),计算出前车尾部对于后车的限制动能 $E_{lm}(X_{10})$ 。

(6) 将 $E_{lm}(X_{10})$ 作为 E_{lm} 代入式(11),判断后车当前是否应输出紧急制动。

为便于量化分析,参照图3计算两车的最小安全间隔,即 $D_{safe} = (X_{10} - X_{20})$ 。根据安全制动模型,这个距离由 $X_{20} \rightarrow X_{21}$ 、 $X_{21} \rightarrow X_{22}$ 、 $X_{22} \rightarrow X_{10}$ 三部分组成,即分别是牵引切除过程、空走过程和制动施加过程。对于前2个过程的运行距离,可根据牵引切除时间 T_{21} 和空走时间 T_{22} 计算得到,即:

$$D_{X_{20} \rightarrow X_{21}} = X_{21} - X_{20} = v_{20} T_{21} + \frac{1}{2} (a_{2, Trc, Max} + a_{2, Grad}) T_{21}^2 \quad (18)$$

$$D_{X_{21} \rightarrow X_{22}} = X_{22} - X_{21} = v_{21} T_{22} + \frac{1}{2} a_{2, Grad} T_{22}^2 \quad (19)$$

$X_{22} \rightarrow X_{10}$ 的第三段距离,也就是后车制动力做

功的距离,可将相关参数代入式(11),将不等号改为等号计算得到,如下所示:

$$E_{k0} + W_g + W_{trc} + W_{brk} = E_{lim} \Rightarrow E_{T2}(X_{20}) + W_{g,(X_{20}-X_{10})} + W_{trc,(X_{20}-X_{21})} + W_{brk,(X_{22}-X_{10})} = E_{lim}(X_{10}) \Rightarrow$$

$$-W_{brk,(X_{22}-X_{10})} = E_{T2}(X_{20}) + W_{trc,(X_{20}-X_{21})} + W_{g,(X_{20}-X_{10})} - E_{lim}(X_{10}) \Rightarrow -m_{T2} \beta_{T2} a_{2,GEB}(X_{10} - X_{22}) =$$

$$E_{T2}(X_{20}) + W_{trc}(X_{20} - X_{21}) + W_g(X_{20} - X_{10}) - E_{lim}(X_{10}) \Rightarrow D_{X_{22} \rightarrow X_{10}} = (X_{10} - X_{22}) =$$

$$\frac{E_{T2}(X_{20}) + W_{trc}(X_{20} - X_{21}) + W_g(X_{20} - X_{10}) - E_{lim}(X_{10})}{-m_{T2} \beta_{T2} a_{2,GEB}} \quad (20)$$

结合式(18)、(19)、(20),可得到最小安全间隔计算式,如下所示:

$$D_{safe} = D_{X_{20} \rightarrow X_{21}} + D_{X_{21} \rightarrow X_{22}} + D_{X_{22} \rightarrow X_{10}} \quad (21)$$

照等速追踪时,两车所能达到的最小安全间隔 D_{safe} 。

4 数据仿真与讨论

以某城轨全自动线路为例。图4为该项目列车以最高运行等级行驶18个车站的速度-距离曲线,运行时长约45 min,在长大区间的最高运行速度约为 $120 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$,运行总里程约为39 km。

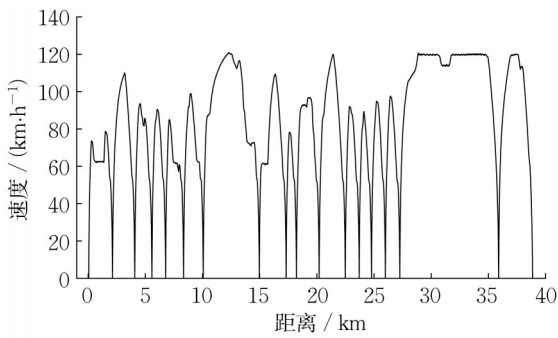


图4 某城轨项目列车运行速度-距离曲线

Fig.4 Operating velocity-distance curve for an urban rail project

假定虚拟编组已经建立,后车跟随前车运行,采用基于能量的计算方法,考察两车的最小间隔。计算时依据以下假定条件:

(1) 虚拟编组中的前车根据图4的曲线运行,并周期性地将当前运行时车尾位置、速度、以最大减速度停车时的车尾位置等信息告知后车。

(2) 后车跟随前车运行,且后车车速与获取到的前车车速保持一致。

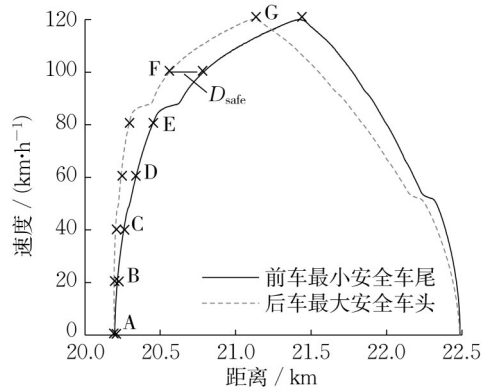
随着无线通信技术的发展,条件(1)能够实现。对于条件(2),不能直接使用单列车的控车策略,需考虑整个编组内所有列车所处限速区的差异,设计相应的控车策略,避免编队不稳定。

根据式(21)选取项目相关列车参数,如表2所示,可以计算出虚拟编组场景前后车相同速度条件下的最小安全间隔。截取图4中列车运行至20.0~22.5 km区间的一段区域,如图5所示,绘出后车按

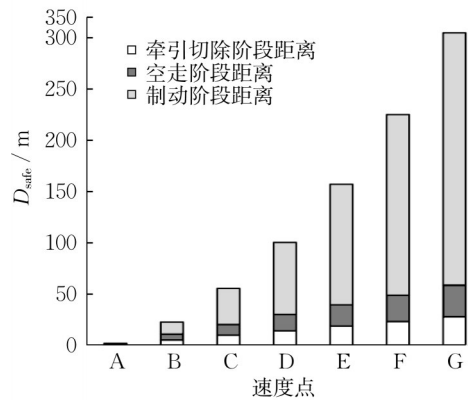
表2 仿真参数取值

Tab.2 Simulation parameter values

参数	单位	仿真取值
$a_{1,Brk,Max}$	$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$	-1.30
T_{21}	s	0.815
T_{22}	s	0.900
$a_{2,Trc,Max}$	$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$	1.10
$a_{2,GEB}$	$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$	-0.87



a 等速追踪时的最小安全间隔



b 不同速度点 D_{safe} 中各阶段的距离

图5 仿真虚拟编组列车等速追踪运行时的最小安全间隔及各阶段距离

Fig.5 Simulation of minimum safe distances and distances in each phase for virtual coupled trains running at same tracking speeds

从图5可以看出,等速追踪时,后车与前车的最小安全间隔与速度为正相关,静止时的间隔最小, $120 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时的间隔最大。选取A~G 7个速度点,

考察不同速度时最小安全间隔的具体取值,如表3所示。根据安全制动模型,最小安全间隔分为牵引切除、空走和制动施加3个阶段,可以分别根据式(18)、(19)、(20)计算得到,图5和表3也分别列出了各阶段的距离。在低速时,前2个阶段占比较大,而高速时最小安全间隔 D_{safe} 主要受制动施加距离的影响。

表3 典型速度时最小安全间隔仿真值

Tab.3 Simulation value of minimum safety intervals at typical speeds

速度点	速度/(km·h ⁻¹)	$D_{x_{20} \rightarrow x_{21}}/m$	$D_{x_{21} \rightarrow x_{22}}/m$	$D_{x_{22} \rightarrow x_{10}}/m$	D_{safe}/m
A	0	0.37	0.81	0.46	1.64
B	19.92	4.87	5.79	11.98	22.64
C	39.83	9.38	10.77	35.14	55.29
D	60.02	13.95	15.81	70.49	100.25
E	80.09	18.50	20.83	117.47	156.80
F	100.04	23.01	25.82	175.91	224.74
G	120.03	27.54	30.82	246.16	304.52

如果要缩短最小安全间隔,就需分别考虑缩短3个阶段的距离。牵引切除阶段持续 T_{21} ,列车最大牵引力和重力做功。重力与所处位置的坡度有关,而牵引力影响列车加速性能,不应缩小。因此,只能考虑减少 T_{21} 。该时间分为两部分:一是车载ATP系统从发现危险到输出紧急制动的响应时间,二是列车收到紧急制动指令后切除牵引的动作时间。目前城轨列车的切除牵引动作时间基本在0.1~0.2 s,已经很快;对于ATP系统的紧急制动响应时间,文献[16]中定义为小于0.75 s,随着安全平台技术的进步,该值能够更小。空走阶段仅受重力做功影响,持续 T_{22} ,该值是列车切除牵引到施加紧急制动的的时间,随着制动系统技术的进步, T_{22} 也能进一步缩短。在制动施加阶段,列车受紧急制动和所处坡度的影响,若想缩短间隔,则只能提升后车的制动能力,即 $a_{2,\text{GEB}}$ 。因此,在表2参数取值的基础上,分别假定 T_{21} 为0.5 s, T_{22} 为0.6 s,并分别将紧急制动减速度 $a_{2,\text{GEB}}$ 提高到 -1.00 、 -1.15 、 $-1.30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$,考察最小安全间隔的变化,仿真结果如图6所示。

从图6可以看出,牵引切除和空走时间 T_{21} 、 T_{22} 的缩短对于最小安全间隔的优化有限。采用参数④同时优化 T_{21} 、 T_{22} 后,在 $120 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时最小安全间隔从304.52 m缩短到269.74 m,减少约11%。相对而言,紧急制动减速度的变化则影响明显,采用 $a_{2,\text{GEB}} = -1.00$ 、 -1.15 、 $-1.30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ 3个不同的紧急制动减速度, $120 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时的最小安全间隔分别为216.93,140.47,81.66 m,分别减少了29%、54%

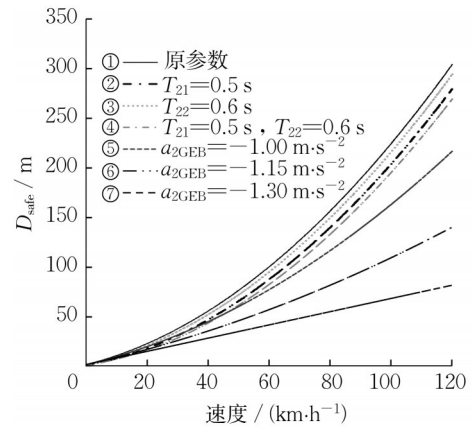


图6 不同参数下的最小安全间隔

Fig.6 Minimum safety distance with different parameter values

和73%。因此,虚拟编组中前后列车制动力的差异是影响最小安全间隔的关键。

如前所述,ATP系统应在最不利情况下也能保证行车安全,所以即使前后车性能相同,计算时使用的制动减速度也不同。对于后车,低估其减速能力为安全侧,故使用最小紧急制动减速度 $-0.87 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$;对于前车,高估其减速能力为安全侧,使用 $-1.30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ 的最大减速度。然而,如果发生车轮打滑,后车制动力就可能会更低;在考虑附加阻力后,前车实际的减速能力也可能会更高。采用相对制动距离原则后,列车安全间隔缩小,增加了当极端情况出现时的碰撞风险。因此,决定虚拟编组安全间隔的关键,就是ATP系统能否实时获知准确且安全的前后车制动减速度,从而对间隔进行动态调整。

5 结语

根据列车安全制动模型,提出一种基于动势能转换的虚拟编组列车安全防护方法,可避免由坡度变化导致的分段速度曲线计算,适用于质量、长度、制动能力不同的异构列车。选取某线路实际的运行曲线,以假定后车速度跟随前车的方式,计算虚拟编组列车所能达到的最小安全间隔。结果表明,前后车的紧急制动减速度差异是影响间距的关键因素。后续,将进一步研究基于可动态调整安全制动减速度的安全防护方法,并在计算列车动势能的基础上,从节能角度进行虚拟编组列车运行曲线的优化。

作者贡献声明:

常 鸣:提出研究思路,设计研究方案,数据收集,建模,开展实验,撰写论文。

崔科:学术指导,提出研究思路,论文修改。

王维旸:数据分析与校核,论文修改。

汪小勇:提出研究思路,论文审核。

参考文献:

- [1] 王学浩,刘瑞娟.基于车车通信的列车自主运行系统研究及应用[J].城市轨道交通研究,2022,25(11):134.
WANG Xuehao, LIU Ruijuan. Research and application of train autonomous control system based on vehicle-to-vehicle communication[J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(11): 134.
- [2] 唐玉川,马保仁.城市轨道交通灵活编组运营组织研究[J].铁道工程学报,2014,31(8):96.
TANG Yuchuan, MA Baoren. Research on the flexible car-set operation organization of urban rail transit [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2014, 31(8): 96.
- [3] 禹丹丹,韩宝明,张琦,等.基于灵活编组的轨道交通列车开行方案优化方法[J].北京交通大学学报,2015,39(6):21.
YU Dandan, HAN Baoming, ZHANG Qi, *et al.* Optimization method for train plan of urban rail transit based on the flexible length of train formation [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2015, 39(6): 21.
- [4] 王冬海,黄柒光.列车灵活编组在城市轨道交通全自动运行线路中的应用[J].城市轨道交通研究,2019,22(S2):102.
WANG Donghai, HUANG Qiguang. Application of flexible train formation on rail transit FAO lines [J]. Urban Mass Transit, 2019, 22(S2): 102.
- [5] BOCK U, BIKKER G. Design and development of a future freight train concept: "virtually coupled train formations" [J]. IFAC Proceedings Volumes, 2000, 33(9): 395.
- [6] GOIKOETXEA J. Roadmap towards the wireless virtual coupling of trains [C]//Communication Technologies for Vehicles. Cham: Springer International Publishing, 2016: 3-9.
- [7] MITCHELL I. ERTMS Level 4, train convoys or virtual coupling[J]. IRSE News, 2016, 219:1.
- [8] STICKEL S, SCHENKER M, DITTUS H, *et al.* Technical feasibility analysis and introduction strategy of the virtually coupled train set concept[J]. Scientific Reports, 2022, 12(1): 4248.
- [9] NING B. Absolute braking and relative distance braking: train operation control modes in moving block systems [J]. WIT Transactions on the Built Environment, 1998, 34: 991.
- [10] 荀径,陈明亮,宁滨,等.虚拟重联条件下地铁列车追踪运行性能衡量[J].北京交通大学学报,2019,43(1):96.
XUN Jing, CHEN Mingliang, NING Bin, *et al.* Train tracking performance measurement under virtual coupling in subway [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2019, 43(1): 96.
- [11] CHEN M, XUN J, LIU Y. A coordinated collision mitigation approach for virtual coupling trains by using model predictive control [C]//2020 IEEE 23rd International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). New York: IEEE, 2020: 1-6.
- [12] XUN J, CHEN M, LIU Y, *et al.* An overspeed protection mechanism for virtual coupling in railway [J]. IEEE Access, 2020, 8: 187400.
- [13] ZHOU Q, ZHANG C, BAO F, *et al.* The safety braking protection model of virtually coupled train platoon in subway [C]//10th Institute of Electrical and Electronics Engineers, International Conference on Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER). New York: IEEE, 2020: 401-406.
- [14] QUAGLIETTA E, SPARTALIS P, WANG M, *et al.* Modelling and analysis of virtual coupling with dynamic safety margin considering risk factors in railway operations[J]. Journal of Rail Transport Planning & Management, 2022, 22: 100313.
- [15] 林颖,王长林.基于CBTC的车载ATP安全制动曲线计算模型研究[J].铁道学报,2011,33(8):69.
LIN Ying, WANG Changlin. Computational model of safe braking curve of onboard ATP based on CBTC[J]. Journal of the China Railway Society, 2011, 33(8): 69.
- [16] IEEE 1474.1. IEEE standard for communications-base train control (CBTC) performance and functional requirements[S]. New York: IEEE, 2004.
- [17] 陈荣武. CBTC系统列车运行仿真与优化策略[D].成都:西南交通大学,2011.
CHEN Rongwu. CBTC system simulation and the optimization strategy[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011.