



基于ETCS制动模型的虚拟联挂 行车安全间隔分析

李启翩¹, 雷成健¹, 谢星¹, 陈东²

(1. 湖南中车时代通信信号有限公司 北京分公司, 北京 100071;

2. 株洲中车时代电气股份有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘要: 虚拟联挂技术采用列车之间的无线通信和协同控制技术代替物理联挂, 将多列车组成一个虚拟编队统一控制。虚拟列车编队能够在对基础设施改造不大的前提下, 缩短行车间隔距离, 增大线路运量, 提高运营的灵活性。自从欧盟将虚拟联挂作为 Shift2Rail 计划中的重点研究内容以来, 虚拟联挂迅速成为国内外轨道交通领域的研究热点。如何在更短的行车间隔下保障列车的安全是虚拟联挂技术必须解决的一个关键问题, 文章基于欧洲列车运行控制系统 (ETCS) 所规定的标准列车制动模型, 分析了虚拟编队成员列车之间安全间隔距离的组成要素, 提出通用安全间隔距离计算方法, 通过仿真计算分析不同时速、不同列车类型、不同线路坡度下安全间隔的特点, 探讨了安全间隔距离对虚拟联挂技术应用于干线铁路的影响, 为干线铁路升级虚拟联挂功能提供参考。

关键词: 虚拟联挂; 相对制动距离; 制动模型; 安全间隔; 虚拟列车联挂系统; 仿真

中图分类号: U284.48

文献标志码: A

文章编号: 1000-128X(2025)02-0137-14

0 引言

为提升欧洲铁路行业竞争力, 满足欧洲运输市场发展变化需求, 实现欧洲轨道交通一体化的目标, 欧盟提出了 Shift2Rail 计划^[1], 用于管理和协调欧洲地平线 2020 框架计划资助的所有以铁路为重点的研究创新, 加速新技术和先进技术的应用。该计划目标之一是将欧洲铁路系统的容量增加一倍, 可靠性和服务质量指标提高 50%, 生命周期成本减半。

Shift2Rail 计划中提出的增加线路容量的主要解决方案是移动闭塞+虚拟联挂, 目的是在基本不改造基础设施的前提下, 仅通过闭塞制式的升级来缩短行车间隔、提高行车密度。

移动闭塞制式广泛应用于城市轨道交通领域, 尽管在干线铁路领域尚不多见, 但 ERTMS/ETCS (Euro-

pean rail traffic management system/European train control system, 欧洲铁路交通管理系统/欧洲列车运行控制系统) 标准已规划了最高等级 Level 3 将使用移动闭塞^[2], 因此 Shift2Rail 计划中有多个项目是关于 ETCS-3 级移动闭塞规范的研究。中国铁路 CTCS-4 (China train control system level 4, 中国列车运行控制系统 4 级) 正是参照 ETCS-3 级标准制定的^[3], 目前尚处于研究阶段。

虚拟联挂技术^[4]通过为列控系统增加虚拟连接两列或更多列车的功能, 从而大幅缩短列车追踪间隔来增加线路容量, 被认为是 Shift2Rail 计划中最重要的创新之一, 当前的相关研究多是直接在 ERTMS/ETCS-3 级上叠加该技术来升级, 因此虚拟联挂系统被部分研究人员称为 ERTMS Level 4^[5-6] 或 ETCS-4^[7], 被视为 ERTMS/ETCS 的未来发展方向之一。

作为轨道交通领域的一项重要革新技术, 对虚拟

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2022YFB4301202)

通信作者: 李启翩, 男, 博士, 高级工程师, 长期从事列车运行控制系统的研究; E-mail: liqh6@csrzc.com

引用格式: 李启翩, 雷成健, 谢星, 等. 基于 ETCS 制动模型的虚拟联挂行车安全间隔分析[J]. 机车电传动, 2025(2): 137-150.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.02.110.

Citation: LI Qihe, LEI Chengjian, XIE Xing, et al. Analysis of safe intervals for virtually coupled operation based on ETCS braking model[J]. Electric drive for locomotives, 2025(2): 137-150.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.02.110.

联挂的灵活应用将对铁路运输方式产生重要影响。自从 Shift2Rail 开始虚拟联挂技术研究后,该技术迅速成为世界轨道交通领域的研究热点。目前,研究人员已针对线路容量提升能力计算^[8]、虚拟编队列车运行状态控制与转换^[9]、关键技术识别^[10-11]、编队协同控制^[12-16]等方面做了众多工作。由于智慧城轨发展纲要的发布,我国对虚拟联挂应用的研究较多集中于城市轨道交通领域^[17-20],在干线领域的应用研究相对较少。本文基于 ERTMS/ETCS 标准制动模型对虚拟联挂在干线铁路上的安全应用之一“虚拟联挂编队内列车的安全间隔”进行分析,提出适用于干线的安全间隔计算方法,并进行仿真计算,通过对仿真计算结果的分析与探讨,对我国干线铁路虚拟联挂的应用发展提供启示,也为我国自主研发的 ETCS 系统^[21]未来发展虚拟联挂功能提供支持。

1 虚拟联挂系统

Shift2Rail 通过其创新计划 IP2 (innovation programme 2) 中的 X2Rail-3 项目对虚拟联挂的概念及应用条件等进行了研究^[22]。所谓虚拟联挂,就是通过无

线通信、协同控制等技术将多列车连接为一个虚拟编队,编队内各成员列车之间没有真实的物理联挂部件,但在运行时仍可被视为一个整体进行控制。

使用虚拟联挂,需要一整套技术和系统的支持,在保证列车安全运营的同时,充分发挥虚拟联挂的优势,X2Rail-3 将这一套完整的系统称为虚拟列车联挂系统 (virtual train coupling system, VTCS),如图 1 所示,VTCS 通过与既有或新增的控车设备交互,按调度计划实现虚拟列车编队的组建、运行、解编的完整功能。当列车未处于虚拟联挂状态时,仍然由既有 ATP (automatic train protection, 自动列车防护) 防护安全,进入联挂状态之后,除头车还需要既有 ATP 控制列车运行之外,其余成员列车的安全防护功能都将由 VTCS 接管(头车也同时需要 VTCS 系统与编队内其他成员交互协同)。VTCS 负责与各车载设备(包括 ATP、自动列车驾驶 ATO、列车控制与管理系统 TCMS、车载通信设施、定位测速装置等)进行交互,并与编队成员沟通协同以保持编队的稳定运行,同时与轨旁设备交互获取控车命令,如与 CTC (centralized traffic control, 调度集中) 进行交互以获取联挂计划等必要信息。

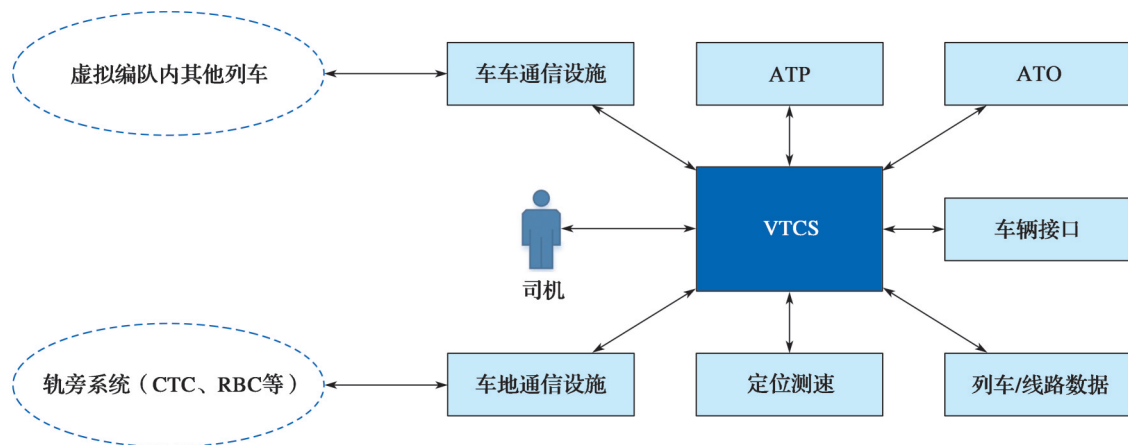


图1 VTCS示意图

Fig. 1 VTCS illustration

相比于既有的闭塞制式,VTCS控制的列车具有两大特征:

①编队内各跟随列车的停止目标点(或称为制动墙——将停止目标点视为一堵不可能越过的“墙”)从“硬墙”变为“软墙”。所谓软墙是指编队内前后列车之间的追踪间隔距离从“绝对制动距离”变为“相对制动距离”,即后车在计算自身行车许可长度时,不仅要考虑前车的位置,而且要考虑前车的实时运行速度,其目标点不再是前车的车尾,而是预计前车从当前位置开始制动到停止时的车尾位置。

②主要控制模式在轨旁设备对列车进行集中控制的基础上,增加了编队内列车协同控制的功能。由于缺少了物理联挂部件,要保持整个编队运行的稳定,需要通过无线信息交互以达到各成员列车在加速、减

速、巡航以及制动等方面的协同动作,并始终保持一定的安全间隔,以确保在按联挂计划运行时,队内成员不因距离过近而发生冲撞,也不因距离过远导致编队解散。

由于相对制动距离突破了既有的安全追踪间隔的限制,因此必须对原有的安全间隔距离计算方法进行改进,计算出最小安全间隔,确保跟随列车能够始终保持与前车的距离大于该最小间隔,以防止发生追尾事故。

2 追踪间隔距离模型分析

本章首先介绍 ETCS 标准制动曲线模型及移动闭塞追踪间隔距离模型,然后提出虚拟联挂追踪间隔模型,

对该模型进行安全分析, 提出需要考虑的各种误差、安全裕量的计算方法, 最终得到完整的安全追踪间隔模型。

2.1 ETCS标准制动模型介绍

2.1.1 概述

尽管虚拟联挂引入了“相对制动距离”的概念, 但列车本身并未变化, 其制动特性仍符合既有制动模型。因此, 要研究编队成员列车间的追踪间隔, 需从列车制动曲线模型着手。

ERTMS/ETCS的基线2版本的标准^[23]没有明确规定列车的制动曲线模型, 将具体实现作为开口项留给了各车载ATP设备厂商。由于列车和车载ATP设备可能来自不同的厂商, 使用的曲线计算方法也各不相同, 即使同样的车辆装备了不同的车载设备, 也可能导致不同的制动性能, 影响互联互通, 因此基线3版本规定了统一的制动曲线模型。该制动曲线模型遵循UIC (Union Internationale des Chemins de Fer, 国际铁路联盟) 标准 UIC 544-1 *Brakes: Braking power*^[24]的规定, 可以适用于所有符合UIC标准的列车, 并已被欧洲标准所采纳, 详见EN 16834^[25]。

2.1.2 ETCS紧急制动曲线

图2为ETCS紧急制动减速曲线 (emergency brake

deceleration curve, EBD 曲线) 示意图 (详见 Subset-026 的 3.13 节), 图2中 EBD 为紧急制动曲线, EBI (emergency brake intervention) 为紧急制动干预点, 即车载ATP发出紧急制动命令时的位置, SBI (service brake intervention) 为常用制动干预点, W (warning) 为警告点, P (permitted speed) 为允许速度点, I (indication) 为指示点。

由图2可见, 在EBI干预位置 P_{EBI} 处, 列车当前测量速度 V_{est} 有一个大小为 $V_{\delta0}$ 的变化, 该值表示测速装置的测量误差, 当该误差为欠读误差时, 真实速度大于测量速度, 为过读误差时, 真实速度小于测量速度 (图2中未反映)。 A_{est1} 表示牵引力继续作用时间 (从发出牵引力切除命令到实际切除所需时间) 内的列车加速度, 其取值为当前所测量的加速度 (小于0时取0), 此加速度会导致速度增加 $V_{\delta1}$ 。 A_{est2} 仅当紧急制动等效建立时间大于牵引力继续作用时间才存在, 即从牵引力切除后到紧急制动等效建立完成这段时间内的加速度, 其取值同样使用当前所测量的加速度 (但取值范围限制在 $[0, 0.4 \text{ m/s}^2]$ 内), 将使列车速度增加 $V_{\delta2}$ 。因此, EBD曲线正式起作用的位置 P_{EBD} 处的列车速度为 $V_{bec} = V_{est} + V_{\delta0} + V_{\delta1} + V_{\delta2}$, 该点与紧急制动干预点 P_{EBI} 的距离为 D_{bec} 。

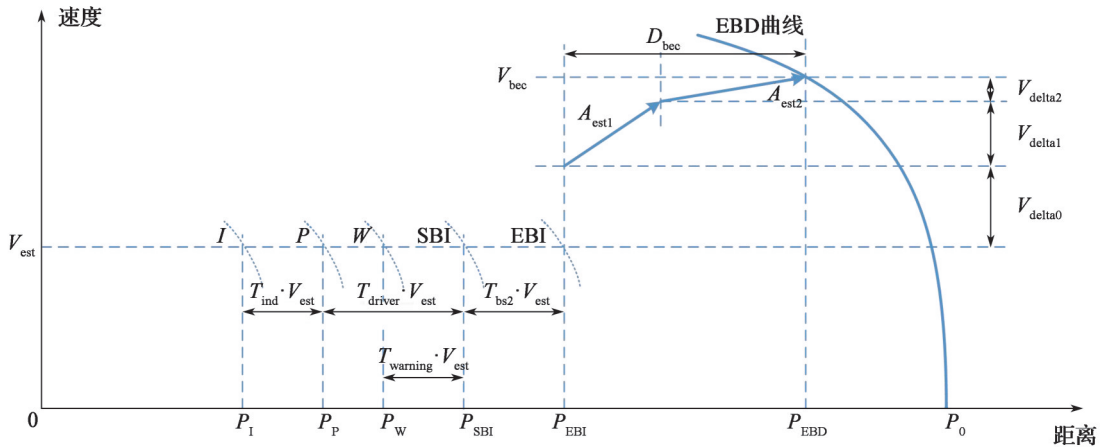


图2 紧急制动减速曲线示意图

Fig. 2 Curve of deceleration under emergency braking

由图2可见, 列车的紧急制动距离就是从 P_{EBI} 到 P_0 的距离, 具体为

$$S_{EB} = D_{bec} + D_{EBD}(V_{bec}) \quad (1)$$

式(1)中, $D_{EBD}(V_{bec})$ 是从列车速度为 V_{bec} 时按照EBD曲线制动至速度为0时所行驶的距离 (即从 P_{EBD} 到 P_0 的距离), 计算该距离需要列车的减速度。根据 Subset-026, 列车的EBD减速度值应按列车的运行速度进行分段, 但最多不超过7段, 在某一个速度范围内的减速度数值不变, 再经过与线路坡度、黏着系数等参数结合进一步分段, 求出实际的分段减速度, 再依据匀减速运动的运动学公式, 从 P_0 倒推至 P_{EBD} , 计算每个分段

行驶的距离, 各段距离之和即为 D_{EBD} 。图3为 D_{EBD} 计算示例, 图3中列车紧急制动减速度共分为4段, 减速度变化点的速度分别为 v_1 、 v_2 和 v_3 , 经过与线路坡度和黏着系数等线路参数相结合, 从速度 V_{bec} 到速度0将减速度共分为7段 (图3中以 $a_7 \sim a_1$ 表示), 其中第 i 段所行驶过的距离为

$$s_i = (v_{si}^2 - v_{ei}^2) / (2a_i) \quad (2)$$

上式中, a_i 为该分段的减速度, v_{si} 为该分段的起始速度, v_{ei} 为该分段的终止速度, 若以 t_i 表示列车在该分段运行时间, 则各变量相互之间的关系为

$$v_{si} = v_{ei} + a_i t_i \quad (3)$$

若减速度曲线共有 n 段, 则可以得出

$$D_{\text{EBD}} = \sum s_i, i = 1, \dots, n. \quad (4)$$

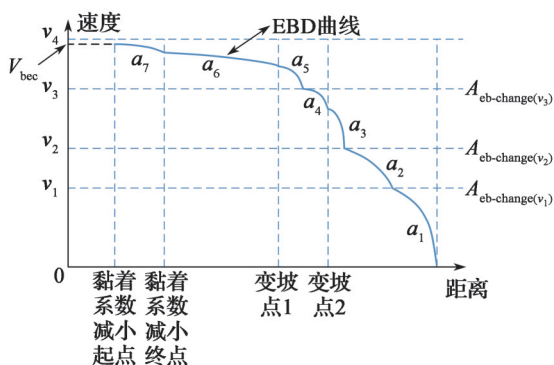


图3 D_{EBD} 计算示例

Fig. 3 Example of D_{EBD} calculation

2.1.3 ETCS 制动模型

Subset-026 规定标准制动曲线模型时将列车分为 Gamma (γ) 车和 Lambda (λ) 车两类, 详细分析如下:

①Gamma 车。Gamma 车采用制动减速度模型, 其所有特性参数包括制动减速度 a_i 、等效制动建立时间 T_{be} 、牵引力继续作用时间 T_{traction} 等均由列车厂商直接提供, 并作为车载列控设备的配置参数。实际计算时, 制动减速度还需要根据钢轨的干湿程度按下式进行修正:

$$d_i = K_{\text{dry-rst}} \times (K_{\text{wet-rst}} + M_{\text{NVAADH}} \times (1 - K_{\text{wet-rst}})) \times a_i \quad (5)$$

式中: $K_{\text{dry-rst}}$ 、 $K_{\text{wet-rst}}$ 、 M_{NVAADH} 均为 Subset-026 规定的修正系数, 需配置为列车参数或国家值。

运行过程中仅需将各参数代入曲线模型 (见上一节), 即可求得结果。

②Lambda 车。Lambda 车则指缺少制动减速度、等效制动建立时间等参数的列车, 需要采用制动转换模型。先按 UIC 标准进行试验以求出列车的“制动重量百分比 (brake weight percentage, 列车制动重量与列车重量之比, 简称制动百分比 brake percentage, 用 λ 表示)”, 并结合列车制动位置、列车长度、列车类型等参数, 代入一个转换模型的经验公式, 计算出制动曲线必要参数。该转换模型仅适用于 $\lambda \in [30, 250]$ 、最高速度不超过 200 km/h、最大长度不超过 900 m 的客运列车和不超过 1 500 m 的货运列车, 若超出此范围, 需按 Gamma 车处理。

注: 与我国传统采用制动率 (闸瓦总压力与列车总重量之比) 表征列车制动性能不同, UIC 采用制动重量百分比表征列车制动性能^[26]。

1) 等效制动建立时间

转换模型首先以列车长度、制动位置、列车类型作为参数, 采用经验公式计算出等效制动建立时间, 以长度为 L 、制动位置为“P”的客运列车为例, 其紧急制动等效建立时间的计算公式为

$$T_{\text{be}} = K_{\text{t-int}} \times K_{\text{to}} \times (a_v + b_v \times L'/100 + c_v \times (L'/100)^2) \quad (6)$$

式中: L' 为修正列车长度 (制动位置为“G”时无须修正, 直接使用原车长), $L' = \max(400 \text{ m}, L)$; a_v 、 b_v 、 c_v 为经验值; K_{to} 为基于目标速度的修正系数 (仅当目标速度不为 0 时使用), 是一个与制动位置相关的经验值; $K_{\text{t-int}}$ 为基于初始速度的修正系数, 配置为国家值。

上述变量详细含义见 Subset-026。

2) 制动减速度

制动减速度同样通过制动重量百分比 λ 进行计算, 计算紧急制动曲线时直接使用 λ , 当计算常用制动曲线时, λ 最大取值不超过 135。

首先依据公式计算出减速度第 1 分段速度值: $V_{\text{lim}} = x \times \lambda^y$ (其中 x 、 y 均为经验值, 单位为 km/h); 然后按照 V_{lim} 的大小, 依据表 1 进行分段。由表 1 可见, 当 V_{lim} 小于 100 km/h 时, 达到最大分段数量 6 段, 当 $V_{\text{lim}} \geq 180 \text{ km/h}$ 时, 段数最少, 仅为 2 段。

表 1 制动减速度分段

Table 1 Braking deceleration subsection

V_{lim}	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
[0, 100]	[0, V_{lim}]	(V_{lim} , 100]	(100, 120]	(120, 150]	(150, 180]	(180, V_{max}]
[100, 120]	[0, V_{lim}]		(V_{lim} , 120]	(120, 150]	(150, 180]	(180, V_{max}]
[120, 150]	[0, V_{lim}]			(V_{lim} , 150]	(150, 180]	(180, V_{max}]
[150, 180]	[0, V_{lim}]				(V_{lim} , 180]	(180, V_{max}]
[180, V_{max}]	[0, V_{lim}]					(V_{lim} , V_{max}]

确定分段之后, 制动减速度各分段的数值按照如下公式进行计算:

$$a_i = A_i \times \lambda^3 + B_i \times \lambda^2 + C_i \times \lambda + D_i \quad (7)$$

式(7)中的 A_i 、 B_i 、 C_i 、 D_i 均为经验值, 详见 Subset-026。对于紧急制动, 还需要依据当前速度和列车长度按下式进行修正:

$$d_i = K_{\text{v-int}} \times K_{\text{r-int}} \times a_i \quad (8)$$

式中: $K_{\text{v-int}}$ 为与当前速度相关的修正系数; $K_{\text{r-int}}$ 为与列车长度相关的修正系数, 详见 Subset-026。

2.2 既有追踪间隔距离模型

轨道交通领域当前常用的闭塞制式主要包括固定闭塞 (含准移动闭塞) 和移动闭塞, 中国高铁均采用准移动闭塞, 城轨线路则多采用移动闭塞。

在固定闭塞下, 后车的追踪目标是前车所在闭塞分区/进路的起点, 如图 4 中蓝色曲线所示。移动闭塞则以前车的尾部 (后撤一个安全裕量) 为追踪目标, 见图 4 中红色曲线。目前移动闭塞已广泛用于城轨领

域, 干线领域中 ETCS-3/CTCS-4 也将采用移动闭塞, 并在积极开展相关研究, 例如 Shift2Rail 计划的 IP2 项目中已完成了移动闭塞规范的发布^[27]。

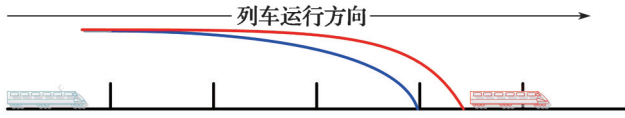


图4 固定闭塞与移动闭塞示例

Fig. 4 Example of fixed block and movable block

无论是固定闭塞还是移动闭塞, 其追踪点仅考虑前车的位置, 而并不考虑前车的速度, 即默认前车为静止 (“撞硬墙”)。

对于现有移动闭塞, 只需在后车的紧急制动距离上增加一个安全裕量作为前后车的安全间隔[如式(9)], 即可保证运行安全。

$$D_{\text{safe}} \geq S_{\text{EBb}} + S_0 \quad (9)$$

式中: D_{safe} 为前后车安全间隔; S_{EBb} 为后车紧急制动距离; S_0 为安全裕量。

由以上分析可知, 在不改造线路基础设施的前提下欲进一步提高线路运量, 就必须继续缩小列车追踪间隔, 而移动闭塞已经是“撞硬墙”的方式所能达到的线路运量极限。要进一步缩短追踪间隔, 就必须考虑前车当前的运行速度 (“撞软墙”), 即虚拟联挂所采用的追踪方式。

2.3 虚拟联挂安全追踪间隔模型

2.3.1 模型概述

“撞软墙”的追踪方式并非新提出的概念, 在提出移动闭塞概念时, 就包括了仅考虑前车位置和同时考虑前车位置、前车速度的两种移动闭塞制式^[28]。由于后者实现难度更大、安全风险更高, 因此一直没有成熟应用, 直到虚拟联挂概念的提出, 才发现该方式正好适用于虚拟联挂系统。“撞软墙”示例如图5, 红色曲线是前车的制动曲线, 蓝色曲线是后车的制动曲线。从图5可以看出, 后车的追踪目标点已经越过前车当前位置, 因此能进一步缩短追踪间隔, 从而提高线路运量。

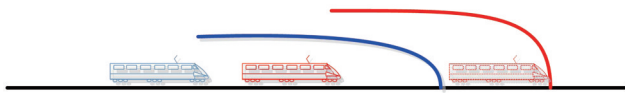


图5 “撞软墙”示例

Fig. 5 Example of "collision to a soft wall"

2.3.2 追踪间隔安全分析

根据 Subset-026^[2], 行车许可 (movement authority) 末端可分为两类: 第一类的目标速度为0, 其终点称为 EoA (end of authority); 第二类则为列车指定了一个到达许可终点时列车应具有的不为0的速度, 称为限制性许可 LoA (limit of authority)。

在“撞软墙”的概念提出后, 一种直接的方案就是简单地将 EoA 改为 LoA, 即将许可终点速度设置为前车当前速度。但实际运行中, 此种方案存在安全风险: ①测量误差的必然存在, 可能导致前后车对自己的当前实际速度估计不准, 无论是高估前车的速度还是低估自身的速度均会导致安全风险; ②更为严重的是, 与通常仿真计算采用的简化方案不同, 在真实线路上运行的不同列车通常会具有不同的列车特性 (包括制动特性), 若前车的制动能力比后车更强, 则相同速度下后车的制动距离比前车更长, 若不做额外防护就可能发生追尾事故。因此, 有必要针对追踪间隔进行安全分析。

理论上, 当两列车均为静止时, 其安全距离可以为0, 而当列车开始运动后, 则要求前车从当前速度开始的紧急制动距离与追踪间隔距离之和, 必须大于或等于后车的紧急制动距离与安全裕量 (包括相关的施工误差、测速测距误差、通信时延等导致的补偿距离等) 之和, 才能确保不会发生追尾风险, 计算公式如下:

$$S_{\text{EBf}} + D_{\text{safe}} \geq S_{\text{EBb}} + S_0 \quad (10)$$

式中: S_{EBf} 为前车的实时紧急制动距离; D_{safe} 为前后车之间的追踪间隔; S_{EBb} 为后车的实时紧急制动距离; S_0 为安全裕量。

由(10)可得

$$D_{\text{safe}} \geq S_{\text{EBb}} + S_0 - S_{\text{EBf}} \quad (11)$$

从式(11)可得, 若 $S_{\text{EBb}} > S_{\text{EBf}}$, 虚拟联挂编队内前后车之间的最小安全距离为

$$D_{\text{safe}} = S_{\text{EBb}} + S_0 - S_{\text{EBf}} \quad (12)$$

否则 (若 $S_{\text{EBb}} \leq S_{\text{EBf}}$) 最小安全距离为

$$D_{\text{safe}} = S_0 \quad (13)$$

因此仅需求出前后车的实时紧急制动距离和当前的安全裕量, 即可得出最小安全追踪间隔 D_{safe} , 该间隔是虚拟联挂编队内成员之间的最小安全距离, 应当根据当前列车状态实时计算, 后车应实时监控该距离, 以确保与前车的安全间隔。

2.3.3 前后车紧急制动距离差值

如2.1.2节中所述, 列车的紧急制动距离为

$$S_{\text{EB}} = D_{\text{bec}} + D_{\text{EBD}}(V_{\text{bec}})$$

对于前后车追踪而言, 从导向安全的角度分析, 风险最大的情况是前车的紧急制动性能处于最有利状态, 而后车紧急制动性能处于最不利状态。

所谓最有利状态, 是认为 D_{bec} 、 T_{be} 、 T_{traction} 均为0, 速度测量误差为过读误差 ($V_{\text{delta0}} < 0$): 即当制动命令发出后, 没有任何控制延迟, 列车立即从速度 $V_{\text{bec}} = V_{\text{est}} - |V_{\text{delta0}}|$ 开始以最大制动力制动。

后车的最不利状态则需要考虑全部的延迟, 且测量误差为欠读误差 ($V_{\text{delta0}} > 0$)。

由上述分析可见, 当前车的最有利紧急制动距离

与最小安全间隔距离之和大于等于后车的最不利紧急制动距离时,能始终确保后车不会追尾。

根据上述分析,计算最小安全间隔时,前后车的紧急制动距离分别为:

$$S_{EBf} = D_{EBD-f}(V_{ets-f} - |V_{\Delta 0-f}|) \quad (14)$$

$$S_{EBb} = D_{bec-b} + D_{EBD-b}(V_{est-b} + |V_{\Delta 0-b}| + V_{\Delta 1-b} + V_{\Delta 2-b}) \quad (15)$$

式中:下标的后缀-f表示前车;-b表示后车。

根据以上分析可以得出前后车紧急制动距离差值为

$$D_{bf} = S_{EBb} - S_{EBf} = D_{bec-b} + D_{EBD-b}(V_{est-b} + |V_{\Delta 0-b}| + V_{\Delta 1-b} + V_{\Delta 2-b}) - D_{EBD-f}(V_{est-f} - |V_{\Delta 0-f}|) \quad (16)$$

2.3.4 追踪间隔安全裕量计算

在实际运行过程中,不能仅采用 D_{bf} 作为前后车之间的最小安全间隔的原因在于必然存在的各种测量误差以及通信/控制延迟,包括以下5个方面:

①施工安装误差。该误差主要是应答器安装位置误差,根据Subset-041^[29],该误差范围为 $[-5\text{ m}, +5\text{ m}]$ 。

②测速误差。这是测速装置的不精确必然导致的误差,Subset-041规定,当车速为30 km/h以下时,该误差不大于 $\pm 2\text{ km/h}$,当大于等于30 km/h后,随着速度的增加,测速误差也线性增大,直到车速500 km/h时,误差最大增加到 $\pm 12\text{ km/h}$,即当速度在30~500 km/h时,测速误差大小可用下式计算:

$$|V_{\Delta 0}| = (v + 64) / 47 \quad (17)$$

③测距误差。ETCS车载设备使用的里程计误差一般随着运行距离增长而增大,每当经过定位应答器时回调。根据Subset-041,当回调后再次运行距离为 s ,则测距误差不超过 $5\% \times s$ 。

④通信延迟。无论是车地无线通信还是车车无线通信都必然存在一定的延迟,在计算编队内前后车追踪间隔时,车地通信延迟没有影响,因此仅需考虑车车通信延迟。该延迟包括:车载列控设备计算生成交互消息的时间,交互消息从车载列控设备发送至车载通信设备的时间,经车载通信设备发送至通信交换中心的时间,经通信交换中心到达对方车载通信设备的时间,从车载通信设备到车载列控设备的时间,车载列控处理消息并根据处理结果发出动作指令的时间。

若车车之间采用点对点直接通信,则没有经过通信交换中心这一环节。

一种获取该延迟时长方式是用理论计算并结合多次测量取平均值获得^[30]。但是,上述延迟仅是在理想状态下的延迟时间,在实际通信过程中,由于无线干扰、信道拥堵等原因必然导致丢包、重传甚至意外断开等情形,直接使用正常状态下的延迟时间,存在安全风险。

由于在实际应用中,任何安全通信协议均会定义一个通信断开时长 T_{disc} ,即若超过该时长仍未收到新消

息,则认为通信断开并需采取安全措施,因此采用通信断开时长作为通信延迟时间能确保安全。

⑤控制延迟。控制延迟是指车载列控设备向列车发出命令到命令起作用的时长^[30],主要包括制动延迟、切牵引延迟(计算安全间隔不考虑加速命令延迟),例如制动延迟是指从制动命令发出到制动力达到全部制动力的95%所用的时长。

上述安全裕量各分量中,测速误差已经在EBD曲线模型中通过 $V_{\Delta 0}$ 覆盖,控制延迟也通过制动等效建立时间 T_{be} 和牵引继续作用时间 $T_{traction}$ 进行覆盖,因此这两部分在安全裕量中将不再重复考虑。于是最终的安全裕量计算公式如下:

$$S_0 = E_0 + E_{install} + E_{dist} + E_{T2T} \quad (18)$$

式(18)中, E_0 是一个预设的固定安全裕量值,可以根据经验或线路特点设置,建议将站内停车与站外分开设置,在站内停车时速度较低,可以设置较小的 E_0 。

$E_{install}$ 为应答器安装误差,当前后车使用同一个LRBG(last relevant balise group,最近相关应答器组)作为定位参考时,应设置 $E_{install} = 0$;当前后车使用不同的LRBG时,从安全的角度考虑,后车取 $+5\text{ m}$,前车取 -5 m ,此时 $E_{install} = 10\text{ m}$ 。

测距误差 E_{dist} 随距离增加,基于导向安全的角度,应认为前车存在欠读误差,后车存在过读误差,假设前车距离自身LRBG为 d_1 ,后车距离自身LRBG为 d_2 ,则通用的算法可以取 $E_{dist} = 5\% \times d_1 + 5\% \times d_2$ 。但在实际运行中,车载ATP会根据测速测距装置计算出自身的过读误差 $L_{DOUBTOVER}$ 和欠读误差 $L_{DOBTUNDER}$ ^[2],则可以直接使用该误差值,即 $E_{dist} = L_{DOBTUNDER-f} + L_{DOUBTOVER-b}$ 。

假设车车通信延迟时长为 T_{disc} ,则该延迟导致间隔误差为 $E_{T2T} = T_{disc} \times V_{bec-b}$ 。此处从导向安全的角度忽略了前车在该段时间内向前行驶的距离,即认为前车在此时间内位置不变,因此计算 E_{dist} 时不考虑 T_{disc} 。

最终可得安全裕量为

$$S_0 = E_0 + 10 + L_{DOBTUNDER-f} + L_{DOUBTOVER-b} + T_{disc} \times V_{bec-b} \quad (19)$$

当前后车LRBG相同时,式(19)中去掉安装误差10 m。

2.3.5 安全追踪间隔完整模型

由前面各章节分析可知,在计算虚拟联挂安全追踪间隔时,前车采用最有利的紧急制动距离计算方式,后车采用最不利的紧急制动距离计算方式,在二者的差值上增加安全裕量,即可得到安全间隔 $D_{safe} = S_{EBb} + S_0 - S_{EBf} = S_0 + D_{bf}$ (当 $D_{bf} > 0$,否则仅取 S_0)。

由于前后车制动性能往往不同,当前车在较高速度的制动减速度远大于后车,而在较低速度时减速度又小于后车时,即使最终后车的停止点在前车车尾的后方,也可能在制动过程中某一时刻发生追尾,例如图6所示,尽管前后车的最终停车点之间仍然保持安全间隔,但在制动过程中将在C点发生追尾。

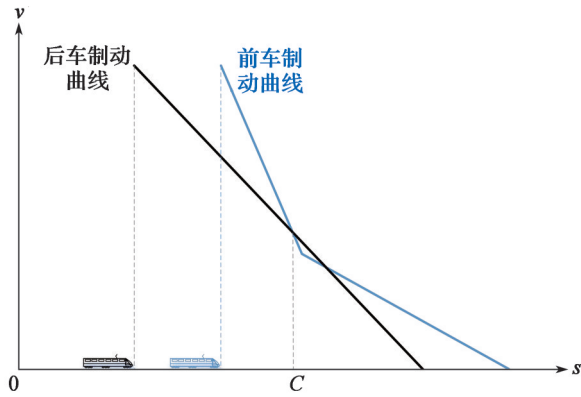


图6 前后车相撞示例

Fig. 6 Example of collision between preceding and following trains

文献[31]提出的解决方法是计算相对制动距离需同时计算LoA及EoA共两条制动曲线并取二者的最小值,且计算后者时使用前、后车制动力中的最大值。但该方法要同时计算两条曲线,实时计算量大;此外,中途相撞的主因是前车制动能力较强,若后车制动能力更强则不会相撞,因此不应考虑后车制动能力较强的情况而无需总是取二者中的最大值,否则会过度增大间隔距离。

本文提出一种安全裕量修正方法:结合前后车的各段减速度值,仅考虑前车减速度大于后车减速度的各速度区间(忽略后车减速度较大的区间),计算这些区间内后车与前车的制动距离差值,将差值作为安全裕量的一部分(以 E_a 表示),对安全间隔进行提前修正,则可以确保安全。下面以一个简单的例子来说明本修正方法。

假设当前列车速度为 v_4 ,前车减速度分为4段,分别是 d_{1f} 、 d_{2f} 、 d_{3f} 、 d_{4f} ,所属速度区间分别为: $[0, v_{1f})$, $[v_{1f}, v_{2f})$, $[v_{2f}, v_{3f})$, $[v_{3f}, +\infty)$;后车减速度分为3段,分别是 d_{1b} 、 d_{2b} 、 d_{3b} ,所属速度区间分别为 $[0, v_{1b})$, $[v_{1b}, v_{2b})$, $[v_{2b}, +\infty)$,其大小关系如图7,则该部分安全裕量可按下式计算:

$$E_a = (v_4^2 - v_{2b}^2)(d_{4f} - d_{3b}) / (2d_{4f}d_{3b}) + (v_{1b}^2 - v_{1f}^2)(d_{2f} - d_{1b}) / (2d_{2f}d_{1b}) + v_{1f}^2(d_{1f} - d_{1b}) / (2d_{1f}d_{1b}) \quad (20)$$

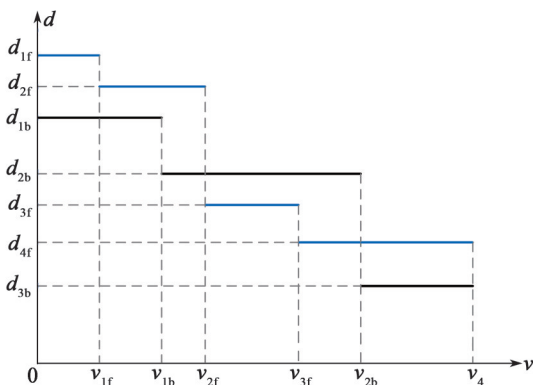


图7 前后车减速度示例

Fig. 7 Example of deceleration of preceding and following trains

综上所述,经修正后的总安全裕量为

$$S_{0M} = E_0 + 10 + L_{\text{DOUBTUNDER-f}} + L_{\text{DOUBTOVER-b}} + T_{\text{disc}} \times V_{\text{bec-b}} + E_a \quad (21)$$

最终可得虚拟联挂列车编队内安全间隔的完整模型如下:

$$D_{\text{safe}} \geq S_{\text{EBb}} + S_{0M} - S_{\text{EBf}} = D_{\text{bf}} + S_{0M}, \text{ 当 } D_{\text{bf}} \geq 0 \quad (22)$$

$$D_{\text{safe}} = S_{0M}, \text{ 当 } D_{\text{bf}} < 0 \quad (23)$$

3 安全间隔仿真计算

针对上述安全间隔模型进行仿真计算,用以分析虚拟联挂缩短追踪间隔的能力。

仿真计算按照第2章中提出的计算模型计算安全裕量以及前后车的紧急制动距离。作为对照,同时按照式(11)计算移动闭塞制式下的安全间隔,即后车的紧急制动距离加上安全裕量的和,该安全裕量仅考虑固定余量、安装误差和测距误差3部分(其余部分仅当使用虚拟联挂时才存在)。

计算依赖列车长度、制动特性、线路坡度、通信周期,以及一些线路参数如国家值、坡度等参数。表2列出本文各仿真中固定使用的部分参数,其余参数在不同的仿真中具体确定。

表2 仿真计算参数

Table 2 Parameters for simulating calculation

参数名称	取值	备注
E_0/m	80	区间固定安全裕量,仿真仅考虑区间追踪,并认为与原移动闭塞固定安全裕量相同
T_{disc}/s	3	车车之间直接通信应采用较高的通信频率,假设连续3 s收不到对方的消息,则认为通信连接断开,需采取安全措施
$L_{\text{DOUBTUNDER-f}}/\text{m}$	75	设应答器按照每1 500 m一组进行配置(每次位置回调后误差清零,最大测距误差为 ± 75 m),此值为极值,实际运行中小于等于此值
$L_{\text{DOUBTOVER-b}}/\text{m}$	75	设应答器按照每1 500 m一组进行配置(每次位置回调后误差清零,最大测距误差为 ± 75 m),此值为极值,实际运行中小于等于此值

$L_{\text{DOUBTUNDER-f}}$ 和 $L_{\text{DOUBTOVER-b}}$ 会随着列车与LRBG的距离增大而逐渐增大,在本文仿真计算中将固定使用其最大值 ± 75 m,实际运行中多数情况下会小于此最大值。

3.1 仿真1(平直轨道)

本仿真模拟最高速度350 km/h的高速动车组在坡度为0的平直轨道上行驶,制动位置为“P”型的客车,列车类型为Gamma车,前后两车制动参数相同,主要参数均由列车厂商直接提供,如表3。

表3 仿真1主要配置参数

Table 3 Main configuration parameters for simulation 1

参数名	取值	备注
前车长度/m	400	
后车长度/m	400	
坡度/‰	0	平直轨道
列车最高时速/ (km·h ⁻¹)	350	考虑测速误差, 列车最高速度在 (350±8.8) km/h 内
$T_{\text{traction}}/\text{s}$	2	紧急制动干预命令下达后继续牵引时间
T_{be}/s	2.5	紧急制动建立时间
$a_1/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	0.81	速度[0 km/h, 40 km/h)内的减速度
$a_2/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	0.72	速度[40 km/h, 80 km/h) 内的减速度
$a_3/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	0.66	速度[80 km/h, 100 km/h) 内的减速度
$a_4/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	0.64	速度[100 km/h, 155 km/h) 内的减速度
$a_5/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	0.44	速度[155 km/h, 220 km/h) 内的减速度
$a_6/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	0.48	速度[220 km/h, 300 km/h) 内的减速度
$a_7/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	0.40	速度大于 300 km/h 的减速度
$A_{\text{estl}}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	1	下达紧急制动命令时的加速度
M_{NVAADH}	1	可用轨轮黏着力权重系数
$K_{\text{dry-rst}}$	0.75	针对各段速度采用相同数值
$K_{\text{wet-rst}}$	0.95	针对各段速度采用相同数值
M_{NVEBCL}	99.99%	在干轨上紧急制动减速度的置信水平

仿真计算结果如表4所示, 图8是依据表4结果绘制的直观示意图。从表4数据可看出, 列车初始速度越高, 虚拟联挂对于缩短安全间隔的作用越明显, 与移动闭塞相比, 安全间隔的减小比例随着初速度的下降而逐渐下降, 初速度至20 km/h时, 两种安全间隔已非常接近, 这是因为随着速度下降, 前车的紧急制动距离与因虚拟联挂增加的额外安全裕量逐渐接近, 对于缩短安全间隔的贡献相应降低。其中, 在140 km/h到160 km/h速度区间安全间隔减少比例几乎不变, 原因是根据参数设置, 列车在155 km/h时, 制动减速度有一个较大的增加。

3.2 仿真2(有坡度轨道)

仿真2采用与仿真1相同的列车配置, 但线路坡度不再设置为0, 而采用前车上坡(坡度20‰)、后车下坡(坡度-20‰)的参数。

表5所示为仿真计算结果。从表5可以明显看出, 在其余参数不变的情况下, 前后车在不同的线路坡度导致安全间隔发生显著变化。当车速为20 km/h时, 虚拟联挂的安全间隔甚至大于移动闭塞的安全间隔, 这是因为车速较低时, 安全裕量对总间隔的影响明显增大, 而坡度的不同导致前车紧急制动距离小于车-车通信延时导致的安全裕量。

3.3 仿真3(不同制动性能)

仿真3除前车的制动性能不同外, 其余的配置参数均与仿真1相同。前车的制动减速度分段如表6所示,

前车制动能力强于后车。

仿真结果如表7所示。从表7可以看出, 与仿真1相比, 安全间隔相比移动闭塞的减小比例随速度减小而减小的趋势不变, 但虚拟联挂的安全裕量和安全间隔均明显增加, 相对于移动闭塞的减少量相应变小。发生此变化的原因一是前车制动能力的增加导致前车紧急制动距离缩短, 二是因制动特性不同而增加的安全裕量 E_a 。

3.4 仿真4(货运列车)

本次仿真最高速度200 km/h的万吨货运列车, 制动位置为“G”型, 列车类型均为Lambda车, 在平直轨道上运行。具体仿真分为(a)、(b)两部分, (a)部分后车制动能力弱于前车, (b)部分前后车制动能力一致。主要参数通过转换模型计算得出, 部分配置参数如表8。

仿真计算结果如表9和表10所示。从表9和表10可以看到安全间隔变化规律与其余仿真一致, 减少比例随列车初速减小而减小, (a)部分减小比例小于(b)部分的原因是后车制动能力较弱, 因此也符合预期, 可知制动能力的差异对安全间隔确实有明显的影响。

此外, 在计算过程中发现, 从 λ 值推导出的紧急制动等效建立时间较长(约29.3 s), 在该段时间内后车的运行距离在其总的紧急制动距离中占比较大(200 km/h时占比约27%, 20 km/h时占比高达77%), 该占比对安全间隔有显著影响。

3.5 仿真结果分析及探讨

3.5.1 安全间隔特点

从上述仿真计算结果可以看出, 虚拟联挂列车编队成员间的安全间隔具有如下特点: ①虚拟联挂确实可以缩短列车追踪间隔, 从而有效提升线路行车密度, 且车速越高, 间隔缩短比例越大, 以仿真1为例, 速度为350 km/h时安全间隔缩短比例接近80%, 而在20 km/h时缩短比例不到1%。②尽管虚拟联挂可用于替代物理联挂, 但列车间的距离仍无法与物理联挂相比, 高速时甚至可达数千米。③安全间隔距离的绝对值随列车速度增大而增大, 例如仿真1中, 350 km/h时的虚拟联挂间隔已大于160 km/h时采用移动闭塞制式(撞硬墙)时的间隔。④线路条件对安全间隔距离有显著影响, 以坡度为例, 在运行时, 编队成员间的距离必然随着各成员所在路段的坡度变化而不断变化。⑤虚拟编队各成员的制动能力对安全间隔有明显的影响, 若前车制动能力大于后车, 则应增大间隔距离, 反之, 则可以缩短间隔距离。⑥重载货运列车的等效制动建立时间 T_{be} 较长, 对于安全间隔有明显影响, 导致虚拟联挂的效率提升不显著。因此, 必要时可以在对制动参数进行严格测试的基础上, 通过修改安全间隔距离模型, 在计算前车的紧急制动距离时考虑该段时间内

表4 仿真1计算结果
Table 4 Result of simulation 1

列车初始速度/ (km·h ⁻¹)	后车紧急制动 距离/m	前车紧急制动 距离/m	安全裕量/m	虚拟联挂安全 间隔/m	移动闭塞安全 间隔/m	减少量/m	减小比例/%
350	15 131.19	12 557.54	539.01	3 112.66	15 371.19	12 258.53	79.75
340	14 175.46	11 709.87	530.50	2 996.09	14 415.46	11 419.37	79.22
330	13 246.49	10 886.90	521.99	2 881.58	13 486.49	10 604.91	78.63
320	12 344.27	10 088.64	513.48	2 769.10	12 584.27	9 815.17	78.00
310	11 468.81	9 315.07	504.96	2 658.71	11 708.81	9 050.10	77.29
300	10 620.11	8 671.48	496.45	2 445.09	10 860.11	8 415.02	77.49
290	9 798.18	8 067.80	487.94	2 218.32	10 038.18	7 819.86	77.90
280	9 056.64	7 484.70	479.43	2 051.37	9 296.64	7 245.27	77.93
270	8 415.32	6 922.20	470.92	1 964.05	8 655.32	6 691.27	77.31
260	7 796.31	6 380.27	462.41	1 878.45	8 036.31	6 157.86	76.63
250	7 188.26	5 858.93	453.90	1 783.23	7 428.26	5 645.03	75.99
240	6 625.19	5 358.18	445.39	1 712.40	6 865.19	5 152.79	75.06
230	6 073.07	4 878.01	436.88	1 631.94	6 313.07	4 681.13	74.15
220	5 543.25	4 397.64	428.37	1 573.98	5 783.25	4 209.27	72.78
210	5 030.94	3 918.50	419.86	1 532.30	5 270.94	3 738.64	70.93
200	4 518.49	3 461.82	411.35	1 468.02	4 758.49	3 290.47	69.15
190	4 014.38	3 027.59	402.84	1 389.62	4 254.38	2 864.76	67.34
180	3 534.59	2 615.82	394.33	1 313.09	3 774.59	2 461.50	65.21
170	3 079.11	2 226.51	385.82	1 238.42	3 319.11	2 080.69	62.69
160	2 647.98	1 859.65	377.30	1 165.64	2 887.98	1 722.34	59.64
150	2 241.17	1 620.61	368.79	989.35	2 481.17	1 491.82	60.13
140	1 889.00	1 401.45	360.28	847.83	2 129.00	1 281.17	60.18
130	1 638.26	1 195.39	351.77	794.65	1 878.26	1 083.61	57.69
120	1 406.70	1 004.77	343.26	745.19	1 646.70	901.51	54.75
110	1 191.86	829.59	334.75	697.02	1 431.86	734.84	51.32
100	993.75	671.53	326.24	648.46	1 233.75	585.29	47.44
90	812.37	531.60	317.73	598.50	1 052.37	453.87	43.13
80	651.88	409.80	309.22	551.30	891.88	340.58	38.19
70	508.21	308.97	300.71	499.95	748.21	248.26	33.18
60	389.96	222.69	292.20	459.47	629.96	170.49	27.06
50	286.54	149.18	283.69	421.04	526.54	105.50	20.04
40	198.99	90.74	275.18	383.43	438.99	55.56	12.66
30	126.37	49.79	266.67	343.25	366.37	23.12	6.31
20	75.11	20.58	258.33	312.86	315.11	2.25	0.71

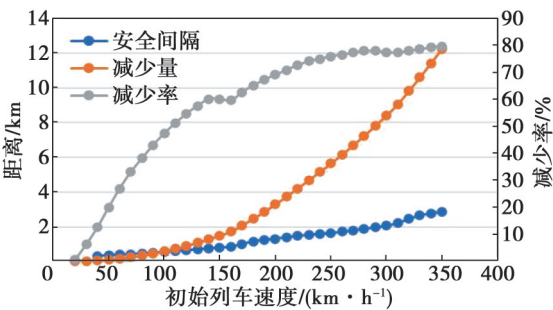


图8 仿真1结果示意图

Fig. 8 Schematic diagram of results from simulation 1

的行驶距离，可以在中低速时显著缩短安全间隔距离。

3.5.2 分析与探讨

基于仿真结果对虚拟联挂安全间隔的特点进行分析可知：①尽管在高速时虚拟联挂对于缩短安全间隔

距离的效果明显，但该距离的长短与车速呈正相关，高速时可达数千米，而低速时仅200多米（含80 m固定余量），这与物理联挂有着本质的不同：首先，怎样通过列车之间的协同保持编队的稳定并维持安全的间隔，是一个重要的挑战；其次，较远的间隔距离对车车之间的点对点通信设施的性能提出了要求，若要在高速铁路引入虚拟联挂，除协同控制算法是必须解决的关键问题外，车-车通信也是一个困难点，一个解决的思路是采用车-地-车通信设施替代，但通信延迟会增加，影响效率。②因列车制动性能的差异对安全间隔距离有影响，故在制定虚拟联挂调度计划时，应当尽量将制动能力较强的列车作为后车，将制动能力较弱的作为前车。③虚拟联挂对线路运能的提升，与线路自身状况如坡度、设计速度等密切相关。相较而言，

表 5 仿真 2 计算结果

Table 5 Result of simulation 2

列车初始速度/ (km·h ⁻¹)	后车紧急制动 距离/m	前车紧急制动 距离/m	安全裕量/m	虚拟联挂安全 间隔/m	移动闭塞安全 间隔/m	减少量/m	减小比例/%
350	32 282.76	8 326.03	539.01	24 495.74	32 522.76	8 027.02	24.68
340	29 935.97	7 794.42	530.50	22 672.04	30 175.97	7 503.93	24.87
330	27 655.17	7 278.31	521.99	20 898.85	27 895.17	6 996.32	25.08
320	25 440.38	6 777.69	513.48	19 176.17	25 680.38	6 504.21	25.33
310	23 291.58	6 292.55	504.96	17 503.99	23 531.58	6 027.59	25.61
300	21 208.78	5 868.62	496.45	15 836.61	21 448.78	5 612.17	26.17
290	19 191.98	5 464.95	487.94	14 214.98	19 431.98	5 217.00	26.85
280	17 521.78	5 075.04	479.43	12 926.18	17 761.78	4 835.60	27.22
270	16 257.67	4 698.89	470.92	12 029.71	16 497.67	4 467.96	27.08
260	15 037.76	4 336.51	462.41	11 163.67	15 277.76	4 114.09	26.93
250	13 862.05	3 987.89	453.90	10 328.06	14 102.05	3 773.99	26.76
240	12 730.54	3 653.04	445.39	9 522.88	12 970.54	3 447.66	26.58
230	11 643.22	3 331.96	436.88	8 748.14	11 883.22	3 135.08	26.38
220	10 600.10	3 016.69	428.37	8 011.78	10 840.10	2 828.32	26.09
210	9 591.67	2 705.66	419.86	7 305.87	9 831.67	2 525.80	25.69
200	8 518.97	2 409.21	411.35	6 521.10	8 758.97	2 237.87	25.55
190	7 430.22	2 127.33	402.84	5 705.72	7 670.22	1 964.50	25.61
180	6 394.41	1 860.04	394.33	4 928.70	6 634.41	1 705.71	25.71
170	5 411.54	1 607.32	385.82	4 190.04	5 651.54	1 461.50	25.86
160	4 481.62	1 369.17	377.30	3 489.75	4 721.62	1 231.87	26.09
150	3 604.63	1 195.47	368.79	2 777.95	3 844.63	1 066.68	27.74
140	2 885.56	1 035.69	360.28	2 210.16	3 125.56	915.40	29.29
130	2 490.76	885.46	351.77	1 957.08	2 730.76	773.68	28.33
120	2 126.46	746.48	343.26	1 723.25	2 366.46	643.22	27.18
110	1 788.78	618.76	334.75	1 504.78	2 028.78	524.00	25.83
100	1 477.72	503.19	326.24	1 300.76	1 717.72	416.96	24.27
90	1 193.26	400.33	317.73	1 110.67	1 433.26	322.59	22.51
80	945.84	310.21	309.22	944.85	1 185.84	240.99	20.32
70	725.23	234.42	300.71	791.52	965.23	173.71	18.00
60	551.44	169.57	292.20	674.08	791.44	117.36	14.83
50	400.51	114.30	283.69	569.90	640.51	70.61	11.02
40	273.29	70.15	275.18	478.32	513.29	34.97	6.81
30	168.40	38.49	266.67	396.58	408.40	11.82	2.89
20	98.70	15.91	258.33	341.13	338.70	-2.43	-0.72

表 6 前车减速度

Table 6 Deceleration of preceding train

速度范围/ (km·h ⁻¹)	[0, 40)	[40, 80)	[80, 160)	[160, 200)	[200, 250)	[250, 300)	≥300
减速度/(m·s ⁻²)	0.81	0.72	0.68	0.65	0.52	0.50	0.42

坡度起伏较小的线路更适合虚拟联挂，具体到某条线路，需要通过详细计算分析来确定虚拟联挂能够带来的提升程度，经过优劣比对，以确定是否采用此功能。④虚拟联挂技术的优势主要在于区间行车的追踪间隔缩短。若不进行基础设施改造，受站台长度等限制，当接近车站时，就需要提前解编，因此区间的长度也会影响效率：若线路上长大区间少、站间距较短，则

频繁地联挂、解编必然会降低效率，虚拟联挂带来的优势会相应降低。⑤在低速情况下，安全裕量对安全间隔的影响较大，可以考虑将固定安全裕量 E_0 改为随车速变化，尤其是进站停车时，为了缩短对站台长度的要求，可以针对该情况单独设置 E_0 的值（例如当速度接近0时，可考虑将 E_0 缩短至5 m以内）。⑥对于重载货运线路，其设计速度一般不超过120 km/h，列车运营速度通常为80 km/h左右，在此速度区间内，由于等效制动建立时间 T_{be} 较长，导致虚拟联挂的安全间隔相较于移动闭塞缩短比例并没有预期的大，例如仿真4(b)中，介于26%~37%之间，绝对缩短量仅数百米。因此，应当综合考虑线路区间长度、站台长度、建设改造成本、系统成熟度、运营调度难度等因素，对于

表 7 仿真 3 计算结果

Table 7 Result of simulation 3

列车初始速度/ (km·h ⁻¹)	后车紧急制动 距离/m	前车紧急制动 距离/m	安全裕量/ m	虚拟联挂安全 间隔/m	移动闭塞安全 间隔/m	减少量/m	减小比例/%
350	15 131.19	11 327.11	1 880.11	5 684.19	15 371.19	9 687.00	63.02
340	14 175.46	10 519.81	1 826.37	5 482.02	14 415.46	8 933.44	61.97
330	13 246.49	9 736.03	1 773.90	5 284.36	13 486.49	8 202.13	60.82
320	12 344.27	8 975.77	1 722.71	5 091.20	12 584.27	7 493.07	59.54
310	11 468.81	8 239.04	1 672.80	4 902.57	11 708.81	6 806.24	58.13
300	10 620.11	7 622.37	1 624.17	4 621.91	10 860.11	6 238.20	57.44
290	9 798.18	7 042.84	1 576.81	4 332.15	10 038.18	5 706.03	56.84
280	9 056.64	6 483.07	1 535.94	4 109.50	9 296.64	5 187.14	55.80
270	8 415.32	5 943.06	1 502.02	3 974.29	8 655.32	4 681.03	54.08
260	7 796.31	5 422.82	1 469.00	3 842.50	8 036.31	4 193.81	52.19
250	7 188.26	4 935.41	1 436.88	3 689.73	7 428.26	3 738.53	50.33
240	6 625.19	4 473.17	1 405.65	3 557.66	6 865.19	3 307.53	48.18
230	6 073.07	4 029.94	1 363.92	3 407.05	6 313.07	2 906.02	46.03
220	5 543.25	3 609.94	1 315.16	3 248.47	5 783.25	2 534.78	43.83
210	5 030.94	3 204.52	1 268.11	3 094.53	5 270.94	2 176.41	41.29
200	4 518.49	2 861.79	1 195.49	2 852.18	4 758.49	1 906.31	40.06
190	4 014.38	2 567.85	1 110.40	2 556.92	4 254.38	1 697.46	39.90
180	3 534.59	2 289.12	975.50	2 220.96	3 774.59	1 553.63	41.16
170	3 079.11	2 025.58	821.94	1 875.47	3 319.11	1 443.64	43.49
160	2 647.98	1 782.53	676.27	1 541.72	2 887.98	1 346.26	46.62
150	2 241.17	1 559.68	538.47	1 219.96	2 481.17	1 261.21	50.83
140	1 889.00	1 353.41	430.87	966.45	2 129.00	1 162.55	54.61
130	1 638.26	1 159.48	408.14	886.93	1 878.26	991.33	52.78
120	1 406.70	980.07	386.40	813.04	1 646.70	833.66	50.63
110	1 191.86	815.20	365.66	742.32	1 431.86	689.54	48.16
100	993.75	664.85	345.90	674.79	1 233.75	558.96	45.31
90	812.37	529.04	327.12	610.45	1 052.37	441.92	41.99
80	651.88	409.80	313.53	555.61	891.88	336.27	37.70
70	508.21	308.97	300.99	500.23	748.21	247.98	33.14
60	389.96	222.69	292.20	459.47	629.96	170.49	27.06
50	286.54	149.18	283.69	421.04	526.54	105.50	20.04
40	198.99	90.74	275.18	383.43	438.99	55.56	12.66
30	126.37	49.79	266.67	343.25	366.37	23.12	6.31
20	75.11	20.58	258.33	312.86	315.11	2.25	0.71

表 8 仿真 4 主要配置参数

Table 8 Main configuration parameters for simulation 4

参数名称	取值	备注
前车长度/m	1 350	
后车长度/m	1 350	
坡度	0‰	平直轨道
列车最高速度/(km·h ⁻¹)	200	考虑测速误差, 列车最高速度在(200±5.6)km/h 内
λ_1	100/%	仿真 4(a)前车制动百分比
λ_2	90/%	后车制动百分比, 以及仿真 4(b)前车制动百分比
K_{t-int}	1.1	取值范围(0, 2]
K_{v-int}	0.7	取值范围(0, 2]
K_{r-int}	0.9	取值范围(0, 2]
$A_{est1}/(m·s^{-2})$	0.05	下达紧急制动命令时的列车加速度

表 9 仿真 4(a)计算结果
Table 9 Result of simulation 4(a)

列车初始速度/ (km·h ⁻¹)	后车 D_{bec} /m	后车紧急制动 距离/m	前车紧急制动 距离/m	安全裕量/m	虚拟联挂安全 间隔/m	移动闭塞安全 间隔/m	减少量/m	减小比例/%
200	1 696.96	6 297.23	3 457.86	849.39	3 688.76	6 537.23	2 848.47	43.57
190	1 613.75	5 726.25	3 066.87	795.04	3 454.42	5 966.25	2 511.83	42.10
180	1 530.53	5 179.45	2 699.30	742.97	3 223.11	5 419.45	2 196.34	40.53
170	1 447.31	4 656.82	2 354.54	693.17	2 995.44	4 896.82	1 901.38	38.83
160	1 364.09	4 160.78	2 029.67	645.92	2 777.03	4 400.78	1 623.75	36.90
150	1 280.87	3 692.86	1 730.51	600.93	2 563.27	3 932.86	1 369.59	34.82
140	1 197.66	3 249.25	1 459.93	558.21	2 347.53	3 489.25	1 141.72	32.72
130	1 114.44	2 841.78	1 205.52	517.92	2 154.18	3 081.78	927.60	30.10
120	1 031.22	2 457.20	999.33	479.87	1 937.74	2 697.20	759.46	28.16
110	948.00	2 102.41	837.74	439.24	1 703.91	2 342.41	638.50	27.26
100	864.79	1 830.04	690.40	413.84	1 553.48	2 070.04	516.56	24.95
90	781.57	1 574.32	557.29	389.65	1 406.68	1 814.32	407.64	22.47
80	698.35	1 334.13	438.43	367.01	1 262.71	1 574.13	311.42	19.78
70	615.13	1 112.51	333.80	345.91	1 124.61	1 352.51	227.90	16.85
60	531.91	907.86	244.27	326.35	989.94	1 147.86	157.92	13.76
50	448.70	720.18	167.98	308.34	860.54	960.18	99.64	10.38
40	365.48	549.46	105.93	291.88	735.40	789.46	54.06	6.85
30	282.26	395.71	58.12	276.96	614.54	635.71	21.17	3.33
20	200.78	261.55	24.02	263.84	501.37	501.55	0.18	0.04

表 10 仿真 4(b)计算结果
Table 10 Result of simulation 4(b)

列车初始速 度/(km·h ⁻¹)	后车紧急制动 距离/m	前车紧急制动 距离/m	安全裕量/m	虚拟联挂安全 间隔/m	移动闭塞安全 间隔/m	减少量/m	减小比例/%
200	6 297.23	3 823.32	411.35	2 885.26	6 537.23	3 651.97	55.86
190	5 726.25	3 391.80	402.84	2 737.28	5 966.25	3 228.97	54.12
180	5 179.45	2 985.96	394.33	2 587.81	5 419.45	2 831.64	52.25
170	4 656.82	2 605.13	385.82	2 437.50	4 896.82	2 459.32	50.22
160	4 160.78	2 246.27	377.30	2 291.81	4 400.78	2 108.97	47.92
150	3 692.86	1 915.31	368.79	2 146.34	3 932.86	1 786.52	45.43
140	3 249.25	1 615.38	360.28	1 994.16	3 489.25	1 495.09	42.85
130	2 841.78	1 333.38	351.77	1 860.18	3 081.78	1 221.60	39.64
120	2 457.20	1 099.09	343.26	1 701.37	2 697.20	995.83	36.92
110	2 102.41	921.41	334.75	1 515.75	2 342.41	826.66	35.29
100	1 830.04	759.35	326.24	1 396.94	2 070.04	673.10	32.52
90	1 574.32	612.95	317.73	1 279.11	1 814.32	535.21	29.50
80	1 334.13	482.21	309.22	1 161.14	1 574.13	412.99	26.24
70	1 112.51	367.14	300.71	1 046.08	1 352.51	306.43	22.66
60	907.86	268.66	292.20	931.39	1 147.86	216.47	18.86
50	720.18	184.76	283.69	819.11	960.18	141.07	14.69
40	549.46	116.51	275.18	708.13	789.46	81.33	10.30
30	395.71	63.93	266.67	598.45	635.71	37.26	5.86
20	261.55	26.42	258.33	493.46	501.55	8.09	1.61

部分货运线路而言，升级为移动闭塞可能比升级到虚拟联挂更合适。另一个方案是，在通过严格试验验证、安全风险能够承担的前提下，在计算前车中低速紧急制动距离时，可通过修改安全间隔模型，适当考虑 T_{bc} 期间前车的行驶距离，以达到缩短安全间隔的目的。

4 结论

本文基于 ERTMS/ETCS 所采用的符合 UIC 标准的列车制动曲线模型，为虚拟联挂列车编队内成员间的安全间隔距离进行建模，提出了编队成员列车之间最

小安全间隔距离的通用计算方法, 该方法可以为ETCS/CTCS列控系统升级虚拟联挂功能提供支持。通过仿真计算分析, 对不同速度、不同列车类型、不同线路坡度等情况下的编队成员列车间距进行了比较, 并据此对虚拟联挂在干线铁路应用的适用性、需要考虑的问题进行了探讨和分析。分析结果表明, 虚拟联挂相较于移动闭塞, 尽管安全间隔距离有所缩短, 但在高速时安全间隔仍可达数千米, 这对编队协同控制算法、车-车通信设施均提出了挑战。此外, 安全间隔与列车速度、列车类型、列车制动性能、线路条件等密切相关, 对线路运能的提升程度也因路、因车而异, 是否应该引入虚拟联挂功能不能一概而论, 需针对具体线路以及所使用的列车类型进行具体计算分析。

参考文献:

- [1] 林鸿, 王林美, 魏艳萍. 关于欧盟 Shift2Rail 计划的研究[J]. 国外铁道车辆, 2019, 56(1): 11-16.
LIN Hong, WANG Linmei, WEI Yanping. A study of the EU Shift2Rail plan[J]. Foreign rolling stock, 2019, 56(1): 11-16.
- [2] Era Unisig Eeig Ertms Users Group. ERTMS/ETCS system requirements specification: subset-026 V3.6.0[Z]. Paris: European Rail Traffic Management System, 2016.
- [3] 中华人民共和国铁道部. 中国列车运行控制系统CTCS技术规范总则(暂行)[EB/OL]. (2003-10-01) [2025-01-18]. https://wenku.baidu.com/view/bf7912da5df7ba0d4a7302768e9951e79a896971.html?_wks_ =1750297334936&bdQuery=CTCS%E6%8A%80%E6%9C%AF%E8%A7%84%E8%8C%83%E6%80%BB%E5%88%99&needWelcomeRecommend=1.
Ministry of Railways of the People's Republic of China. General provisions of technical specifications for CTCS (provisional) [EB/OL]. (2003-10-01) [2025-01-18]. https://wenku.baidu.com/view/bf7912da5df7ba0d4a7302768e9951e79a896971.html?_wks_ =1750297334936&bdQuery=CTCS%E6%8A%80%E6%9C%AF%E8%A7%84%E8%8C%83%E6%80%BB%E5%88%99&needWelcomeRecommend=1.
- [4] BOCK U, BIKKER G. Design and development of a future freight train concept "virtually coupled train formations" [C]//IFAC. 9th IFAC Symposium on Control in Transportation Systems. Braunschweig: IFAC, 2000: 395-400.
- [5] IRSE International Technical Committee. ERTMS level 4, train convoys or virtual coupling (2016)[R]. London: IRSE, 2016.
- [6] MITCHELL I. Closer running: is it feasible? [EB/OL]. (2016-05-06) [2024-12-24]. <https://www.railengineer.co.uk/closer-running-is-it-feasible/>.
- [7] WILLIAMS C. The next ETCS Level? [C]//IEEE. 2016 IEEE International Conference on Intelligent Rail Transportation. Birmingham: IEEE, 2016: 75-79.
- [8] FLAMMINI F, MARRONE S, NARDONE R, et al. Compositional modeling of railway virtual coupling with stochastic activity networks[J]. Formal aspects of computing, 2021, 33(6): 989-1007.
- [9] QUAGLIETTA E, WANG Meng, 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.
- [10] 崔俊峰, 刘岭. 虚拟耦合在列控系统应用的关键技术需求研究[J]. 铁路通信信号工程技术, 2019, 16(10): 1-5.
CUI Junfeng, LIU Ling. Research on key technology requirements of virtual coupling in application of train control system[J]. Railway signalling & communication engineering, 2019, 16(10): 1-5.
- [11] 杨中平, 游婷, 束天成, 等. 列车虚拟编组技术的研究现状及发展[J]. 都市快轨交通, 2023, 36(1): 14-21.
YANG Zhongping, YOU Ting, SHU Tiancheng, et al. Research status and development of virtual coupling technology[J]. Urban rapid rail transit, 2023, 36(1): 14-21.
- [12] FELEZ J, KIM Y, BORRELLI F. A model predictive control approach for virtual coupling in railways[J]. IEEE transactions on intelligent transportation systems, 2019, 20(7): 2728-2739.
- [13] DI MEO C, DI VAIO M, FLAMMINI F, et al. ERTMS/ETCS virtual coupling: proof of concept and numerical analysis[J]. IEEE transactions on intelligent transportation systems, 2020, 21(6): 2545-2556.
- [14] CAO Yuan, YANG Yaran, MA Lianchuan, et al. Research on virtual coupled train control method based on GPC & VAPF [J]. Chinese journal of electronics, 2022, 31(5): 897-905.
- [15] 刘岭. 基于虚拟耦合的列车群体智能控制技术研究及展望[J]. 铁路通信信号工程技术, 2020, 17(2): 1-9.
LIU Ling. Research and prospect of intelligent control technology for virtually coupled train formation[J]. Railway signalling & communication engineering, 2020, 17(2): 1-9.
- [16] 张小林, 赵磊. 模型预测控制在轨道交通虚拟耦合列控系统中的应用[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(10): 233-237.
ZHANG Xiaolin, ZHAO Lei. Application of model predictive control in virtual coupling train control system[J]. Urban mass transit, 2021, 24(10): 233-237.
- [17] 赵兴东, 王伟, 武紫玉, 等. 基于虚拟编组的均衡间隔列车运行图编制研究[J]. 都市快轨交通, 2023, 36(1): 51-58.
ZHAO Xingdong, WANG Wei, WU Ziyu, et al. Using virtual coupling technology to develop train timetable with equilibrium interval[J]. Urban rapid rail transit, 2023, 36(1): 51-58.
- [18] 游婷, 马法运, 苗峰, 等. 城市轨道交通虚拟编组列车优化运行方案研究[J]. 都市快轨交通, 2023, 36(1): 36-42.
YOU Ting, MA Fayun, MIAO Feng, et al. Optimal operation plan design for virtually coupled trains in urban rail Transit[J]. Urban rapid rail transit, 2023, 36(1): 36-42.
- [19] 杨安安, 孙继营, 汪波, 等. 基于虚拟编组技术的大小交路列

- 车开行方案优化[J]. 北京交通大学学报, 2022, 46(4): 9-14.
- YANG Anan, SUN Jiying, WANG Bo, et al. Optimization of virtual-coupling-orientated train operation plan based on full-length and short-turn routing[J]. Journal of Beijing jiaotong university, 2022, 46(4): 9-14.
- [20] 白佳薇, 张琦, 鲁放. 城市轨道交通虚拟编组列车快慢车组织方案研究[J]. 都市轨道交通, 2022, 35(1): 126-133.
- BAI Jiawei, ZHANG Qi, LU Fang. Skip-stop operation organization plan of virtual coupling trains in urban rail transit [J]. Urban rapid rail transit, 2022, 35(1): 126-133.
- [21] 伍靖雯. 畅行全球! 中车时代电气首发欧标列车控制信号系统[N]. 株洲晚报, 2019-06-14(A4).
- WU Jingwen. Travel freely around the world! CRRC Times Electric has launched the first European standard train control signal system[N]. Zhuzhou evening newspaper, 2019-06-14(A4).
- [22] Anon. Virtual train coupling system concept and application conditions[Z]. Paris: EU Funding for Research & Innovation, 2020.
- [23] Era Unisig Eeig Ertms Users Group. ERTMS/ETCS system requirements specification: subset-026 V2.3.0d[Z]. Paris: European Rail Traffic Management System, 2008.
- [24] International Union of Railways. Brakes-braking power: UIC 544-1:2004[S]. Paris: UIC, 2004.
- [25] European Committee for Standardization. Railway applications-braking-brake performance: EN 16834:2019[S]. Bruxelles: European Committee for Standardization, 2019.
- [26] П.Т.Гребенюк, 朱德功. 国际联运车辆的制动标准[J]. 铁道车辆, 1965(3): 27-29.
- П.Т.Гребенюк, ZHU Degong. Braking standards for international intermodal rolling stock[J]. Rolling stock, 1965(3): 27-29.
- [27] Anon. Moving block specification Part 1-Introduction[Z]. Paris: EU Funding for Research & Innovation, 2022.
- [28] 傅世善. 闭塞与列控概论第十讲移动闭塞概述[J]. 铁路通信信号工程技术, 2006, 3(4): 61-63.
- FU Shishan. Overview of block and train control lesson 10 overview of moving block[J]. Railway signalling & communication engineering, 2006, 3(4): 61-63.
- [29] Era Unisig Eeig Ertms Users Group. ERTMS/ETCS performance requirements for interoperability: subset-041 V3.2.0 [Z]. Paris: European Rail Traffic Management System, 2015.
- [30] SPARTALIS P. Capacity benefits of virtual coupling over ETCS L3 moving block in a realistic operational environment[D]. Delft: Delft University of Technology, 2021.
- [31] 宋志丹, 徐效宁, 李辉, 等. 面向虚拟编组的列控技术研究[J]. 铁道标准设计, 2019, 63(6): 155-159.
- SONG Zhidan, XU Xiaoning, LI Hui, et al. Study on virtual-coupling-oriented train control technique[J]. Railway standard design, 2019, 63(6): 155-159.

Analysis of safe intervals for virtually coupled operation based on ETCS braking model

LI Qihe¹, LEI Chengjian¹, XIE Xing¹, CHEN Dong²

(1. Beijing Branch, Hunan CRRC Times Signal & Communication Co., Ltd., Beijing 100071, China;
2. Zhuzhou CRRC Times Electric Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: Instead of physical coupling, virtual coupling technology implements wireless communication and cooperative control between trains to create a virtual platoon of multiple trains operating under unified control. The operation of virtually coupled trains can shorten the distance between operating trains, increase traffic volumes of railways, and improve operational resilience without significant infrastructure renovations. Since the European Union designated virtual coupling as a key research topic in the Shift2Rail initiative, this technology has quickly become a research hotspot in the field of rail transit both domestically and internationally. In this context, ensuring the safety of trains operating at shorter intervals is recognized as a critical issue that must be addressed for the successful application of virtual coupling technology. The initial analysis identified the constituent elements for determining safe intervals between virtually coupled trains, based on the standard train braking model established for the European train control system (ETCS), leading to the development of a generic method for calculating these safe intervals. Subsequent simulating calculations analyzed the characteristics of safe intervals at various speeds, train models, and track slopes. Further study explored the impact of safe intervals on the application of virtual coupling technology on trunk railways, providing reference for implementing virtual coupling functionality in the upgrading of these railways.

Keywords: virtual coupling; relative braking distance; braking model; safe interval; virtual train coupling system; simulation