

基于时延防护的编组列车安全包络管理方法^{*}

耿 鹏 赵 鹏 聂宇威

(通号城市轨道交通技术有限公司, 100070, 北京)

摘 要 [目的] 灵活编组列车中的主控车、被控车与 ZC (区域控制器) 通信延时存在异步性, 不同列车的安全包络可能出现重叠、错位、不连续等情况。为了提高 ZC 对灵活编组列车安全包络管理的精度, 需研究不同列车的消息延时差异, 在时延防护的前提下对编组列车的安全包络进行动态管理。[方法] 对编组列车的位置关系进行场景分析; 介绍了典型编组列车安全包络处理方案; 提出改进编组列车安全包络处理方案, 并对两种方案进行了对比分析。[结果及结论] ZC 与 VOBC (车载控制器) 通过交互延时计算参数计算消息延时, ZC 通过比较主控车和被控车的延时状态, 动态计算编组列车安全包络。由于 ZC 不单独依靠主控车扩展包络, 当主控车位置无法确定时, 可使用当前被控车位置进行计算处理, 避免了采用历史信息导致位置报告无法及时更新的情况, 解决了主控车通信质量较差时安全包络精度低的问题, 提升了 ZC 控制列车的管理精度。

关键词 轨道交通; 灵活编组列车; 安全包络; 时延防护

中图分类号 U284.48

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.02.036

Safety Envelope Management Method for Marshaled Trains Based on Time Delay Protection

GENG Peng, ZHAO Peng, NIE Yuwei

(CRSC Urban Rail Transit Technology Co., Ltd., 100070, Beijing, China)

Abstract [Objective] In flexible marshaled trains, the communication delay between the master railcar, subordinate railcar and ZC (zone controller) exhibits asynchrony, leading to potential issues such as overlapping, misalignment, and discontinuity in the safety envelopes of different trains. To enhance the accuracy of ZC in managing the safety envelopes of flexible marshaled trains, it is essential to study the message delay differences among different trains. It is aimed to dynamically manage the safety envelopes of marshaled trains under the premise of delay protection. [Method] A scenario analysis of the positional relationships among marshaled trains is conducted. A typical safety envelope handling solution for marshaled

trains is introduced and the improved one is proposed, a comparative analysis between the two solutions is conducted. [Result & Conclusion] ZC and VOBC (vehicle on-board controller) calculate message delays with interactive delay calculation parameters. By comparing the delay status between the master and subordinate railcars, ZC dynamically calculates the safety envelope for marshaled trains. Unlike relying solely on the master railcar for extending the envelope, ZC can use the current position of the subordinate railcar for calculation when the master railcar position is uncertain, avoiding situations where adopting historical information causes delays in updating position reports promptly. The issue of low safety envelope accuracy when master railcar communication quality is poor, thereby enhancing the management precision of ZC controlled trains.

Key words rail transit; flexible marshaled train; safety envelope; delay protection

在基于物理联挂的灵活编组技术中, 联挂过程是由一列短编组列车处于静止状态, 另一列短编组列车在 ZC (区域控制器) 的控制下通过低速撞击实现两列车的硬连接, 从而联挂成一列长编组列车。虽然两列短编组列车组合成了一列长编组列车, 但在列车运行过程中, 两列短编组列车依然是两个独立的车载系统, 并且分别向 ZC 报告位置信息^[1]。由于不同短编组列车通过相互独立的链路与 ZC 通信, 且无线通信网络结构存在不确定性, 因此两个链路的通信延时具有随机性。当 ZC 接收到两个 VOBC (车载控制器) 发送的位置信息时, 该位置信息可能出现重叠、错位、不连续等情况, 即 ZC 接收的位置信息与编组列车实际位置不符^[2]。因此, ZC 需要采取相应的技术措施识别编组列车的位置变化, 有效应对 ZC 计算的列车位置信息无法覆盖实体编组列车的风险。

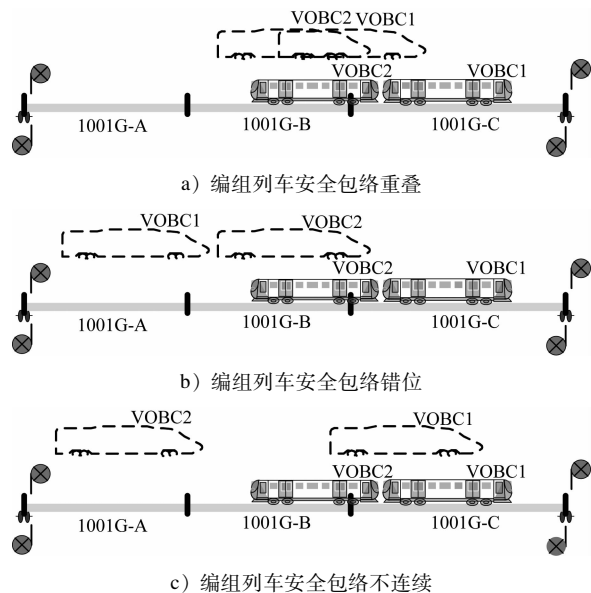
针对既有典型方案中, ZC 对两列车的位置报告管理以接收到的主控车安全包络为基准的问题,

^{*} 北京市科协金桥工程种子资金项目 (ZZ22010)

对安全包络进行扩展,提出一种基于时延防护的编组列车安全包络动态扩展方式,通过实时计算并比较主控车和被控车的延时状态,选用延时较小的短编组列车进行包络扩展,解决典型方案中主控车延时较大时编组列车安全包络精度低的问题。通过仿真试验模拟编组列车的走行过程,比较不同方案下 ZC 计算的列车位置信息。

1 编组列车位置关系场景分析

编组列车位置关系场景示意图如图 1 所示。其中,实线编组列车为二者的真实位置关系,虚线编组列车为 ZC 接收到报告中两列车的位置关系。由图 1 可知:VOBC1 与 VOBC2 的安全包络可能会出现重叠场景;若 VOBC1 与 ZC 的通信延时大于 VOBC2 与 ZC 的通信延时,VOBC1 的安全包络可能完全处于 VOBC2 的安全包络后方,与真实列车位置关系不符,出现错位场景;若 VOBC1 与 ZC 的通信延时小于 VOBC2 与 ZC 的通信延时,二者的安全包络可能出现不连续场景。



注:1001G-A 表示逻辑区段 A;1101G-B 表示逻辑区段 B;1101G-C 表示逻辑区段 C。

图 1 编组列车位置关系场景示意图

Fig. 1 Diagram of position relation scenarios for marshaled trains

产生上述问题的原因均为两列短编组列车与 ZC 通信延时存在异步性。在既有 CBTC(基于通信的列车控制)系统中,列车走行过程的安全包络应具有连续性,即当前时刻位置与历史位置不应发生

突变^[3],且基于包络的追踪方式决定了其安全包络不会发生重叠,因此 ZC 一般直接采用列车的位置报告计算区段占用状态并生成移动授权。在支持灵活编组功能的 CBTC 系统中,若 ZC 依然直接采用列车发送的位置报告计算区段占用状态,可能由于两列短编组列车通信延时差异较大,出现两车之间存在空闲区段的情况,进而误导运营人员。此外,当两列车位置报告发生错序时,会导致移动授权计算错误,甚至产生严重后果^[4]。因此 ZC 应该采用相应的技术措施识别编组列车的位置变化,有效应对 ZC 计算的列车位置信息无法覆盖实体编组列车的风险^[5]。

2 典型编组列车安全包络处理方案

一种典型编组列车安全包络处理方案为,当 ZC 接收到两列短编组列车发送的位置报告时,首先根据列车前后方机械钩、电气钩的连接状态确定编组列车的主控车和被控车,然后始终以编组列车主控车的安全包络为基准,将其增加一个车长的余量得到编组列车的初始安全包络,再将初始安全包络的最小安全末端与被控车的最小安全末端进行比较,取最严格的点更新为编组列车的最小安全末端,至此完成编组列车的安全包络计算^[6]。典型编组列车安全包络处理方案示意图如图 2 所示。

综上所述,既有典型方案中,ZC 对编组列车安全包络处理方式是灵活编组列车当作一列车进行控制,通过短编组列车前后方机械钩、电气钩的连接状态识别列车安全包络错序问题,确定编组列车主控车后,将主控车包络进行扩展,解决列车安全包络重叠、不连续等问题。该方案实现起来较为简单,既保证了编组列车的安全包络能够覆盖列车实体,又保证了列车走行过程中安全包络的连续性。但该方案存在列车包络管理不精细问题,当主控车与 ZC 通信延时较大时,ZC 处理后的编组列车安全包络与该时刻列车实际所处位置偏差过大,位置管理较为粗糙。本文对既有典型方案进行改进,提出了基于时延防护的编组列车安全包络管理方案。

3 改进编组列车安全包络处理方案

ZC 接收到的两列短编组列车安全包络与该时刻列车实际所处位置的偏差差异,记为 ΔL ,则有:

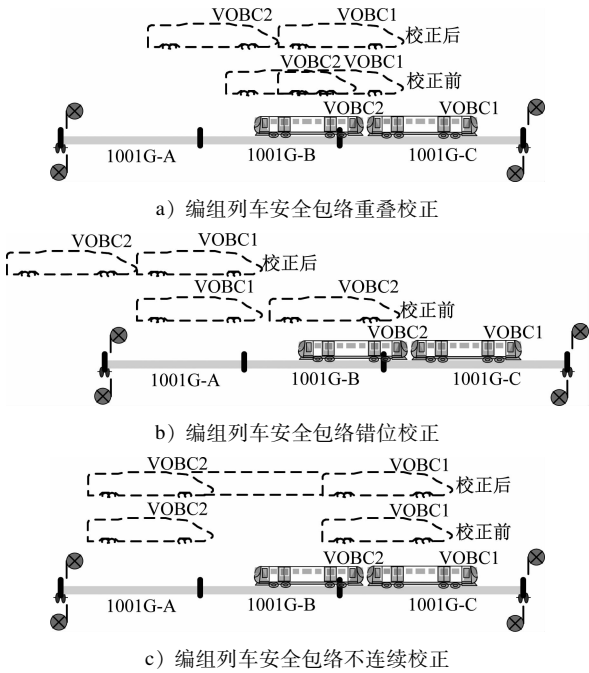


图 2 典型编组列车安全包络处理方案示意图

Fig. 2 Diagram of typical safety envelope treatment solutions for marshaled trains

$$\Delta L = \left| \left(v_1 t_1 + \frac{1}{2} a_1 t_1^2 \right) - \left(v_2 t_2 + \frac{1}{2} a_2 t_2^2 \right) \right| \quad (1)$$

式中:

- $v_1、v_2$ ——两列短编组列车初始速度;
- $a_1、a_2$ ——两列短编组列车加速度;
- $t_1、t_2$ ——两列短编组列车与 ZC 通信延时值。

一般情况下,通常不考虑通信延时时间内列车加速度的变化,根据最不利情况取最大加速度值进行计算。由于两列短编组列车通过机械钩和电气钩实现物理联挂,因此可忽略两列短编组列车间速度和加速度的差异。由式(1)可知,两列短编组列车与 ZC 之间的通信延时差异反映了 ΔL , ΔL 越小,则两列短编组列车位置信息的直接可信度越接近。理想情况下,若 ΔL 恒等于 0,则 ZC 无需附加处理,可直接使用两列车发送的位置信息进行区段占用状态计算及生成移动授权。但考虑实际情况,获取列车与 ZC 的通信延时值是提高列车位置管理精度的前提。

3.1 计算通信延时

通过在 VOBC 与 ZC 之间交互延时计算参数可以获取延时值。根据 T/CAMET 04011. 2—2018《城市轨道交通 基于通信的列车运行控制系统 (CBTC) 互联互通接口规范 第 2 部分:CBTC 系统车地连续通信协议》,延时计算参数包括本方消息

序列号、通信周期、对方消息序列号、收到上一条消息时本方序列号,如表 1 所示。

表 1 延时计算参数
Tab. 1 Parameters of delay calculation

延时计算参数	参数说明
本方消息序列号 (CrntOwnSN)	记录发送本条消息时,本方的周期数
通信周期 (SnPrd)	设备通信周期
对方消息序列号 (RcvOppSN)	记录收到对方上一条消息中的对方消息序列号
收到上一条消息时本方序列号 (PrevOwnSN)	记录收到对方上一条消息时,本方的周期数

参照表 1,对于消息接收方,按照以下原则计算接收到消息的延时值。

1) 如果所收到的对方消息中 RcvOppSN 和 PrevOwnSN 这两个字段均为默认值,则认为该消息中的应用信息不可用;但应记录该消息头中的 CrntOwnSN 字段,以及自己当前的通信周期 (或软件周期) 序号,分别作为下次发给对方的消息头中 RcvOppSN 和 PrevOwnSN 字段的内容。

2) 若新收到的消息为 NewRcvMsg,则该消息延时值 Δt 可以表示为 (式中量的单位均为 ms):

$$\Delta t = (N_{\text{CurrentOwnSN}} - S_{\text{NNewRcvMsg, RcvOppSN}}) T_{\text{PERIOD}} - (S_{\text{NNewRcvMsg, CrntOwnSN}} - S_{\text{NNewRcvMsg, PrevOwnSN}}) \cdot T_{\text{NewRcvMsg, SnPrd}} \quad (2)$$

式中:

- $N_{\text{CurrentOwnSN}}$ ——当前本方周期号;
- $S_{\text{NNewRcvMsg, RcvOppSN}}$ ——新收到消息中的对方消息序列号;
- T_{PERIOD} ——当前本方周期值;
- $S_{\text{NNewRcvMsg, CrntOwnSN}}$ ——新收到消息中的本方消息序列号;
- $S_{\text{NNewRcvMsg, PrevOwnSN}}$ ——新收到消息中的收到上一条消息时本方消息序列号;
- $T_{\text{NewRcvMsg, SnPrd}}$ ——新收到消息中的通信周期。

式(2)表示的含义为通过收到消息中的回复本方“上一条”消息的时间戳 (即 RcvOppSN),计算出总延时值,再减去消息在对方设备内的时间,从而得到双向的传输延迟,将其作为最大传输延迟使用。

3.2 计算编组列车安全包络

ZC 首先根据列车前后方机械钩、电气钩的连接状态判断编组列车的前后关系,确定主控车和被控车,以识别是否发生了错序,然后计算主控车和

被控车的通信延时值,并进行延时比较。主控车与 ZC 的通信延时值记为 Δt_1 ,被控车与 ZC 的通信延时值记为 Δt_2 。改进后的列车安全包络错序校正示意图如图 3 所示。

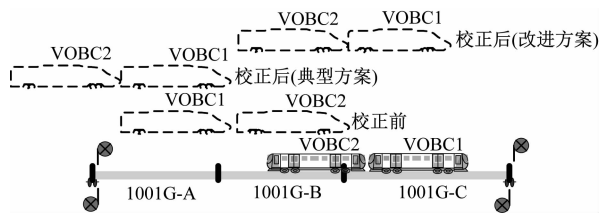


图 3 改进后的列车安全包络错序校正示意图

Fig. 3 Diagram of improved correction method for safety envelope dislocation

若满足 $\Delta t_1 > \Delta t_2$,则认为当前被控车与 ZC 通信质量较好,则应以被控车的位置报告为基准,向前延伸一个车长,作为编组列车的初始安全包络。若主控车的最大安全前端比编组列车初始安全包络更靠前,则将主控车的最大安全前端更新为编组列车的安全包络最大安全前端,否则应将初始安全包络作为编组列车的安全包络。

若满足 $\Delta t_1 \leq \Delta t_2$,则认为主控车与 ZC 通信质量较好,则应以主控车的位置报告为基准,向后延伸一个车长,作为编组列车的初始安全包络。若被控车的最小安全末端比编组列车初始安全包络更靠后时,则将被控车的最小安全末端更新为编组列车的安全包络最小安全末端,否则将初始安全包络作为编组列车的安全包络。

与典型方案相比,本文所提改进方案能够根据通信延时状态实时动态调整编组列车的安全包络,而不是始终以主控车为基准,解决了典型方案中在主控车通信质量不好的情况下,ZC 计算的编组列车安全包络精度差的问题。在保证 ZC 计算的编组列车安全包络能够覆盖编组列车实体的前提下,所提方案能够减小 ZC 接收的编组列车安全包络与该时刻编组列车实际所处位置的偏差。

3.3 安全性分析

在 CBTC 系统中,列车安全包络的准确性是实现列车以移动闭塞方式追踪的前提,该准确性体现在列车发送位置信息时刻,其发出的位置信息一定覆盖列车实体,以及列车位置信息的新鲜度在可容忍的阈值范围内。在所提改进方案中,无论是将主控车的安全包络延伸一个车长距离,还是将被控车的安全包络延伸一个车长距离,均能保证扩展后的

安全包络覆盖其发送位置信息时刻所对应的编组列车实体。同时,通过设计延时计算参数获取列车消息的延时值,可保证位置信息的新鲜度在可容忍的阈值范围内。因此,改进后的方案可在保证安全的前提下提高编组列车的安全包络管理精度。

4 两种方案对比

与典型方案相比,所提改进方案通过获取编组列车 VOBC 与 ZC 之间的通信延时值,判断两列短编组列车位置信息的直接可信度,对编组列车的安全包络计算由静态扩展方式转换为动态调整方式,在保证安全的前提下提高了列车位置管理精度。通过试验及数据分析,对两种方案进行对比研究。

一段采样时间内,ZC 计算的编组列车中两列短编组列车位置信息的延时值如图 4 所示。ZC 接收到两列短编组列车的位置信息时,两列短编组列车消息延时不相同的概率约为 70%。

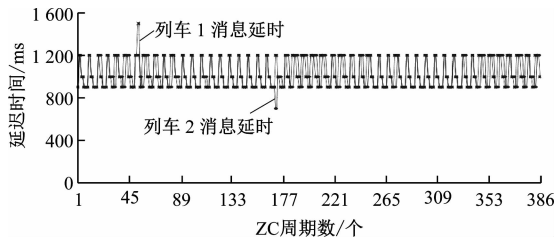


图 4 两列短编组列车位置信息消息延时值

Fig. 4 Position information message delay values of two short-marshaled trains

在列车以 60 km/h 匀速运行过程中,理想情况编组列车位置、采用典型方案计算和采用改进方案计算的编组列车位置对比,如图 5 所示。

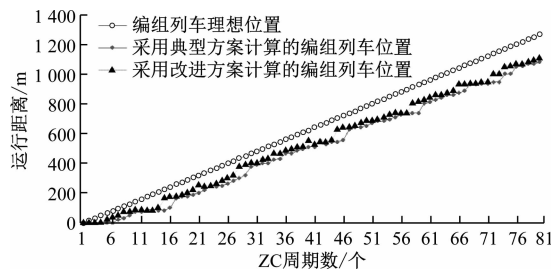


图 5 理想情况、典型方案和改进方案的编组列车位置对比
Fig. 5 Comparison of marshaled train position among ideal situation, typical solution, and improved solution

典型方案中,ZC 采取静态扩展主控车安全包络的方式计算编组列车安全包络。由于 ZC 始终以主控车为基准扩展包络,导致 ZC 计算的编组列车

安全包络与实际编组列车安全包络的偏差是不固定的,完全取决于主控车与 ZC 的通信质量。

采用改进方案对上述编组列车包络计算方法进行优化后,ZC 通过比较主控车和被控车的延时状态动态计算编组列车安全包络。由于 ZC 不单独依靠主控车扩展包络,当收不到主控车位置时,可以使用当前被控车位置处理,避免采用历史信息导致位置报告无法及时更新的情况,解决了主控车通信质量较差时安全包络精度低的问题,进一步提升了 ZC 控制列车的精细程度,尤其在列车安全包络跨计轴边界时,降低了 ZC 对相邻区段列车追踪的影响。

5 结语

针对当前灵活编组线路中两列短编组列车分别与 ZC 通信的特点,本文对目前采用静态扩展编组列车安全包络的方式进行了改进,通过设计延时计算参数,提出了基于时延防护的编组列车动态安全包络管理方法。通过试验数据对比,所提改进方案可以提高编组列车安全包络的精度,优化列车位置管理,对于提高灵活编组线路中的列车追踪效率有一定的参考价值。

参考文献

- [1] 赵家炜,刘婧婧. 地铁列车在线联挂、解编功能分析[J]. 城市轨道交通研究, 2012, 15(8): 152.
ZHAO Jiawei, LIU Jingjing. Analysis of metro train coupling and uncoupling functions[J]. Urban Mass Transit, 2012, 15(8): 152.
- [2] 李晓刚. 车地通信延时对 CBTC 系统列车运行控制的影响分析[J]. 铁路通信信号工程技术, 2011, 8(6): 44.

LI Xiaogang. Analysis of influence of train-wayside communication delay on CBTC system[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2011, 8(6): 44.

- [3] 郑京生. 列车占用检测延时对 CBTC 信号系统安全影响研究[J]. 铁道通信信号, 2018, 54(10): 9.
ZHENG Jingsheng. Study on impacts of train occupancy detection delay on safety of CBTC signaling system[J]. Railway Signalling & Communication, 2018, 54(10): 9.
- [4] 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, 39(7): 73.
LI Wei, TANG Tao, WANG Cheng, et al. Research on influence of wireless communication delay on CBTC train headway of urban rail transit system[J]. Journal of the China Railway Society, 2017, 39(7): 73.
- [5] 陈欣. 三点检查技术对区间占用情况的分析研究[J]. 铁路计算机应用, 2015, 24(10): 6.
CHEN Xin. Three section inspection technique to section occupancy[J]. Railway Computer Application, 2015, 24(10): 6.
- [6] 范海宁,何勇浩. 城市轨道交通列车灵活编组方案及功能实现[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(9): 200.
FAN Haining, HE Yonghao. Flexible marshalling scheme and function realization of urban rail transit train[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(9): 200.
- [7] 聂宇威,赵鹏,宋惠,等. 基于编组列车的安全包络计算方法及装置: 202110722158. X[P]. 2023-03-28.
NIE Yuwei, ZHAO Peng, SONG Hui, et al. A method and device for calculating the safety envelope of marshalled trains: 202110722158. X[P]. 2023-03-28.

· 收稿日期:2022-11-27 修回日期:2023-01-11 出版日期:2024-02-10
Received:2022-11-27 Revised:2023-01-11 Published:2024-02-10
· 通信作者:耿鹏,高级工程师,gengpeng@crsco. com. cn
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 194 页)

- [5] 官文平. 跨座式单轨车辆特点及国内外应用情况[J]. 国外铁道车辆, 2013, 50(1): 5.
GONG Wenping. Features of the straddle type monorail vehicle and the application in China and abroad[J]. Foreign Rolling Stock, 2013, 50(1): 5.
- [6] 喻杨. 跨座式单轨列车气动噪声特性研究[D]. 重庆:重庆交通大学, 2018.
YU Yang. Study on aerodynamic noise characteristics of straddle-type monorail[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University,

2018.

· 收稿日期:2021-07-19 修回日期:2021-09-14 出版日期:2024-02-10
Received:2021-07-19 Revised:2021-09-14 Published:2024-02-10
· 第一作者:杜子学,教授,aaadz@163. com
通信作者:王建,硕士研究生,wjoller@foxmail. com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license