

主从控机车通信延时对重载组合列车纵向力的影响分析

李 乐, 马睿杰

国能运输技术研究院有限责任公司, 北京

收稿日期: 2022年3月22日; 录用日期: 2022年6月28日; 发布日期: 2022年7月6日

摘 要

针对重载组合列车主控和从控机车通信延时问题, 通过建立仿真模型, 分析2万吨重载组合列车、1.6万吨重载组合列车、万吨重载组合列车分别在隧道内发生通信延时并触发紧急制动时车钩受力特点。结果表明: 通信延时越大, 车钩产生的纵向拉钩力和压钩力均会增大, 对重载列车安全运行造成隐患。因此, 针对此应制定相应的安全防范措施, 确保重载列车开行安全。

关键词

重载列车, 通信延时, 纵向力

Influence of Communication Delay between the Master and Slave Control Locomotives on Longitudinal Force of Heavy-Haul Trains

Le Li, Ruijie Ma

CHN ENERGY Institute of Transportation Technology Research Institute Co., Ltd., Beijing

Received: Mar. 22nd, 2022; accepted: Jun. 28th, 2022; published: Jul. 6th, 2022

Abstract

Focus on the communication delay between the control locomotive and slave control locomotive of heavy-haul trains, establishing a simulation model, this paper analyzes the stress characteristics

of coupler when 20,000 tons heavy-haul trains, 16,000 tons heavy-haul trains and 10,000 tons heavy-haul trains have communication delay in the tunnel and trigger emergency braking respectively. The results show that the greater the communication delay, the larger the longitudinal hook pulling force and hook pressing force generated by the coupler, which will cause hidden dangers to the safe operation of heavy-haul trains. Therefore, the preventive measures should be formulated to ensure the safe operation of heavy-haul trains.

Keywords

Heavy-Haul Trains, Communication Delay, Longitudinal Force

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

重载铁路运输凭借其大运量、高效率等诸多优势, 逐渐成为了世界各国煤炭、矿石等大宗货物陆运的主要方式。朔黄铁路作为“西煤东运”的第二大通道, 其重载列车的安全开行尤为必要。当前, 朔黄铁路主要开行 2 万吨、1.6 万吨、万吨为主要编组的重载列车。由于朔黄铁路重载列车的长度大、线路坡度大、桥隧相连、小曲线半径较多, 因此重载列车开行过程中的纵向力大引发的冲动现象尤为明显。对此, 大量学者展开了相应的研究, 研究手段主要以仿真为主。

随着钩缓系统和空气制动系统模型的不断发展, 列车纵向动力学仿真手段日趋完善[1] [2] [3], 为两万吨重载列车纵向冲动特征的仿真分析打下了坚实的基础。基于纵向动力学仿真, 常崇义等[4]研究了从控机车同步响应时间和制动初速对两万吨组合列车纵向力的影响, 其结果表明缩短同步响应时间和避免低速制动可大幅缓解紧急制动时的纵向力。魏伟等[5] [6]计算分析了两万吨组合列车的制动特性, 指出采用组合模式可有效缩短制动波的传递时间, 进而提高列车制动的同步性, 并进一步研究了采用“1+2+1”编组的两万吨列车的制动特性。赵鑫等[7]研究了机车无线同步控制方式对采用“1+2+1”编组方式的两万吨重载列车纵向力分布特征的影响, 指出当主从控机车的延时时间在 4 s 以内时可满足大秦线重载列车的运行需求。文献[8]研究了不同编组方式的两万吨列车纵向动力特性, 比较了分别采用 SS4 牵引的“1+2+1”编组以及 HXD1 牵引的“1+1+0”编组方式的两万吨组合列车在牵引、制动条件下的纵向力分布特征, 为大秦线两万吨重载组合列车编组方式的选取提供了理论指导。杨亮亮等[9]研究了列车编组方式、从控机车响应时间、车辆结构等参数对两万吨重载组合列车纵向冲动的影响, 总结了各参数对列车纵向车钩力的影响规律。

朔黄铁路自 2016 年起开行基于 LTE 的 2 万吨重载组合列车, 其通信问题一直是关注的焦点。针对实际运行中隧道内的通信较差、也最容易发生通信延时问题, 因此本文重点围绕隧道内通信延时开展仿真研究, 对比分析 2 万吨、1.6 万吨、万吨列车隧道内通信延时纵向力的变化, 找出通信延时对重载列车纵向力的影响, 为制定运行安全措施提供依据。

2.2 万吨、1.6 万吨、万吨编组列车介绍

朔黄铁路 2 万吨、1.6 万吨、万吨重载列车采用的机车有两种, 分别为神华八轴交流机车以及韶山 4B 直流机车; 采用的货车有 C80 型货车以及 C64 型货车。组合形成如下编组:

2 万吨编组列车: 神华八轴交流机车 + 108 辆 C80 货车 + 神华八轴交流机车 + 108 辆 C80 货车 + 可控列尾;

1.6 万吨编组 1 列车: 神华八轴交流机车 + 108 辆 C80 货车 + 韶山 4B 直流机车 + 64 辆 C64 货车 + 可控列尾;

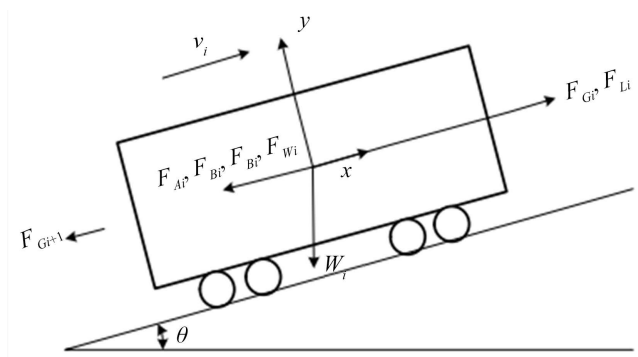
1.6 万吨编组 2 列车: 神华八轴交流机车 + 108 辆 C80 货车 + 韶山 4B 直流机车 + 58 辆 C70 货车 + 可控列尾;

万吨编组列车: 韶山 4B 直流机车 + 64 辆 C64 货车 + 韶山 4B 直流机车 + 64 辆 C64 货车 + 可控列尾。

3. 重载列车模拟建立

3.1. 列车纵向动力学模型

列车由一系列机车与车辆组成, 车辆(或机车)间由车钩和缓冲器连接。建立模型时将每个车辆(或机车)视为一个集中质量, 车辆间由弹簧阻尼单元连接。其中任意一个车辆(或机车) i 的受力如下图所示。



$$F_{L_i} = F_{G_i} - F_{G_{i+1}} + F_{L_i} - F_{W_i}$$

$$F_{2i} = \begin{cases} -\frac{v_i}{|v_i|} (F_{A_i} + F_{B_i} + F_{C_i}) & v_i > 0 \\ -(F_{A_i} + F_{B_i} + F_{C_i}) & v_i = 0 \text{ and } F_{L_i} \geq (F_{A_i} + F_{B_i} + F_{C_i}) \\ -F_{L_i} & v_i = 0 \text{ and } F_{L_i} = 0 \\ 0 & v_i = 0 \text{ and } F_{L_i} = 0 \end{cases}$$

$$m_i \ddot{x}_i = F_{L_i} + F_{2i}$$

式中:

- x_i : 第 i 辆车的瞬时位置;
- v_i : 第 i 辆车瞬时速度;
- W_i : 第 i 辆车的重力;
- $m_i \ddot{x}_i$: 第 i 节车的瞬时惯性力;
- F_{G_i} 、 $F_{G_{i+1}}$: 第 i 节车前、后钩的车钩力;
- F_{A_i} : 第 i 节车运行阻力;
- F_{B_i} : 第 i 节车空气制动力;
- F_{L_i} : 牵引力或动力制动力;
- F_{W_i} : 第 i 节车受到的坡道阻力;

F_{Gi} : 第 i 节车受到的曲线阻力。

3.2. 车辆运行阻力模型

车辆运行阻力等于车辆重量与单位基本阻力乘积。根据“列车牵引计算规程”中的规定, 车辆的运行阻力应按下述方法取值。

空车:

$$w_{01} = 2.23 + 0.0053v + 0.000675v^2$$

重车滚动轴承:

$$w_0 = 0.92 + 0.0048v + 0.000125v^2$$

式中: v 为列车运行速度(km/h)。

另外, 车辆起动阻力为 3.5 N/kN; 单位坡道阻力数值等于坡道千分数。

3.3. 缓冲器特性模型

缓冲器作为缓和重载列车纵向冲击与耗热振动能量的关键部件, 是影响列车车钩力大小的最直接因素, 很大程度上决定了列车纵向动力学研究的水平。本文仿真计算中所使用的缓冲器类型为 HM-1 型缓冲器, 属于摩擦胶泥组合式缓冲器, 具有性能稳定、能量吸收率高、维修方便、适应环境能力强的特点。该缓冲器的特性来自于齐齐哈尔铁路货车(集团)有限公司的单车撞单车试验结果, 然后利用数学方法将其模型化。在 TABLDSS 仿真系统中的缓冲器特性采用相邻车辆的相对速度和相对位移作为变量来进行描述, 其表达式如下所示:

$$F_{Gi} = K\Delta X + C\Delta \dot{X}$$

式中:

F_{Gi} : 第 i 车车钩力;

ΔX : 两相邻车辆间相对位移;

$\Delta \dot{X}$: 两相邻车辆间相对速度;

K 、 C : 分别为缓冲器的刚度和阻尼, 通过试验结果反推出缓冲器的刚度和阻尼。

4. 重载列车隧道内通信延时工况设置条件

本文主要针对 2 万吨、1.6 万吨及万吨列车在实际运行中最有可能产生通信问题的地段展开模拟仿真, 因在平原区段重载组合列车发生通信延时或中断的可能性微乎其微, 所以主要围绕重载列车在隧道内产生通信延时产生紧急制动的情况开展模拟仿真工作。且由于列车运行再长大下坡道容易产生交大的车钩力, 因此选取长大下坡道隧道区段作为研究地点。为确保仿真的高度还原性及可比性, 对 2 万吨、1.6 万吨、万吨重载列车分别选取同步延时 2 s、3 s、4 s、5 s 开展仿真研究, 具体仿真条件设置见下表。

序号	车型	仿真地段	线路坡度	同步延时时间
1	2 万吨编组列车	隧道内 k26 + 000 至 k28 + 000	12‰	0、2、3、4、5s
2	1.6 万吨编组 1 列车	隧道内 k26 + 000 至 k28 + 000	12‰	0、2、3、4、5s
3	1.6 万吨编组 2 列车	隧道内 k26 + 000 至 k28 + 000	12‰	0、2、3、4、5s
4	万吨编组列车	隧道内 k26 + 000 至 k28 + 000	12‰	0、2、3、4、5s

5. 重载列车隧道内通信延时产生紧急制动纵向力分析

5.1.2 万吨重载列车通信延时产生紧急制动时纵向力分析

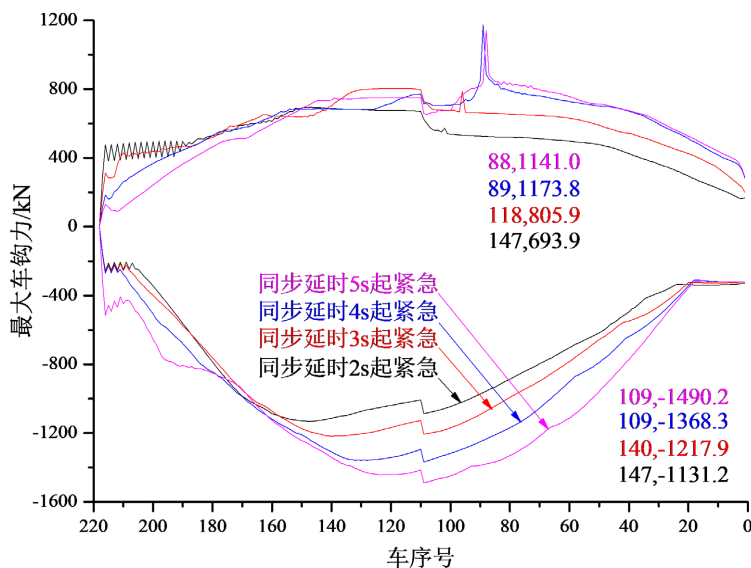


Figure 1. Maximum coupling force distribution of emergency braking train with synchronous delay of master and slave locomotives

图 1. 主从机车同步延时紧急制动列车最大车钩力分布

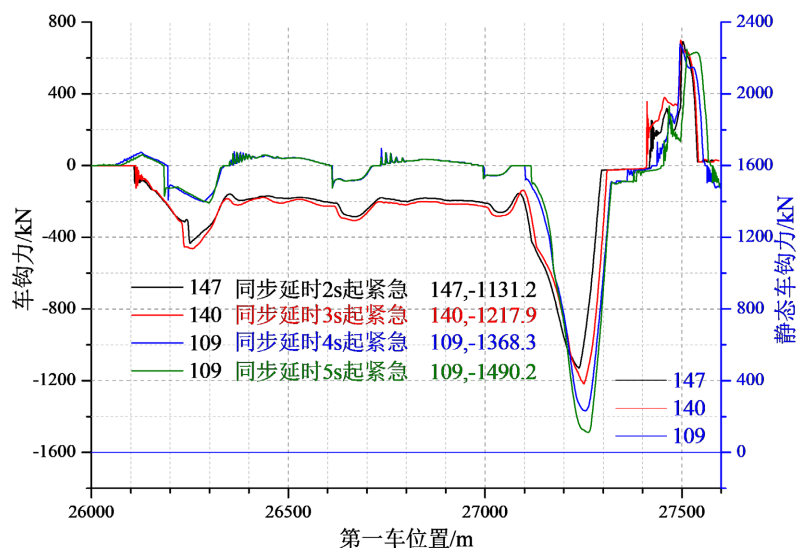


Figure 2. Location mileage of coupler force for vehicles with maximum pressing hook force of synchronous delay train of master and slave locomotives

图 2. 主从机车同步延时列车最大压钩力车辆的车钩力位置里程

1) 主从机车同步延迟时间的增大将导致紧急制动压钩力明显增大(如图 1 所示)。本例不施加再生制动力、地形也对车钩力无影响情况下, 延迟 2 s、3 s、4 s、5 s 时, 紧急制动最大压钩力分别约-1131.2 kN、-1217.9 kN、-1368.3 kN、-1490.2 kN (如图 2 所示); 依次分别相对增大了约-86.7 kN、-150.4 kN、121.9 kN; 较延迟 2 s 增大百分比分别约 7.7%、21%、32%。

2) 主从机车同步延迟对最大压钩力发生的车辆影响方面, 延迟 2 s、3 s 时, 最大压钩力发生在列车后半部分靠前位置(分别是第 147、140 车); 延迟 4 s、5 s 时, 则发生在列车前半部分的尾部(第 109 车)。说明随着同步延迟时间的增大, 后部列车制动力不足, 导致后部列车前涌使列车压钩力上升。

3) 主从机车同步延迟对最大拉压钩力发生位置影响不大, 在 k27 + 200 至 k27 + 300 之间。延迟 2 s、3 s、4 s、5 s 时, 最大压钩力发生位置分别约 k27 + 238 (制动后约 13.3 s)、k27 + 246 (制动后约 13.7 s)、k27 + 260 (制动后约 14.3 s)、k27 + 262 (制动后约 14.6 s)。

4) 延时时间对列车编组车辆最大车钩力分布影响影响不大。延时时间对最大压钩力在线路上发生位置影响相对较为明显, 在 k27 + 200 至 k27 + 400 之间。

5.2.1.6 万吨 C64 编组重载列车通信延时产生紧急制动时纵向力分析

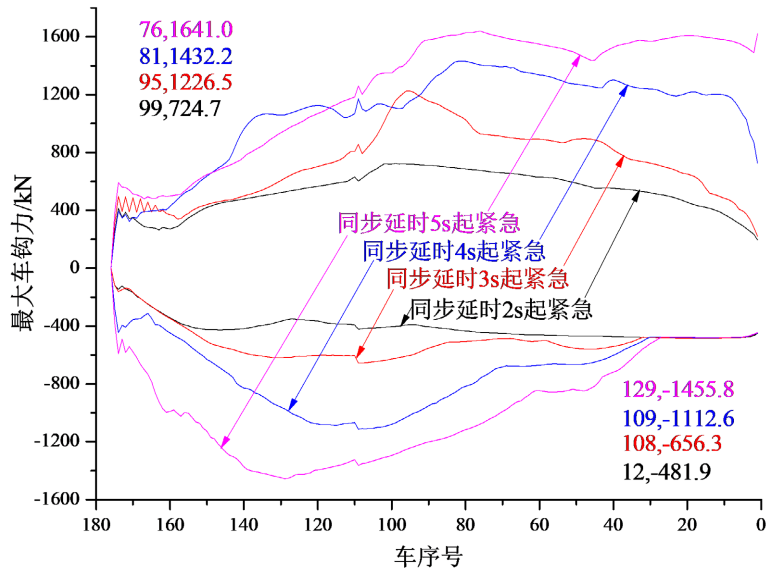


Figure 3. Maximum coupling force distribution of emergency train with synchronous delay starting
图 3. 各同步延时起紧急列车最大车钩力分布

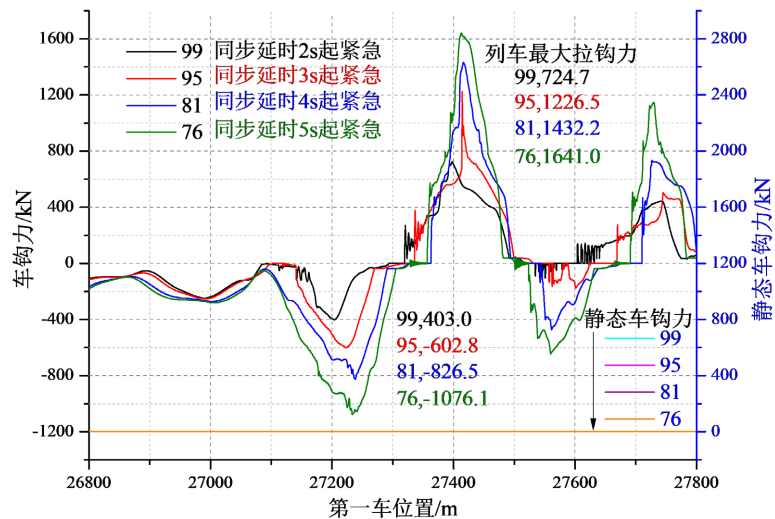


Figure 4. Hook force position mileage for vehicles with maximum pull hook force
图 4. 最大拉钩力车辆的车钩力位置里程

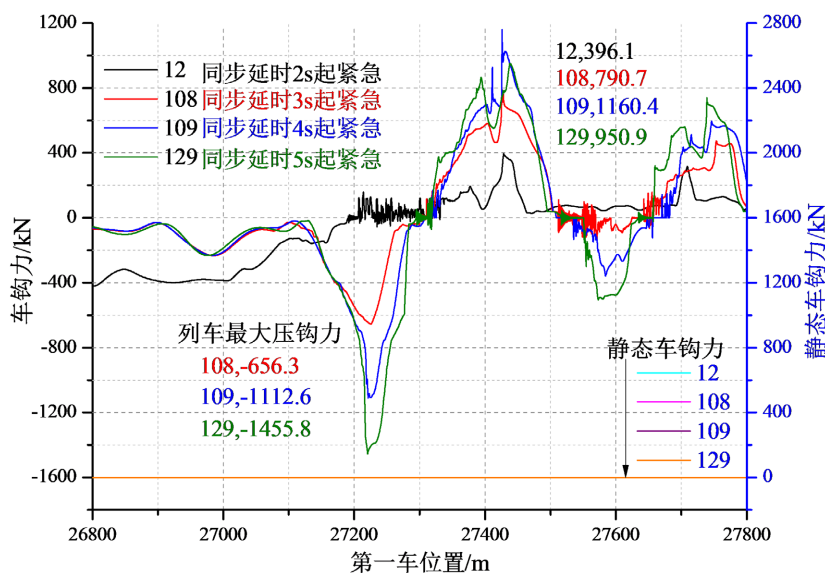


Figure 5. Hook force position mileage for vehicles with maximum hook press force
图 5. 最大压钩力车辆的车钩力位置里程

1) 同步延迟时间的增大将导致紧急制动压钩力显著增大, 列车纵向冲击振动加剧(如图 3 所示)。

本例不施加再生制动力、地形也对车钩力无影响情况下, 延时 2 s、3 s、4 s、5 s 时, 紧急制动最大拉/压钩力分别约 724.7 kN/-481.9 kN、1226.5 kN/-656.3 kN、1432.2 kN/-1112.6 kN、1641.0 kN/-1455.8 kN (如图 4、图 5 所示); 拉/压车钩力依次相对分别增大了约 501.8 kN/-174.4 kN、205.7 kN/-456.3 kN、208.8 kN/-342.2 kN, 增大百分数分别约 69%/36%、17%/70%、15%/31%。最大拉/压车钩力较延迟 2 s 分别增大了约 501.8 kN/-174.4 kN、707.5 kN/-630.7 kN、916.3 kN/973.9 kN, 增大百分比分别约 69%/36%、98%/131%、126%/202%。

3) 随着延迟的增大, 列车最大拉、压车钩力发生车辆分别向列车前、后移动。列车后部的车辆最大压钩力明显增大, 而列车前部分车辆的最大拉钩力则明显增大; 相应地, 发生列车最大压钩力车辆延列车后移(分别是 12、109、109、129 车), 发生列车最大拉钩力车辆则前移(依次为 99、95、81、76 车)。

4) 尽管列车最大拉压车钩力显著增大, 但最大拉压车钩力发生车辆的车钩力峰值位置变化不大。对于发生列车最大拉钩力的车辆, 尽管随着主从机车同步延时的增大最大拉钩力显著增大, 但其发生位置变化不大, 位置/制动后时间分别约 k27 + 398/21.7 s、k27 + 414/22.5 s、k27 + 221/11.6 s。这几辆车拉钩过程发生的位置也同样变化不大, 详细位置见各工况。

对于发生列车最大压钩力的车辆, 除同步延时 2 s 外, 延时 3 s、4 s、5 s 最大压钩力发生位置也变化不大, 发生位置/紧急制动后时间分别约 k27 + 226/11.9 s、k27 + 221/11.7 s、k27 + 416/22.5 s、k27 + 413/22.2 s。而这几辆车压钩过程发生的位置也变化不大, 详细数据见各工况。

5.3.1.6 万吨 C70 编组重载列车通信延时产生紧急制动时纵向力分析

1) 同步延迟时间的增大将导致紧急制动拉、压钩力显著增大(如图 6 所示), 列车纵向冲击振动总体上加剧。各车的最大拉、压车钩力均急剧增大。

2) 尽管列车最大拉压车钩力显著增大, 但最大拉压车钩力发生车辆的车钩力峰值位置变化不大。

3) 若出现通讯失效, 车钩力将大幅度增大。根据计算最大拉、压车钩力分别达到 1600 kN、-1800 kN 以上(如图 7、图 8 所示)。

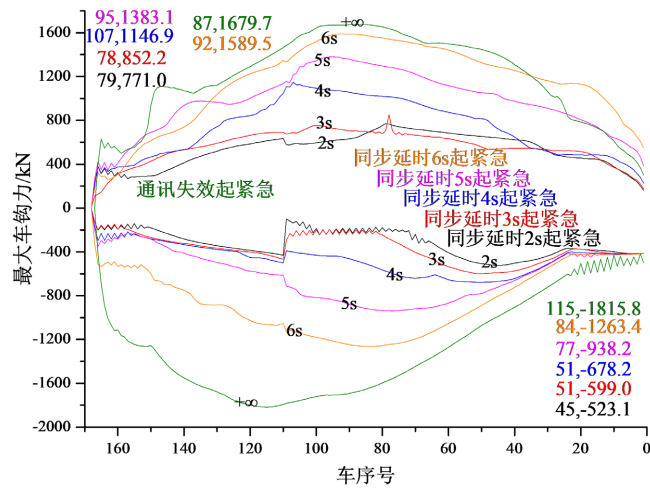


Figure 6. Maximum coupling force distribution of train
图 6. 列车最大车钩力分布

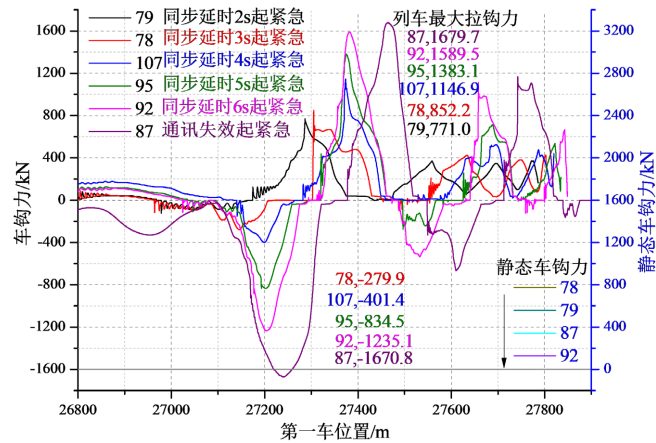


Figure 7. Location mileage of coupler force for vehicles with maximum pressure hook force under emergency braking with synchronization delay

图 7. 各同步延时间紧急制动最大拉钩力车辆的车钩力位置里程

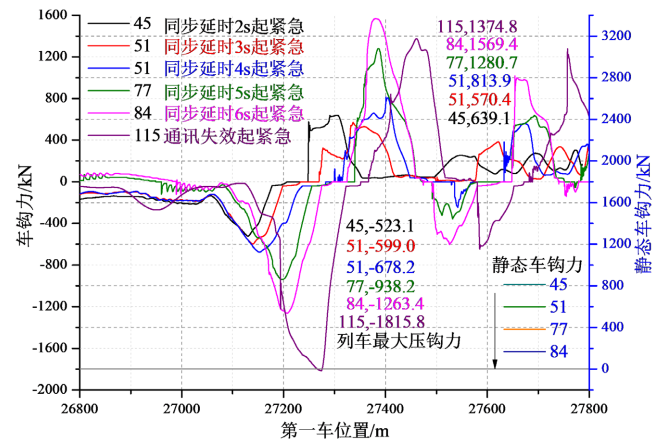


Figure 8. Location mileage of coupler force for vehicles with maximum pressure hook force under emergency braking with synchronization delay

图 8. 各同步延时间紧急制动最大压钩力车辆的车钩力位置里程

5.4. 132 辆 C64 万吨编组重载列车通信延时产生紧急制动时纵向力分析

1) 同步延迟时间的增大将导致紧急制动列车纵向冲击振动加剧, 列车最大拉、压钩力显著增大(如图 9 所示)。延时为 2 s 时, 列车的最大压钩力接近-1000 kN; 延时 5 s 时, 列车最大拉、压钩力分别高达约 1544.5 kN、-1518.4 kN。

2) 随着同步延迟的增大, 最大车钩力发生车辆变化不大。列车最大压钩力均发生在第 67 车(如图 10 所示)。

3) 尽管随着延迟的增大, 最大车钩力车辆的车钩力峰值位置总体上会发生后移, 但变化不大。

4) 若出现通讯完全失效, 紧急制动速度略有提高; 但紧急制动距离略有延长, 相应地, 列车走行时间也略有延长; 但列车最大压钩力增大较明显, 达到约-1775.7 kN (如图 11 所示); 列车最大拉钩力约 931.6 kN。

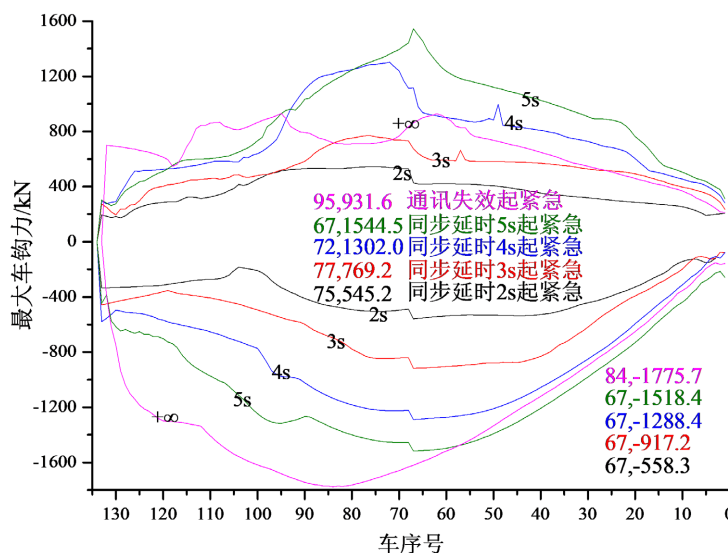


Figure 9. Maximum coupling force distribution of emergency train with synchronous delay starting

图 9. 各同步延时起紧急列车最大车钩力分布

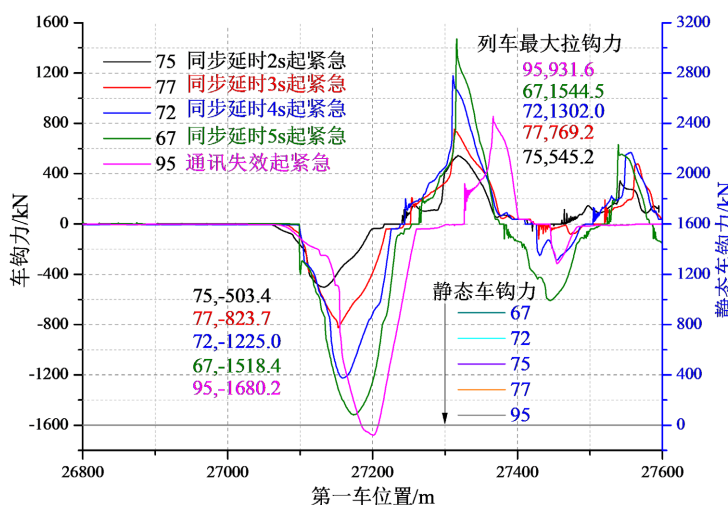


Figure 10. Location mileage of coupler force for vehicles with maximum pressure hook force under emergency conditions with synchronous delay

图 10. 各同步延时起紧急工况最大压钩力车辆的车钩力位置里程

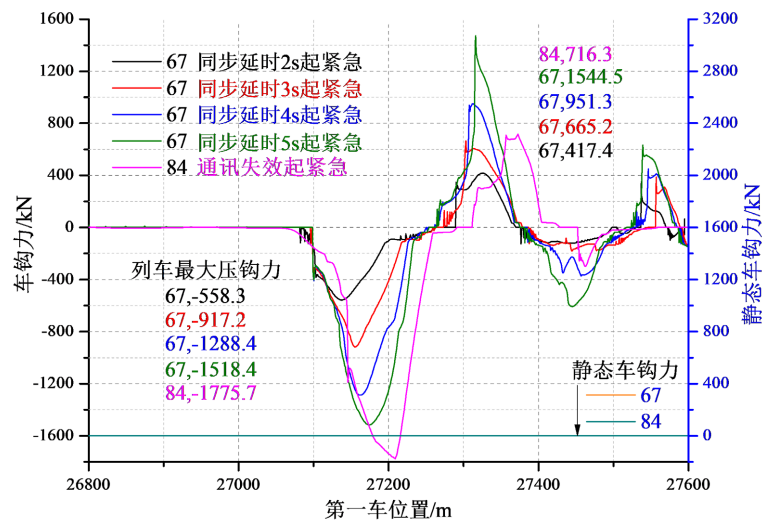


Figure 11. Location mileage of coupler force for vehicles with maximum pressure hook force under emergency conditions with synchronous delay

图 11. 各同步延时起紧急工况最大压钩力车辆的车钩力位置里程

6. 结论

通过对 2 万吨、1.6 万吨(两种编组)以及万吨(1 + 1 C64 万吨)进行同步延时起紧急仿真分析, 我们可以得出如下结论:

1) 重载组合列车隧道内同步延时起紧急(紧急地点 k27 + 000)分析表明, 在未受静态车钩力、再生制动力的影响的情况下, 同步延迟时间对紧急制动车钩力影响明显。同步延迟时间越长, 紧急制动过程中产生的最大拉钩力、压钩力均越大。

2) 无论同步延时的时间长短, 列车紧急制动后最大车钩力峰值点位置里程基本不变。

3) 同步完全失效时, 重载列车紧急制动时均产生了很大的拉、压钩力, 对列车车钩将产生极大破坏。

参考文献

- [1] Cole, C. and Sun, Y.Q. (2006) Simulated Comparisons of Wagon Coupler Systems in Heavy Haul Trains. *Journal of Rail and Rapid Transit*, **220**, 247-256. <https://doi.org/10.1243/09544097JRRT35>
- [2] Pugi, L., Malvezzi, M., Allotta, B., et al. (2004) A Parametric Library for the Simulation of a Union International des Chemins de Fer (UIC) Pneumatic Braking System. *Journal of Rail and Rapid Transit*, **218**, 117-132. <https://doi.org/10.1243/0954409041319632>
- [3] 魏伟. 列车空气制动系统仿真的有效性[J]. 中国铁道科学, 2006, 27(5): 104-109.
- [4] 常崇义, 王成国, 马大炜, 张波. 2 万 t 组合列车纵向力计算研究[J]. 铁道学报, 2006, 28(2): 89-94.
- [5] 魏伟. 两万吨组合列车制动特性[J]. 交通运输工程学报, 2007, 7(6): 12-16.
- [6] 魏伟, 赵连刚. 两万吨列车纵向动力学性能预测[J]. 大连交通大学学报, 2009, 30(2): 39-43.
- [7] 赵鑫, 王成国, 马大炜. 机车无线同步控制技术对 2 万 t 重载组合列车纵向力的影响[J]. 中国铁道科学, 2008(3): 78-83.
- [8] 耿志修, 李学峰, 张波. 大秦线重载列车运行仿真计算研究[J]. 中国铁道科学, 2008(2): 88-93.
- [9] 杨亮亮, 罗世辉, 傅茂海, 周尚书. 2 万吨重载组合列车纵向冲动影响研究[J]. 机车电传动, 2014(3): 34-39.