

重载组合列车跳钩事故原因分析及改善建议

晏新凯¹, 魏伟¹, 陈敏², 徐明龙², 田野³, 黄宏伟³

¹大连交通大学机车车辆工程学院, 辽宁 大连

²中国铁路太原局集团有限公司, 山西 太原

³大秦铁路股份有限公司科学技术研究所, 山西 太原

Email: www.weiwei43@163.com

收稿日期: 2021年2月4日; 录用日期: 2021年3月5日; 发布日期: 2021年3月12日

摘要

2万t重载组合列车担负着重载运输主力军的作用,但在列车运行过程中跳钩、脱轨事故时有发生,对列车的行车安全构成了极大威胁。近期,某重载线路上发生了一起2万t重载列车缓解后跳钩事故,使用列车空气制动与纵向动力学联合仿真系统对此次跳钩事故列车的运行过程进行了重现,分析了列车在缓解后发生跳钩的原因,并提出了针对性的改善方案,为重载组合列车提供了安全操纵方式借鉴。

关键词

重载列车, 纵向动力学, 跳钩事故, 列车操控

Analysis and Improvement Suggestions for the Coupler Separation of Heavy Haul Combined Trains

Xinkai Yan¹, Wei Wei¹, Min Chen², Minglong Xu², Ye Tian³, Hongwei Huang³

¹College of Locomotive and Rolling Stock Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian Liaoning

²China Rail Way Taiyuan Group Co., Ltd., Taiyuan Shanxi

³Science and Technology Research Institute of Daqin Railway Co., Ltd., Taiyuan Shanxi

Email: www.weiwei43@163.com

Received: Feb. 4th, 2021; accepted: Mar. 5th, 2021; published: Mar. 12th, 2021

Abstract

The 20,000 t heavy haul combined train plays the main role of heavy haul transportation. But in the process of train operation, coupler separation and derailment accidents occur from time to

文章引用: 晏新凯, 魏伟, 陈敏, 徐明龙, 田野, 黄宏伟. 重载组合列车跳钩事故原因分析及改善建议[J]. 交通技术, 2021, 10(2): 78-90. DOI: [10.12677/ojtt.2021.102010](https://doi.org/10.12677/ojtt.2021.102010)

time, threatening the security of train operation. A coupler separation accident of a 20,000 t heavy haul train occurred on a heavy-haul line recently. The accident process was reproduced by using the Train Air Brake and Longitudinal Dynamics Simulation System, and the cause of coupler separation of the train after release was analyzed. Improvement suggestions were proposed, providing a reference for the safe operation of heavy haul combined trains.

Keywords

Heavy Haul Train, Longitudinal Dynamics, Coupler Separation, Train Operation

Copyright © 2021 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

得益于效率高、运量大、污染小与成本低的特点,重载运输已经成为了世界铁路货运的发展方向,也成为了我国铁路发展的长期战略目标之一,根据国家铁路局发布的《2019年铁道统计公报》,我国铁路货运在2019年总发送量完成43.89亿t,货运量逐年持续增长,2万t重载组合列车在其中发挥了重要的作用,为我国铁路货运任务的完成提供了保障。

虽然我国已有多年开行2万t重载组合列车的经验,但由于重载列车长度较长、载重量较大,同时车钩力较大,加上线路与机辆设备老化的影响,导致列车在运行过程中安全性相对较差,特别是跳钩、脱轨等事故,严重威胁着列车的运行安全,因此,为保障行车安全,对列车发生事故的原因进行分析以避免事故的再次发生具有重要的现实意义。一般在列车事故发生后,多是通过现场勘察对事故发生的原因进行定性分析,对于定量与准确的判断列车发生事故的原因与过程十分困难,而通过仿真系统可以重现列车发生事故过程并对各种要素进行定量分析,再配合现场勘察的定性分析将可以更准确的分析重载列车发生事故的原因。其中,Belforte等开发了重载列车纵向动力学软件TSDyn,其计算结果可以输入至多体动力学软件MoNSTram中仿真分析列车的纵向冲击与脱轨系数等参数[1];Dmitry等通过UM软件开发了列车三维与一维耦合动力学模型train3d,用以分析与评估列车运行中的安全性能[2];魏伟等探究了在制动工况下列车纵向冲动的的作用机理,发现列车的纵向冲动是由冲击和挤压作用共同形成[3];耿玮平针对可能导致重载列车13A型车钩分离的因素做出了分析,从车钩结构方面分析了事故原因并提出了防范措施[4];伏远昱针对近期大秦线上2.1万t列车中部机车与车辆车钩分离的问题做了分析,判断车钩分离原因为机车车钩从车辆车钩上方受拉跳出,并给出了普查整治措施与检修建议[5];刘爽等在列车空气制动与纵向动力学联合仿真模型的基础上,建立了列车曲线、坡道安全运行模型,探究了车钩力与离心力、列车重量、线路等因素对列车安全因素的影响[6];岳刚针对货车提速后列车车钩分离事故进行了调查统计,指出车钩分离的原因大多是由钩缓配件断裂或车钩防跳作用不稳定引起,并提出在检修时应杜绝车钩水平中心线高度差超限[7];丁国斌对大秦线发生的几起列车分离事件做出了调查,指出分离车钩的特点都具有发生在列车中后部、钩缓磨耗严重与钩提杆横向窜动量超限过多的特点,并针对这些特点提出了预防措施[8]。

目前对重载列车脱轨与跳钩等事故的原因分析大多以车钩结构方面为切入点,对发生事故时列车的纵向动力学状态关注较少,而列车在发生事故时的车钩力状态又与事故的原因息息相关,所以,本文通过列车空气制动与纵向动力学联合仿真系统,以某线路上一起2万t重载组合列车缓解后跳钩事故为例,

通过仿真平台对跳钩事故进行重现,分析了此次事故列车在跳钩时刻的车钩力特点与列车在缓解后发生跳钩的机理,提出了针对性的操纵改善方案,为重载组合列车的安全运行操控方式提供参考。

2. 列车纵向动力学及空气制动系统

2.1. 列车纵向动力学模型

列车由一系列机车及车辆组成,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 的受力如图 1 所示。其中 x_i 、 v_i 、 W_i 为第 i 辆车瞬时位置、速度和重力; $m_i\ddot{x}_i$ 、 F_{Gi} 、 F_{Li} 、 F_{Ai} 、 F_{Bi} 、 F_{Ci} 、 F_{Wi} 分别为第 i 辆车的瞬时惯性力、车钩力、牵引力或动力制动力、运行阻力、空气制动力、曲线阻力、坡道阻力。

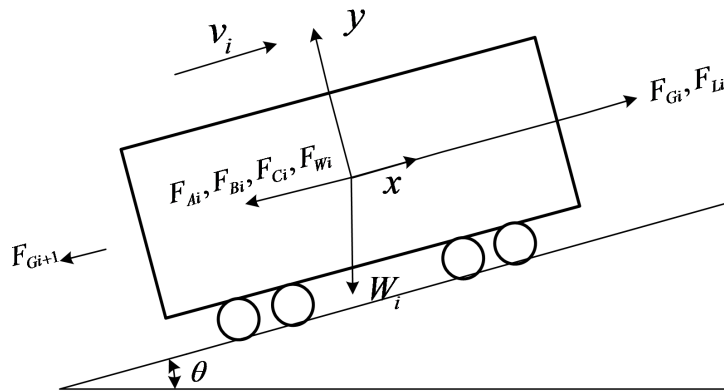


Figure 1. The force diagram of a single vehicle
图 1. 单个车辆受力图

考虑到列车空气制动力、运行阻力(包含隧道阻力)等是被动受力,仅在列车有速度或者有运动趋势时才起作用,这些力不会使机车车辆发生运动,仅是阻碍车辆运动,机车车辆运动方程如(3)所示。

$$F_{Li} = F_{Gi} - F_{Gi+1} + F_{Li} - F_{Wi} \tag{1}$$

$$F_{2i} = \begin{cases} -\frac{v_i}{|v_i|}(F_{Ai} + F_{Bi} + F_{Ci}) & v_i > 0 \\ -(F_{Ai} + F_{Bi} + F_{Ci}) & v_i = 0 \text{ and } F_{Li} \geq (F_{Ai} + F_{Bi} + F_{Ci}) \\ -F_{Li} & v_i = 0 \text{ and } F_{Li} < (F_{Ai} + F_{Bi} + F_{Ci}) \\ 0 & v_i = 0 \text{ and } F_{Li} = 0 \end{cases} \tag{2}$$

$$m_i\ddot{x}_i = F_{Li} + F_{2i} \tag{3}$$

通过对每时刻方程(3)形成的方程组进行求解便可得到整列车中每个机车车辆的物理状态。

2.2. 列车空气制动系统模型

在纵向动力学分析中,空气制动系统产生的制动力是纵向动力学分析难点,特别是制动与缓解转换过程中制动力产生与消失的非稳态过程会对列车循环制动产生非常大的影响。本仿真系统在列车空气制动部分使用基于气体流动理论的空气制动系统模型,在列车的空气制动系统中,气体在列车管内流动,假设管路内壁是刚性的,管路内为一维、非等熵不定常的气体流动,根据气体流动的连续性、动量守恒定律和能量守恒定律建立描述气体状态的方程组如下:

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \frac{\partial u}{\partial x} + u \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\rho u}{F} \frac{dF}{dx} = 0 \\ \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{4f}{D} \frac{u^2}{2|u|} = 0 \\ \frac{\partial p}{\partial t} + u \frac{\partial p}{\partial x} - a^2 \frac{\partial \rho}{\partial t} - a^2 u \frac{\partial \rho}{\partial x} - (k-1)\rho \left(q + u \frac{4f}{D} \frac{u^2}{2|u|} \right) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中： ρ ， u ， p ， a ， k ， D ， F ， f ， q ， x ， t 分别为气体密度、流速、压力、音速、比热比、管路直径、管截面积、管内壁摩擦系数、传热率、距离和时间[9]。

根据上述原理开发了列车空气制动与纵向动力学联合仿真系统(TABLDSS)，该仿真系统可以实现列车空气制动系统与纵向动力学的同步仿真，通过不断地与列车试验结果对比，证明了该系统具备较高的准确性[10]，该系统具有良好的制动特性、车钩力、加速度等参数的同步计算、数值显示及图形显示等功能，为分析列车纵向冲动机理，优化制动、缓冲器系统提供了基本理论和实用工具[11]。该仿真系统于2017年国际纵向动力学评测中在计算精度和计算速度上获得优异成绩[12]。

3. 列车跳钩事故重现

3.1. 事故列车运行情况

某重载路线全长 650 km 左右，相对海拔高度差达 1000 m 以上，处于山区的区段较多，并且隧道多、坡道大，2 万 t 列车在线路上的操纵困难区段较多，运行工况较为恶劣，操纵不当易使列车被迫停车，甚至发生脱轨、跳钩事故。其中，某次 2 万 t 重载组合列车在该线路上运行时发生了一起跳钩事故，事故主要信息如下：列车编组为 1HXD2 机车 + 105C80 车辆 + 1HXD1 机车 + 105C80 车辆 + 可控列尾，总重 2.1 万 t，发生跳钩时的工况为制动后缓解工况，线路为长大下坡，列车跳钩位置为从控机车与机后第一位车辆，据事后检查发现，车钩分离处的机车与车辆车钩均处于闭锁位，风管连接器脱开，风管良好，列车随后分解运行。列车发生跳钩事故的线路情况如图 2 所示。

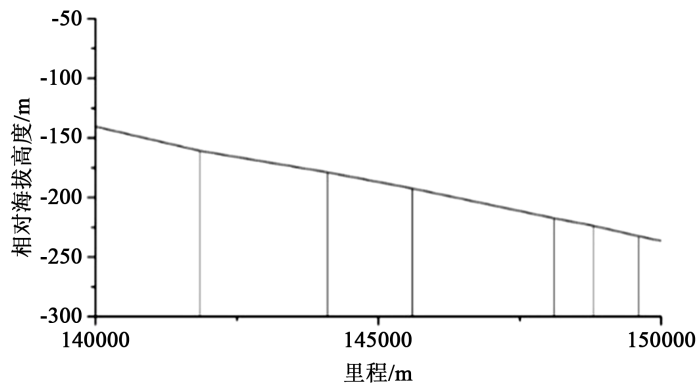


Figure 2. The relative altitude map of coupler separation section
图 2. 跳钩区段相对海拔高度图

3.2. 列车操纵仿真结果

图 3 为此次跳钩列车的实际运行速度与仿真速度对比及对应的操控指令图，从图中可知，列车于 k142+672 开始施加空气制动，列车增速减缓，至 k142+930 处列车速度开始下降，将机车再生力调整至 230 kN 并保持至缓解，列车于时速 38 km/h 实施缓解，缓解后再生力保持 280 kN，在列车缓解过程中，

列车出现跳钩事故，从控机车与机后第一辆车车钩分离，列车发生紧急制动停车。从图中可看出仿真速度与实际速度吻合较好，说明仿真准确重现了事故列车的运行过程。图4与图5分别给出了列车运行过程中的最大车钩力沿车长分布图与发生跳钩的车位(从控机车后钩)车钩力时域图。

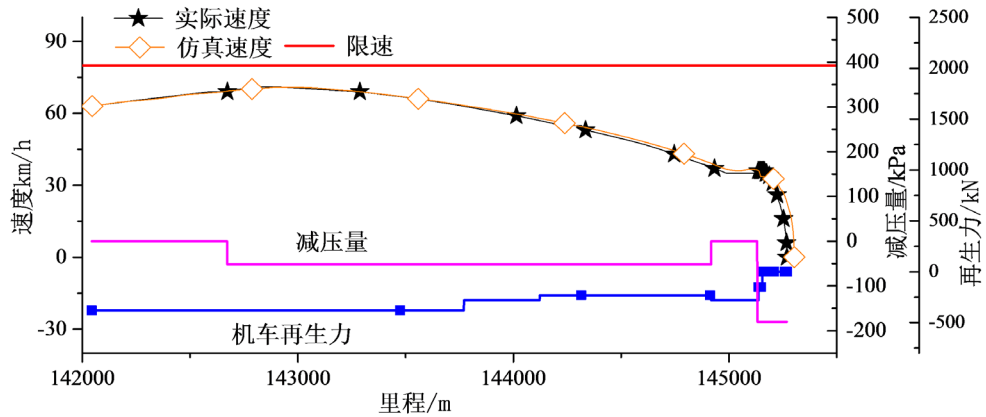


Figure 3. The operating instructions and simulate speed of the coupler separation train
图3. 车钩分离列车速度及操控指令图

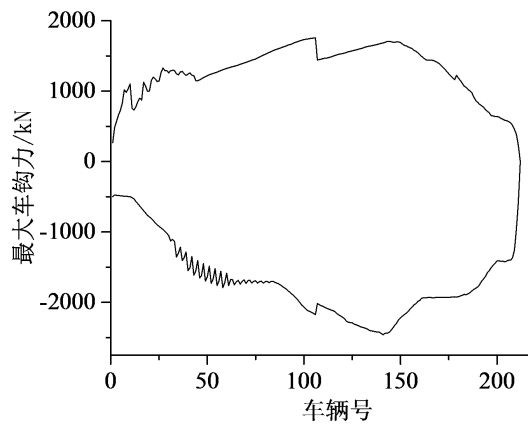


Figure 4. The distribution of the maximum coupler force of the train
图4. 最大车钩力沿车长分布图

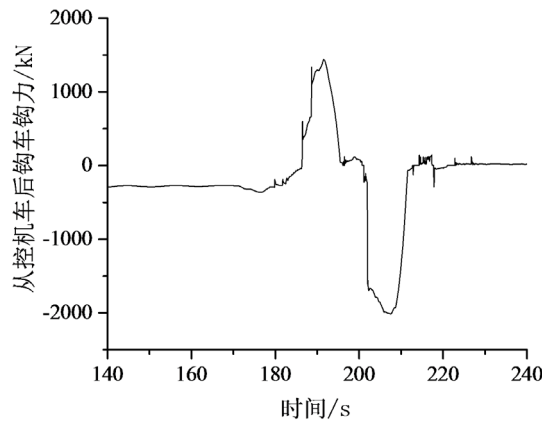


Figure 5. The time-field curve of coupler force of slave locomotive's back coupler
图5. 从控机车后钩车钩力时域图

列车在缓解时,前部车辆先发生缓解作用,后部车辆滞后缓解,前部车辆由于惯性前涌,列车产生拉钩力,等到拉伸达到最大状态后列车又开始回缩产生压钩力,从图4中可知,从控机车后钩缓解后最大拉钩力为1443.1 kN,接着观察列车发生跳钩处的车钩力时域曲线,如图5所示,从控机车在列车缓解前一直受到压钩力(负值为压钩力),随着列车开始缓解,压钩力逐渐减小并开始出现拉钩力,观察到此次拉钩力形成的过程中出现了两个明显的瞬时突变现象,在列车发出缓解指令的15.1 s,拉钩力由0 kN瞬间增大至602.4 kN,增大值为602.4 kN,然后在缓解后17.3 s又从742.9 kN瞬间增大至1332.5 kN,增大值为589.6 kN,接着拉钩力逐渐增至最大1443.1 kN。由于跳钩发生在从控机车与车辆之间,所以拉钩力为导致跳钩的因素之一,从控机车的点头运动对后钩产生的影响加上两个拉钩力瞬时突变的现象极有可能是导致列车产生跳钩的主要原因。

根据列车缓解后从控机车后钩车钩力的特点分析,判断此次列车车钩分离的原因是在列车缓解后,在从控机车处由压钩力向拉钩力转换的过程,当此过程中车钩力为0 kN时,车钩间并不存在力的作用,此时机车存在着点头或浮沉运动,使车钩发生上下蹿动,从图4中可知当车钩力达0 kN之后瞬时增大至602.4 kN,拉钩力经一段时间继续增大后又瞬时增大至1332.5 kN,再结合此突变力发生于k145+095,而列车紧急制动发生于k145+132,所以判定列车跳钩的原因是在列车缓解过程中,从控机车后钩处车钩力为0 kN时机车存在着点头运动,后钩发生上下蹿动,接着第二个较大的瞬时拉力使从控机车和机后第一辆车车钩快速拉伸变化产生跳钩事故,从而导致车钩分离。

下面对这两个突变力形成原因进行说明,观察这两个突变力形成的过程,发现是由于列车在缓解后,列车后半部分会产生一个从后半列中前部向前后传递的拉钩力,此拉钩力逐渐由列车后半部传递至从控机车后钩产生了第一个突变力。如图6所示,随着列车缓解的进行,列车后半部产生的拉钩力逐渐向列车中部传递,至15.1 s列车后半部的拉钩力向前传递至从控机车后钩,拉钩力瞬时增大至602.4 kN,此为第一个突变力形成的原因。随着列车缓解的进行,在列车后半部在已经拉伸的基础上又会产生了一个向前传递的拉钩力,传递至从控机车后钩时形成第二个突变力,如图7所示。在列车缓解后17.3 s,列车后半部的拉钩力又传递至从控机车后钩,拉钩力瞬时增大至1332.5 kN,此为第二个突变力形成的原因。

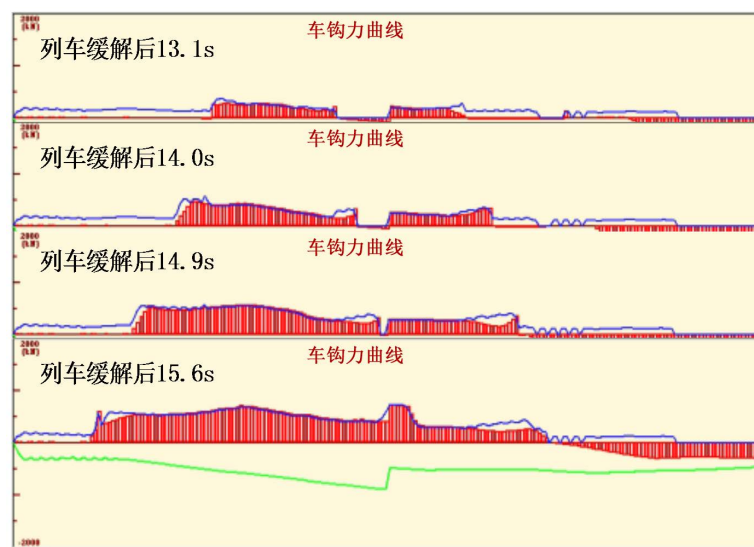


Figure 6. The formation process of the first mutant coupler force
图6. 第一个突变力形成过程

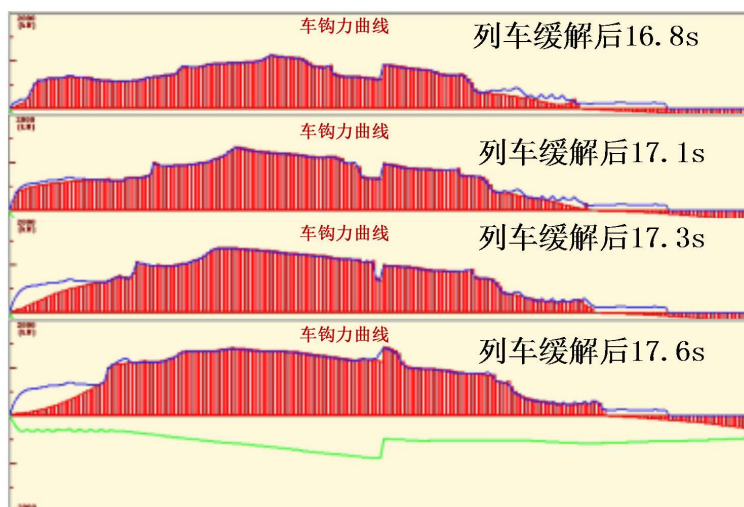


Figure 7. The formation process of the second mutant coupler force
图 7. 第二个突变力形成过程

4. 操纵改善方案及结果分析

4.1. 方案探究及结果分析

在说明这两个突变力形成的原因之后，便可采取对应的操纵措施来减小列车产生的突变力，图 8 为列车主控、从控机车相对于列车尾车的位移图，从图中可以看到初始状态列车主控机车、从控机车与尾车并没有产生相对位移，说明一开始列车并没有产生压缩或拉伸，随着列车开始制动，主控与从控机车位移逐渐小于了尾车位移，说明列车长度缩短，开始进入压缩状态，产生了压钩力，等到列车缓解时，从图 8 中可以看到，主控与从控机车位移开始逐渐大于了尾车的位移，说明缓解后列车整体长度伸长，进入了拉伸状态，开始产生拉钩力，据上述分析可知此次列车跳钩事故便是由列车缓解后拉钩过程中产生，在列车拉伸状态中，主控机车与从控机车相对于尾车有向前运动的趋势，根据机车与车辆的相对位移可得出当主控和从控机车在缓解后再生制动力增大时，会减弱机车相对尾车向前运动的趋势，列车的拉伸状态也会得到减弱，就会减少从控机车后钩拉钩力与突变力。图 9 与图 10 给出了列车缓解后使机车再生力同步增大至 330 kN、360 kN 与 410 kN 的列车最大车钩力沿车长分布图与从控机车车钩力的时域图。

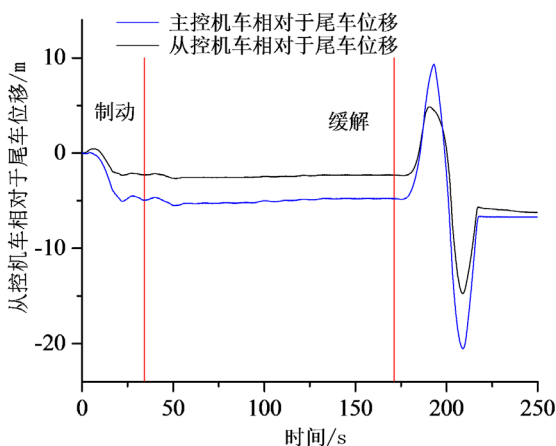


Figure 8. The relative displacement of the tripper car and locomotive
图 8. 主控、从控机车相对于尾车位移

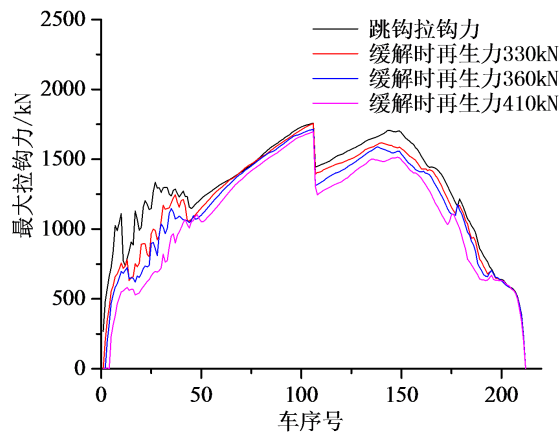


Figure 9. The distribution of the maximum coupler force of the train
图 9. 列车最大拉钩力沿车长分布图

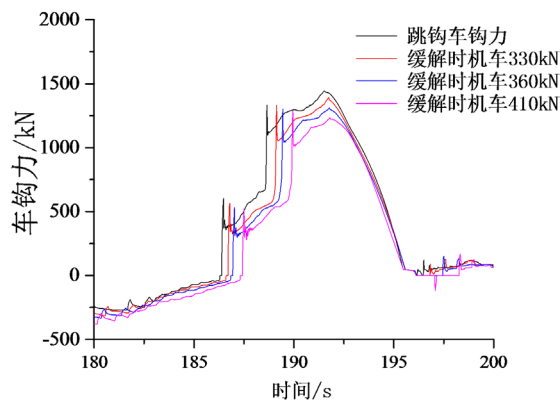


Figure 10. The time-field curve of coupler force of slave locomotive
图 10. 从控机车车钩力时域图

从图 9 中可以看到,随着缓解后机车再生力的增大,列车整体拉钩力有所减小,从图 10 中可以看到,虽然从控机车后钩缓解后最大拉钩力与突变力值有所减小,但两个突变力却仍然存在。其中拉钩力与突变力具体数据如表 1 所示:

Table 1. The Comparison between the mutant coupler force and the maximum tensile coupler force of the back coupler of the slave locomotive with the original operating instructions

表 1. 从控机车后钩突变力和最大拉钩力与原操纵方式对比

机车再生力	第一个突变力	变化百分比	第二个突变力	变化百分比	最大拉钩力	变化百分比
(原操纵方式) 280 kN	602.4 kN	0%	1332.5 kN	0%	1443.1 kN	0%
330 kN	565.1 kN	-6.2%	1331.1 kN	-0.1%	1390.0 kN	-3.7%
360 kN	530.7 kN	-11.9%	1301.1 kN	-2.3%	1301.1 kN	-9.8%
410 kN	522.8 kN	-13.2%	1287.9 kN	-3.4%	1287.9 kN	-10.8%

从表 1 中可知,虽然随着缓解后机车再生力的增大,列车缓解后最大拉钩力有所减小,且两个突变力均有所减小,但突变力仍然存在,靠同步增大机车再生力的操纵方式优化突变力效果有限。所以下面探究缓解时同步操纵机车减小再生力对列车缓解后拉钩力与突变力的影响,图 11 与图 12 为列车缓解时同步将机车再生力降至 230 kN、200 kN 与 180 kN 的列车最大拉钩力沿车长分布图与从控机车车钩力的时域图。

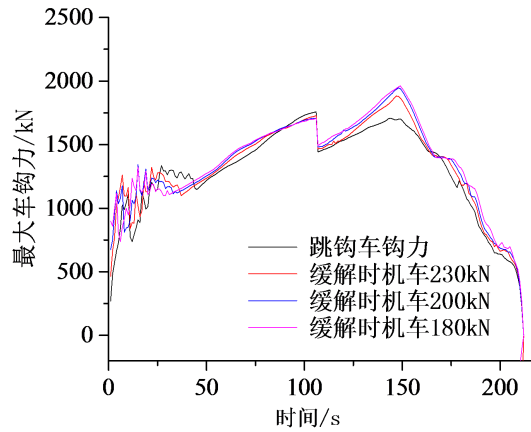


Figure 11. The distribution of the maximum coupler force of the train
图 11. 列车最大拉钩力沿车长分布图

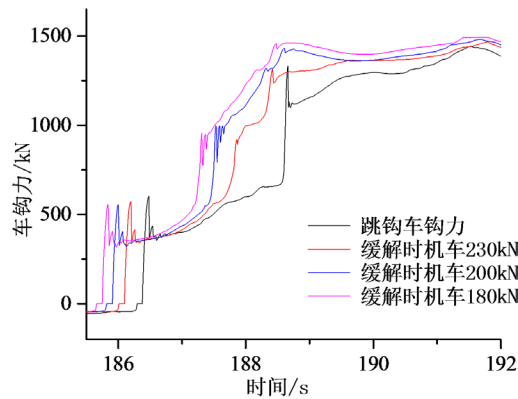


Figure 12. The time-field curve of coupler force of slave locomotive
图 12. 从控机车车钩力时域图

从图 11 中可知随着缓解时机车再生力的减小，列车缓解后整车最大拉钩力有所增大，从图 12 中可以看到，随着缓解时机车再生力的减小，列车从控机车后钩缓解后最大拉钩力有所增大，但当机车再生力在缓解时降低至 230 kN 时，列车缓解后在从控机车后钩位虽然拉钩力上升速度较快，却并没有产生第二个突变力，其中拉钩力与突变力具体数据如表 2 所示：

Table 2. The Comparison between the mutant coupler force and the maximum tensile coupler force of the back coupler of the slave locomotive with the original operating instructions

表 2. 从控机车后钩突变力与最大拉钩力与原操纵方式对比

机车再生力	第一个突变力	变化百分比	第二个突变力	变化百分比	最大拉钩力	变化百分比
(原操纵方式) 280 kN	602.4 kN	0%	1332.5 kN	0%	1443.1 kN	0%
230 kN	573.5 kN	-4.8%			1882.0 kN	30.4%
100 kN	555.9 kN	-7.7%			1945.8 kN	34.8%
180 kN	557.2 kN	-7.5%			1962.9 kN	36.0%

从表 2 中可以看到，在缓解后机车再生力减小至 230 kN 时，列车产生的第一个突变力有所减小，且在第一个突变力产生后没有出现第二个突变现象。观察此种操纵方式下的列车拉钩力形成过程，发现是当原操纵方式下列车开始产生第二个突变力时，该操纵方式下的列车拉钩力没有从列车后半部传递至从

控机车，而是先从列车中部开始逐渐增大并向后部传递，所以在从控机车后钩处并没有出现第二个突变力。如图 13 所示，可以看到当列车缓解时将从控机车再生力减小至 230 kN 时，列车后半列拉钩力传递过程是由列车中部向后部逐渐传递的，这与跳钩时拉钩力的传播规律是不同的。

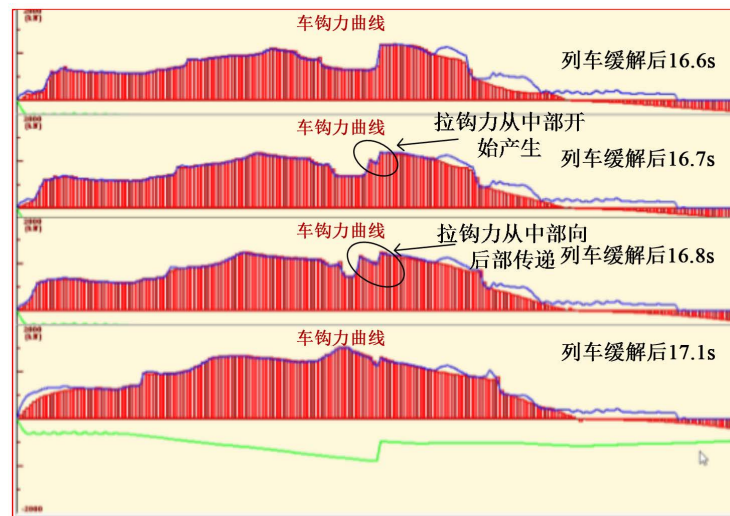


Figure 13. The formation process of the tensile coupler force
图 13. 列车拉钩力传递过程

分析在缓解后减小机车再生力时列车拉钩力由列车中部向后部逐渐传递的原因，是因为当缓解后机车再生力减小时，列车前部车辆缓解后的拉伸作用会增强，导致列车前部拉钩力增大，拉伸后部车辆，使得拉钩力从列车前部传递至后部，从而避免了从控机车后钩第二个突变力的发生。但是由图 11 可知，当缓解后机车再生力降低时，列车缓解后整体最大拉钩力有所增大，对列车的运行品质有害，所以下面探究如何能在使突变力消失的同时不使列车缓解后最大拉钩力恶化的方案。

由上述对机车操纵方式的探究可知，缓解后随着机车再生力的增大，列车缓解后拉钩力在不断减小。所以考虑在缓解时通过减小机车再生力优化突变力后，再通过增大机车再生力使列车缓解后最大拉钩力减小，考虑机车长时间施加较大再生力会对电机造成损坏，以下增大机车再生力的值均为 410 kN。图 14 与图 15 为在缓解时将机车再生力降低至 230 kN，缓解经过一定时间后再增大至 410 kN 的列车最大车钩力沿车长分布图与从控机车车钩力时域图。

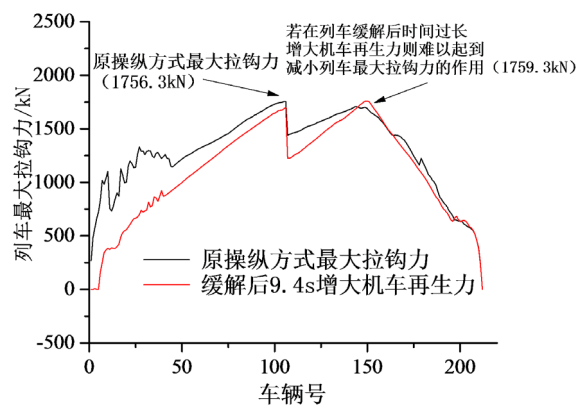


Figure 14. The distribution of the maximum coupler force of the train
图 14. 列车最大车钩力沿车长分布图

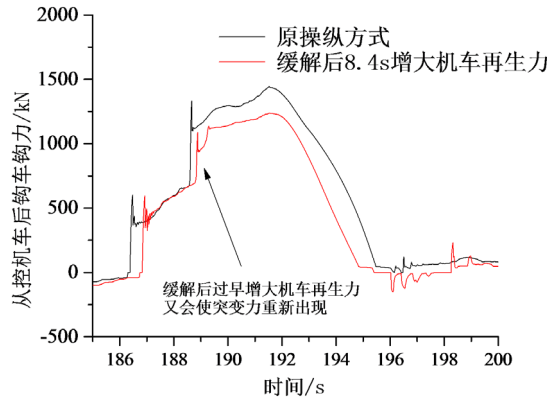


Figure 15. The time-field curve of coupler force of slave locomotive
 图 15. 从控机车车钩力时域图

如图 14 所示,发现列车缓解后如果过晚增大机车再生力会难以抑制列车缓解后最大拉钩力恶化,对列车运行品质造成危害,又如图 15 所示,在列车缓解后过早增大机车再生力又会使突变拉钩力重新出现,达不到优化突变力的目的,说明操纵机车增大再生力对优化突变力与最大拉钩力来说存在着一个操纵时间段,经反复仿真操纵,确定了列车在缓解时将机车再生力降低至 230 kN 的条件下,在缓解后 8.7 s 到 9.3 s 内将机车再生力增大 410 kN,这样既不会产生第二个突变力,列车整体最大拉钩力也没有增大,整体优化效果较好,图 16 为优化后列车最大拉钩力沿车长分布图,图 17 给出了从控机车后钩车钩力时域图。

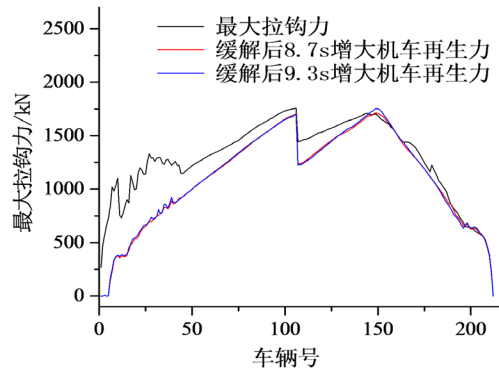


Figure 16. The distribution of the maximum coupler force of the train
 图 16. 列车最大拉钩力沿车长分布图

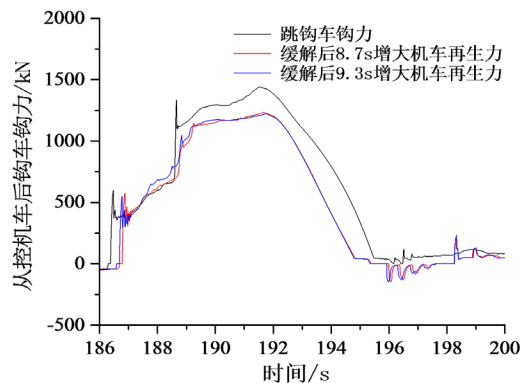


Figure 17. The time-field curve of coupler force of slave locomotive
 图 17. 从控机车车钩力时域图

4.2. 避免跳钩的操纵方案汇总

上面针对改善此次列车跳钩的操纵方式进行了分析, 确定了在缓解时同步减小机车再生力可防止跳钩车位第二个突变力的产生, 之后通过增大机车再生力防止列车缓解后最大拉钩力的恶化, 但仅仅针对缓解后机车再生力降至 230 kN 的情况制定了操纵方案, 下面针对缓解时施加机车再生力的大小与缓解后增大机车再生力的时机进行进一步的探究, 经仿真计算, 图 18 绘出了列车在缓解后将机车再生力降低至 230 kN 到 50 kN 时的操纵方案, 其中横轴代表的是列车缓解时机车再生力的施加值, 纵轴代表的是缓解后将机车再生力增大至 410 kN 的操纵时间, 在图中红线之下操纵机车增大再生力可保证列车缓解后最大拉钩力要小于原操纵方式, 在黑线之上操纵机车增大再生力可保证列车缓解后在从控机车位后钩不会重新产生第二个突变力, 图中红线与黑线之间即为增大机车再生力的操纵可行域。

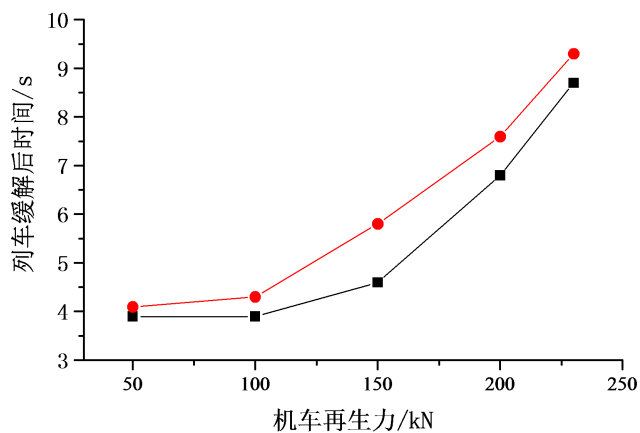


Figure 18. The feasible operating instructions of locomotive regenerative braking force
图 18. 机车再生力操纵方式图

5. 结论

本文使用列车空气制动与纵向动力学联合仿真系统, 仿真了某重载线路一起 2 万 t 重载组合列车缓解后的跳钩事故, 得到以下结论:

- 1) 在此次列车的跳钩事故中, 列车缓解后在从控机车后钩处产生的两个突变拉钩力是导致列车跳钩的重要原因, 这两个突变力由列车缓解后列车后部拉钩力传递至从控机车后钩处产生。
- 2) 在列车缓解时, 通过同步减小机车再生力的操纵方式可使从控机车后钩不会产生第二个突变力, 但此操纵方式会使列车缓解后最大拉钩力增大。
- 3) 在列车缓解时降低机车再生力, 配合合适的时间增大机车再生力, 可使列车突变拉钩力消失的同时降低列车最大拉钩力, 降低列车发生跳钩的可能性。

基金项目

中国国家铁路集团资助项目, 项目编号: N2019J003。

参考文献

- [1] Belforte, P., Cheli, F., Diana, G., et al. (2008) Numerical and Experimental Approach for the Evaluation of Severe Longitudinal Dynamics of Heavy Freight Trains. *Vehicle System Dynamics*, **46**, 937-955. <https://doi.org/10.1080/00423110802037180>
- [2] Dmitry, P., Vladislav, Y., Nikolay, L., et al. (2017) Train 3D: The Technique for Inclusion of Three-Dimensional

Models in Longitudinal Train Dynamics and its Application in Derailment Studies and Train Simulators. *Vehicle System Dynamics*, **55**, 583-600. <https://doi.org/10.1080/00423114.2016.1273532>

- [3] 魏伟, 张东芹, 张军. 重载列车纵向冲动机理及参数影响[J]. 大连交通大学学报, 2011, 32(1): 1-6.
- [4] 耿玮平. 重载列车 13A 型车钩分离的原因分析和防范建议[J]. 中国高新科技, 2018(16): 112-114.
- [5] 伏远昱. 大秦线 2.1 万吨列车中部机车与车辆车钩分离问题初探[J]. 铁道机车车辆, 2020, 40(4): 109-111+115.
- [6] 刘爽, 魏伟. 重载列车安全运行非稳态冲动模型研究[J]. 机械工程学报, 2014, 50(10): 127-142.
- [7] 岳刚. 货车提速后车钩分离的原因分析及建议[J]. 机车车辆工艺, 2004(2): 36-38+46.
- [8] 丁国斌. 大秦线运营车辆 13 号车钩区间分离故障的原因分析及防止措施[J]. 铁道机车车辆, 2004(1): 56-59.
- [9] 魏伟, 李文辉. 列车空气制动系统数值仿真[J]. 铁道学报, 2003(1): 38-42.
- [10] 宋健. 重载列车纵向动力学试验与仿真的比较研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连交通大学, 2018.
- [11] 魏伟, 赵旭宝, 姜岩, 等. 列车空气制动与纵向动力学集成仿真[J]. 铁道学报, 2012, 34(4): 39-46.
- [12] Wu, Q., Spiriyagin, M., Cole, C., *et al.* (2018) International Benchmarking of Longitudinal Train Dynamics Simulators: Results. *Vehicle System Dynamics*, **56**, 343-365. <https://doi.org/10.1080/00423114.2017.1377840>