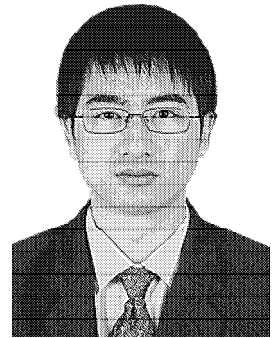


研
究
开
发

2万吨重载组合列车纵向冲动影响研究

杨亮亮¹, 罗世辉¹, 傅茂海², 周尚书³

(1. 西南交通大学 牵引动力国家重点实验室, 四川 成都 610031;
2. 西南交通大学 机械工程学院, 四川 成都 610031;
3. 南车二七车辆有限公司, 北京 100072)



作者简介: 杨亮亮(1986-), 男, 博士研究生, 从事机车车辆设计及理论研究。

摘 要: 为了研究我国2万吨重载组合列车纵向冲动问题, 以装用C80系列运煤专用敞车的组合列车为例, 采用Matlab/Simulink模块建立了2万吨重载组合列车动力学模型, 考虑列车编组方式、从控机车响应时间、车辆结构、钩缓装置、运行条件等因素, 重点分析了1+2+1组合列车紧急制动工况下各因素对纵向冲动的的影响。研究表明: 列车编组方式对各车位车钩力的大小和分布影响很大, 提高从控机车响应时间、装用牵引杆装置或摩擦胶泥缓冲器有利于改善车钩受力, 列车以低制动初速度在陡下坡道时进行紧急制动的车钩力最大。

关键词: 2万吨重载组合列车; 纵向动力学; 车钩力; 加速度; 纵向冲动

中图分类号: U292.92⁺3; U296 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-128X(2014)03-0034-06

Study on Effect of Longitudinal Impulse for 20 000 t Heavy Haul Combined Train

YANG Liang-liang¹, LUO Shi-hui¹, FU Mao-hai², ZHOU Shang-shu³

(1. Traction Power State Key Laboratory, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China;

2. School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China;

3. CSR Erqi Co., Ltd., Beijing 100072, China)

Abstract: In order to study the longitudinal impulse problem on 20 000 t heavy haul combined train in China, the kinetic model of combined train with an example of coal dedicated gondola car of C80 series was established by Matlab/Simulink module. It was mainly analyzed that effects of longitudinal impulses under emergency braking conditions for combined train with 1+2+1 type, and types of combination, response time of controlled locomotives, structure of vehicles, hook buffer devices, operating conditions and other factors were taken into the consider. The result indicates that types of combination have a large influence on coupler forces with sizes and distributions. Also shorter response time of controlled locomotives, using traction rod friction rubber buffer can help to reduce coupler forces. Last but not least, there is the largest coupler force under emergency braking conditions with lower speed and steeper down gradient.

Keywords: 20 000 t heavy haul combined train; longitudinal dynamics; coupler force; acceleration; longitudinal impulse

重载组合列车具有编组长、轴重大的特点, 在制动条件下会引起较大的纵向冲动, 容易导致车钩缓冲器装置和车辆结构及其零部件的损坏。从大秦线2万吨重载组合列车试验成功以来, 我国铁路重载运输技术取得了长足的发展和进步。尤其是Locotrol技术不断改进、编组方式的不断优化以及钩缓装置的不断升级都大大减少了车辆间的纵向冲动, 提高了列车运行的安全性。针对2万吨重载组合列车纵向力的研究主要分为运行试验测试和模拟仿真计算2种。其中, 文献[1-2]

对大秦线2万吨组合列车系统动力学在4 × 5 000 t和1+2+1这2种编组方式下进行了详细的仿真计算和试验验证, 为重载组合列车新技术的发展奠定了理论基础; 文献[3-5]建立了列车空气制动与纵向动力学的联合仿真模型, 并分析了1+1编组下2万吨组合列车制动特性与纵向冲动的相互影响, 为列车制动系统性能优化提供了可靠的方法。此外, 文献[6-7]对组合列车在牵引、制动工况下的车钩载荷特点做了相关研究, 为重载列车的编组优化和控制提供了理论支持。

在2万吨重载组合列车中, 机车的电力牵引、电制动和列车的空气制动分别具有分散和迟滞等特点^[8], 因此车辆之间的纵向冲动并非陆续依次传递。在列车

收稿日期: 2013-12-25; 收修改稿日期: 2014-04-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51005190)

运行试验过程中, 紧急制动工况不仅是列车系统运行安全性能的主要考核条件, 而且也是钩缓装置性能以及车辆承载部件结构强度的评定依据^[9]。因此, 本文利用Matlab/Simulink仿真模块建立了2万吨重载组合列车动力学模型, 主要研究列车编组方式、从控机车响应时间、车辆结构、钩缓装置、运行条件等因素对列车在紧急制动工况下纵向冲动的影。为我国重载组合列车技术的改进提供一定的理论依据。

1 数值计算方法和条件

目前, 我国2万吨重载组合列车上均采用了无线同步摇控装置(Locotrol技术), 其控制原理如图1所示, 该技术将长大列车分解为若干协调运行的列车。当列车制动时, 主控机车给各从控机车发送制动指令, 各从控机车接到指令后实施相应的制动操作。因此, 列车中的各机车都相当于一个制动信号源, 使得制动波在列车中可以双向传播, 降低了各车辆接收制动信号的时间差, 从而有利于降低列车的纵向冲动行为。

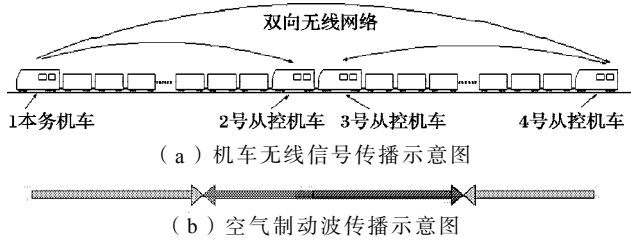


图1 组合列车动力分布控制原理

以大秦线重载铁路2万吨重载组合列车和C80系列运煤专用敞车为研究对象, 将列车模型简化为仅考虑纵向自由度的离散质点物理系统, 该系统包括机车的牵引和电制动特性、列车空气制动特性、列车运行阻力特性以及车钩缓冲器特性。

根据三大件式转向架基础制动系统的结构特点, 每个高摩合成闸瓦所承受的摩擦力 b 为杠杆系统传递的闸瓦正压力 k 与该车型装用闸瓦的摩擦因数 μ 的乘积, 即

$$b = \mu \cdot k = [0.41(k + 200)/(4k + 200) \cdot (v + 150)/(2v + 150)] \cdot k \quad (1)$$

式中: v 为车辆运行速度, km/h。

单车制动力 F_B 为8个单侧闸瓦摩擦力的总和, 其主要由列车制动主管减压量相应的制动缸压力变化曲线决定, 并受空气制动波传递延时的影响, 具体为

$$F_B = 8b = n \cdot S \cdot \lambda \cdot \eta \cdot \mu \cdot f_p(t) \quad (2)$$

式中: $f_p(t)$ 为制动缸压力变化曲线; n 为制动缸的数量; S 为制动缸活塞面积; λ 为整车制动倍率; η 为基础制动系统传递效率。

简化仿真模型中车辆的运行阻力 F_w 按中国铁路牵引计算规程^[10]由下式确定

$$F_w = F_{w1} + F_{w2} + F_{w3} = G \cdot [(0.92 + 0.0048v + 0.00125v^2) + (600/R) + i] \quad (3)$$

式中: F_{w1} 、 F_{w2} 和 F_{w3} 分别为基本阻力、曲线阻力和坡道阻力, N; G 为车辆重量, kN; v 为车辆运行速度, km/h; R 为线路曲线半径, m; i 为线路坡度千分数。

钩缓装置采用考虑车钩间隙变化和缓冲器落锤试验修正特性曲线进行模拟, 如图2所示。为了得到比较稳定的动态滞回特性, 计算时采用指数模型^[11]107~118来模拟缓冲器瞬时拉、压状态的转换, 即

$$F_c(t) = F(x) + [F_c(t - \Delta t) - F(x)] \cdot \exp[-|x(t) - x(t - \Delta t)|/\beta] \quad (4)$$

$$F(x) = \begin{cases} F_+(x) & x(t) > x(t - \Delta t) \\ F_-(x) & x(t) < x(t - \Delta t) \end{cases} \quad (5)$$

式中: $F_c(t)$ 、 $F_c(t - \Delta t)$ 、 $x(t)$ 和 $x(t - \Delta t)$ 分别为 t 时刻、 $t - \Delta t$ 时刻的车钩力和其相应的缓冲器位移; Δt 为积分步长; $F_+(x)$ 、 $F_-(x)$ 分别为缓冲器的加载、卸载曲线函数; β 为控制参数。

通过上述方法可以得到调车冲击工况下车钩缓冲器的动态作用轨迹, 见图3。

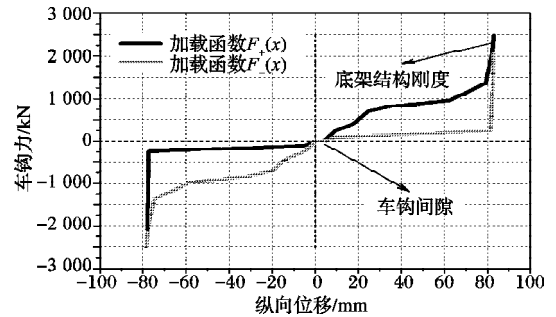


图2 钩缓特性曲线

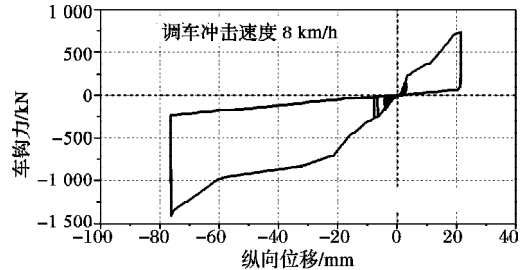


图3 调车冲击下缓冲器滞回曲线结果

2 仿真模型及验证

根据上述数值计算方法和条件, 可以将2万吨组合列车系统动力学问题转化为式(6)中微分方程组解的问题, 并利用Matlab/Simulink仿真模块建立了详细的物理模型如图4所示。

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{F\} \quad (6)$$

式中: $[M]$ 为系统质量矩阵; $[C]$ 为系统阻尼矩阵; $[K]$ 为系统刚度矩阵; $\{x\}$ 、 $\{\dot{x}\}$ 和 $\{\ddot{x}\}$ 分别为位移、速度、加速度矢量; $\{F\}$ 为与位移和速度有关的非线性载荷矢量。

式(6)经变换可得

$$\{\ddot{x}\} = -[M]^{-1}[C]\{\dot{x}\} - [M]^{-1}[K]\{x\} + [M]^{-1}\{F\} \quad (7)$$

从式(7)可看出, 微分方程组把模型分成了阻尼

系统模块、刚度系统模块和载荷作用模块。

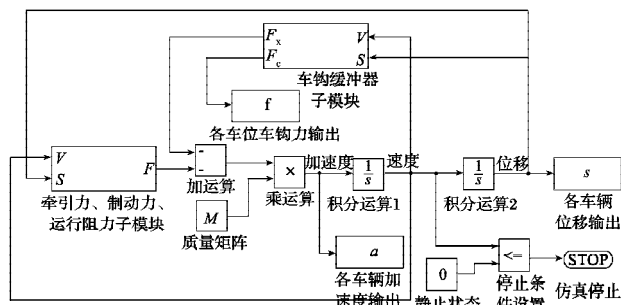


图4 组合列车纵向动力学物理模型

以大秦线2万吨重载组合列车运行试验结果^[12]为验证依据,分别对 $4 \times 5\,000\text{ t}$ 编组和1+2+1编组的列车在不同运行条件下进行仿真分析,计算中尽可能地按照试验条件模拟,仿真和试验结果对比如表1(表1中的“位置”指具体某节车辆在整列车中的位置序号, $4 \times 5\,000\text{ t}$ 和1+2+1两种组合下的牵引车辆总数均为204)。由表1可知,各仿真计算最大车钩力出现位置和试验实测位置基本一致,除了1+2+1组合下的紧急制动工况外,最大车钩力值与试验值的误差基本都在20%以内,且该工况下的运行试验结果是由于机车信号故障而导致的其压钩力偏大。因此,文中列车纵向动力学计算模型是基本可信的。

表1 2万吨重载组合列车仿真与试验结果对比

编组方式	制动方式	地点	坡度/ ‰	制动 初速/ $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$	最大车钩力/kN	
					试验值 (位置)	仿真值 (位置)
$4 \times 5000\text{ t}$ 组合	常用全制动	K87.6	0	78.9	-1 055.00(103)	-970(103)
$4 \times 5000\text{ t}$ 组合	常用全制动	K179.5	-12	79.5	-1 087.09(103)	-991(103)
$4 \times 5000\text{ t}$ 组合	紧急制动	K339	0	78.7	-698.78(103)	-842(103)
$4 \times 5000\text{ t}$ 组合	紧急制动	K64.6	-12	77.3	457.81(103)	468(102)
1+2+1组合	常用全制动	K87.6	0	80.5	-387.63(103)	-544(103)
1+2+1组合	常用全制动	K179.5	-12	80.4	-572.86(103)	-736(103)
1+2+1组合	紧急制动	K129.2	0	81.6	-2 276.40(100)	-1 097(103)
1+2+1组合	紧急制动	K64.6	-12	79.7	429.65(175)	-865(103)

3 动力学仿真计算结果

3.1 编组形式

2万吨重载组合列车编组形式主要有以下几种方案:

$4 \times 5\,000\text{ t}$ 方案: $\text{SS}_4 \times 1 + \text{C80} \times 51 + \text{SS}_4 \times 1 + \text{C80} \times 51 + \text{SS}_4 \times 1 + \text{C80} \times 51 + \text{SS}_4 \times 1 + \text{C80} \times 51$;

1+2+1方案: $\text{SS}_4 \times 1 + \text{C80} \times 102 + \text{SS}_4 \times 2 + \text{C80} \times 102 + \text{SS}_4 \times 1$;

2+1+1方案: $\text{SS}_4 \times 2 + \text{C80} \times 102 + \text{SS}_4 \times 1 + \text{C80} \times 102 + \text{SS}_4 \times 1$;

2+2方案: $\text{SS}_4 \times 2 + \text{C80} \times 102 + \text{SS}_4 \times 2 + \text{C80} \times 102 + \text{智能列尾装置}$;

1+1+0方案: $\text{HXD}_2 \times 1 + \text{C80} \times 105 + \text{HXD}_1 \times 1 + \text{C80} \times 105 + \text{智能列尾装置}$;

1+0+1方案: $\text{HXD}_2 \times 1 + \text{C80} \times 105 + \text{C80} \times 105 + \text{HXD}_1 \times 1$ 。

各编组方案下的列车以 80 km/h 初速度在平直道上进行紧急制动时的车钩力最大幅值沿列车分布情况如图5所示。

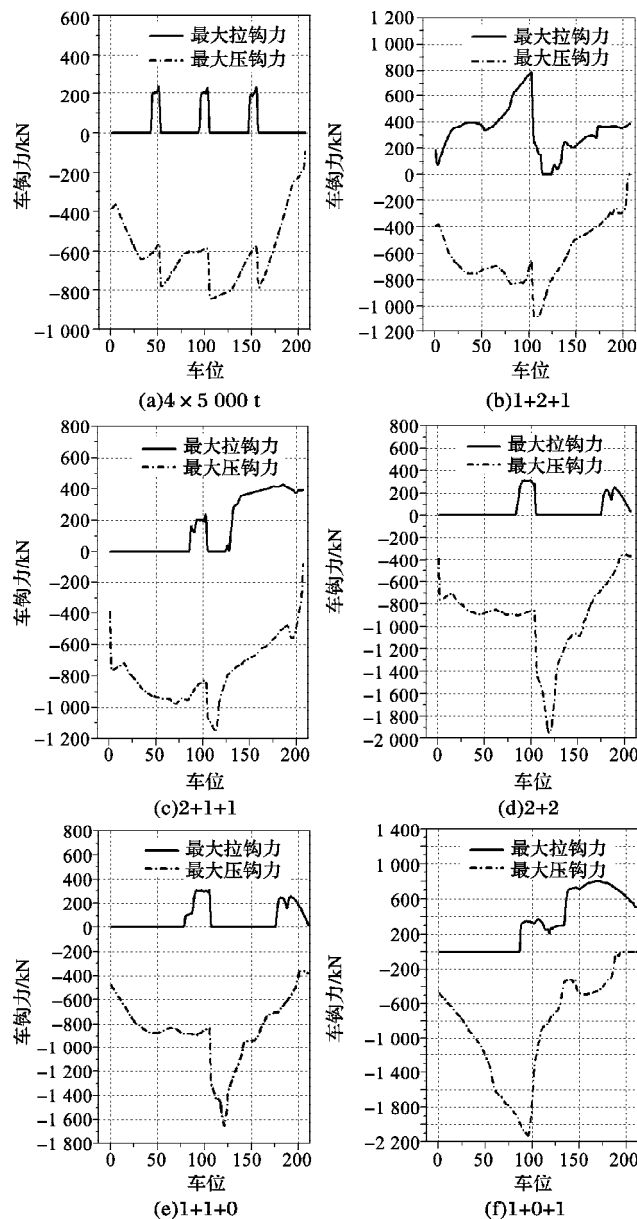


图5 各编组形式下的车钩力分布

从压钩力的分布特点来看,1+2+1、2+1+1、2+2和1+1+0这4种编组方案比较相似,最大压钩力均出现在靠近中间机车的后部某车位,且仅呈现了该处的一个峰值;1+0+1编组方案的最大压钩力发生于靠整个列车的中间位置,其压钩力是所有编组方案中最大的; $4 \times 5\,000\text{ t}$ 编组方案的压钩力峰值有3个,分别位于2~4位机车的后部,且大小相当。而6种编组方案的拉钩力分布特点主要与有无端部机车有关, $4 \times 5\,000\text{ t}$ 、2+2和1+1+0这3种编组方案均不含端部机车,其拉钩力峰值都较小且分布范围较窄;其余3种编组方案的拉钩力峰值分布范围较广,且数值也很大。仅由紧急制动工况计算结果并不足以比较出哪种组合方式最好,但从Locotrol原理可知1+0+1组合方式的空气制动波传播时间最长,其拉钩力和压钩力均很大,故该编组方案在

实际线路上也很少使用。从实际运行试验和运用效果来看, $4 \times 5\,000\text{ t}$ 、 $1+2+1$ 和 $1+1+0$ 这3种组合方式使用比较广泛, 所以下文对列车纵向冲动影响的分析以 $1+2+1$ 编组方案紧急制动工况为主要算例。

3.2 从控机车响应时间

从控机车响应时间主要取决于Locotrol装置的作用时间, 它决定着各机车协调制动或缓解命令的同步性能, 也影响着各车位车辆空气制动或缓解的作用时间和大小, 进而影响整个列车纵向冲动的传递。根据大秦线组合列车实际试验结果, 从控机车平均响应时间为 3.06 s , 最长响应时间为 5.87 s , 在仿真中对从控机车采用 $1\sim 6\text{ s}$ 延时计算如表2所示。结果表明, 从控机车延时长短对列车的车钩力和纵向加速度影响很大, 尤其是在延时达到 5 s 及以上时, 最大压钩力和加速度急剧增大, 当延时达到 6 s 时, 最大压钩力已超出了MT-2型缓冲器的最大阻抗力, 钩缓装置以及车体牵引梁结构将承受很大的冲击。

表2 $1+2+1$ 组合列车从控机车延时效应对列车在平直道紧急制动下纵向冲动影响($V=80\text{ km/h}$)

从控机车延时/s	1	2	3	4	5	6
最大拉钩力的峰值/kN	512	748	798	632	736	758
最大拉钩力的车位	103	103	103	103	98	96
最大压钩力的峰值/kN	-535	-757	-1\,097	-1\,343	-2\,013	-2\,552
最大压钩力的车位	32	105	105	105	120	127
最大纵向加速度/g	3.938	4.348	5.765	8.146	13.174	19.833
制动距离/m	571	589	606	622	635	647

由于 $1+2+1$ 组合列车不同从控机车响应下的车钩最大拉、压钩力多次出现在103和105车位, 图6为这2个车位下的车钩载荷时间历程(图6中的 1 s 、 2 s 、 3 s 、 4 s 、 5 s 、 6 s 分别为从控机车不同的响应时间), 随着操作延迟的依次增加, 相同车位的最大压钩力呈现依次滞后且放大的趋势, 且放大率也逐渐增大。而最大拉钩力受从控机车延迟效应的影响不大, 其载荷历程仅表现出依次滞后的特点。

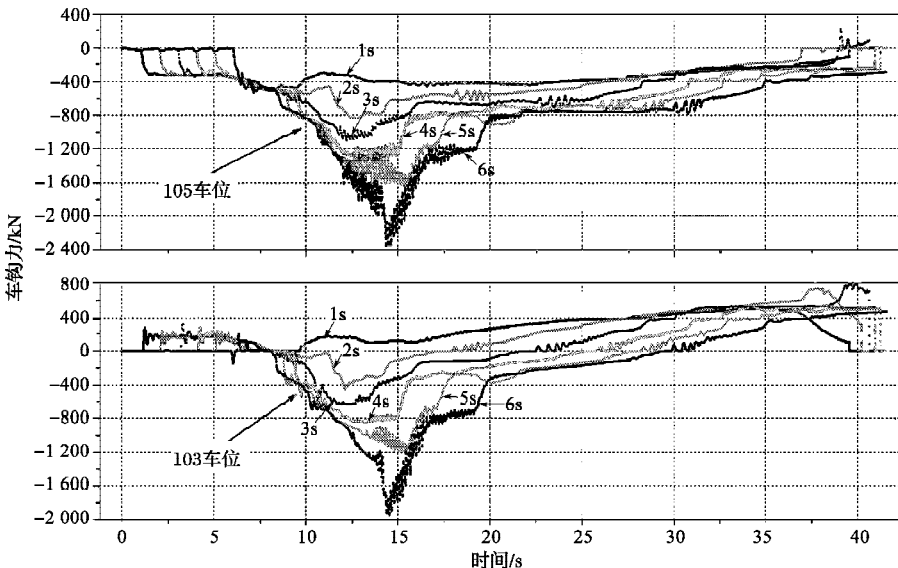


图6 $1+2+1$ 组合列车平直道紧急制动103、105位车钩载荷时间历程($V=80\text{ km/h}$)

3.3 车辆结构

C80系列运煤专用敞车^{[11]200-203}主要分为铝合金材料和不锈钢材料2种, 其中C80型铝合金运煤专用敞车的底架为双浴盆式结构, 2个整体旋压密封式制动缸($203\text{ mm} \times 254\text{ mm}$)分别安装在前、后端牵引梁的上部, 全车制动倍率为8.5; 而以C80B型不锈钢运煤专用敞车为例, 其底架为平地板结构, 304.8 mm (12英寸)的整体旋压制动缸放置在车体底架下部, 全车制动倍率为7.3。此外, 由于2种C80系列敞车制动缸安装位置的不同, 导致各制动风管的布置和总长度也不同。分别以这2种型号的敞车为研究对象, 计算 $1+2+1$ 组合列车以 80 km/h 速度在平直道紧急制动下的列车纵向冲动分布, 见图7。

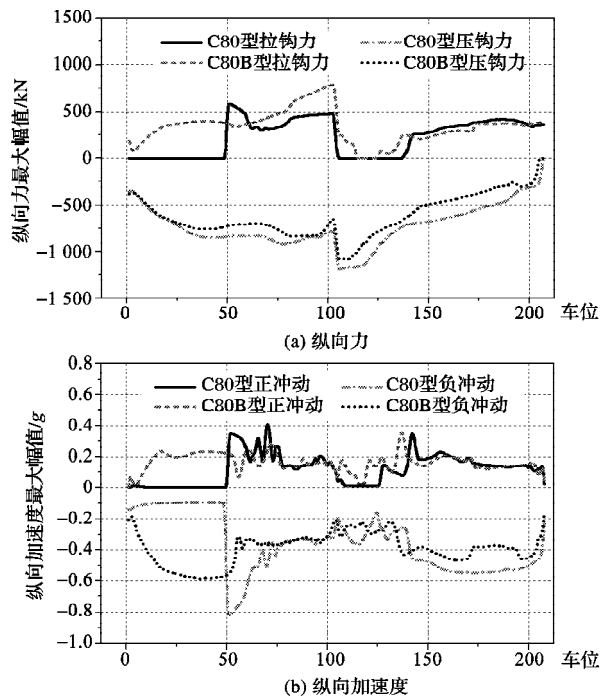


图7 装用C80型、C80B型敞车的 $1+2+1$ 组合列车纵向冲动沿列车分布比较($V=80\text{ km/h}$)

结果表明, 装用C80型铝合金敞车的 $1+2+1$ 组合列车的压钩力最大值比装用C80B型不锈钢敞车时在各车位间均较大, 这是因为C80型敞车比C80B型敞车的有效闸瓦制动力大, 从而导致更大的车间相对作用力; 此外, C80型敞车的制动风管总长度更大, 使得列车空气制动波的传递相对较慢, 因此也不利于纵向冲动的抑制。而最大拉钩力在装用C80B型敞车的列车前102个车位的分布更广, 纵向加速度影响的区别比较小, 主要体现在列车前50个车位的分布情况。

结果表明, 装用C80型铝合金敞车的 $1+2+1$ 组合列车的压钩力最大值比装用C80B型不锈钢敞车时在各车位间均较大, 这是因为C80型敞车比C80B型敞车的有效闸瓦制动力大, 从而导致更大的车间相对作用力; 此外, C80型敞车的制动风管总长度更大, 使得列车空气制动波的传递相对较慢, 因此也不利于纵向冲动的抑制。而最大拉钩力在装用C80B型敞车的列车前102个车位的分布更广, 纵向加速度影响的区别比较小, 主要体现在列车前50个车位的分布情况。

3.4 钩缓装置

目前, 我国铁路重载货车装用的车钩为16型联锁式旋转车钩和17型联锁式固定车钩, 其具有

连挂间隙小(9.5 mm)、联锁防脱及防跳性能可靠、曲线通过好等特点,广泛应用于载重70 t、80 t的各型运煤专用敞车上。由于在国外重载运输的单元列车中采用的牵引杆装置能有效地减少列车的间隙效应^[13],因此在我国运煤专用列车中,可将每3个车辆(1个翻车单元)之间的2个连挂车位处的17型车钩设计成2个无间隙的牵引杆,从而能极大地减小整列车的累计自由间隙。从图8中紧急制动工况下的对比仿真结果可以看出,牵引杆装置并未改变最大车钩力沿各车位的分布状态,拉钩力的改善程度略大于压钩力,这是由计算初始条件为拉钩状态引起的;在减少列车纵向冲击方面,牵引杆装置对纵向加速度的降低比车钩力更显著。

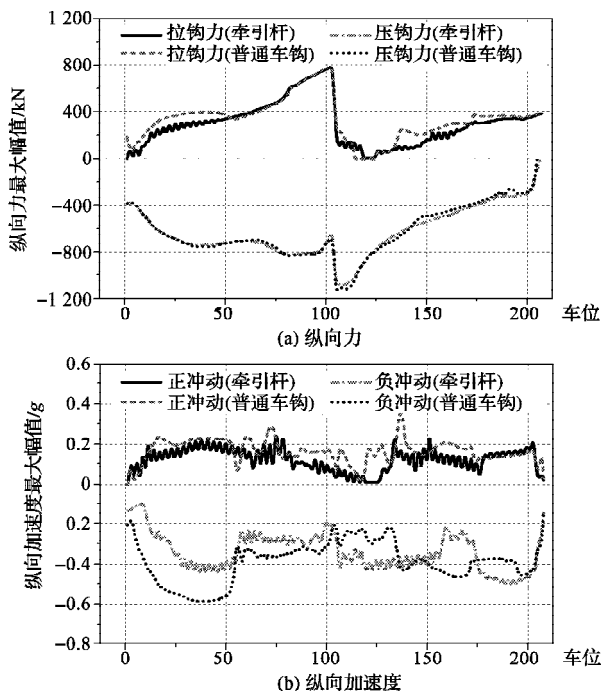


图8 装用牵引杆、普通车钩的1+2+1组合列车纵向冲动沿列车分布比较($V=80$ km/h)

此外,我国铁路主型货车装用的缓冲器有应用最为广泛的MT-2型、MT-3型等干摩擦式钢弹簧缓冲器和缓冲性能更优良的HM-1型摩擦胶泥缓冲器,各型缓冲器的性能参数^[11]见表3,其中MT-2型缓冲器是我国重载铁路车辆装用的主型缓冲器。从图9所示的列车紧急制动下的仿真结果可知,由于摩擦胶泥缓冲器具有较大的容量和阻抗力,有利于减少列车的纵向冲动作用,其中对列车中部车位压钩力的改善最明显。因此,适当地在1+2+1编组的2万吨重载组合列车的中间机车附近改装摩擦胶泥缓冲器,可以有效地减少车钩载荷,有利于减小车钩装置和车体牵引梁结构的疲劳破坏。

表3 我国铁路货车常用缓冲器主要性能参数

缓冲器 类型	额定冲击速度/ $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$	容量/ kJ	阻抗力/ kN	工作行程/ mm	重量/ kg
MT-3	8	45	$\leq 2\,000$	83	178
MT-2	8	50	$\leq 2\,270$	83	178
HM-1	10	>50	$\leq 2\,450$	81	132

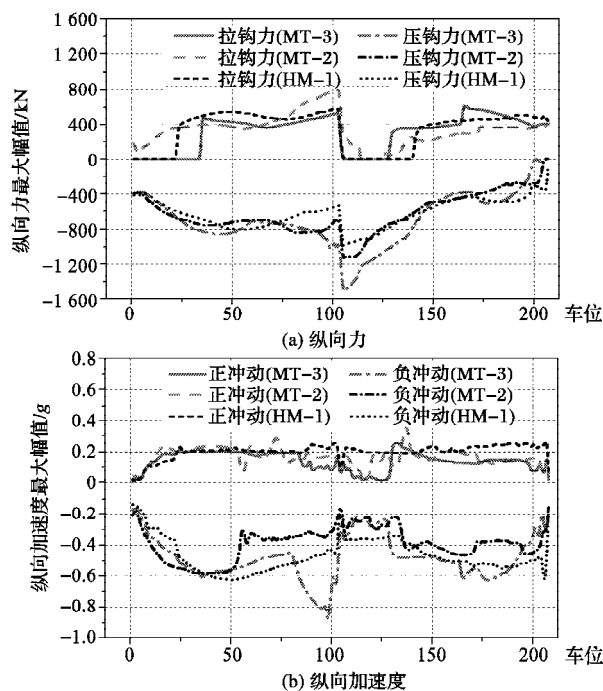


图9 装用不同缓冲器的1+2+1组合列车纵向冲动沿列车分布比较($V=80$ km/h)

3.5 运行条件

列车在实际运行过程中各主控机车需要根据不同的线路条件、运行速度等进行不同程度的制动和缓解操作,尤其对重载组合列车而言,合理的操作技术能够使列车在复杂线路上仍保持良好的运行性能。仿真计算时假设车钩初始状态在上坡道和平直道时为拉钩状态,在下坡道时为压钩状态,由图10的结果可知,随着线路坡度值的增加,压钩力依次增大,拉钩力依次减小,且当线路为下坡道时拉钩力减小幅度最大;在

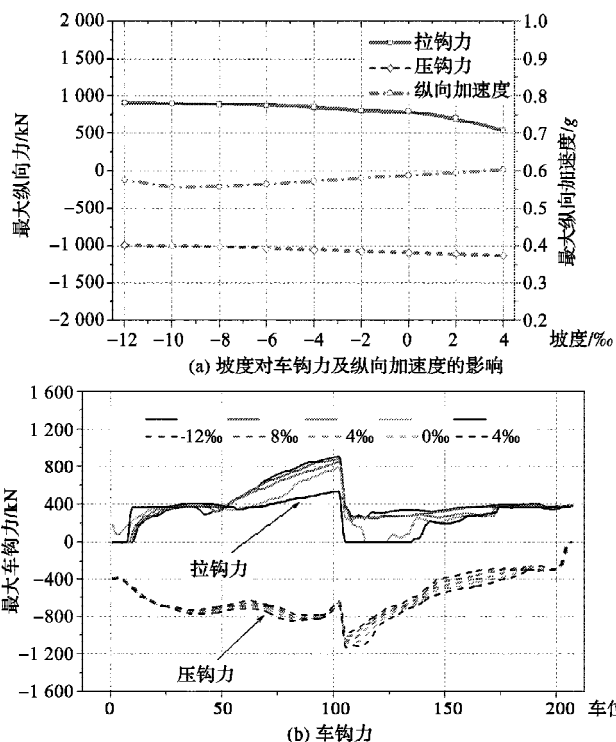


图10 1+2+1组合列车在不同线路坡度下紧急制动时的纵向冲动影响($V=80$ km/h)

大秦铁路运输重车方向的线路坡度-12‰~4‰范围内1+2+1组合列车紧急制动时车钩力沿列车分布趋势基本一致。图11中列车车钩力基本随制动初速减小而增加,其中当速度低至50 km/h及以下时,靠近中间机车后部车辆的压钩力急剧增大,因此应尽量减少或避免低速时进行紧急制动操作;此外,制动初速越大,拉钩力沿列车分布越广。

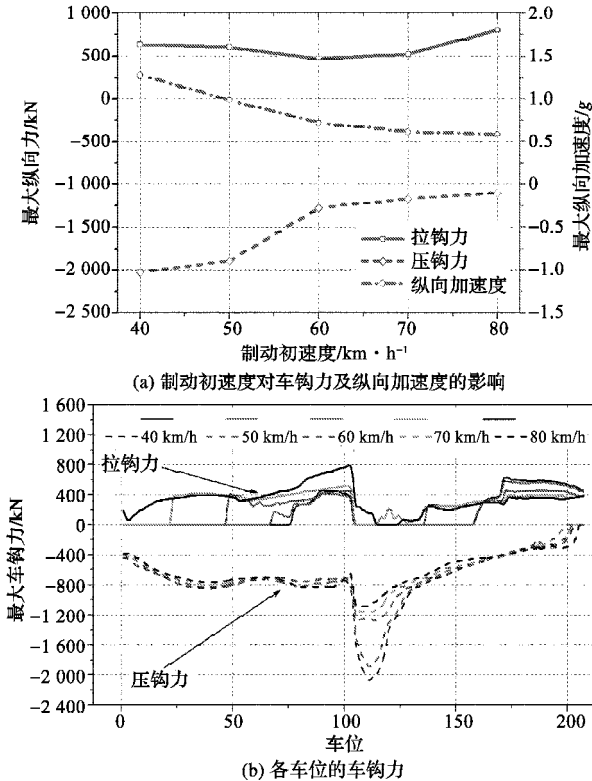


图11 1+2+1组合列车以不同初速度在平直道紧急制动下的纵向冲动影响

为了比较不同制动工况下的纵向冲动,以1+2+1组合列车以60 km/h速度在长大下坡道(-6‰)分别进行停车制动(紧急制动、常用全制动)和调速制动,仿真结果见表4。就车钩力和加速度而言,紧急制动时最大,常用全制动时最小;从最大车钩力分布来看,由于调速制动时空气制动减压量很小,需要充分发挥所有机车的电制动能力,所以最大车钩力位置受机车电制动的影响比较大,经常出现在靠近中间机车的车位处,而停车制动则是在列车空气制动和机车电制动均处于最大贡献时进行的,最大车钩力受机车电制动和列车空气制动的共同影响。

表4 1+2+1组合列车在长大下坡道时不同制动工况的纵向冲动比较

制动工况	紧急制动	常用全制动	调速制动
最大拉钩力的峰值/kN	516	578	544
最大拉钩力的车位	164	167	103
最大压钩力的峰值/kN	-1 148	-787	-919
最大压钩力的车位	108	121	105
最大纵向加速度/g	5.936	4.130	5.205

4 结论

本文以2万吨重载组合列车为研究对象,重点研究

列车编组方式、从控机车响应时间、车辆结构、钩缓装置、运行条件等因素对列车在紧急制动工况下纵向冲动的影响,结果表明:

①列车编组方案对2万吨重载组合列车纵向冲动影响很大,空气制动波的传播形式完全取决于从控机车的数量和位置,从而影响列车各车位车钩力分布和大小。

②从控机车响应时间对1+2+1组合列车的纵向性能影响很大,随着延迟时间的增加,车钩力和纵向加速度增大,当延时达到5s及以上时,最大压钩力急剧增大。在1+2+1组合列车中,装用C80型运煤专用敞车的组合列车比装用C80B型运煤专用敞车时的纵向性能更恶劣;装用牵引杆装置和摩擦胶泥缓冲器均可以改善车钩受力,缓和列车纵向加速度。随着线路坡度值的增加,1+2+1组合列车压钩力依次增大,拉钩力依次减小;而随着制动初速度减小时,列车车钩力逐渐增加,当速度低至50km/h及以下时,最大压钩力幅值急剧增大。此外,列车在长大下坡道上进行停车制动和调速制动时的纵向力特点也不同。

③由于没有考虑轮轨关系作用、悬挂引起的纵向和垂向耦合效应以及车体承载面与散装货物之间的迟滞作用等因素,文中仿真结果与文献[12]试验结果还具有一定的差异,但某些分析结论对推动我国2万吨重载组合列车技术的发展具有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] 常崇义,王成国,马大伟,等. 2万t组合列车纵向力计算研究[J] 铁道学报,2006,28(2): 89-94.
- [2] 赵鑫,王成国,马大伟. 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,2008,29(3): 78-83.
- [3] 魏伟,杜念博. 重载列车制动管路对制动性能的影响[J] 交通运输工程学报,2011,11(5): 49-54.
- [4] 魏伟,武星宇. 制动特性对列车纵向冲动的影响[J] 大连交通大学学报,2012,33(2): 1-5.
- [5] 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.
- [6] 陈琳芝,郭其一,殷毓华,等. 重载列车同步控制下纵向力仿真研究[J] 机车电传动,2012(6): 8-11.
- [7] 蒋益平,池茂儒,朱海燕. 两万吨重载组合列车牵引和制动时的车钩力分析[J] 机车电传动,2013(1): 23-26.
- [8] 耿志修. 大秦铁路重载运输技术[M]. 北京: 中国铁道出版社,2009: 12-21.
- [9] 铁道部标准计量研究所. TB/T 1335—1996 铁道车辆强度设计及试验鉴定规范[S]. 北京: 铁道部标准计量研究所,1997: 226,236.
- [10] 饶忠. 列车牵引计算[M]. 北京: 中国铁道出版社,2004: 20-27.
- [11] 王春山,陈雷. 铁路重载提速货车技术[M]. 北京: 中国铁道出版社,2010.
- [12] 中国铁道科学研究院. 大秦线采用Locotrol技术开行2万吨重载组合列车试验报告[R]. 北京: 中国铁道科学研究院,2006.
- [13] 严隽毫,翟婉明,陈清,等. 重载列车系统动力学[M]. 北京: 中国铁道出版社,2003: 230-235.

