

研
究
开
发

重载列车同步控制下纵向力仿真研究

陈琳芝¹, 郭其一¹, 殷毓华², 吕 杰³

(1. 同济大学 电气工程系, 上海 201804;

2. 上海铁路局, 上海 200071;

3. 南车株洲电力机车研究所有限公司, 湖南 株洲 412001)



作者简介: 陈琳芝(1988-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为轨道电气。

摘 要: 列车纵向力成为评价重载列车同步控制性能的一个重要指标, 为对其进行研究, 建立了列车纵向动力学数学模型, 通过 Matlab/Simulink 设计仿真模型, 计算不同编组和不同工况下万吨列车的纵向力, 并与试验数据进行比对来验证该仿真模型的可行性, 同时也验证了同步控制的组合列车比传统编组方式列车在纵向动力学性能上更具优越性, 为进一步分析和优化列车同步控制提供仿真平台和理论依据。

关键词: 重载列车; 同步控制; 纵向力; 数学模型; 仿真模型

中图分类号: U292.91+2; TP391.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-128X(2012)06-0008-04

Simulation Study of Heavy Haul Train Longitudinal Force with Synchronous Control

CHEN Lin-zhi¹, GUO Qi-yi¹, YIN Yu-hua², LV Jie³

(1. Department of Electrical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China;

2. Shanghai Railway Bureau, Shanghai 20071, China;

3. CSR Zhuzhou Institute Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: Longitudinal force has become an important index to evaluate synchronous control performance of heavy haul train. Mathematical model and simulation model based on Matlab/Simulink of train's longitudinal dynamics was established. Longitudinal force of 10 000 t heavy haul train under different marshaling and different working conditions was calculated and compared to test data, which verified the feasibility of simulation model; simultaneously, it was proved that the combined train of synchronous control had more advantages in dynamics performance than the traditional train. All of above provide simulation platform and theoretical basis for further analysis and optimization of train synchronous control.

Key words: heavy haul train; synchronous control; longitudinal force; mathematical model; simulation model

0 引言

开行重载组合列车代表当今世界铁路货运的先进水平和重要发展方向,是提高货运运能的主要手段,为经济快速发展提供了有力保障^[1]。然而,重载列车由多台机车共同牵引,其受力情况较一般列车更为复杂。为安全开行重载列车,目前电力机车上主要采用无线同步控制系统,并已在大秦线和神朔线上正式开行无线同步控制重载列车^[2]。为进一步研究和优化重载列车同步控制策略,需要模拟和分析危及列车运行安全的各种工况下的纵向力分布。文献[3-4]重点进行了万吨列车纵向力的试验研究;文献[5]把钩缓装置描述成简

单的线性模型组合,用改进的 Runge-Kutt 方法对列车纵向动力学方程进行求解;文献[1,6]中采用 Newmark 显式积分方法求解非线性的列车动力学方程;文献[7-8]对纵向力的数学模型和仿真模型进行了阐述;文献[9-11]对重载列车车钩纵向力造成的危害进行了分析。本文根据列车纵向力数学模型,利用 Matlab/Simulink 进行仿真计算,计算列车不同编组和不同工况下的纵向力,并与试验数据进行比对来验证该仿真模型的可行性,同时也验证了同步控制的组合列车比传统编组方式列车在纵向动力学性能上更具优越性,为进一步分析和优化列车控制提供仿真平台和理论依据。

1 重载列车同步控制中纵向力数学模型

基于无线通信的同步控制指组合列车以无线通信

收稿日期: 2012-05-20; 收修修改稿日期: 2012-09-26

基金项目: 国家 863 项目(2009AA11Z217)

方式传输主从控机车之间的操控命令和应答、状态信息等,实现主控机车对从控机车的远程无线同步控制。为了简化模型,组合列车的同步控制忽略了列车无线信号传输和制动波传输等时延,认为各个机车同时执行制动/牵引动作,并且各台机车的制动/牵引力大小相同。

1.1 列车纵向动力学模型

将列车视为用缓冲器联结的间断质点系,每一个质点代表一节辆,根据牛顿第二定律,可列出用非线性方程描述的列车运动方程式^[1,7]。

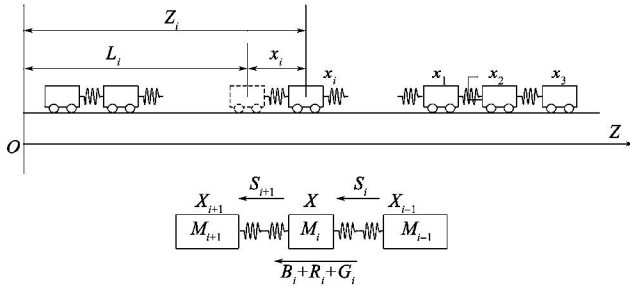


图1 列车纵向运动计算简图

在坐标系Z中,序号为*i*的车辆流动坐标为:

$$Z_i = L_i + X_i$$

式中: L_i 为序号*i*车辆在初始时刻($t=0$)在固定坐标系中质心的坐标; X_i 为序号*i*车辆的质心相对于其静平衡状态未知的位移量。

由图1得列车运动方程式的形式为^[4-5]:

$$M_i \ddot{X}_i = S_i - S_{i+1} - B_i - R_i - G_i \quad (1)$$

式中: M_i 、 $\ddot{X}_i$ 、 S_i 、 B_i 、 R_i 、 G_i 分别为序号*i*车辆的质量、位移量、前车钩力、制动力、基本阻力、附加阻力(包括坡道阻力和弯道阻力)。

车钩力(S_i)取决于车辆间的相对位移与相对速度,将式(1)形式写成二阶常微分方程组的通用形式

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{F\} \quad (2)$$

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; $\{\ddot{x}\}$ 、 $\{\dot{x}\}$ 、 $\{x\}$ 分别为加速度、速度、位移矢量; $\{F\}$ 为广义载荷矢量,是与位移、速度有关的非线性过程量。式(2)两边同时乘以 $[M]^{-1}$,再通过移项得下式:

$$\{\ddot{x}\} = [M]^{-1}\{F\} - [M]^{-1}[C]\{\dot{x}\} - [M]^{-1}[K]\{x\} \quad (3)$$

这是一个关于 $\{\ddot{x}\}$ 的方程,把方程分成3个模块:制动力与阻力模块、刚度子系统模块、阻尼子系统模块。建立仿真模型对方程组求解,获得车钩的受力情况。

其中,基本阻力和制动力计算可参看牵引计算的有关规范,下将对车钩缓冲装置的数学模型进行分析。

1.2 钩缓装置力的计算

钩缓装置是车钩和缓冲器的简称,起联接车辆和

缓冲车辆冲击的作用,针对线性缓冲器进行分析,其缓冲特性如图2所示。

对线性缓冲器,其作用力与相对位移的关系可表示如下:

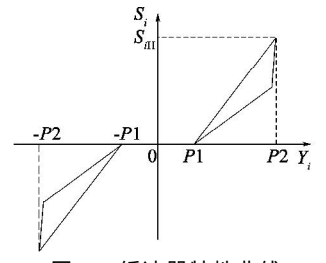


图2 缓冲器特性曲线

$$\begin{cases} |y_i| \leq P_1 & S_i = 0 \\ P_1 \leq |y_i| \leq P_2 \text{ 且 } \sec y_i \dot{y}_i > 0 \text{ 时, } & S_i = ak_1 \cdot (|y_i| - P_1) \cdot \sec y_i \\ P_1 \leq |y_i| \leq P_2 \text{ 且 } \sec y_i \dot{y}_i < 0 \text{ 时, } & S_i = ak_2 \cdot (|y_i| - P_1) \cdot \sec y_i \\ P_2 \leq |y_i| \text{ 且 } \sec y_i \dot{y}_i > 0 \text{ 时, } & S_i = [S_{i+1} + ak_2 \cdot (|y_i| - P_2)] \cdot \sec y_i \end{cases}$$

式中: P_1 为车钩缓冲装置的游隙; P_2 为缓冲装置的最大行程; ak_1 和 ak_2 为缓冲器的加载和卸载刚度; ak_3 为车体刚度。

通常车辆间有2个缓冲器,把这2个缓冲器视为串联形式,则组合后特性参数分别为:

$$\overline{ak_1} = ak_1/2, \overline{ak_2} = ak_2/2, \overline{ak_3} = ak_3/2$$

$$\overline{P_1} = 2P_1, \overline{P_2} = 2P_2$$

2 重载列车同步控制中纵向力仿真模型

根据前文分析的列车纵向动力学数学模型,利用Matlab/Simulink模块设计仿真模块。具体的仿真条件为:万吨重载列车的总重为10 368 t,列车总长约为1 460 m。25 t轴重货车车辆长度按13 942 mm考虑,车辆的车钩为E级钢17型联锁式车钩,一对车钩的结构间隙考虑到应用磨损后取30 mm,车辆的缓冲器为MT-2型缓冲器,车辆的制动装置为改进的120型控制阀配新型高摩合成闸瓦。设计仿真模型如图3所示。

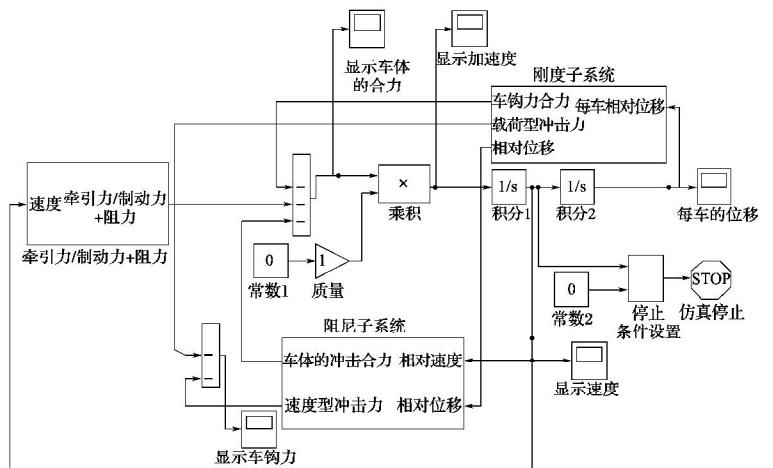


图3 列车纵向动力学仿真模型

列车纵向动力学仿真模型包含2个积分环节和2个求和模块,实现微分方程式(1)的求解。如图3所示,在数据线1上传递的是车体的加速度 $\{\ddot{x}\}$,经积分环节转化为车体的速度 $\{\dot{x}\}$ 传递到数据线2,再经过积分环节转化为车体的位移 $\{x\}$ 传递到数据线3。由于刚度子系

统与位移有关, 所以将数据线3的数据引入到刚度子系统中。同理, 将数据线2引入阻力子系统模块, 这样就可以得到和式(3)等价的仿真框图, 由仿真图可以方便地得出各车的车钩力、速度、加速度等。

3 列车纵向力仿真计算

利用前文建立的仿真模型计算不同编组 and 不同工况下的纵向力验证该模型的可行性。针对图4的2个编组方案进行计算: 方案1(组合列车方案): SS₄B 机车+25 t轴重货车(50辆)+ SS₄B 机车+25 t轴重货车(50辆)+可控列尾; 方案2(单元列车方案): SS₄B 机车(2台重联)+25 t轴重货车(100辆)+可控列尾。

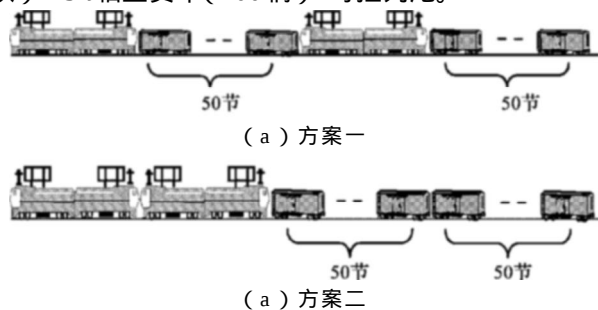


图4 组合列车和单元列车编组方式

3.1 限坡启动

计算条件为: 全列车均处于4‰的上坡道上, 初始速度为0, 车钩初始状态为压钩状态, 2台SS₄型电力机车同时牵引, 牵引手柄提到最大位的时间为32 s。启动过程中各节车的最大车钩力如5所示(以下图中、表中的“车辆位置”、“车位”指在102辆编组中的具体位置), 其中, 车钩力为负表示车钩受压, 车钩力为正表示车钩受拉; 而加速度为正表示其方向与列车运行方向相同, 加速度为负表示其方向与列车运行方向相反(以下同)。

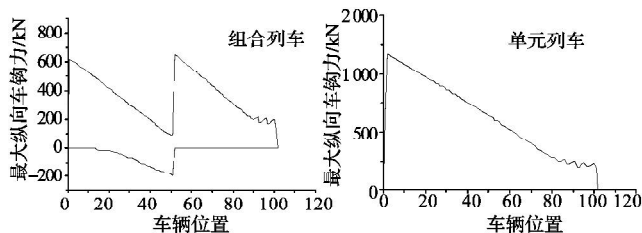


图5 启动过程中各节车的最大车钩力

3.2 动力制动

计算条件为: 坡道为-9‰的单一下坡道, 列车的初始速度为45 km/h, 车钩初始状态为拉钩状态, 2台SS₄型电力机车同时动力制动, 动力制动手柄提到最大位的时间为32 s。动力制动工况各节车的最大车钩力如图6所示。

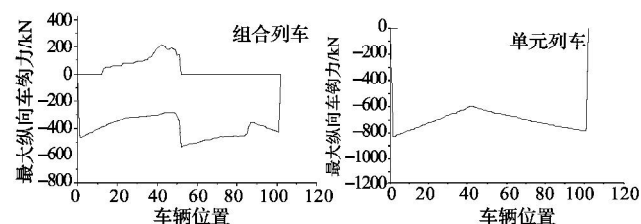


图6 动力制动工况各节车的最大车钩力

3.3 常用制动

计算条件为: 坡道为-9‰的单一下坡道, 初始制动速度为75 km/h, 车钩的初始状态为拉钩状态, 列车管减压量为80 kPa。制动工况中各节车的最大车钩力如图7所示。

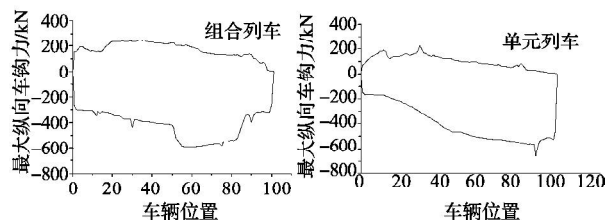


图7 制动工况中各节车的最大车钩力

3.4 常用制动缓解

计算条件为: 坡道为-9‰的单一下坡道, 列车的初始缓解速度为35 km/h, 车钩的初始状态为压钩状态, 列车管减压量为80 kPa。制动缓解工况中各节车最大车钩力如图8所示。

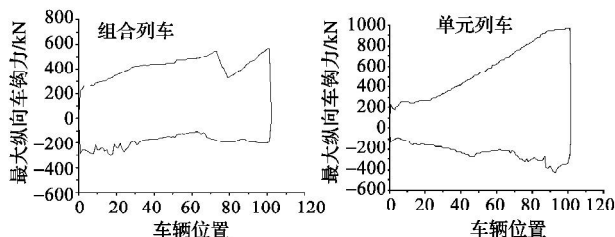


图8 制动缓解工况中各节车最大车钩力

3.5 紧急制动

计算条件为: 单一平直道, 列车制动前初速度为100 km/h, 车钩的初始状态为拉钩状态, 列车管减压量为80 kPa。紧急制动工况中各节车的最大车钩力如图9所示。

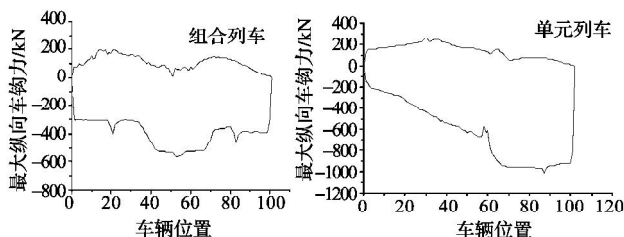


图9 紧急制动工况中各节车的最大车钩力

4 仿真计算结果与试验比较

4.1 组合列车仿真数据与试验数据比较

试验数据有神华对SS₄B型电力机车加装机车无线重联装置进行分布动力控制万吨组合列车的试验数据, 和在燕家塔进行“1+1”、“2+0”2种模式万吨组合列车的静态试验的数据。

根据前文“1+1”编组的仿真计算结果与试验数据比较如表1所示, 表1是列车在不同工况下的最大车钩力和最大加速度的比较。由表1可以看出, 仿真数据和试验测试数据基本一致, 说明仿真的正确性和准确性是不容置疑的。

表1 不同工况下的最大车钩力

工况	坡道 值	初速/ km·h ⁻¹	比较	最大车钩拉力/ 车位/时间	最大车钩压力/ 车位/时间	最大正加速度/ 车位/时间	最大负加速度/ 车位/时间
限坡启动	4‰	0	计算	655/54/48	-195/52/8	2.8/9/4	-1.6/3/4
限坡启动	4‰	0	试验	650.47/52/42.0	-194.07/51/6.0	2.70/8/3.0	-1.62/3/2.0
动力制动	-9‰	45	计算	220/42/-	-510/51/-	2.0/39/15/-	-4.4/101/15
动力制动	-9‰	45	试验	215.40/42/21.0	-531.04/52/16.0	1.99/39/10	-4.13/101/13
常用制动	-9‰	75	计算	242/34/-	-587/56/-	3.0/15/48/-	3.0/30/15
常用制动	-9‰	75	试验	245.26/34/27.0	-590.75/56/16.0	3.01/15/45.0	-3.22/31/12.0
制动缓解	-9‰	35	计算	570/100/-	-300/17/-	5.5/100/15/-	-3.9/93/15
制动缓解	-9‰	35	试验	573.69/101/13	-300.71/17/27.0	5.59/101/13.0	-3.79/92/13.0
紧急制动	0	100	计算	200/21/-	-557/53/-	3.0/24/12/-	-3.6/80/10
紧急制动	0	100	试验	198.34/17/20.0	-565.16/53/12.0	2.92/22/9.0	-3.83/84/10.0

注：表中车钩拉力及压力的量纲为 kN，时间的量纲为 s，加速度的量纲为 m/s²

4.2 组合列车和单元列车仿真数据比较

在各工况中,最大车钩力和最大加速度的值如表 2 所示。单元列车为 A,组合列车为 B。由表 2 可知组合列车与单元列车相比,减小了列车纵向车钩力和纵向冲动。

表2 不同条件下的最大车钩力和最大加速度

工况	坡道 值	初速/ km·h ⁻¹	编组	最大车钩 拉力/车位	最大车钩 压力/车位	最大正加 速度/车位	最大负加 速度/车位	车钩力 改善	冲动 改善
限坡启动	4‰	0	A	1 171/2	/	4.3/16	-3.2/29	/	/
限坡启动	4‰	0	B	655/54	-195/52	2.8/9	-1.6/3	44.5%	37.5%
动力制动	-9‰	45	A	/	-829/2	6.67/86	-7.76/101	/	/
动力制动	-9‰	45	B	220/42	-510/51	1.99/39	-4.13/101	36.0%	46.8%
常用制动	-9‰	75	A	223/31	-663/91	4.68/86	-5.69/91	/	/
常用制动	-9‰	75	B	242/34	-587/56	3.01/15	-3.22/31	10.9%	43.4%
制动缓解	-9‰	35	A	971/101	-428/93	9.50/101	-6.01/84	/	/
制动缓解	-9‰	35	B	570/100	-300/17	5.59/101	-3.79/92	40.9%	41.1%
紧急制动	0	100	A	258/30	-1 006/87	8.31/80	-9.99/87	/	/
紧急制动	0	100	B	200/21	-557/53	2.92/22	-3.83/84	43.8%	61.7%

注：表中车钩拉力及压力的量纲为 kN，加速度的量纲为 m/s²

如表 2 所示,同步控制的组合列车与单元列车相比,纵向车钩力和纵向冲动有了很大改善,从而提高了列车运行的可靠性和安全性,这也正是目前重载列车主要采用多机车分布牵引的一个重要原因。

5 结语

本文建立了列车同步控制下纵向力和车缓装置力的数学模型,运用 Matlab/Simulink 进行仿真计算求出的加速度及冲动值大小等物理量,与实际运行线路上进行纵向冲动试验所得到的结果相符。同步控制的组合

列车在纵向力和纵向冲动上有了较大的改善,证明了组合列车比单元列车更具优越性,为进一步优化列车编组和同步控制策略提供可靠的仿真平台和理论依据。由于需要考虑的参数多、难度大,本文研究工作并没有把实际对列车纵向冲动有影响的横向和垂向的冲击等因素的影响考虑进去,在下一步研究中将考虑更多的因素,完善仿真模型。

参考文献：

[1] 耿志修.大秦铁路重载运输技术[M] 北京：中国铁道出版社,2009.

[2] 范振平,李 强,黄 倩. 大秦线 2 万吨重载列车车钩纵向力特性研究[J] 物流与技术,2011(5): 125-127.

[3] 王悦明,陶 强,陆 阳,倪纯双,李学峰. 大秦线 2 万 t 重载组合列车试验研究[A]// 铁道科学技术新进展[M] 北京：中国铁道出版社,2005.

[4] Mouginchteine L ,Yabko I-Method of Investigation of the Longitudinal and Dynamic Forces in Freight Trains of Increased Mass and Length[J] Implementation of Heavy Haul Technology for Network Efficiency ,2003 (9): 43-51.

[5] 严隽毫,翟婉明,陈 清,傅茂海.重载列车系统动力学[M] 北京：中国铁道出版社,2003.

[6] Fancher P S ,Ervin R D ,MacAdam C C ,Winkler CB. Measurement and Representation of Truck Leaf Spring[R]Ann Arbor : High Safety Research Institute ,The Univ of Michigan ,1980.

[7] 胡万华,杨建伟,李继山.列车纵向冲动数学模型及仿真研究[J] 太原重型机械学院学报,2004,25(3): 30-34.

[8] 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.

[9] 赵 鑫,土成国,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 ,29(3): 78-83.

[10] 安中正. “ 和谐号 ” 机车牵引 2 万 t 重载列车的制动操纵技术探讨[J] 机车电传动,2010(1):70-72.

[11] 金 辉. 超长重载列车易发生冲钩问题的原因及对策[J] 机车电传动,2010(1):75-78.