

一系定位刚度对转向架群配置高速货运动车组 车辆动力学性能影响研究*

王家鑫¹ 张为黎² 陈再刚^{2†}

(1. 中车唐山机车车辆有限公司, 唐山 063000)(2. 西南交通大学 牵引动力国家重点实验室, 成都 610031)

摘要 为了提高我国铁路对大型、重型、贵重货物的快捷高效运输能力, 中车唐山机车车辆有限公司研发了转向架群配置的高速货运动车组. 基于多体系统动力学理论, 建立了转向架群配置的高速货运动车组车辆系统动力学模型, 确定了转向架群配置高速货运动车组车辆的非线性临界速度, 研究了一系定位刚度对车辆运行非线性临界速度的影响; 同时, 利用建立的模型研究了一系定位刚度对车辆运行安全性指标以及平稳性指标的影响. 研究表明, 非线性临界速度随着一系纵向定位刚度的增加先增大后减小, 而随着一系横向定位刚度的增加整体呈现减小趋势; 车辆横向运行平稳性指标随着一系纵向定位刚度的增加有所增加, 而垂向平稳性指标基本保持不变; 一系横向定位刚度对车辆运行平稳性指标影响不明显.

关键词 转向架群配置, 高速货运动车组, 动力学性能, 安全性, 定位刚度

DOI: 10.6052/1672-6553-2020-030

引言

为了实现对大型、重型、贵重货物的快捷运输, 中车唐山公司提出并研发了一种转向架群配置的高速货运动车组. 转向架群配置的高速货运动车组运行速度能达到 250km/h 以上, 并且由于其轴数的增加其载重能力也大幅度提高. 过往已有学者对转向架群配置列车有所研究, 认为转向架群配置结构方案是可行的, 且其曲线通过性能有所提升^[1]. 由于一系定位刚度对列车动力学性能有着明显影响, 尤其对于高速重载的转向架群配置的高速货运动车组而言, 其一系定位刚度是否合理值得关注. 以往已有许多学者在悬挂参数对车辆动力学性能的影响方面做过许多工作. 例如, 王开云等^[2]基于车轨耦合动力学理论, 运用 TTISIM 仿真系统对天梭号电力机车进行悬挂参数影响分析并给出优化意见; 任尊松等人^[3]基于多体动力学软件 SIMPACK 对高速列车踏面以及悬挂参数进行优化; 潘迪夫等^[4]运用 SIMPACK 软件建立 CRH2 型列车动力学模型, 并分析了其悬挂参数对车辆动力学性能的影响; 吕凯凯等^[5]对八轴电力机车研究了悬挂参数对车辆的影响并给出优化意见; 李嘉伟等^[6]对 200km/h 电力机车一系悬挂结构以及参数进行分析优化. 但

是, 对于当前具有新型结构形式的转向架群配置高速货运动车组的动力学性能, 仍缺乏相应的研究工作, 其动力学参数影响规律亟待解明.

针对转向架群配置的高速货运动车组, 本文基于多体系统动力学理论^[7], 运用多体动力学软件 SIMPACK 建立转向架群配置的高速货运动车组动力学模型. 在此基础上确定了车辆的非线性临界速度, 分析了其一系悬挂定位刚度对车辆非线性临界速度以及安全性、平稳性等动力学性能的影响.

1 转向架群配置动车组车辆动力学模型

本文基于大型多体动力学仿真分析软件 SIMPACK 建立了转向架群配置的高速货运动车组车辆动力学理论模型, 如图 1 所示. 该转向架群配置的高速货运动车组车辆拥有四个二轴转向架, 与传统四轴、六轴铁路车辆最大的区别在于该车辆结构在构架以及车体之间增加了过渡构架, 过渡构架通过三系悬挂与车体相连; 每一过渡构架下有两个两轴转向架, 通过二系悬挂与构架相连; 抗蛇行减振器以及横向减振器不仅存在于二系悬挂, 三系悬挂中也同样存在; 抗侧滚扭杆在过渡构架以及车体之间. 考虑模型各部分均为刚体, 共有 15 个刚体, 转向架群配置高速货运动车组动力学模型共有 75 个自由度, 表 1 为车辆相关参数.

2019-08-06 收到第 1 稿, 2020-03-16 收到修改稿.

* 国家重点研发计划资助项目(2017YFB1201300)和国家自然科学基金资助项目(51775453)

† 通讯作者 E-mail: zgchen@home.swjtu.edu.cn

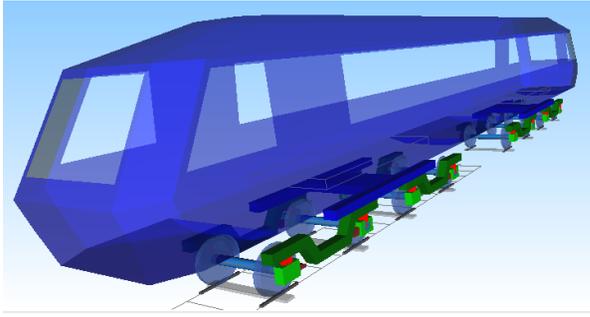


图1 转向架群配置高速货车组车辆动力学模型

Fig.1 Vehicle dynamics model of high-speed freight EMU equipped with four double-axle bogies

表1 高速货车组动力学模型主要参数

Table 1 Main parameters of dynamic model of high-speed freight EMU

Parameter	Value
Car-body mass/kg	42,800
Car-body rolling moment of inertia /t·m ²	87.2
Car-body pitching moment of inertia/t·m ²	1927.7
Car-body yawing moment of inertia/t·m ²	1927.8
Transition-bogie mass/kg	2596
Transition-bogie rolling moment of inertia/t·m ²	3993
Transition-bogie pitching moment of inertia/t·m ²	5388
Transition-bogie yawing moment of inertia/t·m ²	9205
Bogie-frame mass/kg	1630
Bogie-frame rolling moment of inertia/t·m ²	1520
Bogie-frame pitching moment of inertia/t·m ²	1057
Bogie-frame yawing moment of inertia/t·m ²	2519
Wheelset mass/kg	1414
Wheelset rolling moment of inertia/t·m ²	797
Wheelset pitching moment of inertia/t·m ²	98
Wheelset yawing moment of inertia/t·m ²	797
Primary-suspension longitudinal stiffness/kN/m	919.8
Primary-suspension lateral stiffness/kN/m	919.8
Primary-suspension vertical stiffness/kN/m	4117.5
Secondary-suspension longitudinal stiffness/kN/m	133
Secondary-suspension lateral stiffness/kN/m	133
Secondary-suspension vertical stiffness/kN/m	203
Tertiary-suspension longitudinal stiffness/kN/m	400
Tertiary-suspension lateral stiffness/kN/m	400
Tertiary-suspension vertical stiffness/kN/m	1200

2 一系定位刚度对动车组车辆非线性临界速度的影响

转向架群配置的高速货车组设计运行速度将达到250km/h以上,其悬挂参数设计值能否使车辆稳定性以及平稳性等指标达到标准值得研究^[9].本节以临界速度为目标,利用第一节建立的高速货车组车辆动力学模型,研究一系定位刚度对车辆运行稳定性的影响.该动车组车辆一系纵向定位刚度设计值为40MN/m,一系横向定位刚度

设计值为12MN/m.

本文采用降速法计算获得的定位刚度设计参数下车辆轮对横向位移随车辆运行速度变化的时程曲线结果,如图2所示.由图可知,在初始不平顺激励下,速度从390km/h逐渐降低,轮对呈现周期性的横向振动,当速度降至384km/h时,轮对横向位移突然收敛至平衡位置.由此可得,该转向架群配置的动车组车辆非线性临界速度为384km/h.

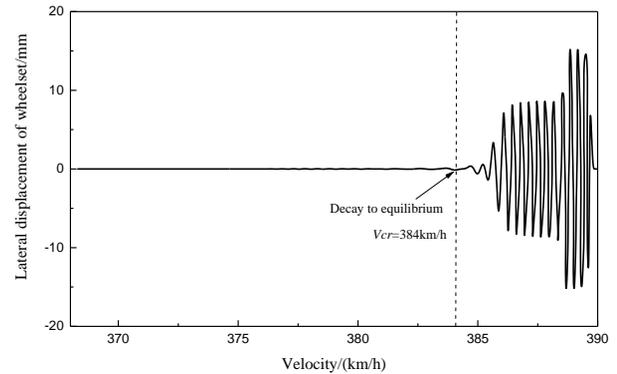


图2 轮对横向位移与车辆运行速度关系

Fig.2 Relationship between wheelset lateral displacement and vehicle running speed

2.1 一系纵向定位刚度对车辆非线性临界速度的影响

图3所示为一系纵向定位刚度对车辆非线性临界速度的影响规律曲线.由图可知,一系纵向定位刚度值在5MN/m以下时,随着刚度的增加,机车非线性临界速度呈增加趋势,且增幅明显,刚度值为5MN/m左右时,机车非线性临界速度达到了最大值.当刚度值在5MN/m以上时,机车临界速度随着刚度值的增大而减小,且在20MN/m以后降低幅度较为平缓.

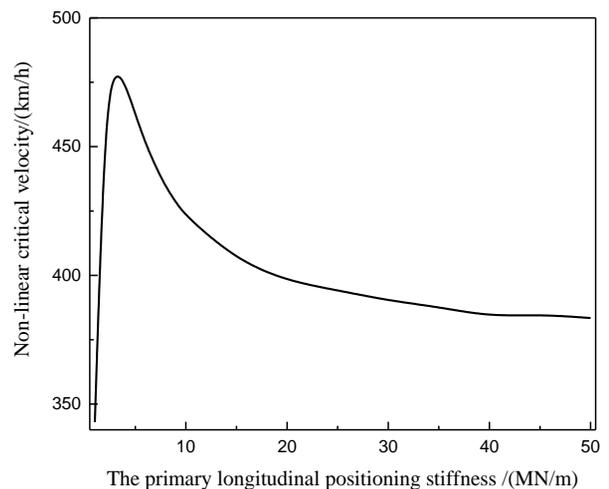


图3 一系悬挂纵向定位刚度对非线性临界速度的影响

Fig.3 Influence of primary longitudinal positioning stiffness on non-linear critical velocity

由此可知,当一系纵向定位刚度取 5MN/m 左右时,车辆运行非线性临界速度达到最高.但同时考虑到一系定位刚度不能过小,否则会影响车辆的牵引性能,因而在原始设计的一系纵向定位刚度 40MN/m 取值下,动车组车辆非线性临界速度为 384km/h ,基本满足稳定运行的要求.若想进一步提高车辆的非线性临界速度,可适当降低一系纵向定位刚度.

2.2 一系横向定位刚度对车辆非线性临界速度的影响

一系横向定位刚度对车辆非线性临界速度的影响如图4所示.由图可知,当一系横向定位刚度值在 $1\sim 20\text{MN/m}$ 时,车辆非线性临界速度随横向定位刚度的增加整体呈现降低趋势.而当横向刚度在 $1\sim 7\text{MN/m}$ 时,随着一系横向定位刚度的增加,车辆非线性临界速度迅速降低,但当横向定位刚度值大于 7MN/m ,车辆非线性临界速度随一系横向定位刚度的增加,其降低幅度较为平缓.由于车辆运营速度在 250km/h 以上,而动力学仿真条件由于对车辆运营实际状况有所简化,因此对转向架群配置的高速货运动车组进行仿真需要达到较高的非线性临界速度,从结果来看,若想进一步提高车辆的非线性临界速度,可适当降低一系横向定位刚度.

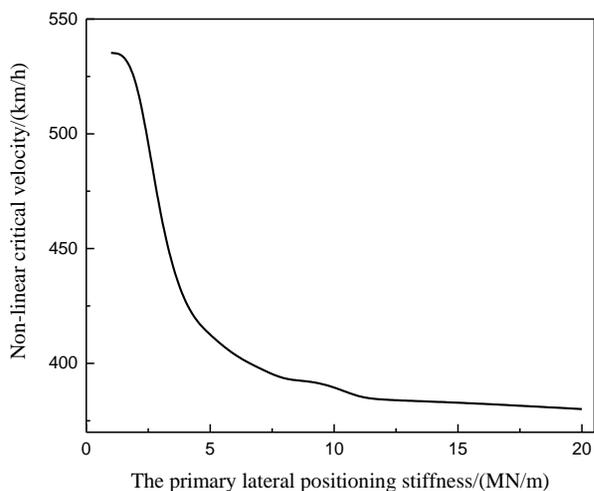


图4 一系横向定位刚度对临界速度的影响

Fig.4 Influence of primary lateral positioning stiffness on non-linear critical velocity

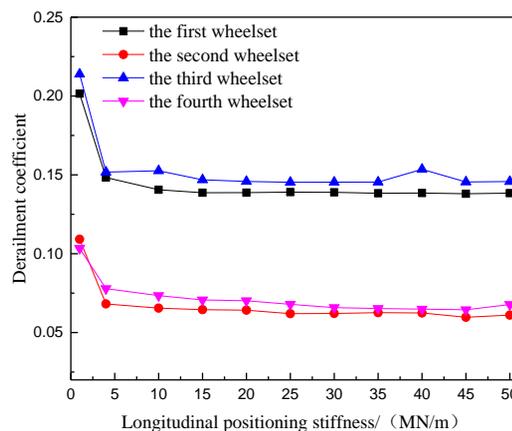
3 一系定位刚度对动车组车辆动力学性能的影响分析

为研究一系定位刚度对该转向架群配置的高速货运动车组车辆动力学性能的影响,利用本文建立的动车组车辆动力学模型,开展了动车组车辆动态仿真,分析了不同一系定位刚度参数下动车组以 250km/h 的恒定速度在曲线半径为 7000m 的轨道

上运行时的动力学特性.结合文献[8-10]对一系定位刚度对该转向架群配置的高速货运动车组车辆动力学性能的影响进行分析.

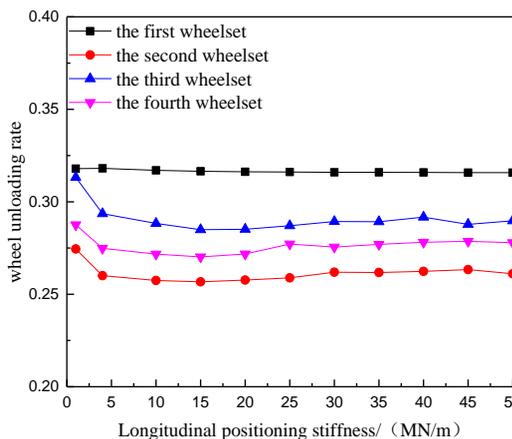
3.1 一系纵向定位刚度对车辆动力学性能的影响

图5所示为一系纵向定位刚度对转向架群配置高速货运动车组车辆动力学性能影响的仿真计算结果统计规律.由图可知,在曲线运行时,每位轮对脱轨系数随着一系纵向定位刚度的增大其变化规律基本一致,均是随着一系纵向定位刚度的增大呈现先减小然后基本保持不变的规律,其中1位与3位轮对脱轨系数数值比较接近,2位以及4位轮对的脱轨系数数值基本一致.当一系纵向定位刚度从 1MN/m 增加到 50MN/m 时,1位轮对轮重减载率基本保持不变,而其余三位轮对轮重减载率变化规律基本一致,均是先有所减小然后基本保持不变.同时,随着一系纵向定位刚度的增加,车体垂向、横向加速度以及垂向平稳性指标基本保持不变,而横向平稳性指标随着一系纵向定位刚度的增加逐渐增大.



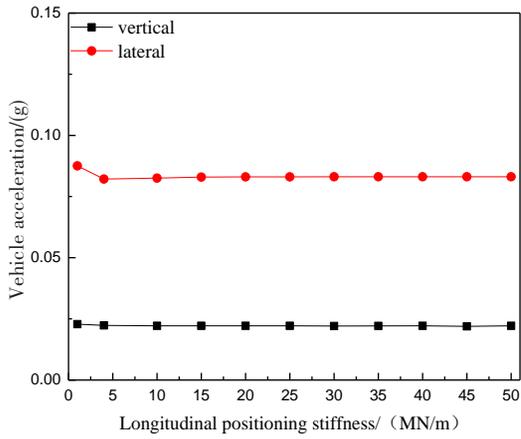
(a) 脱轨系数

(a) Derailment coefficient



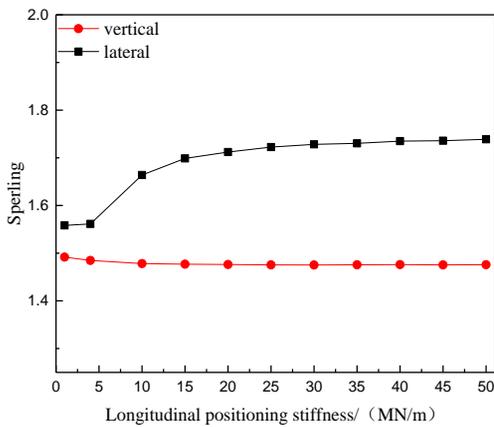
(b) 轮重减载率

(b) Wheel unloading rate



(c) 车体振动加速度

(c) Vehicle body vibration acceleration



(d) Sperling 指标

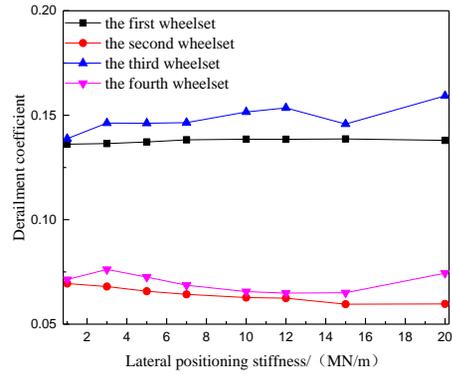
(d) Sperling index

图 5 一系纵向定位刚度对车辆动力学性能的影响

Fig.5 Influence of primary longitudinal positioning stiffness on vehicle dynamic performance

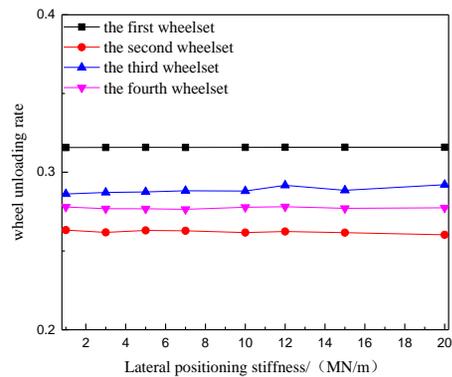
3.2 一系横向定位刚度对车辆动力学性能的影响

图 6 所示为一系横向定位刚度对转向架群配置高速货车组车辆在曲线运行时对其动力学性能影响的仿真计算结果统计规律. 由图 6 可知, 当一系横向定位刚度逐渐增大时, 1 位轮对脱轨系数随着一系横向定位刚度的增加基本保持不变, 而 3 位轮对脱轨系数随着一系横向定位刚度的增加呈现增大趋势, 2 位以及 4 位轮对整体呈现减小趋势; 而各轮对的轮重减载率却在—系横向定位刚度的增加过程中基本保持不变. 同时车体加速度以及平稳性指标受—系横向定位刚度的影响不大, 当—系横向定位刚度从 1MN/m 增大到 20MN/m 时, 车体加速度以及平稳性指标基本保持不变.



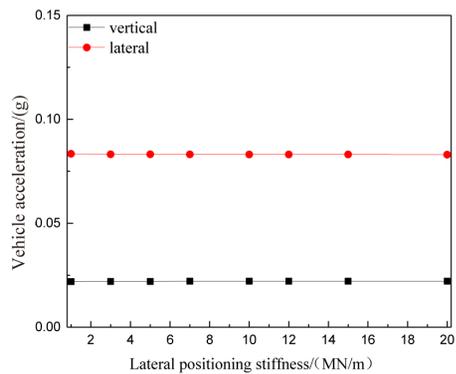
(a) 脱轨系数

(a) Derailment coefficient



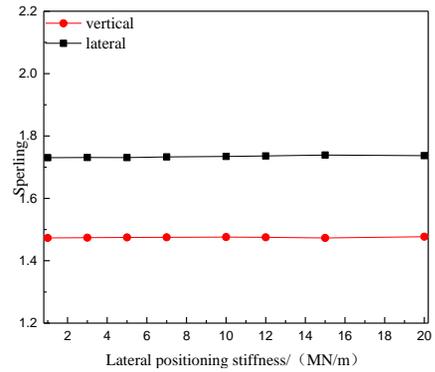
(b) 轮重减载率

(b) Wheel unloading rate



(c) 车体振动加速度

(c) Vehicle body vibration acceleration



(d) Sperling 指标

(d) Sperling index

图 6 一系横向定位刚度对车辆动力学性能的影响

Fig.6 Influence of primary lateral positioning stiffness on vehicle dynamic performance

4 结论

本文利用基于多体动力学理论建立的转向架群配置高速货运动车组车辆动力学模型,研究了一系定位刚度对车辆非线性临界速度以及运行安全性、平稳性等动力学性能的影响,主要研究结论如下:

(1) 转向架群配置高速货运动车组车辆的非线性临界速度在384km/h,若想获得更高的临界速度可适当降低一系定位刚度。

(2) 车辆非线性临界速度随着一系纵向定位刚度的增加先增大后减小,而随着一系横向定位刚度的增加整体呈现减小趋势。

(3) 随着一系纵向定位刚度的增加,各轮对脱轨系数以及轮重减载率变化趋势基本一致,但1、3位轮对脱轨系数较为接近,且大于2、4位轮对脱轨系数。

(4) 随着一系纵向定位刚度从1MN/m增加到50MN/m车辆横向平稳性指标有所增加,但对车辆垂向平稳性指标影响不明显;而随着一系横向定位刚度的增加,2位以及4位轮对的脱轨系数整体有所降低,但对车辆运行垂向平稳性指标或是横向平稳性指标影响均不明显。

参 考 文 献

- 1 钟文生,姚远,张红军.单节八轴机车转向架动力学研究.机械,2014,41(8):1~5,49 (Zhong W S, Yao Y, Zhang H J. The bogie structure and dynamics studies of the eight-axle locomotive. *Machinery*, 2014, 41(8):1~5, 49(in Chinese))
- 2 王开云,孟宏,翟婉明.“天梭”号电力机车参数优化及动力性能仿真分析.机车电传动,2003,6:5~8,12 (Wang K Y, Meng H, Zhai W M. Parameters optimization of "Tiansuo" electric locomotive and simulation & analysis of its dynamic performance. *Electric Drive for Locomotives*, 2003, 6:5~8, 12 (in Chinese))
- 3 李响,任尊松,徐宁.基于转向架悬挂参数与踏面锥度优化的高速车辆动力学性能分析.铁道学报,2018,40(3):39~44(Li X, Ren Z S, Xu N. Dynamic performance analysis of high-speed vehicle based on optimization of bogie suspension parameters and tread conicity. *Journal of the China Railway Society*, 2018, 40(3):39~44 (in Chinese))
- 4 潘迪夫,全柏达,杨松.CRH2悬挂刚度参数对车辆动力学性能的影响.物流工程与管理,2018,40(5):135~139,147(Pan D F, Quan B D, Yang S. The influence of suspension stiffness parameters on dynamic performance of CRH2. *Logistics Engineering and Management*, 2018, 40(5):135~139, 147 (in Chinese))
- 5 吕凯凯,王开云,张志和.200km/h八轴客运电力机车悬挂参数对运动稳定性影响.兰州交通大学学报,2015,34(6):139~142(Lv K K, Wang K Y, Zhang Z H. Effect of suspension parameters on running stability of 200km/h eight-axle passenger electric locomotive. *Journal of Lanzhou Jiaotong University*, 2015, 34(6):139~142 (in Chinese))
- 6 李嘉伟,王开云.200 km/h电力机车转向架一系悬挂设计分析.铁道机车车辆,2008,28(1):175~177(Li J W, Wang K Y. Design analysis of the primary suspension system for 200 km/h electric locomotive bogie. *Railway Locomotive & Car*, 2008, 28(1):175~177 (in Chinese))
- 7 刘延柱.多体系统动力学(第2版).北京:高等教育出版社,2014 (Li Y Z. Dynamics of multibody systems (Second edition). Beijing: Higher Education Press, 2014 (in Chinese))
- 8 翟婉明.车辆-轨道耦合动力学(第4版).北京:科学出版社,2015 (Zhai W M. Vehicle-track coupling dynamics (Fourth edition). Beijing: Science Press, 2015 (in Chinese))
- 9 GB5599-85,铁道车辆动力学性能评定和试验鉴定规范.北京:中国计划出版社,1985 (GB5599-85, Railway vehicles-specification dynamic performance accreditation test. Beijing: China Planning Publishing House, 1985 (in Chinese))
- 10 铁运[2008]28号,高速动车组整车试验规范.北京:中华人民共和国铁道部,2008 (Rail Transport [2008] No. 28, Testing of high-speed electric multiple unit on completion of construction. Beijing: Ministry of Railways, People's Republic of China, 2008(in Chinese))

EFFECT OF PRIMARY POSITIONING STIFFNESS ON VEHICLE DYNAMICS PERFORMANCE OF HIGH-SPEED FREIGHT EMU EQUIPPED WITH FOUR DOUBLE-AXLE BOGIES *

Wang Jiaxin¹ Zhang Weili² Chen Zaigang^{2†}

(1.CRRC Tangshan Co., LTD, Tangshan 063000, China)

(2.State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract In order to achieve a fast and efficient transportation capacity of China's railways for large, heavy and valuable goods, CRRC Tangshan Co., Ltd. developed a high-speed freight electric multiple units (EMU) equipped with four double-axle bogies. Based on the theory of multi-body system dynamics, this paper established a vehicle dynamics model of the high-speed freight EMU equipped with four double-axle bogies, and studied the influence of primary positioning stiffness on the nonlinear critical speed of the vehicle; At the same time, the influence of primary positioning stiffness on vehicle safety index and stationarity index were studied. The results showed that the nonlinear critical velocity firstly increases and then decreases with the increase of the primary longitudinal positioning stiffness, and monotonically decreases with the increase of the primary lateral positioning stiffness. The lateral stability index of the vehicle increases with the increase of the primary longitudinal positioning stiffness, while the vertical stability index is nearly unchanged. The primary lateral positioning stiffness of the vehicle has no significant effect on the vehicle stability index.

Key words bogie group, high-speed freight train, dynamic performance, safety, positioning stiffness

Received 6 August 2019, Revised 16 March 2020.

* The project supported by the National Key R&D Program of China (2017YFB1201300) and the National Natural Science Foundation of China (51775453)

† Corresponding author E-mail: zgchen@home.swjtu.edu.cn