

高速列车蛇行运动稳定性研究概述¹

刘伟涓^{1, 2}, 姜瑞金², 刘凤伟², 张良威²

(1. 西南交通大学机械工程学院, 四川成都 610031; 2. 中国中车长江车辆有限公司, 湖北武汉 430000)

摘要: 高速列车长期服役安全可靠是高铁建设的首要保证, 自激蛇行运动是轨道车辆所特有的一种失稳形式, 为了解决车辆的运动稳定性, 确保高速、安全行驶, 以高速列车蛇行失稳的理论研究方法为背景, 概述了蛇行失稳研究中的主要研究方法及其存在的不足, 对近期的研究热点方向进行了概述并对非光滑分岔、非对称运行稳定性等方向进行了展望。内容包括: 对于高速列车的确定性稳定性而言, 在不考虑车辆非线性特性, 一般可以采用特征根法、Routh-Hurwitz准则判定法、最小阻尼系数等方法进行分析; 当必须考虑轮轨接触以及悬挂系统的非线性特征时, 可以采用特征值变化法、QR算法+二分法、中心流形法、打靶法、延续算法等方法。对于车辆的随机稳定性而言, 可以采用随机非线性动力学Hamilton理论、蒙特卡洛法、半隐式的Milstein随机数值模拟、小数据量等方法对随机稳定性、随机分岔以及分岔类型进行分析。随机稳定性、随机分岔由于能够考虑自身结构参数激励、轮轨接触不平顺激励, 能得到更接近真实运行条件下的失稳临界速度, 这方面的理论研究和试验研究逐渐得到研究人员的关注, 并成为高速列车蛇行失稳研究的热点方向。

关键词: 车辆工程; 高速列车; 车辆动力学; 蛇行稳定性; 随机稳定性

中图分类号:U260.11 文献标志码: A

Nonlinear stochastic optimal control of wheelset system's stabilization

LIU Weiwei^{1,2}, JIANG Ruijin², LIU Fengwei²; ZHANG Liangwei²

(1.School of Mechanical Engineering ,Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China; 2.CRRC YANGZE Co,Ltd, Wuhan, Hubei 430000, China;)

Abstract:Hunting stability is one of the key performances that greatly affecting the long-term operation safety and overseas expansion of Chinese high speed trains. This paper summarizes the main research methods of hunting instability of high speed trains.The research of non-smooth bifurcation and asymmetric operation stability is prospected.Without considering the nonlinear characteristics of the vehicle ,the characteristic root method, the routh-hurwitz criterion method and the minimum damping coefficient can be used to analyze the certainty stability of high speed trains.When the wheel-rail contact and the nonlinear characteristics of the suspension system must be considered, the method of eigenvalue change, QR algorithm, binary method, center manifold method, shooting method and continuation algorithm can be used.In

收稿日期: 2017-11-23; 修回日期: 2018-03-12; 责任编辑: 张 军

基金项目: 国家自然科学基金(51705432, 51705431); 博士后科学基金(2016T90709, 2015M582565, 2017M612935); 牵引动力国家重点实验室开放课题(TPL14018)

第一作者简介: 刘伟涓(1984-)男, 四川自贡人, 讲师, 博士, 主要从事高速列车系统动力学方面的研究。

E-mail: liuweimei1592@163.com

刘伟涓, 姜瑞金, 刘凤伟, 等. 高速列车蛇行运动稳定性研究概述[J]. 高速列车蛇行运动稳定性研究概述, 2018, 39(3):

LIU Weiwei, JIANG Ruijin, LIU Fengwei, et al . Nonlinear stochastic optimal control of wheelset system' s stabilization[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2018, 39(3):

addition, stochastic nonlinear dynamics hamilton theory, monte carlo method, semi-implicit milstein stochastic numerical simulation and small data quantity can be used to analyze random stability and random bifurcation. Generally speaking, stochastic stability and random bifurcation can get closer to the real conditions of the critical speed of instability, and this aspect of theoretical research and experimental research have been paid more attention by researchers, and this research on the hunting stability of high speed trains has become a hot topic.

Keywords: vehicle engineering; high speed train; vehicle dynamic; hunting stability; stochastic stability

高速列车长期服役安全可靠性是高铁建设以及推广海外市场的首要保证,运动稳定性是这一保证中最为关键的问题。一旦列车出现蛇行失稳,运行品质将急剧恶化,乘坐舒适性降低,并导致轮轨间强烈的相互作用,引起严重的轮轨磨耗,对线路造成严重危害,甚至引起脱轨重大事故^[1-2]。研究人员对于车辆蛇行运动的深入研究,为列车的设计时速和运行速度持续提高和安全运行提供了重要保障,这包括了线性分析、非线性分析、数值分析、滚振试验分析,线路试验分析方法^[3-11],如图1所示。对于线性理论分析包括:特征根法、Routh-Hurwitz准则判定法、最小阻尼系数等来判定稳定性。在考虑轮轨接触几何非线性、蠕滑非线性,各种悬挂、结构非线性后,发展或应用了诸如特征值变化法、QR算法+二分法、中心流形法、打靶法、延续算法等非线性理论方法。在滚振、线路试验中,根据不同的理论基础和各国经验制定出了多种测试标准,但主要侧重于构架横向加速度、轮轨横向力、轮对横向加速度中的某个方面^[12-14]。诸如:UIC515构架横向加速度分析法、TSI L84构架横向加速度分析法、UIC518轮轨横向导向力分析法、国家标准《200km/h及以上速度级电动车组动力学性能试验鉴定方法及评定标准》参考UIC515而制定。



图1 动车组蛇行失稳滚振试验

Fig.1 High speed train rolling vibration test hunting instability

1 高速列车确定性稳定性与分岔

蛇行运动是一种自激行为并取决于振动体本身的特性,是车辆系统自身的固有属性。车辆系统运动方程 $X = f(x, \dot{x}, \dots, v)$, 当速度确定后,系统的稳定性也随之确定。因此,采用传统车辆动力学方法研究车辆蛇行运动稳定性只针对车辆系统进行分析。

研究表明,车辆系统稳定性不仅取决于自身结构参数,而且与运行的线路条件有直接关系^[15-18]。轨道的变形和不平顺激励会引起车辆的振动,而车辆的振动经由轮轨界面又会引起轨道结构振动加剧,反过来又助长了轨道变形激励,这种互反馈作用将使车辆与轨道系统处于特定的耦合振动状态之中。

在国内外经典车辆动力学对稳定性的研究基础上,基于车辆/轨道耦合动力学理论,运用快速显式数值积分方法,对车辆在弹性轨道上运行时非线性稳定性的临界速度进行仿真分析研究^[19]。

通过与传统轨道横向刚度无穷大的车辆动力学模型计算所得临界速度比较,后者临界速度明显偏高,如图2所示。

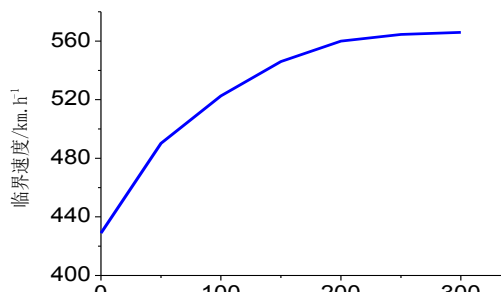


图2 扣件横向刚度与临界速度变化关系

Fig.2 Relationship between lateral stiffness and critical speed of fastener

在分析货运车辆蛇行稳定性中,考虑轨道离散支承模型具有重要意义。现有研究表明,考虑粘弹性轨道模型计算得出的蛇行失稳临界速度要低于不考虑轨道模型即“刚性”轨道之值,一般低于10%。另外对轨道车辆外部结构参数,如轨距、轨底坡、扣件横向刚度、钢轨弹性变形等研究表明,对车辆运行失稳临界速度均具有重要影响。

以上分析反映出的共同规律是:采用耦合模型、轨道离散支承模型等,所计算得出的车辆临界速度均较传统模型低。究其原因,主要是因为在这些模型中,轨道弹性阻尼结构体系参与了系统的振动,钢轨具有三向振动自由度,两侧钢轨对轮对的横向和垂向约束能力相对传统模型中固定钢轨来说更低,因而轮对更易出现蛇行失稳,致使车辆临界速度降低。这也表明:车辆系统稳定性不仅取决于车辆自身结构参数,而且还和运行的线路条件有直接关系,同时也预示线路不平顺激励对车辆失稳临界速度有重要影响。

值得注意的是,现有确定临界速度的方法是:在轨道上加一段随机不平顺,使整个系统的振动被激发,然后使车辆系统在平直无激励轨道上运行,当系统响应不再衰减到平衡位置,而是趋于稳定极限环时,此时速度即为车辆临界速度,据此可通过振动系统某一个刚体自由度时间历程和相平面图对车辆临界速度进行分析和判定,如图3所示。可以看出,基于上述判断方法,轨道激励只是作为激发系统振动手段,而不能考虑带有轨道激励时系统稳定性情况,因为当系统能量激发后,须去掉激励作用才能判断系统是否稳定。

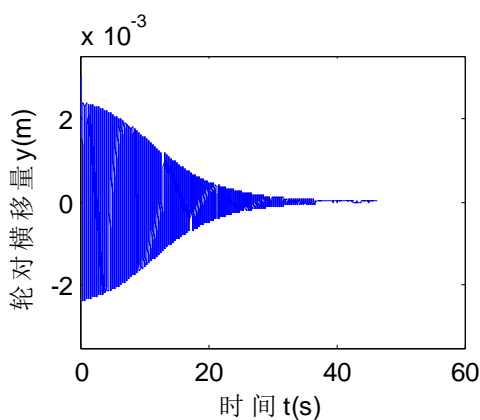


图3 动车组轮对蛇行稳定示意图

Fig.3 Schematic diagram of wheelset hunting stability

研究表明,轨道车辆失稳临界速度和轨道激励有直接关系。其中,车辆横向运动稳定性丧失,

本质上是由于系统自激产生的能量以及外部输入的能量大于系统内部阻尼所消耗的能量,导致振动能量逐渐积聚,而使车辆产生横向运动与摇头运动,最终表现出蛇行失稳运动形态。能量必须以某种形式输入系统才能激发自激振动,对于不受外激的自由轮对系统,其对称的质量矩阵不影响能量变化,故输入能量的变化只能归因于蠕滑力的综合矢量,而蠕滑力能量组成为

$$-\frac{1}{\pi} \int_0^T \dot{\mathbf{u}}^T \mathbf{f}_s dt = \left(2f_{22} y_{w0}^2 \frac{W}{v} + 2f_{11} b^2 \psi_{w0}^2 \frac{W}{v} \right) + \left(-2f_{22} y_{w0} \psi_{w0} - 2f_{11} \frac{\lambda_e b}{r_0} y_{w0} \psi_{w0} \right) \quad (1)$$

蠕滑力矢量中包含阻尼部分和刚度部分,蠕滑力阻尼项 $(2f_{22} y_{w0}^2 \frac{W}{v} + 2f_{11} b^2 \psi_{w0}^2 \frac{W}{v})$ 为能量消耗,刚度项 $(-2f_{22} y_{w0} \psi_{w0} - 2f_{11} \frac{\lambda_e b}{r_0} y_{w0} \psi_{w0})$ 为能量输入。由于非对称耦合刚度产生能量输入能力不变,而能量输出能力与速度成反比,随着速度增加,能量输出能力逐渐减弱,当二者达到相互抵消时即为临界速度,速度再继续增加,系统将产生富裕能量,该能量会转化为动能和势能并引起周期蛇行运动。当考虑外部轨道不平顺激励给轮对系统提供能量输入时:

$$-\frac{1}{\pi} \int_0^T \dot{\mathbf{u}}^T \mathbf{f}_s dt = \left(2f_{22} y_{w0}^2 \frac{W}{v} + 2f_{11} b^2 \psi_{w0}^2 \frac{W}{v} \right) + \left(-2f_{22} y_{w0} \psi_{w0} - 2f_{11} \frac{\lambda_e b}{r_0} y_{w0} \psi_{w0} \right) + E \quad (2)$$

为了抵消轨道不平顺激励输入的能量,只能降低蠕滑力阻尼项中的速度来增加能量消耗能力,以确保系统稳定性。这也表明轨道车辆失稳临界速度和轨道激励有直接关系。

新近研究和铁路实际运营表明,车辆运行监测失稳速度、数值仿真、滚振台试验失稳速度三者有较大差异,这也带来了对车辆结构设计、真实失稳临界速度估计的困难。

对于运行监测而言,各国对稳定性的评判标准不统一,美国FRA车辆安全评价标准采用转向架横向加速度在0~10 Hz内2 s滑动窗有效值大于3.92 m²/s来识别车辆失稳;澳大利亚采用横向失稳定义为在0-10 Hz 滤波情况下,横向加速度至少持续超过5 s振荡,横向加速度平均值大于3.43 m²/s,最大横向加速度超过4.91 m²/s。我国参照欧洲标准,规定转向架构架加速度在0~10 Hz 滤波下,峰值有连续6次以上达到或超过极限值8~10 m²/s来识别车辆失稳。从这些不同评价标准角度来看,对同一车辆也会得到不同失稳临界速度。而在线监测的理论基础在于,系统失稳后,表征轮对、构架位移的都有准等幅运动失稳形式,如图4所示,以及长期的运动分岔行为形式,如图5所示。

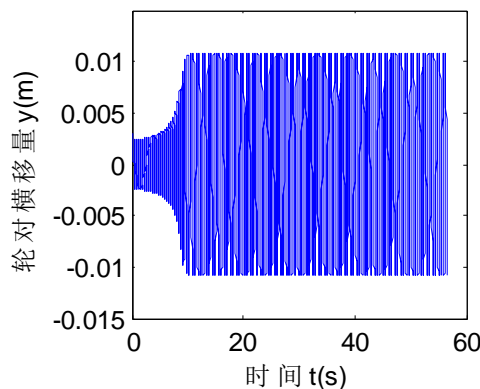


图4 轮对失稳等幅运动示意图

Fig.4 Sketch of wheelset with constant amplitude motion

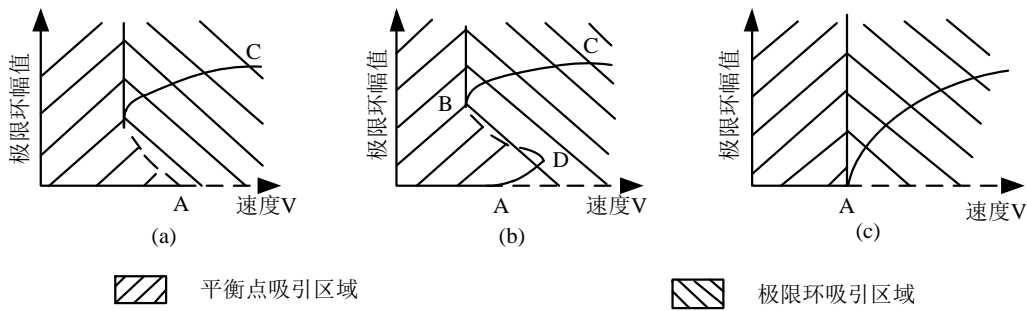


图5 轨道车辆系统典型分岔图
Fig.5 Typical bifurcation diagram of rail vehicle system

轨道车辆是典型的非线性系统 $X = f(x, \dot{x}, \dots, v)$ ，构架横向失稳后加速度输出具有 $a_t = -y_0 \omega_t \sin(\omega_t t + \beta)$ 近似关系，据此对振动波形识别可判断系统是否失稳，另外再结合各国实际运营经验，便制定了相应实时监测评价标准。根据我国现有高铁运营经验，列车监测系统时有发生失稳误报停车事故，这对运营调控、乘客乘坐体验均带来重要影响。另外值得注意的是，在原车辆系统 $X = f(x, \dot{x}, \dots, v)$ 中，由于没能考虑外部运行条件影响，故得出的加速度输出形式 $a_t = -y_0 \omega_t \sin(\omega_t t + \beta)$ 存在一定不足，这势必导致监测评判的失稳速度存在不准确，若监测标准太严会产生误报可能，监测标准太松又达不到控制安全目的。所以，现在对轨道车辆蛇行运动研究方向更多的是基于随机动力学理论的运动稳定性和分岔研究。

2 高速列车随机稳定性与分岔

以往研究表明，对于轨道车辆数值仿真、滚振试验方法、理论求解，均是基于对确定性理论的应用，而该理论的基本假设前提是对无扰或微扰运动稳定性的求解，对于铁道车辆系统而言，可以使用线性特征值等法，得到系统线性临界速度，也可利用描述函数法、一次近似方程雅可比矩阵特征值法、直接数值积分等方法，对车辆系统非线性临界速度进行求解^[3-11]。值得注意的是，在这些求解方法中，不能考虑外部扰动作用，或只能把外部扰动作为初始激励，再通过去掉激励后考察系统收敛情况来判定其稳定性，然而轨道车辆线路运行时始终具有随机轨道不平顺激励，这就需要把车辆稳定性的分析从确定性框架推广到随机系统框架来进行。

在结合相关试验和理论研究基础表明，车辆蛇行失稳不只是系统固有属性并仅取决于自身结构参数，而且与运行线路条件有直接关系，其中轨道不平顺激励具有重要影响。现在应用较多的有，随机非线性动力学Hamilton理论、蒙特卡洛法、半隐式的Milstein随机数值模拟、小数据量方法，对随机稳定性、失稳后的分岔类型从理论分析、滚振实验、线路实验方面进行了研究^[15-18]。例如，对于动车组随机稳定性分析而言，如图6所示，表示车辆系统的联合概率密度随不同运行速度的变化情况，横坐标表示系统振动总能量，纵坐标表示系统具有该能量的概率大小。当速度为20 m/s、40 m/s时，系统的主要能量集中于零，并有较大概率，这表明此时的车辆在运行时，系统的振动会逐渐收敛于平衡位置，不会出现蛇行失稳；当速度为60 m/s、80 m/s时，可以看出此时的图形出现了火山口形状，具有稳定状态的零值在火山口中心底部，而附近具有振动能量的位置具有较大概率，这表明车辆系统在运行过程中，随着运行时间的增加，系统的振动会具有某一能量，而不会收敛于平衡位置，系统将出现蛇行失稳。如果把上述的运行速度进行连续变化，即可看出联合概率密度在某些速度点上发生突变，即发生了分岔行为，如图7所示，分别有随机D-分岔和随机P-分岔两个分岔点。

图6与图3、4的运动稳定性相较而言，图3在受到扰动后，随着运行时间的延长，将收敛于平衡位置，而图4在受到扰动后，随着运行时间的延长，将处于等幅运动状态。图5与图7的运动分岔相较而言，前者出现的超临界分岔或亚临界分岔是确定的，而后者的随机D-分岔和随机P-分岔的发生

是概率意义上的。总体而言，图3、4、5的确定性分岔和稳定性特征它只能反应系统自身的固有属性，而没能把系统与运行环境的相互作用体现出来，而图6、7却可以。这是上述两种不同蛇行失稳运动分析的本质区别。

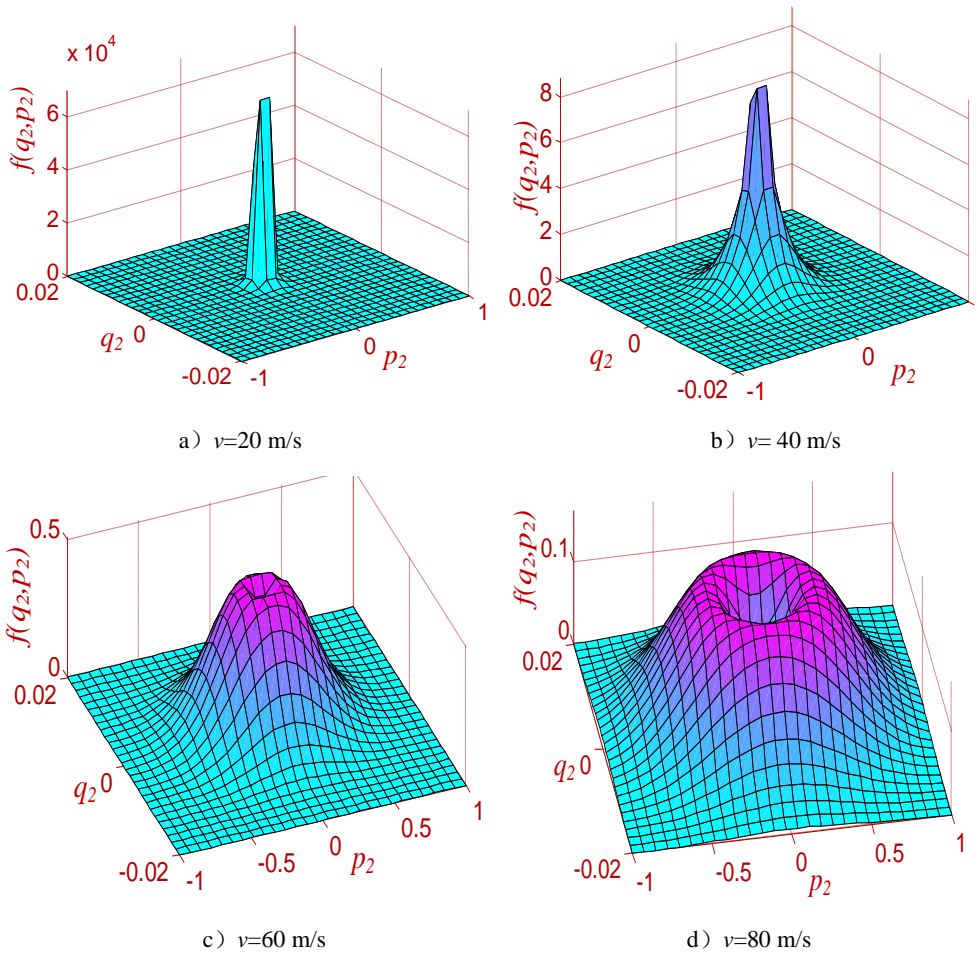


图6 轨道车辆蛇行运动随机稳定性
Fig.6 Rail vehicle hunting stochastic stability

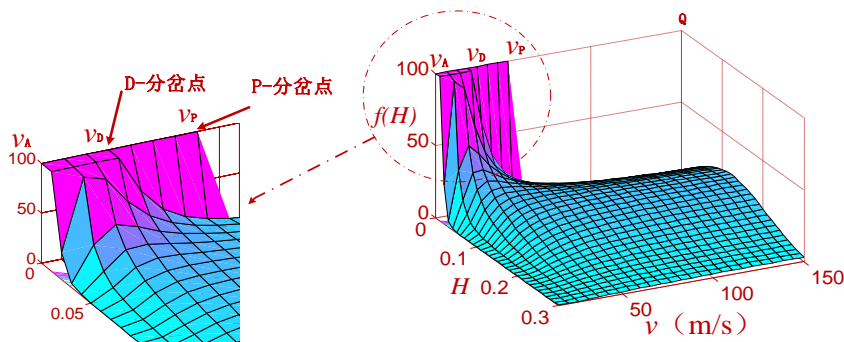


图7 轨道车辆蛇行运动分岔
Fig.7 Rail vehicle hunting bifurcation

3 结论

自激蛇行运动是轨道车辆所独有的一种失稳形式，为了确保车辆的高速、安全行驶，运动的稳定性这是首先需要确保的问题。文章概述了高速列车蛇行失稳现阶段的一些主要研究方法及其不足

之处,并对近期研究的随机稳定性、随机分岔这个研究热点方向进行了简述。

在以往确定性框架下进行的分析中,均是抛开了列车实际运行中最为重要的轨道不平顺激励这个因素,而单独考察车辆系统运行性能。这势必使求解得的蛇行失稳速度与线路实际运行工况具有较大差异。在滚振、线路测试中,由于受确定性框架理论分析的局限,所以只能依据大量重复性试验和各国运营经验来制定出具体的规范标准。现在的一个研究热点方向是在随机体系下进行蛇行稳定性、分岔的理论分析和相应的试验方法制定。

另外,轨道车辆轮轨间存在自由间隔,运行时有较大轮轨碰撞力,结构间有止档、干摩擦等现象,对于此类非光滑的处理现在大都是进行分段线性的光滑处理,而实际情况却是非光滑的,所以对于非光滑的稳定性、分岔研究也具有大量的工作可以进行。同时,在车辆系统中具有结构布置、安装、悬挂性能误差等因素影响,系统很难达到前后左右的绝对对称,而现在大都是基于完全对称的假设来进行蛇行稳定性分析,所以对于非对称稳定性、分岔的研究也是一个热点方向。

参考文献/References:

- [1] 关庆华,曾京. 轮轨横向碰撞引起的脱轨研究[J]. 振动与冲击,2009,28(12):38-42.
GUAN Qinghua, ZENG Jing. Study on derailment induced by lateral impact between wheel and rail[J]. Journal of Vibration and Shock, 2009,28(12):38-42.
- [2] 凌亮,肖新标,吴磊,等. 地震波频谱特性对高速列车动态脱轨行为的影响[J]. 工程力学,2013,30(1): 384-393.
LING Liang, XIAO Xinbiao, WU Lei, et al. Effect of spectrum characteristics of seismic wave on derailment of high-speed train[J]. Engineering Mechanics, 2013,30(1): 384-393.
- [3] WICKENS A H. The dynamic stability of railway vehicle wheelsets and bogies having profiled wheels[J]. International Journal of Solids and Structures, 1965, 1(3): 319-341.
- [4] WAGNER U. Nonlinear dynamic behavior of a railway wheelset[J]. Vehicle System Dynamics, 47(5): 627-640.
- [5] TANABE M, WAKUI H, OKUDA H, et al. Dynamics interaction analysis of an unlimited number of Shinkansen cars running on the railway track[J]. Vehicle System Dynamics, 2002, 40:91-106.
- [6] H Glickenstein. SNCF and alstom set new world speed record. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2007, 2(3):62-65.
- [7] Xiao-Hui Zeng, Han Wu, Jiang Lai, Hong-Zhi Sheng. Influences of aerodynamic loads on hunting stability of high-speed railway vehicles and parameter studies[J]. Acta Mechanica Sinica, 2014, 30(6): 889-900.
- [8] F. Dorigatti, M. Sterling, C. J. Baker, A. D. Quinn. Crosswind effects on the stability of a model passenger train-A comparison of static and moving experiments[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2015, 138: 36-51.
- [9] TRUE H. Multiple attractors and critical parameters and how to find them numerically: the right, the wrong and the gambling way[J]. Vehicle System Dynamics, 2013, 51(3):443-459.
- [10] Yung-Chang Cheng, Sen-Yung Lee. Stability analysis of High-Speed Railway vehicle using half-car model. International Journal of Heavy Vehicle Systems, 2010, 17: 139-58.
- [11] Yung-Chang Cheng, Sen-Yung Lee, Hsing-Hao Chen. Modeling and nonlinear hunting stability analysis of high-speed railway vehicle moving on curved tracks. Journal of Sound and Vibration, 2009, 324: 139-60.
- [12] 张卫华,黄丽湘,马启文,等. 机车车辆动力性能动态模拟[J]. 机械工程学报, 2007, 43(12):114-119.
ZHANG Weihua, HUANG Lixiang, Ma Qiwen, et al. Dynamic simulation on dynamic characteristics of railway vehicle[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(12):114-119.
- [13] Benedetto Allotta, Luca Pugi, Monica Malvezzi. A scaled roller rig for high-speed vehicles[J]. Vehicle System Dynamics, 2010, 48(S1):3-18.
- [14] BOSSO N, ZAMPIERI N. Real-time implementation of a traction control algorithm on a scaled roller rig[J]. Vehicle System Dynamics, 2013, 51(4):517-541.
- [15] Hao Dong, Jing Zeng, JianHua Xie. Bifurcation instability forms of high speed railway vehicles[J]. SCIENCE CHINA Technological Sciences, 2013, 56(7): 1685-1696.
- [16] 张波, 曾京, 刘伟渭. Gauss 白噪声激励下悬挂轮对系统的随机稳定性研究[J]. 振动与冲击, 2015, 34(19):49-56.
ZHANG Bo, ZENG Jing, LIU Weiwei. Stochastic stability of a suspended wheelset system under gauss white noise[J]. Journal of Vibration

and Shock, 2015, 34(19):49-56.

- [17] 刘伟渭,戴焕云,刘转华,等.弹性约束轮对系统的随机 Hopf 分岔研究[J].铁道学报,2013, 35(10):38-45.

LIU Weiwei, DAI Huanyun, LIU Zhuanhua, et al. Research on stochastic Hopf bifurcation of elastic constraint wheelset system[J]. Journal of the China Railway Society, 2013, 35(10):38-45.

- [18] Xue-Jun Gao, Ying-Hui Li, Yuan Yue. The "resultant bifurcation diagram" method and its application to bifurcation behaviors of a symmetric railway bogie system. .Nonlinear Dynamics, 2012, 70: 363-80.

- [19] 王开云,刘鹏飞.铁路货车通过曲线轨道时的非线性运动稳定性研究,中国铁道科学,2011,32(2):85-89.

WANG Kaiyun, LIU Pengfei. Research on the nonlinear hunting stability of railway freight car on curved track [J]. China Railway Science, 2011, 32(2):85-89.