DOI: 10.3901/JME.2020.08.182

车轮扁疤所引起的车辆系统振动特性分析*

刘国云^{1,2} 曾 京¹ 邬平波¹ 朱海燕³ 张 波²

(1. 西南交通大学牵引动力国家重点实验室 成都 610031;

2. 大功率交流传动电力机车系统集成国家重点实验室 株洲 412001;

3. 华东交通大学机电与车辆工程学院 南昌 330013)

摘要: 车轮扁疤所诱发的轮对弹性变形会导致车辆系统部件振动加速度增大,但目前相关研究主要采取刚体动力学模型。为更准确研究车轮扁疤对高速车辆振动特性的影响,在目前成熟且广泛已知的车辆-轨道耦合模型和车辆系统刚柔耦合模型的基础上,综合考虑车辆主要部件的弹性振动和轨道弹性振动的影响,建立改进的车辆-轨道动力学模型。结果表明,在扁疤作用下,轮对弹性变形对轮轨垂向力影响甚微,但对轴箱端盖垂向振动响应影响很大;扁疤所产生的冲击载荷经过转向架或者钢轨的传递作用,会导致同轴另一侧以及转向架同侧处的轮轨力产生小幅值波动;扁疤所在轮对的左右两个轴箱端盖振动加速度要远大于同一转向架的其他两处;在低速时,车轮扁疤对构架端部垂向振动加速度也有着不可忽视的影响。提出的研究成果揭示了车轮扁疤作用下车辆-轨道系统弹性变形的重要性,对车轮状态监控也具有重要意义。

关键词: 高速车辆; 车轮扁疤; 振动; 刚柔耦合; 动力学

中图分类号: U211

Vibration Characteristic Analysis of Vehicle Systems Due to Wheel Flat

LIU Guoyun^{1,2} ZENG Jing¹ WU Pingbo¹ ZHU Haiyan³ ZHANG Bo²

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

2. State Key Laboratory of Heavy Duty AC Drive Electric Locomotive Systems Integration, Zhuzhou 412001;

3. School of Mechatronics & Vehicle Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013)

Abstract: The elastic deformation of wheelset caused by wheel flat increases the vibration acceleration of vehicle components, but the rigid body dynamics model is mainly adopted in the the related research at present. In order to study the vibration characteristic of high speed vehicles due to wheel flat more accurately, based on the mature and widely known vehicle-track coupling model and the rigid-flexible coupling model of vehicle system, a corresponding analytical model is improved, where the influences of elastic deformation of main vehicle parts and track are comprehensively considered. The results indicate that the wheel elastic deformation has little effect on wheel/rail vertical force, but has a great influence on axle-box cover vertical vibration in the presence of wheel flat. Through the transfer of bogie or rail, the impact load generated by wheel flat can cause small fluctuation of wheel-rail force on the two wheels, which are on the same wheelset and at the same side of the bogie respectively. Due to wheel flat, the two axle-box cover vibration acceleration at the wheelset with wheel flat is greater than the other two of the same bogie. What is more, the influence of wheel flat on bogie frame end vertical vibration cannot be ignored at low speed. The research results reveal the importance of the elastic deformation of vehicle-track system due to wheel flat, and have great significance for wheelset condition monitoring.

Key words: high-speed vehicle; wheel flat; vibration; rigid-flexible coupling; dynamics

0 前言

铁路是一种高效运输工具,其牵引与制动依靠轮轨之间的滚动接触来实现。但遇到下雨或者结霜天气时,潮湿的钢轨会引起车轮发生打滑,进而造

成表面擦伤^[1]。尽管目前各种类型的车辆均采用了防空转和防滑技术,但仍会出现车轮擦伤,因此,在世界铁路领域里车轮擦伤已成为难以解决的主要关注问题^[2-4]。在滚动过程中,它会导致轮轨作用力出现周期性冲击,不仅造成轮轨系统的严重损坏,还会引起剧烈的轮轨振动噪声^[5-6]。为了控制车轮扁疤对铁路车辆安全运行的影响,相关的维修标准在世界各国的铁路部门中也应运而生^[7]。

* 国家重点研发计划(2016YFB1200505)和国家自然科学基金(51665015)资助项目。20190417 收到初稿,20190517 收到修改稿

为了探讨车轮扁疤的冲击作用, 很多学者进行了大量的相关理论和试验研究。考虑到扁疤冲击定位的难度, NEWTON 等^[8]采用等效成钢轨压痕的方法, 分析了速度和轴重对扁疤冲击力的影响, 并建立 3 种理论模型, 比较分析了数值结果与试验之间的差异。BIAN 等^[9]建立了基于 ANSYS 的三维轮轨接触模型, 研究了冲击载荷随扁疤长度变化的规律。采用有限元法搭建车辆-轨道耦合系统模型。DUKKIPATI 等^[10]分析了车速、扁疤尺寸和轴重等因素对扁疤冲击的影响。MARTÍNEZ 等^[11]建立了考虑轮轨弹性的车辆-轨道模型, 研究了扁疤作用下的车轴应力响应。为了迅速计算扁疤冲击力, BOGDEVICIUS 等^[12]基于假设条件定义了扁疤冲击力的解析表达式。基于动力学原理, 翟婉明^[13]从理论和仿真计算角度全面分析了车轮扁疤的动力学效应, 并针对扁疤长度限值问题进行了探讨。王建斌等^[14]引入简化的扁疤冲击力计算公式, 研究了扁疤冲击时车轴危险截面的应力谱。王忆佳等^[3]基于车轮半径变化法, 仿真分析了高速列车车轮的新、旧两种扁疤。凌亮等^[4]分析了车轮擦伤工况下的轮对垂向振动加速度和轮轨作用面上的法向力, 并由轮轨垂向力安全限值确定了高速车轮擦伤维修界限。基于考虑车辆-轨道相互作用的轮轨冲击噪声预测模型, 杨新文等^[15]计算分析了不同线路上车轮扁疤所引起的轮轨噪声特征。

从上述文献回顾可以看出, 目前关于车轮扁疤对车辆系统振动影响的研究主要是采取刚体动力学模型来分析, 如文献[3-4]和[7]。而实际上车轮滚过扁疤位置时往往会激发出轮对的弹性变形, 导致车辆系统部件的振动加速度进一步增大。因此, 为了准确分析车轮扁疤下的车辆系统振动特性, 本文在目前成熟的车辆-轨道耦合模型和车辆系统刚柔耦合模型的基础上, 综合考虑了轨道弹性振动和车辆主要部件弹性振动的影响, 对于车辆模型, 采用了刚柔耦合动力学理论来模拟轮对、轴箱、构架和车体; 在轨道系统中, 钢轨是采用梁模型来模拟, 轨道板的正则模态通过三维实体有限元计算得到, 其动态响应采用模态叠加方法进行模拟^[16]。利用所改进的分析模型, 研究了旧扁疤对高速车辆系统振动的影响规律, 包括不同位置的构架端部以及轴箱端盖的振动加速度, 以便对轮对状态监控提供一些帮助。

1 车轮扁疤对车辆系统振动的影响

为了分析车轮扁疤对高速列车振动响应的影

响, 在牵引动力国家重点实验室的滚动振动试验台上进行了扁疤车轮的整车动力学试验, 如图 1 所示。其中扁疤设置在第 1 位轮对的左轮上, 如图 2 所示。从图 2b 可以看出, 车轮扁疤在名义滚动圆处的深度约为 0.04 mm, 长度约为 70 mm。在试验过程中, 为了得到轴箱和构架端部的振动响应, 在相应位置处分别布置了加速度传感器, 加速度测点如图 1、3 所示。

图 1 扁疤车轮下的整车动力学试验

(a) 车轮扁疤

(b) 名义滚动圆处车轮不圆度

图 2 车轮扁疤示意图

图 3 构架加速度测点示意图

图4是速度为80 km/h时所测得车辆振动响应结果。从图4可以看出,由于第1位轮对左侧处的扁疤所产生的周期性冲击力作用,第1位轮对左侧和右侧处的轴箱振动加速度在时域图上都表现出明显的周期性冲击,且幅值大于第2位轮对右侧轴箱。同时扁疤冲击力也导致了构架端部的垂向振动加速度明显增大,包括扁疤轮对的左右上方构架端部和扁疤车轮同侧处的构架端部。其中,由于试验中同时考虑了轨道不平顺的作用,加上扁疤尺寸很小(轻微擦伤),扁疤在构架右侧端部所产生的冲击会被激励振动信号湮没,故在构架右侧端部加速度响应中未见明显冲击,如图4b所示。因此,扁疤作用下将导致车辆系统部件的振动响应发生改变,如果弄清扁疤激励下的振动响应特征,这对车轮的状态监控有着非常重要的意义。

图4 扁疤激励下的车辆振动响应测试结果

2 动力学模型

2.1 车辆系统刚柔耦合动力学模型

在传统的动力学研究中,一般采用刚体来模拟惯性部件,通常是合理和经济的。但当车轮出现失圆时,比如扁疤,往往会将轮对弹性变形激发出来。因此,为更准确模拟扁疤工况下车辆系统的振动响应,需要建立刚柔耦合动力学模型,考

虑车辆系统部件的弹性变形。本文车辆系统刚柔耦合动力学模型中主要部件的部分振型及频率如图5~7所示。

图5 轮对部分振型

图6 轴箱部分振型

图7 构架部分振型

2.2 轨道系统动力学模型

本文所考虑的轨道为CRTSI型板式无砟轨道,包括钢轨、扣件、轨道板以及CA砂浆层组成。其中钢轨的动态行为采用Timoshenko梁模型来模拟,包括垂向、横向和扭转振动;轨道板的正则模式通过三维实体有限元计算得到,其动态响应采用模式叠加方法进行模拟,钢轨扣件和砂浆层用周期性离散的黏弹性单元代替,钢轨的运动方程建立见文献[17],轨道板的运动方程见文献[18]。

2.3 动力学模型改进的实现

由于高速车辆的轮轨系统伤损等非常容易引起车辆的高频振动,在SIMPACK中建立考虑轮对、轴箱、构架和车体部件为弹性的整车模型。而轨道动力学模型是通过Matlab建立的,其中的钢轨视为连续弹性离散点支承的无限Timoshenko梁,而轨道板采用模式叠加法进行模拟。最后利用Matlab与

SIMPACK 的联合仿真接口模块, 将轨道模型和整车模型联系起来, 实现了动力学模型的改进, 如图 8 所示^[19]。此种迭代方式求解被称为全过程迭代法^[20], 即首先根据车辆系统的动力学方程在 SIMPACK 软件中得到第 i 时刻的车辆动力响应, 然后将所得到的轮轨力及其纵向位置输入到 Matlab 中的轨道系统里, 进一步得到轨道位移, 接下来将轨道位移数据回传给 SIMPACK, 在轨道不平顺的基础上, 叠加轨道位移生成新的激励后对车辆系统方程进行第 $i+1$ 时刻的求解, 如此反复^[21]。

图 8 车辆-轨道模型

2.4 轨道子系统数值积分方法

对于轨道子系统, 其动力学方程的数值求解采用翟婉明提出的新型预测-校正积分法进行求解, 具体的求解思路见文献[17]。

2.5 车轮旧扁疤数学模型

为了研究车轮旧扁疤的动力学效应, 相关学者根据其几何外形已提出了相关的数学模型。在理想情况下, 当车轮刚发生滑行擦伤时, 擦伤处的初始形状与圆周弦线类似, 称为新扁疤。但在实际运行过程中, 车轮新擦伤棱角会很快被磨圆而形成旧扁疤。

扁疤不平顺公式为

$$f = 0.5D_f \left[1 - \cos\left(\frac{2\pi x}{l_f}\right) \right] \quad (1)$$

式中, x 为车轮圆周的弧长; D_f 为旧扁疤的深度; l_f 为旧扁疤长度。当扁疤深度 D_f 不能准确得到时, 可以通过式(2)估算得到

$$D_f = \frac{l_f^2}{16R_w} \quad (2)$$

式中, R_w 为车轮的名义滚动圆半径。

3 仿真结果分析

3.1 扁疤工况下钢轨弹性振动对振动响应的影响

本节利用所建立的车辆系统刚柔耦合动力学模型(简称模型 1)以及所改进的模型(简称模型 2), 分析了扁疤工况下钢轨弹性振动对车辆系统动态响应

的影响, 其中模型 2 能够考虑钢轨的弹性振动。图 9 为两种计算模型下车轮以速度 80 km/h 滚过旧扁疤时轮轨垂向力以及轴箱端盖处垂向振动加速度的时间历程响应对比结果。从图 9 可以看出, 对于长度为 40 mm, 深度为 0.4 mm 的旧扁疤, 采用模型 1 所得到的轮轨力和轴箱垂向振动加速度均要小于采用模型 2 的计算结果; 从图 9a 可以看出, 两种模型中均出现了轮轨接触分离的现象, 而在模型 2 中还出现了二次分离现象; 另外, 在模型 2 中, 轮轨力从 0 急剧增加到最大值的时刻要先于模型 1; 从图 9b 可以看出, 对于轴箱垂向振动加速度, 虽然模型 1 的轮轨力波动时间更长, 但在模型 2 中轴箱加速度却由更多的波峰和波谷组成, 且波动时间更长, 这是由于模型 2 中考虑了钢轨的振动所导致的。

图 9 钢轨弹性振动对车辆系统响应的影响

3.2 扁疤工况下轮对弹性变形对振动响应的影响

采用所建立的改进模型, 分析了轮对车轴弹性变形对轮轨力以及车辆振动响应的影响, 其中的车辆速度为 80 km/h, 仿真结果如图 10 所示。从图 10a 可以看出, 两条曲线变化趋势及幅值基本保持一致, 因此轮对弹性变形对轮轨垂向力影响甚微。根据图 10b 的结果, 考虑轮对弹性变形后, 轴箱端盖的垂向振动加速度幅值变得更大, 波动时间变得越长, 值得注意的是, 当不考虑轮对弹性变形时, 在轮轨出现分离的这段时间内, 轴箱振动加速度幅值基本保持不变, 因此也能够从轴箱端盖振动加速度时域

图上辨认出轮轨分离时刻。从图 10c 可以看出, 两种情况下构架端部振动加速度的变化趋势是一致的, 但当考虑轮对弹性变形后, 构架振动加速度在二次分离后出现了较大的波动。

图 10 扁疤工况下轮对弹性变形对车辆系统振动的影响

3.3 扁疤冲击下不同位置处振动响应对比

图 11 为车轮以 80 km/h 的速度滚过旧扁疤时车辆系统不同位置处的振动响应结果。从图 11a 可以看出, 扁疤在 1 位右轮所产的冲击载荷经过转向架或者钢轨的传递作用, 导致 1 位左轮和 2 位右轮的轮轨力也产生了波动, 但波动幅值较小, 而 2 位左轮的轮轨力幅值基本不受到影响, 因此, 扁疤所产生的冲击载荷经过转向架或者钢轨的传递作用会导致同轴另一侧以及转向架同侧处的轮轨力产生明显的波动。

从图 11b 可以看出, 在扁疤冲击载荷的作用下, 1 位轮对左右两轴箱端盖的垂向振动加速度幅值要

明显大于另外两处。这与滚动台上的扁疤试验结果基本是一致的, 从而也说明了模型的正确性。

从图 11c 可以看出, 由于扁疤的作用, 构架端部位置处的垂向振动加速度均出现了波动, 包括扁疤轮对的左右上方构架端部和扁疤车轮同侧处的构架端部, 这也与滚动台上的试验结果是一致的。值得注意的是, 第 1 位轮对上方的构架端部加速度(FL 和 FR)的波动频率要更高一些。

图 11 扁疤冲击下的车辆系统振动响应

3.4 其他关键因素对振动冲击的影响分析

车速和车轮扁疤尺寸(包括深度及长度)是影响扁疤冲击力大小的关键因素, 因此本节分析了扁疤深度和长度及车速对轮轨垂向力及车辆系统振动加速度的影响规律。

图 12 给出了不同速度下在扁疤冲击载荷的响

应, 其中旧扁疤长度为 40 mm, 深度为 0.4 mm, 所考虑的速度范围为 50~350 km/h。从图 12a 可以看出, 在低速范围内, 轮轨垂向力随着速度的增加而增加; 在高速时, 轮轨力随着速度的增加而减小, 这与文献[4]中的结论基本是一致的。

(a) 轮轨力最大值

(b) 轴箱端盖纵向加速度最大值

(c) 轴箱端盖垂向加速度最大值

(d) 构架端部垂向加速度最大值

图 12 速度对扁疤冲击响应的影响

由于所采用的计算模型将轮对建立一个旋转的弹性体, 且轮对模态关于车轴中心线是对称或者反对称的, 因此扁疤所产生的冲击能在轴箱纵向振动加速度上很好地反映出来, 如图 12b 所示。从图 12b、12c 可以看出, 在 1 位右轮冲击载荷的作用下, 第 1 位轮对左右轴箱处纵向和垂向振动加速度均要

明显大于第 2 位轮对左右轴箱, 且随着速度的增加, 加速度幅值先增加然后再逐渐减小, 这个变化规律与轮轨力是一致的。从图 12d 可以看出, 4 个位置处的构架端部振动加速度随着速度的升高呈现出逐渐减小的趋势。

为了分析扁疤长度对轮轨力和加速度的影响, 选取扁疤深度为 0.4 mm, 长度为 30~80 mm, 仿真结果如图 13 所示。从图 13 可以看出, 对于低速 80 km/h, 当扁疤深度一定时, 轮轨力和轴箱加速度随着扁疤长度的增加而减小; 对于高速 200 km/h 和 300 km/h, 当扁疤深度一定时, 轮轨力和轴箱加速度随着扁疤长度的增加而增加。这是由于: 模型中的轮轨接触采用单点赫兹接触模型, 在高速时车轮滚动通过扁疤区域基本上是平抛运动, 如果扁疤长度越长, 将导致轮轨接触分离的时间变大, 当车轮再次与钢轨接触碰撞时, 其垂向速度也越大, 所积累的动能也越大, 因而造成更大的轮轨冲击。对于低速 80 km/h, 通过计算发现, 所选参数下的扁疤都出现了轮轨接触分离, 且再次与钢轨接触的时刻要先于车轮刚好滚过整个扁疤的时刻。另外, 当扁疤深度一定时, 扁疤长度越短, 其半径变化量与车轮滚动角增量的比值也越大, 因此, 在低速时扁疤长度越短, 反而会导致轮轨接触分离的时间越长, 进而造成更大的轮轨冲击。

(a) 轮轨力最大值

(b) 轴箱端盖垂向加速度最大值

图 13 扁疤长度对轮轨力和加速度的影响

(扁疤深度为 0.4 mm)

为了分析扁疤深度对轮轨力和加速度的影响,选取扁疤长度为 50 mm,深度变化范围为 0.1~0.6 mm,结果如图 14 所示。从图 14 可以看出,当扁疤长度一定时,在低速和高速段,轮轨力和轴箱端盖垂向加速度均随着扁疤深度的增加而变大。值得注意的是,在上述分析中已提出,在高速时车轮滚过扁疤区域基本上是平抛运动,因而轮轨接触分离的时间只与长度有关,这样在高速时轮轨力不会随扁疤深度的增加而增加,然而事实并非如此。这是由于:在高速段,车轮从扁疤起始端开始滚动进入扁疤时,轮轨力是逐渐降低至 0 的;当扁疤长度一定时,若扁疤深度越大,则开始出现轮轨接触分离的时刻也越早。因此,在车轮滚动通过整个扁疤过程中,发生轮轨接触分离的时间也越长,进而造成更大的轮轨冲击。

图 14 扁疤深度对轮轨力和加速度的影响
(扁疤长度为 50 mm)

4 结论

(1) 在扁疤冲击工况下,轨道的弹性振动对车辆系统部件的振动响应影响很大。

(2) 轮对弹性变形对轮轨垂向力影响甚微,但对轴箱端盖垂向振动响应影响很大。

(3) 扁疤所产生的冲击载荷经过转向架或者钢轨的传递作用会导致同轴另一侧以及转向架同侧处的轮轨力产生波动,但波动幅值较小;在扁疤冲击载荷的作用下,扁疤所在轮对的左右两个轴箱端盖的纵向和垂向振动加速度要远大于另一轮对左右轴箱端盖位置处的加速度;在速度相对较低的范围内,车轮扁疤对转向架四个构架端部位置处的垂向振动加速度也有着不可忽视的影响。

(4) 轮轨力和轴箱振动加速度随着速度的增加先增加然后再逐渐减小,而构架端部振动加速度随着速度的升高呈现出逐渐减小的趋势。当扁疤深度一定时,对于低速,轮轨力和轴箱加速度随着扁疤长度的增加而减小;对于高速,轮轨力和轴箱加速度随着扁疤长度的增加而增加。当扁疤长度一定时,在低速和高速段,轮轨力和轴箱端盖垂向加速度均随着扁疤深度的增加而变大。

参考文献

- [1] KUMAGAI N, ISHIKAWA H, HAGA K, et al. Factors of wheel flats occurrence and preventive measures[J]. Wear, 1991, 144(1/2): 277-287.
- [2] MAZILU T. A dynamic model for the impact between the wheel flat and rail[J]. University Politechnical of Bucharest Scientific Bulletin. D : Mechanical Engineering, 2007, 59(2): 45-58.
- [3] 王忆佳, 曾京, 高浩, 等. 车轮扁疤引起的轮轨冲击分析[J]. 西南交通大学学报, 2014, 49(4): 700-705.
WANG Yijia, ZENG Jing, GAO Hao, et al. Analysis of wheel/rail impact induced by wheel flats [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2014, 49(4): 700-705.
- [4] 凌亮, 曹亚博, 肖新标, 等. 车轮擦伤对高速轮轨接触行为的影响[J]. 铁道学报, 2015, 37(7): 32-39.
LING Liang, CAO Yabo, XIAO Xinbiao, et al. Effect of wheel flats on the high-speed wheel-rail contact behavior[J]. Journal of the China Railway Society, 2015, 37(7): 32-39.
- [5] BARKE D, CHIU W. A Review of the effects of out-of-round wheels on track and vehicle components[J]. IMechE Journal of Rail and Rapid Transit, 2005, 219(3): 151-175.
- [6] NIELSEN J, JOHANSSON A. Out-of-round railway wheels—A literature survey[J]. IMechE Journal of Rail and Rapid Transit, 2000, 214(2): 79-91.
- [7] UZZAL R, AHMED W, BHAT R. Impact analysis due to multiple wheel flats in three-dimensional railway vehicle-track system model and development of a smart wheelset[J]. IMechE Journal of Rail and Rapid Transit, 2016, 230(2): 450-471.

- [8] NEWTON S, CLARK R. An investigation into the dynamic effects on the track of wheel flats on railway vehicles[J]. *Journal of mechanics Engineering Science*, 1979, 21(4): 287-297.
- [9] BIAN J, GU Y, MURRAY M. A dynamic wheel-rail impact analysis of railway track under wheel flat by finite element analysis[J]. *Vehicle System Dynamics*, 2013, 51(6): 784-797.
- [10] DUKKIPATI R, DONG R. Impact loads due to wheel flats and shells[J]. *Vehicle System Dynamics*, 1999, 31(1): 1-22.
- [11] MARTÍNEZ J, MAZZOLA L, BAEZA L, et al. Numerical estimation of stresses in railway axles using a train-track interaction model[J]. *International Journal of Fatigue*, 2013, 47(6): 18-30.
- [12] BOGDEVICIUS M, ZYGIENE R, BUREIKA G, et al. An analytical mathematical method for calculation of the dynamic wheel-rail impact force caused by wheel flat[J]. *Vehicle System Dynamics*, 2016, 54(5): 689-705.
- [13] 翟婉明. 铁路车轮扁疤的动力学效应[J]. *铁道车辆*, 1994, 32(7): 1-5.
ZHAI Wanming. The effect of wheel flat on vehicle dynamic performance[J]. *Rolling Stock*, 1994, 32(7): 1-5.
- [14] 王建斌, 郭平波, 唐兆. 车轮扁疤引发附加冲击力对车轴应力谱影响的计算[J]. *铁道学报*, 2006, 28(1): 39-43.
WANG Jianbin, WU Pingbo, TANG Zhao. Research on the axle stress spectrum considering extra wheel flat impact forces[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2006, 28(1): 39-43.
- [15] 杨新文, 翟婉明. 车轮扁疤激起的轮轨冲击噪声机理分析[J]. *振动与冲击*, 2009, 28(8): 46-49.
YANG Xinwen, ZHAI Wanming. Wheel/rail impact noise due to wheel flats[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2009, 28(8): 46-49.
- [16] 刘国云. 关键部件性能演变的高速列车动力学性能分析及评估[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
LIU Guoyun. Analysis and assessment of high speed trains dynamic performance due to performance evolution of key components[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.
- [17] 翟婉明. 车辆-轨道耦合动力学(上册)[M]. 4 版. 北京: 科学出版社, 2015.
ZHAI Wanming. Vehicle-track coupled dynamics(Volume 1)[M]. 4th ed. Beijing: Science Press, 2015.
- [18] XIAO X, LING L, JING X. A study of the derailment mechanism of a high speed train due to an earthquake[J]. *Vehicle System Dynamic*, 2012, 50(3): 449-470.
- [19] WU X, CHI M, GAO H. Damage tolerances of a railway axle in the presence of wheel polygonalizations[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2016, 66(1): 44-59.
- [20] 夏禾, 张楠, 郭薇薇. 车桥耦合振动工程[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
XIA He, ZHANG Nan, GUO Weiwei. Coupling vibrations of train-bridge system[M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [21] 刘国云, 曾京, 张波. 钢轨波磨对高速车辆振动特性的影响[J]. *振动与冲击*, 2019, 38(6): 137-143.
LIU Guoyun, ZENG Jing, ZHANG Bo. Influence of rail corrugation on high-speed vehicle vibration performance[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2019, 38(6): 137-143.

作者简介: 刘国云(通信作者), 男, 1989 年出生, 博士研究生。主要研究方向为车辆系统动力学。

E-mail: lgyml@163.com

曾京, 男, 1963 年出生, 博士, 教授。主要研究方向为车辆系统动力学。

E-mail: zeng@swjtu.edu.cn