

车轮扁疤伤损对高速列车轮对动力学性能影响

杨 光¹,任尊松¹,袁雨青²

(1.北京交通大学 载运工具先进制造与测控技术教育部重点实验室,北京 100044;
2.中车青岛四方机车车辆股份有限公司,青岛 266111)

摘 要:车轮扁疤是铁道车辆车轮踏面的缺陷形式之一,对轮轨动力和运用安全有明显的影响.本文建立了弹性车辆系统动力学模型,且将车轮扁疤伤损考虑为车轮轮径变化,利用数值仿真,研究了车轮扁疤伤损对高速列车轮轨冲击力、轮对振动及轮轨接触性能等的影响,并结合列车运行安全性指标得到了不同速度等级下车轮扁疤长度安全限值.结果表明,弹性车辆系统模型可以准确体现轮对旋转运动特征.车轮扁疤伤损对轮轨系统垂向和横向均产生冲击作用,对轮轨系统垂向冲击作用尤为明显,将显著增大轮对旋转振动频率及其倍频对应的振动能量,且会激起轮对中高频弹性共振.车轮出现 40 mm 扁疤时,随着车轮旋转运动,轮轨接触点向轮背侧出现周期性横移,轮轨接触斑面积最大可达 142 mm²,轮轨纵向和横向蠕滑率分别增大 4%和 16%.轮轨力、轮对振动加速度及轮轨磨损指数均会随车轮扁疤长度的增加而增大.当列车运行速度在 300 km/h 及以下时,车轮扁疤长度需限制在 30 mm;当列车运行速度达到 350 km/h 时,车轮扁疤长度需限定在 25 mm.

关键词:车辆工程;高速列车;车轮扁疤;安全性;轮轨接触;高频冲击

中图分类号:U270 **文献标志码:**A

Influence of wheel flat on dynamic performance of high-speed train wheelset

YANG Guang¹, REN Zunsong¹, YUAN Yuqing²

(1. Ministry of Education Key Laboratory of Vehicle Advanced Manufacturing, Measuring and Control Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;
2. CRRC Qingdao Sifang Co., LTD., Qingdao 266111, China)

Abstract: Wheel flat is one of wheel tread defect forms of railway vehicles, and it has significant influence on the wheel/rail dynamic and operation safety. In order to study the influence, the elastic dynamic model of vehicle system and the model of wheel flat which considered the change of wheel radius are established. With the numerical method, the influence of wheel flat on wheel-set vibration, wheel/rail impact force and contact performance is analyzed, and the safety limit value of wheel flat length is obtained in different speeds. The results show that the designed elastic vehicle system model can accurately reflect the wheel-set rotation characteristics. The wheel flat causes impacts on the wheel/rail system in both vertical and lateral directions, and the dynamic responses in vertical are more obvious. The vibration energy in frequency of wheel-set rotation

收稿日期:2017-04-13
基金项目:国家自然科学基金(51575036);国家重点研发计划(2016YFB1200403)
Foundation items:National Natural Science Foundation of China(51575036);National Key R&D Plan(2016YFB1200403)
第一作者:杨光(1989—),男,土家族,湖北宜昌人,博士.研究方向为车辆系统动力学.email:12116327@bjtu.edu.cn.
引用格式:杨光,任尊松,袁雨青.车轮扁疤伤损对高速列车轮对动力学性能影响[J].北京交通大学学报,2018,42(3):103—111.
YANG Guang, REN Zunsong, YUAN Yuqing. Influence of wheel flat on dynamic performance of high-speed train wheelset[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2018, 42(3):103—111.(in Chinese)

will significantly increase because of the impact of wheel flat. When the length of wheel flat is 40 mm, with the wheel-set rotation, the contact area of wheel/rail up to 142 mm^2 , the longitudinal and lateral creepage increased by 4% and 16% respectively. The amplitudes of wheel/rail vertical contact force, the wheel-set acceleration and wheel/rail wear number will increase as the increasing of the wheel flat length. When the operation speed is 300 km/h and below, the length of wheel flat should be limited to 30 mm, and 25 mm is the limit value of wheel flat length when the speed is 350 km/h.

Keywords: vehicle engineering; high speed train; wheel flat; security; wheel/rail contact; high frequency impact

车轮扁疤是铁路车辆运用中普遍存在的一类车轮踏面损伤形态,其对铁路车辆运行安全性和轮轴运用安全性的影响不容忽视:严重的车轮扁疤损伤所引起的高频冲击力可为正常轮载的 3~4 倍^[1],车轴危险截面等效应力可达到无扁疤激励时的 2 倍^[2].对于高速列车,随着车轮高速旋转运动,车轮扁疤损伤对轮轨系统产生的周期性冲击将显著增大,严重危及列车运行安全性.因此,需建立能够更为准确地反映高速列车动力学性能的车辆系统模型,研究车轮扁疤损伤对其振动性能及运行安全性的影响.

文献[3]的研究结果表明,通过建立弹性车辆系统进行仿真分析能够更加准确地反映列车高速运行时车辆系统动力学性能.文献[4]基于欧拉坐标系建立弹性旋转轮对模型,并分析弹性旋转轮对模型和刚性轮对模型在车轮扁疤损伤冲击下的轮轨力差异,但其仿真车辆运行速度为 200 km/h.文献[5]建立了带集中质量和转动惯量的弹性车轴模型,分析了车轮扁疤激励对高速列车轮轨力的影响.两者研究结果均表明,相对于刚性模型,弹性模型能够充分反映车轮扁疤损伤冲击的中高频特性.此外,文献[6-7]的研究结果指出车轮扁疤的几何形状对于轮轨接触有明显影响,故需要建立能够真实描述车轮扁疤的数学模型以保证研究结果的准确性.文献[8]认为车轮扁疤损伤引起的轮轨冲击与轨道低接头引起的轮轨冲击类似,将车轮扁疤损伤冲击效应等效为轨道低接头冲击效应.文献[1]将车轮扁疤损伤考虑为轮轨垂向速度冲击,并提出货车车轮扁疤长度安全限值.文献[9]建立包含车轮扁疤的车轮-轨道系统三维有限元模型,研究不同扁疤长度下轮轨冲击特性.对车轮扁疤损伤引起的冲击而言,文献[1]的扁疤模型反映了新车轮擦伤形成的冲击,即新扁疤冲击;而低接头等效模型则是模拟车轮踏面擦伤棱角被磨圆后形成的冲击,即为旧扁疤冲击.两种扁疤模型均能反映车轮扁疤损伤引起的冲击作用,但

列车高速运行条件下,这两种模型是否仍然能够准确反映车轮扁疤损伤冲击作用还有待进一步验证.文献[10]采用改变车轮半径的方法模拟车轮扁疤,该方法更接近车轮扁疤损伤实际外形,并提出列车运行速度为 300 km/h 及以下时车轮扁疤长度安全限值,但其建立的车辆系统模型并未考虑轮对结构弹性,车轮扁疤损伤对于轮轨系统的冲击作用分析还不够完善.

鉴于此,本文作者以某型高速列车为研究对象,利用有限元和多体动力学方法,建立弹性车辆系统动力学模型,并将车轮扁疤损伤考虑为车轮半径的变化,仿真分析列车运行速度达到 350 km/h 时,车轮扁疤损伤对高速轮轨系统的冲击作用及其对轮轨接触特性的影响,并结合列车运行安全性指标提出不同速度等级下车轮扁疤长度安全限值.

1 弹性车辆系统动力学模型

高速列车车辆系统动力学模型如图 1 所示,是由 1 个车体、2 个构架、4 个轮对、一系悬挂和二系悬挂等组成的多体系统.需先借助有限元结构分析软件 ANSYS 对车体、构架和轮对等部件弹性化处理,再利用多体动力学计算软件 SIMPACK 生成弹性部件,结合车辆系统结构参数和悬挂参数,建立弹性车辆系统动力学模型.

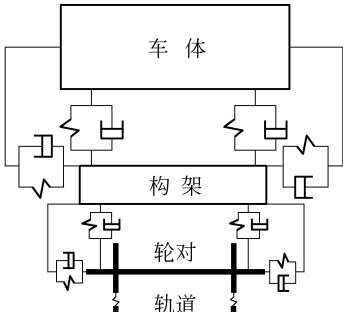


图 1 车辆系统动力学模型简图

Fig.1 Dynamic model of vehicle system

1.1 轮对弹性化处理

将某型高速列车轮对的实体模型导入有限元软件中进行网格划分,得到轮对的结构信息文件.由于网格划分的精度直接影响有限元计算的准确性,综合考虑到计算机计算能力、提高运算速度并保证计算精确性,轮对车轮采用 LMA 型踏面外形,车轴是采用有利于列车轻量化的空心车轴,如图 2 所示,轮对有限元模型的最小网格尺寸为 2 mm,单元数为 104 464 个,节点数为 124 421 个.

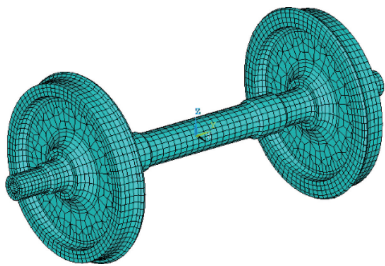


图 2 轮对有限元模型

Fig. 2 Finite element model of wheelset

为了实现快速的动力学计算,还需采用子结构方法对轮对有限元模型进行处理,即在部件所有节点中,选取部分节点的自由度作为主自由度,而其他节点的自由度被减缩,最后将减缩扩展到完整的自由度上.子结构方法是依据 Guyan 缩减理论将一组单元用矩阵凝聚成一个超单元的过程.模型的动力平衡方程为

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{D}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{u} = \mathbf{F} \quad (1)$$

式中: \mathbf{M} 、 \mathbf{K} 、 \mathbf{D} 分别为质量矩阵、刚度矩阵、阻尼矩阵; \mathbf{u} 为位移矩阵; \mathbf{F} 为载荷矩阵.假定有 m 个主自由度, s 个从自由度,式(1)的矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_{mm} & \mathbf{M}_{ms} \\ \mathbf{M}_{sm} & \mathbf{M}_{ss} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{u}}_{mm} \\ \ddot{\mathbf{u}}_{ss} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{D}_{mm} & \mathbf{D}_{ms} \\ \mathbf{D}_{sm} & \mathbf{D}_{ss} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{u}}_{mm} \\ \dot{\mathbf{u}}_{ss} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{mm} & \mathbf{K}_{ms} \\ \mathbf{K}_{sm} & \mathbf{K}_{ss} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{u}_{mm} \\ \mathbf{u}_{ss} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{F}_{mm} \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (2)$$

式中: \mathbf{K}_{mm} 、 \mathbf{K}_{ms} 、 \mathbf{K}_{sm} 和 \mathbf{K}_{ss} 依次为 $m \times m$ 、 $m \times s$ 、 $s \times m$ 和 $s \times s$ 刚度矩阵; \mathbf{M} 和 \mathbf{D} 为相应的质量和阻尼矩阵; \mathbf{F}_{mm} 表示作用在主自由度上的载荷向量.

考虑到 Guyan 缩减是基于 $\mathbf{K}\mathbf{u} = \mathbf{F}$ 的静态变

换,假定有

$$\mathbf{u}_{ss} = -\mathbf{K}_{ss}^{-1} \mathbf{K}_{sm} \mathbf{u}_{mm} \quad (3)$$

对式(3)进行一次和二次微分得

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{u}}_{ss} = -\mathbf{K}_{ss}^{-1} \mathbf{K}_{sm} \dot{\mathbf{u}}_{mm} \\ \ddot{\mathbf{u}}_{ss} = -\mathbf{K}_{ss}^{-1} \mathbf{K}_{sm} \ddot{\mathbf{u}}_{mm} \end{cases} \quad (4)$$

$$\mathbf{u}_{ss} = -\mathbf{K}_{ss}^{-1} [\mathbf{M}_{ss} \ddot{\mathbf{u}}_{sm} + \mathbf{M}_{ss} \mathbf{u}_{ss} + \mathbf{u}_{mm}] \quad (5)$$

将式(4)代入式(5)得到

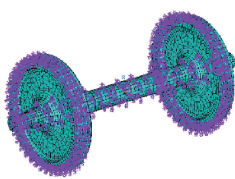
$$\mathbf{u}_{ss} = -\mathbf{K}_{ss}^{-1} [(\mathbf{M}_{sm} - \mathbf{M}_{ss} \mathbf{K}_{ss}^{-1} \mathbf{K}_{sm}) \ddot{\mathbf{u}}_{mm} + (\mathbf{D}_{sm} - \mathbf{D}_{ss} \mathbf{K}_{ss}^{-1} \mathbf{K}_{sm}) \dot{\mathbf{u}}_{mm} + \mathbf{K}_{sm} \mathbf{u}_{mm}] \quad (6)$$

为了提高 Guyan 缩减的精确度,需使式(6)与式(3)等价,即使 \mathbf{u}_m 的一阶和二阶系数为零,则

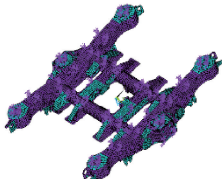
$$\begin{cases} \mathbf{M}_{sm} = \mathbf{M}_{ss} \mathbf{K}_{ss}^{-1} \mathbf{K}_{sm} \\ \mathbf{D}_{sm} = \mathbf{D}_{ss} \mathbf{K}_{ss}^{-1} \mathbf{K}_{sm} \end{cases} \quad (7)$$

能否满足式(7)将直接取决于主自由度的选取情况.主自由度的选取须保留部件结构特征,以及动力学中的铰接点、力的作用点等关键节点.以轮对为例,车轮选取 4 个截面,每个截面沿圆周方向均布选取 40 个主节点;车轴选取 9 个截面,每个截面上均布选取 5 个主节点,轮对主自由度节点共选取 205 个.采用类似的方法,构架主自由度节点共选取 120 个,车体主自由度节点共选取 80 个,图 3 给出了车辆系统各部件主自由度节点分布情况.

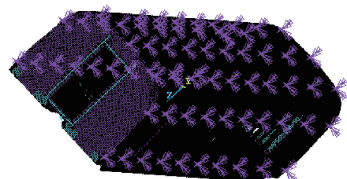
进一步对缩减自由度后的车辆系统各部件模型进行模态分析,仍以轮对为例,轮对模态从第 7 阶开始体现弹性特征,表 1 给出了轮对第 7~14 阶弹性模态,对比主自由度缩减处理前后轮对各阶弹性模态频率的差异,可见模态缩减后,轮对频率误差均在 0.5% 以内,使用自由度缩减后的子结构可以满足动力学分析的精度要求.构架和车体的模态分析及典型模态振型不再赘述.为了兼顾计算精度和效率,还需依据研究现状和经验合理选取各部件弹性模态特征.车轮多边形磨损对轮轨系统存在中高频冲击作用,当列车运行速度为 350 km/h 时,20 阶多边形的冲击频率可达到 720 Hz,极有可能激起轮轨部件弹性共振.作为承受高频冲击的直接载体,需保留轨道和轮对高频模态特征,将其模态特征截止频率均设



(a) 轮对弹性模型



(b) 构架弹性模型



(c) 车体弹性模型

图 3 车辆系统各部件弹性模型

Fig.3 Elastic model of substructures in vehicle system

置为 800 Hz.

表 1 轮对模态分析结果

Tab.1 Results of wheelset modal analysis

阶数	缩减后 频率/Hz	缩减前频 率/Hz	频率误 差/%	典型振型
7	65.0	65.3	0.5	绕轴线一阶扭转
8	76.8	77.1	0.4	水平方向一阶弯曲
9	76.8	77.1	0.4	垂向一阶弯曲
10	134.3	134.6	0.2	水平方向二阶弯曲
11	134.3	134.6	0.2	垂向二阶弯曲
12	224.6	224.8	0.1	车轮伞形
13	250.3	250.6	0.1	水平方向三阶弯曲
14	250.3	250.6	0.1	垂向三阶弯曲

1.2 弹性车辆系统动力学模型

在 SIMPACK 前处理模块中,调入经有限元分析后的各部件模态和结构信息文件,分别生成轮对、构架和车体弹性模型.车轮踏面外形采用 LMA 型踏面,钢轨采用 CHN60 钢轨,轮轨内侧距为 1 353 mm,轮轨接触几何关系如图 4 所示.

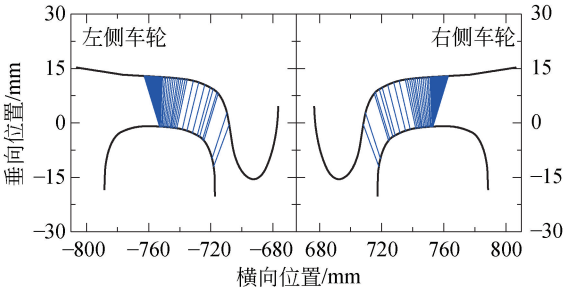


图 4 轮轨接触几何关系

Fig.4 Geometry of wheel/rail contact

轮轨接触力计算则是将轮轨法向力和蠕滑力分开求解.轮轨接触面的法向力基于 Hertz 弹性体接触理论计算得到,再进一步根据 Kalker 简化算法 (FASTSIM)求解轮轨蠕滑力^[11],轮轨蠕滑率和蠕滑力的关系为

$$\begin{cases} T_1 = -f_{11}\xi_1 \\ T_2 = -f_{22}\xi_2 - f_{23}\xi_3 \\ T_3 = -f_{33}\xi_2 - f_{33}\xi_3 \end{cases} \quad (8)$$

式中: T_1 、 ξ_1 为纵向蠕滑力、率; T_2 、 ξ_2 为横向蠕滑力、率; T_3 、 ξ_3 为自旋蠕滑力、率; f_{ij} 为蠕滑系数(其中 $f_{23} = f_{32}$),由接触斑长短轴、弹性模量及 Kalker 系数等参数计算得到.

此外,车辆系统结构参数、悬挂参数均按参考文献[12]设定,所建立的弹性车辆系统动力学模型如图 5 所示.

1.3 弹性车辆系统动力学性能

如图 6 所示,在实际运用中,轮轴承受车辆重量后将发生垂向弯曲变形,车轴中心线不再是直线,车轮向外侧偏转.弹性车辆系统模型能够体现轮轴变

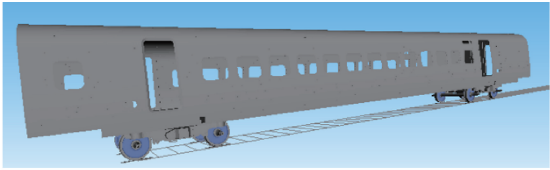


图 5 弹性车辆系统模型

Fig.5 Model of elastic vehicle system

形特征,这里以车轴未发生弹性变形时的轮对质心位置为原点,获得了车轴中心线上不同截面(0,±0.35 m,±0.67 m,±0.82 m,±1 m)的垂向偏移量.图 7 给出了不同时刻轮轴垂向弯曲变形特征,在轮对旋转运动过程中,轮轴垂向弯曲变形以及车轮向外偏转程度会随之变化.

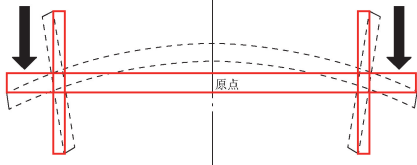


图 6 轮对弯曲变形示意图

Fig.6 Bending deformation of wheel-set

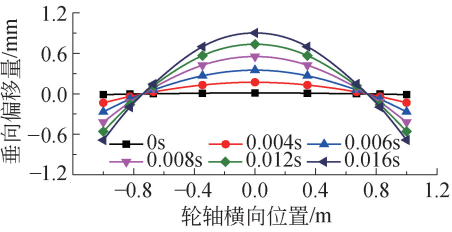


图 7 不同时刻轮轴弹性变形

Fig.7 Bending deformation degree of axle in different times

弹性化处理后,轮对垂向振动加速度频谱存在与轮对旋转频率相关的频率特征^[3];而考虑为刚性模型时,轮对垂向振动加速度频谱不存在与轮对旋转频率相关的频率特征.图 8 给出了武广线路激励下,分别考虑为弹性和刚性时,轮对垂向加速度振动频率分布.列车运行速度 350 km/h,只有弹性化处理后的轮对垂向加速度频谱出现 36 Hz 的旋转频率特征,这与实际线路测试结果^[3]一致.此外,在 70~300 Hz 频率范围内(125 Hz、152 Hz、200 Hz 和 241 Hz),2 种模型轮对垂向振动加速度均存在频率尖峰,这些频率特征有可能由轨道短波不平顺激起,极有可能激起轮对在 70~300 Hz 频率范围内丰富的弹性模态,弹性模型轮对垂向振动能量大于刚性模型振动能量.故此,高速轮轨动力学研究中,需将轮对做弹性化处理才能体现出轮对的旋转振动特性,且弹性振动会提高轮对中高端垂向振动能量.

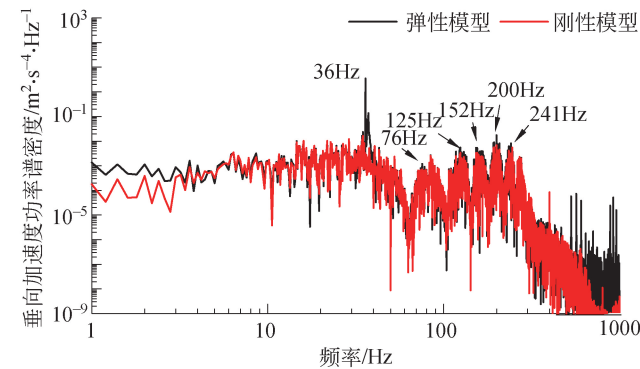


图 8 轮对垂向加速度功率谱密度

Fig.8 Power spectral density (PSD) of wheelset vertical acceleration

2 车轮扁疤数学模型

车轮新擦伤类似于车轮踏面圆周上的弦线^[1],但理想的新擦伤并非经常出现.当车轮新擦伤出现后,随着列车运行,车轮踏面擦伤棱角会被迅速磨圆,演变为陈旧擦伤.现场检测数据表明^[13],扣修车辆的车轮扁疤均为陈旧性擦伤,这也表明车轮新擦伤在检修作用中不易被检测到.因此,需建立能够描述车轮陈旧擦伤的数学模型以仿真分析车轮扁疤的冲击作用.

现有旧扁疤模型是与扁疤长度和车辆运行距离相关的余弦函数,反映扁疤深度的变化,如下

$$\Delta Z(x) = \frac{1}{2} D_f \left[1 - \cos\left(\frac{2\pi x}{L_f}\right) \right] \quad (9)$$

式中: $D_f = L_f^2 / (16R)$, L_f 为车轮扁疤长度, m; R 为车轮滚动圆半径,取 $R = 0.43$ m; x 为车辆运行距离, m.

在此基础之上,将车轮扁疤转换为车轮半径的变化,如下

$$R(\beta) = R - \frac{Ra^2}{8} \left[1 - \cos\left(\frac{\pi}{a}\beta\right) \right] \quad (10)$$

式中: $a = L_f / (2R)$; β 为车轮旋转角度, rad.

所建立的反映车轮半径变化的旧扁疤模型与扁疤长度和车轮旋转角度相关,车轮扁疤深度和扁疤长度的关系由图 9 给出.

3 轮对动力学性能

3.1 轮轨力与轮对振动加速度

当车轮扁疤与钢轨发生冲击时,作用时间极短,轮轨垂向接触力迅速增大和减小^[12].实际上,由于车轮扁疤改变了车轮踏面外形,会影响轮轨接触性能,对轮轨系统垂向和横向均产生冲击作用.

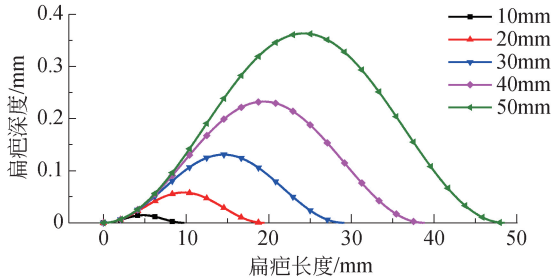


图 9 车轮旧扁疤外形

Fig.9 Profile of rounded wheel flats

仿真车辆系统以 350 km/h 的速度在无扰动线路上运行,分析车轮扁疤对轮轨力、轮对振动加速度、轮轨接触斑面积和轮轨接触蠕滑率等的影响.

图 10 给出不同车轮扁疤长度下轮轨垂向接触力变化.在车轮扁疤冲击作用下,轮轨垂向接触力会先减小后增大,最大可到达正常轮载的 2 倍.当车轮扁疤长度超过 30 mm 时,轮轨垂向接触力会减小到零,即出现短暂轮重完全减载现象.

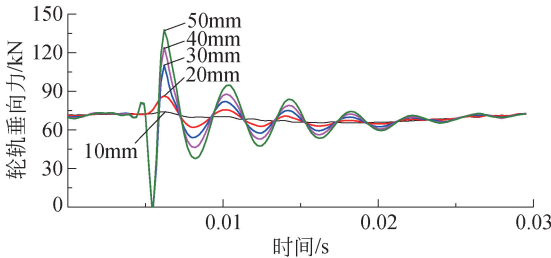


图 10 轮轨垂向接触力时域变化

Fig.10 Time domain of wheel/rail contact vertical force

由图 10 还可以看出,车轮扁疤越长,轮轨垂向接触力峰值越大,进一步分析扁疤长度对轮轨力的影响.分别将不同车轮扁疤长度对应的轮轨力峰值除以 10 mm 扁疤时的轮轨力峰值,得到轮轨垂向接触力和轮轨横向力增长指数.如图 11 所示,车轮扁疤越长,轮轨力峰值越大;50 mm 扁疤对应的轮轨垂向接触力峰值增长倍数为 1.7,轮轨横向力峰值增长倍数为 1.3.由此可见,轮轨垂向接触力峰值变化幅度大于轮轨横向力峰值变化幅度.

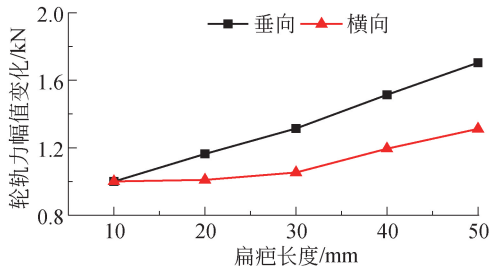


图 11 轮轨力峰值变化

Fig.11 Change of wheel/rail contact force peak

列车运行速度增大也会加剧轮轨间相互作用,

需进一步分析不同速度下,车轮扁疤对轮轨系统的垂向冲击作用.图 12 给出了车轮分别出现 20 mm、30 mm 和 40 mm 扁疤时,不同列车运行速度对轮轨垂向接触力的影响.列车运行速度由 20 km/h 增加到 400 km/h,3 种扁疤长度下轮轨垂向接触力最大值呈现先增大后减小的规律,这与文献[1]中得到的轮轨垂向接触力变化规律相一致.

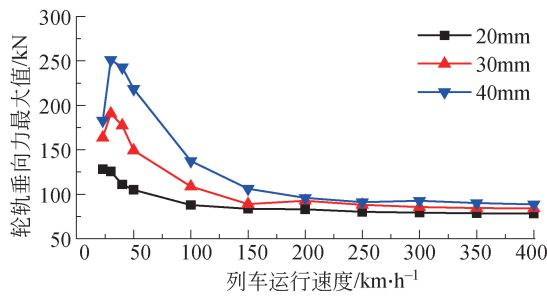


图 12 轮轨垂向接触力最大值

Fig.12 Maximum of wheel/rail contact vertical force

采用相同的方法分析扁疤长度对轮对轴箱位置(车轮出现扁疤一侧)振动加速度的影响.如图 13 所示,车轮扁疤越长,加速度幅值越大,50 mm 扁疤长度对应的垂向加速度幅值增长倍数为 5.1,横向加速度幅值增长倍数为 1.5,垂向加速度幅值变化幅度明显大于横向加速度幅值变化幅度.

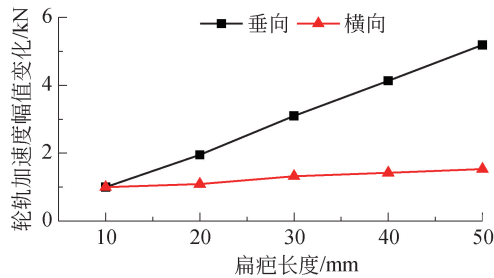


图 13 轮对加速度幅值变化

Fig.13 Change of wheelset acceleration amplitude

列车运行速度为 350 km/h 时,轮对旋转频率为 36.1 Hz,车轮存在扁疤伤损后,其对于轮轨系统周期性冲击的频率与轮对旋转运动对应的频率相同,也会对轮对垂向振动能量有一定影响,如图 14 所示,当车轮出现 40 mm 扁疤伤损后,刚性模型和弹性模型的轮对垂向振动加速度频率分布存在轮对旋转频率及其倍频特征,刚性模型在这些频率特征下的轮对垂向振动能量会随着频率增大而衰减,而弹性模型的轮轨垂向振动除了在 36 Hz 存在较高能量外,中高频区域的振动能量也显著增大.由图 14 还可知,对于弹性模型,当频率值为 36.1 Hz 时,存在 40 mm 扁疤伤损的轮对垂向振动能量密度为 $2.05 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^4 \cdot \text{Hz}^{-1}$,无车轮扁疤伤损的轮对垂向振动能量密度 $1.03 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^4 \cdot \text{Hz}^{-1}$,仅为车轮存在

40 mm 扁疤时轮对垂向振动能量密度的 1/2;在 200~400 Hz 的中高频区间,车轮出现扁疤伤损后,轮对垂向振动能量密度最大值出现在 253.1 Hz,是轮对旋转频率的 7 倍频,结合表 1 给出的轮对模态特征,该频率值与轮对三阶弯曲振动频率(250.3 Hz)接近,极有可能激起轮对三阶弯曲模态共振,故其能量密度在该频率附近明显增大.由此可见,考虑轮对弹性模态后,车轮扁疤伤损对轮轨系统的垂向冲击会提高轮对旋转振动能量,激起轮对高阶模态弹性共振.

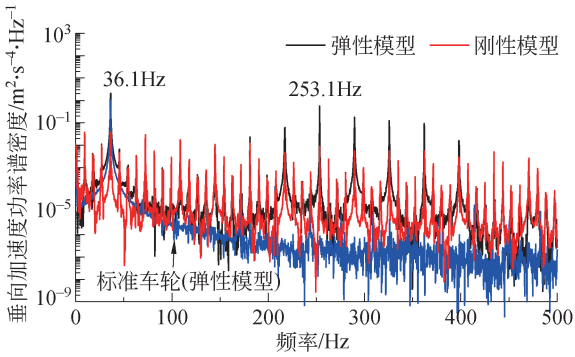
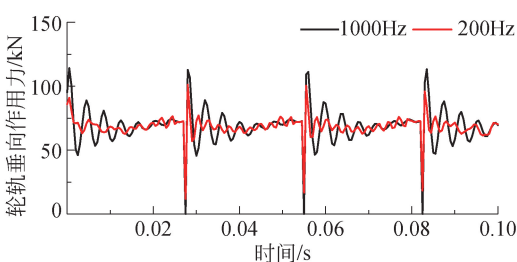


图 14 轮对垂向加速度功率谱密度

Fig.14 PSD of vertical acceleration of wheelset

为了确认 200~400 Hz 范围内,车轮扁疤伤损所激起的轮对弹性振动对轮轨垂向作用的影响程度,将轮对模态截止频率设置为 200 Hz,对比不同模态截止频率下,轮轨垂向作用力和垂向振动加速度幅值的差异.如图 15 所示,设置截止频率为 200 Hz 后,轮轨垂向作用力最大值由 113 kN 减为 101 kN,减小了 11%,轮轨垂向作用力峰值衰减时间由 0.018 s 减为 0.01 s;轮对垂向振动加速度幅值由 $67 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 减小到 $47 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$,减小了 30%,轮对垂向加速度峰值衰减速度加快.因此,当不考虑轮对 200 Hz 以上弹性模态特征后,轮对自身弹性特征减少,车轮扁疤伤损所激起的轮轨垂向作用力和轮对垂向振动加速度峰值均有不同程度的减小,这表明在轮对旋转运动过程中,车轮扁疤伤损所产生中高频冲击极有可能激起轮对中高频弹性共振,且该冲击作用对于轮轨垂向动力性能的影响不容忽视.

综合分析扁疤长度对轮轨力和加速度的影响,



(a) 轮对垂向作用力

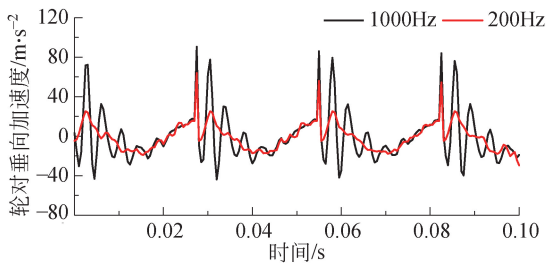


图 15 不同轮对模态截止频率对轮对垂向作用影响

向蠕滑率和横向蠕滑率最大值分别增大 4% 和 16%。

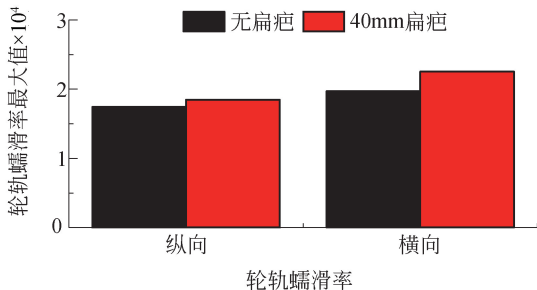


图 17 轮轨接触蠕滑率最大值

Figure 17 Maximum of wheel/rail contact creepage

轮轨接触几何关系也能体现轮轨接触状态变化,故引入轮轨接触点横向位置来分析车轮扁疤伤损对轮轨接触几何关系的影响.图 18 给出了车辆系统以 350 km/h 运行在考虑武广干扰线路运行时,不同车轮状态下轮轨接触点横向位置变化情况.与正常车轮相比,存在扁疤伤损的车轮轮轨接触点横向位置整体变化规律与之相似,整体变化趋势更靠近车轮外侧.从局部放大图还可以发现,车轮扁疤冲击时,轮轨接触点会突然向轮背一侧移动,随着车轮旋转运动,这一现象呈现周期性变化.

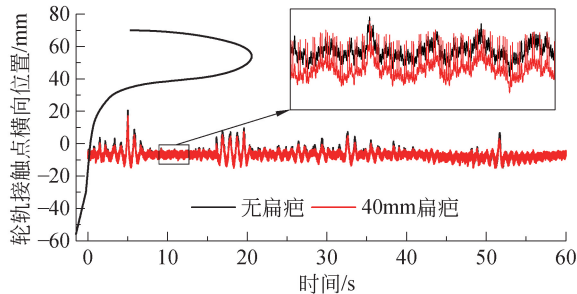


图 18 轮轨接触点横向位置

Fig.18 Lateral position of wheel/rail contact point

综合分析车轮扁疤对轮轨接触斑面积、轮轨蠕滑性能和轮轨接触点横向位置的影响,可以发现,车轮扁疤冲击使轮轨间相互作用更加剧烈,这也会进一步加剧轮轨磨损.磨损指数是反映轮轨磨损的参数之一,反映了轮轨接触面上的能量耗散,其数学模型如下

$$W = T_1 \xi_1 + T_2 \xi_2 + T_3 \xi_3 \quad (11)$$

磨损指数越大,则表明车轮磨损程度越严重.由于随机扰动下磨损指数的时域最值存在一定的偶然性,不能充分体现其随车轮扁疤长度变化的规律,这里引入有效值(均方根值)来反映磨损指数在不同条件下的变化.

如图 19 所示,车轮扁疤越长,车轮磨损指数越大.车轮磨损加剧后,会进一步加长和加深车轮扁疤

可以发现,车轮扁疤伤损对轮轨系统垂向和横向均产生冲击作用,且对轮轨系统垂向冲击更为显著,轮轨力和轮对振动加速度均随扁疤长度的增加而增加.此外,车轮扁疤伤损对于轮轨系统周期性冲击与轮对旋转运动周期相同,会显著增大轮对旋转振动频率及其倍频对应的振动能量,其激起的轮对中高弹性模态共振对轮轨系统垂向动力性能影响也十分显著.

3.2 轮轨接触特性

通过分析不同扁疤长度下轮轨垂向接触力变化可知,在扁疤长度超过 30 mm 时,轮轨间会出现短暂轮重完全减载现象,这说明轮轨可能会出现短暂脱离现象.为了确认这一现象,需分析车轮出现扁疤伤损时轮轨接触斑面积的变化,进而判断轮轨接触状态.

图 16 给出了正常车轮和出现 40 mm 扁疤伤损两种条件下轮轨接触斑面积的周期性变化.车轮扁疤与钢轨发生冲击时,轮轨接触斑面积会减小到零,而后急速增大到 142 mm² 左右.这表明当车轮出现 40 mm 扁疤伤损时,轮轨间会出现瞬间脱离现象,所以轮轨垂向接触力会减小为零,出现短暂轮重完全减载现象.

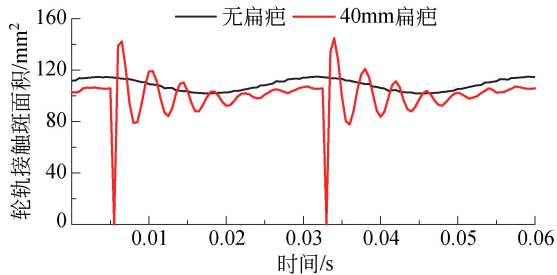


图 16 轮轨接触斑面积

Fig.16 Area of wheel/rail contact patch

车轮旋转运动过程中,车轮扁疤冲击引起的轮轨接触斑变化也会进一步影响轮轨蠕滑性能.如图 17 所示,车轮出现 40 mm 扁疤伤损后,轮轨接触纵

伤损,轮轨系统将承受更大的扁疤冲击作用,这对于列车运行安全和轮轨运用寿命均有不利影响,故需严格控制扁疤长度,以保障列车运行安全.

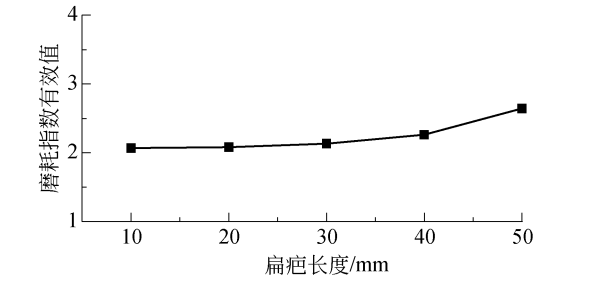


图 19 轮轨磨损指数有效值

Fig.19 Root mean square of wheel/rail wear number

4 车轮扁疤长度安全限值

车轮出现扁疤伤损后,在其旋转运动过程中,会不断地对轮轨系统产生周期性冲击,且对轮轨系统垂向冲击最为显著,垂向冲击引起的轮轨垂向作用力过大或者车轮严重减载均会威胁高速列车行车安全,需利用轮重减载率和轮轨垂向接触力两项指标对车轮扁疤长度予以限制.我国《高速试验列车动力学强度及动力学性能规范》(95J01—L)规定,动力车通过直线、曲线、道岔和桥梁时,导向轮对每个车轮作用于轨道的垂向作用力限值为 170 kN^[12],轮重减载率静态标准为 0.6,动态标准为 0.8.

图 20 和图 21 分别给出了车辆系统分别以 250 km/h、300 km/h 和 350 km/h 3 个速度等级在考虑武广激扰线路运行时,不同扁疤长度下,轮重减载率和轮轨垂向接触力最大值变化.车辆系统运行速度越高,轮轨间垂向相互作用更加激烈,轮重减载率和轮轨垂向作用力均会越大,且轮重减载率和轮轨垂向作用力均随车轮扁疤长度增大而增大.以轮重减载率动态标准 0.8 为安全限值,列车运行速度为 350 km/h 时,须将车轮扁疤限制在 25 mm 以内;列车运行速度为 300 km/h 时,车轮扁疤长度安全限值为 40 mm;列车运行速度为 250 km/h 时,车轮扁疤长度安全限值为 45 mm.以 170 kN 为轮轨垂向接触力安全限值,需对车轮扁疤长度做出以下限制:当列车运行速度在 300 km/h 及以下时,车轮扁疤长度需限制在 40 mm 以内;当列车运行速度达到 350 km/h 时,车轮扁疤长度不能超过 25 mm.

此外,考虑到车轮扁疤激起的轮轨垂向接触力呈现先增大后减小的趋势.为保障行车安全,低速下轮轨垂向作用力也应满足 170 kN 安全限值,依据图 12 给出的不同速度下轮轨垂向作用力变化趋势,车轮扁疤长度需限制在 30 mm 以下.

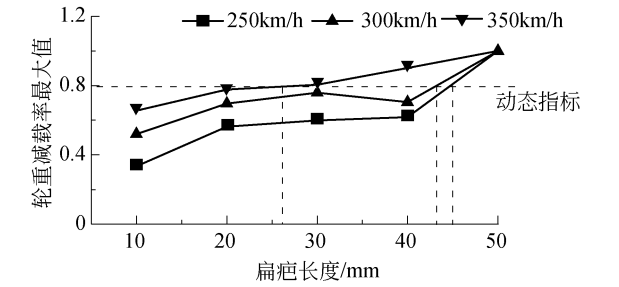


图 20 轮重减载率最大值

Fig.20 Maximum of wheel load reduction

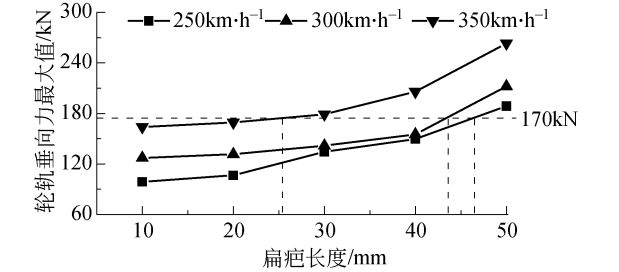


图 21 轮轨垂向作用力最大值

Fig.21 Maximum of vertical wheel/rail force

综上所述,当列车运行速度在 300 km/h 及以下时,车轮扁疤长度需限制在 30 mm;当列车运行速度达到 350 km/h 时,车轮扁疤长度需限定在 25 mm.

5 结论

本文在建立弹性车辆系统动力学模型基础上,将车轮扁疤伤损考虑为车轮轮径变化,研究车轮扁疤伤损对高速列车轮轨动态作用力、轮对振动和轮轨接触特性等的影响,得到了不同速度等级下车轮扁疤长度安全限值,结论如下:

1)弹性车辆系统模型可以准确体现轮对旋转运动特征,车轮扁疤伤损对于轮轨系统周期性冲击与轮对旋转运动周期相同,会显著增大轮对旋转振动频率及其倍频对应的振动能量,其激起的轮对中高弹性模态共振对轮轨系统垂向动力性能影响也十分显著.

2)车轮扁疤伤损对轮轨系统垂向和横向均产生冲击作用,对轮轨系统垂向冲击作用更为显著,车轮扁疤越长,轮轨力越大,轮对振动加速度也越大.当扁疤长度超过 30 mm 时,车轮与钢轨会出现短暂脱离现象.

3)车轮出现 40 mm 扁疤时,随着车轮旋转运动,轮轨接触斑面积最大可达 142 mm²,轮轨纵向和横向蠕滑率分别增大 4% 和 16%,轮轨接触点向轮背侧出现周期性横移.车轮扁疤越长,车轮磨损指数越大.

4)为保障高速列车运行安全,对车轮扁疤限制如下:速度在 300 km/h 及以下时,车轮扁疤长度限值为 30 mm;速度达到 350 km/h 时,车轮扁疤长度限值为 25 mm.

参考文献(References):

[1] 翟婉明. 铁路车轮扁疤的动力学效应[J]. 铁道车辆, 1994(7): 1—5.
ZHAI Wanming. Dynamic effect of wheel flats in railway[J]. Rolling Stock,1994(7): 1—5. (in Chinese)

[2] 王建斌, 邬平波, 唐兆. 车轮扁疤引发附加冲击力对车轴应力谱影响的研究[J]. 铁道学报, 2006, 28(1):39—43.
WANG Jianbin, WU Pingbo, TANG Zhao. Research on the axle stress spectrum considering extra wheelflat impact forces[J]. Journal of the China Railway Society, 2006, 28(1): 39—43. (in Chinese)

[3] REN Z, YANG G, WANG S, et al. Analysis of vibration and frequency transmission of high speed EMU with flexible model[J]. Acta Mechanica Sinica, 2014, 30(6): 876—883.

[4] BAEZA L, FAYOS J, RODA A, et al. High frequency railway vehicle-track dynamics through flexible rotating wheelsets[J]. Vehicle System Dynamics, 2008, 46(7): 647—659.

[5] 徐宁, 任尊松, 马尚. 带集中质量及转动惯量的弹性车轴模型及振动分析[J]. 机械工程学报, 2014, 50(2): 125—131.
XU Ning, REN Zunsong, MA Shang. Vibration analysis of elastic wheelset model with concentrated mass and moment of inertia[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(2):125—131. (in Chinese)

[6] PIERINGER A,KROPP W, THOMPSON D J. Investigation of the dynamic contact filter effect in vertical wheel/rail interaction using a 2D and a 3D non-Hertzian

contact model[J]. Wear, 2011, 271(1/2): 328—338.

[7] PIERINGER A,KROPP W,NIELSEN J C O. The influence of contact modelling on simulated wheel/rail interaction due to wheel flats[J]. Wear, 2014, 314(1/2): 273—281.

[8] NEWTON S G, CLARK R A. An investigation into the dynamic effects on the track of wheelflats on railway vehicles[J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 1979, 21(21):287—297.

[9] BIAN J, GU Y, MURRAY M H. A dynamic wheel-rail impact analysis of railway track under wheel flat by finite element analysis [J]. International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility, 2013, 51(6): 784—797.

[10] 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. (in Chinese)

[11] KALKER J J. A fast algorithm for the simplified theory of rolling contact[J]. Vehicle System Dynamics, 1982, 11(1):1—13.

[12] 任尊松. 轮轨多点接触及车辆-道岔系统动态相互作用[M]. 北京:科学出版社, 2014.
REN Zunsong. Wheel/rail multi-point contacts and vehicle-turnout system dynamic interactions[M]. Beijing: Science Press, 2014. (in Chinese)

[13] 陈享成, 王炎孝, 杨占平. 再论修改车轮扁疤容许限度标准势在必行[J]. 铁道技术监督, 2006(3):10—12.
CHEN Xiangcheng, WANG Yanxiao, YANG Zhanping. It is vital to modify the standard on allowable limits of wheel flat[J]. Railway Quality Control,2006(3): 10—12. (in Chinese)