

车轮扁疤对转向架系统振动特征影响分析研究

牛治慧^{1,2}, 王春辉^{1,2}, 李旭伟^{1,2}

¹中国汽车技术研究中心有限公司, 天津

²中汽研汽车检验中心(天津)有限公司, 天津

收稿日期: 2022年5月2日; 录用日期: 2022年5月22日; 发布日期: 2022年5月31日

摘要

车轮作为列车走行部件中重要核心部件之一, 轮轨相关作用力将直接影响车辆行驶性能和乘客乘坐舒适性, 以CRH380为对象, 建立了车辆轨道耦合动力学模型, 通过仿真分析了车轮扁疤对转向架系统振动特征的影响, 结果表明: 当轮对车轮出现扁疤缺陷时, 扁疤轮对轴箱横向加速度有效值为正常轮对轴箱横向加速度有效值的1.35倍; 相同车速下, 随着扁疤长度的增加, 轴箱横向加速度有效值逐渐增加; 不同长度的扁疤引起的轴箱横向振动加速度有效值随车速变化均呈现先增加后减小再增加的趋势; 相同车速下, 随着扁疤长度的增加, 轴箱垂向加速度有效值逐渐增加; 不同长度的扁疤引起的轴箱垂向振动加速度有效值均随车速增加而增大。

关键词

轨道车辆, 扁疤, 轴箱, 振动特征

Analysis and Research on Influence of Wheel Flat on Vibration Characteristics of Bogie System

Zhihui Niu^{1,2}, Chunhui Wang^{1,2}, Xuwei Li^{1,2}

¹China Automotive Technology and Research Center Co., Ltd., Tianjin

²CATARC Automotive Test Center (Tianjin) Co., Ltd., Tianjin

Received: May 2nd, 2022; accepted: May 22nd, 2022; published: May 31st, 2022

Abstract

As one of the important core components of train running parts, the wheel rail related force will

文章引用: 牛治慧, 王春辉, 李旭伟. 车轮扁疤对转向架系统振动特征影响分析研究[J]. 交通技术, 2022, 11(3): 236-248. DOI: 10.12677/ojtt.2022.113024

directly affect the vehicle running performance and passenger riding comfort. Taking CRH380 as the object, the vehicle track coupling dynamic model is established. The influence of wheel flat scar on the vibration characteristics of bogie system is analyzed through simulation. The results show that when the wheel set wheel has flat scar defect, the effective value of transverse acceleration of axle box of flat wheel set is 1.35 times of that of normal wheel set; at the same speed, the effective value of axle box lateral acceleration increases gradually with the increase of flat scar length; the effective value of axle box transverse vibration acceleration caused by flat scar of different length increases first, then decreases and then increases with the change of vehicle speed. At the same speed, the effective value of vertical acceleration of axle box increases gradually with the increase of flat scar length; the effective value of vertical vibration acceleration of axle box caused by flat scar of different length increases with the increase of vehicle speed.

Keywords

Rail Vehicle, Wheel Flat, Axle Box, Vibration Characteristics

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

转向架是保证轨道车辆安全行驶的主要部件之一，其在车辆行驶过程中的特性直接影响了车辆的运行安全性和乘坐舒适性[1] [2] [3]。由于列车行驶时受到车速、轨道不平顺波长等多种因素的影响，且车轮在行驶磨损过程中会导致车轮扁疤或者车轮多边形变化，车轮扁疤和车轮多边形的出现均会造成列车在运行时出现周期性的轮轨激励，从而影响转向架在车辆行驶过程中的性能。Johansson、Jin 和马卫华等对车轮不圆进行了现场测量并对车轮多边形的形成机理进行了分析研究[4] [5] [6] [7] [8]；翟婉明等[9] [10]研究了车轮扁疤造成的轮轨冲击机理，并对不同车轮扁疤尺寸对轮轨冲击力的影响进行了分析；杨光[11]通过数值仿真对车轮扁疤引起的轮轨接触特性进行了研究，分析了车辆运行速度和扁疤长度下的轮轨接触力，结果表明，车轮扁疤会激起车轮中高频的弹性共振；Martínez 等[12]分析了车轮和钢轨表面不同类型的几何缺陷引起车轴上的动应力的变化特征；Marijonas 等[13]建立了“铁路车辆 - 车轮 - 轨道”系统的数学模型，采用有限元法分析了车轮踏面和钢轨之间的接触产生力，并分析了轮对扁疤对车辆动力学的影响。

本文建立了的车辆 - 轨道耦合动力学模型，利用 simpack 建立了车辆动力学仿真模型，分析了车轮扁疤对轴箱和转向架构架振动特性的影响。

2. 车辆动力学模型

车辆在行驶过程中由车轮踏面损伤引起的轴箱系统振动主要通过轮轨相互作用力传递至车辆轴箱系统，本文在分析时采用车辆 - 轨道耦合动力学模型，如图 1 所示模型中把车辆系统简化为一个车体、两个构架、四个轮对，其中轮对考虑沉浮、横移、侧滚和摇头四个自由度，车体和构架考虑沉浮、横移、侧滚、摇头和点头 5 个自由度，一系弹簧、一系减震器、二系空气弹簧和抗蛇形减振器均采用弹簧 - 阻尼系统模拟，轨道模型采用 Euler 梁模型对钢轨振动进行分析，钢轨和轮对接触采用 Hertz 非线性弹性接触理论进行求解，钢轨的振动微分方程为：

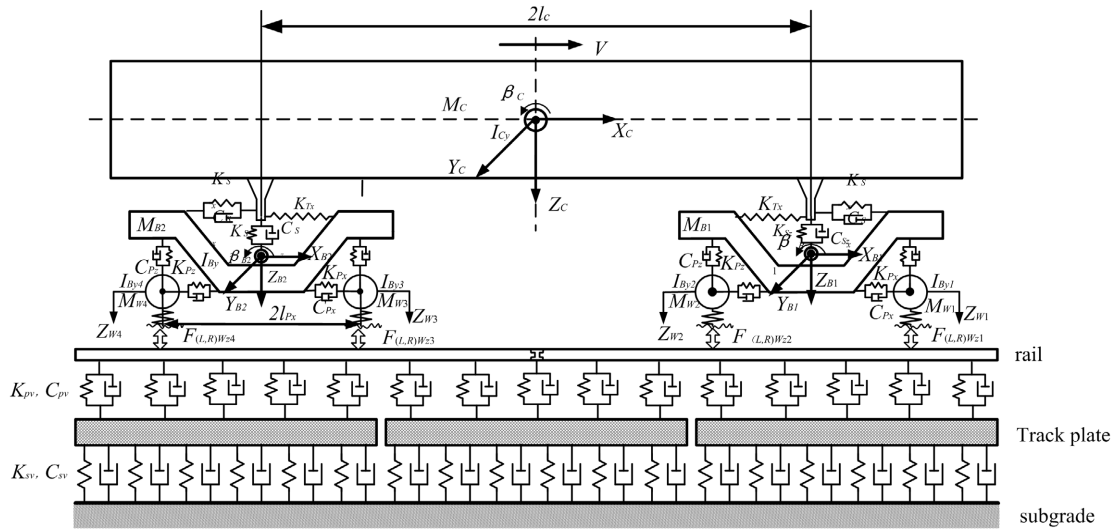


Figure 1. Vehicle track coupling dynamic model

图 1. 车辆 - 轨道耦合动力学模型

$$EI_Y \frac{\partial^4 Z_r(x,t)}{\partial x^4} + m_r \frac{\partial^2 Z_r(x,t)}{\partial t^2} = - \sum_{i=1}^N F_{rsi}(t) \delta(x-x_i) + \sum_{j=1}^4 p_j \delta(x-x_{wj}) \quad (1)$$

其中

$$F_{rsi}(t) = K_{Pi} [Z_r(x_i,t) - Z_{si}(t)] + C_{Pi} [\dot{Z}_r(x_i,t) - \dot{Z}_{si}(t)] \quad (2)$$

四个轮对沿 x 轴的运动坐标沿 x_{wj} ($j=1,2,3,4$) 为

$$\begin{cases} x_{w1}(t) = x_0 + 2(l_c + l_B) + vt \\ x_{w2}(t) = x_0 + 2l_c + vt \\ x_{w3}(t) = x_0 + 2l_B + vt \\ x_{w4}(t) = x_0 + vt \end{cases} \quad (3)$$

$$x_i = il_s \quad (i=1 \sim N) \quad (4)$$

3. 车轮扁疤损伤模型分析

列车在行驶过程中，会因制动时车轮踏面与轨道表面滑动摩擦时造成车轮踏面的磨损，以致形成车轮扁疤；车轮扁疤根据形成的时间和外形不同可以区分为新、旧扁疤；图 2 为轮对扁疤的形成变化过程示意图，图 2(a) 中所示的过渡型扁疤，随着车轮扁疤处的磨损，车轮新扁疤的弦线逐渐的被磨圆，车轮扁疤长度逐渐增加，而扁疤深度 h 继续保持不变，直到产生图 2(a) 中所示的旧扁疤。新扁疤、过渡扁疤和旧扁疤的长度与扁疤深度 h 的关系可由以下公式表示[14] [15]:

$$L_N = \sqrt{8Rh - h^2} \quad (5)$$

$$L_R = 4\sqrt{Rh} \quad (6)$$

$$L_N < L_P < L_R \quad (7)$$

式中， L_N 、 L_P 、 L_R 分别为车轮新扁疤、过渡扁疤和旧扁疤所对应的长度， h 为扁疤深度， R 车轮半径。图 2(b) 为 $R = 460 \text{ mm}$ ， $h = 0.67 \text{ mm}$ 时所对应的扁疤在车轮圆周上展开时的示意图，从图中可以看出，在扁

疤深度相同时旧扁疤弦线长度最大，新扁疤弦线长度最小。

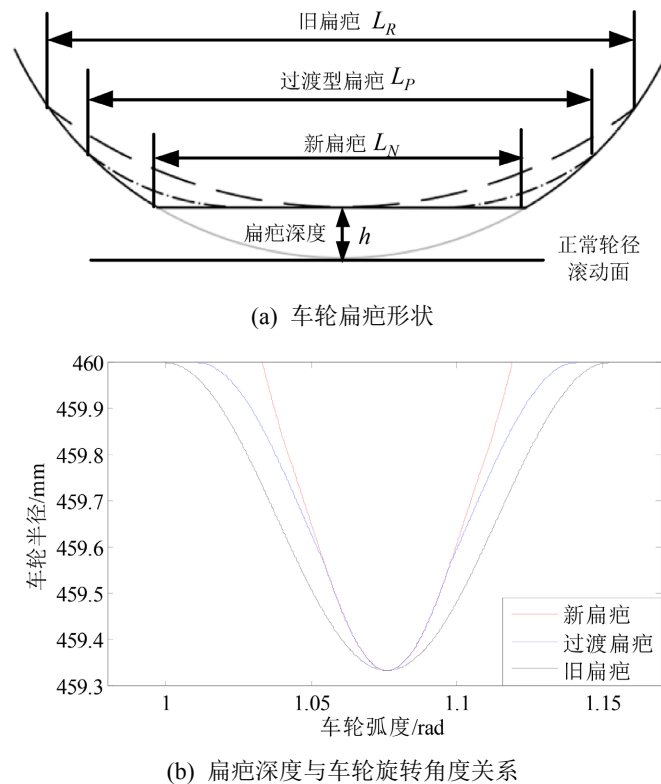


Figure 2. Schematic diagram of new and old flat scar shape of wheel
图 2. 车轮新旧扁疤形状示意图

由于新扁疤在出现后不久就会变成旧扁疤，所以本文在仅考虑旧扁疤对车辆动力特性的影响；旧扁疤通常用 Lyon 扁疤冲击激励模型表示，车轮扁疤引起的不平顺可用公式(8)表示[16]：

$$z_p = \frac{h}{2} \left(1 - \cos \left(\frac{2\pi x}{L} \right) \right) \quad (8)$$

式中， $h = L^2/16R$ ， L 为车轮扁疤长度， x 为沿车轮踏面表面的弧长。

4. 车轮扁疤对转向架系统振动特征影响分析

本文采用 SIMPACK 多体动力学仿真软件进行仿真计算，建模过程中将车辆系统中的车体、构架、轮对、轴箱、电机和齿轮箱等部件视为刚体，如图 3 为本文仿建立的动车仿真动力学模型。

4.1. 车轮扁疤对轴箱系统振动特征的影响

仿真时把车轮扁疤缺陷设置在车辆前转向架 2 位轮对右侧车轮处，扁疤长度为 50 mm，深度为 0.45 mm，车辆其余车轮均为正常车轮。

4.1.1. 车轮扁疤对轴箱系统横向振动的影响

图 4 和图 5 分别为仿真速度为 300 km/h 时车轮扁疤激励下车辆轴箱横向振动加速度时域和频域结果；从图 5 中可以看出，有扁疤缺陷车轮在运行时，在大于 170 Hz 频率段出现调制频率为轮对旋转频率 30.84

Hz 的调制频带，并在 277.6 Hz 处出现峰值，且左右两轴箱处的特征基本一致，从图中可以看出，当车轮出现扁疤时，可同时引起同轴两侧轴箱横向振动特征的变化。

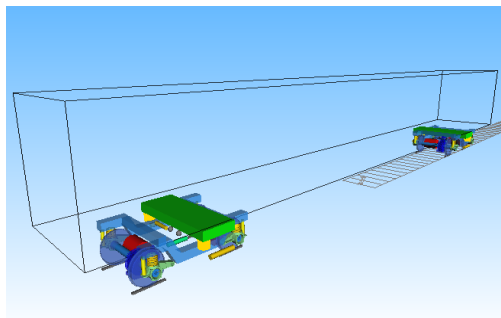


Figure 3. Rail vehicle model
图 3. 动车整车模型

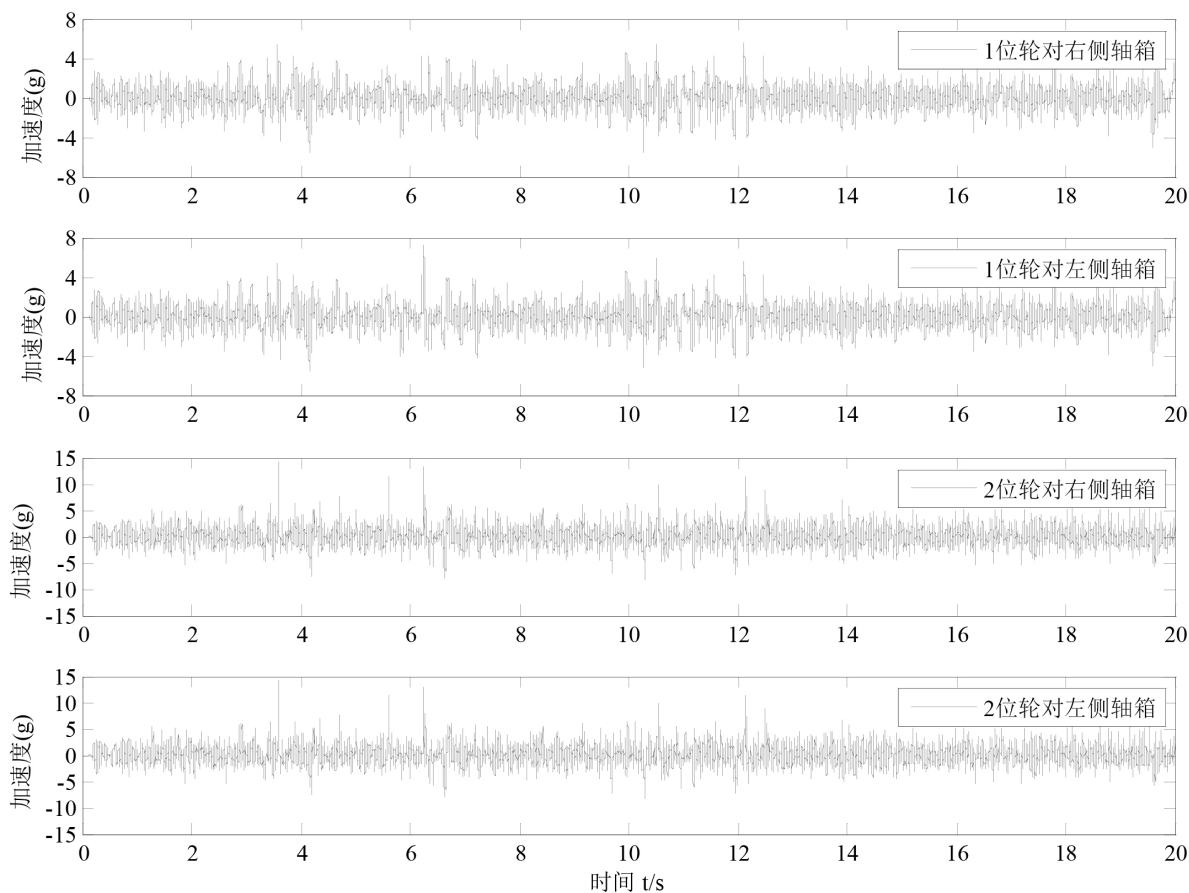


Figure 4. Time domain curve of axle box transverse vibration acceleration under wheel flat scar excitation
图 4. 车轮扁疤激励下轴箱横向振动加速度时域曲线图

从表 1 中统计结果可知，当轮对车轮出现扁疤缺陷时，轮对两侧车轮轴箱横向加速度振幅和有效值均大于正常轮对两侧车轮轴箱。2 位轮对左、右两侧轴箱横向加速度有效值相对于 1 位轮对左、右两侧轴箱横向加速度有效值均值均增大了 34%。

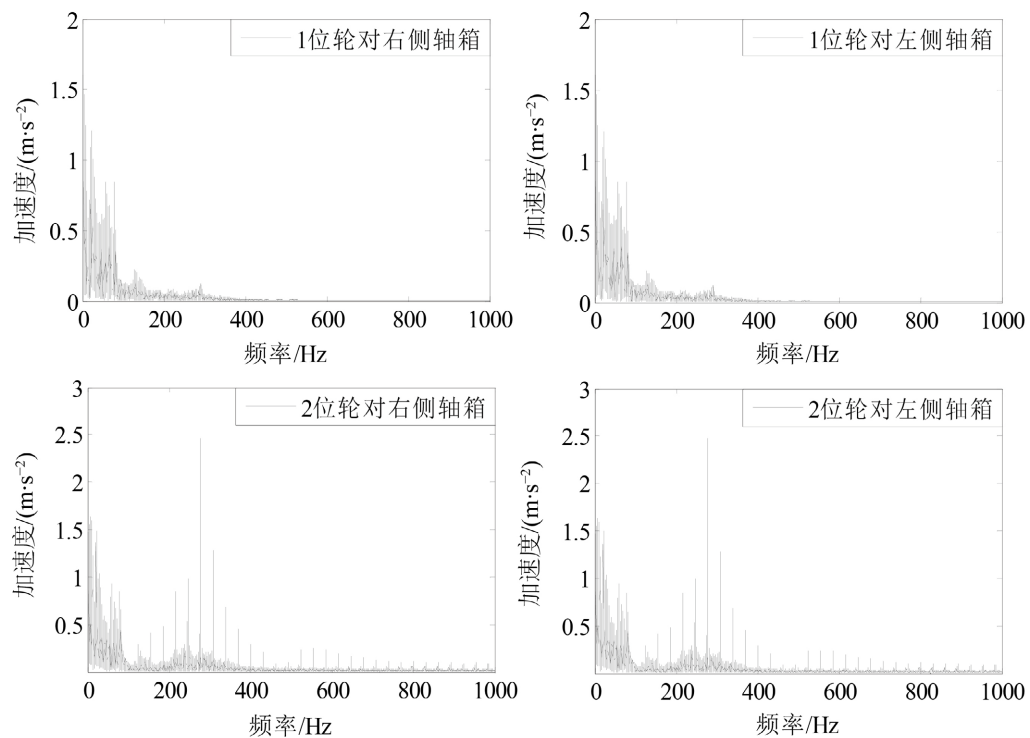


Figure 5. Spectrum diagram of axle box transverse vibration acceleration under wheel flat scar excitation
图 5. 车轮扁疤激励下轴箱横向振动加速度频谱图

Table 1. Statistics of axle box lateral acceleration under wheel flat scar excitation

表 1. 车轮扁疤激励下轴箱横向加速度统计表

位置	最小值(g)	最大值(g)	有效值(g)
1 位轮对左侧轴箱	-5.6326	7.1963	1.2480
1 位轮对右侧轴箱	-5.5946	5.5599	1.2339
2 位轮对左侧轴箱	-8.2118	14.2012	1.6686
2 位轮对右侧轴箱	-8.1318	14.3411	1.6683

4.1.2. 车轮扁疤对轴箱系统垂向振动的影响

图 6 和图 7 分别为仿真速度为 300 km/h 时车轮扁疤激励下车辆轴箱垂向振动加速度时域和频域结果；从图 7 中可以看出，有扁疤缺陷车轮在运行时，在大于 170 Hz 频率段出现调制频率为轮对旋转频率 30.84 Hz 的调制频带，并在 277.6 Hz 处出现峰值，且左右两轴箱处的特征基本一致，从图中可以看出，当车轮出现扁疤时，可同时引起同轴两侧轴箱垂向振动特征的变化；根据对扁疤缺陷轮对左右轴箱垂向加速度的分析得到，在受到扁疤冲击过程中左右车轮两侧轴箱垂向加速度方向是相反的，分析这是由于在扁疤车轮在运动过程中会导致轮对出现侧滚运动引起的。

从表 2 中统计结果可知，当轮对车轮出现扁疤缺陷时，轮对两侧车轮轴箱垂向加速度振幅和有效值均大于正常轮对两侧车轮轴箱；2 位轮对左侧轴箱垂向加速度有效值相对于 1 位轮对左、右两侧轴箱垂向加速度有效值均值增大了 125%，2 位轮对右侧轴箱垂向加速度有效值相对于 1 位轮对左、右两侧轴箱垂向加速度有效值均值增大了 203%，出现扁疤损伤车轮将对轴箱垂向造成较大的冲击。

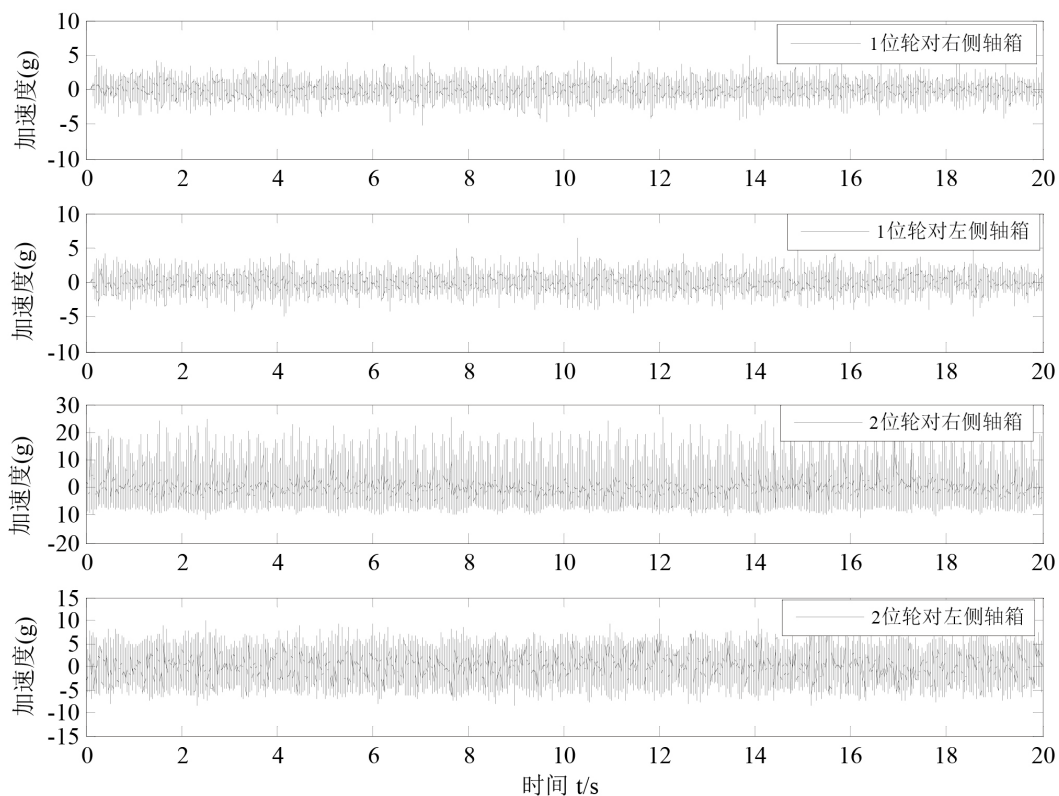


Figure 6. Time domain curve of vertical vibration acceleration of axle box under wheel flat scar excitation
图 6. 车轮扁疤激励下轴箱垂向振动加速度时域曲线图

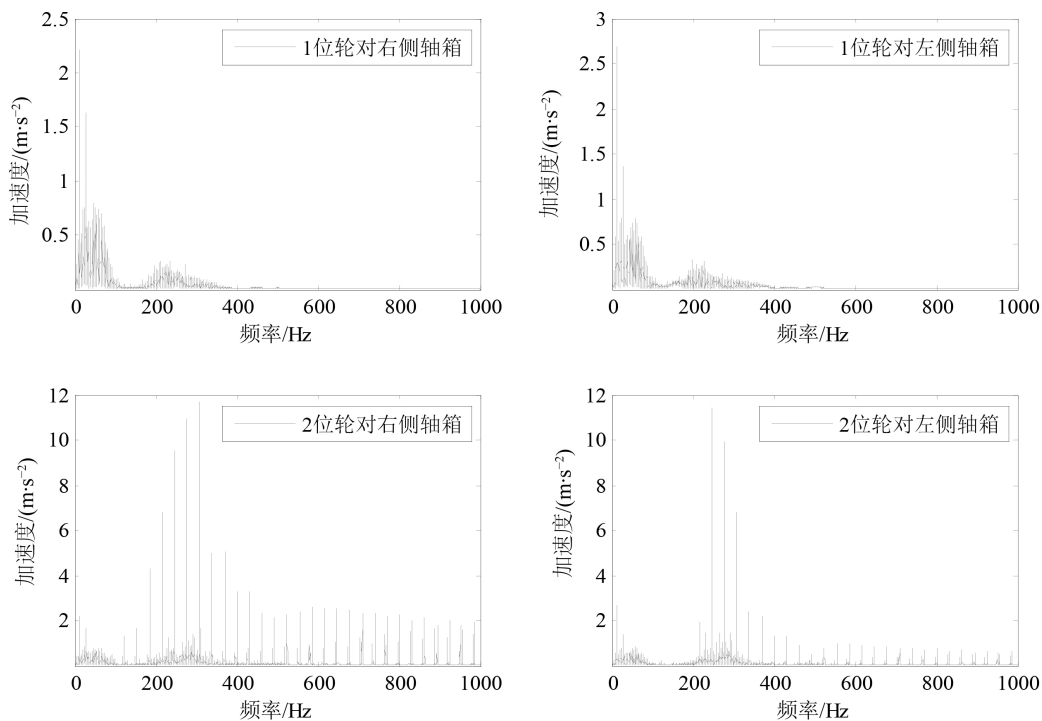


Figure 7. Spectrum of vertical vibration acceleration of axle box excited by wheel flat scar
图 7. 车轮扁疤激励下轴箱垂向振动加速度频谱图

Table 2. Statistics of axle box vertical acceleration under wheel flat scar excitation
表 2. 车轮扁疤激励下轴箱垂向加速度统计表

位置	最小值(g)	最大值(g)	有效值(g)
1 位轮对左侧轴箱	-4.9597	4.9695	1.0889
1 位轮对右侧轴箱	-5.1610	6.4195	1.0797
2 位轮对左侧轴箱	-8.6840	10.5307	2.4367
2 位轮对右侧轴箱	-11.5488	26.0952	3.2829

从图 5 和图 7 分别所示的轴箱横向与垂向加速度时域曲线可知, 当车轮出现扁疤缺陷时会引起轴箱在垂向和横向的高频振动, 在横向和垂向方向均会对轴箱产生冲击作用, 车轮扁疤引起轴箱垂向振动加速度有效值变化大于轴箱横向振动加速度有效值的变化, 车轮扁疤损伤时对轴箱垂向冲击作用更为显著。

4.1.3. 车轮扁疤尺寸对轴箱系统振动的影响

在车辆行驶过程中, 不同大小尺寸扁疤和车辆行驶速度对轴箱系统振动特性的影响也不同, 图 8 和图 9 分别为不同车轮扁疤长度时轴箱系统横向振动和垂向振动随车速的变化规律。从图 8 中可以看出, 相同车速下, 随着扁疤长度的增加, 轴箱横向加速度有效值逐渐增加; 不同长度的扁疤引起的轴箱横向振动随车速的变化趋势基本一致, 轴箱横向加速度有效值随车速变化均呈现先增加后减小再增加的趋势; 在车速为 250 km/h 时, 轴箱横向加速度有效值达到最大。

从图 9 中可以看出, 相同车速下, 随着扁疤长度的增加, 轴箱垂向加速度有效值逐渐增加; 不同长度的扁疤引起的轴箱垂向振动加速度有效值均随车速增加而增大。

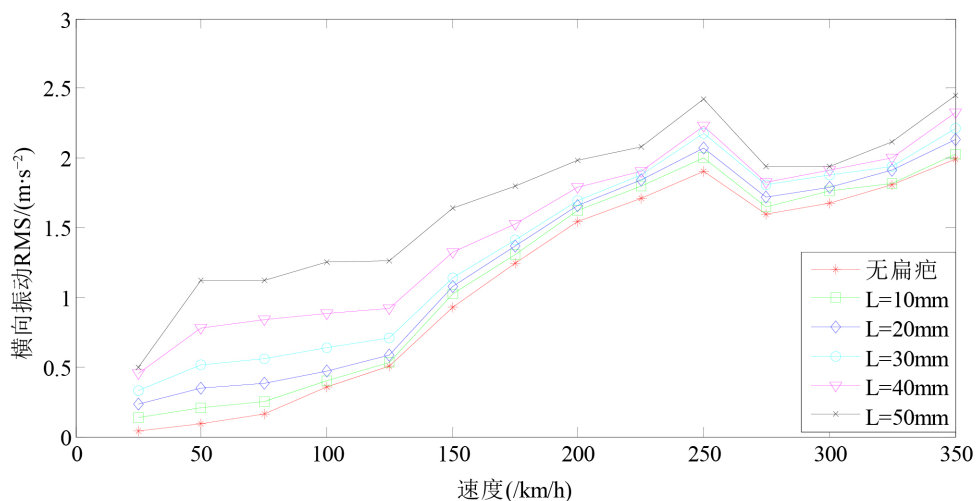


Figure 8. Effective value curve of axle box transverse acceleration under excitation of different flat scar length

图 8. 不同扁疤长度激励下轴箱横向加速度有效值曲线

4.2. 车轮扁疤对转向架构架振动特征的影响

4.2.1. 车轮扁疤对转向架构架横向振动特征的影响

图 10 和图 11 分别为仿真速度为 300 km/h 时车轮扁疤激励下转向架构架横向振动加速度时域和频域结果; 从图 11 中可以看出, 当有扁疤缺陷车轮在运行时, 转向架构架将会出现调制频率为轮对旋转频率

30.84 Hz 的调制频带，并在 277.6 Hz 处出现峰值，从图中可以看出，当车轮出现扁疤时，可引起整个转向架构架的横向振动。

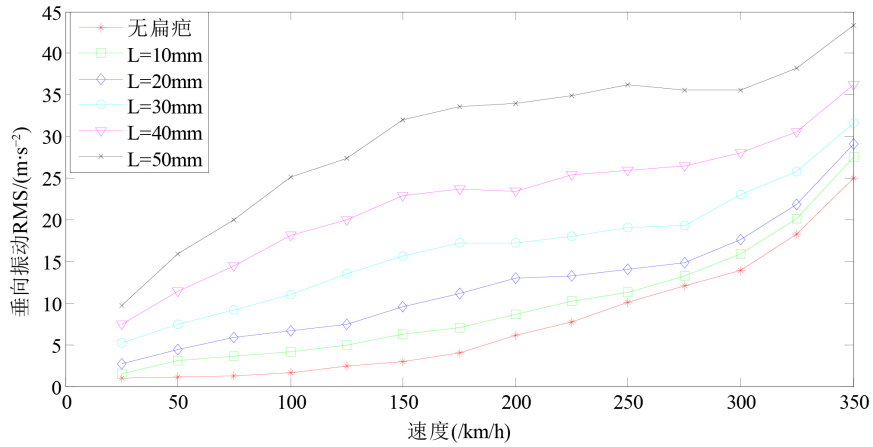


Figure 9. Effective value curve of vertical acceleration of axle box under excitation of different flat scar length

图 9. 不同扁疤长度激励下轴箱垂向加速度有效值曲线

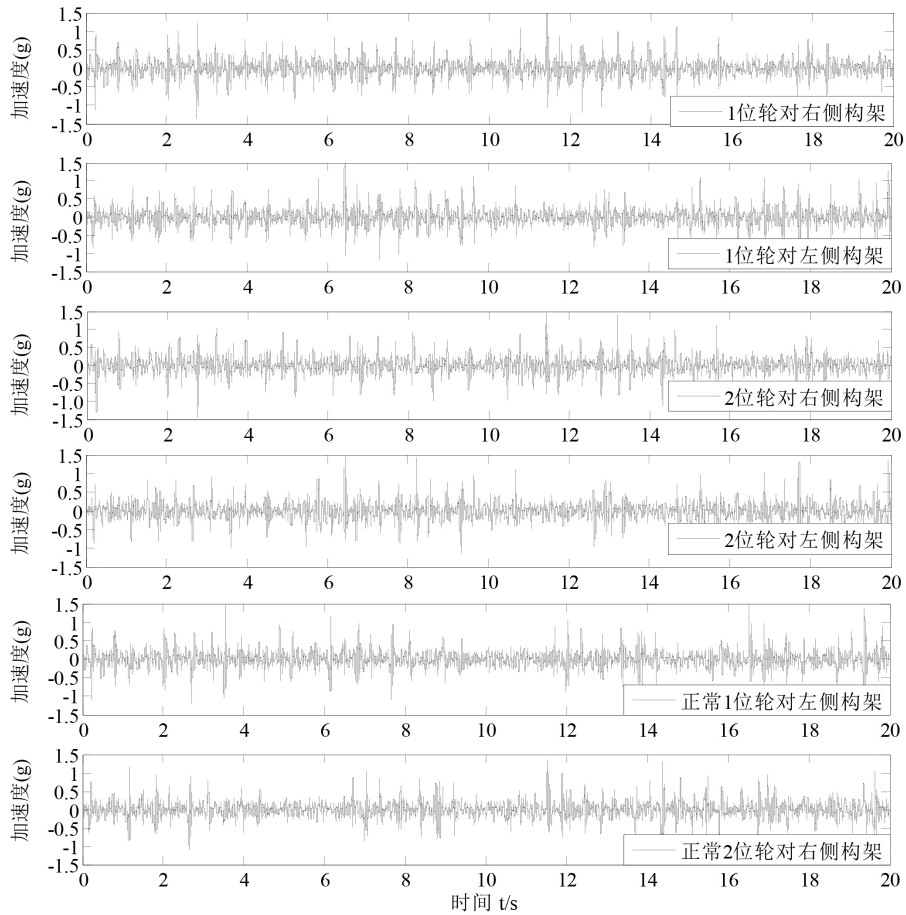


Figure 10. Time domain diagram of transverse acceleration of frame under wheel flat scar excitation

图 10. 车轮扁疤激励下构架横向加速度时域图

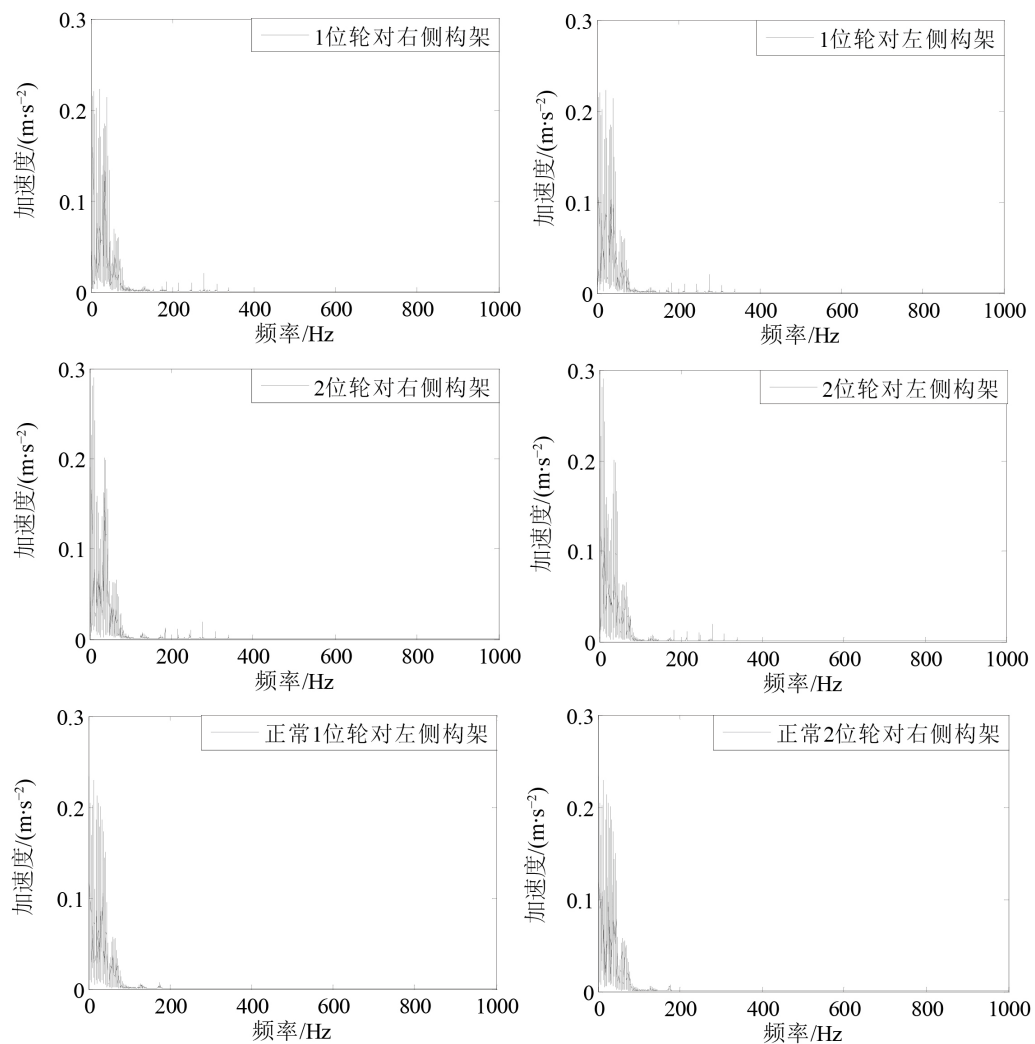


Figure 11. Spectrum diagram of transverse vibration acceleration of frame under wheel flat scar excitation
图 11. 车轮扁疤激励下构架横向振动加速度频谱图

从表 3 中统计结果可知, 当轮对车轮出现扁疤缺陷时, 转向架构架横向加速度振幅和有效值均略大于正常轮对转向架构架横向加速度; 2 位轮对构架横向加速度有效值均值相对于 1 位轮对构架横向加速度有效值均值增加了 6%, 2 位轮对构架横向加速度有效值均值相对于正常轮对构架横向加速度有效值均值增加了 16%, 出现扁疤损伤对转向构架横向振动影响较小。

Table 3. Statistical table of lateral acceleration of frame under wheel flat scar excitation
表 3. 车轮扁疤激励下构架横向加速度的统计表

位置	最小值(g)	最大值(g)	有效值(g)
1 位轮对左侧构架	-1.2724	1.4409	0.2225
1 位轮对右侧构架	-1.1880	1.4306	0.2272
2 位轮对左侧构架	-1.4579	1.4634	0.2382
2 位轮对右侧构架	-1.3515	1.4996	0.2396
正常 1 位轮对左侧构架	-1.1658	1.3503	0.2021
正常 2 位轮对右侧构架	-1.1705	1.3804	0.2079

4.2.2. 车轮扁疤对转向架构架垂向振动的影响

图 12 和图 13 分别为仿真速度为 300 km/h 时车轮扁疤激励下转向架构架垂向振动加速度时域和频域结果；从图 13 中可以看出，当有扁疤缺陷车轮在运行时，转向架构架将会出现调制频率为轮对旋转频率 30.84 Hz 的调制频带，并在 277.6 Hz 处出现峰值，从图中可以看出，当车轮出现扁疤时，可引起整个转向架构架的垂向振动。

从表 4 中统计结果可知，当车轮出现扁疤缺陷时，转向架构架垂向加速度振幅和有效值均略大于正常轮对转向架构架垂向加速度；2 位轮对构架垂向加速度有效值均值相对于 1 位轮对构架垂向加速度有效值均值增加了 4.4%，2 位轮对构架垂向加速度有效值均值相对于正常轮对构架垂向加速度有效值均值增加了 12%，出现扁疤损伤对转向构架垂向振动影响较小。

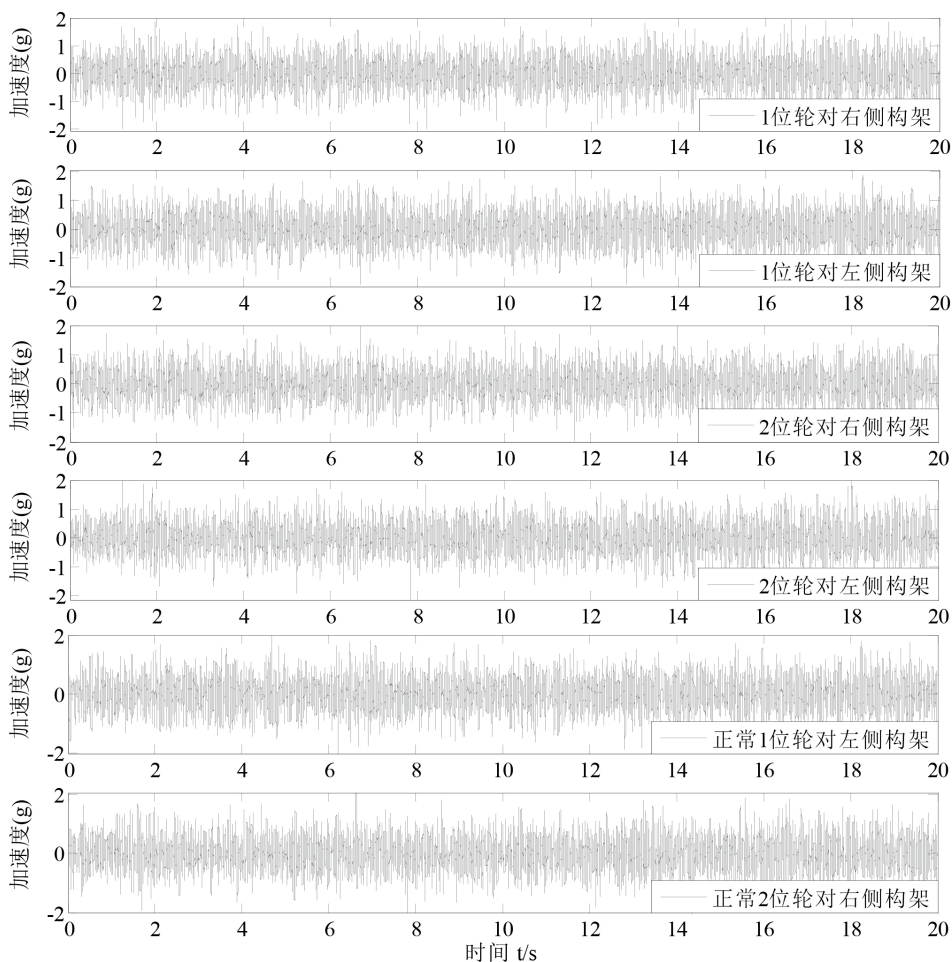


Figure 12. Time domain diagram of vertical acceleration of frame

图 12. 构架垂向加速度时域图

Table 4. Statistics of vertical acceleration of frame under wheel flat scar excitation

表 4. 车轮扁疤激励下构架垂向加速度统计表

位置	最小值(g)	最大值(g)	有效值(g)
1 位轮对左侧构架	-1.8752	1.8490	0.5664
1 位轮对右侧构架	-1.8526	1.8423	0.5697

Continued

2 位轮对左侧构架	-1.9607	2.0300	0.5897
2 位轮对右侧构架	-2.1361	1.9848	0.5957
正常 1 位轮对左侧构架	-1.8232	1.7064	0.5219
正常 2 位轮对右侧构架	-1.8998	1.8716	0.5385

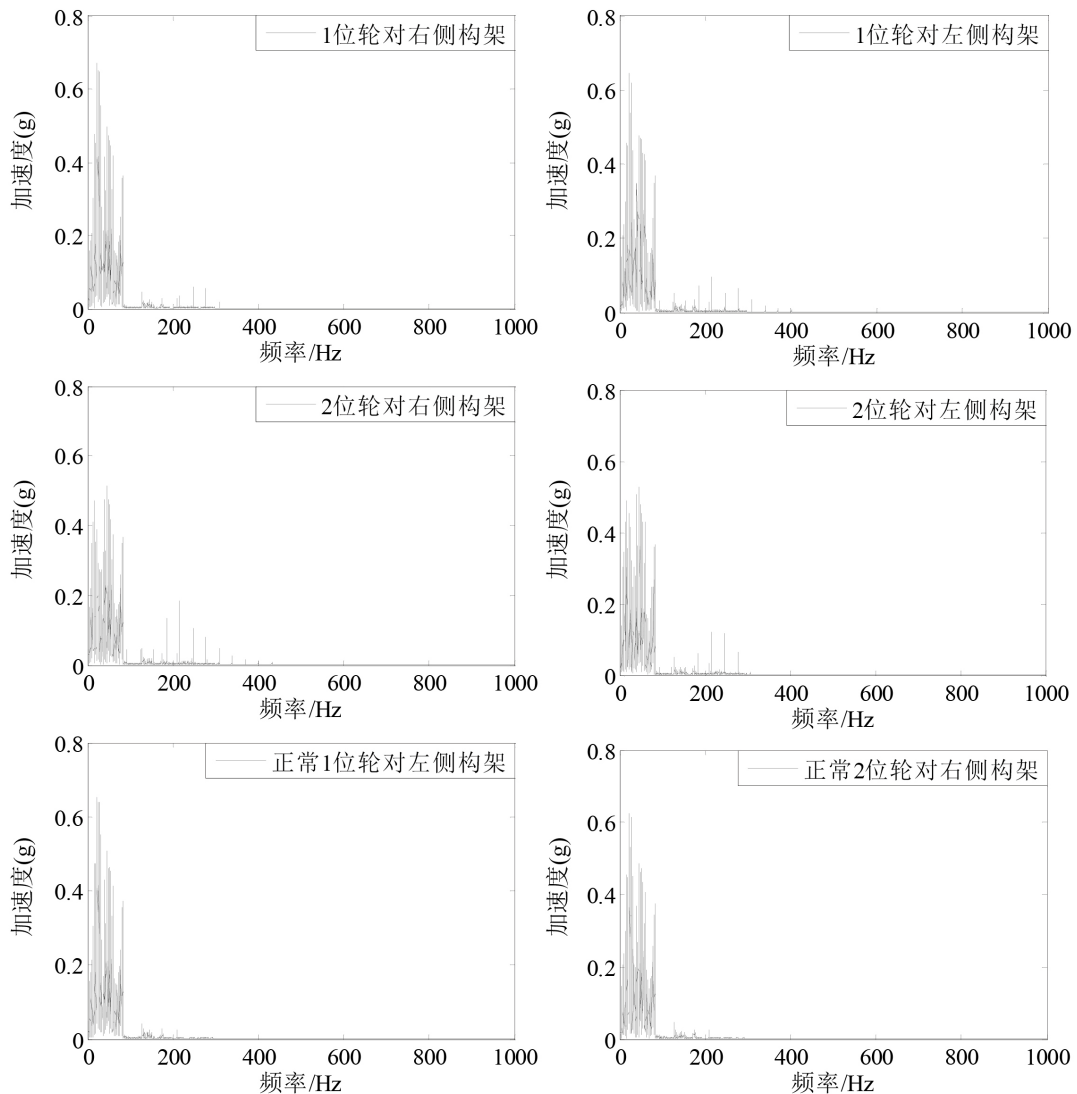


Figure 13. Spectrum of vertical vibration acceleration of frame

图 13. 构架垂向振动加速度频谱图

5. 结论

1) 从分析结果可以得到车轮扁疤对轴箱振动特征影响较大, 对转向架构架振动特征影响较小, 且车轮扁疤能够引起轴箱在频率 277.6 Hz 附近振动能量的增加。

2) 相同车速下, 随着扁疤长度的增加, 轴箱横向加速度有效值逐渐增加; 不同长度的扁疤引起的轴箱横向振动加速度有效值随车速变化均呈现先增加后减小再增加的趋势; 在车速为 250 km/h 时, 轴箱横

向加速度有效值达到最大。

3) 相同车速下, 随着扁疤长度的增加, 轴箱垂向加速度有效值逐渐增加; 不同长度的扁疤引起的轴箱垂向振动加速度有效值均随车速增加而增大。

参考文献

- [1] 李芾, 付茂海, 黄运华, 等. 车辆空气弹簧动力学参数特性研究[J]. 中国铁道科学, 2003, 24(5): 91-95.
- [2] 刘宏友. 高速列车中的关键动力学问题研究[J]. 中国铁道科学, 2004, 25(1): 136-138.
- [3] 朴明伟, 任晋峰, 李娜, 等. 基于空簧悬挂特性的高铁车辆垂向振动舒适性对比研究[J]. 中国铁道科学, 2012, 33(1): 71-77.
- [4] Johansson, A. and Nielsen, J.O. (2003) Out-of-Round Railway Wheels-Wheel-Rail Contact Forces and Track Response Derived from Field Tests and Numerical Simulations. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, **217**, 135-146. <https://doi.org/10.1243/095440903765762878>
- [5] Jin, X., Wu, L., Fang, J., et al. (2012) An Investigation into the Mechanism of the Polygonal Wear of Metro Train Wheels and Its Effect on the Dynamic Behaviour of a Wheel/Rail System. *Vehicle System Dynamics*, **50**, 1817-1834. <https://doi.org/10.1080/00423114.2012.695022>
- [6] Johansson, A. (2006) Out-of-Round Railway Wheels Assessment of Wheel Tread Irregularities in Train Traffic. *Journal of Sound and Vibration*, **293**, 795-806. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2005.08.048>
- [7] 马卫华, 罗世辉, 宋荣荣. 地铁车辆车轮多边形形成原因分析[J]. 机械工程学报, 2012, 48(24): 106-111.
- [8] Johansson, A. and Andersson, C. (2005) Out-of-Round Railway Wheels—A Study of Wheel Polygonalization through Simulation of Three-Dimensional Wheel-Rail Interaction and Wear. *Vehicle System Dynamics*, **43**, 539-559. <https://doi.org/10.1080/00423110500184649>
- [9] 翟婉明. 铁路车轮扁疤的动力学效应[J]. 铁道车辆, 1994(7): 1-5.
- [10] 秦玉冬, 胡明, 杨柳青, 等. 基于 SIMPACK 的扁疤车轮轮轨冲击力学特性分析[J]. 中国机械工程, 2017, 28(17): 2029-2035, 2042.
- [11] 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.
- [12] Martínez-Casas, J., Mazzola, L., Baeza, L., et al. (2013) Numerical Estimation of Stresses in Railway Axles Using a Train-Track Interaction Model. *International Journal of Fatigue*, **47**, 18-30. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2012.07.006>
- [13] Bogdevičius, M., Žygienė, R., Dailydka, S., et al. (2015) The Dynamic Behaviour of a Wheel Flat of a Railway Vehicle and Rail Irregularities. *Transport*, **30**, 217-232. <https://doi.org/10.3846/16484142.2015.1051108>
- [14] Fesharakifard, R., Dequidt, A., Tison, T., et al. (2013) Dynamics of Railway Track Subjected to Distributed and Local Out-of-Round Wheels. *Mechanics & Industry*, **14**, 347-359. <https://doi.org/10.1051/meca/2013074>
- [15] Pieringer, A., Kropp, W. and Nielsen, J.C.O. (2014) The Influence of Contact Modelling on Simulated Wheel/Rail Interaction Due to Wheel Flats. *Wear*, **314**, 273-281. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.12.005>
- [16] Lyon, D. (2002) Review of Vertical Dynamic Track Forces. Rail Safety and Standards Board Report.