DOI：10.13890/j.issn.1000-128X.2022.05.103

铁道机车车辆

车轮多边形演变及其对车辆动力学影响

徐　辉[1]，宋冬利[1]，田光荣[2]

（1.西南交通大学 牵引动力国家重点实验室，四川 成都　610031；
2.中国铁道科学研究院集团有限公司 机车车辆研究所，北京　100081）

摘　要：车轮多边形演变会影响动车组运行安全，为研究其演变过程以及对车辆振动行为的影响，对国内某动车组车轮进行实际廓形测量和分析。基于车辆动力学理论和滚动接触理论，建立车辆–轨道耦合动力学模型，从时域和频域角度仿真分析多边形磨耗特征。假设车轮横向轮廓和名义车轮半径不发生变化，结合USFD磨耗模型建立长期磨损迭代模型来模拟多边形演变行为，并利用实测不圆顺数据分析对动力学性能的影响。计算结果表明：最终圆周轮廓与初始轮廓存在相位差，车轮磨耗虽增加但波形变化不大。车轮多边形对平稳性指标影响较小，但会影响轮轨动作用力，轮轨垂向力最大值随车轮不圆顺波长的增大而降低，随速度和粗糙度幅值增加而增大。同等行车速度下粗糙度幅值增大，构架垂向加速度幅值相应增大。

关键词：车轮多边形；磨损迭代；演变行为；动力学性能；实测廓形；动车组；轨道不平顺

中图分类号：U211.5　　**文献标识码：**A

文章编号：1000-128X(2022)05-0078-06

Polygonal evolution of wheels and its effect on vehicle dynamics

XU Hui[1], SONG Dongli[1], TIAN Guangrong[2]

(1. State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China;
2. Locomotive & Car Institute, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China)

Abstract: The polygonal evolution of wheels affects the operational safety of EMUs. In order to study the evolution process and its effect on vehicle vibration behaviors, the wheel profile of an EMU in China was measured and analyzed. Based on the vehicle dynamics theory and rolling contact theory, a vehicle-rail coupling dynamics model was established, and the characteristics of polygonal wear were simulated from angles of view of the time domain and frequency domain. Assuming that the lateral wheel profile and nominal wheel radius were unchanged, a long-term wear iterative model was established in combination with the USFD wear model, to simulate the polygonal evolution behaviors, and the effect on the dynamic performance was analyzed on the basis of the measured out-of-roundness data. The results show that there is a phase difference between the final circumferential profile and the initial profile, and the waveform changes little with worsening wheel wear. The wheel polygon has little effect on the running stability index, but it affects the wheel-rail dynamic interaction. The maximum wheel-rail vertical force decreases with the increase of wheel out-of-roundness wavelength, and increases with the increase of speed and roughness amplitude. At the same driving speed, the vertical acceleration amplitude of the frame increases with the increase of the roughness amplitude.

Keywords: wheel polygon; wear iteration; evolution behavior; dynamic performance; measured profile; EMUs; track irregularity

收稿日期：2022-02-15；修回日期：2022-08-18
基金项目：国家自然科学基金项目（P110520G02004）；国铁集团科研计划项目（K2020J017）
通信作者：宋冬利（1971—），女，博士，高级实验师，博士生导师，主要从事高速列车PHM方面的研究；
E-mail: sdl.cds@163.com

0　引言

随着列车行车速度和轴重的增加，列车车轮多边形化已成为轨道交通亟待解决的问题。车轮多边形化又称谐波磨耗，即车轮各角度下滚动圆半径与平均半径存在差值，其后果可能导致噪声增大、乘坐舒适度降低、部件损坏和轨道恶化[1]。为保证行车安全，被动解决方案是缩短车轮镟修周期，这会导致维护成本增加，轮对寿命减少。车轮多边形化的原理极为复杂，根据已有文献，大致认为与车轮初始不圆、轮轨黏滑振动和制动时闸瓦与车轮的热弹性失稳有关。

在车轮多边形问题仿真研究方面，为研究某动车组 18 阶和 19 阶车轮多边形影响下的车辆振动行为，文献[2]采用 Simpack 建模并结合实测数据，发现仿真和实测振动能量接近由 19 阶多边形引起的振动频率；文献[3]仿真了速度为 250 km/h 和 300 km/h 下车轮多边形发展历程，发现轮轨间存在 1 个固定的振动频率促使车轮多边形演变，而提高镟修品质能延缓多边形发展速度；文献[4]对比分析刚性轮轨、柔性轮轨、刚性轮柔性轨、柔性轮刚性轨 4 种工况下车轮多边形演变过程，研究表明扣件刚度和阻尼均会影响车轮多边形发展；文献[5]发现多边形相位差会加快车轮磨耗，数值在左右相位差为 1/2 周期时最大，并且在谐波磨耗形成中存在一个磨耗急剧增大的“转折里程”；文献[6]研究发现蛇行失稳速度随谐波阶数和幅值的增大而降低，受转向架悬挂的减振作用，谐波磨耗对运行平稳性的影响较小；文献[7]针对动车组车轮多边形化特点，按轮轨垂向力划分安全区域，1~4 阶多边形幅值分别为 1.0 mm、0.4 mm、0.4 mm、0.3 mm；文献[8]基于“定频整分”理论和西北复杂运行条件下实测车轮粗糙度数据，发现车轮直径的变化会改变谐波磨耗的阶数和演变速度；文献[9]仿真模拟车轮多边形的发展过程，得出轨枕参数激振和 P2 共振导致车轮 5~7 阶多边形磨耗；文献[10-11]表明同一转向架两轮对间钢轨的三阶弯曲振动导致高阶谐波磨耗形成；文献[12]以地铁车辆为对象，研究多边形磨损的形成原理，发现轮对一阶弯曲共振导致车轮多边形化，并且加粗轮轴能延缓多边形磨损；文献[13]跟踪测试不同线路 9 种车型动车组的车轮不圆度，研究表明多边形的产生与轴距、扣件类型和温度有关；文献[14]考虑了轮对旋转惯量并建立有限元模型，发现制动器摩擦力主要影响高阶多边形磨耗，饱和蠕滑力主要影响低阶多边形磨耗；文献[15]分析在实际线路运营中，钢轨波磨和车轮周长需要有严格条件才会导致车轮多边形磨耗。

为研究国内某动车组实测圆周不平顺演变规律，采用多体动力学软件 UM 建立“车辆–轨道”耦合动力学模型，分析实测廓形的演变规律和对车辆振动特性的影响。

1　车轮多边形磨耗预测模型

1.1　多边形磨耗预测过程

现有的车轮磨耗预测大多采用闭环仿真模型，相较于车轮踏面磨耗预测，车轮多边形磨耗预测有其自身特殊性，图 1 给出车轮多边形演变的仿真过程。

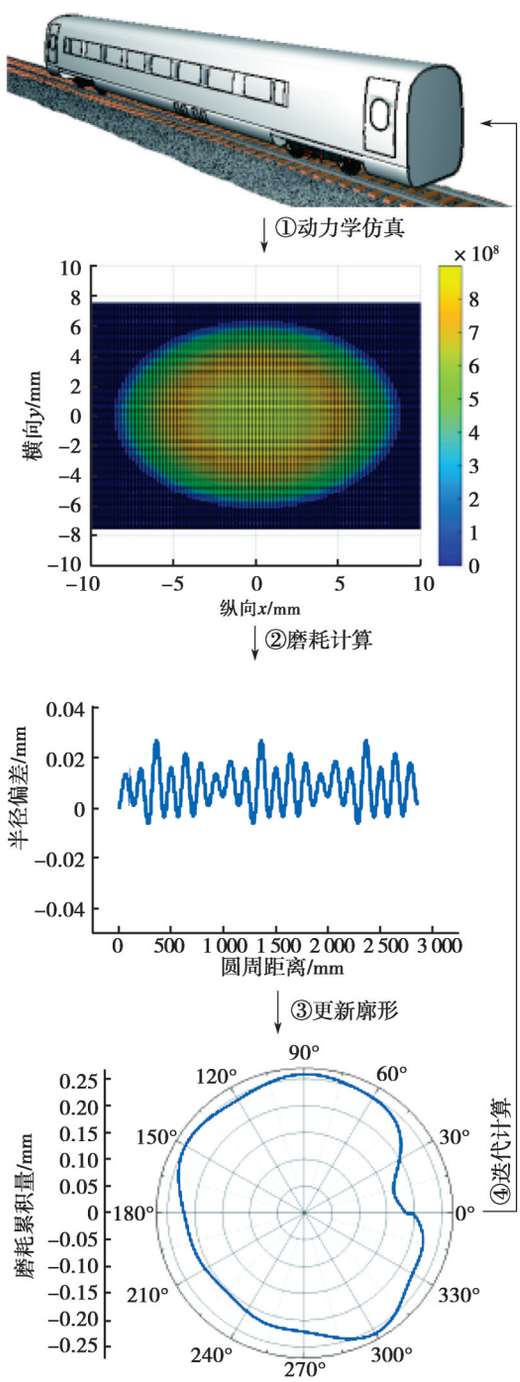


图 1　铁路车轮多边形演变仿真过程

Fig. 1　Polygonal evolutional simulation process of train wheel

首先，“车辆–轨道”模型以轨道不平顺、车轮初始不平顺和控制参数等作为边界条件计算出轮轨接触力、蠕滑率、接触点位置等数据，将其作为接触模型

的输入；其次，通过磨耗模型将接触模型的接触斑结果作为输入，计算出每个接触斑的磨耗量；最后，将各接触斑磨耗沿圆周方向累加到车轮上，根据更新条件，若达到则输出最终车轮非圆化结果，否则将更新后的圆周轮廓重新输入到“车辆-轨道”动力学模型中，进行下一次迭代。

1.2 “车辆-轨道”耦合动力学模型

基于多体动力学理论，结合国内某动车组的动力学参数对转向架的悬挂装置进行力元简化，在软件UM中建立包括1个车体、2个构架、4个轮对、8个轴箱的多刚体“车辆-轨道”动力学模型，车体、构架和轮对存在纵向、横向、浮沉、侧滚、点头和摇头6个自由度，其中轮对的浮沉和侧滚为非独立自由度，转臂的点头运动为1个自由度。车辆一系定位方式采用转臂节点定位，二系悬挂有横向垂向减振器、空气弹簧、抗侧滚扭杆、抗蛇行减振器和横向止挡。模型非线性因素包括蠕滑力、止挡和部分悬挂阻尼。转向架动力学模型如图2所示。

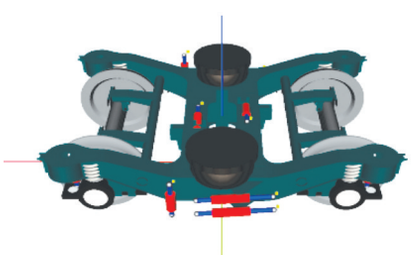


图2 转向架模型

Fig. 2 Bogie model

1.3 车轮磨耗模型

在磨耗模型中，借鉴文献[16]的研究内容，选取BRR、KTH、USFD和Zobory模型，对其在铁路车轮多边形化仿真的适用性进行研究，用解析的方法推导出磨损函数的统一表达式。本文采用USFD磨耗模型，该模型的数学表达式为

$$H_{\mathrm{USFD}}=\frac{2K_{\mathrm{USFD}}}{\pi b\rho}\cdot T_{\gamma} \tag{1}$$

式中：H_{USFD}为磨耗深度；K_{USFD}为磨耗系数；ρ为车轮材料密度；b为接触斑短轴半长；T_{γ}为总蠕滑力。

其中，总蠕滑力T_{γ}为

$$T_{\gamma}=\left|T_x\xi_x\right|+\left|T_y\xi_y\right| \tag{2}$$

式中：T_x为纵向蠕滑力；ξ_x为纵向蠕滑率；T_y为横向蠕滑力；ξ_y为横向蠕滑率。

1.4 更新策略

为了使模拟周向磨损演变可行，需设置一些假设：①车轮横向轮廓不发生变化；②名义车轮半径不变。在仿真过程中，将车轮沿圆周离散成3 600个点，按转轮数插值累加到相应离散点，从而得到圆周方向的多边形磨损量。计算各接触斑磨损量时有不同的策略：①接触斑内各条带纵向叠加后，横向平均得到瞬时磨损；②纵向叠加后横向取条带最大数值作为瞬时磨损。本文采用平均法计算瞬时磨损。新生成的径向偏差首尾可能会不连续，这不符合实际情况，本文通过傅里叶级数进行平滑拟合。

在列车实际运行时，车轮周向磨耗是连续进行的，但通过仿真只能通过更新廓形来离散化逼近。本文通过短期仿真（即车轮旋转15圈，需排除前5圈导致的初始瞬态响应影响），在USFD模型中计算10轮有效转数的累加深度，再乘以放大系数以代表更大的转数，放大系数没有明确的标准，本文选取2×10^5。按比例计算的磨损值累加到圆周上，作为每次迭代的最后一步，用于更新车轮的多边形化。

2 车轮多边形演变

仿真时选用实测车轮不圆作为输入，施加给1位轮对，不考虑轨道不平顺。迭代次数合计50次，按照每5个迭代步数的步长提取1次圆周方向的径向偏差结果。由于实测数据的复杂性，选取了典型圆周廓形进行分析。图3、图4是左右轮对均施加2阶不圆，图5、图6是左轮施加7阶不圆、右轮施加8阶不圆的车轮多边形化的演变过程。对于图3和图4，随着迭代次数的增加（即运行里程的增加），左轮第1处波峰和第2处波谷磨耗较快，并且整体有相位偏移；右轮迭代末期曲线与初期曲线存在相位差。对于图5和图6，同样发

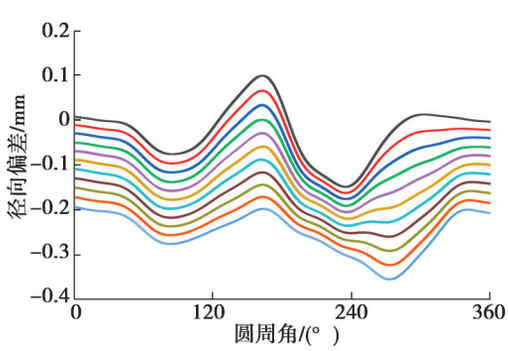


图3 左轮2阶不圆状态下的径向偏差

Fig. 3 Radial deviation under the condition of 2-order out-of-roundness of left wheel

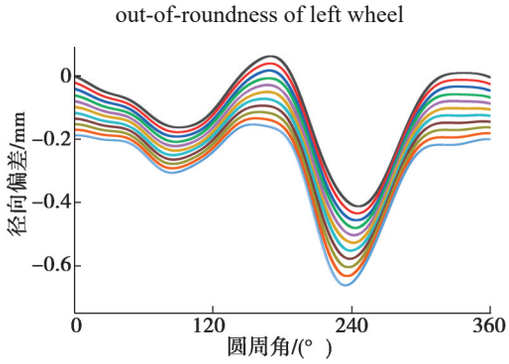


图4 右轮2阶不圆状态下的径向偏差

Fig. 4 Radial deviation under the condition of 2-order out-of-roundness of right wheel

生了某个波峰和波谷磨耗较快的现象，并且最后圆周轮廓与初始廓形有相位差。从全局看，车轮磨耗存在增加现象，但车轮多边形的波形变化不大。根据已有文献，波形演变规律可能与所选取的磨耗模型、廓形更新策略和是否考虑轨道激扰等因素有关。

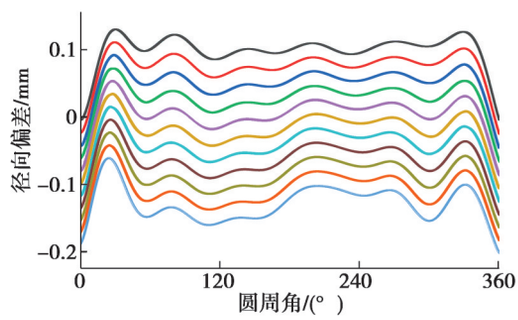


图5　左轮7阶不圆状态下的径向偏差

Fig. 5　Radial deviation under the condition of 7-order out-of-roundness of left wheel

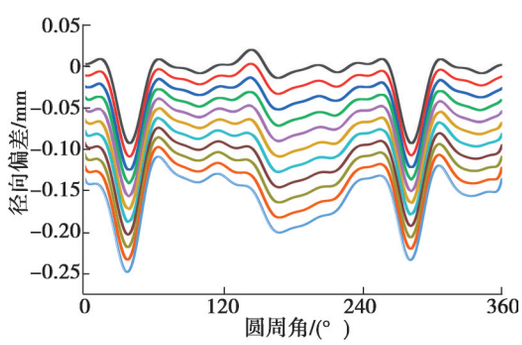


图6　右轮8阶不圆状态下的径向偏差

Fig. 6　Radial deviation under the condition of 8-order out-of-roundness of right wheel

3　车轮多边形对动力学性能的影响

3.1　平稳性指标

根据GB/T 5599—2019要求的平稳性指标，计算出的加速度频率范围为0.5~40 Hz。由计算方法可知，较高频率权重较小，对平稳性指标影响较小。图7和图8为实测1阶不圆对车体垂向和横向平稳性指标的影响，其粗糙度幅值分别为15 dB，20 dB，25 dB，30 dB。从图7和图8可知，在车速为100 km/h和150 km/h时，随着粗糙度幅值增大，垂向平稳性指标受影响较大，因为低速工况下激励频率低；粗糙度幅值大小对横向平稳性指标影响较小。

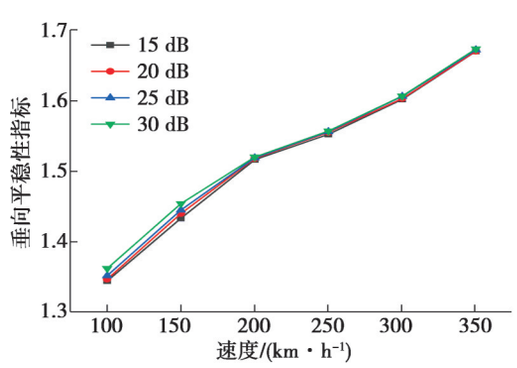


图7　1阶不圆的垂向平稳性指标

Fig. 7　Vertical stability index of 1-order out-of-roundness

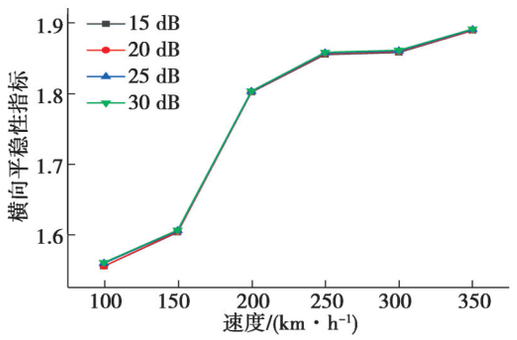


图8　1阶不圆的横向平稳性指标

Fig. 8　Lateral running stability index of 1-order out-of-roundness

3.2　轮轨作用力

当动车组高速运行时，轮轨间动作用力会对列车和钢轨造成不利影响，严重时会出现轮轨脱离，产生过大冲击力。给车轮施加粗糙度幅值为30 dB的1阶和2阶车辆不圆顺激励，轮轨垂向力与车速的关系如图9和图10所示。由图9和图10可知，轮轨垂向力极值随行车速度的增加而变大，并且2阶不圆顺车轮在不同速度下的垂向力极值大于1阶不圆顺车轮。由图11可知，轮轨力最大值随车轮不圆顺波长的增大而降低；考虑速度与粗糙度幅值的影响，从图12可知，轮轨力最大值随速度和粗糙度幅值增加而增大。由于选取实测不圆顺对应的径向偏差幅值均较小，轮轨垂向力安全阈

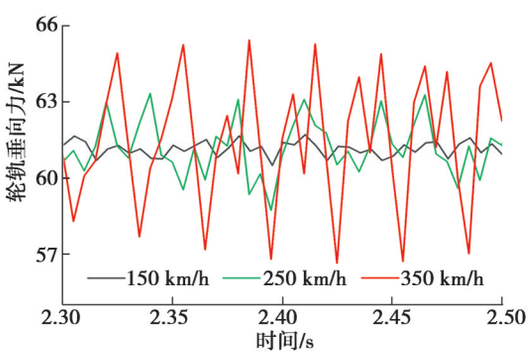


图9　不同车速下的轮轨垂向力(I)

Fig. 9　Wheel-rail vertical forces at different speeds (I)

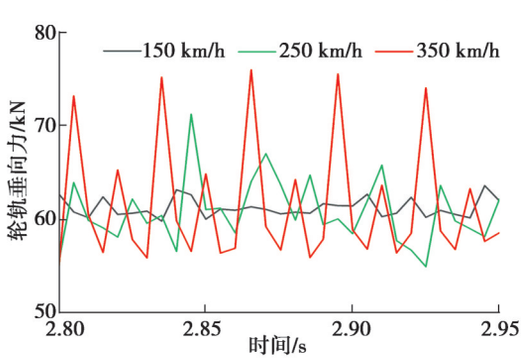


图10　不同车速下的轮轨垂向力(II)

Fig. 10　Wheel-rail vertical forces at different speeds (II)

值较大。当速度 V=300 km/h 时，粗糙度幅值由 15 dB 增至 30 dB 后，轮轨力最大值增大了 15.6%。

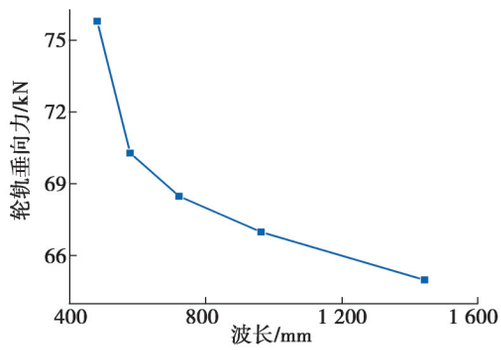


图 11　不同波长下的轮轨垂向力

Fig. 11　Wheel-rail vertical forces at different wavelengths

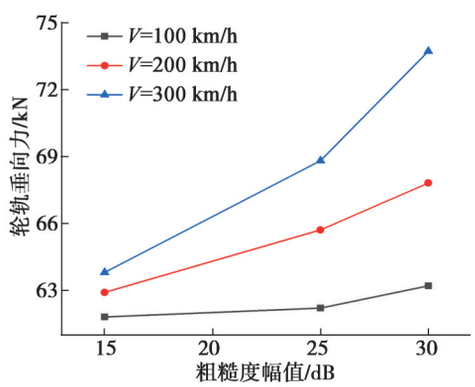


图 12　不同速度与粗糙度下的轮轨垂向力

Fig. 12　Wheel-rail vertical forces at different speeds and roughness

3.3　振动加速度

车轮多边形的激励频率定义为车轮转动频率与多边形阶数的乘积，计算公式为

$$f_{oor}=\frac{V}{\pi D}N_{oor} \tag{3}$$

式中：N_{oor}为多边形阶数；V为车速；D为车轮直径。

当车轮直径 D=0.92 m，车速 V 分别为 100 km/h，150 km/h，200 km/h，250 km/h，300 km/h 这 5 个速度时，1~4 阶车轮不圆顺对应的车轮振动频率如表 1 所示。

表 1　车轮多边形的振动频率

Table 1　Vibration frequency of the wheel polygon　Hz

速度/(km·h^{-1})	车轮多边形阶数N_{oor}			
	1	2	3	4
100	9.62	19.23	28.85	38.46
150	14.42	28.85	43.27	57.69
200	19.23	38.46	57.69	76.93
250	24.04	48.08	72.12	96.16
300	28.85	57.69	86.54	115.39

图 13 为车速 300 km/h 下 1~4 阶车体垂向加速度的幅值谱，图 14 为 1 阶车轮多边形在不同速度级下的车体垂向加速度幅值谱，测点为车辆前转向架中心地板面位置。从图 13 和图 14 可以看出，仿真后经 FFT 变换的频率与表 1 一致，并且车轮多边形引起的频带较窄；当径向偏差增加时，对应频率下的垂向加速度幅值会显著增加。由图 15 可知，车轮粗糙度幅值为 30 dB 下的构架加速度幅值明显大于车轮粗糙度幅值为 15 dB 的工况，这表明车轮粗糙度幅值对构架的垂向加速度幅值有较大影响，可能会造成部件的疲劳破坏。在列车实际运用中，及早预警车轮不圆顺幅值及阶次情况是必要的。

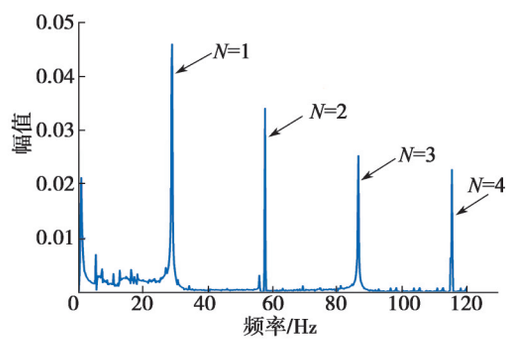


图 13　不同阶数下的特征频率

Fig. 13　Characteristic frequencies at different orders

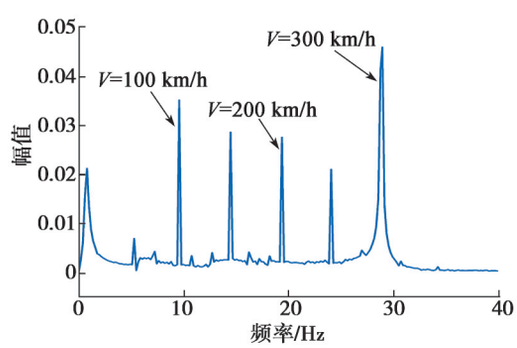


图 14　不同速度下的特征频率

Fig. 14　Characteristic frequencies at different speeds

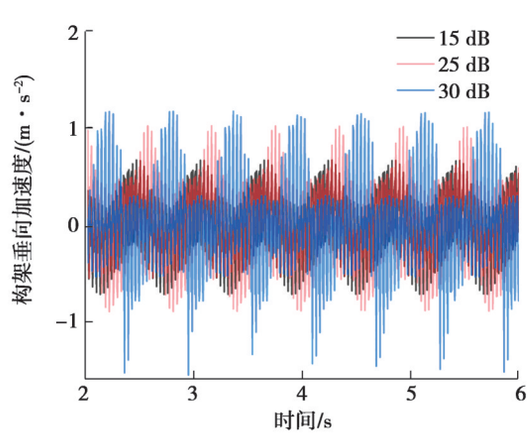


图 15　不同幅值下的构架垂向加速度

Fig. 15　Vertical acceleration of frame at different amplitudes

4　结论

本文基于车辆动力学和滚动接触理论搭建了“车

辆−轨道”耦合动力学模型，结合USFD磨耗模型建立了长期圆周磨耗预测模型，通过动力学软件和磨耗程序仿真了多边形化演变和实测车轮不圆对动力学性能的影响。结论如下：

①多边形演变过程会出现波峰和波谷磨耗较快现象，最终圆周轮廓相较于初始轮廓存在相位偏移。

②车轮多边形粗糙度幅值对垂向和横向平稳性指标影响较小；相同行车速度下粗糙度幅值变化显著影响轮轨垂向力最大值和构架垂向加速度幅值；通过对车体振动加速度进行FFT变换，其计算结果与对应车轮多边形激励频率一致。

参考文献：

[1] BARKE D W, CHIU W K. A review of the effects of out-of-round wheels on track and vehicle components[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F Journal of Rail and Rapid Transit, 2005, 219(3): 151-175.

[2] 徐冬冬, 杨九河, 丁军君. 高速列车车轮多边形动力学试验与仿真研究[J]. 机车电传动, 2021(6): 42-48.
XU Dongdong, YANG Jiuhe, DING Junjun. Dynamic test and simulation of high-speed train polygonal wheels[J]. Electric Drive for Locomotives, 2021(6): 42-48.

[3] 宋志坤, 任海星, 胡晓依, 等. 动车组车轮多边形磨耗发展历程模拟及车轮粗糙度的影响[J]. 铁道学报, 2021, 43(6): 23-28.
SONG Zhikun, REN Haixing, HU Xiaoyi, et al. Research on development process simulation and influencing factors of polygonal wear of high-speed train wheels[J]. Journal of the China Railway Society, 2021, 43(6): 23-28.

[4] 胡晓依, 任海星, 成棣, 等. 动车组车轮多边形磨耗形成与发展过程仿真研究[J]. 中国铁道科学, 2021, 42(2): 107-115.
HU Xiaoyi, REN Haixing, CHENG Di, et al. Numerical simulation on the formation and development of polygonal wear of EMU wheels[J]. China Railway Science, 2021, 42 (2): 107-115.

[5] 丁军君, 杨九河, 胡静涛, 等. 高速列车车轮多边形磨耗演变行为[J]. 机械工程学报, 2020, 56(22): 184-189.
DING Junjun, YANG Jiuhe, HU Jingtao, et al. Evolution of the polygonal wear of high-speed train wheels[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(22): 184-189.

[6] 王红兵, 李国芳, 王泽根, 等. 车轮多边形对车辆动力学性能影响分析[J]. 铁道标准设计, 2020, 64(6): 165-171.
WANG Hongbing, LI Guofang, WANG Zegen, et al. Analysis of influence of wheel polygon on vehicle dynamic performance[J]. Railway Standard Design, 2020, 64(6): 165-171.

[7] 王忆佳, 曾京, 罗仁, 等. 高速列车车轮多边形化对车辆动力学性能的影响[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2013, 45 (3): 176-182.
WANG Yijia, ZENG Jing, LUO Ren, et al. Effect of polygonal wheel on vehicle dynamic performance[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2013, 45 (3): 176-182.

[8] 高阳, 于子良, 齐洪峰, 等. 西北复杂运行条件下车轮多边形发展规律研究[J]. 噪声与振动控制, 2020, 40(3): 118-124.
GAO Yang, YU Ziliang, QI Hongfeng, et al. Study on the development regulation of wheel polygon under the complex running conditions in northwest China[J]. Noise and Vibration Control, 2020, 40(3): 118-124.

[9] JOHANSSON A, ANDERSSON C. Out-of-round railway wheels−a study of wheel polygonalization through simulation of three-dimensional wheel-rail interaction and wear[J]. Vehicle System Dynamics, 2005, 43(8): 539-559.

[10] CAI Wubin, CHI Maoru, WU Xingwen, et al. Experimental and numerical analysis of the polygonal wear of high-speed trains[J]. Wear, 2019, 440/441: 203079.

[11] WU Xingwen, RAKHEJA S, CAI Wubin, et al. A study of formation of high order wheel polygonalization[J]. Wear, 2019, 424/425: 1-14.

[12] 李伟, 李言义, 张雄飞, 等. 地铁车辆车轮多边形的机理分析[J]. 机械工程学报, 2013, 49(18): 17-22.
LI Wei, LI Yanyi, ZHANG Xiongfei, et al. Mechanism of the polygonal wear of metro train wheels[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(18): 17-22.

[13] 王鹏, 陶功权, 杨晓璇, 等. 中国高速列车车轮多边形磨耗特征分析[J/OL]. 西南交通大学学报: 1-9 (2021-11-25) [2022-02-22]. https://kns. cnki. net/kcms/detail/51.1277.U.20211124.1532.002.html
WANG Peng, TAO Gongquan, YANG Xiaoxuan, et al. Analysis of polygonal wear characteristics of Chinese high-speed train wheels[J/OL]. Journal of Southwest Jiaotong University: 1-9 (2021-11-25)[2022-02-22]. https://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1277.U.20211124.1532.002.html.

[14] 吴波文, 刘婷, 王晓翠, 等. 基于有限元的高速列车车轮多边形磨耗成因分析[J]. 摩擦学学报, 2022, 42(1): 131-141.
WU Bowen, LIU Ting, WANG Xiaocui, et al. Formation of polygonalization of the high-speed train wheels based on the finite element method[J]. Tribology, 2022, 42(1): 131-141.

[15] 吴越, 韩健, 左齐宇, 等. 钢轨波磨对高速列车车轮多边形磨耗产生与发展的影响[J]. 机械工程学报, 2020, 56(17): 198-208.
WU Yue, HAN Jian, ZUO Qiyu, et al. Effect of rail corrugation on initiation and development of polygonal wear on high-speed train wheels[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(17): 198-208.

[16] PENG Bo, IWNICKI S, SHACKLETON P, et al. Comparison of wear models for simulation of railway wheel polygonization[J]. Wear, 2019, 436/437: 203010.