

# 车轮多边形化对高速列车齿轮传动系统性能影响分析

许思思<sup>1</sup> 黄冠华<sup>2</sup>

(1 中国中车工业研究院有限公司 北京 100070; 2 成都西交金测智能科技有限公司 四川 成都 610037)

**摘要:** 文章研究列车齿轮传动系统在车轮多边形工况下的振动。首先利用周期函数模拟车轮周期性多边形不平顺, 建立包含齿轮啮合系统的动车组动车动力学模型。基于此, 可获得内外激励共同作用下齿轮传动系统各部件加速度、动态啮合力等振动指标。最后进行了台架试验分析。计算结果和试验结果都表明, 齿轮系统加速度和啮合力在车轮多边形激励下明显增大, 高阶激励造成的振动更为剧烈, 系统振动评估时不能忽视齿轮内部动态激励的影响。

**关键词:** 车轮多边形; 齿轮传动系统; 波深; 啮合力; 振动

## 0 引言

车轮踏面形状是影响车辆轮轨接触动力学性能的主要因素之一。在车轮出厂时, 尽管踏面形状比较复杂, 但还是有标准踏面可遵循, 在圆周方向表现为圆形。随着车轮的投入运营, 轮轨间的磨耗日益增加, 圆周方向不再是圆形, 而是会形成各种近似于圆形的多边形或不同多边形的组合, 这种现象通常被称为车轮的多边形化或车轮多边形磨耗。车轮多边形化对于车辆的动力学性能有着重要影响, 众多学者对此进行了研究分析, 主要的研究方向集中在车轮的多边形化形成机理和对车辆轮轨接触的影响。

铁路车辆驱动主要依赖于齿轮传动, 车轮多边形化将直接影响齿轮传动系统的传动平稳性。与此同时, 齿轮传动系统啮合会引发内部的周期激励。齿轮传动系统在这种内部周期激励和外部轮轨激励的影响下, 在实际运营中也不可避免出现各种各样的故障。目前, 轨道交通状态修正在大力推广, 状态修的首要任务就是判别车辆各部件的准确状态, 而部件间的结构约束导致的振动关联使得部件间状态相互影响, 理清部件间振动影响的关系直接影响状态修的实施效果。因此, 研究车轮发生多边形磨耗时齿轮系统的振动行为具有重要分析意义。

文章对于车轮多边形这种特殊激励下齿轮传动系统的振动行为进行了重点分析, 首先建立精确描述齿轮传动系统的轮齿啮合动力学模型, 构建包含这两种激励模型下的车辆动力学模型。针对缺陷工况难以进行线路试验的问题, 采用室内台架试验方法, 利用可以模拟车轮多边形激励的比例滚轮激励试验平台, 进一步分析和验证理论仿真分析得到的规律。

## 1 车轮多边形化模型

采用谐波函数对车轮的圆周变化进行模拟, 计算方

程如下:

$$\begin{cases} \Delta r = A \sin(n\beta + \beta_0) \\ r(\beta) = R - \Delta r \\ \beta(t) = \beta(t-1) + \omega\Delta t \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\Delta r$ —轮径差;

$A$ —发生多边形时不圆度大小;

$n$ —多边形边数;

$\beta$ —车轮转动角度;

$R$ —车轮半径。

图1为基于式(1)计算得到的示意图, 分别模拟车轮1阶、2阶、3阶和20阶多边形的示意图。

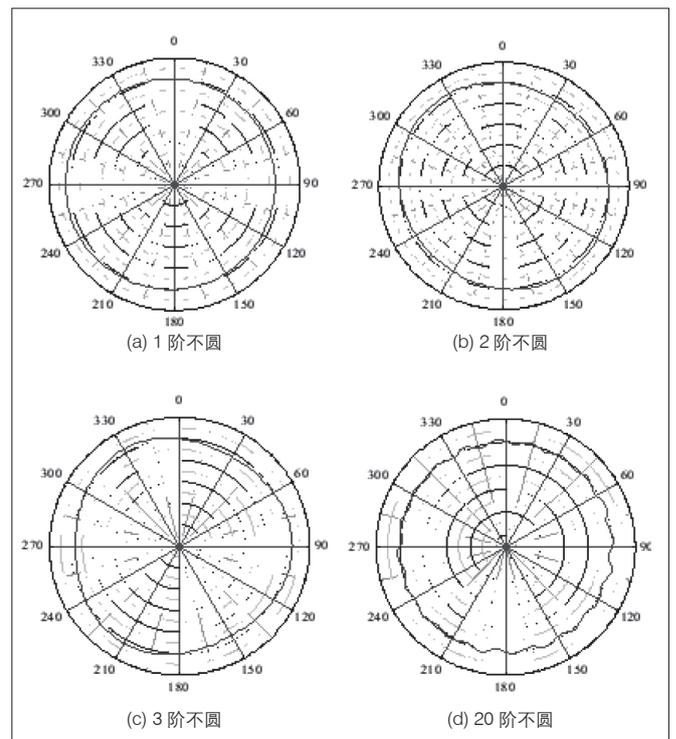


图1 车轮多边形化图

### 2 齿轮啮合模型

针对某型高速动车组动车车辆，通过多体动力学软件 SIMPACK 完成车辆的整车动力学建模。建模时所用的齿轮系统参数主要如下：齿轮模数 6mm，压力角  $20^\circ$ ，传动比 2.43，大小轮齿数分别为 85 和 35，齿轮中心距 380mm，宽度 65mm。图 2 是建立好的模型可视化图。

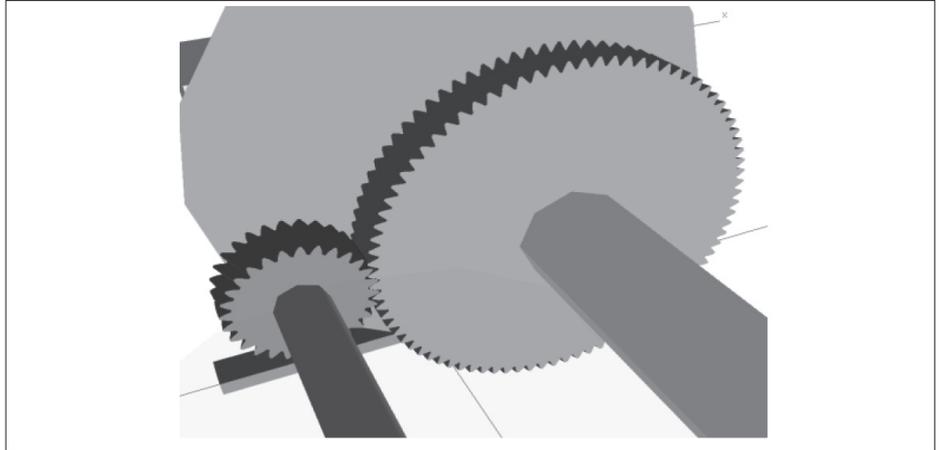


图 2 齿轮啮合动力学模型

### 3 车辆系统动力学模型

车辆动力学建模技术比较成熟，传动的模型一般只考虑车体、构架、车轮和轴箱等主要部件。本文在此基础上，为了模拟齿轮传动的激励，增加了齿轮箱、驱动主动轮和传动从动轮的模型，可视化模型如图 3 所示。

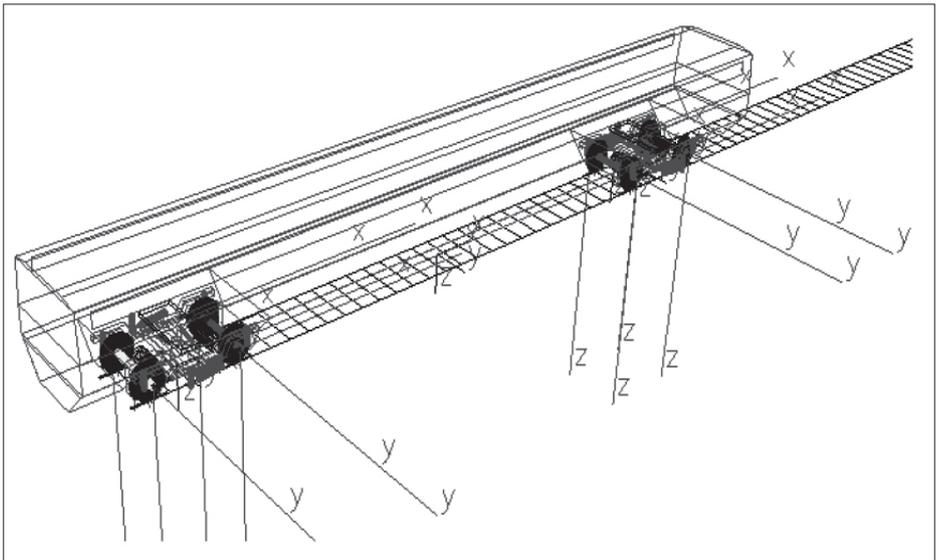


图 3 动车整车动力学模型

### 4 计算结果分析

利用上述建立的模型进行理论仿真，仿真速度为 300km/h，取波深 0.1mm，由于啮合频率比较高，需要严格遵守采样定理，这里选择的采样频率为 10kHz，分别计算车轮在 1 阶、2 阶和 3 阶多边形工况下的动态性能。

图 4 表明，当车轮出现多边形磨损后，箱体加速度、齿间啮合力 and 主从动齿轮角加速度都明显增大，这在高阶的时候表现尤为明显。这也是在列车日常运营中用户需要对车轮多边形相关幅值进行监测控制的原因。为了分析不同波深幅值的影响，图 5 取不同幅值进行了分别计算，从结果可知，随着波深幅值的加大，振动波动逐渐显著，在实际运营中应严密监控轮对的径跳量，防止径跳过大引起的转向架剧烈振动。

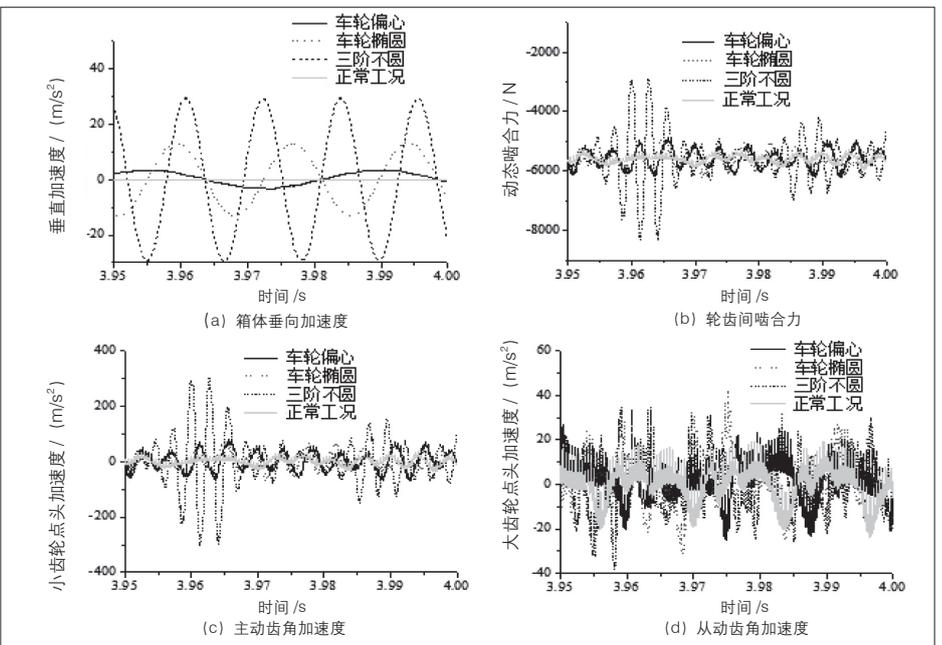


图 4 不同阶数多边形影响

车轮多边形化往往不是单一的某一阶，而是具有多阶属性。根据文献的现场测试结果，模拟多阶车轮多边形化，主要考虑车轮的一、三、六、十一、十五、十八和二十阶的组合，波深幅值分别取 0.01mm、0.02mm、0.1mm、0.05mm、0.06mm、0.05mm 和 0.06mm，其他条件不变。图 6 是仿真得到的箱体加速度、轮齿间啮合力和主从动轮角加速度结果。

同时为了分析各阶激励频率的真实影响占比，图 7 对轮齿间啮合力进行了频谱分析。式 (2) 为计算特征频率的公式。

$$f = Nv / (2\pi R_0) \quad (2)$$

式中：N—阶数；

v—运行速度；

R<sub>0</sub>—滚动圆半径。

从图 6 和图 7 中可以看出，齿轮系统的内部周期激励（体现在轮齿啮合频率）和轮轨的外部激励（体现在车轮各阶多边形激励频率）在齿轮系统的动态响应中都有影响，这便验证了列车传动系统的振动会受到内外动态激励影响的结论；同时还可以发现，高阶和波深幅值大的多边形化对于传动系统的振动影响更为显著。

### 5 试验分析

上述通过仿真计算分析了车轮多边形磨损后对齿轮传动系统影响。在列车的实际服役过程中，对于车轮多边形有着严格的检查机制和管理流程，一旦发现严重的车轮多边形，都会提前进行镟轮等操作，因此服役线路条件下

很难获得相关的工况数据。为此，西南交通大学牵引动力国家重点实验室研制了一款比例滚轮激励试验台，试验台能够模拟车轮缺陷工况下转向架振动变化。

图 8 是小比例滚轮激励试验台的原理图。小滚轮固定在地面基座上，通过电机齿轮箱进行驱动，与小滚轮

接触的是 1:1 的运营车辆轮对。在实际试验中，为了更加符合实际运营工况，通常选用 1:1 的运营车辆转向架，转向架一侧的轮对在轨道上，另一侧与小滚轮进行接触，转向架纵向有约束，防止在滚轮与车轮跑合的同时产生纵向移动。垂向载荷方面，通过两个液压作动器模拟二

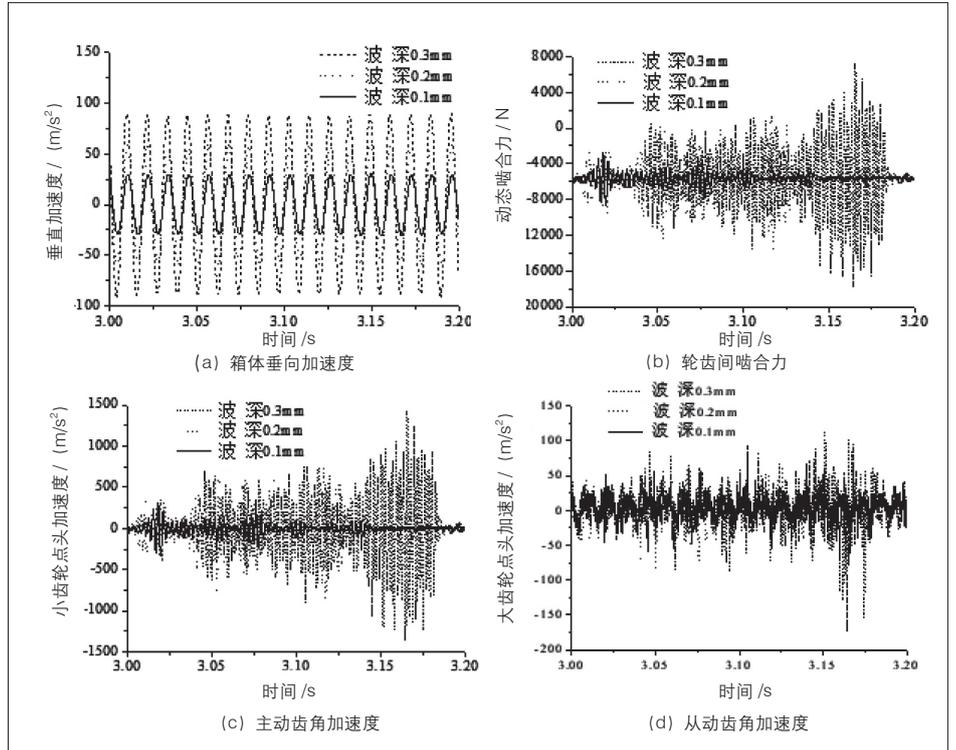


图 5 波深对齿轮振动特性影响

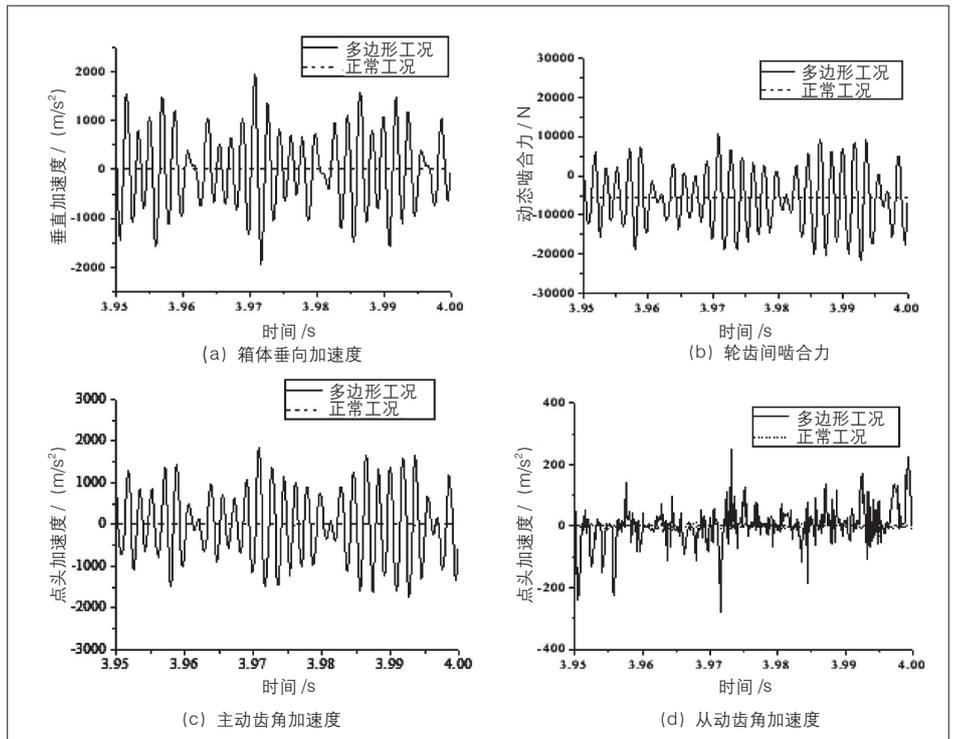


图 6 车轮多阶多边形工况影响

系悬挂承担的车体与转向架的相互作用，施加在转向架的枕梁上，载荷大小可根据试验的工况进行调节。小滚轮可以进行加工和更换，故而可以在小滚轮上设置或再现现场难以实施的失效形式和故障方式，比如通过在小滚轮的踏面圆周方向加工成具有一定径跳量的多边形来模拟车轮多边形激励。驱动电机为三相异步驱动电机，由电机驱动齿轮箱带动小滚轮旋转，模拟调节车轮的转速，便可以模拟车轮多边形激励下的各关键部件动态响应，进而实现车轮缺陷工况下转向架的振动关联分析。图9是建成的小比例滚轮激励试验台实物图。

为了对本文的建模方法和仿真结果进行有效验证分析，在小比例滚轮激励试验台上进行了试验。转向架选用与本文仿真条件一致的国内某高速动车组动车转向架，小滚轮被加工成13阶多边形，对应成车轮为20阶多边形激励。径跳量幅值设置为0.05mm，受限于实验条件和排除其他因素的干扰，试验只考虑单纯的多边形激励，轨道不平顺激励和钢轨波磨等因素不予以考虑。分别在齿轮箱的小齿轮和大齿轮轴承处布置振动加速度传感器，同时监控转轴的转速。

选取齿轮箱上小齿轮轴承座垂向加速度为观测分析对象，图10是齿轮箱上小齿轮轴承座处的垂向加速度，图11是对应的频率分析结果。从图中可以看出，在车轮多边形激励下，箱体的加速度响应显著增大，这与上述仿真的结果一致。在频谱图的特征频率中，26Hz是小滚轮的转频，345Hz是车轮20阶多边形特征频率，从中发现，一旦发生车轮多边形，影响的不仅仅是车轮本身，在齿轮箱箱体的振动响应中也有显著的体现，这为后续故障关联诊断提供了新的思路。

### 6 结语

基于文中分析，总结结论如下。

(1) 车轮多边形化对高速列车齿轮传动系统性能有重要的影响，影响的关键参数是多边形的阶数和波深幅值。

(2) 由于齿轮传动系统啮合频率和固有频率较高，因此更容易与车轮高阶多边形激励频率耦合发生共振。

(3) 列车齿轮传动系统不仅承受轮轨外部激励，内部啮合引起的动态激励也能使齿轮系统的振动增大，内外激励的同时作用也使得齿轮传动系统振动特性区别于其他部件，在动车组的服役中应尤其注意。

(4) 车轮一旦发生多边形故障，在齿轮箱的箱体中也能得到较为明显的体现。在日常车辆运营中，可以将

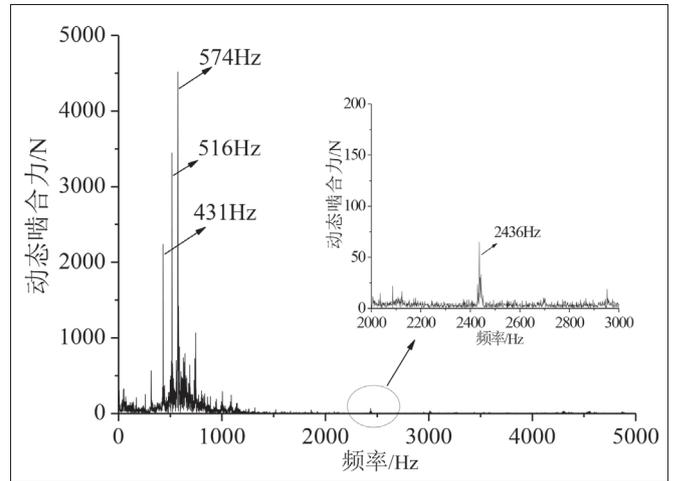


图7 齿轮啮合力频谱图

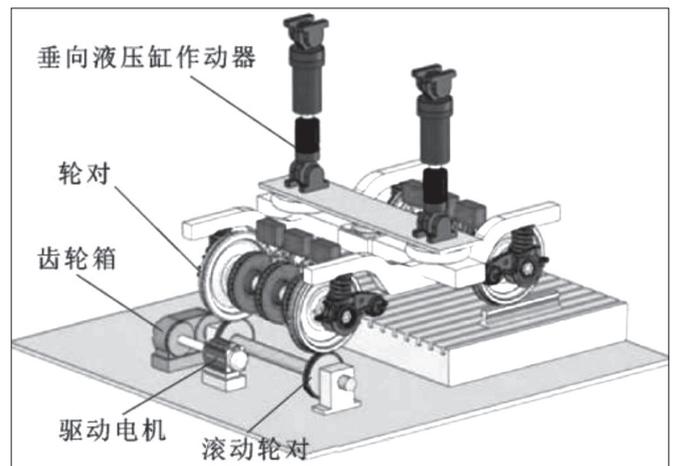


图8 小比例滚轮激励试验台原理图

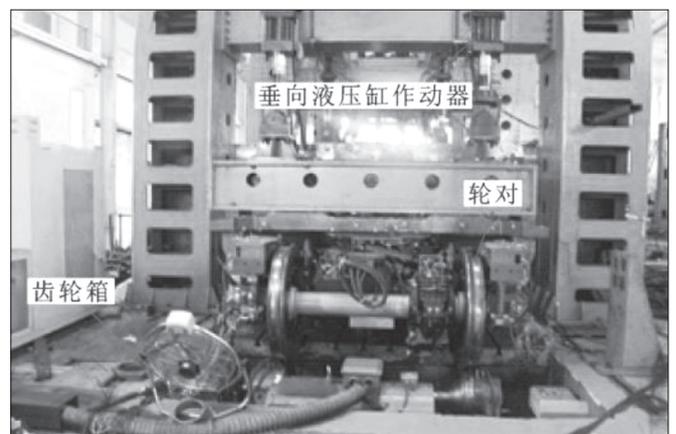


图9 小比例滚轮激励试验台实物图

箱体的状态监测与车轮的径跳量检查进行关联验证，提高部件故障的诊断率，为车辆的状态修提供更准确的数据支撑。

### 参考文献：

[1]Johansson A.Out-of-round railway wheels—assessment of wheel tread irregularities

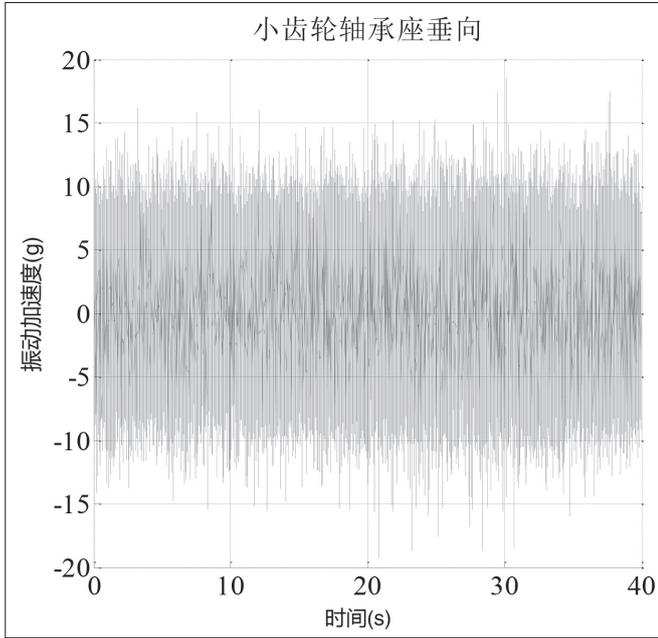


图 10 齿轮箱振动加速度

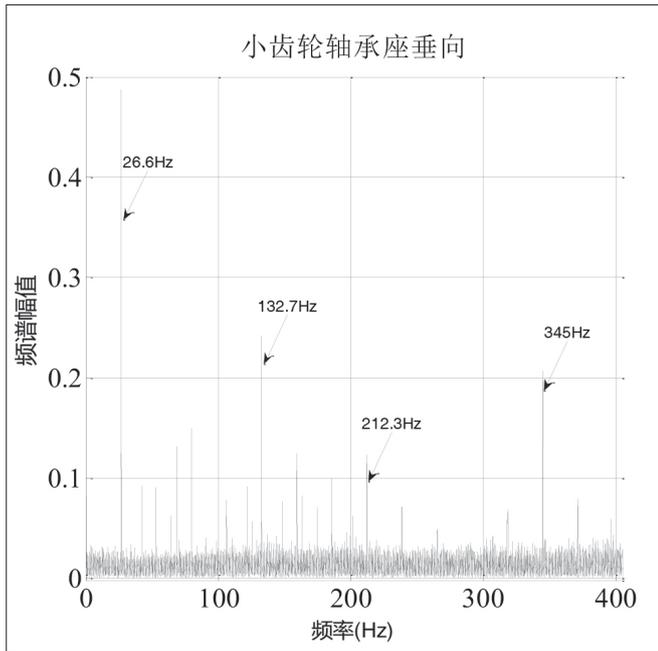


图 11 齿轮箱振动加速度频谱

in train traffic[J]. Journal of Sound and Vibration, 2005, 293(3/5): 795-806.

[2] 马卫华, 罗世辉, 宋荣荣. 地铁车辆车轮多边形化形成原因分析 [J]. 机械工程学报, 2012, 48(24): 106-111.

[3] Zhiwei Wang, Guiming Mei, Weihua Zhang, et al. Effects of polygonal wear of wheels on the dynamic performance of the gearbox housing of a high-speed train[J]. Proceedings of Institute of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2018, 232(06): 1852-1863.

[4] 邓永果. 车辆非圆化对高速车轮系统动力学性能的影响 [D]. 成都: 西南交通大学, 2014.

[5] Xuesong Jin, Lei Wu, Jianying Fang, et al. An investigation into the mechanism of the polygonal wear of metro train wheels and its effect on the dynamic behavior of a wheel/rail system[J]. Vehicle System Dynamics, 2012, 50(12): 1817-1834.

[6] 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(03): 176-182.

[7] 黄冠华, 高速列车齿轮传动系统动态特性研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2015.

[8] 黄冠华, 周宁, 张卫华, 等. 动态激励下高速列车齿轮传动系统振动特性分析 [J]. 铁道学报, 2014, 36(12): 20-26.

[9] 罗仁, 曾京, 鄢平波, 等. 高速列车车轮不圆顺磨耗仿真及分析 [J]. 铁道学报, 2010, 32(05): 30-35.

[10] 朱海燕, 王超文, 鄢平波, 等. 基于小滚轮高频激励的高速列车齿轮箱箱体振动试验 [J]. 交通运输工程学报, 2020, 20(05): 135-150.

作者简介: 黄冠华(1987.03-), 男, 汉族, 江西吉安人, 博士研究生, 研究方向: 机械系统动力学。