

地铁车轮多边形磨耗动态监测评价指标

陈洪轩¹ 马盛况² 沈 钢¹ 余道洪¹ 王伟铭¹ 范广能¹

(1. 同济大学铁道与城市轨道交通研究院, 201804, 上海; 2. 中车南京浦镇车辆有限公司, 210031, 南京)

摘 要 [目的] 地铁车轮的多边形磨耗会使车辆产生振动, 影响车辆运行的平稳性和舒适性。现有的车轮不圆度静态检测手段需要消耗大量的人力、物力, 因此需对车轮多边形磨耗的严重程度进行动态监测。[方法] 建立整车刚性、轨下基础柔性动力学仿真模型; 提出基于钢轨振动加速度的车轮多边形阶数特征分析方法, 分析车轮多边形磨耗评价指标, 并基于实测数据对其进行验证。[结果及结论] 车轮多边形程度指标 K 受轨道不平顺影响小, 能够定量地反映车轮的不圆程度; 基于评价指标 K 计算获得的车轮多边形幅值与实际车轮的圆周径跳幅值具有较好的一致性。

关键词 地铁; 车辆; 车轮多边形磨耗

中图分类号 U270.33

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.12.038

Dynamic Monitoring and Evaluation Index of Metro Wheel Polygonal Wear

CHEN Hongxuan¹, MA Shengkuang², SHEN Gang¹, YU Daohong¹, WANG Weiming¹, FAN Guangneng¹

(1. Institute of Rail Transit, Tongji University, 201804, Shanghai, China; 2. CRRC Nanjing Puzhen Vehicle Co., Ltd., 210031, Nanjing, China)

Abstract [Objective] Metro wheel polygonal wear causes vehicle vibration, affecting the smoothness and comfort of the vehicle operation. The existing static detection methods for wheel out-of-roundness consume a lot of manpower and material resources, a dynamically monitoring for the wheel polygonal wear severity is required. [Method] A dynamic simulation model of whole-vehicle rigidity and sub-rail foundation flexibility is established; a wheel polygonal order characteristic analysis method based on rail vibration acceleration is proposed; the wheel polygonal wear evaluation index is analyzed and verified based on measured data. [Result & Conclusion] The wheel polygonal degree index K is less affected by track irregularity and can quantitatively reflect the degree of wheel out-of-roundness; the wheel polygonal amplitude calculated based on the evaluation index K has better consistency with the actual wheel circumferential radial runout amplitude.

Key words metro; vehicle; wheel polygonal wear

车轮多边形磨耗是车轮失圆的一种特殊类型, 其指车轮半径沿着车轮整个圆周呈周期性或非周期性的变化。在地铁列车运行过程中, 由车轮多边形磨耗引起的振动不仅会影响乘坐舒适性, 而且当振动频率接近列车零部件的固有频率时, 二者会产生共振, 降低车轴、轴承等构件的使用寿命, 进而影响地铁列车的安全运营。

国内外已有较多学者针对车轮缺陷监测进行了研究。文献[1]提出了一种平行四边形测量机构, 基于垂向位移识别车轮失圆。文献[2]采集了钢轨振动加速度, 通过加速度多阶谱有效值是否超过一定阈值来判断车轮的健康状况。在已有文献的动态监测方法中, 大多研究主要集中于通过轴箱振动情况来判断车轮多边形磨耗情况。鉴于此, 本文提出一种基于钢轨振动加速度的车轮多边形阶数特征分析方法, 建立整车刚性、轨下基础柔性动力学仿真模型, 并计算轨道振动加速度信号, 通过PSD(功率谱密度)分析振动信号的主要频率, 从而得到车轮多边形的阶数。基于上述研究, 本文进一步提出了能够反映车轮多边形磨耗程度的评价指标 K , 并通过实际车轮的圆周径跳验证了该指标的有效性。本文研究可为车轮的镟修和维护提供一定的指导。

1 建立车-轨刚柔耦合动力学模型

在列车运行过程中, 由于车轮存在多边形磨耗, 轮对会对钢轨造成一定的冲击, 进而使钢轨发生振动。由于本文是基于钢轨的振动信号进行分析的, 无法忽略扣件位置对钢轨振动加速度的影响, 因此不能把钢轨设置为刚性模型。

为了获得车轮整个圆周引起的钢轨振动加速度信号, 在右侧钢轨底部设置4个振动加速度传感器^[3]。在实际铁路线路中, 钢轨为无限长的柔性梁, 在设置传感器时应尽量避免因柔性轨边界条件

导致的振动加速度信号测量误差,故将 4 个振动加速度传感器布置在钢轨中间位置,其位置示意图如图 1 所示。所建立的车-轨刚柔耦合动力学模型示意图如图 2 所示。

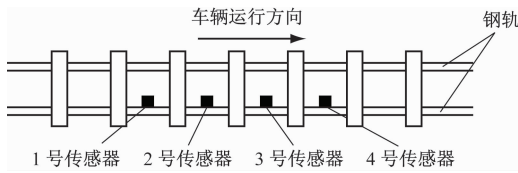


图 1 振动加速度传感器位置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of vibration acceleration sensor location

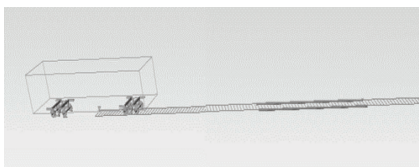


图 2 车-轨刚柔耦合动力学模型示意图

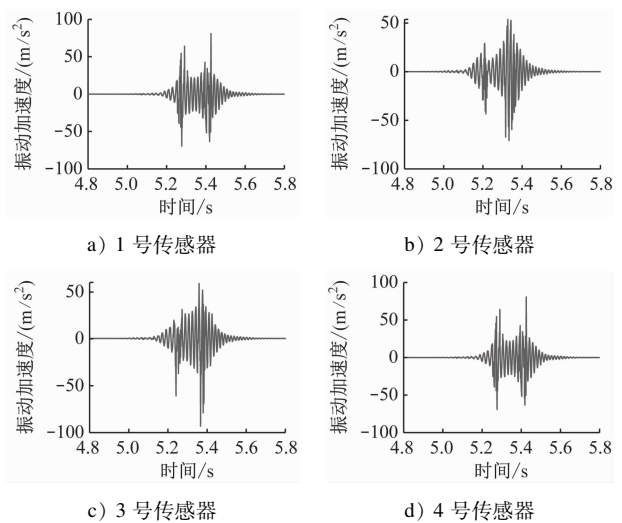
Fig. 2 Schematic diagram of vehicle-track rigid flexible coupling dynamics model

2 基于轨道振动加速度的车轮多边形阶数特征分析

将车-轨刚柔耦合动力学模型的 2 位轮对设置为失圆,其他车轮设置为正常轮对^[4],通过数值模拟软件对振动加速度传感器信号进行分析。设置车辆运行速度为 70 km/h,车轮失圆幅值为 0.1 mm,1 位轮对失圆阶数为 8 阶,2 位轮对失圆阶数为 7 阶。为了使整个车辆模型均通过柔性钢轨,仿真时长设置为 10 s,输出传感器在 4.8 ~ 5.8 s 内产生的振动加速度信号(其余时间振动加速度传感器的数值为 0)。不同时间下 4 个传感器的振动加速度响应曲线如图 3 所示。

由图 3 可知:4 个传感器的振动加速度信号均在一次受迫振动未衰减为 0 时,又被激起了第二次振动。当轮对经过钢轨某位置时,轮轨作用力的波及范围约为 4.2 m,即相邻两轮对对钢轨的振动加速度会产生相互影响。为了获得单一车轮对钢轨的振动响应,需对振动加速度信号进行分轴处理。仿真车轮周向长度为 2.64 m,整个车轮通过某一传感器的时间为 0.136 s,该车轮通过该传感器的时间间隔为 0.068 s,则 2 位轮对通过 1 号—4 号传感器的通过时间分别为 5.244 ~ 5.380 s、5.275 ~ 5.411

s、5.306 ~ 5.422 s、5.337 ~ 5.473 s。不同时间下 4 个传感器的振动加速度分轴曲线图如图 4 所示。



注:振动加速度以垂直地面向上为正,以垂直地面向下为负;余类同。

图 3 不同时间下 4 个传感器的振动加速度响应曲线

Fig. 3 Vibration acceleration response curves of the four sensors at different times

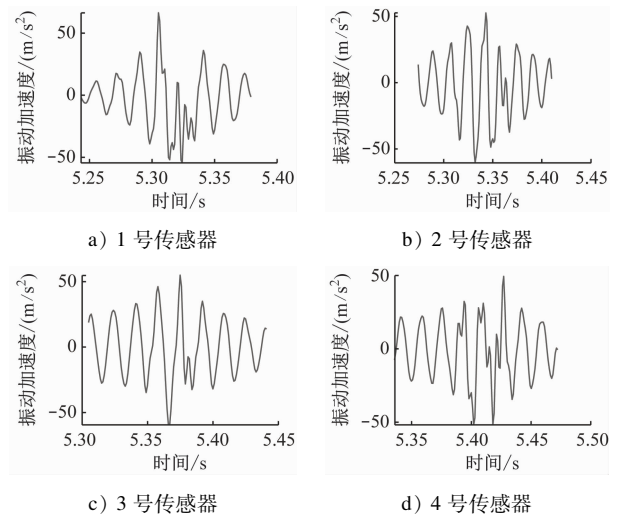


图 4 不同时间下 4 个传感器的振动加速度分轴曲线图

Fig. 4 Vibration acceleration axis curves of the four sensors at different times

对分轴处理后的振动加速度信号进行功率谱密度分析。利用平均功率图法返回加速度信号的 PSD。利用 MATLAB 软件中的 Periodogram 函数,对 PSD 设置加窗函数(矩形窗)、采样频率等参数。不同振动频率下,1 位轮对和 2 位轮对的振动加速度 PSD 值 P 如图 5 和图 6 所示,其中 f 为振动频率。

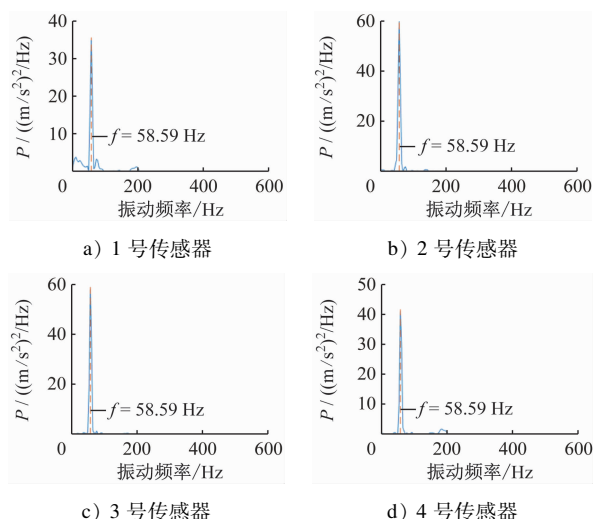


图5 不同振动频率下的1位轮对振动加速度PSD

Fig. 5 Vibration acceleration PSD of No. 1 position wheelset at different vibration frequencies

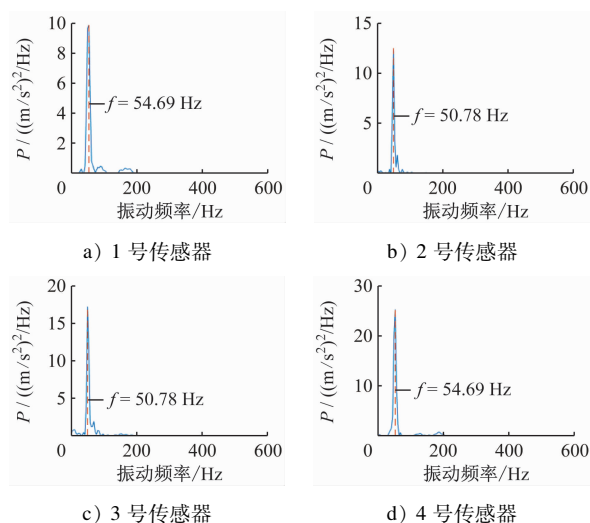


图6 不同振动频率下的2位轮对振动加速度PSD

Fig. 6 Vibration acceleration PSD of No. 2 position wheelset at different vibration frequencies

车轮多边形振动频率 f_0 可以表示为:

$$f_0 = \frac{nv}{0.0036\pi d} \quad (1)$$

式中:

v ——车辆运行速度,单位 km/h;

n ——车轮不圆阶数;

d ——车轮轮对直径,单位 mm。

由图5可知:1位轮对4个振动传感器的PSD最大值均出现在频率为58.59 Hz处,与式(1)的8阶多边形振动频率58.95 Hz较为接近,两者具有对应关系。由图6可知:2位轮对中,2号和3号传感

器的PSD最大值均出现在频率为50.78 Hz处,与式(1)的7阶多边形振动频率51.58 Hz较为接近;1号和4号传感器的PSD最大值均出现在频率为54.69 Hz处,处在7阶多边形振动频率和8阶多边形振动频率之间,说明1位轮对的多边形磨耗结果对这两者产生了影响。综上所述,基本可以通过频域分析获得车轮多边形磨耗的主要阶数。

3 车轮多边形磨耗评价指标

3.1 基于钢轨振动加速度PSD最大值

在判断车轮失圆的严重程度时,多边形阶数只是其中一个方面,单一的多边形阶数并不能判断车轮的运行状态,因此需要引入新指标,以判断车轮的失圆程度。

定义多边形程度指标 K ,以1号传感器的数据为例,计算步骤为:将振动加速度信号按车轴分开,求出PSD图像后,记录PSD图中大于0.5倍最大值的所有尖点对应频率及频率总个数 n ;以第 i 个尖点对应频率为中心频率,计算1/3倍频程的上、下限频率,并求出频率范围内的面积 $S(i)$;计算整个频域范围内的总面积 S_a ,然后根据多边形程度指标计算式求出相应的 K 值。

多边形程度指标 K 可以表示为:

$$K = \sum_{i=1}^n \left(\frac{S(i)}{S_a} S(i) \right) \quad (2)$$

式中:

$S(i)/S_a$ ——该主频的权重值。

在求解 K 值的过程中,将所记录的尖点对应频率与该车辆运行速度下的车轮各阶多边形激励频率进行对比,即可得到车轮多边形阶数。由此可知,该方法能够在求解 K 值的同时,将多边形阶数表征出来。

不同车轮多边形阶数下的 K 值如表1所示。由表1可知:随着车轮多边形阶数的升高, K 值整体呈现上升的趋势。将 K 值分为两个区间:7~9阶的 K 值一般小于200;10~15阶的 K 值均大于400。因此,该方法可以在一定程度上获得车轮多边形的恶化情况。

3.2 基于轨道不平顺条件

在不同线路条件下,评价指标应具备一致性,即其受到轨道线路的影响应尽可能少。在上述仿真条件下,对轨道添加美国6级、5级和4级随机不平顺轨道谱,并在此基础上计算 K 值。下文以车轮

表 1 不同车轮多边形阶数下的 K 值Tab.1 K values at different wheel polygon orders

车轮多边形阶数	K 值
7	35.55
8	108.86
9	92.16
10	455.77
11	619.29
12	482.82
13	793.48
14	635.81
15	1 034.70

多边形阶数 = 8 为例进行分析。

不同轨道不平顺条件下的 K 值如表 2 所示。由表 2 可知:改变轨道不平顺条件对 K 值的影响较大;添加了轨道不平顺谱后的 K 值均大于 150,比无不平顺条件下的 K 值增大了约 40%。因此,需优化 K 值的计算方法。

表 2 不同轨道不平顺条件下的 K 值Tab.2 Values of K under different track irregularity conditions

不平顺情况	K 值
无不平顺	108.85
添加美国 6 级随机不平顺谱	152.14
添加美国 5 级随机不平顺谱	171.94
添加美国 4 级随机不平顺谱	151.25

对振动加速度求解 PSD 后取以 10 为底的对数,并剔除对数计算后小于 0 的数据值,所记录的尖点对应频率改为大于 0.8 倍 PSD 最大值。优化后,不同振动频率下的 1 号传感器振动加速度 PSD 如图 7 所示。

在 K 值计算过程中,还需考虑主频能量所占权重。在 1/3 倍频程范围内,距离中心频率越近的能量越应该被凸显,距离中心频率越远的频率对应的能量影响应被忽略。因此,设置以中心频率为均值的正态分布权重函数(见图 8)对 PSD 进行加权,在美国 5 级随机不平顺谱下,加权后的 PSD 值 P_1 如图 9 所示。优化中心频率后,不同轨道不平顺条件下的 K 值如表 3 所示。由表 3 可知:优化后的 K 值受到轨道不平顺的影响较小。

优化后的 K 值计算步骤为:

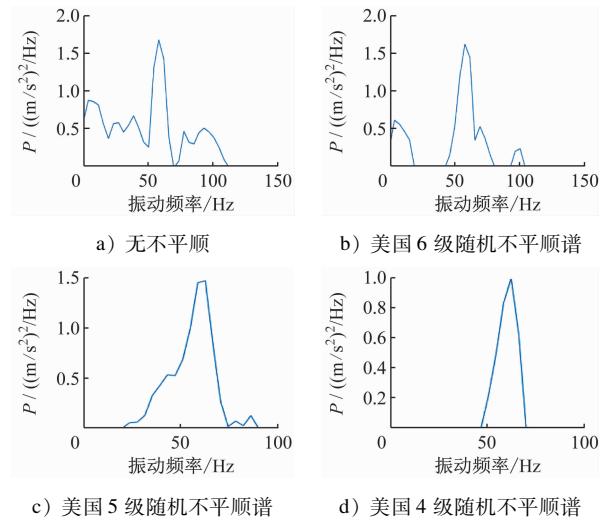


图 7 优化后不同振动频率下的 1 号传感器振动加速度 PSD

Fig. 7 Vibration acceleration PSD of sensor No. 1 at different vibration frequencies after optimization

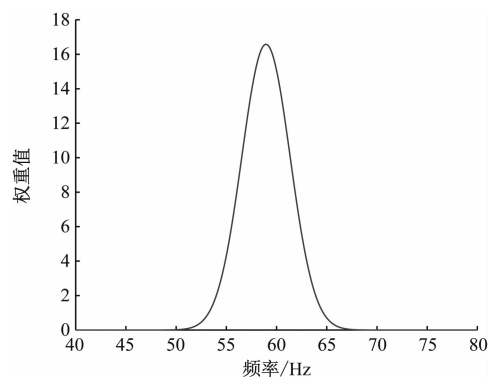


图 8 正态分布权重函数

Fig. 8 Normal distribution weight function

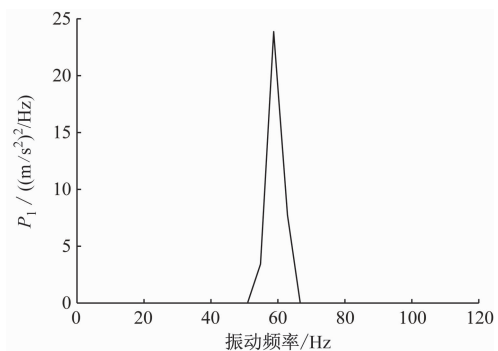


图 9 美国 5 级随机不平顺谱下加权后的 PSD 值

Fig. 9 Weighted PSD values under Grade V random irregularity of the United States

步骤 1 对钢轨振动加速度进行滤波后分轴,以获得某车轮产生的振动加速度信号,并对其求 PSD 图像;

表 3 优化中心频率后不同轨道不平顺条件下的 K 值Tab.3 K values under different track irregularities after center frequency optimization

不平顺情况	K 值
无不平顺	132.62
添加美国 6 级随机不平顺谱	133.42
添加美国 5 级随机不平顺谱	135.78
添加美国 4 级随机不平顺谱	134.88

步骤 2 对 PSD 图像取对数,并对小于 0 的数值进行过滤,获得新的图像;

步骤 3 找到大于 0.8 倍 PSD 最大值的尖点对应频率,尖点对应频率个数记为 n ;

步骤 4 以第 i 个尖点对应频率为中心频率,计算 $1/3$ 倍频程的上、下限频率;

步骤 5 用第 i 个中心频率为均值的正态分布权重函数与 PSD 进行加权,求上、下限频率范围内的面积 $S(i)$;

步骤 6 求整个频域范围内的总面积 S_a ;

步骤 7 计算 K 值;

步骤 8 将尖点对应频率与多边形激励频率进行对比,得到车轮多边形主要阶数;

步骤 9 综合 K 值与阶数,判断车轮失圆程度。

将不同阶数的多边形车轮导入所提模型中,所获得的不同阶数和车轮周向径跳幅值条件下的 K 值如表 4 所示。随着车轮多边形周向径跳幅值的增加, K 值逐渐变大。因此,通过 K 值可以反映车轮的多边形程度。

表 4 不同阶数和车轮周向径跳幅值条件下的 K 值Tab.4 K values under different orders and wheel circumferential radial runout amplitudes

阶数	K 值			
	车轮周向径跳幅值 = 0.05 mm	车轮周向径跳幅值 = 0.10 mm	车轮周向径跳幅值 = 0.15 mm	车轮周向径跳幅值 = 0.20 mm
8	97.48	132.62	164.17	193.70
9	96.95	134.50	171.28	207.40
10	143.55	179.03	208.84	209.16
11	111.39	173.23	194.01	219.60
12	107.11	155.90	196.38	219.10
13	100.12	164.38	207.69	210.70
14	115.73	156.93	195.55	221.30

4 评价指标验证

在地铁车轮检修过程中,某车轮径向偏差图如

图 10 所示。车轮的最大径跳范围基本为 $-0.1 \sim 0.1$ mm,相邻波峰、波谷间的差异较明显。将实测车轮周向径跳数据导入 SIMPACK 软件,并输入美国 5 级轨道不平顺谱进行仿真。不同时间下,实测车轮 4 个传感器的振动加速度响应曲线如图 11 所示。不同振动频率下,实测车轮的振动加速度 PSD 如图 12 所示。由图 12 可知:实测车轮的振动加速度 PSD 值呈现出单峰值的结果,对应峰值的频率与车轮 13 阶多边形振动频率 95.79 Hz 具有较强的一致性。由此可见,通过钢轨振动信号分析车轮多边形阶数的方法具备一定的可行性。

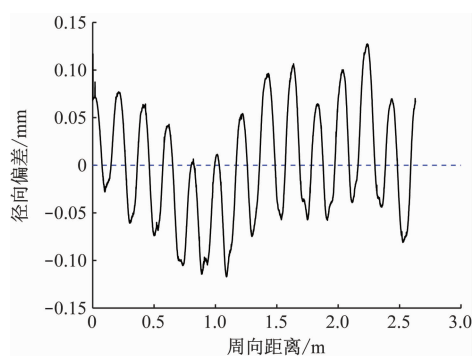


图 10 某车轮径向偏差图

Fig. 10 Radial deviation diagram of a certain wheel

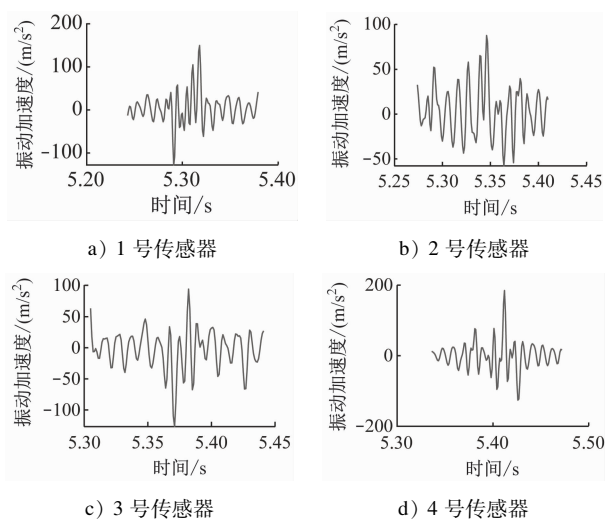


图 11 不同时间下实测车轮 4 个传感器的振动加速度响应曲线

Fig. 11 Vibration acceleration response curves of the four sensors on the measured wheel at different times

对于车轮多边形程度指标 K ,通过计算得到 4 个传感器的平均 K 值为 151.77。将其与表 4 中 13 阶 K 值进行对比发现,其多边形幅值为 0.05 ~ 0.10 mm,对其进行插值计算可知其多边形幅值为 0.098

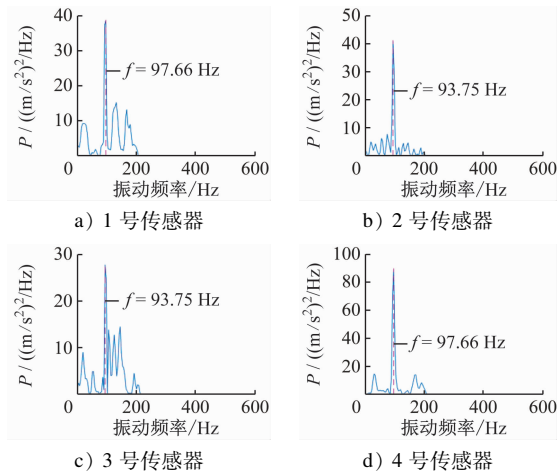


图 12 不同振动频率下实测车轮的振动加速度 PSD

Fig. 12 Vibration acceleration PSD of the measured wheel at different vibration frequencies

mm,而实测车轮相邻波峰、波谷间的径跳约为 0.08 mm,误差为 22.5%,二者具有一致性。

5 结语

本文建立了车-轨刚柔耦合动力学模型,在柔性钢轨上设置 4 个加速度传感器,采集钢轨的振动加速度信号,对车轮多边形问题进行分析。此外,本文还通过对分轴后的振动加速度数据进行频谱分析,获得了车轮多边形阶数,提出表征车轮多边形程度的评价指标 K ,构建了不同幅值、不同阶数的 K 值表,对车轮多边形程度进行量化分析。以实际车轮的圆周径跳作为输入,验证评价指标 K ,计算结果表明,车轮多边形程度评价指标 K 能较好地表征圆

(上接第 234 页)

参考文献

- [1] 陶庸. 基于气流组织的城轨车厢风道结构优化[D]. 长沙:中南大学, 2013.
TAO Yong. Optimization of air duct structure of urban rail cars based on air distribution[D]. Changsha: Central South University, 2013.
- [2] KONSTANTINOV M, WAGNER C. Numerical simulation of the thermal comfort in a train cabin[J]. International Journal of Railway Technology, 2015, 4(3): 69.
- [3] 李超, 张成方. 石家庄地铁 3 号线车厢内气流组织的数值模拟及分析[J]. 制冷与空调(四川), 2016, 30(2): 153.
LI Chao, ZHANG Chengfang. Numerical simulation and analysis on air organization inside Shijiazhuang Metro Line 3 subway car [J]. Refrigeration & Air Conditioning, 2016, 30(2): 153.

周径跳幅值真实值。

参考文献

- [1] 高润. 列车车轮失圆动态检测方法与技术研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
GAO Run. Research on dynamic detection method and technology of out-of-round railway wheel[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.
 - [2] 黄贵发, 廖云, 李修文, 等. 融合振动位移滤波及加速度多阶谱的车轮失圆诊断方法[J]. 质量与可靠性, 2021(3): 27.
HUANG Guifa, LIAO Yun, LI Xiuwen, et al. A diagnosis method for wheel tread out of round based on vibration displacement filtering and multi order acceleration spectrum[J]. Quality and Reliability, 2021(3): 27.
 - [3] 刘新海. 城轨列车车轮全局不圆度检测方法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2019.
LIU Xinhai. Research on detection method of global roundness of urban rail train wheels[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2019.
 - [4] 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, 2018.
LIU Guoyun. Analysis and assessment of highspeed trains dynamic performance due to performance evolution of key components[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.
- 收稿日期:2022-10-31 修回日期:2022-12-27 出版日期:2024-12-10
Received:2022-10-31 Revised:2022-12-27 Published:2024-12-10
• 第一作者:陈洪轩,硕士研究生,chenhongxuan0412@163.com
通信作者:沈钢,教授,elsg163@163.com
• ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license
- [4] 徐世南, 张继业, 熊骏, 等. 地铁列车通过隧道时的气动性能研究[J]. 城市轨道交通研究, 2016, 19(9): 99.
XU Shinan, ZHANG Jiye, XIONG Jun, et al. Aerodynamic performance of metro vehicle passing through tunnels [J]. Urban Mass Transit, 2016, 19(9): 99.
 - [5] XIONG X, ZHU L, ZHANG J, et al. Field measurements of the interior and exterior aerodynamic pressure induced by a metro train passing through a tunnel [J]. Sustainable Cities and Society, 2020, 53: 101928.
- 收稿日期:2023-07-18 修回日期:2023-08-28 出版日期:2024-12-10
Received:2023-07-18 Revised:2023-08-28 Published:2024-12-10
• 第一作者:李芃,副教授,lipeng99@tongji.edu.cn
通信作者:吴妍,副教授,yan.wu@tongji.edu.cn
• ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license