

抗蛇行减振器对车轮磨耗后转向架稳定性的影响研究

成军强 杨 陈 贾小平 苏文静

(中车南京浦镇车辆有限公司, 210031, 南京//第一作者, 正高级工程师)

摘 要 基于某设计运行速度为 120 km/h 的新型地铁车辆, 利用 SIMPACK 多体动力学软件对转向架进行建模, 仿真分析磨耗轮状态下、车辆在安装抗蛇行减振器前后的临界速度。使用机车车辆滚动振动试验台对该型转向架进行滚振动力学试验, 并对比在安装抗蛇行减振器前后车辆的稳定性。研究结果显示, 在车轮磨耗状态下, 安装抗蛇行减振器时的车辆蛇行临界速度高于 160 km/h, 不安装抗蛇行减振器时的车辆蛇行临界速度低于 120 km/h。这说明安装抗蛇行减振器能够显著提高车轮磨耗后车辆的稳定性。

关键词 轨道交通; 车辆稳定性; 抗蛇行减振器; 磨耗车轮

中图分类号 U270.1⁺1

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.12.047

Influence of Yaw Damper on Bogie Stability after Wheel Wear

CHENG Junqiang, YANG Chen, JIA Xiaoping, SU Wenjing

Abstract Based on a new metro vehicle with design speed of 120 km/h, the multi-body dynamics software SIMPACK is used to model the bogie, and the critical speeds of the vehicle before and after installing yaw damper under the condition of worn wheel is simulated and analyzed. The rolling vibration dynamics test of this bogie is carried out on the rolling vibration test rig, and the vehicle stability before and after installing yaw damper is compared. Research results show that under the condition of wheel wear, the critical speed is higher than 160 km/h when yaw damper is installed; when the yaw damper is not installed, the critical speed is lower than 120 km/h. It is proven that the installation of yaw damper can significantly improve vehicle stability after wheel wear.

Key words rail transit; vehicle stability; yaw damper; worn wheel

Author's address CRRC Nanjing Puzhen Co., Ltd., 210031, Nanjing, China

车辆的运行速度要求不断提高。对于运行速度为 80 km/h 的地铁车辆, 即使未安装抗蛇行减振器, 也能在运行中保持良好的动力学性能。但当运行速度提高到 120 km/h 时, 未安装抗蛇行减振器的地铁车辆在动力学试验中出现了横向平稳性超标现象。根据文献[1-2]的研究结果, 随着列车运行速度的提升, 车辆的横向平稳性上升十分明显。该问题往往与车轮磨耗后车辆的稳定性不足有密切的关联。未安装抗蛇行减振器当然更经济, 所以, 设计速度为 120 km/h 时的转向架是否需要安装抗蛇行减振器是一项需要深入研究的问题。

在新轮新轨状态下, 轮轨匹配接触关系较好时, 车辆往往能够保持较好的蛇行运动稳定性, 但在车轮出现磨耗, 特别是出现严重的凹型磨耗后, 轮轨会出现较大的等效锥度, 这会导致车辆的蛇行临界速度(以下简为“临界速度”)显著降低。文献[3]对此问题做过相应的研究。近几年, 我国高速铁路运营过程中也发现了磨耗后车轮出现大等效锥度造成列车蛇行运动稳定性不足的问题^[4-6]。这种蛇行失稳往往会与车体一阶菱形模态耦合, 造成车体出现弹性振动而极大地降低乘坐舒适度, 是需要坚决避免的。许多学者详细分析抗蛇行减振器车辆稳定性的影响。文献[7]经仿真研究指出, 在大等效锥度条件下不安装抗蛇行减振器的转向架, 当列车速度达到 120 km/h 时, 其蛇行稳定性裕量不足, 安装抗蛇行减振器有利于提升转向架的稳定性。文献[8]对磨耗后踏面进行分析后指出, 抗蛇行减振器失效后车辆的临界速度会降低。文献[9]通过仿真分析和线路试验发现, 阻尼值较大的抗蛇行减振器能使车辆具有更高的蛇行稳定性。

由此可见, 抗蛇行减振器对车辆的蛇行运动稳定性影响显著。对此, 本文以某设计速度为 120 km/h 的新型地铁车辆为对象进行仿真和试验研究, 初步评估在未安装抗蛇行减振器情况下的车辆稳定性。抗蛇行减振器的仿真模型较为复杂, 传统

0 引言

近年来, 随着城市轨道交通的迅速发展, 地铁

的 Maxwell 模型尚不能完全准确地体现抗蛇行减振器的动态特性,很多国内外学者均提出了新的抗蛇行减振器物理模型^[10-13],更加细致地讨论不同建模方法对车辆稳定性的影响。然而,仿真分析方法与现车试验总有一定的差异,为了更准确地掌握安装抗蛇行减振器前后车辆的稳定性差异,本文依托机车车辆滚动振动试验台对安装该转向架的车辆进行了台架试验,以更详细、更准确地分析抗蛇行减振器对车轮磨耗后转向架稳定性的影响。

1 车辆稳定性的仿真

1.1 建立多体动力学模型

基于某设计时速为 120 km 的新型地铁车辆的真实数据,使用 SIMPACK 多体动力学软件建立仿真模型(如图 1 所示)。模型中,轮对 5 个自由度、轴箱 1 个自由度、构架 6 个自由度、车体 6 个自由度,并考虑横向止挡位移-力曲线和抗蛇行减振器速度-力曲线等悬挂元件的非线性特征(如图 2 所示)。

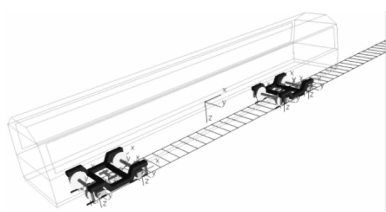
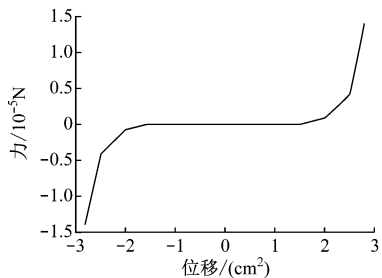
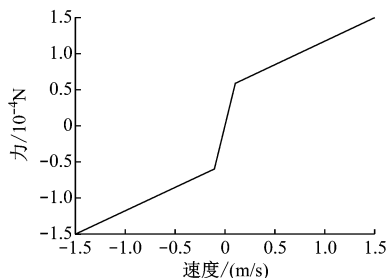


图 1 车辆的 SIMPACK 模型

Fig. 1 SIMPACK model of the vehicle



a) 横向止挡力-位移曲线



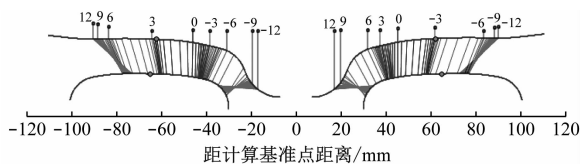
b) 抗蛇行减振器力-速度曲线

图 2 部分模型中考虑的悬挂元件非线性特征

Fig. 2 Nonlinear characteristics of suspension elements considered in some models

采用美国五级谱作为轨道不平顺输入。

在仿真模型中使用了磨耗后踏面实测数据。该踏面与标准 60 kg/m 轨在轨底坡(坡度为 1/40)状态下匹配后的轮轨接触关系点如图 3 所示。由图 3 可知,磨耗后踏面的左右轮初始接触点均靠近轮缘一侧。这种接触关系容易造成轮轨出现较大的等效锥度,因此需对其等效锥度进行计算。



注:接触点上方数据为轮对横移量。

图 3 仿真用轮轨接触点

Fig. 3 Wheel-rail contact points for simulation

由 UIC 519—2004 标准^[14],对于磨耗后踏面,需通过计算实际轮轨接触点得到轮径差,再将各初始横移量下的轮径差代入自由轮对在轨道上的运动微分方程(见式(1))中进行积分,得到轮对以幅值 $2y$ 和波长 λ 的周期运动。

$$\ddot{Y} + \frac{v^2}{er_0} \Delta r = 0 \quad (1)$$

式中:

Y ——轮对横移量;

\ddot{Y} ——轮对横移加速度;

e ——接触点跨距;

r_0 ——名义滚动圆半径;

Δr ——轮径差;

v ——轮对前进速度。

然后,应用 Klingel 公式来计算等效锥度 $\tan \gamma_e$,即:

$$\tan \gamma_e = \left(\frac{\pi}{\lambda} \right)^2 \cdot 2er_0 \quad (2)$$

计算得到的等效锥度如图 4 所示。本文采用的实测轮轨关系存在较大的等效锥度,其 3 mm 等效锥度达到 0.61,并且在 0 ~ 3 mm 范围内存在“负斜率”特征,这与近年来我国铁道车辆出现的磨耗后恶劣轮轨关系有相同的特点。在这种轮轨关系下,车辆的临界速度会显著降低,乘坐舒适性会大幅下降,因此,本文选择这种极不利的轮轨关系对该型转向架的抗蛇行减振器进行选择策略研究,以更深入分析车辆在线路运行中能否具备足够的稳定性裕量。

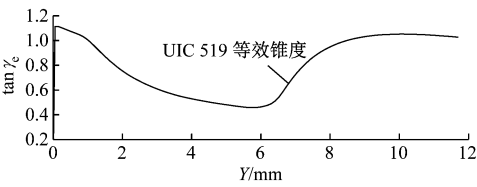


图 4 $\tan \gamma_e$ 的计算值

Fig. 4 Calculation value of $\tan \gamma_e$

1.2 仿真工况

为对比安装抗蛇行减振器前后的车辆蛇行运动稳定性,本文取车辆运行速度设计值(120 km/h)作为列车匀速运行时的的仿真速度,对临界速度进行仿真分析,具体仿真工况见表 1。

表 1 仿真工况设置

Tab.1 Simulation working condition settings	
仿真工况	仿真计算说明
磨损轮安装抗蛇行减振器	采用降速法,由 250 km/h 加美国五级谱激励并降速,直到轮对收敛
磨损轮不安装抗蛇行减振器	采用降速法,由 180 km/h 加美国五级谱激励并降速,直到轮对收敛

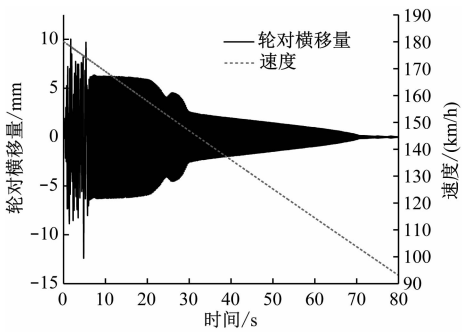
1.3 临界速度的仿真计算

采用降速法仿真计算车辆的非线性临界速度:首先,在列车高速运行时施加轨道不平顺激励;然后,撤去激励,使轮对出现极限环运动;最后随着车速的降低,轮对的横移量幅值会逐渐降低,直到收敛。由图 5 所示的计算结果可知,在不安装抗蛇行减振器时,车辆的非线性临界速度为 103.1 km/h,低于车辆的设计运行速度 120 km/h;安装抗蛇行减振器后,车辆的非线性临界速度为 224.2 km/h,远高于 120 km/h。可见,安装抗蛇行减振器后,车辆的临界速度会有大幅提升。

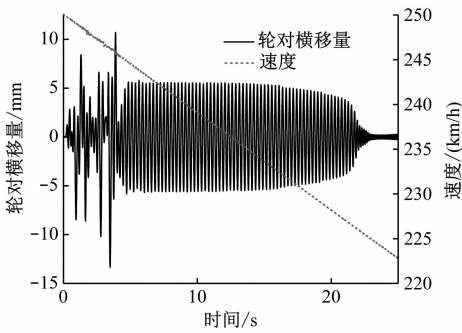
2 滚振试验研究

2.1 机车车辆滚动振动试验台

机车车辆滚动振动试验台如图 6 所示。该试验台模拟轨道的滚轮,可在滚动的同时进行横向、垂向激励,以模拟车辆在实际线路上的运行工况。其滚动即模拟车辆沿轨道向前的运动,其激励则模拟轨道的各种不平顺输入。试验台模拟的车辆运行速度最高可达 600 km/h,激励的横向振幅可达 ± 10 mm,垂向振幅可达 ± 15 mm。试验台除机械总体外,还有驱动控制系统、激励控制系统和总监控系统,可进行电机的驱动控制,实现 4 根轴的同步转动



a) 不安装抗蛇行减振器



b) 安装抗蛇行减振器

图 5 降速法仿真计算临界速度结果

Fig. 5 Simulation results of critical speed calculated by deceleration method



图 6 机车车辆滚动振动试验台

Fig. 6 Rolling vibration test rig for rolling stock

控制,以及各激励器的激励输入控制。

2.2 滚振试验方法

本次滚振试验使用某型设计时速为 120 km/h 的真实转向架并安装试验用假车体,按照 AW0(空载)工况对车体进行配重。车体和转向架之间采用工装连接。试验实景见图 7。

稳定性试验采用的滚振试验轨道谱为美国五级谱。稳定性台架试验方式有 2 种:

1) 先通过试验台纯滚动试验进行增速,找到车辆的蛇行运动非线性失稳速度;然后进行降速。减速中,蛇行运动消失时的速度即非线性临界速度。



图7 滚振试验实景图

Fig. 7 Picture of rolling vibration test scene

2) 通过滚轮对被试转向架车轮施加线路不平顺激励,并逐级提速,直至被试转向架出现蛇行运动。此时的速度即为实际临界速度。随后,激振停止,再进行降速。轮对收敛时的速度即为非线性临界速度。

按照 GB/T 32358—2015《轨道交通机车车辆台架试验方法》^[16]要求:在纯滚动状态下,若被试转向架未出现失稳现象,则稳定性台架试验的速度应加至列车最高运行速度的 1.2 倍;在有激振情况下,若被试转向架未出现失稳现象。则稳定性台架试验的速度应加至列车最高运行速度的 1.15 倍。试验转向架的线路运行速度为 120 km/h,则其线路最高运行速度为 120 km/h 的 1.1 倍,即 132 km/h。在纯滚动状态下,台架稳定性试验最高速度为 158.4 km/h,取整为 160 km/h;加激励情况下,台架稳定性试验最高速度为 151.8 km/h。但从仿真结果看,被试转向架的非线性临界速度远高于 160 km/h。因此,为更好地研究被试转向架的非线性临界速度,本次试验在 160 km/h 时也对转向架施加了轨道不平顺激励。

2.3 轮轮接触关系

如图 8 所示,采用数字激光廓形检测仪^[17]对试验用磨损轮廓形和滚轮廓形进行测试。试验车车轮和试验台滚轮之间轮轮接触点计算结果如图 9 所示。由图 9 可见:左右轮初始接触点均靠近轮缘一侧,且存在两点接触趋势;滚动圆附近因存在凹型磨损未与滚轮产生良好的接触关系。

对左右轮轮径差和 UIC 519 等效锥度进行计算,结果如图 10 所示。由图 10 可知,轮对横移量为 3 mm 时的等效锥度为 0.54,且存在“负斜率”特征,为较为恶劣的接触状态。与仿真用等效锥度对比可知,实测的轮轮等效锥度略小于仿真用等效锥度。



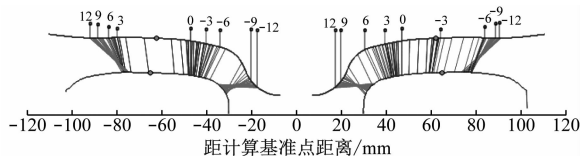
a) 滚轮廓形测试



b) 车轮廓形测试

图8 轮轮廓形测试

Fig. 8 Wheel-wheel profile test



注:上方数据为横移量,mm。

图9 滚振试验的轮轮接触点

Fig. 9 Wheel-wheel contact point for rolling vibration test

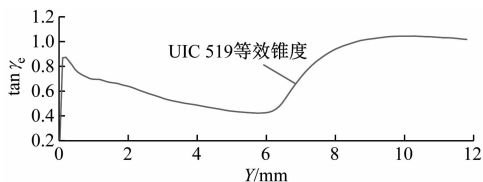


图10 实测轮轮接触等效锥度

Fig. 10 Measured wheel-wheel contact equivalent taper

2.4 滚振试验临界速度测试结果

滚振试验的临界速度测试结果如图 11 所示。

由图 11 a),安装抗蛇行减振器情况下,在设计运行速度为 160 km/h 且加激励时,轮对未发生失稳现象,而且激励撤去后也未出现极限环运动。由此可判定,其实际失稳速度高于 160 km/h。

由图 11 b),未安装抗蛇行减振器情况下,在设计运行速度为 135 km/h 且加激励时,轮对出现了失稳现象;激励撤去后,轮对存在幅值为 4.5 mm 的极限环运动;随着速度的降低,极限环幅值逐渐降低,并在 100.5 km/h 时轮对收敛。由此可判定,其实际

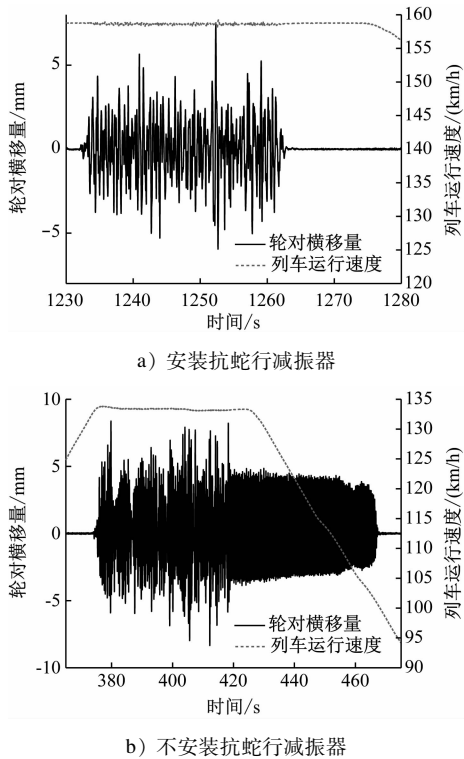


图 11 滚振试验的临界速度测试结果

Fig. 11 Critical speed test results for rolling vibration test

失稳速度为 135 km/h, 非线性临界速度为 100.5 km/h。

台架滚振试验中未安装抗蛇行减振器的非线性临界速度与仿真结果较为接近, 说明仿真模型的计算结果是较准确的。两种方法的研究结果均表明, 安装抗蛇行减振器后, 车辆的临界速度会显著提升。

3 结语

为保证某设计时速为 120 km 新型地铁车辆的转向架在车轮磨损状态下仍能保持足够的蛇行运动稳定性, 本文针对该转向架是否安装抗蛇行减振器的问题进行仿真试验和滚振试验研究。仿真试验和滚振试验得到的临界速度结果较为接近: 在安装抗蛇行减振器时, 临界速度高于 160 km/h; 在不安装抗蛇行减振器时, 临界速度低于 120 km/h。研究结果表明, 在磨损后踏面存在较大等效锥度情况下, 未安装抗蛇行减振器时车辆的临界速度较低, 稳定性裕量不足; 安装抗蛇行减振器车辆的稳定性有显著提升。因此, 建议该新型转向架应安装抗蛇行减振器, 以保证其在全运营周期内具备足够的蛇行运动稳定性, 实现车辆安全平稳运行。

参考文献

- [1] 李凡松, 王建斌, 石怀龙, 等. 动车组车体异常弹性振动原因及抑制措施研究[J]. 机械工程学报, 2019(12): 178.
LI Fansong, WANG Jianbin, SHI Huailong, et al. Research on causes and countermeasures of abnormal flexible vibration of car body for electric multiple units [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019(12): 178.
- [2] QI Y, DAI H, SONG C, et al. Shaking analysis of high-speed train's carbody when cross lines[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2019, 33(3): 1055.
- [3] POLACH O. Characteristic parameters of nonlinear wheel/rail contactometry[J]. Vehicle System Dynamics, 2010, 48(S1): 19.
- [4] WEI L, ZENG J, CHI M, et al. Carbody elastic vibrations of high-speed vehicles caused by bogie hunting instability[J]. Vehicle System Dynamics, 2017, 55(9): 1321.
- [5] 杨震寰, 戴焕云, 石俊杰, 等. 磨耗后轮轨型面接触关系及线路适应性分析[J]. 铁道学报, 2021(5): 37.
YANG Zhenhuan, DAI Huanyun, SHI Junjie, et al. Analysis of worn wheel-rail contact relationship and line adaptability [J]. Journal of the China Railway Society, 2021(5): 37.
- [6] SHI H, WU P. Flexible vibration analysis for car body of high-speed EMU[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2016(1): 55.
- [7] 李浩, 戴焕云, 汪群生, 等. 等效锥度对 120 km/h 地铁车辆横向稳定性影响研究[J]. 机车电传动, 2020(3): 68.
LI Hao, Dai Huanyun, WANG Qunsheng, et al. Research on influence of equivalent conicity on lateral stability of 120 km/h metro vehicles[J]. Electric Drive for Locomotives, 2020(3): 68.
- [8] 吴娜, 曾京, 王忆佳. 轮轨磨耗状态下悬挂参数失效对车辆动力学性能影响[J]. 振动与冲击, 2015(5): 82.
WU Na, ZENG Jing, WANG Yijia. Effect of wheel/rail wear and suspension system failure on vehicle dynamic performance [J]. Journal of Vibration and Shock, 2015(5): 82.
- [9] 吴会超, 霍文彪, 卢权, 等. 不同抗蛇行减振器对动车组蛇行失稳的影响研究[J]. 机车电传动, 2017(5): 30.
WU Huichao, HUO Wenbiao, LU Quan, et al. Influence study of different anti-yaw dampers on EMUs hunting instability [J]. Electric Drive for Locomotives, 2017(5): 30.
- [10] HUANG C, ZENG J. Dynamic behaviour of a high-speed train hydraulic yaw damper[J]. Vehicle System Dynamics International Journal of Vehicle Mechanics & Mobility, 2018, 56(2): 1.
- [11] ALONSO A. Yaw damper modeling and its influence on the railway dynamic stability[J]. Vehicle System Dynamics, 2011, 49(9): 1367.
- [12] TENG W, SHI H, LUO R, et al. Improved nonlinear model of a yaw damper for simulating the dynamics of a high-speed train [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F Journal of Rail and Rapid Transit, 2018, 233: 651.
- [13] 白瑾瑜, 曾京, 石怀龙, 等. 抗蛇行减振器对高速列车稳定性的影响[J]. 振动与冲击, 2020(23): 78.

- BAI Jinyu, ZENG Jing, SHI Huailong, et al. Effects of anti-hunting shock absorber on stability of high-speed train[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020(23):78.
- [14] International Union of Railways. Method for determining the equivalent conicity: UIC 519—2004[S]. Paris: International Union of Railways, 2004.
- [15] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 机车车辆动力学性能评定及试验鉴定规范: GB/T 5599—2019 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
- State Administration for Market Regulation, Standardization Administration. Specification for dynamic performance assessment and testing verification for rolling stock: GB/T 5599-2019 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2019.
- [16] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准
- (上接第 233 页)
- [2] 魏运, 白文飞, 李宇杰. 智慧地铁需求分析及功能规划研究[J]. 都市轨道交通, 2020(1):40.
- WEI Yun, BAI Wenfei, LI Yujie. Development demand and function planning of smart metro[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2020(1):40.
- [3] 曹勇, 张玉文, 龚艳. 基于大数据和云计算的车辆智能运维模式[J]. 城市轨道交通研究, 2020(4):69.
- CAO Yong, ZHANG Yuwen, GONG Yan. Subway vehicle intelligent operation and maintenance mode based on big data and cloud computing[J]. Urban Mass Transit, 2020(4):69.
- [4] 杨子亮. 城轨交通全自动运行列车车辆段设计研究[J]. 现代城市轨道交通, 2020(5):9.
- YANG Ziliang. Research on design of FAO train depot for urban rail transit[J]. Modern Urban Rail Transit, 2020(5):9.
- [5] 汪峥, 王孔明, 范琪, 等. 地铁车辆基地综合自动化管理系统设计[J]. 城市轨道交通研究, 2020(10):166.
- WANG Zheng, WANG Kongming, FAN Qi, et al. Design of integrated automation management system for metro vehicle depot [J]. Urban Mass Transit, 2020(10):166.
- [6] 迁军杰. 装配式车辆基地设计特点及创新[J]. 铁道标准设计, 2020(12):160.
- YU Junjie. Design characteristics and innovation of prefabricated metro vehicle base [J]. Railway Standard Design, 2020(12):160.
- [7] 贾科, 李爱东, 王新线. 城市轨道交通智能建造技术发展趋势分析[J]. 现代城市轨道交通, 2021(6):107.
- JIA Ke, LI Aidong, WANG Xinxian. Analysis on development trend of intelligent construction technology for urban rail transit [J]. Modern Urban Rail Transit, 2021(6):107.
- (收稿日期: 2021-07-30)
- (上接第 239 页)
- [2] ISO. Acoustics—railway applications—measurement of noise emitted by railbound vehicles: ISO 3095[S]. Geneva: ISO, 2013.
- [3] 韩光旭, 宋春元, 李国栋, 等. 高速列车车轮非圆化与振动噪声关系跟踪试验研究[J]. 城市轨道交通研究, 2017(2):1.
- HAN Guangxu, SONG Chunyuan, LI Guodong, et al. Tracing test of the relationship between high-speed train wheel OOR and vibration noise[J]. Urban Mass Transit, 2017(2):1.
- [4] THOMPSON D J. On the relationship between wheel and rail surface roughness and rolling noise[J]. Journal of Sound and Vibration, 1996, 193(1):149.
- [5] HAN J, XIAO X, WU Y, et al. Effect of rail corrugation on metro interior noise and its control [J]. Applied Acoustics, 2018, 130:63.
- [6] REMINGTON P J. Wheel/rail noise—part IV: rolling noise[J]. Journal of Sound and Vibration, 1976, 46(3):419.
- [7] BSI. Railway applications—noise emission—rail roughness measurement related to rolling noise generation: BS EN 15610: 2009 [S]. Brussels: CENELEC, 2009.
- [8] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 声学 轨道车辆内部噪声测量: GB 3449—2011 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Acoustics—measurement of noise inside railbound vehicles: GB/T 3449—2011 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2012.
- [9] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 城市轨道交通列车噪声限值和测量方法: GB 14892—2006 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Noise limit and measurement for train of urban rail transit: GB 14892—2006 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2006.
- (收稿日期: 2022-07-31)