

低温环境下高速列车车内噪声问题及控制方案*

孙 强¹, 张 捷², 肖新标², 王金田¹, 滕万秀¹, 高 阳¹

(1. 中车长春轨道客车股份有限公司 长春, 130062) (2. 西南交通大学牵引动力国家重点实验室 成都, 610031)

摘要 对低温环境下(-30℃)的 250 km/h 高速列车车内客室端部噪声进行测试, 深入分析了运行环境温度对车内噪声的影响。通过对比夏季、冬季两种季节因素, 掌握了不同环境下高速列车的车内振动噪声特性、车下声源特性和声振传递路径, 研究了低温环境下的高速列车减振降噪技术, 以提高低温环境下高速列车的车内噪声性能。研究表明, 车内客室端部噪声异常问题是由于受到列车 250 km/h 匀速运行时的过枕跨频率激励, 而冬季运行时转向架区域减振性能下降, 使得该频率更容易传递至车内所致, 并激发车内客室空腔的声学模态。通过从传递路径上进行控制, 使用一种金属减振器代替原有地板的支撑结构, 优化车体内地板和外地板之间的弹性支撑, 能够有效改善低温环境下高速列车车内客室端部异常噪声问题。

关键词 高速列车; 低温; 车内噪声; 过枕跨频率; 减振器; 噪声控制

中图分类号 U270.1⁺6

引 言

高速列车的车内噪声问题复杂, 有“正常”噪声问题, 例如不同车型的噪声^[1]、进出隧道时的噪声^[2]、受电弓的噪声^[3]以及轮轨和气动等作用的噪声^[4-5]等; 也有“异常”噪声问题, 例如车轮非圆化^[6]引起的车内异响^[7]问题。国内对于高速列车车内噪声问题的研究已有相当多的成果。袁旻忠等^[8]研究了高速列车运行工况下噪声传递路径及声源贡献量。王金田等^[9]研究了高速列车车间连接处车内噪声特性。文献[10-11]基于声品质参数分别对高速列车车内噪声进行了客观评价和主观评价。毛杰等^[12]考虑不同声源激励影响, 对高速列车车内噪声进行了预测。

高速列车车内噪声问题由于特性不一、发生突然, 往往很难掌握其机理并进行相应的减振降噪处理。笔者针对某高速列车车内客室端部异常噪声问题^[13], 分析了运行环境温度对车内噪声的影响。通过对比夏、冬两种季节因素, 掌握不同环境下高速列车的车内振动噪声特性、车下声源特性和声振传递路径, 研究了低温环境下的高速列车减振降噪技术, 以提高低温环境下高速列车的车内噪声性能。

1 不同环境温度下车内噪声特性分析

某高速列车在冬季运营的过程中, 发生了车内客室端部存在异常噪声问题^[13]。主要表现为列车 250 km/h 匀速运行时, 车内客室端部靠窗一侧的噪声比过道位置高出 8 dBA 左右, 而两个测点位置的横向距离仅约 1.5 m。

为了深入研究这一问题, 分别在冬季、车外环境温度约为 -30℃, 以及夏季、车外环境温度约为 25℃时, 对车内噪声、振动进行了测试。图 1 为车内噪声、振动测点布置示意图。

如图 1 所示, “●”为噪声测点, 分别位于客室端部靠窗一侧和过道位置, 麦克风距离内地板表面垂直 1.5 m 高; “■”为振动测点, 分别位于客室端部靠窗地板、过道地板、侧墙和顶板, 加速度计均为测试面的法向。

1.1 冬季运行时车内噪声特性

图 2 给出了高速列车在冬季、以 250 km/h 速度匀速运行时, 车内客室端部噪声的 1/3 倍频程频谱及窄带频谱。

由图 2(a)可见, 高速列车在冬季、以 250 km/h

* 国家重点研发计划资助项目(2016YFB1200506-08/2016YFB1200503-02/2016YFE0205200); 国家自然科学基金资助项目(51475390/U1434201)

收稿日期: 2017-11-07; 修回日期: 2018-03-03

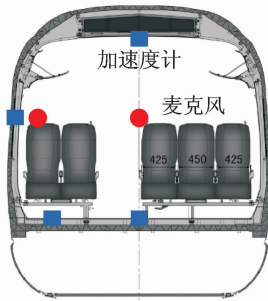
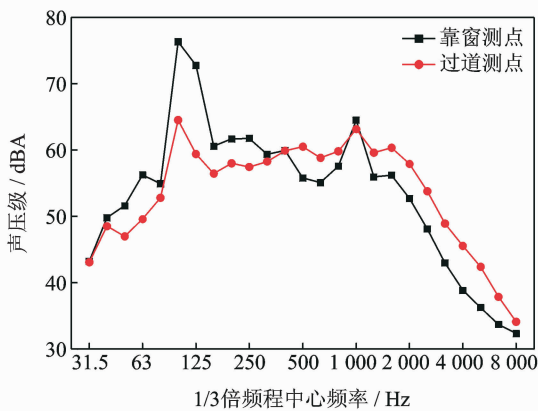


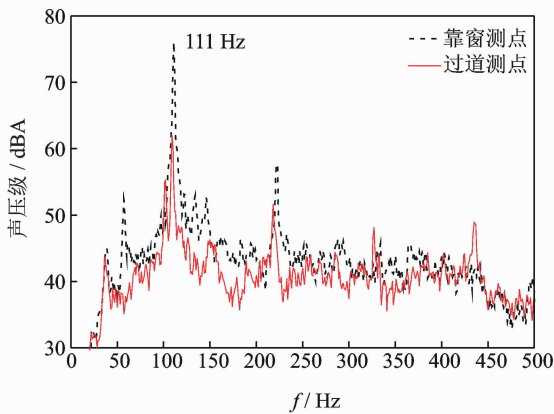
图1 车内噪声、振动测点布置示意图

Fig. 1 Measurement points of the interior noise and vibration



(a) 1/3倍频程频谱

(a) Noise spectrum in 1/3 octave band



(b) 窄带频谱

(b) Noise spectrum in narrow band

图2 靠窗与过道位置噪声频谱图(冬季)

Fig. 2 Noise spectrum at end by window and by aisle (winter)

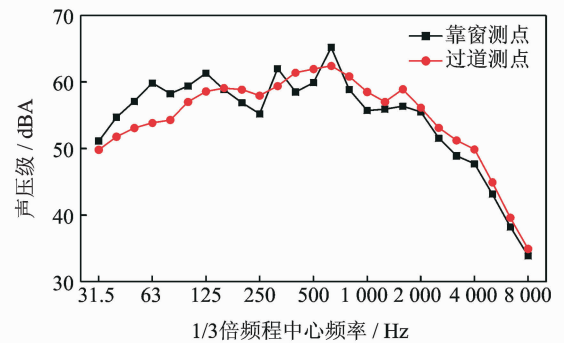
速度匀速运行时,车内客室端部靠窗位置和过道位置的噪声均在中心频率100和1000 Hz的1/3倍频带存在明显峰值,且中心频率100 Hz的1/3倍频带峰值显著。靠窗位置的噪声在中心频率100 Hz的1/3倍频带的峰值高出过道位置10 dB以上,且高出自身在其他频带的噪声也达到10 dB以

上。因此,车内客室端部靠窗一侧的噪声总值比过道位置高出8 dB左右,这是中心频率100 Hz的1/3倍频带峰值导致的。

由图2(b)可见,中心频率100 Hz的1/3倍频带峰值在窄带频谱上显示为111 Hz的频率峰值,且车内客室端部靠窗一侧的噪声在111 Hz的频率峰值达到76.1 dB,高出过道位置约14 dB。

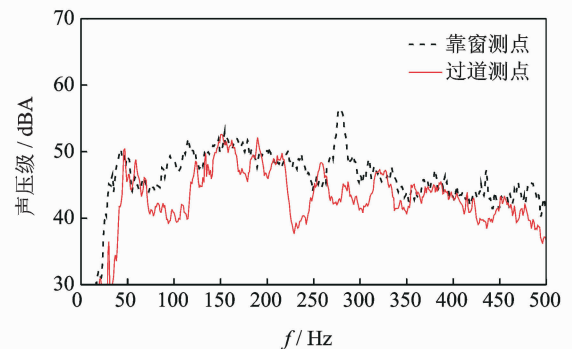
1.2 夏季运行时车内噪声特性

图3给出了高速列车在夏季、以250 km/h速度匀速运行时,车内客室端部噪声的1/3倍频程频谱及窄带频谱。



(a) 1/3倍频程频谱

(a) Noise spectrum in 1/3 octave band



(b) 窄带频谱

(b) Noise spectrum in narrow band

图3 靠窗与过道位置噪声频谱图(夏季)

Fig. 3 Noise spectrum at end by window and by aisle (summer)

由图3(a)可见,高速列车在夏季、以250 km/h速度匀速运行时,车内客室端部靠窗位置和过道位置的噪声主要在中心频率630 Hz的1/3倍频带存在峰值。相对于冬季,车内客室端部噪声在中心频率100 Hz的1/3倍频带峰值已经不存在。在夏季运行时,车内客室端部靠窗位置和过道位置的噪声总值也基本相当。

由图3(b)可见,在车内客室端部噪声窄带频谱分布上,无论是靠窗一侧还是过道位置,车内噪声在

111 Hz 频率处的峰值均不明显。

因此,低温环境是造成高速列车车内客室端部噪声异常的外在原因。但是,车内的噪声峰值是由于低温引起的车体密封问题产生的声泄露,还是低温引起的车体隔振问题产生的振动声辐射,还有待结合不同环境温度下的车体振动传递特性深入分析。

2 不同环境温度下振动传递特性分析

2.1 冬季运行时的振动传递特性

图4给出了高速列车在冬季、以250 km/h速度匀速运行时,车内客室端部振动加速度窄带频谱。其中,振动加速度级的参考值为 1 m/s^2 。

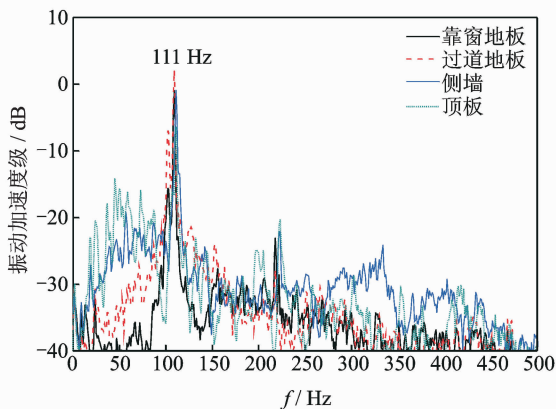


图4 车内客室端部振动加速度频谱(冬季)

Fig. 4 Acceleration spectrum at coach end (winter)

由图4可见,高速列车在冬季、以250 km/h速度匀速运行时,车内客室端部的靠窗地板、过道地板、侧墙和顶板的振动加速度均在111 Hz存在明显峰值。因此,111 Hz同时为车内客室端部噪声与振动的峰值频率,结构传声路径对车内客室端部噪声有重要贡献。

图5给出了车内客室端部对应的车下转向架区域振动测试结果。转向架区域的振动测点位于右侧轴箱、构架和车体,测试方向均为垂向。

由图5可见,车下转向架区域的轴箱、构架和车体在垂向振动上,均在111 Hz频率处存在明显峰值。该频率与车内噪声、振动的显著频率存在对应关系。根据已有的研究结果^[13],111 Hz的峰值是高速列车250 km/h运行时的过枕跨激励频率。为了分析该频率的传递是否受到运行环境温度的影响,对夏季运行时的振动传递特性进行类似研究。

2.2 夏季运行时的振动传递特性

图6给出了高速列车在夏季、以250 km/h速

度匀速运行时,车内客室端部振动加速度窄带频谱。

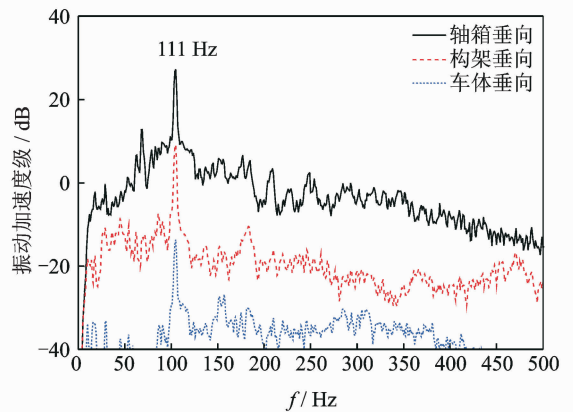


图5 车下转向架区域振动加速度频谱(冬季)

Fig. 5 Acceleration spectrum at bogie area (winter)

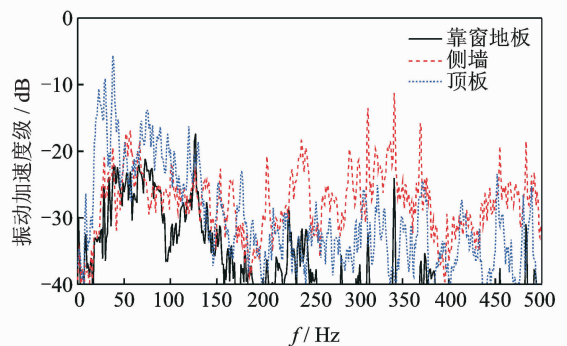


图6 车内客室端部振动加速度频谱(夏季)

Fig. 6 Acceleration spectrum at coach end (summer)

由图6可见,高速列车在夏季、以250 km/h速度匀速运行时,车内客室端部的靠窗地板、过道地板、侧墙和顶板的振动加速度频谱分布相对均匀,虽然在150 Hz以下的低频仍有一些峰值,但是在111 Hz处已经不再像冬季时具有明显峰值。

图7给出了车内客室端部对应的车下转向架区域振动测试结果。

由图7可见,车下转向架区域的轴箱、构架和车体在垂向振动上仍在111 Hz处存在峰值,但该频率处的振动加速度幅值明显小于冬季运行时的,各测点均比冬季降低了约20 dB。这可能和低温环境下,转向架系统以及车体系统的弹性部件减振性能下降,导致轮轨激励的振动更容易向上传播有关。

因此,高速列车车内客室端部噪声异常问题是由于受到列车250 km/h匀速运行时的过枕跨频率激励,而冬季运行时转向架区域减振性能下降,使得该频率更容易传递至车内所致。但是,靠窗一侧和过道位置的噪声相差近8 dBA,单是环境温度的作用还不足以造成两个距离仅1.5 m的测点噪声相差如此之大。

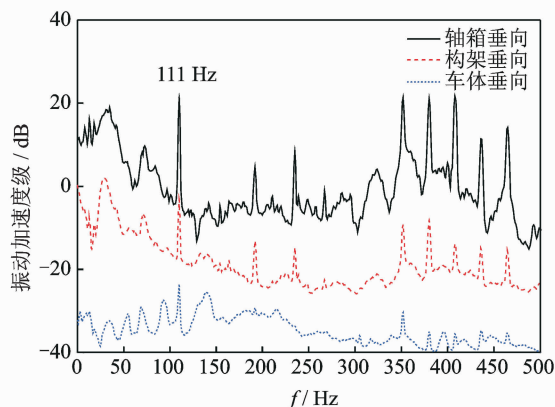


图 7 车下转向架区域振动加速度频谱(夏季)

Fig. 7 Acceleration spectrum at bogie area (summer)

3 低温环境下车内噪声控制方案

图 8 给出了高速列车车内客室空腔的声学模式计算结果。由图 8 可见,高速列车车内客室空腔在 111 Hz 附近的声学模式分布主要表现为横向两侧大、中间小的分布规律。对应到车内噪声测点高度,客室端部靠窗一侧的声压明显高于过道位置。

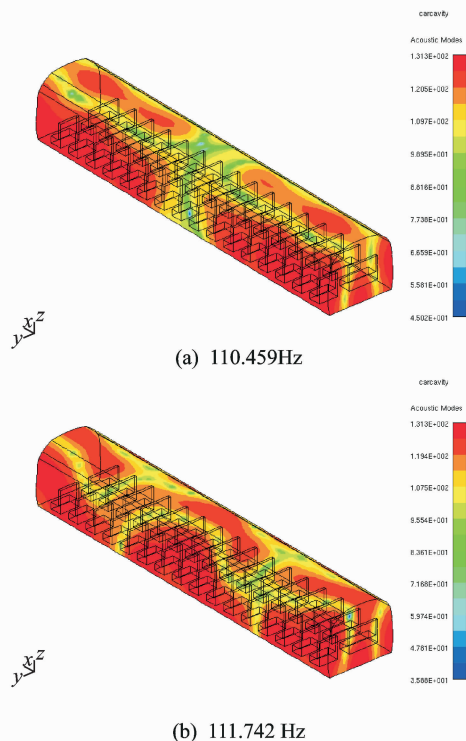


图 8 车内客室空腔的声学模式

Fig. 8 Cavity acoustic modes of the coach

因此,高速列车车内客室端部噪声异常问题还和车内客室空腔的声学模式分布有关。为了解决低温环境下的高速列车车内客室端部异常噪声问题,根据其产生机理,有以下几种措施方案:a. 针对 111 Hz 的

过枕跨激励频率,改变列车运行速度,可以避开该频率;b. 在转向架至车体的传递路径上增加隔振和减振装置,衰减 111 Hz 的振动;c. 在车体结构上增加阻尼,降低 111 Hz 的结构共振能量;d. 在客室内车体表面铺设吸声材料,降低 111 Hz 的声学共振能量。

综合考虑高速列车实际运营情况,选择从传递路径上进行控制,优化车体内地板和外地板之间的弹性支撑。使用一种金属减振器代替原有地板的支撑结构,如图 9 所示,该金属减振器材质为不锈钢,使用温度范围为 $-65 \sim +170^{\circ}\text{C}$,可满足不同承载设计要求,具备三向减振、三向承载功能。

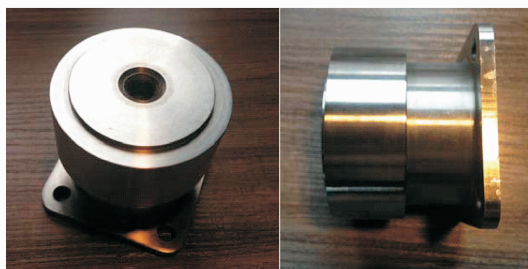
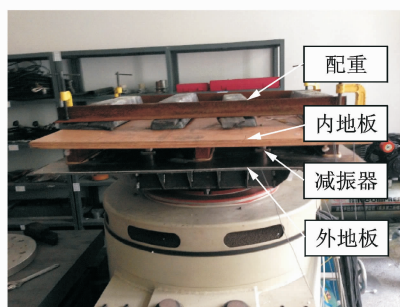


图 9 一种金属减振器

Fig. 9 A metal damper

针对使用金属减振器的优化地板结构和原地板结构,进行减振性能对比试验。如图 10 所示,减振性能试验在振动台上进行,地板样件尺寸为 1 m^2 。



(a) 振动台

(a) Platform vibrator



(b) 振动加速度测点

(b) Accelerometer measured points

图 10 地板减振性能试验

Fig. 10 Damping characteristics test of the floor

将外地板、减振器和内地板按实车状态组装之后,放在振动台上,并于内地板上配重 300 kg 模拟装车状态。3 个振动加速度测点分别位于地板外角、地板侧边中心和减振器上方,加速度计均为地板垂向。用激振台输出上限频率为 200 Hz 的白噪声激励,分别测试新地板结构和原地板结构的振动加速度,两次测试中保持激振器输出的振动能量一致。

由于试验条件限制,地板样件尺寸仅为 1 m^2 ,和实车情况并不相同。但是地板尺寸大小主要影响结构的低频整体模态,对于离散点的减振测试结果仍具有参考意义。考虑到尺寸问题,为了不给地板样件附加刚度,地板的四周为自由边界。

表 1 给出了 111 Hz 时新地板结构和原地板结构的减振性能测试结果对比。

表 1 地板振动性能试验结果对比

测点位置	原地板	新地板
地板外角	26.9	11.4
地板侧边中心	24.9	17.1
减振器上方	30.6	18.4

由表 1 可看出,针对高速列车 250 km/h 匀速运行时的 111 Hz 过枕垮频率,新地板结构不同测点的振动加速度级相对原地板结构均有不同程度的降低,3 个测点的振动加速度级平均降低了近 12 dB。因此,新地板结构对于 111 Hz 的频率具有良好的减振效果。

4 低温环境下车内噪声控制方案验证

为了验证新地板结构装车之后的降噪效果,对使用新、旧地板的同型号高速列车,在相同线路区段进行车内振动和噪声试验。因为试验开始之前,该线路已经限速 200 km/h,所以只能考察 200 km/h 速度下的车内噪声控制效果。试验时间为冬季,环境温度为 -10°C 。

图 11 和图 12 分别给出了高速列车 200 km/h 匀速运行时,使用新、旧地板的高速列车车内客室端部地板垂向振动加速度和车内噪声窄带频谱对比。根据之前的分析,111 Hz 是高速列车 250 km/h 匀速运行时的过枕垮激励频率。当列车运行速度降低到 200 km/h 时,过枕垮激励频率约为 88 Hz。

由图 11 可见,当高速列车以 200 km/h 速度匀速运行时,原地板结构在 88 Hz 存在明显峰值。新

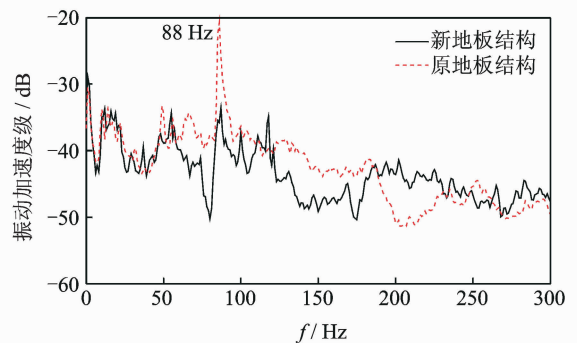


图 11 车内地板振动加速度对比

Fig. 11 Comparison of interior floor vibration

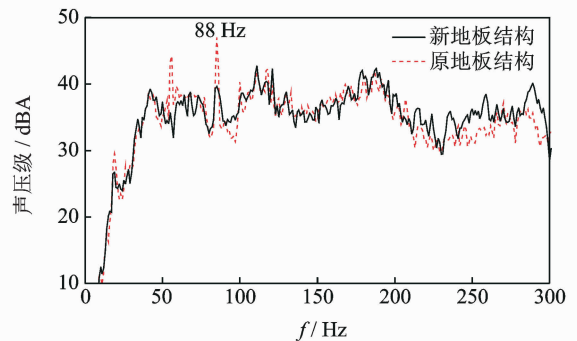


图 12 车内客室端部噪声对比

Fig. 12 Comparison of interior noise at coach end

地板结构在该峰值频率的振动加速度得到有效控制,相比于原地板结构,该频率的加速度级降低了 12.7 dB。

由图 12 可见,使用新地板之后,车内客室端部噪声在 88 Hz 处也得到明显控制,相比于原地板结构,该频率的噪声降低了 7.4 dBA。

因此,从传递路径上进行控制,使用一种金属减振器代替原有地板的支撑结构,优化车体内地板和外地板之间的弹性支撑,对低温环境下高速列车车内客室端部异常噪声问题能够有效改善。

5 结论

1) 车内客室端部噪声异常问题是由于受到列车 250 km/h 匀速运行时的过枕垮频率激励,而冬季运行时转向架区域减振性能下降,使该频率更容易传递至车内,并激发车内客室空腔的声学模态。

2) 通过从传递路径上进行控制,使用一种金属减振器代替原有地板的支撑结构,优化车体内地板和外地板之间的弹性支撑,能够有效改善低温环境下高速列车车内客室端部异常噪声问题。

参 考 文 献

- [1] Soeta Y, Shimokura R. Survey of interior noise characteristics in various types of trains[J]. Applied Acoustics, 2013,74(10):1160-1166.
- [2] Shin C H, Park W G. Numerical study of flow characteristics of the high speed train entering into a tunnel [J]. Mechanics Research Communications, 2003, 30(4):287-296.
- [3] 郭建强,葛剑敏,张华丽. 高速列车受电弓区车内噪声研究与控制[J]. 振动、测试与诊断, 2017, 37(4):662-666.
Guo Jianqiang, Ge Jianmin, Zhang Huali. Internal noise research and control measures of pantograph area of high-speed trains[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2017,37(4):662-666. (in Chinese)
- [4] Mellet C, Létourneaux F, Poisson F, et al. High speed train noise emission; latest investigation of the aerodynamic/rolling noise contribution[J]. Journal of Sound and Vibration, 2006,293(3-5):535-546.
- [5] Park B, Jeon J Y, Choi S, et al. Short-term noise annoyance assessment in passenger compartments of high-speed trains under sudden variation[J]. Applied Acoustics, 2015,97:46-53.
- [6] 王兴宇,范军. 高速列车车内噪声与车轮不圆顺关系的研究[J]. 铁道学报, 2013, 35(9):14-18.
Wang Xingyu, Fan Jun. Research on relation between interior noises and out-of-round wheels of high-speed EMU[J]. Journal of the China Railway Society, 2013, 35(9):14-18. (in Chinese)
- [7] 韩光旭,张捷,肖新标,等. 高速动车组车内异常振动噪声特性与车轮非圆化关系研究[J]. 机械工程学报, 2014, 50(22):113-121.
Han Guangxu, Zhang Jie, Xiao Xinbiao, et al. Study on high-speed train abnormal interior vibration and noise related to wheel roughness[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014,50(22):113-121. (in Chinese)
- [8] 袁旻恣, Shen A, 鲁帆, 等. 高速列车运行工况下噪声传递路径及声源贡献量分析[J]. 振动与冲击, 2013, 32(21):189-196.
Yuan Minmin, Shen A, Lu Fan, et al. Operational transfer path analysis and noise sources contribution for China railway high-speed (CRH)[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013,32(21):189-196. (in Chinese)
- [9] 王金田,孙强,郭伟强,等. 高速列车车间连接处车内噪声特性研究[J]. 噪声与振动控制, 2014, 34(6):97-101.
Wang Jintian, Sun Qiang, Guo Weiqiang, et al. Study on interior noise characteristics of the gangway in high-speed trains[J]. Noise and Vibration Control, 2014, 34(6):97-101. (in Chinese)
- [10] 范蓉平,孟光,孙旭,等. 基于心理声学响度分析的高速列车车内噪声评价[J]. 振动与冲击, 2005, 24(5):46-52.
Fan Rongping, Meng Guang, Sun Xu, et al. Interior noise evaluation for high speed traveling train based on psychoacoustical loudness analysis[J]. Journal of Vibration and Shock, 2005,24(5):46-52. (in Chinese)
- [11] 刘岩,杨冰,叶贵鑫,等. 高速铁路客车车内声品质客观参量与主观评价相关性分析[J]. 铁道学报, 2012, 34(12):35-39.
Liu Yan, Yang Bing, Ye Guixin, et al. Analysis on correlation between objective parameters and subjective evaluation of sound quality of high speed passenger train[J]. Journal of the China Railway Society, 2012, 34(12):35-39. (in Chinese)
- [12] 毛杰,郝志勇,孙强,等. 多物理场耦合激励下的高铁车内中频噪声计算[J]. 浙江大学学报:工学版, 2015, 49(2):315-321.
Mao Jie, Hao Zhiyong, Sun Qiang, et al. High-speed train medium-frequency interior noise calculation under multi-physical-field coupling excitations[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2015, 49(2):315-321. (in Chinese)
- [13] 张捷,肖新标,韩健,等. 高速列车车内客室端部噪声分布特性与声学模态分析[J]. 机械工程学报, 2014, 50(12):97-103.
Zhang Jie, Xiao Xinbiao, Han Jian, et al. Characteristics of noise distribution at the ends of the coach and acoustic modal analysis of high-speed train [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014,50(12):97-103. (in Chinese)



第一作者简介:孙强,男,1980年10月生,博士、高级工程师。主要研究方向为车辆振动噪声分析及控制。曾发表《Monitoring and analysis of acoustic characteristics of interior noise of a high-speed train running in low temperature environment》(《11th International Workshop on Structural Health Monitoring》California, USA: Stanford, 2017)等论文。

E-mail: sunqiang@cccar.com.cn

通信作者简介:肖新标,男,1978年8月生,博士、副研究员。主要研究方向为铁路噪声与振动。

E-mail: xinbiaoxiao@163.com

