

# 基于减振器设计的高速列车地板降噪特性研究<sup>\*</sup>

王东镇<sup>1,2</sup>, 葛剑敏<sup>1</sup>

(1. 同济大学物理科学与工程学院 上海, 200092) (2. 中车青岛四方机车车辆股份有限公司 青岛, 266111)

**摘要** 为解决铁路列车在轻量化、高速化的过程中带来的一系列车辆振动和噪声问题, 针对已有车体结构, 重点研究了地板减振器参数变化对改善车辆隔声性能的影响。首先, 开展车内噪声特性及车内噪声源识别测试, 探明车内噪声的显著频段、主要声源源强及分布特性; 其次, 对比分析地板内部安装减振器前后车辆噪声特性的变化, 明确地板减振器的降噪效果; 最后, 运用基于声学实验室测试的方法对地板减振器各类参数开展研究和优化设计。研究表明: 地板结构为车内噪声主要传声结构和声源分布区域; 安装地板减振器可以有效提高地板结构的隔声量, 从而达到抑制车内噪声的目的; 改变地板减振器刚度、邵氏 A 硬度、阻尼、载重及数量均对地板结构隔声性能有一定影响。本研究可为轨道车辆减振降噪设计提供依据。

**关键词** 高速列车; 减振降噪; 隔声量; 减振器; 优化设计

**中图分类号** U270.1<sup>+</sup>6; TH140

## 引言

高速铁路具有速度高、运能大、安全性高、舒适方便和比陆路及航空运输能耗更低等特点, 在我国得到了迅猛发展, 成为我国铁路运输现代化的重要标志。伴随着列车运行性能的提升以及越加成熟的高速铁路系统的建立, 铁路列车轻量化、高速化成为趋势, 但同时带来高速列车的振动噪声问题, 进而影响到司乘人员的乘坐体验。因此, 高速列车减振降噪已经逐渐成为我国高速铁路技术的重点难题。

研究人员开展了大量的关于高速列车减振降噪优化设计和控制研究的相关工作。文献[1-2]从建筑工程角度对隔声、振动控制进行了研究, 形成了一系列建筑结构声学 and 振动设计的方法和理论。王佐民等<sup>[3]</sup>采用理论分析和实验方法拓展了双层结构的隔声和吸声理论。伏蓉等<sup>[4]</sup>基于传递矩阵法, 建立“铝板+多孔材料层+空气层+碳纤维增强板”的典型高速动车组多层车体断面复合隔声结构计算分析模型, 提出轻量化的复合隔声吸声结构。郭建强等<sup>[5]</sup>提出受电弓减振安装方案, 并在模拟实车环境下验证了其降噪效果和可靠性。张玉梅等<sup>[6]</sup>结合低地板车辆的线路测试, 获取了低地板车动车、拖车、车内及转向架噪声特性, 可为低地板车振动噪声控制和低噪声设计提供参考。张捷等<sup>[7-8]</sup>基于线路实

验, 采用球形阵列分别对低地板列车和高速列车进行车内声源识别, 研究不同区域的振动噪声分布和传递特性。张丰收等<sup>[9-10]</sup>基于有限元方法, 结合声学分析软件建立分析模型, 进行了无阻尼条件下边界条件、面板厚度和激励位置对外地板结构模态振动特性和板结构声辐射特性影响分析。邢鹏等<sup>[11]</sup>提出了一种基于实验分析的统计能量分析方法, 解决了车内中高频噪声预测分析准确性低的缺陷。吴健等<sup>[12]</sup>等基于有限元-统计能量混合法, 建立高速列车车体铝型材振动声辐射预测模型, 研究了敷设黏弹性阻尼层对铝型材结构声振特性的影响。结果表明, 在型材顶板、底板以及型材内表面敷设黏弹性阻尼可明显抑制 500 Hz 以上中高频频段的振动声辐射。姚丹等<sup>[13]</sup>基于传递矩阵法, 建立了轻量化城轨列车顶板结构隔声特性预测分析模型, 计算分析了典型多孔材料在顶板结构应用的隔声性能提高效果。结果表明, 通过多孔材料的添加应用, 可有效提高顶板结构在 315 Hz 处隔声低谷的隔声量。王瑞乾等<sup>[14]</sup>通过实验室测试, 研究了在铝型材表面喷涂阻尼对其减振降噪效果的影响。结果显示, 随着阻尼层厚度的增加, 铝型材的隔声效果呈现提高趋势, 尤其是在 500 Hz 以上的中高频段。

上述研究主要从型材设计等方面开展了车辆减振降噪优化研究, 但是型材设计更加适用于车辆设计的初期阶段, 笔者针对已有车体结构, 重点研究地

<sup>\*</sup> 国家重点研发计划资助项目(2016YFB1200500)

收稿日期: 2019-07-08; 修回日期: 2019-08-14

板减振器参数变化对车辆降噪性能的影响。首先,对车内噪声特性及车内噪声源展开研究,探明车内噪声的显著频段及来源;其次,对比车体地板内部安装减振器前后车辆噪声特性差异;最后,运用基于声学实验室环境测试的方法,对地板减振器各类参数开展优化设计。

## 1 高速列车车内噪声特性分析

车辆在运行时,车外噪声源会透过车体板件结构向车内辐射噪声。同时,来自转向架区域、设备悬挂位置的结构振动也会传递到车体并引起车体振动及辐射噪声。图1为列车以300 km/h速度匀速运行时,车内客室一端标准噪声测点的频谱特性。由图可知,车内噪声总值为65.9 dB(A),最大噪声频段为1 250 Hz。按照最大噪声频段下降10 dB(A)的规则来确定其主频为160~3 150 Hz的噪声频段。

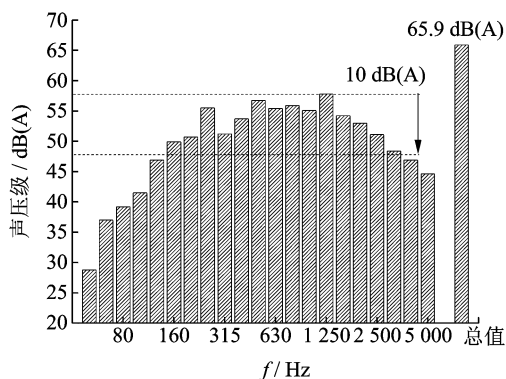


图1 车内噪声频谱特性

Fig. 1 The spectrum characteristics of interior noise

为确定车内噪声来源,需要对车内噪声源进行识别和定位。运用B&K公司研发的刚性球形阵列系统开展车内声源识别工作,其构成主要包括50个传声器通道以及12个摄像头,如图2所示。图3为列车以300 km/h速度匀速运行时,全频段(50~5 000 Hz)和最大噪声频段(1 250 Hz)的声源识别结果。图中球形阵列面对车内端门方向,顶部为车顶板,底部为车内地地板,左右方向为侧墙。由图可知,无论是全频段还是最大噪声频段,车内噪声源均主要位于地板位置。

图4为车辆运行时的车外噪声源识别结果。由图可知,车辆运行时的噪声源主要来自于转向架区域噪声。当转向架区域产生显著噪声时,会向上传递至车内,进而增大车内噪声。

综上所述,在转向架区域产生的噪声传递至车内这个过程中,车辆地板是非常重要的一个结构。

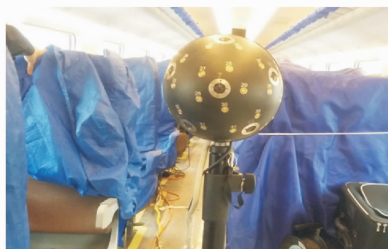
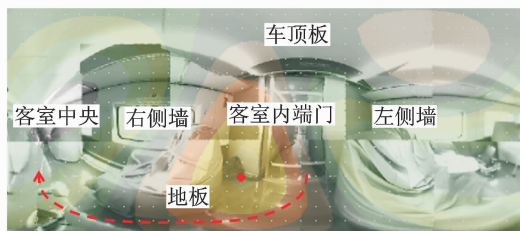
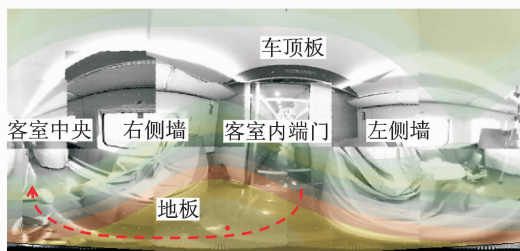


图2 车内声源识别系统

Fig. 2 Vehicle sound source recognition system



(a) 50~5 000 Hz



(b) 1 250 Hz

图3 车内声源识别结果

Fig. 3 Vehicle interior sound source recognition results

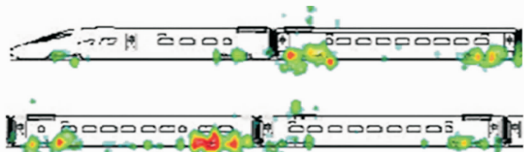


图4 车外声源识别结果

Fig. 4 Vehicle exterior sound source recognition results

因此,可以通过对地板进行降噪处理来实现车内噪声控制的目标。

## 2 减振器降噪效果研究

对于组合车体地板来说,由于声桥的存在,在入射声波激发下的第1块板的振动可能通过声桥传递到第2块板上,从而在第2块板上原有的声激发振动上又附加了振动,增大了向透射面辐射的噪声,导致了隔声性能的下降。显然,声桥刚度越大,其振动传递能力越强,导致隔声性能下降越多。因此,将传统的车体地板的刚性支撑梁断开,并安装地板减振器(如图5所示),可以减少声桥的传声作用,提高隔

声量。对于地板减振器的设计需要考虑形变控制原则、模态匹配原则、轻量化设计原则和可靠性设计原则等方面的要求。

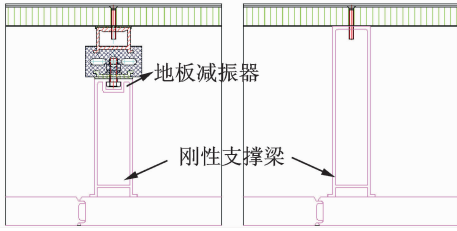


图 5 地板减振器安装位置

Fig. 5 Installation position of floor absorber

为研究安装地板减振器对地板结构隔声特性的影响,分别对刚性支撑梁地板结构和安装减振器地板结构进行隔声特性测试,结果如图 6 所示。

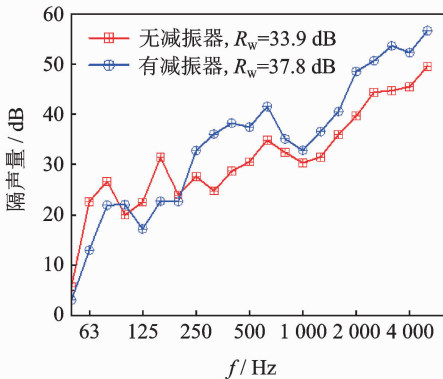


图 6 地板结构隔声特性对比

Fig. 6 Comparison of sound insulation characteristics of different floor structures

由图 6 可知,在安装地板减振器后,总的来说地板结构的隔声量由 33.9 dB 增大到 37.8 dB,增大 3.9 dB。从频域上来看,安装减振器后,地板结构的隔声量在大于 200 Hz 的频段显著增加,而 0~200 Hz 频段内安装减振器反而会减小其隔声量。其主要原因在于减振器在低频段存在大量的固有模态,导致其在低频段隔声薄弱。由以上分析可知,车内噪声最显著频段为 160~3 150 Hz,可以看出安装地板减振器后,地板结构在此频段隔声量增大明显。

为了研究安装地板减振器对车内噪声的影响,分别测试某车辆安装地板减振器前后的车内噪声特性,结果如图 7 所示。其中,列车的运行速度为 300 km/h 匀速运行。

由图 7 可知,在安装地板减振器后,车内地板近场噪声由 65.9 dB(A) 降低至 63.8 dB(A),降低了 2.1 dB(A),达到了降噪的目的。从频谱上看,车内噪声主要在大于 200 Hz 的频段显著降低,这也与地

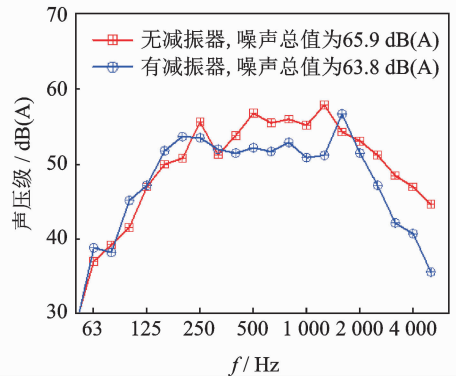


图 7 车内噪声频谱特性对比

Fig. 7 Comparison of spectrum characteristics of interior noise of different floor structures

板结构的隔声特性曲线相吻合。

综上所述,安装地板减振器可以有效提高地板结构的隔声量,进而达到控制车内噪声的目的。然而,地板减振器参数众多,需要对其参数进行优化设计,以得到降噪效果最显著的减振器优化方案。

### 3 测试方案

#### 3.1 测试原理

图 8 为实验室测试地板结构的隔声特性原理示意图及安装方式。在发声室中,通过麦克风测试混响声场的平均声压,在接收室(半自由声场)中,通过声强探头扫描整个地板区域的声强结果,根据式(1)测试得到地板结构的隔声量。

$$R_w = L_1 - L_{1n} - 6 \quad (1)$$

其中: $L_1$  为发声室的平均声压级; $L_{1n}$  为接收室中样品表面的声强级。

#### 3.2 测试工况

本次测试从地板减振器的刚度、邵氏 A 硬度、阻尼、数量和载重等 5 个方面展开研究,共设置 9 组地板结构试样,如表 1 所示。表中刚度和阻尼为单个减振器的性能参数,按照 TB/T2843 中附录 A 和附录 B 测试方法获取。硬度为减振器中硫化橡胶的邵氏 A 硬度,按照 GB/T 531.1 测试方法获取。载重通过模拟现车座椅与地板接触面积通过实验工装进行加载,空载为地板不加载荷的重量,半载和满载分别为模拟现车一半成员和定员,按照实际座椅与地板的支撑面等效施加到实验地板的载荷。通过对比样件 1 和样件 2 的隔声特性,可以研究减振器刚度对隔声特性的影响;通过对比样件 2 和样件 3 的隔声特性,可以研究减振器硬度对隔声特性的影

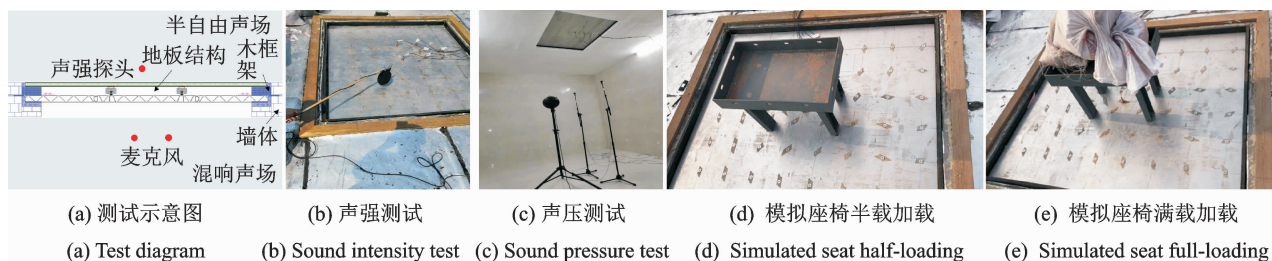


图8 试验测试原理

Fig. 8 Test principle

表1 测试样件参数

Tab. 1 Test sample parameters

样件编号	数量	刚度/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$ )	邵氏 A 硬度/ Shore A	阻尼	载重
1	4	480	55	0.91	空载
2	4	900	55	0.91	空载
3	4	900	65	0.91	空载
4	4	430	50	1.26	空载
5	4	430	50	0.91	空载
6	6	900	65	0.91	空载
7	10	900	65	0.91	空载
8	6	900	65	0.91	半载
9	6	900	65	0.91	满载

响;通过对比样件4和样件5的隔声特性,可以研究减振器阻尼对隔声特性的影响;通过对比样件3、样件6和样件7的隔声特性,可以研究减振器数量对隔声特性的影响;通过对比样件6、样件8和样件9的隔声特性,可以研究减振器载荷对隔声特性的影响。

## 4 地板减振器优化设计方案对比

### 4.1 刚度影响

图9为减振器刚度变化对地板隔声量的影响。被测减振器刚度值分别为900 kN/m和480 kN/m,其他参数均相同。从图9可以看出,减振器刚度从900 kN/m降低到480 kN/m时,地板结构的隔声量增大了1.1 dB。减振器刚度变化对地板隔声量的影响主要集中在100~500 Hz频段内,最大差异在10 dB以上。在100~160 Hz频段内,减振器刚度为900 kN/m时,隔声量较大;在200~500 Hz,减振器刚度为480 kN/m时,隔声量较大。

### 4.2 硬度影响

图10为减振器硬度变化对地板隔声量的影响。被测减振器邵氏A硬度值分别为55 Shore A和65 Shore A,其他参数均相同。可以看出,减振器邵氏

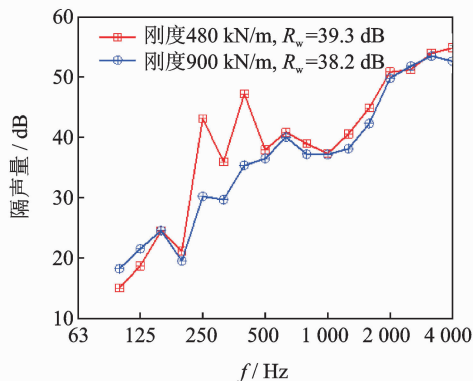


图9 减振器刚度变化对地板隔声量的影响

Fig. 9 The influence of floor absorber stiffness on the sound insulation

A硬度从65 Shore A降低到55 Shore A时,地板结构的计权隔声量增大了1.1 dB。减振器邵氏A硬度变化对地板隔声量的影响主要集中在200~1000 Hz频段内,差异在1.0~2.5 dB之间,减振器邵氏A硬度为55 Shore A时,隔声量较大。

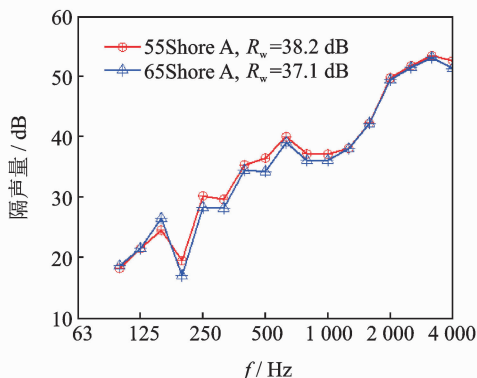


图10 减振器硬度变化对地板隔声量的影响

Fig. 10 The influence of floor absorber hardness on the sound insulation

### 4.3 阻尼影响

减振器阻尼大小对地板隔声量的影响结果如图11所示。被测减振器阻尼值分别为1.26(大阻尼)和0.91(小阻尼),其他参数均相同。



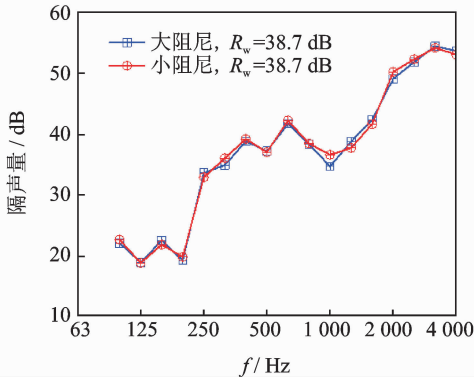


图 11 减振器阻尼变化对地板隔声量的影响  
Fig. 11 The influence of floor absorber damping coefficient on the sound insulation

从图 11 可以看出,减振器阻尼增大,地板结构的计权隔声量保持不变。减振器阻尼变化对地板隔声量的影响主要集中在 315 Hz 和 1 000 Hz,最大差异为 1.9 dB。总体来说,减振器阻尼对地板隔声特性影响不明显,主要原因在于阻尼主要对减振器固有频率处的振动起抑制作用,因此对 100 Hz 以上的隔声量影响不明显。

#### 4.4 支座数量影响

图 12 为减振器数量变化对地板隔声量影响。减振器数量分别为 4,6 和 10。可以看出,减振器数量增大,地板结构的计权隔声量逐渐增大,减振器数量从 4 个增大到 10 个,计权隔声量增大了 0.7 dB。减振器数量变化对地板隔声量的影响主要集中在 100~200 Hz 和 800~4 000 Hz,基本表现为随着减振器数量的增大,隔声量逐渐增大。最大差异出现在 200 Hz,隔声量增大了 4.3 dB。需要注意的是,由于减振器刚度在此工况下较大,导致其对上板约束变大,从而会抑制其振动噪声,但是在其刚度较小

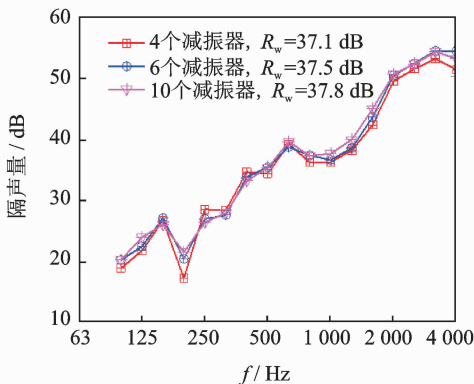


图 12 减振器数量变化对地板隔声量的影响  
Fig. 12 The influence of floor absorber quantity on the sound insulation

时,此结论不一定成立,有待进一步验证。

#### 4.5 地板载重影响

图 13 为减振器载重对地板隔声量的影响。可以看出,地板载重状态从空载变为半载或满载后,地板结构的计权隔声量增大,增大幅度为 1.0 和 0.8 dB。地板载重状态从半载变为满载,隔声量差异不大。地板频率隔声量的变化主要集中在 100~200 Hz,随着约束状态的增大,低频隔声量增大,最大幅度为 7.6 dB。增加载荷会增大地板的约束,尤其是从空载到半载时对地板会直接增加座椅 4 个支撑面的约束,这也是从空载到半载隔声量增大显著,而半载到满载增大不显著的原因。同时,载荷的增加可能会影响试件安装的边界约束条件,这部分对隔声量的影响还有待进一步研究。

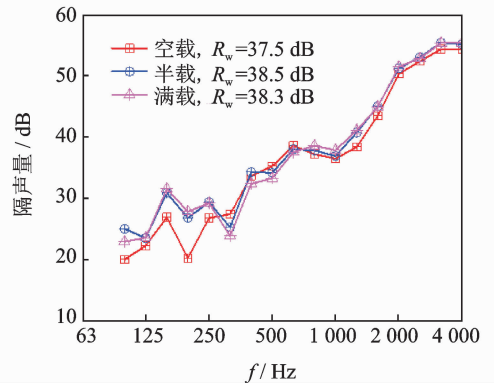


图 13 减振器载重对地板隔声量的影响  
Fig. 13 The influence of floor absorber loading on the sound insulation

### 5 结 论

- 1) 车体地板为主要传声结构,安装地板减振器可以有效提高地板结构的隔声量,进而达到控制车内噪声的目的。
- 2) 减振器刚度和邵氏 A 硬度对地板结构隔声特性影响较为显著,降低减振器刚度和邵氏 A 硬度可以提高地板结构的隔声性能。
- 3) 减振器阻尼对地板结构隔声特性无明显影响,因此可以适当提高减振器阻尼以达到减振的目的。
- 4) 在大刚度条件下,减振器数量的增大会提高地板结构的隔声量。
- 5) 地板载重状态对地板结构隔声特性也有一定影响,半载和满载状态下的隔声量要大于空载状态下的隔声量。
- 6) 从降噪的角度考虑,地板减振器的优化方向应尽量选取低刚度、低硬度和高阻尼。同时,适当增大减振器数量会通过增加约束提高整体地板的刚

度,既可以降噪,也可以提高车辆的平稳性。

### 参 考 文 献

- [1] 马大猷. 噪声与振动控制工程手册[M]. 北京:机械工业出版社, 2002:255-711.
- [2] 杜功焕, 朱哲民, 龚秀芬. 声学基础[M]. 南京:南京大学出版社, 2006: 163-448.
- [3] 王佐民, 姜在秀. 双层板结构隔声性能阻抗法分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2011, 39(9): 1383-1386.  
WANG Zuomin, JIANG Zaixiu. Impedance analysis method for sound insulation of double panels[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2011, 39(9): 1383-1386. (in Chinese)
- [4] 伏蓉, 张捷, 姚丹, 等. 高速列车车体轻量化层状复合结构隔声设计[J]. 噪声与振动控制, 2016, 36(1):39-52.  
FU Rong, ZHANG Jie, YAO Dan, et al. Study on sound insulation and lightening design of layered composite structures for high-speed trains[J]. Noise and Vibration Control, 2016, 36(1):39-52. (in Chinese)
- [5] 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)
- [6] 张玉梅, 肖新标, 温泽峰, 等. 低地板车结构传声及车内噪声特性[J]. 噪声与振动控制, 2014, 34(4): 1-4.  
ZHANG Yumei, XIAO Xinbiao, WEN Zefeng, et al. Structure-borne sound transfer path of a low-floor vehicle and its interior noise property [J]. Noise and Vibration Control, 2014, 34(4): 1-4. (in Chinese)
- [7] 张捷, 肖新标, 王帝, 等. 350km/h 以上高速列车观光区噪声特性及其评价研究[J]. 铁道学报, 2012, 34(10):23-29.  
ZHANG Jie, XIAO Xinbiao, WANG Di, et al. Preliminary investigation into aerodynamic noise of a certain type of pantograph under of 350km/h[J]. Journal of the China Railway Society, 2012, 34(10):23-29. (in Chinese)
- [8] 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)
- [9] 张丰收, 沈火明. 无阻尼高速列车板结构声辐射特性研究[J]. 四川理工学院学报(自然科学版), 2017, 30(3): 35-40.  
ZHANG Fengshou, SHEN Huoming. Research on the structural vibration and sound radiation of plate on high-speed without damp[J]. Journal of Sichuan University of Science & Engineering(Natural Science Edition), 2017, 30(3): 35-40. (in Chinese)
- [10] 张丰收. 高速列车铝型材板结构振动与声辐射特性研究[D]. 成都:西南交通大学, 2015.
- [11] 邢鹏, 华林, 卢焯华, 等. 基于实验 SEA 方法的车内噪声预测分析[J]. 振动、测试与诊断, 2017, 37(5): 928-933.  
XING Peng, HUA Lin, LU Zhihua, et al. Predictive analysis of automobile interior noise based on experimental SEA method[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2017, 37(5):928-933. (in Chinese)
- [12] 吴健, 肖新标, 张玉梅, 等. 基于 FE-SEA 混合法的铝型材振动声辐射特性预测[J]. 噪声与振动控制, 2015, 35(3):33-36.  
WU Jian, XIAO Xinbiao, ZHANG Yumei, et al. Sound radiation prediction and control of section aluminum of high-speed train's car-body based on hybrid FE-SEA method [J]. Noise and Vibration Control, 2015, 35(3):33-36. (in Chinese)
- [13] 姚丹, 杜几平, 张捷, 等. 多孔材料声学参数辨识及其在城轨列车顶板隔声中的应用[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018(1): 253-260.  
YAO Dan, DU Jiping, ZHANG Jie, et al. Parameter identification of acoustic porous materials and its application in sound insulation of metro ceilings[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2018(1): 253-260. (in Chinese)
- [14] 王瑞乾, 肖新标, 刘佳, 等. 高速列车阻尼喷涂式铝型材减振降噪特性试验[J]. 噪声与振动控制, 2014, 34(4): 52-55.  
WANG Ruiqian, XIAO Xinbiao, LIU Jia, et al. Experiments on vibration and noise reduction effect of sprayed-damping section aluminium applied to high-speed trains[J]. Noise and Vibration Control, 2014, 34(4): 52-55. (in Chinese)



**第一作者简介:**王东镇,男,1983年2月生,博士生。主要研究方向为高速列车振动噪声控制技术。曾发表《Vibration and acoustic radiation of bogie aero under random excitation in high-speed trains》(《Journal of Modern Transportation》2019, Vol. 27)等论文。  
E-mail: 834644991@qq.com

