

基于有限元-统计能量混合法的磁浮列车顶板结构声振特性预测分析

彭 垒 贾尚帅 李宝川

(中车唐山机车车辆有限公司, 063035, 唐山//第一作者, 工程师)

摘 要 基于FE-SEA(有限元-统计能量)混合法,建立了能完整考虑内饰板、多孔吸声材料和铝型材的磁浮列车组合顶板声振特性预测模型,预测并对比了磁浮列车圆顶区域、空调区域和侧顶区域的顶板结构声振特性。对比结果显示:侧顶区域顶板的声振特性最优,圆顶和空调区域次之。对于铝型材结构,圆顶区域和空调区域的面密度基本接近,空调区域的计权隔声量比圆顶区域大3.2 dB,总辐射声功率级大3.0 dBA。对于组合结构,空调区域顶板的计权隔声量比圆顶区域大1.0 dB,总辐射声功率级一致。顶板结构的声振特性与其振动响应和辐射效率直接相关。顶板采用铝型材结构时的声振特性差异明显,采用整体组合结构时的声振特性差异会略有减小。

关键词 磁浮列车; 顶板结构; 有限元-统计能量混合法; 声振特性

中图分类号 U270.3

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.04.029

Vibro-acoustic Characteristics Prediction and Analysis of Roof Structures in Maglev Trains Based on FE-SEA Hybrid Method

PENG Lei, JIA Shangshuai, LI Baochuan

Abstract Based on FE-SEA (finite element-statistical energy analysis) hybrid method, a maglev train composite roof vibro-acoustic characteristics prediction model fully considering interior trim panels, porous sound-absorbing materials, and aluminum profiles is established. The roof structure vibro-acoustic characteristics of the three areas of maglev train (dome area, air-conditioning area, and side top area) are predicted and compared. The comparison results show that the vibro-acoustic characteristics of the top plate in the side top area are the best, followed by the dome and the air-conditioning areas. For aluminum profile structure, the area density of the dome and the air-conditioning areas is close. The weighted sound insulation of the air-conditioning area is 3.2 dB larger than that of the dome area and 3.0 dBA larger for total radiated sound power level. For composite structure, the weighted sound insulation

of the roof in air-conditioning area is 1.0 dB larger than that in dome area, and the total radiated sound power level is the same. The vibro-acoustic characteristics of a roof structure are directly related to its vibration response and radiation efficiency. The difference in vibro-acoustic characteristics when using aluminum profile structure is evident, while the difference is slightly reduced when composite structure is used.

Key words maglev train; roof structure; FE-SEA hybrid method; vibro-acoustic characteristics

Author's address CRRC Tangshan Co., Ltd., 063035, Tangshan, China

为平衡载客量和磁浮力的关系,磁浮列车车体结构往往采用轻量化设计。而车体结构的轻量化,必然会导致其减振降噪性能的降低,从而影响内部噪声水平及乘客乘坐舒适性。

磁浮列车主要有3大噪声源:推进及辅助设备噪声、机械或结构辐射噪声、气流噪声^[1]。与传统城市轨道交通类似,磁浮列车的车外噪声主要通过车体板材结构传播进入到车厢内部。当列车在隧道中运行时,车内噪声主要来源于顶板方向。为了有效地抑制噪声从车外传入车内,对磁浮列车顶板结构声振特性的评估就显得至关重要。

典型的轨道交通车辆车体结构主要包括车体型材和内饰板,两者之间填充多孔吸声材料。文献[2]通过有限元法建立了地板、侧墙及顶板的隔声仿真模型,对不同区域进行了优化。文献[3]基于统计能量法对铝型材结构进行了隔声仿真分析,对比了阻尼处理对铝型材隔声性能的影响。文献[4]基于传递矩阵法,对城轨列车双层中空顶板结构的隔声特性进行了预测分析。文献[5]基于FE-SEA(有限元-统计能量)混合法^[6-7]计算了地铁车辆铝型材结构的隔声性能,并与试验测试结果进行对比,验证了模型。相比于有限元法、统计能量法和

传递矩阵法, FE-SEA 混合法可以更加精准有效地预测铝型材结构在全频段内的声振特性。

为更加精确地评估磁浮列车组合顶板结构的声振特性, 本文基于 FE-SEA 混合法, 建立了能完整考虑内饰板、多孔吸声材料和铝型材的组合顶板声振特性预测模型, 对比分析了圆顶区域、空调区域及侧顶区域的顶板结构声振特性。

1 FE-SEA 混合法

在计算磁浮列车组合顶板结构的隔声特性和振动声辐射特性时, FE-SEA 混合法将系统整体结构分解为确定性子系统和非确定性子系统, 并将确定性子系统用 FE(有限元法)或边界元法来描述, 将非确定性子系统用 SEA(统计能量法)来描述, 结合子系统间振动波的传递与反射, 通过振动能量互换原理, 分析各个子系统之间的相互动态影响。

FE 子系统的动态响应 S_{qq} 为:

$$\langle S_{qq} \rangle = D_{\text{tot}}^{-1} \left(S_{\text{ff,ext}} + \sum_m \frac{4E_m}{\pi\omega n_m} \text{Im} \{ D_{\text{dir},m} \} \right) D_{\text{tot}}^{-H} \quad (1)$$

式中:

D_{tot} ——FE 子系统的总动刚度矩阵, 为 FE 子系统本身的动刚度矩阵与各 SEA 子系统的直接场总动刚度矩阵的叠加;

$D_{\text{dir},m}$ ——第 m 个 SEA 子系统的直接场总动刚度矩阵;

$S_{\text{ff,ext}}$ ——外部激振力作用下的位移响应;

E_m ——第 m 个 SEA 子系统的统计能量响应;

ω ——角频率;

n_m ——第 m 个子系统的模态密度。

对于 SEA 子系统, 存在能量平衡方程:

$$P_{\text{in,dir},m} = P_{\text{out,rev},m} + P_{\text{diss},m} \quad (2)$$

式中:

$P_{\text{in,dir},m}$ ——输入到第 m 个 SEA 子系统的直接场平均功率流;

$P_{\text{out,rev},m}$ ——混响激励下第 m 个 SEA 子系统混响场的输出功率流;

$P_{\text{diss},m}$ ——第 m 个 SEA 子系统自身耗散的功率流。

将输入功率流、输出功率流和耗散功率流分别用模态密度的形式描述, 则有:

$$(M_m + h_{\text{tot},m}) \frac{E_m}{n_m} - \sum_n h_{nm} \frac{E_n}{n_n} = P_{\text{in},0,m} \quad (3)$$

式中:

M_m ——第 m 个 SEA 子系统半功率带宽中的模态重叠因子;

$h_{\text{tot},m}$ ——从子系统 m 混响场中的输出能量系数;

h_{nm} ——子系统 n 和 m 之间的功率传递系数;

$P_{\text{in},0,m}$ ——第 m 个 SEA 子系统外部激励的输入功率流。

结合子系统的能量平衡方程, 即可求得各个 SEA 子系统的能量响应以及确定性子系统的位移响应。

2 顶板声振特性预测模型

基于 FE-SEA 混合法, 在 ESI VA One 软件中建立磁浮列车组合顶板的声振特性预测模型, 如图 1 所示。将顶板结构沿纵向拉伸 1 m 并划分网格, 对其隔声性能及声辐射性能进行预测分析。

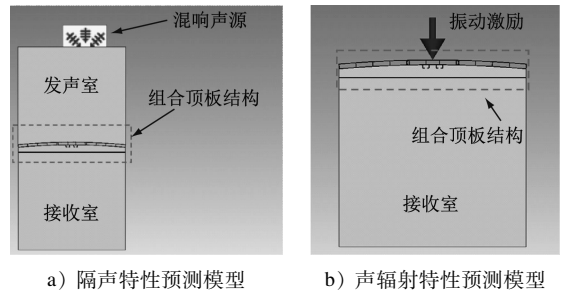


图 1 磁浮列车组合顶板声振特性预测模型

Fig. 1 Vibro-acoustics characteristics prediction model of maglev train composite roof

图 1 a) 中: 发声室和接收室由上下 2 个空腔模拟; 在发声室顶板外侧施加混响声源; 铝型材结构用 FE 子系统模拟, 其他结构用 SEA 子系统模拟。通过组合顶板内外两侧声腔的声能量来计算其隔声量:

$$R = 10 \lg \left(\frac{A\omega}{8\pi^2 c_0^2 \eta_2 n_1} \left(\frac{E_1}{E_2} - \frac{n_1}{n_2} \right) \right) \quad (4)$$

式中:

R ——隔声量;

A ——组合顶板向接收室一侧辐射能量时的辐射面积;

c_0 ——空气中的声速;

E_1 ——发声室的能量;

E_2 ——接收室的能量;

n_1 ——发声室的模态密度;

n_2 ——接收室的模态密度;

η_2 ——接收室的阻尼损耗因子。

图1 b)中,空腔模拟接收室;在组合顶板结构外侧施加单位力作为激励;铝型材结构用FE子系统模拟,其他结构用SEA子系统模拟。通过计算组合顶板内侧声腔的辐射声功率来评价其振动声辐射特性。

文献[8]基于试验测试结果,对采用FE-SEA混合法计算的地铁列车地板结构隔声及振动声辐射特性进行了详细验证。本文计算模型与文献[8]相同,故不再详细赘述模型验证过程。

3 顶板声振特性预测分析

图2为某磁浮列车车体顶板结构截面图。车体顶板主要划分为圆顶区域、空调区域和侧顶区域。本文根据车体顶板结构截面划分网格,建立各区域的声振特性预测模型。模型中各层材料的密度通过称重得到,弹性模量、泊松比和阻尼损耗因子等参数主要参考同类型材料确定。将碳纤维棉的吸声系数通过驻波管测试后加载到模型中。模型中边界条件定义为自由状态。

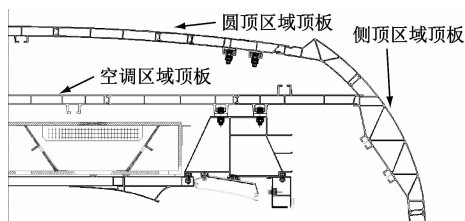


图2 磁浮列车车体顶板结构截面图

Fig.2 Section of maglev train body roof structure

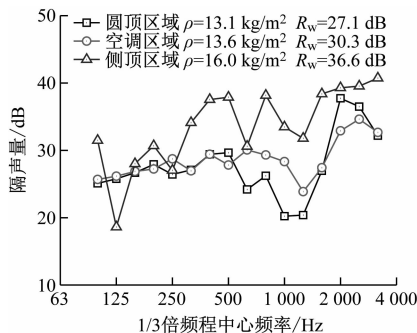
3.1 顶板采用铝型材结构

3个区域顶板采用铝型材结构时的声振特性预测结果如图3所示。

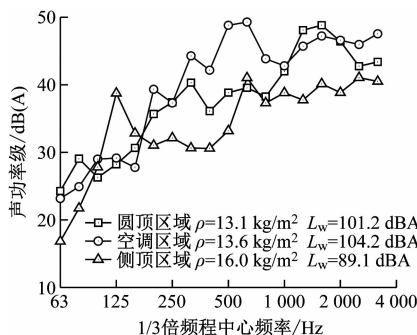
由预测结果可知,圆顶区域和空调区域顶板铝型材的面密度基本接近,但空调区域计权隔声量比圆顶区域计权隔声量大3.2 dB。由图3 a)可见,在630~1 250 Hz,空调区域隔声量比圆顶区域隔声量大3.1~8.1 dB。

图4为圆顶区域和空调区域顶板铝型材的窄带隔声量结果。由图4可知,在500~1 500 Hz范围内,圆顶区域存在更多的窄带隔声低谷,其导致了1/3倍频程频带隔声量和计权隔声量的降低。

窄带隔声低谷主要与铝型材振动响应相关。图5为单位声压激励下圆顶区域和空调区域顶板铝



a) 隔声特性



b) 声辐射特性

注: ρ 为材料面密度; R_w 为计权隔声量; L_w 为总辐射声功率级

图3 顶板铝型材结构声振特性预测结果

Fig.3 Prediction results of vibro-acoustic characteristics of aluminum profile roof structure

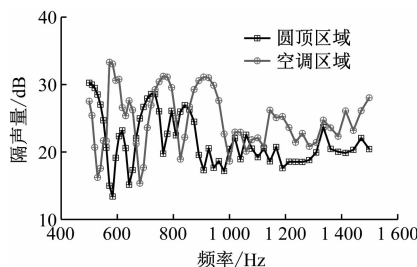


图4 顶板铝型材结构的窄带隔声量结果

Fig.4 Narrow band sound insulation results of aluminum profile roof structure

型材的窄带振动速度响应结果。在550~2 000 Hz范围内,圆顶区域的振动响应更为剧烈。

圆顶区域和空调区域顶板铝型材的面密度基本接近,但空调区域的总声功率级比圆顶区域大3.0 dBA。由图3 b)可以看出,在400~800 Hz,空调区域声功率级比圆顶区域声功率级大11.2~19.9 dBA。

图6和图7为圆顶区域和空调区域顶板铝型材在单位力激励下的窄带振动响应和声辐射效率结果。

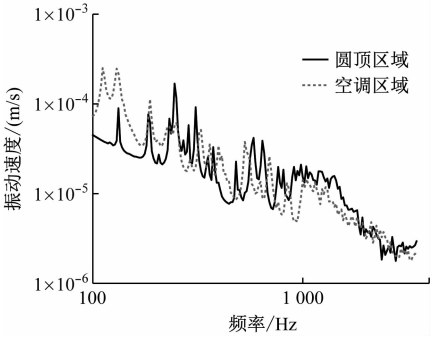


图5 顶板铝型材结构的窄带振动响应结果(声激励)
Fig. 5 Narrow band vibration response results of aluminum profile roof structure (acoustic excitation)

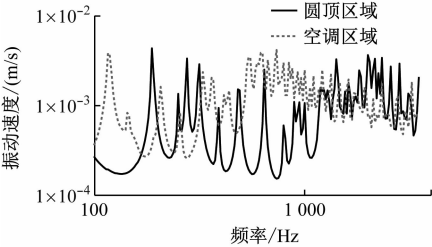


图6 顶板铝型材结构的窄带振动响应结果(力激励)
Fig. 6 Narrow band vibration response results of aluminum profile roof structure (force excitation)

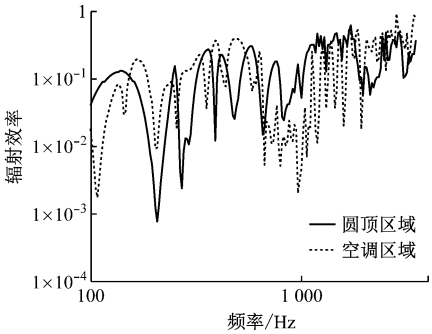


图7 顶板铝型材结构的窄带声辐射效率结果(力激励)
Fig. 7 Narrow band sound radiation efficiency results of aluminum profile roof structure (force excitation)

由图6及图7可见:在320~1 150 Hz范围内,空调区域的振动响应更为剧烈;在360~650 Hz范围内,空调区域的声辐射效率较大,在650~1 800 Hz范围内,空调区域的声辐射效率较小。受振动响应和声辐射效率的共同影响,空调区域顶板铝型材在400~800 Hz的声功率级较大。

3.2 顶板采用组合结构

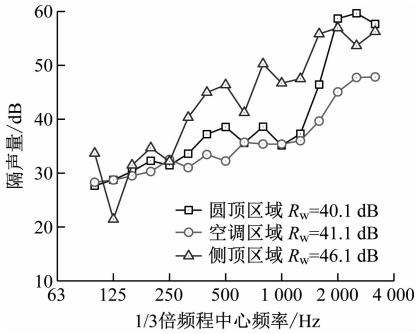
3个区域顶板采用组合结构方案的排布方式及各层材料厚度如表1所示。3种区域顶板组合结构的声振特性预测结果如图8所示。

由图8可知,侧顶区域顶板的计权隔声量最大,

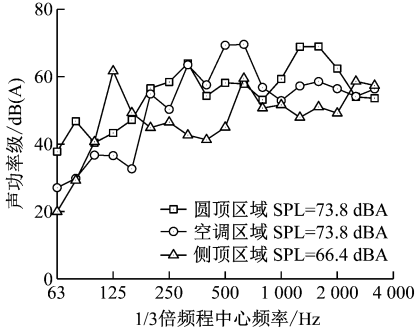
表1 顶板组合方案及材料参数

Tab. 1 Composite roof scheme and material parameters

方案	厚度/mm	密度/(kg/m ³)	
顶板铝型材	圆顶区域	30	2 700
	空调区域	30	2 700
	侧顶区域	50	2 700
碳纤维棉		50	11.45
镁合金板 + 骨架		2	1 780



a) 隔声特性



b) 声辐射特性

图8 3种区域顶板组合结构的声振特性预测结果

Fig. 8 Prediction results of vibro-acoustic characteristics of roof structure in dome area

总辐射声功率级最小。

3.3 2种结构方案的隔声特性对比

由图3,当顶板采用铝型材结构时,与圆顶区域相比,空调区域的计权隔声量大3.2 dB,总辐射声功率级大3.0 dB(A)。由图8,当顶板采用组合结构时,与圆顶区域相比,空调区域的计权隔声量大1.0 dB,总辐射声功率级一致。

由此可见,顶板采用铝型材结构时的声振特性差异明显,采用整体组合结构时的声振特性差异会略有减小。

4 结语

本文基于FE-SEA混合法,建立了磁浮列车顶板结构声振特性预测模型,预测并对比了3个不同

区域顶板的声振特性。主要结论如下:

1) 对比铝型材结构的3个顶板区域:侧顶区域的面密度最大,计权隔声量最大,辐射声功率级最小;圆顶和空调区域的面密度基本接近;与圆顶区域相比,空调区域的计权隔声量大3.2 dB,总辐射声功率级大3.0 dB(A)。

2) 在单位声压激励下:在550~2 000 Hz范围内,圆顶区域的振动响应更为剧烈;在500~1 500 Hz范围内,圆顶区域存在更多的窄带隔声低谷,由此导致了1/3倍频程频带隔声量和计权隔声量的降低。

3) 在单位力激励下:空调区域在320~1 150 Hz范围内的振动响应更为剧烈,在360~650 Hz范围内的声辐射效率较大,在650~1 800 Hz范围内的声辐射效率较小。受到振动响应和声辐射效率的共同影响,空调区域铝型材顶板在400~800 Hz范围内的声功率级较大,由此导致了总辐射声功率级的增大。

4) 对比采用组合结构的3个顶板区域预测结果:侧顶区域顶板的计权隔声量最大,总辐射声功率级最小;空调区域顶板的计权隔声量比圆顶区域的计权隔声量大1.0 dB,二者总辐射声功率级一致。顶板采用铝型材结构时的声振特性差异明显,采用整体组合结构时的声振特性差异会略有减小。

参考文献

- [1] 梁燕,俞英杰,葛剑敏,等.磁悬浮车辆噪声源及噪声特性分析[J].噪声与振动控制,2007(增刊1):46.
- LIANG Yan, YU Yingjie, GE Jianmin, et al. Analysis on noise source and its noise property of maglev vehicles[J]. Noise and Vi-

bration Control, 2007(S1):46.

- [2] 郭会越.车体铝合金型材断面的声学优化[D].北京:北京交通大学,2015.
- GUO Huiyue. The acoustic optimization of aluminum car body profile section[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015.
- [3] 张媛媛.高速列车铝型材外地板结构振动与减振降噪性能分析研究[D].成都:西南交通大学,2013.
- ZHANG Yuanyuan. Research on the vibration and sound transmission loss of the external floor high-speed train[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.
- [4] 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.
- 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 University (Science and Technology), 2018(1):253.
- [5] 吴健.地铁列车车内噪声预测与车体铝型材减振降噪优化[D].成都:西南交通大学,2016.
- WU Jian. Prediction of interior noise of subway train and optimization of extruded aluminum profile for vibration and noise reduction [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.
- [6] LANGLEY R S, BREMNER P. A hybrid method for the vibration analysis of complex structural-acoustic systems[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1999,105:1657.
- [7] SHORTER P J, LANGLEY R S. Vibro-acoustic analysis of complex systems[J]. Journal of Sound and Vibration, 2005,288:669.
- [8] 詹雪燕.地铁列车加筋铝型材地板声学特性分析与优化[D].成都:西南交通大学,2018.
- ZHAN Xueyan. Analysis and optimization of acoustical characteristics of metro reinforced extruded aluminum floor[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.

(收稿日期:2020-05-08)

(上接第136页)

- [17] 周文皎,习奇,申文君,等.丰沙线危岩落石风险评估及整治[J].铁道建筑,2018(6):100.
- ZHOU Wenjiao, XI Qi, SHENG Wenjun, et al. Rockfall analysis and risk assessment for Fengtai-Shacheng Railway[J]. Railway Engineering, 2018(6):100.
- [18] 翟继伟.辛泰线危岩落石整治[J].路基工程,2012(3):189.
- ZHAI Jiwei. Treatment on dangerous rock and rockfall along Linzi-Taian Railway Line[J]. Subgrade Engineering, 2012(3):189.
- [19] 罗章波.小平地隧道进口危岩落石分析及整治设计[J].隧道建设,2013(9):768.
- LUO Zhangbo. An analysis and design for the treatment of rock falls at the entrance portal of Xiaopingdi tunnel[J]. Tunnel Construction, 2013(9):768.
- [20] 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.滑坡防治工程勘查规范:GB/T 32864—2016[S].北京:中国标准出版社,2016.

General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Code for geological investigation of landslide prevention: GB/T 32864—2016 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.

- [21] 罗田.岩质边坡危岩落石运动特征和防护研究[D].成都:西南交通大学,2013.
- LUO Tian. Study on movement characteristics and protection work design of rockfall on the rock slope[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.
- [22] 国家铁路局.铁路特殊路基设计规范:TB 10035—2018, J 158—2018[S].北京:中国铁道出版社有限公司,2018.
- National Railway Administration of the People's Republic of China. Code for design on special railway earth structure: TB 10035—2018, J 158—2018 [S]. Beijing: China Railway Publishing House Co., Ltd., 2018.

(收稿日期:2020-03-20)