文章编号：1006-1355(2015)03-0033-04+107

基于FE-SEA混合法的铝型材振动声辐射特性预测

吴 健[1,2]，肖新标[1]，张玉梅[1]，圣小珍[1]

(1. 西南交通大学 牵引动力国家重点实验室，成都 610031；
2. 西南交通大学 材料先进技术教育部重点实验室，成都 610031)

摘 要：基于FE-SEA混合法建立高速列车车体铝型材振动声辐射预测模型，并与FE-BEM模型的预测结果进行对比分析，验证模型的有效性，进而运用该模型分析黏弹性阻尼减振降噪技术对于抑制铝型材振动声辐射的效果。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。在型材表面敷设黏弹性阻尼时，型材声辐射效率变化不大，型材振动被抑制导致其向半空间辐射声功率降低。对比顶板和型材内表面阻尼敷设形式，在型材底板敷设阻尼具有较高的经济性，更加有利于实现车体的轻量化设计。相关结果可为高速列车车体铝型材的减振降噪设计提供理论参考。

关键词：振动与波；高速列车；中空铝型材；振动声辐射；FE-SEA混合法

中图分类号：U270.1 **文献标识码**：A DOI编码：10.3969/j.issn.1006-1335.2015.03.008

Sound Radiation Prediction and Control of Section Aluminum of High-speed Train's Car-body Based on Hybrid FE-SEA Method

WU Jian[1,2], *XIAO Xin-biao*[1], *ZHANG Yu-mei*[1], *SHENG Xiao-zhen*[1]

(1. State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;
2. Key Laboratory of Advanced Technologies of Materials, Ministry of Education,
Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract : The hybrid FE-SEA model was developed to predict the sound radiation of section aluminum of high-speed train's car-body. The model was verified through the comparison of the results with those calculated by using the FE-BEM model. The effect of the viscoelastic damping technique on the sound radiation suppression was analyzed with this model. The prediction results show that the sound radiation of the section aluminum with viscoelastic damping material attached to the top and the bottom and the inner surface of the section aluminum can significantly suppress the sound radiation in the medium- and- high frequency range above 500 Hz. While the acoustic radiation efficiency does not change a lot if the viscoelastic damping material is attached to the outer surface of the section aluminum. Comparing the types of the viscoelastic damping material attachment, it is concluded that the viscoelastic damping material attached to the bottom is more economic and feasible. It is beneficial for the light car-body design. This work may provide a theoretical guidance for the design of the section aluminum for noise and vibration reduction of the car-bodies.

Key words : vibration and wave ; high-speed train ; hollow section aluminum ; sound radiation ; hybrid FE-SEA

近年来我国的高速铁路获得了迅猛发展，高速列车的最高运营速度达到350 km/h，更高运营速度的高速列车也正在研制中。随着高速列车运营速度的不断提高，车内噪声问题已引发广泛的关注，车内噪声水平已成为评价车内乘坐舒适度的重要指标之一，直接影响高速列车在运输行业的竞争力[1, 2]。为满足高速运行需要，高速列车需要具有轻量化的车体结构，中空挤压铝型材结构车体在高速列车上得到广泛的应用[3, 4]。在列车运行过程中，车体受到外界激扰力的作用，激励车体铝型材振动并向车内外辐射噪声。因此，研究高速列车车体铝型材的振动声辐射特性，对于控制车体的结构传声、改善车内的声振环境具有着非常重要的意义。

通过实验测试可以获取高速列车车体铝型材的

收稿日期：2015－01－13
基金项目：国家自然科学基金(51475390, U1434201)；
国家863计划(2011AA11A103-2-2)
作者简介：吴健（1990－），男，辽宁锦州人，硕士研究生，目前从事高速列车减振降噪研究。
E-mail: wujian0511@126.com
通讯作者：圣小珍，男，教授，博士生导师。
E-mail: shengxiaozhen@hotmail.com

振动声辐射特性，但是在工程实践中通常希望找到一种有效计算方法对铝型材振动声辐射特性进行准确的预测，以便节省实验带来的巨大消耗，缩短设计周期，节省设计成本。结构声振特性的预测方法主要有：确定性分析方法（有限元法、边界元法等）、统计性分析方法（统计能量法）以及混合模型法（FE-SEA混合法），这些方法有其各自的适用范围和局限性[5]。Montgomery[6]等应用有限元-边界元方法求解出中、低频频段飞机舱壁传声损失的数值解，但是随着计算频率的提高，有限元模型所需要的网格数目急剧增大，不可避免的付出高昂的计算成本，有限元模型参数的任何不确定因素都可能会导致求解失败。张军[7]等应用统计能量法等对中空挤压铝型材高频振动声辐射特性进行预测，但经典的统计能量法是建立在保守弱耦合、激励源互不相干和子结构具有足够高的模态叠合系数等假设下，因此无法对中低频频域结构的声振特性进行准确的预测。FE-SEA混合法集合了有限元法和统计能量法的优点，为结构宽频振动响应分析提供了一种有效手段[8,9]。本文基于FE-SEA混合方法，利用全频段振动噪声分析软件VA One建立了高速列车车体铝型材振动声辐射特性预测模型，并将仿真预测结果与BEM模型预测结果进行对比分析，验证该模型的经济性与有效性，进而应用该模型预测分析了黏弹性阻尼减振降噪技术对于改善铝型材声辐射特性的效果。

1 FE-SEA理论简介

Shorter等[10]对H-混合法的运用给出一套完整的公式，成为H-混合法工程应用的理论基础。在H-混合法模型法理论模型中，对于每个SEA子系统能量平衡方程的建立亦是基于传统SEA理论的能量平衡理论，即子系统的输入功率流$P_{\text{in},k}$等于其输出功率流$P_{\text{out},k}$与自身消耗功率流$P_{\text{dis},k}$之和，如式(1)所示。

$$P_{\text{in},j}=P_{\text{out},j}+P_{\text{diss},j} \tag{1}$$

系统输入到SEA子系统j的直接场的平均功率流可以表示为

$$P_{\text{in},j}=P_{\text{in},j}^{ext}+\sum_{k=1}^{N}P_{\text{in},k\to j} \tag{2}$$

式(2)中，$P_{\text{in},j}^{ext}$是外部激振力S_{ff}输入到SEA子系统j的功率流，$P_{\text{in},k\to j}$为由其他的SEA子系统的混响场载荷$S_{ff,\text{rev}}^{(k)}$输入子系统j的功率流，SEA子系统的输出功率为

$$P_{\text{out},j}=P_{\text{tran},j\to d}+\sum_{k=1}^{N}P_{\text{tran},j\to k} \tag{3}$$

式(3)中，$P_{\text{tran},j\to d}$为由子系统j的混响场传递到FE子系统中的功率流，$P_{\text{tran},j\to k}$为由子系统j的混响场传递到其他SEA子系统中的功率流。

子系统j自身消耗的平均功率流为

$$P_{\text{diss},j}=\omega\eta_j E_j \tag{4}$$

将式(2)、式(3)和式(4)代入式(1)中，求解后可获得各SEA子系统的能量E_j以及子系统间的功率流P_{ij}。

2 FE-SEA混合模型建立及验证

本文铝型材振动声辐射预测模型采用高速列车0.985 m×0.975 m的车体地板铝型材结构，型材截面如图1所示。在全频段振动噪声分析软件VA One中分别建立进行铝型材振动声辐射预测分析的FE-SEA混合模型（图2）和FE-BEM模型（图3），在模型底板中部施加激励载荷，载荷为粉红噪声谱，幅值为1N，对比分析两种模型的精确性与经济性，以便寻求准确而快速的用于分析铝型材隔声特性的最优模型。

图4给出了FE-SEA模型和FE-BEM模型对中空挤压铝型材振动声辐射的预测结果。两种模型的预测结果基本吻合，在1/3倍频程频段辐射声功率幅值相差在0.5 dB以内。由于采用FE-SEA混合模型预测型材振动声辐射时，用SEA子系统半无限流体场（SIF）模拟型材表面的声场环境，与FE-BEM模型相比，计算量小，计算耗时少。因此，FE-SEA模型可以在保证预测结果精确可靠的同时，又具有快速简便的优点，综合考虑建议采用FE-SEA混合模型对型材的振动声辐射进行预测。

图1 型材样件截面图

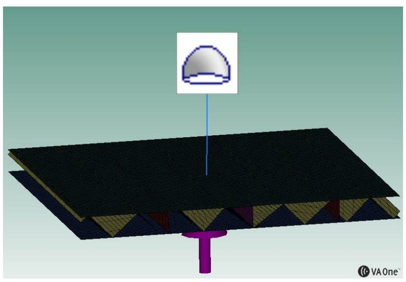

图2 FE-SEA混合模型

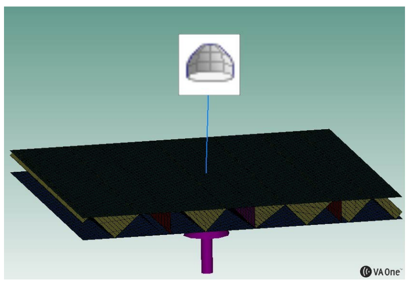

图3 FE-BEM模型

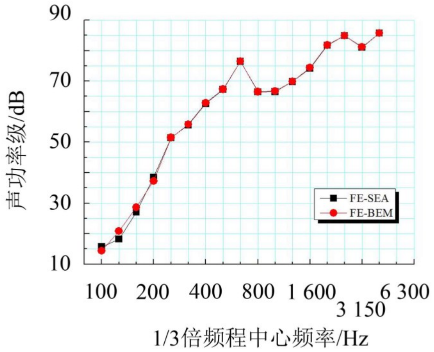

图 4　辐射声功率预测结果对比

3　型材振动声辐射特性优化

由于金属薄壁件的结构阻尼通常较小，在振源激励下，振幅无法迅速衰减，会导致较显著的结构振动和噪声辐射。在实际工程应用中，通在金属薄壁件上敷设黏弹性阻尼材料形成复合阻尼结构，以达到提高结构阻尼性能，抑制结构振动及噪声辐射的目的。本文分别在车体铝型材顶板、底板和型材内表面敷设阻尼，如图5所示，调查分析阻尼层厚度对铝型材振动声辐射特性的影响。

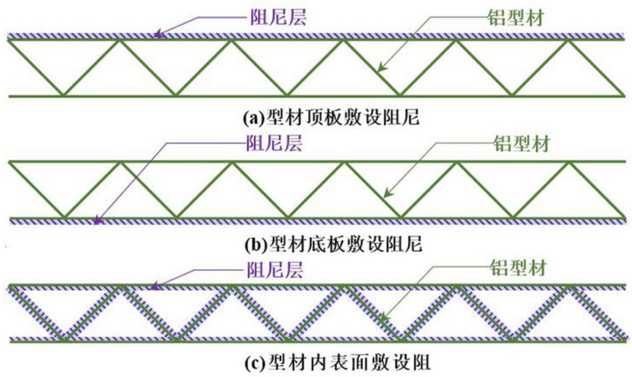

图 5　粘弹性阻尼敷设形式

图6给出了在车体铝型材表面敷设黏弹性阻尼情况下铝型材向半空间辐射声功率的总值随着敷设黏弹性阻尼层厚度变化情况。从图4中可以看出，在铝型材顶板敷设黏弹性阻尼层，阻尼层每加厚1 mm，铝型材向半空间辐射声功率的总值降低约为2 dB。在铝型材底板敷设黏弹性阻尼层，黏弹性阻尼层每加厚1 mm，铝型材向半空间辐射声功率的总值降低约为2 dB～4 dB，铝型材向半空间范围内辐射声功率的总值的降低量随着敷设阻尼层厚度的增加而减少。在铝型材底板敷设黏弹性阻尼层，黏弹性阻尼层每加厚1 mm，铝型材向半空间辐射声功率的总值降低约为5 dB。从图6中可以看出在型材内表面敷设黏弹性阻尼材料对铝型材的减振降噪效果最为明显，但是型材内表面面积远大于型材顶板和底板的面积，在敷设相同厚度黏弹性阻尼材料时，在型材内表面敷设阻尼材料时黏弹性阻尼材料的用量是在型材顶板和底板敷设黏弹性阻尼材料用量的5倍。因此，在铝型材表面敷设黏弹性阻尼材料时，需综合考虑高速列车车体轻量化、经济性和减振降噪效果等综合因素。本文采用降噪效率来评价三种阻尼敷设形式的优劣。降噪效率[11]的定义为铝型材向半空间辐射声功率总值的降低量与采取优化措施而增加质量的比值，即为

$$\lambda = \Delta P/\Delta m \tag{5}$$

式中 λ 为降噪率，ΔP 为铝型材向半空间辐射声功率总值的降低量，Δm 为敷设阻尼型材质量。

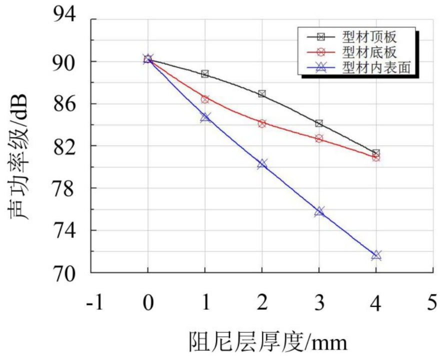

图 6　辐射声功率总值

图7给出了本文计算工况降噪率的计算结果，对比型材顶板和型材内表面黏弹性敷设形式，不同阻尼层厚度下，型材底板敷设黏弹性阻尼材料具有较高的降噪率，因此在型材底板敷设黏弹性阻尼材料具有更好的经济性和更利于车体的轻量化设计。

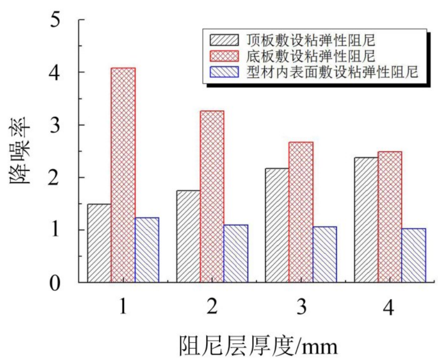

图 7　铝型材降噪效率

图8给出了在铝型材底板敷设黏弹性阻尼后，辐射声功率的1/3倍频程频谱特性，从图中可以看出，振动声辐射的主要贡献频带集中在400 Hz以上的中高频频频段。型材顶板敷设敷设黏性阻尼后，500 Hz以上的中高频频段辐射功率明显降低，500 Hz以下中低频频段未发生明显改变。高速列车车内噪声的显著频带为500 Hz～5 000 Hz，因此在铝

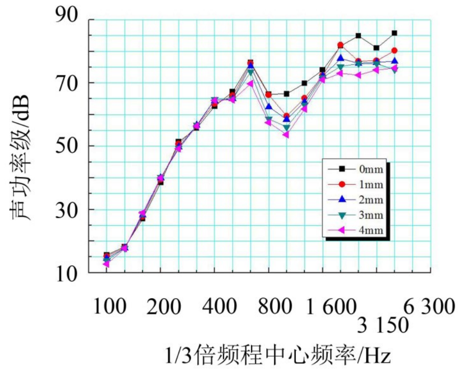

图 8 1/3 倍频程频谱特

型材辐射黏弹性阻尼对于高速列车车内的减振降噪具有积极作用。

车体铝型材向半空间范围内辐射声功率的大小与铝型材顶板表面各点的振动速度的幅值有关，幅值越大，辐射声功率越大；同时，还与铝型材顶板表面振动速度的分布有关，在相同振动速度幅值的情况下，不同的速度分布所辐射的声功率也不相同。本文用输入导纳表征单位外界激励力引起的铝型材顶板振动速度的大小，用声辐射效率表征铝型材顶板表面法相振动速度的空间均方相等的情况下各种速度分布辐射声功率的能力。在型材顶板和内表面敷设阻尼材料，铝型材辐射声功率的1/3倍频程频谱规律与上文所述基本相同，限于文章篇幅原因，文中未给出其计算结果。

铝型材的输入导纳如式(6)所示，为铝型材顶板的均方根速度幅值与外界激励力幅值之比。

$$输入导纳=\frac{铝型材顶板均方根速度}{激振力幅值} \tag{6}$$

铝型材声辐射效率如式(7)所示

$$\sigma_{rad}=\frac{P_{rad}}{P'_{rad}} \tag{7}$$

式中 P_{rad} 为铝型材顶板振动辐射到半空间的声功率，P'_{rad} 为与铝型材顶板具有相同表面积和相同均方根速度的刚性平板辐射到半空间的声功率。声辐射效率的大小与铝型材顶板的振动速度的幅值无关，而只与速度的分布有关。

为研究在铝型材表面辐射黏弹性阻尼抑制铝型材振动声辐射的机理，我们从铝型材的输入阻抗和声辐射效率两方面对其进行探讨。图9和图10给出了在铝型材底板敷设不同厚度黏弹性阻尼后铝型材声辐射效率和输入导纳的变化情况。从图中可以看出，铝型材的声辐射效率在计算频段均未发生明显改变；随着敷设阻尼层厚度的增加，铝型材500 Hz以上频段的输入导纳明显降低。因此在型材底板敷设黏弹性阻尼材料主要是通过抑制铝型材顶板的振动降低铝型材向半空间辐射声功率。在型材顶板和内表面敷设阻尼材料，铝型材输入导纳和声辐射效率的计算结果的规律与上文所述基本相同，限于文章篇幅原因，文中未给出其计算结果。

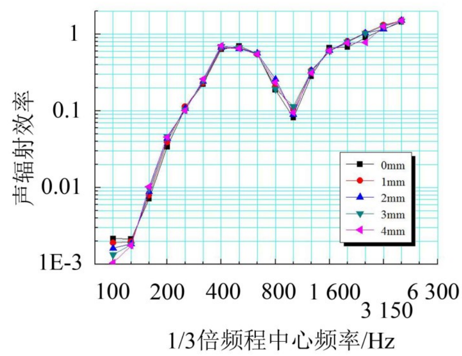

图 9 铝型材声辐射效率

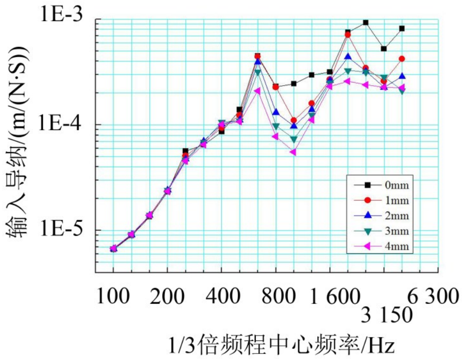

图 10 铝型材输入导纳

4 结 语

本文基于FE-SEA混合法建立了高速列车车体铝型材振动声辐射预测模型，并与FE-BEM模型的预测结果进行对比分析，验证了模型的有效性，进而应用该模型分析了黏弹性阻尼减振降噪技术对于抑制铝型材振动声辐射的效果。计算结果表明：

（1）FE-SEA混合模型与FE-BEM模型相比，既可以保证预测结果精确可靠，又具有快速简便的优点；

（2）在型材顶板、底板以及型材内表面敷设黏弹性阻尼材料可明显抑制500 Hz以上中高频频段的振动声辐射；

（3）在型材表面敷设黏弹性阻尼材料时，型材声辐射效率变化不大，但由于型材的振动被抑制导致其向半空间辐射声功率降低；

（4）对比顶板和型材内表面阻尼敷设形式，型材底板敷设阻尼材料具有较高的经济性，更加有利于实现车体的轻量化设计。

(下转第107页)