

无阻尼高速列车板结构声辐射特性研究

张丰收¹, 沈火明²

(1. 中国核动力研究设计院核反应堆系统设计技术国家级重点实验室, 成都 610041;

2. 西南交通大学力学与工程学院, 成都 610031)

摘要:基于有限元方法结合声学分析软件 Virtual. Lab Acoustic 建立高速列车铝型材外地板加筋板结构分析模型,完成了外地板结构模态振动特性和板结构声辐射特性分析。重点研究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声辐射特性的影响。研究结果表明:板结构加筋后其刚性显著增强;外地板结构边界条件变化对板结构振动声辐射特性影响较小,后续计算采取两端面简支约束;面板厚度增加,刚性增强,使结构截止频率向高频移动,使得外地板结构声辐射能力减弱;激励位置远离板结构中心时,也能够有效减弱外地板结构声辐射能力,可考虑实行区域化划分安装。

关键词:高速列车;铝型材外地板;振动声辐射;声功率

中图分类号:U270.32

文献标志码:A

引言

目前我国高速铁路快速发展,取得显著的建设成就。高速列车车体制造主要以铝合金材料为主,铝合金挤压型材发展及中空加筋的优质特性大幅度降低了列车整车质量,实现高速列车轻量化。然而,列车在提速运行过程中产生的振动和噪声会导致结构材料性能和寿命的降低,也会影响乘客舒适度。因此,外地板结构振动声辐射问题研究在高速列车降低振动噪声的设计中显得尤为重要。列车车体结构振动声辐射问题一直是众多专家学者的研究重点。

文献[1]主要探究阻尼因素对轮轨向外辐射噪声特性的影响;文献[2]探究一种新方法测量并估计列车的传输损耗量,并将数值分析法与按照比例缩小的混响室进行结合并测量验证;文献[3-4]主要运用解析法研究机械结构振动,探究阻尼复合圆柱壳的振动声辐射特性;文献[5]主要进行研究地铁车轮安装环形阻尼器后

的振动声辐射特性;文献[6-7]主要是运用有限元法和统计能量法进行混合分析以解决结构振动的中频问题。上述文献主要采用理论方法研究结构相对简单的薄壳结构,高速列车铝型材外地板是加筋板结构,难以采用文献中的理论方法实现。为更真实模拟外地板结构振动特性,本文参照上述文献研究方法结合工程背景,建立外地板结构实体模型,采用数值仿真方法(FEM-AML)探究外地板结构振动声辐射特性。

铝型材外地板为中空加筋薄板具有双壳结构,这种结构不仅满足列车车体生产轻量化技术要求,也能满足车体相应的刚度和强度需要。下面通过普通板结构和加筋板^[8]结构模型固有频率进行计算对比。矩形薄板基础结构长 $x=0.6$ m,板宽 $y=0.4$ m,板厚 $h=0.006$ m,板的密度 $\rho=7800$ kg/m³,弹性模量 $E=210$ GPa,泊松比 ν 取0.3,边界条件为四边固支约束。加筋布置为长度方向3条加筋结构,宽度方向1条加强筋结构,加强筋高选取为0.022 m、宽为0.005 m的扁钢。矩形薄板

收稿日期:2016-12-22

作者简介:张丰收(1989-),男,山东曹县人,助理工程师,硕士,主要从事结构振动与控制、工程结构仿真方面的研究,(E-mail)1989zfs@sina.com;
沈火明(1968-),男,江苏苏州人,教授,博士,博士生导师,主要从事结构振动与控制、工程结构仿真、微动磨损与微动疲劳、环境评价与预测方面的研究。

和矩形加筋板结构模型如图1所示。

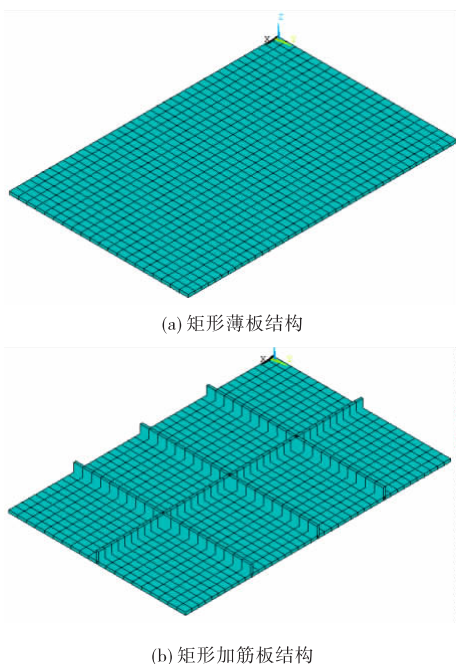


图1 矩形板结构有限元示意图

计算表明,加筋后提高了板结构固有频率,其刚性也显著增强,在相同激励作用下较原结构不易发生共振。板结构加筋既能满足工程应用的精度要求,也能满足工程应用的刚度要求^[9],如图2所示。

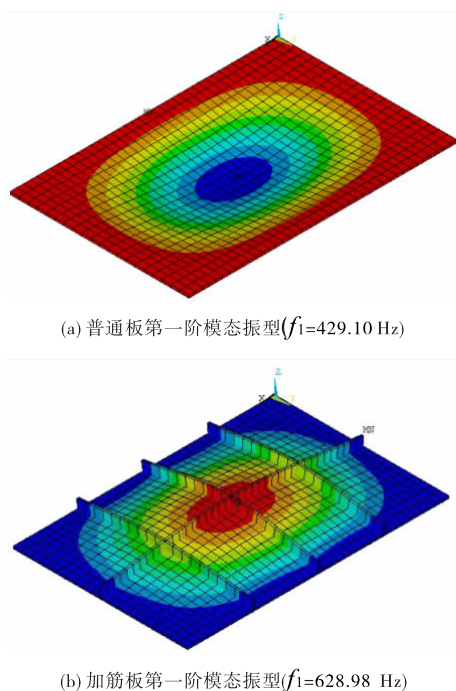


图2 矩形板固有频率和模态振型

1 有限元实体建模

拟采用声学有限元软件建立实体模型,外地板布筋

采用变形最小且稳定性好的三角形布筋^[10]。通过FEM-AML方法对高速列车外地板结构进行振动声辐射特性分析。声波传播时在两种介质的交界面处发生反射、折射等现象,导致数值计算中声波传播及能量传递产生误差,在声学软件中将声学边界条件定义成AML属性以实现声学网格空间完全离散降低误差的目的,FEM-AML方法方便且计算效率比边界元法高^[11]。

AML方法可以自动匹配声学边界条件,只需给出有限元边界即可,不需要手动添加声波吸收层网格,声学边界定义成AML属性后即实现无反射声学边界条件的模拟,如图3所示,模型参数见表1。

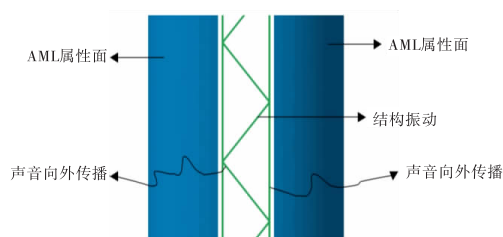


图3 声学有限元无反射边界条件示意图

表1 铝型材外地板结构参数模型

材料模型	弹性模量/GPa	泊松比	密度/(kg/m ³)	铝型材板结构尺寸/mm
外地板结构模型	71	0.3296	2710	2100 × 1176 × 70

注:声学模型为空气属性。

2 外地板结构振动声辐射特性

2.1 边界条件对外地板结构声辐射特性的影响

铝型材外地板结构在激励载荷作用下产生振动,并向外辐射能量,通过计算场点声压级和辐射声功率级频率响应曲线能够直观反映结构在激励作用下振动噪声随频率的变化。载荷类型分别施加激励载荷10 N(三分之一倍频程)和实测车体振动值载荷,计算频率为10 Hz~3150 Hz。外地板结构边界条件分别选择两端面简支、固支和一端固支一端简支约束。

由图4和图5可知,边界条件变化时,外地板结构场点声压级以及辐射声功率级几乎重合在一起。激励载荷变化时不改变外地板结构声辐射特性整体趋势,只改变其能量分布,两种荷载类型下的峰值频率都在630 Hz中心频率附近。针对本实体模型而言,边界条件变化对结构振动声辐射特性影响很小,后续数值计算采用两端面简支约束。

2.2 面板厚度对铝型材板结构振动声辐射特性的影响

2.2.1 外地板结构固有振动特性

板结构在进行模态振动时会存在一个中间模态值,

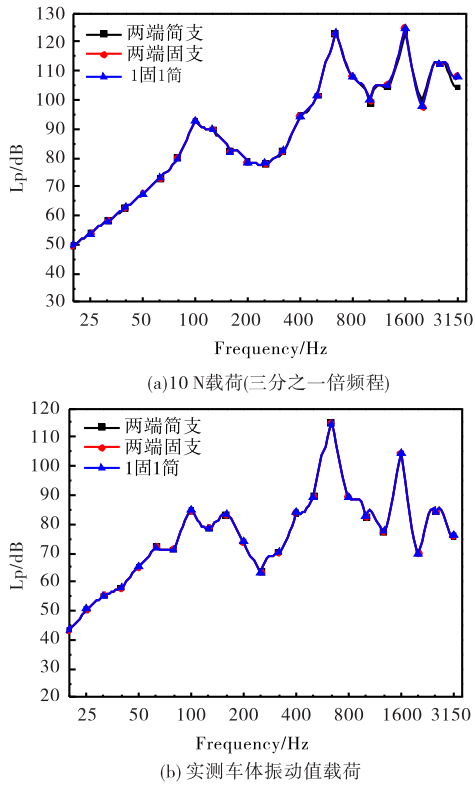


图 4 不同边界条件外地板结构场点声压级

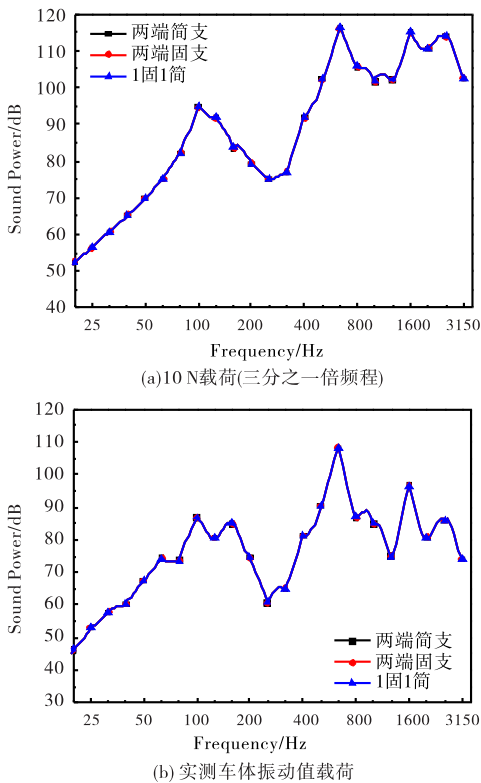


图 5 不同边界条件外地板结构辐射声功率级

称为截止频率;低于截止频率板结构可视为均质单板不产生局部变形;高于截止频率板结构被分割成若干小区域而产生明显的局部变形^[10]。面板厚度取 2.0 mm、

2.5 mm、3.0 mm,筋板厚度取 2.5 mm,载荷施加实测车体振动值,分析不同面板厚度铝型材外地板结构固有振动特性。结果显示:相同边界条件时,面板厚度增加,结构刚度增强和质量增加,加筋铝型材外地板结构一阶固有频率向高频移动,如图 6 所示。但针对结构材料利用率而言,单纯通过增加面板厚度增强结构的刚性,这种做法不经济。

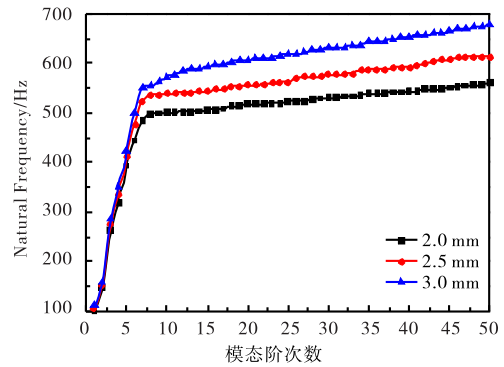


图 6 不同面板厚度外地板结构的固有频率

2.2.2 外地板结构声辐射特性

铝型材外地板结构在载荷激励作用下产生振动与声音,并向外辐射能量,通过计算场点声压级频率响应曲线和辐射声功率级频率响应曲线,能够直观反映板结构在激励作用下产生的振动噪声及辐射能量随频率的变化规律。此工况载荷施加实测车体振动值,施加位置在外地板结构中心。外地板结构受迫振动,场点声压级和辐射声功率级随面板厚度变化规律为:(1) 在 20 Hz ~ 500 Hz 频率段,声压级在一阶固有频率(100 Hz 左右)处达到峰值,面板厚度增加能够抑制辐射声压和辐射声功率 2 dB ~ 4 dB;(2) 500 Hz ~ 2000 Hz 频率段,面板厚度 2.5 mm 时辐射声压和辐射声功率频响曲线均小于其他两个工况,并显著抑制了 630 Hz 和 1000 Hz 频率峰值,两频率点声压级分别降低 18.54 dB 和 7.44 dB。结合表 2 总辐射声功率值,可知在中低频范围,面板厚度取 2.5 mm 时对辐射声压和辐射声功率的抑制效果较好,如图 7 所示。注:场点均选取铝型材外地板结构表面声压最大值点,下同。

表 2 不同面板厚度外地板结构总辐射声功率值

	面板厚度/mm		
	2.0	2.5	3.0
总辐射声功率值/dB	108.44	98.2105	106.926

从能量角度分析,板结构受迫振动的振动速度均方根值(RMS)也可揭示板结构声辐射特性。施加简谐力在外地板结构中心点位置,取板结构中心点位置为观测点,软件直接得出中心点位置的 RMS 值,计算结果如图

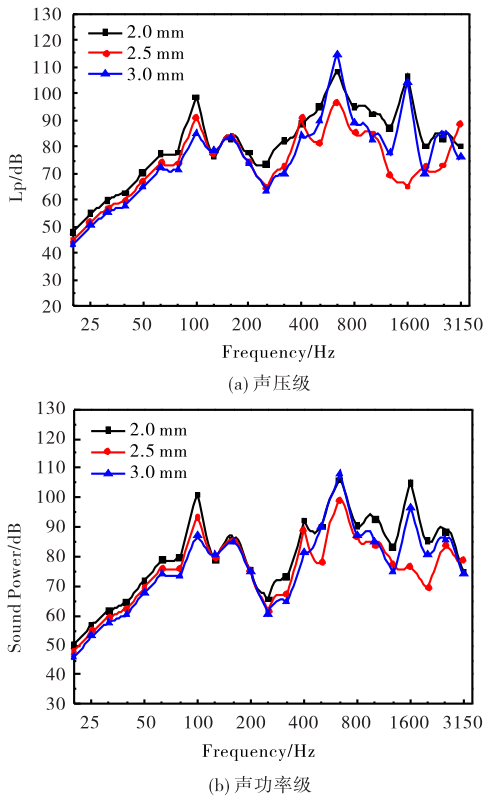


图7 不同面板厚度外地板结构场点声压级和辐射声功率级

8(a)所示。400 Hz 中心频率以下,厚度变化不改变振速变化趋势和峰值对应的频率,但 400 Hz 以上时,频率变化时,厚度增加导致振动速度波动增大,峰值对应频率发生变化。同种激励,外地板结构振动速度随面板厚度增加而增加,结合声辐射效率,如图 8(b)所示,面板厚度增加结构声辐射效率明显降低,振速和声辐射效率共同决定结构的声学性能,因此面板厚度增加时外地板结构整体声学性能得到改善。

外地板结构系统中低频时能量较高,所以当计算声频率增大时观测点 RMS 值整体呈下降趋势,且板结构辐射声功率级和其 RMS 值所体现的振动能量也逐渐变小。面板厚度 2.5 mm 和 3.0 mm 声辐射效率曲线变化趋势非常相近,根据高速列车内噪声中低频特性结合辐射声功率和质量因素,并结合表 3,选择面板厚度 2.5 mm 时声学性能较优。

表3 不同面板厚度外地板结构振动速度均方根值

	面板厚度/mm		
	2.0	2.5	3.0
振动速度均方根值/dB	44.64	53.66	54.2

2.3 激励位置对铝型材板结构振动声辐射特性的影响

此工况选择筋板面板组合为 2.5 mm、3.0 mm、3.0 mm,讨论激励载荷位置变化对铝型材板结构场点声

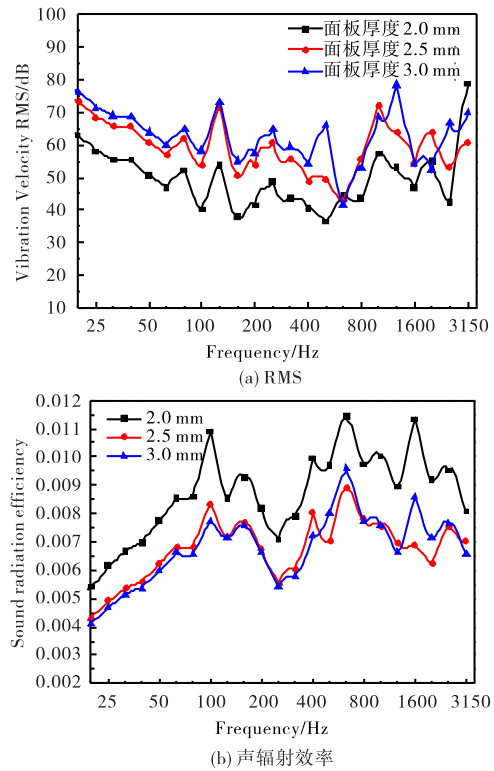


图8 不同面板厚度外地板结构 RMS 和辐射效率

压级和声功率级频率响应的影响,载荷施加类型实测车体振动值。激励载荷作用点分别加载在板结构中心位置、对角线位置的三等分点、四等分点、五等分点,如图 9 所示,两端面边界条件简支约束。

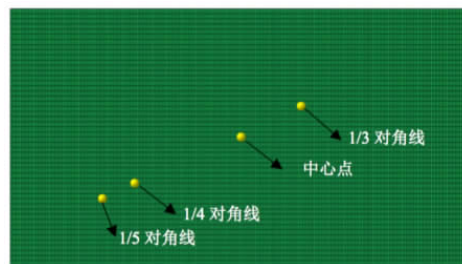


图9 激励位置示意图

在激励载荷作用下,铝型材外地板结构振动并带动结构周围空气运动,可以使板结构表面空气压缩膨胀并形成声波向外传播。不同激励位置会激发结构不同的模态振型,由此可以推测点激励位置的变化为显著影响结构的声辐射特性。由文献[11]知,改变激励载荷位置,外地板结构的各阶模态辐射效率不会改变。但由于外地板结构各阶模态对结构振动响应的贡献量,特别是外地板结构共振模态对结构振动响应的贡献量会发生很大变化,进而导致外地板结构辐射声功率级和声辐射效率发生变化。

如图 10 所示,激励载荷位置变化对场点声压级和

辐射声功率级影响分为中低频(20 Hz ~ 800 Hz)和 高频(800 Hz 以上)两个频率段:(1) 20 Hz ~ 800 Hz 中心频率,激励位置远离外地板结构中心时,场点声压级和辐射声功率级频率响应减小,说明外地板结构振动也在逐渐减弱,结构向外辐射的声波能量逐渐减小;(2) 800 Hz 以上中心频率,激励位置远离中心时板结构场点声压级和辐射声功率级频率响应均大幅度减弱,振动得到明显抑制,见表 4。激励位置变化时,场点声压级和辐射声功率级频率响应峰值对应频率几乎相同,其主要原因峰值对应频率与外地板结构发生共振的频率点相对应,而激励位置的变化不会引起共振频率的变化。

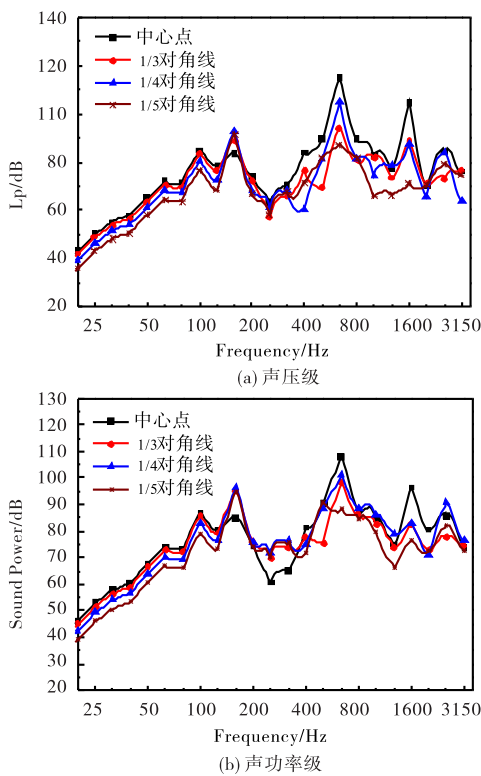


图 10 不同激励位置外地板结构场点声压级和辐射声功率级

表 4 不同激励位置外地板结构总辐射声功率值

	激励作用点位置			
	中心点值	1/3 对角线	1/4 对角线	1/5 对角线
总辐射声功率值 (dB)	106.9	97.4	100.9	92.6
	与中心点差值	-9.5	-6.0	-14.3

从能量角度分析,板结构受迫振动的振动速度均方根值(RMS)也可揭示板结构声辐射特性。施加简谐力在外地板结构中心点位置,取板结构中心点位置为观测点,软件直接得出中心点位置的 RMS 值,计算结果如图 11(a)所示。400 Hz 中心频率以下时,激励远离板结构中心后,振速峰值对应的频率显著增大,但是远离板结

构中心后,激励位置变化时振速峰值对应的频率缓慢增大。400 Hz 中心频率以上时,激励位置发生变化时,振动速度随着频率的增加体现出的波动性增大,振速峰值对应的频率发生较小变化。

板结构的声学性能由其表面的振动速度和声辐射效率共同决定。结合板结构声辐射效率,如图 11(b)所示,激励位置远离板结构中心点位置后振速增大,但声辐射效率降低,最终导致板结构向外辐射的声压和声功率降低。根据高速列车内噪声中低频特性,说明列车在外地板安装时可以考虑预测外激励载荷位置,尽量避免其作用在板结构的中心位置。在铝型材板结构安装过程中实行区域化划分,可使外地板结构局部受力位置的声辐射系数降低,进而能够有效减弱铝型材外地板结构振动,减少噪声产生。

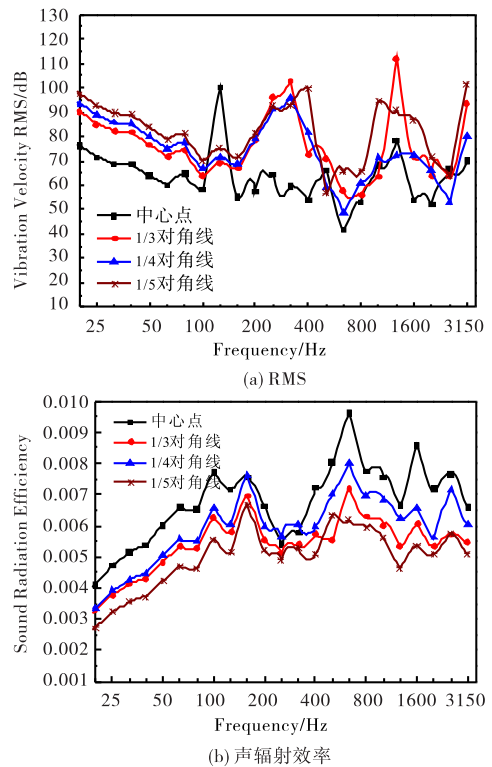


图 11 不同激励位置外地板结构 RMS 值和辐射效率

3 结论

(1) 低于截止频率(550 Hz)外地板结构做整体模态振动且频率变化幅度较大,面板厚度变化对固有频率影响非常小;高于截止频率发生局部模态振动且频率变化幅度较小,面板厚度增加外地板结构固有频率向高频移动明显。如果仅通过增加面板厚度的方法增加板结构刚性的做法不经济,通过声学数值模拟计算初步表明面板厚度选择 2.5 mm 时外地板结构能得到较优的声学

性能。

(2) 激励位置变化时,远离板结构中心位置其声压级、辐射声功率级和辐射效率均逐渐减小。在铝型材外地板结构安装过程中可考虑实行区域化划分,降低局部受力位置的声辐射系数,进而有效减弱铝型材外地板结构振动和声音能量的辐射,营造更好的列车乘车环境。后续工作可考虑敷设相关阻尼材料研究铝型材外地板结构的振动声辐射特性。

参考文献:

- [1] ZHANG Y M,XIAO X B,SHEN H M,et al.The effect of ring dampers on noise radiation from railway wheels[J].Noise Control Engineering Journal,2012,60(3):293-300.
- [2] KIM T M,KIM J T.Comparison study of sound transmission loss in high speed train[J].International Journal of Railway,2011,4(1):19-27.
- [3] 刘雁梅,黄协清.阻尼复合圆柱壳体声振特性理论研究进展与现状[J].振动与冲击,2000,19(2):40-43.
- [4] MARKUS S.Damping properties of layered cylindrical shells,vibrating in axially symmetric modes[J].Journal of Sound & Vibration,1976,48(4):511-524.
- [5] 张玉梅.地铁阻尼环低噪声车轮振动声辐射特性试验研究[D].成都:西南交通大学,2015.
- [6] LANGLEY R S.The response of two dimensional periodic structures to impulsive point loading[J].Journal of Sound and Vibration,1997,201(2):235-253.
- [7] LANGLEY R S,BARDELL N S.The response of two dimensional periodic structures to harmonic point loading:a theoretical and experimental study of a beam grillage[J].Journal of Sound & Vibration,1997,207(4):521-535.
- [8] 邹平.加筋板拓扑结构与声辐射特性研究[D].长沙:湖南大学,2009.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 詹福良,徐俊伟.Virtual.lab Acoustic 声学仿真计算从入门到精通[M].西安:西北工业大学出版社,2013.

Research on the Structural Vibration and Sound Radiation of Plate on High-Speed Without Damp

ZHANG Fengshou¹, SHEN Huoming²

- (1. State Key Laboratory of Reactor System Design Technology, Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610041, China;
2. School of Mechanical and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Virtual. Lab Acoustic was adopted to establish the analytical model of aluminum alloy extrusion reinforced structure which is used on high-speed train with finite element method. The analytical model has been established to study the influence of the boundary conditions, thickness of panel, load position on the structure's vibration and acoustical characterization without damp. The results demonstrated that the rigidity of board structure strengthens greatly after reinforced. The effect of boundary conditions on acoustic power is not significant, and it will choose simple supported constraint in the following calculations. In the low frequency range, the cut-off frequency moves to high range with the increasing of the thickness of panel. The increasing of panel's thickness and the load position away from the center of the structure are able to weaken the capacity of structure's acoustic radiation, and the alloy extrusion can be considered to regional division with installing.

Key words: high-speed train; aluminum alloy extrusion; vibration and acoustical radiation; acoustic power