

薄板结构振动声辐射特性分析及优化

刘成武, 郭小斌

(福建工程学院 机械与汽车工程学院, 福建 福州 350118)

摘要: 利用有限元法与边界元法结合对薄板进行振动声辐射特性分析, 研究了薄板结构在简谐力作用下表面声压分布状况, 分析了不同边界条件、材料以及加筋形式等因素对薄板结构振动声辐射特性的影响, 并对简支矩形薄板厚度进行了优化。研究表明, 边界约束的增加会导致薄板刚度变大, 进而导致薄板辐射声功率与辐射效率随之改变; 不同材料对结构的辐射声功率均有影响, 而对辐射效率影响很小; 加筋对薄板声辐射特性影响显著, 十字型加筋形式减震降噪效果最好; 对薄板厚度进行优化, 优化后薄板辐射声功率级下降了 4.29 dB。

关键词: 薄板; 振动声辐射; 辐射声功率; 辐射效率

中图分类号: TB532

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2020)04-0375-06

Analysis and optimization of vibration acoustic radiation characteristics of thin plate structure

LIU Chengwu, GUO Xiaobin

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: Finite element method combined with the boundary element method was employed to analyze the vibration and acoustic radiation characteristics of the thin plate. The distribution of acoustic pressure on the surface of a thin plate structure subjected to harmonic force was studied. The influence of such factors as different boundary conditions, materials and stiffened types on the vibration acoustic radiation characteristics of thin plate structure was analyzed, and the thickness of the simply-supported rectangular plate was optimized. Results show that the stiffness of the thin plate increases with an increasing boundary constraint, which further affects the radiation power and radiation efficiency accordingly. Different materials can affect the radiation sound power of the structure; however, they have little influence on the radiation efficiency. The stiffening has a significant effect on the acoustic radiation characteristics of the thin plate, and the cross-stiffened plates have been proven to be the best shock and noise absorbers. After the optimization of the thickness of the plate, the level of the radiated sound power is decreased by 4.29 dB.

Keywords: thin plates; vibration acoustic radiation; acoustic radiation power; radiation efficiency

在实际工程应用中, 板类件由于其结构简单、适用性强被广泛使用。因此, 研究板类件的振动声辐射特性对于结构的减振降噪有着重要意义。文献[1-3]对薄板声辐射理论进行了研究, 为进一步对声辐射特性分析奠定了理论基础。张媛媛

等^[4-6]根据理论公式利用 MATLAB 编程研究了作用力位置、尺寸参数等因素对薄板声辐射特性的影响。刘宝等^[7]以混合势计算结构表面振速与声压, 并以简支矩形板为例分析了板厚对声辐射参数的影响, 但对其他边界条件情况没有分析。

收稿日期: 2020-03-04

基金项目: 福建省自然科学基金项目 (2018J01628)

第一作者简介: 刘成武 (1975—), 男, 安徽枞阳人, 教授, 博士, 研究方向: 车辆 NVH 技术、结构多学科设计优化。

范鑫等^[8]利用声学软件 Virtural.Lab Acoustical 对蜂窝层板进行声辐射特性仿真分析,并对面板厚度、壁长等设计变量对传声性能的影响进行了研究。上述文献完善了薄板振动声辐射的理论,并对声辐射特性进行了研究,但还不够全面充分,如:不同材料、边界条件、使用加强筋等情况未考虑。本文在上述文献的基础上,利用有限元法计算薄板的振动响应,结合边界元方法计算薄板声辐射特性,主要研究了不同边界条件、材料属性和薄板加筋、不同加筋形式情况下结构声辐射特性的变化规律并对矩形简支薄板在某一厚度进行了优化,为实际工程应用提供方法与理论指导。

1 薄板振动有限元理论

设薄板长为 a 、宽为 b ,厚度为 l ,横向振动位移为 ω 。薄板横向振动平衡方程为:

$$\frac{\partial^4 \omega}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 \omega}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 \omega}{\partial y^4} = \frac{p(x,y)}{D} \tag{1}$$

式中 $D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}$ 为弯曲刚度矩阵, E 为材料的弹性模量, μ 为材料的泊松比, $p(x,y)$ 为薄板自由振动时的惯性载荷。 $p(x,y)$ 可表示为:

$$p(x,y) = -\rho t \frac{\partial^2 \omega}{\partial^2 t} \tag{2}$$

把式(2)带入式(1)使用分离变量法,可得薄板自由振动方程为

$$D \nabla^4 \omega + \rho h \frac{\partial^2 \omega}{\partial^2 t} = 0 \tag{3}$$

式中 ρ 为材料的密度, ∇^4 为微分算子。

$$\nabla^4 = \left(\frac{\partial^2}{\partial^2 x} + \frac{\partial^2}{\partial^2 y} \right)^2 \tag{4}$$

对于四边简支矩形薄板由于其结构简单固有频率精确解析解为

$$\omega = \pi^2 \sqrt{\frac{D}{\rho h} \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right)} \tag{5}$$

2 薄板声辐射理论

假设薄板位于刚性障板上,薄板障板尺寸远大于薄板,设薄板的表面积为 S ,传播介质为空气,当薄板在圆频率 ω 下振动,该板薄板表面声压为:

$$P(L,\omega) = \frac{j k \rho_0 c}{2 \pi} \iint V(Q,\omega) \frac{e^{-i k r}}{r} dS(Q) \tag{6}$$

式中, j 为虚数单位, ρ_0 为空气密度, c 为空气声

速, $k = \omega/c$ 为波数, $V(Q,\omega)$ 为薄板表面法向振速, L 为场点, Q 为源点, r 为两点距离。

假设薄板表面是由无限多个面单元组成,经单元离散后,结构表面辐射阻抗 R 可以表示为

$$R_{mn} = \frac{k^2 (\Delta S)^2 \rho c}{4 \pi} \tag{7}$$

已知薄板表面辐射阻抗,薄板总的辐射声功率为^[9]:

$$W = N^H R N \tag{8}$$

式中 R 为辐射阻抗矩阵, N 为薄板各小面积单元上法向振速组成的 M 阶列向量。

根据辐射效率公式,可知薄板声辐射效率为

$$\sigma_{mn} = \frac{W_{mn}}{\rho c a b \langle v^2 \rangle} \tag{9}$$

式中 $\langle v^2 \rangle$ 为均方根振速。

3 数值仿真

设一矩形薄板长、宽分别为 1.0 m 和 0.8 m,材料为钢材,弹性模量为 $E = 211 \text{ GPa}$,泊松比为 0.3,密度为 $7\,830 \text{ kg/m}^3$ 。

3.1 薄板的自由振动计算

薄板边界条件设为四边简支,薄板厚度设为 0.003 m,运用 MATLAB 对其精确解析式进行编程求其结果,与 ABAQUS 数值仿真结果进行对比,验证有限元仿真计算的准确性。计算结果如表 1 所示。

表 1 四边简支矩形薄板前 8 阶固有频率

Tab.1 The first eight natural frequencies of simply-supported rectangular thin plates with four edges

阶数	频率/Hz	
	MATLAB	ABAQUS
1	18.93	18.98
2	41.15	41.24
3	53.74	53.86
4	75.92	76.06
5	78.42	78.59
6	112.32	112.56
7	113.14	113.20
8	131.10	131.35

从表 1 可以看出,用 MATLAB 编程与 ABAQUS 仿真计算所得固有频率结果基本一致。通过结果对比,证明使用 ABAQUS 进行薄板结构振动分析

完全可靠、准确。

3.2 薄板的声辐射特性分析

假设薄板的传播介质为空气,密度为 1.225 kg/m³,声音传播速度为 340 m/s,板厚为 6 mm,约束条件为四边简支。采用基于模态的稳态动态分析计算薄板在简谐作用力下的薄板表面振动速度,再联合 Virtual.Lab 计算薄板辐射声功率、辐射声效率以及表面声压分布等薄板声学特性指标,前 4 阶薄板结构表面声压如图 1 所示。

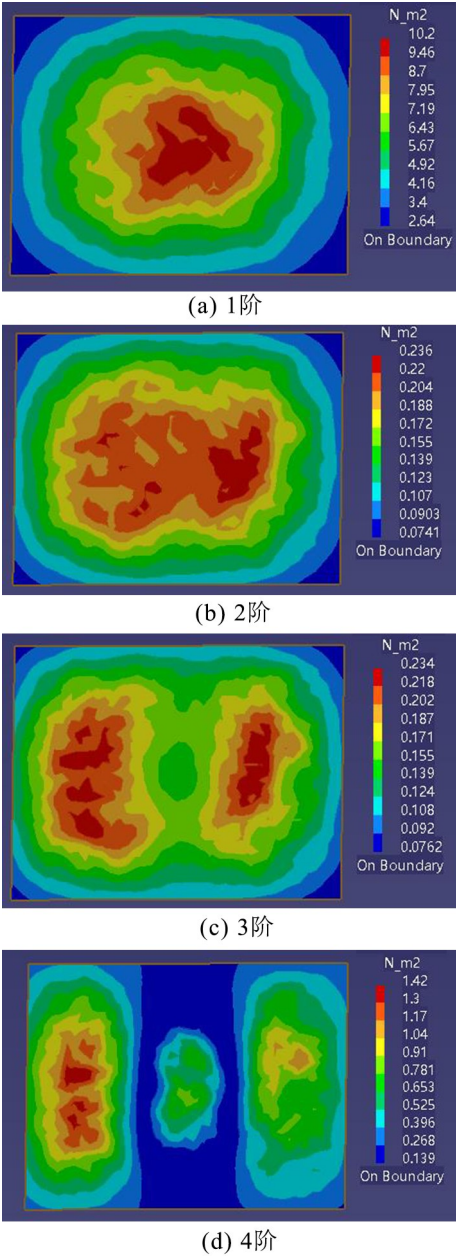


图 1 矩形薄板前 4 阶表面声压分布
Fig.1 Surface distribution of the sound pressure of the first four orders of the rectangular thin plate

从图 1 可以看出,四边简支矩形薄板表面声压分布与结构振型图形状相似,这也说明了薄板在振动幅值峰值处声辐射最大,两者具有一致性,在考虑薄板减振降噪时也应考虑薄板的声辐射特点,在振动峰值处应特别注意。

3.3 边界条件对薄板声辐射特性影响

在实际工程中,不同边界条件会被应用在各种结构。四边简支、四边固支两种边界条件薄板前四阶固有频率如表 2。结构辐射的声功率级和声辐射效率分别如图 2、图 3 所示。

表 2 不同边界条件前 4 阶固有频率对比
Tab.2 Comparison of the first four natural frequencies of different boundary conditions

阶数	频率/ Hz	
	四边固支	四边简支
1	70	38
2	123	82
3	161	108
4	210	152

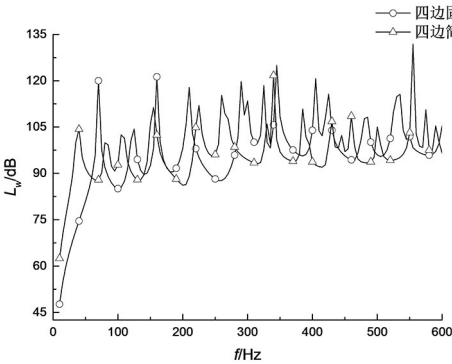


图 2 不同边界条件下薄板辐射声功率级
Fig.2 Radiation sound power level of thin plates under different boundary conditions

根据图 2 可以看出,在外部条件一定情况下,四边简支薄板辐射的声功率级低于四边固支边界条件下声辐射功率级。主要原因是四边固支薄板约束的增加对薄板刚度的增大效果明显,即改变边界条件,相当于改变了结构的刚度,结构的辐射声功率随之受到影响。

从图 3 可以看出,边界条件的不同,薄板辐射效率也明显不一样:在相同激励力条件下,由于四边固支薄板刚度增加,固有频率相应增加,四边固

支辐射效率相比四边简支向右偏移,但整体趋势是四边固支薄板辐射效率高于四边简支辐射效率。

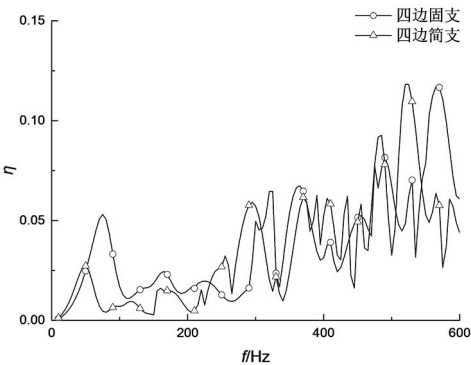


图 3 不同边界条件薄板声辐射效率

Fig.3 Acoustic radiation efficiency of thin plates under different boundary conditions

3.4 不同材料对薄板振动声辐射的影响

在实际工程应用中,钢与铝是应用最广泛的两种材料,对这两种材料探究在相同尺寸、外部激励相同条件下振动与声辐射特性具有重要实际意义。两种材料的基本参数如表 3 所示。

表 3 铝板与钢板基本参数

Tab.3 Basic parameters of aluminum plates and steel plates

材料	长/ m	宽/ m	高/ mm	弹性模 量/GPa	密度/ (kg·m ⁻³)	泊松 比
钢板	1.0	0.8	6.0	211	7 830	0.30
铝板	1.0	0.8	6.0	70	2 700	0.33

为了保证结果的可参考性,两种材料薄板均采用四边简支边界条件,外部激励力幅值均为 500 N,频率范围设为 20~600 Hz,力作用点坐标为(0.22 m,0.28 m)。利用 LMS Virtural.Lab 对两种材料薄板进行声学分析,获得的两种不同材料的辐射声功率级和辐射效率如图 4、图 5 所示。

由图 4 可以看出,针对铝和钢两种材料,在结构尺寸参数、边界条件、激励位置和大小相同情况下,在 20~600 Hz 频率范围内铝板辐射声功率大于钢板辐射声功率。同时,在薄板固有频率处会出现一个辐射声功率的峰值。由此得出,不同材料所辐射的声功率差别很大,在实际工程应用中要考虑材料对设备声学性能的影响。

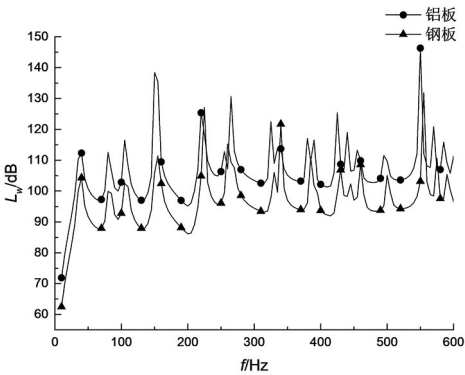


图 4 钢板和铝板的辐射声功率级

Fig.4 Radiation sound power levels of steel plates and aluminum plates

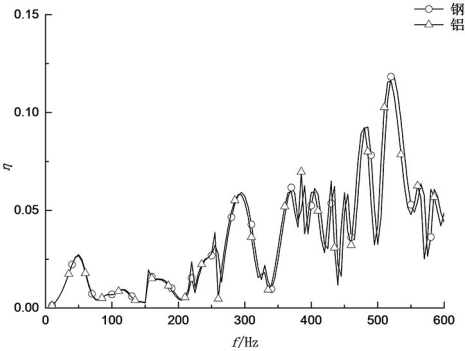


图 5 铝板和钢板辐射效率

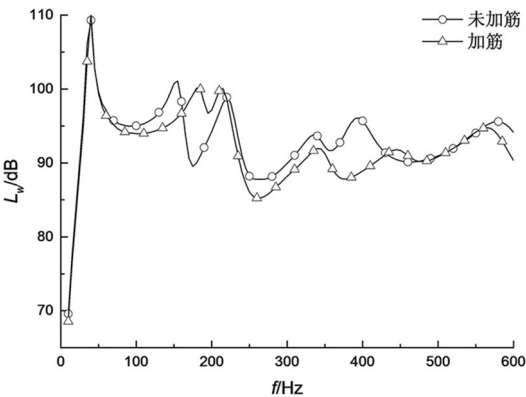
Fig.5 Radiation efficiency of aluminum plates and steel plates

图 5 表明,在一定条件下,钢板、铝板两种材料效率在 20~600 Hz 频率段声辐射效率曲线几乎完全重合。说明矩形薄板结构的声辐射效率与结构材料没有关系,即结构噪声的辐射效率与材料本身属性无关,而对结构辐射的声功率有明显影响。

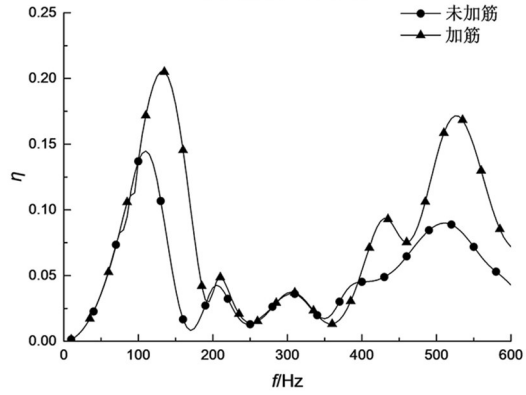
4 加筋对薄板声辐射特性的影响

以基板为参考对象,探讨加筋对薄板声学特性的影响。边界条件相同均为四边简支,激励力为 100 N,作用在部件中心位置。利用 ABAQUS 对基板与单道加筋板进行谐响应分析,分别提取两者表面振动速度,导入 LMS Virtural.Lab 中进行声学分析,声学求解范围为 10~600 Hz,步长为窄频 5 Hz。得到两者辐射声功率级与辐射效率的对比结果如图 6 所示。

由图 6 可以看出,加筋对减低薄板声功率有



(a) 辐射声功率级



(b) 声辐射效率

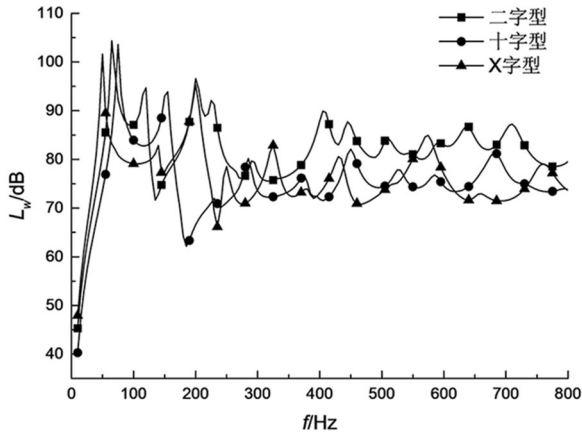
图 6 基板与加筋板辐射声功率级与声辐射效率
Fig.6 Radiant sound power levels and radiant efficiency of base plate and stiffened plate

显著效果,从 200 Hz 以后加筋板辐射声功率就低于基板,且在同一频率处最大相差 10 dB。随着频率的升高,加筋板的峰值随之向右移动。在声辐射效率方面,加筋板辐射效率高于基板,且相应峰值相差很大。

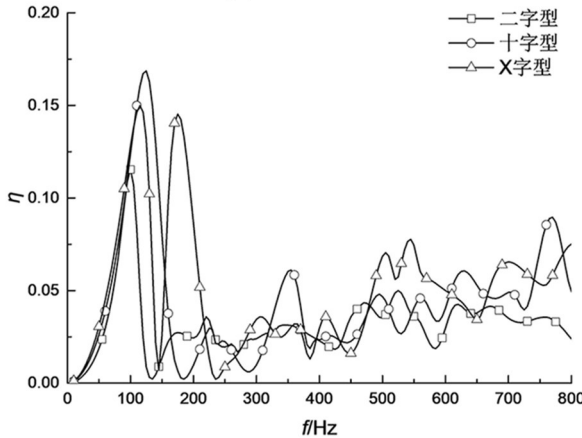
5 不同加筋形式对薄板声辐射特性的影响

为了探讨筋条布置形式对板结构声辐射的影响,拟通过对板结构分别添加沿长度方向的“二字型”加筋板,“十字型”加筋板,“X 字型”加筋板来对板结构的声辐射特性进行研究。不同加筋形式对薄板结构表面辐射声功率和辐射效率的影响如图 7 所示。由图可知,不同加筋形式筋板的声功率级的变化趋势基本一致。但从整个频率范围来看十字型加筋板辐射声功率级较低,相比其他两种加筋形式声功率级比较稳定。从辐射声效率图中可以发现在第一个峰值处十字型加筋板最

高,X 字型次之,二字型最低。且 X 字型加筋形式有两个显著波峰,随着频率增加三种加筋形式声辐射效率均有上升趋势。



(a) 辐射声功率级



(b) 声辐射效率

图 7 不同加筋形式辐射声功率级与辐射声效率
Fig.7 Radiating sound power levels and radiating sound efficiency of different stiffened forms

6 薄板声辐射特性优化

矩形薄板为例,薄板长、宽分别为 1.0 m 和 0.8 m,厚度为 0.006 m,约束条件为四边简支,材料的弹性模量 $E = 211 \text{ GPa}$,泊松比为 0.3,密度为 $7\,830 \text{ kg/m}^3$ 。以薄板厚度为设计参数,薄板第一阶固有频率为约束条件,声功率级最小为优化目标。薄板厚度在 5~7 mm 内以间隔 0.2 mm 分别对其进行声辐射分析,各种板厚声功率级如图 8 所示。由 3.3 节可知,四边简支薄板第一阶固有频率为 38 Hz。在 38 Hz 处薄板辐射声功率级如表 4 所示。

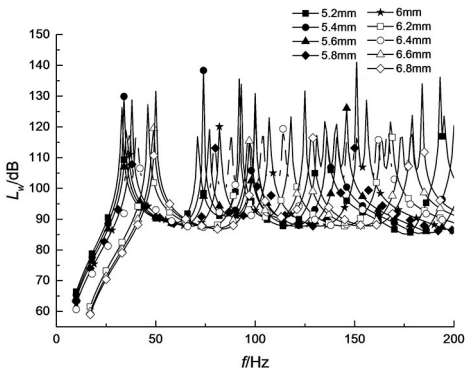


图 8 不同板厚声功率级

Fig.8 Sound power levels of different plate thicknesses

表 4 一阶固有频率处薄板辐射声功率级
Tab.4 Radiating sound power levels of the thin plate at the first natural frequency

板厚/mm	声功率级/dB
5.2	138.62
5.4	138.65
5.6	132.78
5.8	142.68
6.0	132.10
6.2	136.74
6.4	127.81
6.6	133.23
6.8	136.57

由图 8 可以看出,随着薄板厚度的增加,薄板辐射声功率级曲线逐渐向右移动,但曲线趋势基本相同。由表 4 可以看出,当板的厚度选取为 6.4 mm 时,在一阶固有频率处薄板辐射声功率级最小,相比初始薄板厚度 6.0 mm,辐射声功率级下降了 4.29 dB。

7 结论

- 1) 四边固支薄板与四边简支薄板相比,增加边界条件约束,相当于增大了结构刚度,造成结构辐射声功率级变大,辐射能量升高。材料属性的改变对结构辐射声功率级有很大影响,对辐射效率影响可以忽略不计。
- 2) 加筋对薄板声辐射功率及声辐射效率有显著影响,加筋能降低薄板辐射声功率,而声辐射效率高于未加筋薄板。通过对比 3 种不同加筋形式薄板,十字加筋板的减震降噪效果优于 X 字型 and 二字型加筋板。
- 3) 通过对薄板厚度进行优化,薄板辐射声功率级从 132.1 dB 下降到 127.81 dB,下降了 4.29 dB,优化效果显著。

参考文献:

[1] 任惠娟,盛美萍. 矩形薄板的模态声辐射效率[J]. 机械科学与技术, 2010, 29(10): 1397-1400.
[2] 刘宝,王德石,朱拥勇. 障板对于平板声辐射特性的影响分析[J]. 噪声与振动控制, 2018, 38(3): 26-30, 41.
[3] 高宏林,黎胜,孟春霞. 改进的半空间频率均方声压法计算结构频带振动声辐射[J]. 声学学报, 2019, 44(1): 106-115.
[4] 张媛媛,沈火明. 基于 Matlab 板的振动响应与声辐射研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学版), 2014, 28(8): 34-38.
[5] 王宇星,沈火明. 薄板声辐射特性的数值模拟与分析[J]. 应用数学和力学, 2014, 35(S1): 236-240.
[6] 赵峰. 矩形板声振特性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2018.
[7] 刘宝,王德石,周奇郑. 板厚对无障薄板声辐射特性影响的分析[J]. 声学学报, 2017, 42(5): 593-600.
[8] 范鑫,崔洪宇,洪明. 基于 Virtual.Lab Acoustics 的蜂窝夹层板结构传声特性分析[J]. 噪声与振动控制, 2017, 37(4): 34-39, 68.
[9] 李双,陈克安. 基于振动模态和声辐射模态的结构声辐射分析[C] //中国声学学会 2006 年全国声学学术会议论文集. 厦门, 2006: 305-306.

(责任编辑: 方素华)