

二维周期阻尼三明治板结构声辐射特性研究

杨 瑶,周敬东,朱 帅,陈 源,周明刚

(湖北工业大学 湖北汽车结构振动与噪声控制工程技术研究中心,湖北 武汉 430068)

摘 要:现有对二维周期结构的研究大多集中在振动带隙上,而对于层芯为二维周期粘弹性阻尼材料的三明治夹层板结构,其声辐射特性的研究仍较少。该文以有限元与边界元结合的方法为基础,通过理论建模和数值仿真,并将场点声压数据 RMS 处理,得到声场的声压均方值作为衡量结构声辐射特性的标准,对影响二维块状周期阻尼双层板壳结构声辐射特性的阻尼层芯厚度和晶格常数进行了研究,得到了在中低频段两者对结构声辐射特性的影响规律。

关键词:二维;周期结构;三明治板;声辐射

中图分类号: TB535 **文献标识码:** A

Study on Acoustic Radiation Characteristic of Sandwiched Panel Structure with 2D Periodical Damping Core

YANG Yao, ZHOU Jingdong, ZHU Shuai, CHEN Yuan, ZHOU Minggang

(Hubei Automotive Structural Engineering Center of Noise & Vibration, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

Abstract: The existing research of 2D periodical structure mostly focus on the vibration band gap, while the acoustic radiation characteristic research of sandwiched panel structure with 2D periodical viscous-elastic damping material core still lack. Based on combinative method of FEM and BEM, through taking data of field point into RMS processing, and then taking the quadratic mean sound pressure as a standard to measure structure's acoustic radiation characteristic, the effects of thickness of damping core and lattice constant on the periodical damping double-panel structure's acoustic radiation characteristic are studied in this work, and the influence regulation of the two factors on the structure's acoustic radiation characteristic are obtained.

Key words: 2D; periodical structure; sandwiched panel; acoustic radiation

0 引言

与单层板壳结构相比,三明治层合板结构具有刚度大,抗冲击性强及隔声性能突出等优点,因而广泛应用于工业及其生活的各个领域,如包装、建筑,特别是交通领域,其中汽车、船舶、舰艇、飞机等外部整体结构均大面积的采用了三明治层合板结构的设计。因此,对三明治层合板结构的研究尤其是其声学性能领域的研究逐渐成为学者们的关注热点。早在1949年, Beranek 等对无限大三明治层合板及其耦合空气腔结构的传声特性进行了研究,其理论仅适用于声波垂直入射的情况^[1]。Tongan Wang 等利用数值仿真法对单向三明治层合板结构的传声损失和予以预测,并用实验验证了模型的可靠性^[2],而后又利用遗传算法对三明治层合板结构进行优化,其结果对此类结构的实际应用具有较强的指导

作用^[3]。H. Denli 和 J. Q. Sun 等对三明治蜂窝夹板的声辐射特性在较宽频段上进行了仿真优化,数值结果表明类似结构可通过优化在窄频和宽频段内显著降低其声辐射^[4]; C. Shen 和 F. X. Xin 等对瓦楞形层芯三明治层合板的传声损失进行了研究,重点考察了结构尺寸、层芯角度及面板厚度对结构传声损失的影响,并利用现有实验数据对数值结果进行了对比验证^[5]。王海英构造了一种新的考虑芯板压缩变形影响的夹层板单元,消除了计算时的剪切闭锁问题,并结合有限元与边界元方法,系统的研究了不同物理及几何参数下夹层板的声辐射特性^[6]。

以上研究重点集中在层芯为蜂窝状、瓦楞状及传统大面积矩形层芯的三明治板结构上,而对于层芯为周期粘弹性阻尼材料特别是二维周期块状的三明治层合板,其声辐射特性的研究仍较少。本文主

收稿日期:2014-03-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50595081);湖北自然科学基金资助项目(2011CDB085)

作者简介:杨瑶(1989-),女,湖北赤壁人,硕士生,主要从事振动与噪声控制的研究。E-mail:772148615@qq.com。通信作者:周敬东(1973-),男,湖北武汉人,博士,主要从事振动与噪声控制的研究。E-mail:oldwiner@163.com。

要针对影响此类结构声辐射特性较显著的 2 个参数(层芯厚度和晶格常数)进行了研究,得出了其影响规律。

1 理论建模

图 1 为本文研究的二维块状周期阻尼三明治层合板结构示意图。如图 1(a)所示,结构分为上基板,周期阻尼层芯及下基板。图 1(b)中为一个周期的阻尼层芯原胞的具体示意图。设定基板长方向为 x 方向,宽方向为 y 方向,则该结构 x 方向晶格常数为 a_x , y 方向晶格常数为 a_y ,对于长、宽不同的三明治结构具有普适意义。

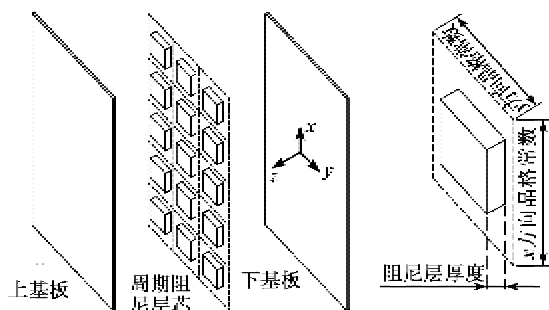


图 1 二维块状周期阻尼三明治层合板结构示意图

1.1 振动有限元分析

基于 Kirchhoff 薄板假设的经典层合板理论,将该三明治层合板结构进行离散,把结构无限个自由度的振动问题转化成有限个自由度的振动问题。在简谐激励作用下,图 1 中结构振动位移响应的有限元表达式为

$$u(\omega) = (K + j\omega C + \omega^2 M)^{-1} f(\omega) \quad (1)$$

式中: $u(\omega)$ 为结构振动位移; K, C, M 分别为结构的刚度阵、阻尼阵和质量阵; $f(\omega)$ 为外部激励载荷向量。

1.2 声学边界元分析

在声学边界元法中,边界条件总体归为混合边界条件、声压边界条件及声质点速度边界条件三类,文中采用声质点边界条件。由于声学响应计算中要求速度响应为法向速度,所以须将结构表面的速度响应向法向方向投影,并将其映射给结构边界元模型

$$v_n(\omega) = j\omega u(\omega) n \quad (2)$$

式(2)为结构表面法向振动速度响应,将其代入到诺依曼边界条件中,并联合无穷远处的 Sommerfeld 辐射条件及 Helmholtz 微分方程

$$\begin{cases} \frac{\partial p}{\partial n} = -j\omega \rho v_n \\ \lim_{r \rightarrow \infty} \left(\frac{\partial p}{\partial n} - ikp \right) = 0 \\ \nabla^2 p + k^2 p = 0 \end{cases} \quad (3)$$

由式(3)得到 Helmholtz 积分方程

$$\oint \left[-j\omega \rho v_n(x_a) G(r) + p(x_a) \frac{\partial G(r)}{\partial n} \right] ds = \begin{cases} p(x) & x \in O \\ 0.5 p(x) & x \in S \\ 0 & x \in I \end{cases} \quad (4)$$

式中: x, x_a 分别为声场中和结构上任意一点; r 为结构表面到声场中任一点的距离; $G(r) = e^{-ikr}/4\pi r$ 为自由空间格林函数; $k = \omega/c$ 为波数; O, S, I 分别为结构边界元模型外部、表面及内部。

将诺依曼边界条件和式(3)分别用于边界元模型两侧并相减,得到边界元模型的单层势 h_i (声压梯度)和双层势 (声压差)为

$$h_i = \frac{\partial p_o}{\partial n} - \frac{\partial p_d}{\partial n} \quad (5)$$

$$\tau_i = P_o - p_d \quad (6)$$

利用有限元离散思想便可得到声场中任意点的声压

$$p(r) = \{A_i\}^T \cdot \{h_i\} + \{B_i\}^T \cdot \{\tau_i\} \quad (7)$$

式中 $\{A_i\}, \{B_i\}$ 分别为向量系数^[7]。

1.3 声压 RMS 均方处理

由于声场中单一点声压并不能作为一个全局量来表征结构对外声辐射的强弱,故本文中构建一个封闭的场点网格,该场点网格由 38 个场点组成,场点网格将结构均匀包络,对 38 个场点上声压均方处理,可得到声压均方值来表征结构在声场中声辐射强弱。另外,对中低频段进行均方处理,可得到声压均方值来表征该频段结构声辐射的强弱。

1.3.1 场点声压表面粗糙度(RMS)处理

$$\bar{y}(f) = \sqrt{\frac{1}{38} \sum_{i=1}^{38} y_i^2(f)} \quad (8)$$

式中: $\bar{y}(f)$ 为所有场点在频率 f 处的声压均方值; $y_i(f)$ 为第 i 个场点在频率 f 处的有效声压值。

1.3.2 频率段声压 RMS 处理

$$\bar{y} = \sqrt{\frac{1}{f_{\max} - f_{\min}} \int_{f_{\min}}^{f_{\max}} y^2(f) df} \quad (9)$$

式中: $\bar{y}$ 为声压均方幅频曲线在频率段 $f_{\min} \sim f_{\max}$ 上的声压均方值; $f_{\min}, f_{\max}$ 分别为频率段的起止频率;

$y(f)$ 为声压均方幅频曲线在频率 f 处的有效声压值。

2 仿真建模

根据有限元结合边界元的思想,先利用有限元软件建立结构有限元模型,计算结构振动位移响应。其中,结构上、下基板选用 shell63 壳单元,阻尼层芯选用 solid45 实体单元,三者间用 GLUE 命令粘接后压缩并重编节点;结构四点简支,在下基板一端中点施加幅值为 5 N 的点谐激励;网格划分远远满足声学分析需要的最小分析波长至少含 6 个单元的要求,分析频率为 0~1 000 Hz。得到结构振动位移响应后,将其作为边界条件映射给结构边界元模型,进行声学分析,然后建立 ISO Power Field Point 场点网格,提取场点声压。模型参数如表 1、2 所示

表 1 上、下层板及阻尼尺寸

结构参数	长度/mm	宽度/mm	厚度/mm
上下层板	500	350	1
周期阻尼	40	40	3
大块阻尼 1	240	200	3
大块阻尼 2	140	350	3

表 2 材料基本参数

材料参数	密度/ (kg/m ³)	弹性模量/ GPa	泊松比	阻尼比
薄板	7 780	210.6	0.3	0
阻尼	2 250	0.567	0.49	0.135

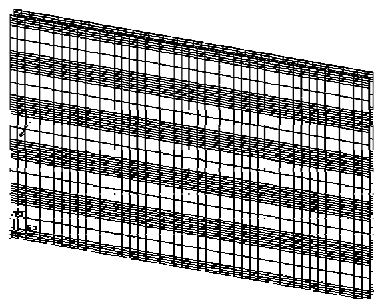


图 2 有限元模型示意图

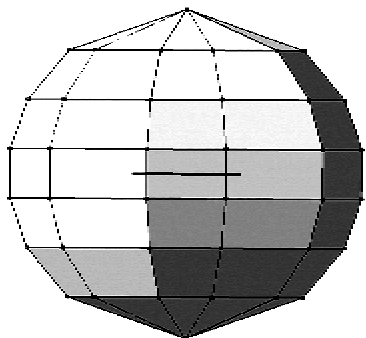


图 3 ISO Power Field Point 场点

3 算例分析

3.1 几种敷设方式时结构的声辐射对比

传统阻尼敷设方式为对基板全覆敷设阻尼或者在局部位置敷设大块阻尼。全覆阻尼敷设方式是将与基板长宽尺寸一致的阻尼敷设到基板上,使阻尼能完全覆盖基板,这种方式在宽频段下得到效果较好,但材料的使用成本较高;大块阻尼敷设方式对其敷设位置的减振降噪效果较好,但由于附加质量的集中,易引发结构共振,使结构整体的降噪效果不佳。而二维块状周期阻尼敷设方式较以上方式更灵活,且不易造成质量过于集中,减振降噪效果更好。图 4 为两种大块阻尼敷设方式。

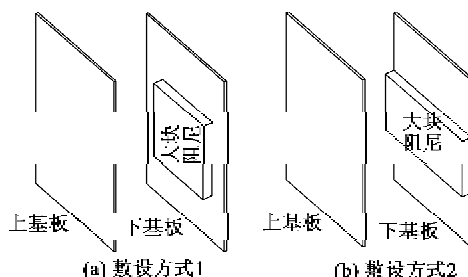


图 4 2 种大块阻尼敷设方式

在同等条件下,将二维块状周期阻尼敷设方式、全覆阻尼敷设方式及图 4 中 2 种大块阻尼敷设方式的三明治板壳结构辐射声压进行对比,其结果如图 5 所示。由图可知,二维块状周期阻尼贴敷方式与 2 种大块阻尼贴敷方式的阻尼覆盖率均为 27.43%,敷设方式的结构尺寸见如表 1 所示。

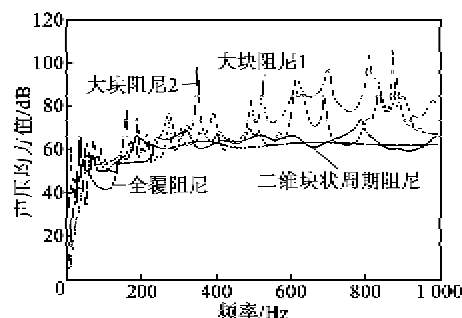


图 5 几种敷设方式时结构辐射声压对比曲线

由图 5 还可知,同等条件下,二维块状周期阻尼敷设方式时三明治板壳结构的辐射声压小于传统的大块阻尼贴敷方式,整体上略大于全覆阻尼敷设的情况,且某些频段(如 138~230 Hz、340~400 Hz、640~695 Hz 和 846~963 Hz)低于全覆敷设阻尼的情况。然而二维块状周期阻尼敷设方式比全覆阻

尼敷设方式所用阻尼减少 72.57%，这降低了三明治层合板结构在工程应用中的成本，且同样能达到降噪的目的。因此，阻尼层芯厚度和晶格常数对影响二维周期块状阻尼三明治层合板结构声辐射较显著。

3.2 阻尼层芯厚度对结构声辐射的影响

层芯厚度对三明治层合板结构的声辐射影响较大，为研究其对二维块状周期阻尼三明治结构声辐射特性的影响规律，将阻尼层芯厚(1~18 mm)作为单一变量进行考察，其他参数选取表 1、2 中的初始参数不变。选取层芯厚度不同时结构的辐射声压曲线进行对比，如图 6 所示。

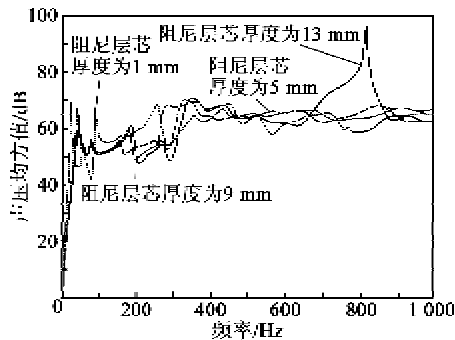


图6 几种层芯厚度时结构辐射声压曲线对比图

由图 6 可知，在 0~300 Hz 低频段时，结构辐射声压随着阻尼厚度的增加有规律的递减，但在 300 Hz 后，规律不明显，当层芯厚度为 13 mm 时，在 700~870 Hz 间结构辐射声压出现了较大的幅值，模态分析显示，在 811.5 Hz 处为结构的一个模态点，与声压曲线峰值的频率相吻合，这表明改变层芯厚度可能会导致结构的共振，从而使辐射声压剧增。可见并非阻尼层芯越厚，结构辐射声压就越低。为进一步研究其规律，对阻尼层芯厚度为 0~18 mm 时结构的辐射声压曲线进行 RMS 处理，得到各情况下 0~1 000 Hz 频段的声压均方位值如表 3 所示。

表3 不同阻尼层芯厚度结构辐射声压均方位值

层芯厚度/mm	1	2	3	4	5	6
声压/dB	62.87	63.15	63.47	63.86	64.24	64.33
层芯厚度/mm	7	8	9	10	11	12
声压/dB	64.43	64.05	64.35	66.02	65.42	64.35
层芯厚度/mm	13	14	15	16	17	18
声压/dB	75.83	64.91	63.58	54.50	63.25	52.80

将表 3 中数据插值，得到阻尼层芯厚度对该结

构辐射声压影响曲线如图 7 所示。由图可看出，并非阻尼层芯越厚，该结构辐射声压越低，如厚 1 mm 时结构的辐射声压低于厚 13 mm 时结构的辐射声压。可见，阻尼层芯厚度对二维块状周期阻尼三明治层合板结构声辐射的影响呈非线性关系，在一定厚度下结构的辐射声压达到最低。因此，对于周期阻尼三明治层合板结构，在给定的基板尺寸时，可利用数值仿真对阻尼层芯厚度优化，得到满足既定条件的最优解，如在此算例中，从成本和声辐射特性方面考虑，层芯厚度为 1 mm 时结构最优。

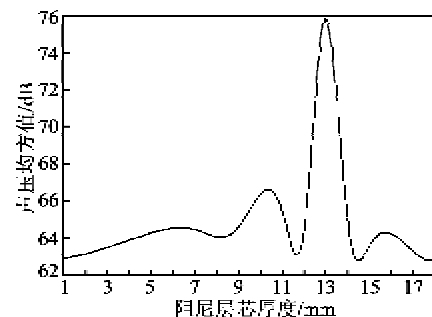


图7 阻尼层芯厚度对结构辐射声压影响曲线

3.3 晶格常数对结构声辐射的影响

对于周期结构，晶格常数的改变对其振动和声学特性都有显著影响，因此，对二维块状周期阻尼三明治层合板结构晶格常数的研究必要。而对于二维周期结构，只改变 a_x 或 a_y 及同时改变 a_x 、 a_y 对结构的声辐射特性影响都较大。

3.3.1 a_x 对结构声辐射的影响

图 8 为几种 a_x 时结构辐射声压曲线对比图。由图可知，随着 a_x 的增大，结构辐射声压曲线的峰值减小，趋于平缓。但可看出， $a_x=0.07$ m 时结构辐射声压稍低于 $a_x=0.08$ m 时的结构辐射声压，可见结构整体辐射声压大小与 a_x 呈非线性关系。为进一步研究两者间的关系，对 $a_x=0.045\sim0.083$ m 时结构辐射声压 RMS 处理，并对结果进行曲线插值，得到两者关系曲线如图 9 所示。

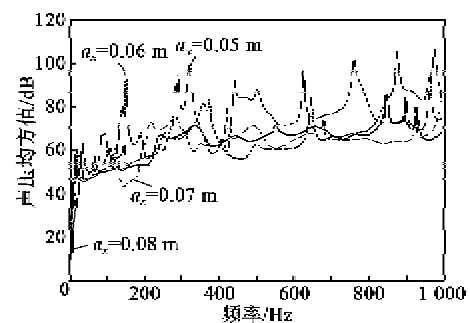
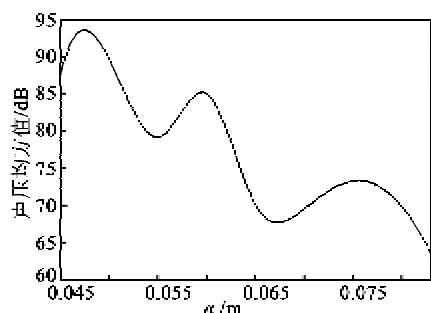


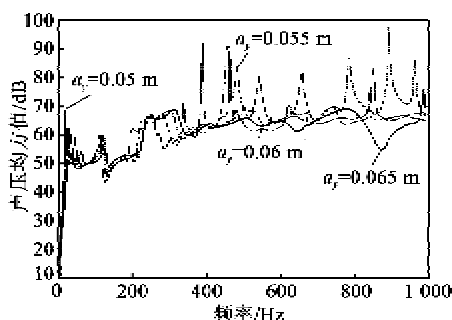
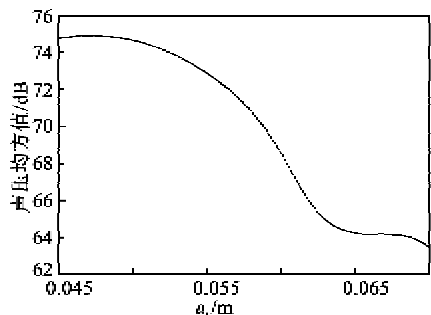
图8 a_x 不同时结构辐射声压曲线对比图

图9 a_x 对结构辐射声压影响曲线

由图9可看出,随着 a_x 的增大,结构辐射声压均方值整体上呈下降趋势,但在特定晶格常数段(如 $a_x=0.045\sim 0.048\text{ m}$ 、 $0.055\sim 0.06\text{ m}$ 、 $0.068\sim 0.076\text{ m}$)会呈上升趋势,从而出现峰值,这可能与特定晶格常数下结构发生共振从而导致辐射声压较大有关。从图中声压均方值的大小可知,阻尼层芯在 x 方向呈均布状态($a_x=0.083\text{ m}$)时结构的辐射声压达到最低。

3.3.2 a_y 对结构声辐射的影响

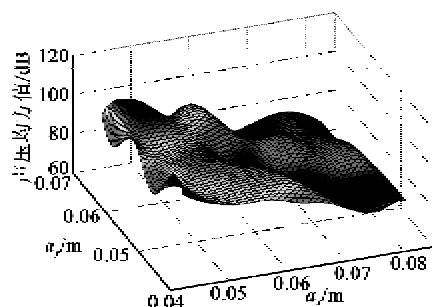
图10为 a_y 不同时结构的辐射声压曲线。由图可看出,当 a_y 较小时,结构辐射声压在模态点上的尖峰值较突出,随着 a_y 的增大,结构辐射声压峰值减小,曲线整体逐渐平缓,幅值降低。为进一步分析两者间的关系,将 $a_y=0.045\sim 0.07\text{ m}$ 时结构辐射声压RMS处理,并对结果曲线插值,得到两者关系曲线如图11所示。

图10 a_y 不同时结构辐射声压曲线对比图图11 a_y 对结构辐射声压影响曲线

由图11可知, a_y 对结构辐射声压的影响较有规律,随着 a_y 增大,结构辐射声压逐渐减小。当 a_y 较小时,改变 a_y 对结构辐射声压的影响较显著;当 a_y 接近阻尼层芯均匀分布状态($a_y=0.07\text{ m}$)时,改变 a_y 对结构辐射声压的影响较小,且阻尼层芯为均布状态时,结构辐射声压达到最小。

3.3.3 a_x 、 a_y 对结构声辐射的综合影响

实际工况中,二维周期结构周期结构可能需同时优化 a_x 和 a_y 才能达到实际要求,这时就必须考虑 a_x 、 a_y 对结构声辐射的综合影响。设定 a_x 和 a_y 为自变量,根据模型大小分别取其变化范围为 $0.045\sim 0.083\text{ m}$ 、 $0.045\sim 0.07\text{ m}$,结构的声压均方值为因变量,计算得到不同 a_x 和 a_y 情况下的54组数据,将其插值,得到 a_x 、 a_y 对结构辐射声压影响分布如图12所示。

图12 a_x 、 a_y 对结构辐射声压的综合影响分布

由图12可看出,在 a_x 、 a_y 均为 0.045 m 时,结构辐射声压均方值出现最高点(为 96.25 dB);在 $a_x=0.083\text{ m}$ 、 $a_y=0.07\text{ m}$ 时结构辐射声压均方值出现最低点(为 63.47 dB),结构辐射声压均方值最低点为阻尼层芯在 x 、 y 方向都为均布状态的情况。这说明当 a_x 、 a_y 都为均布状态时,结构的声辐射达到最低。这也为二维块状周期阻尼三明治层合板结构在实际工程中的优化提供了一条思路。

4 结论

通过有限元与边界元相结合的方法,对二维周期块状阻尼三明治层合板结构的声辐射特性进行了分析,研究发现:

1) 对于阻尼层芯三明治层合板结构,二维块状周期阻尼敷设方式在声学性能上明显优于同等阻尼覆盖率的大块阻尼敷设方式,并在特定频段优于全覆阻尼敷设方式。

2) 阻尼层芯厚度与该结构辐射声压呈非线性

(下转第1021页)