

◇ 研究报告 ◇

# 不同铺设角度下层合板结构参数对声功率影响\*

王县委 吴锦武<sup>†</sup>

(南昌航空大学飞行器工程学院 南昌 330063)

**摘要** 本文研究了不同纤维铺设角度的层合板结构参数对声功率的影响,从而为层合板的低噪声设计提供理论依据。通过分层有限元理论获得层合板结构动力学响应,基于声辐射模态概念分析不同铺设角度下层合板不同铺设方式、宽厚比和弹性模量比对其声功率影响。结果表明,层合板的铺设角度和宽厚比对复合材料层合板结构的声辐射功率影响较大。首先相同铺设角度的层合板,改变弹性模量比,声功率变化不明显;其次改变不同的铺设角度,宽厚比较小的层合板声功率下降的空间更大,更易于声功率的降低。层合板作为结构件时,从降低声功率角度而言总体上对称铺设结构比单向铺设层合板结构有优势,并且相同铺设角度下,反对称铺设层合板可获得更小的辐射声功率。

**关键词** 铺设角度,层合板,声功率,分层有限元理论

中图分类号: TB532 文献标识码: A 文章编号: 1000-310X(2016)02-0144-07

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2016.02.008

## The effects of structure parameters of laminated composite plates with different fiber orientation on the sound power

WANG Xianwei WU Jinwu

(School of Aircraft Engineering, Nanchang HangKong University, Nanchang 330063, China)

**Abstract** In this paper, the effects of the structural parameters of laminated composite plates with different fiber orientation angle on the sound power were investigated which can provide a theoretical basis for the design of the low noise. The dynamic response of laminated plates was obtained by using layerwise finite element model. Based on the acoustic radiation mode, the laying form of the fiber, width-depth ratio and elastic modulus ratio on the plate structural parameters, the sound power of the laminated composite plates with different fiber orientation angle were then discussed. The numerical simulations results show that the effects of the panel orientation angle and width-depth ratio on the sound radiation power of the laminated composite plates are significant. Firstly, the sound power change of laminated plates with same laying angle by changing the elastic modulus ratio is not obvious. Secondly, the laminated composite plates with the smaller width-depth ratio have bigger space on the acoustic power reduction and more easily reduce it by changing the angle of the laying. In addition, from the point of view of acoustic radiation power reduction, as a structural component, symmetrical laminated plates have more advantages than the unidirectional laminated structure and anti-symmetrical laminate can obtain lower acoustic power at the same laying angle.

**Key words** Fiber orientation angle, Laminated plate, Sound power, Layerwise finite element model

2015-06-29 收稿; 2016-01-26 定稿

\*国家自然科学基金项目 (51265038)

作者简介: 王县委 (1988-), 男, 江苏徐州人, 硕士研究生, 研究方向: 结构振动与声控制。

<sup>†</sup> 通讯作者 E-mail: wujinwu@nchu.edu.cn

### 1 引言

复合材料层合板作为一种新型的高比刚度和高比强度的材料，目前正在航空航天、核工业、汽车等工业领域得到广泛应用。评价其动态性能的一项重要指标就是结构辐射噪声的大小。研究结构声功率，是结构低噪声设计重要内容之一。

纤维铺设角度是层合板结构重要的结构参数之一，近年来，围绕复合材料层合板的铺设角度与声学特性的研究也越来越多。如基于一阶剪切变形理论和分层理论的层合板结构的声辐射问题<sup>[1-2]</sup>；复合材料层合板声功率及灵敏度的分析<sup>[3]</sup>；层合板辐射声功率优化设计<sup>[4-6]</sup>；以及复合材料层合板振动声辐射的主动控制<sup>[7-8]</sup>等。以上研究层合板声辐射问题，大都只选取几种特殊铺设角度如0°、30°、45°、60°及90°等，这极大限制了层合板结构设计的灵活性，同时铺设角度的多样性在层合板低噪声设计中也未能得到充分利用。

随着纤维铺设角度铺设技术的快速发展<sup>[9-10]</sup>，铺设角度已经不局限于几种特殊的角度。因此本文主要基于分层理论结合有限元模型分析结构振动特性，通过声辐射模态概念计算8层层合板结构铺角在0°到90°范围对应的声功率。最终将更多的纤维铺设角度应用于层合板设计中，研究不同铺设角度下不同外激励力位置时层合板结构铺设方式、宽厚比、弹性模量比对其声辐射功率的影响，从而为层合板的低噪声设计提供理论依据。

### 2 层合板结构动力响应

基于分层理论，在沿板厚方向采用分层插值，层合板结构物理模型及坐标关系如图1所示。

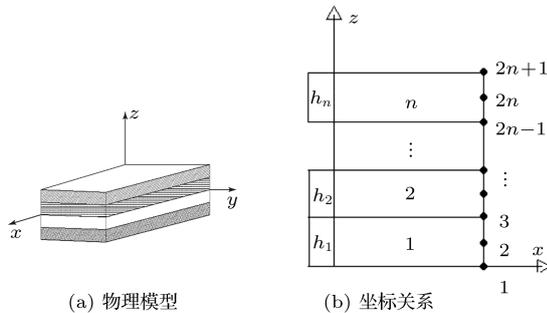


图1 层合板物理模型与坐标关系图

Fig. 1 Physical model and coordinate diagram of laminated plate

层合板结构的位移场可表示为

$$\begin{aligned}
 U(x, y, z, t) &= \sum_{i=1}^{2n+1} u_i(x, y, t)\Psi_i(z), \\
 V(x, y, z, t) &= \sum_{i=1}^{2n+1} v_i(x, y, t)\Psi_i(z), \\
 W(x, y, z, t) &= \sum_{i=1}^{2n+1} w_i(x, y, t)\Psi_i(z),
 \end{aligned} \tag{1}$$

式(1)中， $U(x, y, z, t)$ 、 $V(x, y, z, t)$ 、 $W(x, y, z, t)$ 分别为 $x, y, z$ 方向位移， $n$ 为铺设层数， $2n + 1$ 为插值面数， $u_i(x, y, t)$ 、 $v_i(x, y, t)$ 、 $w_i(x, y, t)$ 为第 $i$ 个插值平面内 $h_j$ 方向位移， $\Psi_i(z)$ 为插值展开系数，其取值为

$$\begin{aligned}
 \Psi^1(z) &= \varphi_1^{(1)}(z), & z_1 \leq z \leq z_2, \\
 \Psi^i(z) &= \begin{cases} \varphi_2^{(i-1)}(z), & z_{i-1} \leq z \leq z_i, \\ \varphi_1^i(z), & z_i \leq z \leq z_{i+1}, \end{cases} \\
 \Psi^{2n+1}(z) &= \varphi_2^{2n}(z), & z_{2n} \leq z \leq z_{2n+1},
 \end{aligned} \tag{2}$$

其中 $z_k$ 代表第 $k$ 个插值层的坐标，同时 $\varphi_{1i}$ 、 $\varphi_{2i}$ 分别等于：

$$\varphi_1^{(j)}(z) = 1 - zz/h_j, \tag{3}$$

$$\varphi_2^{(j)}(z) = zz/h_j, \quad 0 \leq zz \leq h_j, \tag{4}$$

式(4)中， $h_j$ 表示层合板的第 $j$ 个铺设层的厚度， $zz$ 为板厚的局部坐标。根据有限元理论，式(1)中 $u_i(x, y, t)$ 、 $v_i(x, y, t)$ 、 $w_i(x, y, t)$ 可表示为

$$\begin{aligned}
 u_i(x, y, t) &= \sum_{k=1}^m N_k(x, y)u_k T(t), \\
 v_i(x, y, t) &= \sum_{k=1}^m N_k(x, y)v_k T(t), \\
 w_i(x, y, t) &= \sum_{k=1}^m N_k(x, y)w_k T(t),
 \end{aligned} \tag{5}$$

其中， $m$ 为有限元单元节点数。 $N_k(x, y)$ 为形函数表达式， $u_k, v_k, w_k$ 为有限元节点 $k$ 处的 $x, y, z$ 坐标， $T(t)$ 为时间函数。采用四节点矩形单元。

将式(5)和节点形函数表达式带入式(1)，可得单元形函数矩阵 $N$

$$\begin{aligned}
 N &= [N_{11}, N_{12}, \dots, N_{lk}, N_{38}], \\
 l &= 1, 2, 3, \quad k = 1, 2, \dots, 8,
 \end{aligned} \tag{6}$$

其中

$$N_{lk} = \begin{bmatrix} N_k \phi_{ik} \\ \\ \\ N_k \phi_{ik} \end{bmatrix}. \tag{7}$$

根据弹性力学位移-应变关系,单元应变矩阵为

$$B = [B_{11}, B_{12}, \dots, B_{lk}, B_{38}],$$

$$l = 1, 2, 3, \quad k = 1, 2, \dots, 8, \quad (8)$$

其中元素  $B_{ij}$  见文献 [11]。

当  $x, y, z$  坐标系与材料正轴坐标存在偏轴角  $\theta$ , 定义为纤维材料铺设角度。以四层层合板结构为例, 层合板铺设角度  $\theta$  的构造形式如图 2 所示。选取整

体坐标系  $xyz$ , 用  $\theta$  角表示层合板中某单层板的纤维方向。其中  $\theta$  是单层板 1 轴与  $x$  轴之夹角, 由  $x$  轴逆时针转向 1 轴时规定为正。此时四层层合板结构的纤维方向依次为  $\theta = \alpha, 0^\circ, 90^\circ, -\alpha$ 。该层合板的标记法为  $\alpha/0^\circ/90^\circ/-\alpha$ 。本文着重分析工程常见的纤维铺设方式, 即  $[\theta]_8$  单向铺设;  $[\pm\theta]_{2s}$  对称铺设;  $[\theta/-\theta]_4$  反对称铺设, 铺角  $\theta$  在  $0^\circ$  到  $90^\circ$  范围。

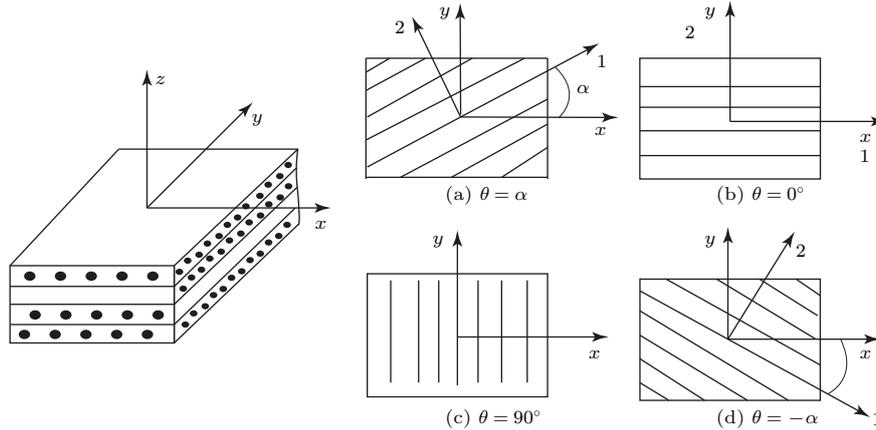


图 2 纤维铺设角度构造形式图

Fig. 2 The structure of fiber orientation angle

根据转应力轴公式, 当层合板结构存在铺设角度  $\theta$  时, 第  $i$  层应力-应变关系可表达为

$$[\sigma^i] = [\bar{D}][\epsilon^i], \quad (9)$$

其中  $\bar{D}$  为偏轴刚度矩阵。改变铺设角度, 刚度矩阵会发生改变。得到矩阵  $B$  和  $\bar{D}$  后, 单元刚度矩阵  $K$  和单元质量矩阵  $M$  可表示为

$$K = \iiint_V B^T \bar{D} B dx dy dz,$$

$$M = \iiint_V \rho N^T N dx dy dz,$$

$$C = \alpha K + \beta M, \quad (10)$$

其中,  $\alpha, \beta$  分别为质量和刚度因子。此时结构总动力方程为

$$M \ddot{X} + C \dot{X} + K X = F_0 e^{i\omega t}, \quad (11)$$

式 (11) 中  $F_0$  为激励力幅值向量, 假设结构在简谐激励力下的位移响应复数形式为

$$X = X_0 e^{i\omega t}, \quad (12)$$

其中  $X_0$  为简谐波载荷作用下位移响应的幅值向量, 将式 (12) 代入式 (11), 略去时间项得到结构的位

移响应幅值向量为

$$X_0 = [(-\omega^2 + i\omega\alpha) M + (1 + i\omega\beta) K]^{-1} F_0. \quad (13)$$

### 3 声辐射模态

设振动平板表面积  $S$ , 放置在无穷大刚性障板上, 以圆频率  $\omega$  向上半空间辐射声。声场介质密度为  $\rho$ , 声速为  $c$ 。振动板表面分成  $J$  个等面积单元。假设每个单元长度远小于声波波长。每个单元法向速度构成速度向量为  $U(\omega)$ 。辐射总声功率  $W(\omega)$  可表示为 [12]

$$W(\omega) = \frac{\rho c S}{2} U(\omega)^H \cdot R \cdot U(\omega), \quad (14)$$

式 (14) 中,  $H$  代表复数共轭转置。  $R$  矩阵为实对称正定矩阵, 对  $R$  矩阵进行特征值分解, 即  $R = Q \cdot \Lambda \cdot Q^T$ ,  $T$  表示转置, 其特征值为  $\lambda_i$  都为正数, 对应的特征向量为  $Q_i$ , 即声辐射模态相互正交 [12]。由式 (13) 可求结构法向速度向量  $U(\omega) = i\omega X_0$ , 将法向速度矢量  $U(\omega)$  带入式 (14), 即可得到辐射声功率  $W(\omega)$ 。

## 4 数值分析与讨论

以八层 T300 碳纤维/环氧层合板为例, 层合板结构物理参数如表 1 所述。在复合材料层合板施加 1N 简谐激励力, 激励的位置分别为层合板中心点 ( $x_1 = 0.5 \times Lx, y_1 = 0.5 \times Ly$ )、边界点 ( $x_2 = (7/9) \times Lx, y_2 = (13/18) \times Ly$ )。通过计算不同铺设方式、宽厚比和弹性模量比的 8 层板铺角  $\theta$  在  $0^\circ$  到  $90^\circ$  范围对应声辐射功率, 分析不同铺设角度的层合板铺设方法对声辐射功率的影响。

表 1 复合材料层合板性能参数

Table 1 The parameters of composite laminates

参数	大小
长	$L_x = 0.3480 \text{ m}$
厚度	$h = 0.002 \text{ m}$
弹性模量	$E_2 = E_3 = 10.3 \text{ GPa}$
剪切模量	$G_{23} = G_{21} = G_{31} = 7.17 \text{ GPa}$
泊松比	$\nu_{12} = 0.28$
阻尼比	$\xi = 0.05$
板密度	$1760 \text{ kg/m}^3$

### 4.1 角度铺设方式对层合板的固有频率影响

不同铺设角度的层合板, 板件刚度的各向异性发生改变, 层合板的动刚度也会随之变化。动刚度为动载荷下抵抗变形的能力, 即引起单位振幅所需要的动态力。静刚度一般用结构的在静载荷作用下的变形多少来衡量, 动刚度则是用结构的固有频率来衡量。因此假设层合板  $E_1 = 181 \text{ GPa}$ , 宽度  $b = 0.3048 \text{ m}$ , 计算简支边界条件下三种不同铺设方式的 8 层板铺角  $\theta$  在  $0^\circ$  到  $90^\circ$  范围对应的前两阶固有频率。三种不同铺设方式分别为:  $[\theta]_8$  单向铺设;  $[\pm\theta]_{2s}$  对称铺设;  $[\theta/-\theta]_4$  反对称铺设。

不同铺设方式层合板结构的前两阶固有频率见图 3~4。由图 3~4 可知: 首先, 单向铺设层合板第一阶固有频率随铺设角度增大逐渐增大, 而其他铺设层合板第一、二阶固有频率随铺设角度呈先增大后减小趋势, 并且第一、二阶固有频率均在  $45^\circ$  附近取最大值。其次, 不同铺设方式的层合板在相同铺设角度下其第一、二阶固有频率大小基本上依次为: 反对称最大, 对称居中, 单向最小。因此当激励力频率远大于不同铺设角度层合板结构的固有频率时, 结构则不容易变形, 即变形较小, 此时结构的动刚度相对激励较大。但当激励力的频率与结构的固有频

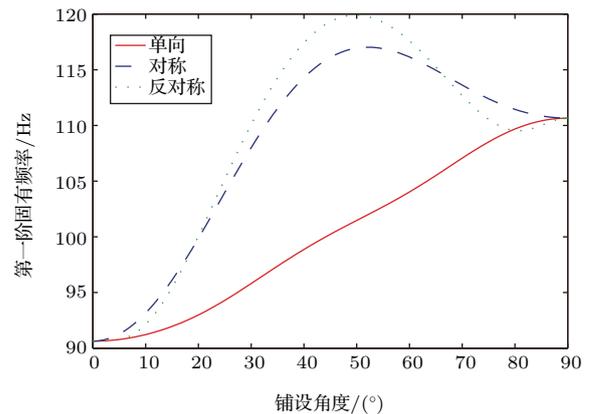


图 3 不同铺设方式对第一阶固有频率影响

Fig. 3 The effect of different laying modes on first natural frequency

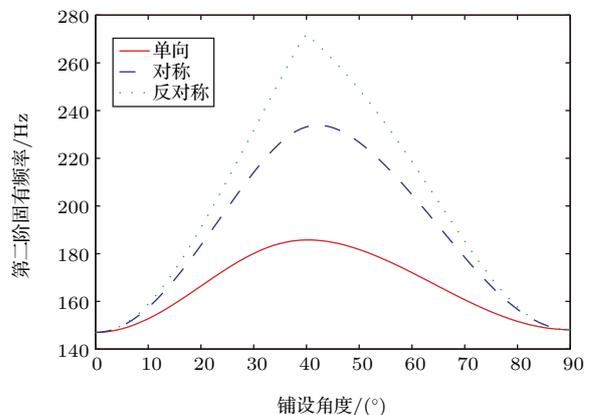


图 4 不同铺设方式对第二阶固有频率影响

Fig. 4 The effect of different laying modes on second natural frequency

率相近时, 有可能出现共振现象, 此时动刚度最小, 变形最大, 而此时对应的声辐射功率会出现峰值。

### 4.2 不同结构参数对声功率的影响

以表 1 所述的层合板为例, 其中层合板  $E_1 = 206 \text{ GPa}$  (即:  $E_1/E_2 = 20$ ), 宽度  $b = 0.30 \text{ m}$  (即:  $b/h = 150$ ), 激励频率为  $200 \text{ Hz}$ 。对于层合板而言, 其工程应用中常见的铺设角度多数为  $0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$  及  $90^\circ$ 。在复合材料层合板施加 1N 简谐激励力, 激励的位置分别为层合板中心点和边界点。五种常见铺设角度下的简支边界下八层板辐射声功率数值如表 2 所述。

由表 2 可得: (1) 相同激励, 相同铺设角度时, 单向铺设时声功率略大于对称和反对称铺设时的声功率。(2) 相同铺设角度下, 中点激励时声功率大于边界点激励所产生的声功率。因为此时层合板结构速度幅值较大。

表2 不同激励条件下八层板声功率对比

Table 2 The comparison of acoustic power of eight-layer plate under different excitation

激励位置 铺设角度(°)	中点激励			边界点激励		
	单向	对称	反对称	单向	对称	反对称
0	83.08	83.08	83.08	73.57	73.57	73.57
30	83.78	83.57	83.51	79.83	77.96	76.67
45	83.09	84.31	84.72	79.54	79.12	78.09
60	84.95	84.69	84.63	79.31	79.19	77.90
90	85.96	85.96	85.96	76.05	76.05	76.05

#### 4.2.1 不同铺设角度方式的影响

假设层合板  $E_1 = 181$  GPa, 宽度  $b = 0.3048$  m, 激励频率为 200 Hz, 计算简支边界条件下三种不同铺设方式的 8 层板铺角  $\theta$  在  $0^\circ$  到  $90^\circ$  范围对应的辐射声功率。

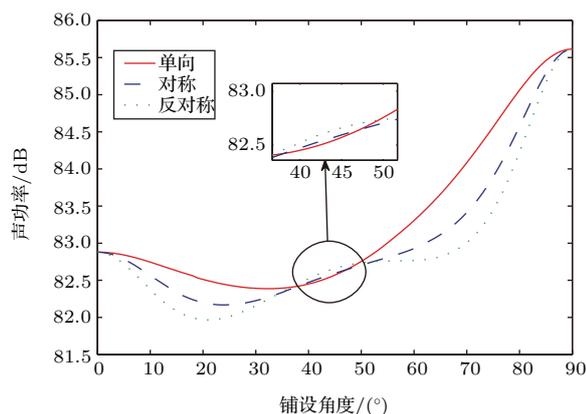


图5 中点激励不同铺设方式对声功率影响

Fig. 5 The effect of different laying modes on acoustic power under the middle point force

当激励力分别位于板结构中点和边界点时, 不同铺设方式层合板结构的辐射声功率见图 5~6。由图 5~6 可知: 首先, 在中点激励时, 铺设角度在  $40^\circ$  到  $50^\circ$  时, 铺设方式对层合板声辐射功率影响较小。层合板作为结构件时, 对称层合板在相同铺设角度下比单向层合板在降噪上更有优势。其次, 在激励频率为 200 Hz 非中点激励时, 随着铺设角度的变化, 铺设方式对层合板声辐射功率影响较大。由于铺设角度在  $15^\circ$  到  $25^\circ$  和  $60^\circ$  到  $70^\circ$  两个区间内, 对称和反对称层合板二阶固有频率与激励频率接近, 此时反对称和对称层合板声功率较大, 并且当二阶固有频率等于激励频率 200 Hz 时层合板刚度最小, 变形最大, 从而在区间内取得声功率峰值, 但

除这两个铺设角度区间外, 相同铺设角度下反对称层合板可以获得更小的声功率。综合分析总体趋势上, 层合板作为结构件时, 从声功率降低角度而言, 相同铺设角度下对称铺设层合板结构比单向铺设层合板结构有优势, 并且反对称铺设层合板可获得更小的声功率。

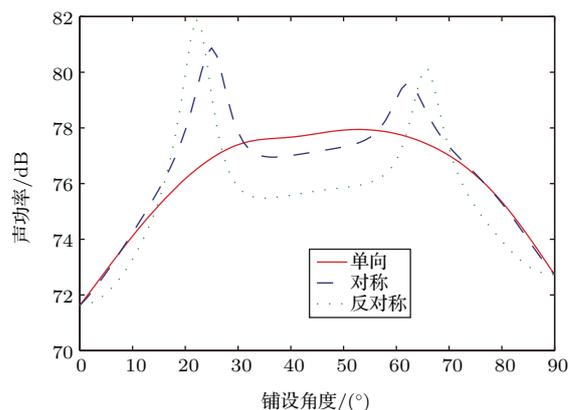


图6 边界点激励不同铺设方式对声功率影响

Fig. 6 The effect of different laying modes on acoustic power under the boundary point force

#### 4.2.2 不同宽厚比的影响

假设层合板激励频率为 200 Hz,  $E_1 = 181$  GPa, 计算简支边界四种宽厚比  $b/h$  分别为 75, 100, 125, 150 时铺层方式为  $[\pm\theta]_{2s}$  的 8 层板铺角  $\theta$  在  $0^\circ$  到  $90^\circ$  范围对应的辐射声功率。其中  $b$  定义为板宽度。

当激励力分别位于板结构中点和边界点时, 在不同宽厚比下层合板结构的辐射声功率见图 7~8。由图 7~8 可知: (1) 随着铺设角度的增加, 不同宽厚比的层合板声功率相差较大。从 7 和图 8 中选取与表 2 相同的五种工程常用铺设角度 (即  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  及  $90^\circ$ ), 对比声功率数值可得: 相同宽厚比下

( $b/h = 150$ ), 表2中五种铺设角度对应的声功率与图中相差不大, 而不同宽厚比层合板声功率相差较大。因此相同铺设角度下, 简支层合板在中点和边界点激励时宽厚比对声功率都有较大的影响。(2) 随着铺设角度的增加, 宽厚比为75和100的层合板的声功率先增大后减小, 在 $20^\circ$ 和 $50^\circ$ 附近, 分别取得声功率峰值。而宽厚比较大的层合板在不同的铺设角度下, 声功率变化不大。综合分析, 改变不同的铺设角度, 宽厚比较小的层合板声功率下降的空间更大, 更易于声功率的减小。

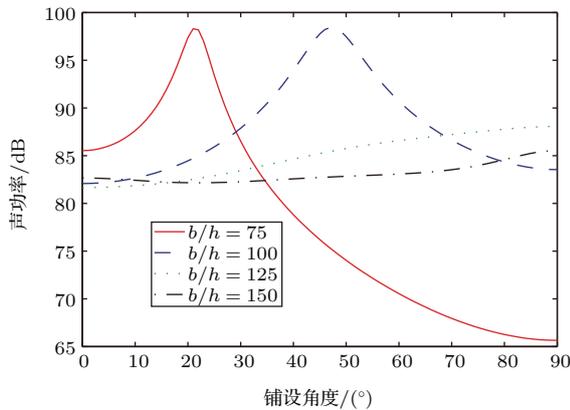


图7 中点激励不同宽厚比对声功率影响

Fig. 7 The effect of different width-depth ratios on acoustic power under the middle point force

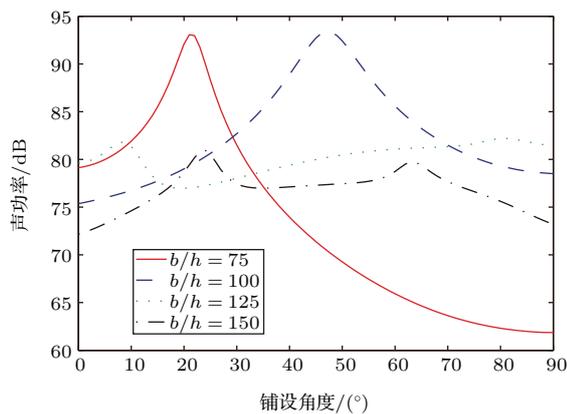


图8 边界点激励不同宽厚比对声功率影响

Fig. 8 The effect of different width-depth ratios on acoustic power under the boundary point force

#### 4.2.3 不同弹性模量比的影响

假设层合板宽度  $b = 0.3048$  m, 激励频率为 200 Hz, 计算简支边界四种弹性模量比  $E_1/E_2$  分别为 10, 15, 20, 25 时铺层方式为  $[\pm\theta]_{2s}$  的 8 层板铺角  $\theta$  在  $0^\circ$  到  $90^\circ$  范围对应的辐射声功率。

当激励力分别位于板结构中点和边界点时, 在不同弹性模量比下层合板结构的辐射声功率见图9~10。由图9~10可知: 随着铺设角度增加, 由放大图可得, 在 $25^\circ$ 到 $60^\circ$ 区间内, 相同铺设角度不同弹性模量比的层合板声功率相差很小。在其他铺设角度区间内, 总体趋势为中点激励时相同铺设角度下弹性模量比越大, 层合板声功率越大, 但声功率相差不大, 最大相差6 dB。而边界点激励时相同铺设角度下弹性模量比越大, 层合板声功率越小, 但声功率相差也不大, 最大相差6 dB。从图9和图10中选取与表2相同的五种工程常用铺设角度(即 $0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ 及 $90^\circ$ ), 对比声功率数值可知: 相同弹性模量比 ( $E_1/E_2 = 20$ ) 下, 表2中五种铺设角度对应的声功率与图中相差不大, 而不同弹性模量比层合板声功率相差也不大。综合分析相同铺设角度下的层合板, 通过改变弹性模量比, 声功率变化不明显。

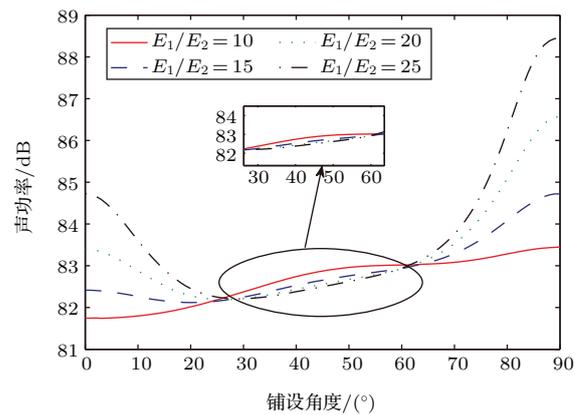


图9 中点激励对不同弹性模量比声功率影响

Fig. 9 The effect of different modulus ratios on acoustic power under the middle point force

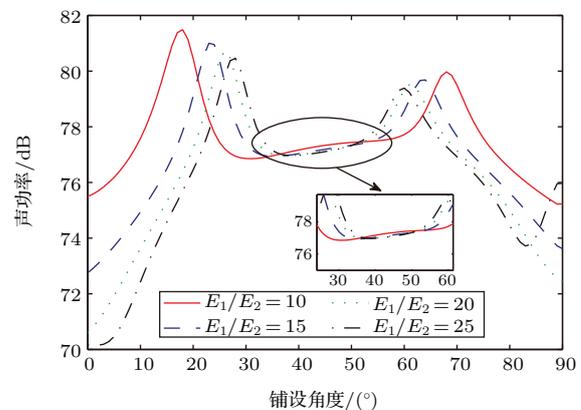


图10 边界点激励不同弹性模量比对声功率影响

Fig. 10 The effect of different modulus ratios on acoustic power under the boundary point force

## 5 结论

文章研究了8层铺角 $\theta$ 在 $0^\circ$ 到 $90^\circ$ 层合板结构在不同激励力位置时,铺设方式、宽厚比、弹性模量比对其声功率的影响。数值计算结果表明,层合板铺设角度和跨厚比对复合材料层合板结构的声辐射功率影响较大。首先相同铺设角度的层合板,改变弹性模量比,声功率变化不明显。其次改变不同的铺设角度,宽厚比较小的层合板声功率下降的空间更大,更易于减小声功率。另外层合板作为结构件时,因此从降低声功率角度而言总体上对称铺设结构比单向铺设层合板结构有优势,并且相同铺设角度下,反对称铺设层合板可获得更小的声功率。

## 参 考 文 献

- [1] YIN X W, LIU L J, HUA H X, et al. Acoustic radiation from a laminated composite plate reinforced by doubly periodic parallel stiffeners[J]. *J. Sound Vib.*, 2007, 306(3-5): 877-889.
- [2] 赵飞. 基于分层理论的层合板声辐射分析与结构优化[D]. 江西: 南昌航空大学, 2013: 21-36.
- [3] 吴锦武, 薛晓理, 彭文辉. 复合材料层合板声功率及灵敏度研究[J]. *噪声与振动控制*, 2015, 35(1): 119-122.  
WU Jinwu, XU Xiaoli, PENG Wenhui. Analysis of sound power and sensitivity of composite laminate plate[J]. *Noise and Vibration Control*, 2015, 35(1): 119-122.
- [4] NIU B, OLHOFF N, LUND E. Discrete material optimization of vibrating laminated composite plates for minimum sound radiation[J]. *Int. J. Solids Struct.*, 2010, 47(16): 2097-2114.
- [5] 刘宝山, 赵国忠, 顾元宪. 复合材料层合板结构振动声辐射优化[J]. *振动与冲击*, 2008, 27(12): 31-35.  
LIU Baoshan, ZHAO Guozhong, GU Yuanxian. Sound radiation optimization of composite laminated plate vibration[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2008, 27(12): 31-35.
- [6] 陈炉云, 张裕芳. 基于遗传算法的复合材料结构-声辐射优化研究[J]. *复合材料学报*, 2012, 29(3): 203-207.  
CHEN Luyun, ZHANG Yufang. Composite material structural-acoustic optimization based on genetic algorithm[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2012, 29(3): 203-207.
- [7] RAY M C, BALAJI R. Active structural acoustic control of laminated cylindrical panels using smart damping treatment[J]. *Int. J. Mech. Sci.*, 2007, 49(9): 1001-1017.
- [8] LI S, ZHAO D Y. Numerical simulation of active control of structural vibration and acoustic radiation of a fluid-loaded laminated plate[J]. *J. Sound Vib.*, 2004, 272(s1-2): 109-124.
- [9] 邵冠军, 游有鹏, 缪群华. 复合材料开孔层合板的纤维铺放路径优化设计[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2006, (4): 31-34.  
SHAO Guanjun, YOU Youpeng, MIU Qunhua. Optimization of fiber placement path for composite laminates with open holes[J]. *Fiber Reinforced Plastics/Composites*, 2006, (4): 31-34.
- [10] 秦永利, 祝颖丹, 范欣愉, 等. 纤维曲线铺放制备变刚度复合材料层合板的研究进展[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2012, (1): 61-66.  
QIN Yongli, ZHU Yingdan, FAN Xinyu, et al. Research progress of composite laminates with variable stiffness in the fiber curve [J]. *Fiber Reinforced Plastics/Composites*, 2012, (1): 61-66.
- [11] WU J W, HUANG L Z. Natural frequencies and acoustic radiation mode amplitudes of laminated composite plates on the layerwise FEM[J]. *Int. J. Acoust. Vibr.*, 2013, 18(3): 134-140.
- [12] 姜哲. 基于声辐射模态确定声功率[J]. *江苏大学学报(自然科学版)*, 2005, 26(6): 537-541.  
JIANG Zhe. Determination of acoustic power on acoustic radiation modes[J]. *Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition*, 2005, 26(6): 537-541.