第50卷第6期
2010年11月

大连理工大学学报
Journal of Dalian University of Technology

Vol. 50, No. 6
Nov. 2010

文章编号：1000-8608(2010)06-0969-9

水下结构声主动控制压电传感器/作动器布置研究

孙　超*[1,2]，赵德有[1]

（1. 大连理工大学 船舶工程学院，辽宁 大连　116024；
2. 北京航天微机电技术研究所，北京　100094）

摘要： 研究了板水下声辐射主动控制时压电传感器/作动器的布置问题. 基于声振耦合理论，在低于临界频率情况下对结构模态和声极子的相互关系做了深入的分析，建立了板波数和辐射声功率间的关系，并据此提出了模态抑制和模态重组方法相结合的压电片布置方案. 结合有限元/边界元数值计算方法，对所提出的压电片布置方案进行了结构辐射声功率控制的定量计算. 与应变理论和角落单极子理论相比，基于声振耦合理论的压电片布置方案在高频段给出了更好的辐射声功率控制效果，同时所需要的控制作动电压相对大幅下降.

关键词： 压电片；主动控制；声振耦合；声辐射

中图分类号： TB535　　**文献标志码：** A

0　引　言

舰船在运行过程中，由各种频率激励引起的船舶舱壁振动声辐射是噪声控制要解决的一个重要问题，传统的被动控制方法不同程度存在着设备笨重、体积庞大、安装维护困难等缺点. 而最近迅速发展起来的有源噪声控制技术恰好能弥补无源噪声控制技术的不足，特别是使用智能材料的噪声主动控制结构，具有体积小、对被控系统物理特性影响小、安装设计方便等特点，目前被广泛应用在低频激励作用下结构振动声辐射控制的研究中. 较高频率激励作用下，即当结构振动出现较高阶模态时，对结构声辐射进行主动控制的探讨尚不多见.

结构声有源控制（ASAC）系统将振动主动控制技术应用到结构声主动控制中[1~3]，通过对振动结构表面施加次级力，抑制结构的声辐射. 在有限的作动能量下，通过尽量少的传感器和作动器来获得不错的控制效果，一直是结构声主动控制追求的目标. 利用少量的传感器/作动器对结构声辐射进行主动控制时，主要依赖于模态重组和模态抑制[4]两种方法. 模态抑制思想使用较为广泛，一般通过使用压电作动器控制结构的应变模态. 模态重组方法因为涉及结构和声场的耦合问题，所做工作相对较少，李双等[5]利用 Maidanik 的角落单极子模型，通过次级声源对初级声场进行了控制，利用声极子的相消特性在空气中得到了较好的低频辐射声场控制效果. Sors 等[6]则使用靠近棱边 4 个角点对压电作动器进行布置的方法讨论了板结构在空气中低频声辐射的反馈控制问题. Gu 等[7]在对流体加载板的声辐射主动控制中，指出靠近板的棱边作用次级力并配合前馈控制方法对棱边辐射耦合现象有更好的控制效果.

在用声振耦合模型分析较高频激励下结构出现的多模态情况时，理想化模型和实际模型比较吻合，更能准确地表达成声极子以及模仿声极子间的叠加和消减. 本文使用铺设有智能材料传感器/作动器的紧凑结构，根据文献[8]的有限板声振耦合理论，利用模态重组方法对结构的压电传感器/作动器布置问题进行深入的探讨，提出针对高阶模态时水下结构声辐射控制压电传感器/作动器的布置方案.

1　板声辐射控制中传感器/作动器模态重组布置方法

以往的文献在铺设压电片时，没有考虑辐射声场与结构之间的关系，通常通过模态抑制的方法选取结构应变最大处铺设压电片，需要较大的

收稿日期： 2008-11-03；　**修回日期：** 2010-10-13.
作者简介： 孙　超*（1978-），男，博士，E-mail：ed. suen@gmail. com.

能量来完成作动.对于密质流体来讲声振耦合特性是不容忽视的,这时往往给主动控制带来更大的能量消耗,应该针对耦合后声场的具体情况,对板实施考虑辐射声场的贴片处理.本文首先讨论声极子和远场辐射声功率之间的关系.

1.1 声辐射板的压电传感器/作动器布置定性分析

1.1.1 含板波数的声功率表达形式 四边简支弯曲振动板的固有频率表达式为

$$\omega_{m,n}=\pi^2\left(\frac{m^2}{L_x^2}+\frac{n^2}{L_y^2}\right)\sqrt{\frac{D}{\rho h}} \tag{1}$$

式中:$D=Eh^3/12(1-\gamma^2)$,为板的筒形弯曲刚度,E 为弹性模量,γ 为泊松比,h 为板厚;ρ 为板的密度;L_x 为板长,L_y 为板宽;用两个参数(m,n)描述模态.

基于式(1)的板波数表达式为

$$K_{\mathrm{b}}=\frac{\omega_{m,n}}{c_{\mathrm{b}}}=2\pi\left[\left(\frac{m\pi}{L_x}\right)^2+\left(\frac{n\pi}{L_y}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}} \tag{2}$$

其中 c_{b} 为板的弯曲波速,设

$$K_{\mathrm{b}x}=m\pi/L_x,\quad K_{\mathrm{b}y}=n\pi/L_y \tag{3}$$

考虑边长比 $R=L_x/L_y=mK_{\mathrm{b}y}/nK_{\mathrm{b}x}$,以及 $R_{mn}=m/n$(短边模态数与长边模态数之比),得 $K_{\mathrm{b}x}=(R_{mn}/R)K_{\mathrm{b}y}$,代入式(2)得

$$K_{\mathrm{b}}=2\pi\left[\left(\frac{R_{mn}}{R}\right)^2+1\right]^{\frac{1}{2}}K_{\mathrm{b}y} \tag{4}$$

通过空间波数和板波数的关系式 $K=\frac{\lambda_{\mathrm{b}}}{\lambda}K_{\mathrm{b}}$ 得到

$$K=\frac{0.9c_1h}{\pi c}K_{\mathrm{b}}^2 \tag{5}$$

c_1 为板的纵向波速,c 为空气中的声速.

对于长和宽分别为 L_x、L_y,嵌入无限大障板中的弹性平板,声辐射功率的波数域表达式为[9]

$$\Pi=\frac{\omega\rho_0}{8\pi^2}\mathrm{Re}\left(\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}\frac{|\dot{w}(k_x,k_y)|^2}{\sqrt{k^2-k_x^2-k_y^2}}\mathrm{d}k_x\mathrm{d}k_y\right) \tag{6}$$

其中 $\dot{w}(k_x,k_y)$ 为结构表面法向复振动速度.根据文献[10]对式(6)进行麦克劳林级数展开,结合式(4)、(5)得到低频情况下含单方向板波数的辐射声功率的近似关系:

$$\Pi=\sum_{m=1}^{M}\sum_{n=1}^{N}10\rho_0cc_1^2h^2K_{\mathrm{b}y}^4\left(\left(\frac{R_{mn}}{R}\right)^2+1\right)^2|Q_{mn}|^2 \tag{7}$$

Q_{mn} 是(m,n)阶结构振动表面复体积速度.通过将辐射声功率空间波数域的表达形式向板波数表达形式的转化,更清晰地体现了辐射声功率和模态间的关系,可以看出基于结构振动模态理论讨论时只有(奇,奇)模态对体积速度有贡献;通过空间波数向板波数的转换看出对辐射声功率的贡献不仅主要取决于体积速度沿板两个方向(奇,奇)模态的模态积,还与模态比有关系,这体现了沿板两个方向声极子的数量分布情况.模态比和模态积基本体现了板表面声极子的分布形式对辐射声场声功率的影响.下面通过声振耦合方法具体分析结构模态和声极子之间的关系.

1.1.2 声振耦合时结构模态和声极子相互关系 式(1)也可表示为

$$f_{m,n}=1.8c_1h\left[\left(\frac{m}{2L_x}\right)^2+\left(\frac{n}{2L_y}\right)^2\right]=1.8c_1h/\lambda_{\mathrm{b}m,n}^2 \tag{8}$$

其中

$$\frac{1}{\lambda_{\mathrm{b}m,n}^2}=\frac{1}{\lambda_{\mathrm{b}x}^2}+\frac{1}{\lambda_{\mathrm{b}y}^2} \tag{9}$$

$$\lambda_{\mathrm{b}x}=\frac{2L_x}{m},\ \lambda_{\mathrm{b}y}=\frac{2L_y}{n} \tag{10}$$

$\lambda_{\mathrm{b}x}$、$\lambda_{\mathrm{b}y}$ 分别为沿 x、y 方向板表面的位移弯曲波长.

当结构的弯曲波速等于声波速,即弯曲波长等于声波长时所对应的频率称之为临界频率,即

$$\sqrt{1.8c_1h/f_{\mathrm{c}}}=c/f_{\mathrm{c}} \tag{11}$$

得到

$$f_{\mathrm{c}}=c^2/1.8c_1h \tag{12}$$

式中:f_{c} 为临界频率.

受机械激励的平板,$f<f_{\mathrm{c}}$ 时,无限板不辐射声波,但由于有限板的二维性及边界条件产生驻波的影响,在 $f<f_{\mathrm{c}}$ 或 $f>f_{\mathrm{c}}$ 时都能辐射声波.对于有限板,在低于临界频率的激励频率作用下,即 $f<f_{\mathrm{c}}$ 时,发生声慢(AS)振动[6].

针对板波长和声波长之间的大小关系,总结得到了以下板声辐射规律:

$$\left.\begin{array}{l}\lambda_{\mathrm{b}y}<\lambda,\ L_y<n\lambda/2\\ \lambda_{\mathrm{b}x}<\lambda,\ L_x<m\lambda/2\end{array}\right\}\text{发生顶角辐射,如图 1}$$

$$\left.\begin{array}{l}\lambda_{\mathrm{b}y}>\lambda,\ L_y>n\lambda/2\\ \lambda_{\mathrm{b}x}<\lambda,\ L_x<m\lambda/2\end{array}\right\}\text{发生棱边辐射,如图 2}$$

横纵坐标互换,规律相同.根据长短边的板半波长数,可以把图1和2看做是(偶,奇)模态下取$(m=5,n=4)$和(奇,奇)模态下取$(m=5,n=1)$各声极子相消后的辐射效果,(偶,偶)模态情况下根据板半波长也可以得到同样的辐射规律.

以上是文献[8]提出的考虑声振耦合的声慢振型图.在不同频率激励作用下,将会有辐射声波波长小于板的弯曲波长的情况出现,如图正负号代表不同板波匹配所形成的极子,此时经过极子间的相消作用,最后会有整个棱边都参与形成剩

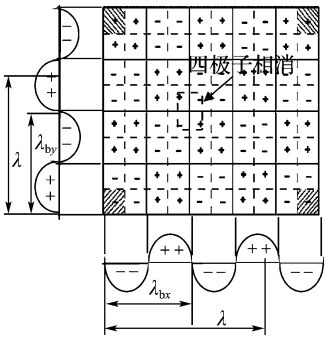


图 1　简支板($m=5,n=4$)顶角辐射

Fig. 1　Simply supported board ($m=5$, $n=4$) corner radiation

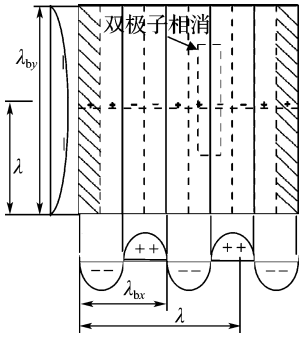


图 2　简支板($m=5,n=1$)棱边辐射

Fig. 2　Simply supported board ($m=5$, $n=1$) edge radiation

余声极子向声场辐射的情况. 如图 2,(奇,奇)模态邻近极子间互相抵消,最后剩余相距较远有效辐射面积较大的两条棱边. 当沿矩形板两边辐射声波波长都大于板的弯曲波长时,如图 1,(偶,奇)模态相邻极子作用后余下的顶角部分声极子向声场辐射,由于距离较远,正负极子间不能完成相消作用,不能忽略其辐射.

从有效辐射面积可以看出,棱边辐射比顶角辐射辐射声波更多些,针对棱边振动的控制将会更为有效地降低声辐射.

1.2　压电传感器/作动器布置方案

根据声振耦合时结构模态和声极子的相互关系,文中给出了含棱边辐射贴片控制方案:对一阶整体振动在板中心处贴片,即对于振动能量较大的第一阶结构模态采用模态抑制方法;对比较宽幅的棱边辐射布置在棱边辐射发生边中心处,即半波长的最大振幅处(波峰或波谷),如图 3 所示的虚线框位置,对结构模态进行重组,改变声极子分布.

由于顶角辐射时,经过声极子相消后有效的辐射面积很小,从权衡作动器数量、作动能量和简化控制算法的工程实用角度出发,不予考虑.

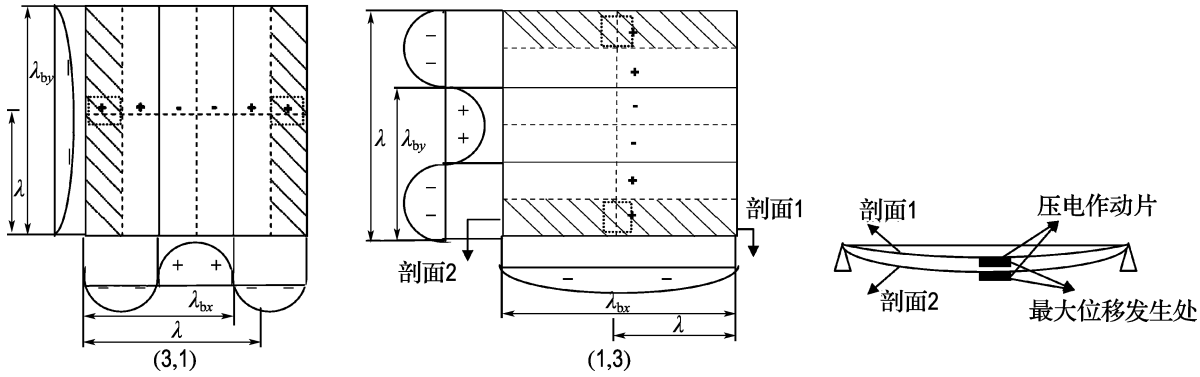


图 3　棱边辐射贴片示意图

Fig. 3　The location of piezoelectric patches to edge radiation

2　结构声辐射/声传输控制压电传感器/作动器布置仿真

2.1　数值计算模型

采用文献[11]给出的压电有限元模型,将压电层合板结构修改为由有限个压电片按基板正反面对称布置的压电控制模型[12],需要把压电层的本构方程修改为下式:

$$\begin{aligned}\boldsymbol{\sigma} &= \boldsymbol{C\varepsilon} - (\boldsymbol{A}\cdot\boldsymbol{B})\boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{E}\\ \boldsymbol{D} &= (\boldsymbol{A}\cdot\boldsymbol{B})\boldsymbol{e\varepsilon} + \boldsymbol{gE}\end{aligned} \tag{13}$$

式中:$\boldsymbol{\sigma}$ 为应力,$\boldsymbol{\varepsilon}$ 为应变,$\boldsymbol{E}$ 为电场强度,$\boldsymbol{C}$ 为弹性刚度常数,$\boldsymbol{e}$ 为压电应力常数,$\boldsymbol{g}$ 为介电常数. $A(x,y)$ 表示在 z 方向上电极在压电片表面上的形状分布函数, $B(x,y)$ 表示极性分布函数,二者均为阶跃函数,即

$$A(x,y) = \begin{cases}0; & (x,y)\text{ 点上没有覆盖电极}\\ 1; & (x,y)\text{ 点上覆盖电极}\end{cases}$$

$$B(x,y) = \begin{cases}1; & (x,y)\text{ 点上电极沿 } z \text{ 轴正向}\\ -1; & (x,y)\text{ 点上电极沿 } z \text{ 轴负向}\end{cases}$$

按照文献 [11、13] 给出的有限元 / 边界元方法计算密质流体中的结构声场耦合问题,基于简

单可靠的负速度反馈方法讨论压电作动片不同布置时的控制效果.

压电板的动力学控制方程表示为

$$\boldsymbol{M}\ddot{\boldsymbol{d}}+(\boldsymbol{C}_{\mathrm{r}}+\bar{\boldsymbol{C}})\dot{\boldsymbol{d}}+(\boldsymbol{K}+\mathrm{i}\boldsymbol{K}')\boldsymbol{d}=\boldsymbol{F} \quad (14)$$

式中:质量阵 $\boldsymbol{M}=\boldsymbol{m}_{\mathrm{m}}+\boldsymbol{m}_{\mathrm{p}}$,$\boldsymbol{m}_{\mathrm{m}}$、$\boldsymbol{m}_{\mathrm{p}}$ 分别为弹性材料质量阵和压电材料质量阵;刚度阵 $\boldsymbol{K}=\boldsymbol{k}_{\mathrm{dd}}+\boldsymbol{k}_{\mathrm{ds}}\boldsymbol{k}_{\mathrm{ss}}^{-1}\boldsymbol{k}_{\mathrm{sd}}$,$\boldsymbol{k}_{\mathrm{dd}}$ 为结构系统的弹性刚度矩阵,$\boldsymbol{k}_{\mathrm{ss}}$ 为压电传感层的电学刚度矩阵,$\boldsymbol{k}_{\mathrm{sd}}$、$\boldsymbol{k}_{\mathrm{ds}}$ 为压电传感层与基体结构的压电弹性耦合刚度矩阵;结构系统的比例阻尼阵 $\boldsymbol{C}_{\mathrm{r}}=\alpha\boldsymbol{M}+\beta\boldsymbol{K}$;主动控制阻尼阵 $\bar{\boldsymbol{C}}=\boldsymbol{k}_{\mathrm{da}}\boldsymbol{G}\boldsymbol{k}_{\mathrm{ss}}^{-1}\boldsymbol{k}_{\mathrm{sd}}$,$\boldsymbol{k}_{\mathrm{da}}$ 为压电作动层与基体结构的压电弹性耦合刚度矩阵,$\boldsymbol{G}$ 为增益矩阵;$\boldsymbol{K}'$ 为考虑结构系统的结构阻尼后得到的结构刚度阵虚部;外荷载 $\boldsymbol{F}=\boldsymbol{f}-\boldsymbol{f}_{\mathrm{p}}$,$\boldsymbol{f}_{\mathrm{p}}$ 为流体对结构的作用力向量,计算公式为

$$\boldsymbol{f}_{\mathrm{p}}=-\boldsymbol{H}\boldsymbol{A}\boldsymbol{p} \quad (15)$$

式中:$\boldsymbol{H}$ 为方向余弦转化矩阵;$\boldsymbol{A}=\int_S \boldsymbol{N}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{N}\mathrm{d}S$,$\boldsymbol{N}$ 为形状函数. 根据 Rayleigh 积分,可得声压 $\boldsymbol{p}$ 与板表面法向振速 $\boldsymbol{v}_{\mathrm{n}}$ 的关系:

$$\boldsymbol{p}=\boldsymbol{D}\boldsymbol{v}_{\mathrm{n}} \quad (16)$$

$\boldsymbol{D}$ 为系数矩阵. 从而根据声压可求得结构远场辐射声功率.

计算模型如图 4 所示,边界条件为四边简支,基板为钢板,选取各参数如表 1 所示. 坐标系的原点取在板中心,板表面在位置 $(x,y)=(0.113\ 75\ \mathrm{m},0.094\ 75\ \mathrm{m})$ 处作用一集中单位简谐激励力,$f(x,t)=F\exp(\mathrm{i}\omega t)$,$F=1.0$ N. 单元划分为 16×16. 压电传感器和作动器成对在板的两面对称布置.

2.2 压电传感器/作动器布置

声慢的出现频率范围上限,即临界频率 $f_{\max}$:在空气中 $f_{\max}=c_{\mathrm{a}}^2/1.8c_{\mathrm{l}}h=3\ 500$ Hz,在水中 $f_{\max}=68$ kHz.

在激励频率满足 $f<f_{\max}$ 时,都遵从声振耦合中的声慢振动发生规律.

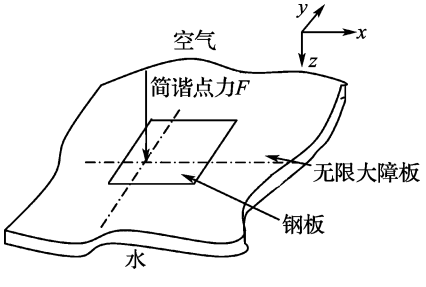


图 4 计算模型

Fig. 4 Computational model

表 1 板和压电材料的物理参数

Tab. 1 Properties of the plate and piezoelectric material

参数	数值
板长 L_x/m	0.455
板宽 L_y/m	0.379
板厚 h/m	0.003
板弹性模量 E/GPa	210
板泊松比	0.30
板密度 ρ/(kg·m^{-2})	7 850
压电陶瓷厚度/m	0.001
压电陶瓷密度/(kg·m^{-2})	7 600
压电陶瓷弹性模量 E_{11}、E_{22}、E_{33}/GPa	81.3
压电陶瓷剪切模量 G_{12}/GPa	30.6
压电陶瓷剪切模量 G_{13}、G_{23}/GPa	25.6
压电陶瓷泊松比 γ_{12}	0.33
压电陶瓷泊松比 γ_{13}、γ_{23}	0.43
压电常数 e_{31}、e_{32}/(C·m^{-2})	−5.2
压电常数 e_{33}/(C·m^{-2})	15.08
压电常数 e_{24}/(C·m^{-2})	12.72
介电常数 ξ_{11}、ξ_{22}/(F·m^{-1})	$1.305\ 4\times10^{-8}$
介电常数 ξ_{33}/(F·m^{-1})	$1.505\ 0\times10^{-8}$

通过对式(7)的分析,得知辐射声功率的大小跟声极子分布(模态积和模态比)的定性关系,基于声振耦合考虑,考察固有振动模态下简支板的有效辐射面积分布规律,给出其中前 6 阶棱边辐射示意图(如图 5 所示).

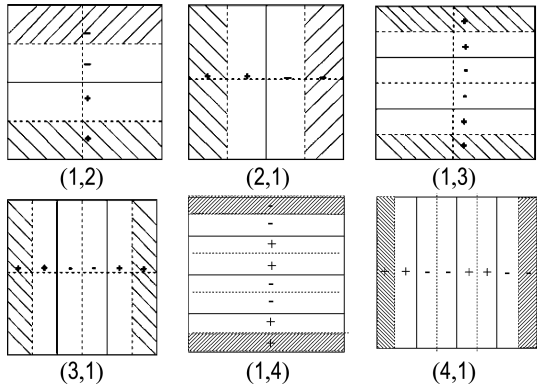


图 5 简支板棱边辐射图

Fig. 5 Edge radiation of simply supported board

(偶,奇)模态出现棱边辐射时,如图 5 中的(1,2)、(2,1)模态,有效辐射面积很大,虽然辐射反向但不相邻,不符合相消规则无法作为极子相消,产生的棱边辐射也需考虑,而基于结构振动的辐射声功率分析则把(奇,偶)模态的声辐射贡献完全忽略掉. 由图 5 看出,随着模态数的增加,有效辐射面积(阴影部分)向棱边收缩,靠近棱边部分的面积对每阶模态的辐射都有贡献,这为针对高阶模态实施控制提供了依据.

下面给出针对单阶棱边辐射进行棱边贴片控制的仿真计算,探讨棱边辐射控制规律(见图 6~8).

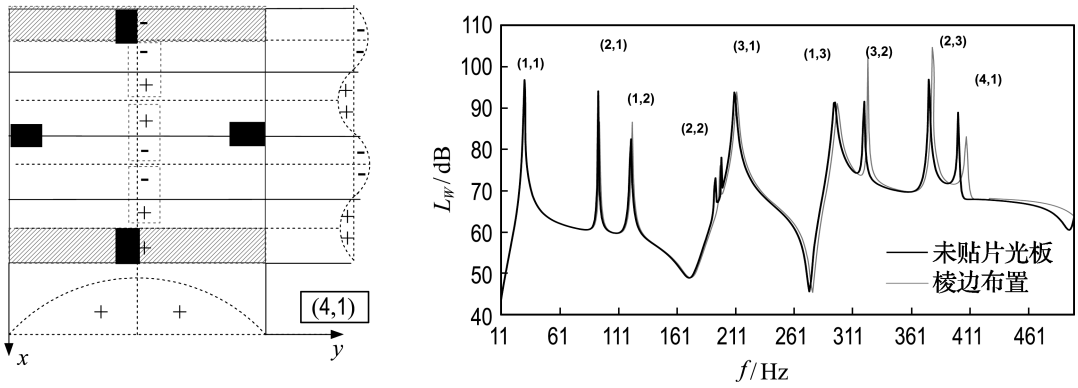


图 6　(4,1)振动模态棱边辐射贴片示意及辐射声功率控制效果(向水中)

Fig. 6　The piezoelectric patches location to edge radiation according to mode (4,1) and the control effect of acoustic radiation power (in water)

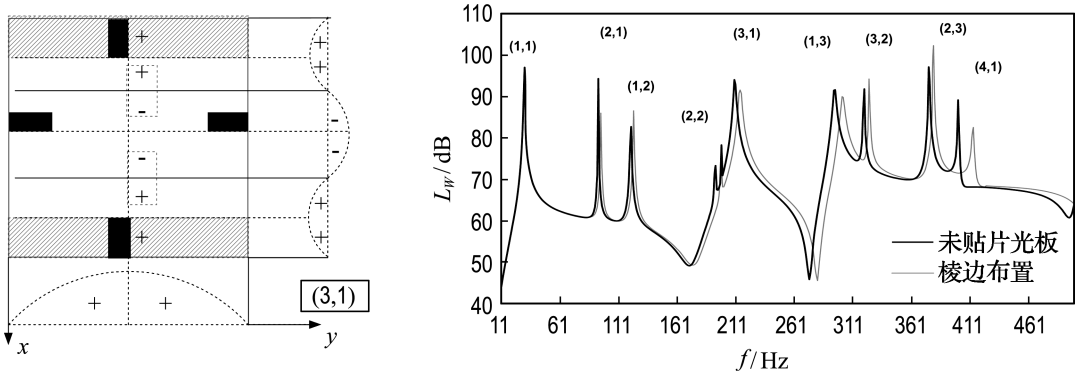


图 7　(3,1)振动模态棱边辐射贴片示意及辐射声功率控制效果图(向水中)

Fig. 7　The piezoelectric patches location to edge radiation according to mode (3,1) and the control effect of acoustic radiation power (in water)

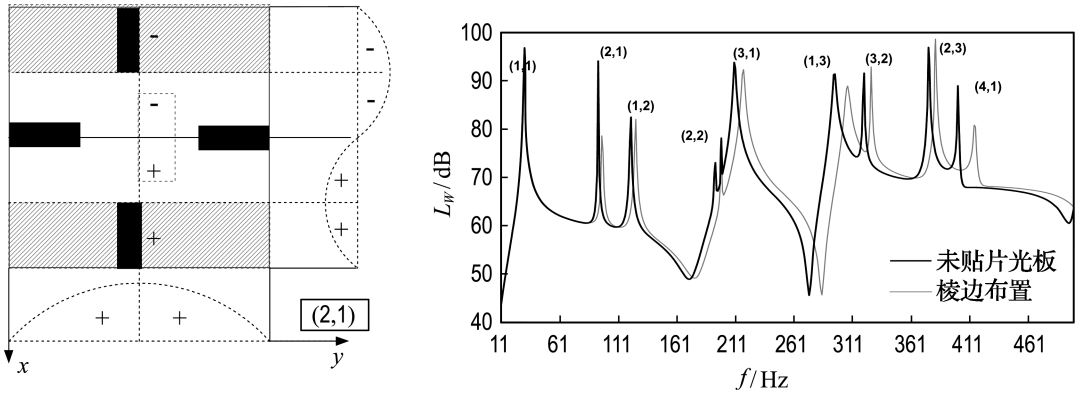


图 8　(2,1)振动模态棱边辐射贴片示意及辐射声功率控制效果图(向水中)

Fig. 8　The piezoelectric patches location to edge radiation according to mode (2,1) and the control effect of acoustic radiation power (in water)

左右对边的棱边辐射，同样会发生在上下对边，所以四边采用同样的压电片布置方法.

从贴片位置和控制效果可以看出，图 6 针对(4,1)、(1,4)模态进行棱边贴片控制，(4,1)模态共振峰有明显下降. 图 7 对(3,1)、(1,3)模态进行棱边贴片控制，(1,3)、(3,1)模态辐射得到一定控制，同时(4,1)模态也得到控制. 图 8 对(2,1)、(1,2)模态下的棱边辐射进行贴片控制，(2,1)、(1,2)模态控制效果得到进一步提高，同时包括了对(3,1)、(1,3)、(4,1)、(1,4)模态下棱边辐射的控制.

现有的比较认可的针对结构模态的应变贴片理论是通过模态抑制的控制方法来抑制结构的前几阶主要振动模态，从而控制辐射声功率，低阶(奇，奇)模态对体积速度贡献最大. 本文计算了结构振动前 6 阶模态的应变分布(见图 9).

只考虑模态抑制针对结构前 3 阶主要振动模态最大应变处进行控制贴片方案 1 如图 10(a)；使用相同数量的压电片，文中给出考虑多阶模态重组，对高阶棱边辐射进行控制贴片方案 2 如图 10(b)；文献[6]顶角贴片方案 3 如图 10(c).

2.3 声辐射多阶模态控制

表 2 给出了同样尺寸钢板、不同压电片布置情况下结构固有频率计算比较.

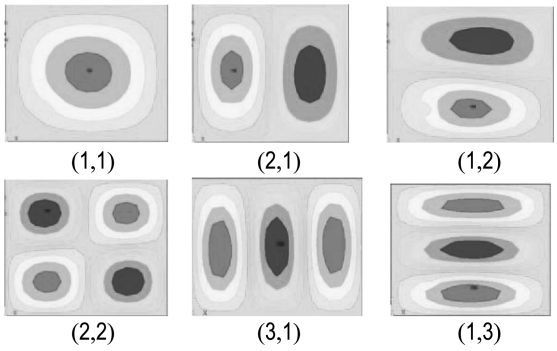


图 9 板的应变模态图

Fig. 9 Mode of plate on strain chart

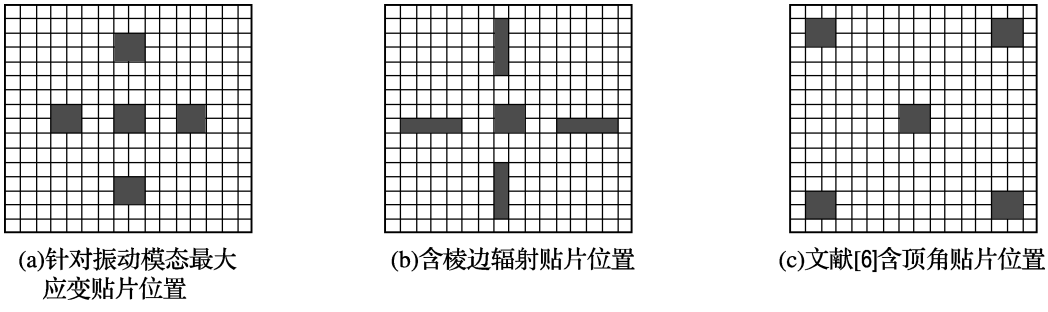


图 10 板的单元划分以及压电片位置

Fig. 10 The element mesh of plate and location of piezoelectric patches

表 2 板的固有频率

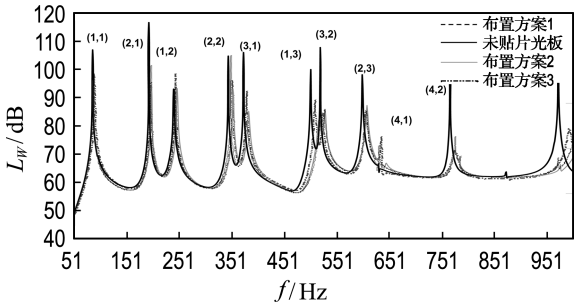
Tab. 2 Natural frequencies of plate Hz

阶数	未贴片光板		文献[14]	文献[11]压电层合板		模态最大应变处贴片板		含棱边贴片板		文献[6]顶角贴片板	
	空气	水	空气	空气	水	空气	水	空气	水	空气	水
1	87	30	87	105	45	86	32	86	31	89	32
2	193	94	194	235	136	196	96	197	96	196	96
3	240	121	241	292	175	243	124	245	124	243	123
4	344	193	348	418	275	349	195	357	200	352	200
5	373	210	372	454	298	380	219	382	221	379	216
6	501	295	497	609	415	518	315	515	311	509	304
7	519	320	526	631	448	527	330	525	327	523	329
8	600	376	604	728	524	606	385	605	382	606	388
9	631	401	621	766	557	630	403	643	415	635	407
10	766	511	775	931	701	775	528	774	528	775	531
11	771	516	782	935	707	785	529	788	529	786	535

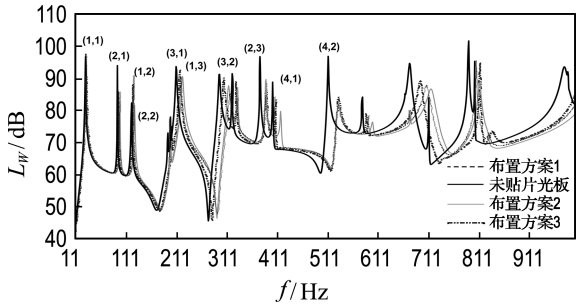
通过几种情况下固有频率的计算比较可以看出，少量压电片布置对钢板的固有特性只有很小的影响，铺设压电层则对基板的影响较大.

图 11 给出了图 10 不同压电片布置方案下，在空气和水中力激励作用下辐射声功率的控制效果对比，控制增益取 100.

分析图 11，方案 3 相对于其他 2 种方案在使用负速度反馈控制算法时没有优势. 从对板的辐射声功率控制效果来看，方案 2 整体控制效果好于方案 1，个别共振峰控制效果相对方案 1 有 5 dB 以上的衰减，在水中 300 Hz 以上高频区一直明显保持控制效果好的优势.



(a) 向空气中



(b) 向水中

图 11　有无主动控制下的简支板辐射声功率

Fig. 11　Acoustic radiation power of simply supported plate with and without active control

对图 11 控制图线的分析见图 12.

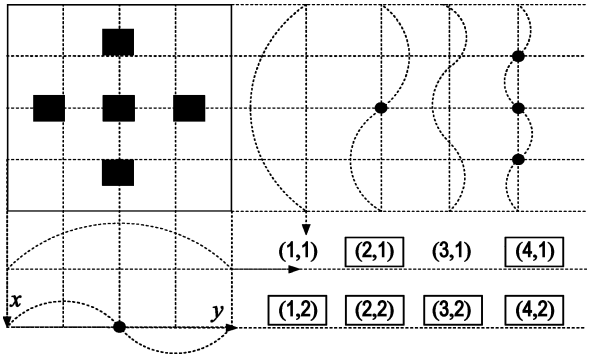


图 12　振动模态针对应变最大处贴片控制解析

Fig. 12　Analysis of the control effect of piezoelectric patches location according to strain mode

图 12 的标注圆点，示意板表面发生此阶振型时，作动器位置落在节线处，致使框选的几阶模态振动在针对应变进行贴片控制时，得不到很好的处理，而激励频率可能恰恰激起结构被框选的这几阶模态的共振.

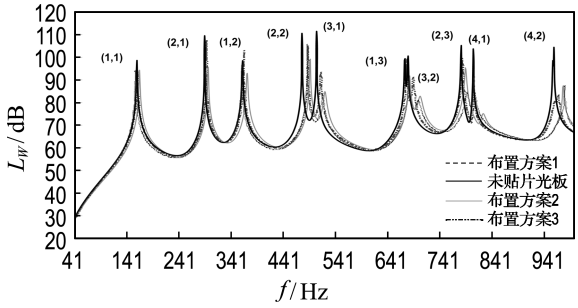
从算例控制效果来看，由力激励作用下辐射声功率的控制图 11 可清楚看到，针对应变进行贴片控制在(1,2)、(2,1)、(2,2)、(4,1)等共振模态上的控制效果与含棱边辐射贴片给出的控制效果差别较大. 含棱边辐射贴片控制效果有明显优势. 这和图 12 的分析是吻合的.

据图 12 分析可以发现，在高频激励作用下板出现高阶模态时，针对应变进行贴片控制方案往往会使大部分作动器落在节线处，而根据棱边辐射图 6，含棱边贴片对高阶模态的声辐射控制是有明显优势的. 控制仿真曲线也体现了这一趋势.

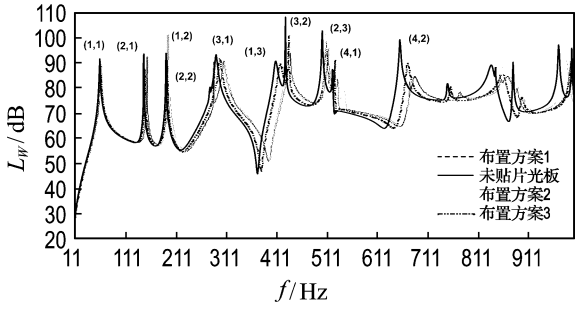
含棱边贴片的控制方法实质上是优化了传统的针对主要共振模态应变进行贴片的方法，结合棱边辐射模态理论，把以前针对(1,3)、(3,1)模态的贴片形状转换成垂直于邻近板边的长条形，不仅没有削弱对(1,3)、(3,1)模态的控制效果，而且具有了对辐射有主要贡献的其他模态也实施控制的特点.

当板四边固支时，比较 3 种压电片布置方案下板的辐射声功率控制效果.

从图 13 的固支板辐射声功率控制效果来看，同简支板的控制规律一致，含棱边辐射贴片方案 2 控制效果最好. 图 14、15 给出了在力激励作用下，对简支板结构声辐射进行速度负反馈主动控制时，两种最有效的压电片布置方案，方案 1 和 2 在部分共振频率下所对应的压电片作动电压幅值.



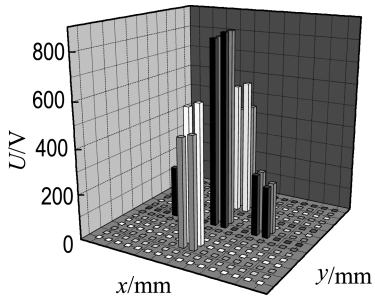
(a) 向空气中



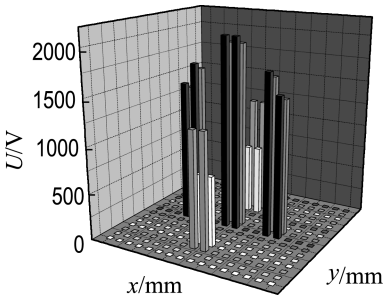
(b) 向水中

图 13　有无主动控制下的固支板辐射声功率

Fig. 13　Acoustic radiation power of clamped plate with and without active control



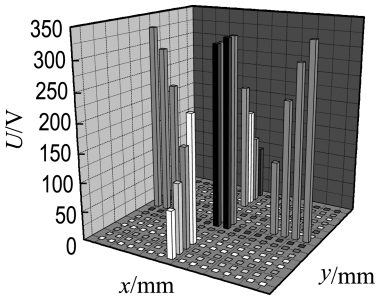
(a) 水中,98 Hz



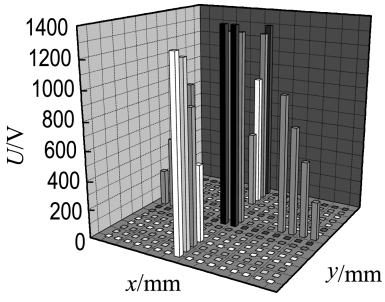
(b) 水中,127 Hz

图 14 模态最大应变贴片时作动电压幅值

Fig. 14 Amplitude of control voltage of piezoelectric actuators for strain mode scheme



(a) 水中,98 Hz



(b) 水中,127 Hz

图 15 含棱边辐射贴片时作动电压幅值

Fig. 15 Amplitude of control voltage of piezoelectric actuators for edge radiation scheme

通过对振动模态最大应变处贴片方案和考虑棱边辐射贴片方案在相同共振频率下的压电幅值比较可知,含棱边辐射贴片需要的最大作动电压要明显小于应变模态贴片,因此可以看出,结合声场声振耦合特性考虑的贴片方法,不仅得到了很好的声辐射衰减效果,而且不用一味减小结构多阶固有模态振动而消耗较大的电压,体现了针对声场进行控制来降低辐射声能量的优势.

3 结 论

板的结构声振实际存在棱边辐射效应,利用简单可靠的适于复杂工况下的负速度反馈控制[2],通过对板在空气中和水中的辐射声功率的控制算例说明,考虑声振耦合的含棱边辐射贴片控制与现有其他贴片方法相比,在对结构高阶模态的控制中得到了更好的声辐射衰减效果.

水下结构辐射阻尼随频率的升高而增大,相应要求控制上通过加大电压给出更高的主动控制阻尼,来进行结构模态抑制才能有效控制振动声辐射.而通过对振动模态最大应变处贴片方案和含棱边辐射贴片方案相同共振频率下的电压幅值比较可知,含棱边辐射贴片需要的最大作动电压要明显小于振动模态最大应变处贴片的作动电压,因此可以看出,结合模态重组思想,而不单纯利用模态抑制思想的含棱边贴片方法不仅得到了很好的声辐射控制效果,而且不用消耗较大的电压,体现了含棱边辐射贴片控制方法对高阶模态实施控制的优越性.

参考文献:

[1] FULLER C R. Active control of transmission/radiation from elastic plates by vibration input analysis[J]. **Journal of Sound and Vibration**, 1990, **136**:1-15

[2] GARDONIO P, BIANCHI E, ELLIOT S J. Smart panel with multiple decentralized units for the control of sound transmission. Part I: theoretical predictions [J]. **Journal of Sound and Vibration**, 2004, **274**(1-2):163-192

[3] PETITJEAN B, LEGRAIN I. Feedback controllers for active vibration suppression [J]. **Journal of Sound Structural Control**, 1996, **3**(1-2):111-127

[4] HANSEN C H, SNYDER S . Mechanisms of active noise control by vibration sources [J]. **Journal of Sound and Vibration**, 1991, **147**(3):519-525

[5] 李 双,陈克安,潘浩然. 基于模态理论的有源声学

结构控制机理研究[J]. 振动工程学报，2007，**20**(2):140-144

[6] SORS T C，ELLIOT S J. Modelling and feedback control of sound radiation from a vibrating panel[J]. **Smart Materials and Structure**，1999，**8**(3):301-331

[7] GU Y，FULLER C R. Active control of sound radiation from a fluid-loaded rectangular uniform plate [J]. **Journal of the Acoustical Society of America**，1993，**93**(1):337-345

[8] 姚德源，王其政. 统计能量分析原理及应用[M]. 北京:北京理工大学出版社，1997

[9] FULLER C R，ELLIOT S J. **Active Control of Vibration**[M]. London:Academic Press，1996

[10] WILLIAMS E G. A series expansion of the acoustic power radiated from planar sources[J]. **Journal of the Acoustic Society of America**，1983，**73**(5):1520-1524

[11] LI Sheng，ZHAO De-you. Numerical simulation of active control of structural vibration and acoustic radiation of a fluid-loaded laminated plate [J]. **Journal of Sound and Vibration**，2004，**272**(1-2):109-124

[12] CORREIA V M F，GOMES M A A，SULEMAN A，*et al*. Modelling and design of adaptive composite structures [J]. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**，2000，**185**(2-4):325-346

[13] 黎　胜，赵德有. 用有限元/边界元方法进行结构声辐射的模态分析[J]. 声学学报，2001，**26**(2):174-179

[14] MASSON P，BERRY A. Active structural acoustic control using strain sensing [J]. **Journal of the Acoustical Society of America**，1997，**102**(3):1588-1599

Study of piezoelectric sensor/actuator scheme for underwater structural acoustics active control

SUN　Chao[*1,2]，　ZHAO　De-you[1]

(1. Department of Naval Architecture，Dalian University of Technology，Dalian 116024，China；
2. Beijing Institute of Aerospace Micro-electromechanical Technology，Beijing 100094，China)

Abstract：A theoretical and numerical investigation of piezoelectric sensor/actuator scheme for the active control of underwater structural acoustics radiation is performed. Based on structural-acoustic coupling theory，a detailed analysis of the relationship between structural modal and sound poles is presented below critical frequency. Qualitative relation between acoustic radiation power and wavenumber of plate is given. A piezoelectric patches scheme is introduced which combined modal suppression method with modal reconstruction method. Based on the numerical computation method of finite element method/boundary element method (FEM/BEM)，quantitative analysis of the control of acoustic radiation power is done according to disposal scheme of piezoelectric patches. The disposal scheme of piezoelectric patches based on the theory of structural-acoustic coupling gives a better acoustic radiation power control result compared with the other two schemes based on strain theory and corner monopole theory at high frequency. Furthermore，a lower voltage is demanded when a better control result is gotten.

Key words：piezoelectric patches；active control；structural-acoustic coupling；acoustic radiation