

0-3 型压电复合材料覆盖层水下吸声性能的理论研究

于利刚 李朝晖[†] 马黎黎

(北京大学信息科学技术学院, 北京, 100871)

(2010 年 12 月 9 日收到; 2011 年 5 月 9 日收到修改稿)

目前压电分流阻尼技术在振动和噪声领域的应用得到了广泛的关注. 本文尝试将压电分流阻尼技术应用于水下吸声领域, 以提高覆盖层的吸声性能. 将压电覆盖层厚度模态的机电方程和声波传播的传递矩阵相结合, 建立一维电声模型. 该模型可以用于分析多层压电和非压电水下吸声覆盖层的吸声性能. 采用该模型分析了 0-3 型压电复合材料覆盖层的水下吸声性能. 压电复合材料的参数是采用 Furukawa 的模型计算的. 研究表明, 采用合适的分流电阻, 负电容分流电路可以在较宽的频率范围显著提高覆盖层的吸声性能. 其原理可以从阻抗匹配的角度解释, 负电容分流电路可以调整压电覆盖层的表面声阻抗, 使之与水的特性声阻抗相匹配.

关键词: 压电分流阻尼, 吸声, 负电容, 0-3 型压电复合材料

PACS: 43.20.+g, 43.30.+m

1 引言

压电分流阻尼技术 (piezoelectric shunt damping) 是近年来在振动与噪声控制领域的研究热点. 在应用中, 压电器件通常粘结在需要减振的机械结构上, 并且和分流电路相连接. 机械振动可以通过压电效应转化为电能, 然后由分流电路转化为热能, 损耗掉. 这项技术不需要额外的传感器, 分流电路可以对减振起到控制作用^[1]. 目前各种分流电路如共振电路^[2-5]、开关电路^[6-8]、负电容电路^[9-11]等已得到了形成和发展. 相比较而言, 负电容电路比较简单, 并且可以获得宽带减振效果, 因此得到了较多关注.

0-3 型压电复合材料是水声学和超声学领域常用的压电材料. 通常由 PZT 压电陶瓷颗粒和橡胶复合而成. PZT 压电陶瓷颗粒均匀分散在橡胶中, 颗粒之间不连通; 橡胶作为基体材料, 是三维连通的. 和普通的压电材料 (如 PZT 陶瓷) 相比, 0-3 型压电复合材料具有很好的柔韧性, 可以覆盖到弯曲结构的表面; 其声阻抗较低, 可以和水匹配^[12]; 若以 0-3

型压电复合材料作为水下吸声覆盖层, 其吸声机制可以包含机械阻尼和压电分流阻尼两种方式^[13]. 因此, 0-3 型压电复合材料是发展智能型水下吸声覆盖层的理想原材料.

尽管目前压电分流阻尼技术在吸声领域的研究得到了一些关注^[13-16], 但是以 0-3 型压电复合材料作为水下吸声覆盖层的应用研究还不多见. Zhang 等人^[13]建立一维的电声模型, 并采用该模型计算了不同阻抗的分流电路对压电复合材料覆盖层的水下吸声性能的影响. 研究表明, 合适的分流电路可以使压电复合材料覆盖层获得较好的吸声效果. 该模型相对简单, 仅限于固定边界的单个压电覆盖层. 而实际应用中的吸声覆盖层往往是多层结构, 其边界条件也比较复杂. 因此, 有必要对现有的模型做进一步发展, 为将来发展智能型水下吸声覆盖层打下一定的基础.

本文对负电容电路分流的 0-3 型压电复合材料覆盖层的水下吸声性能进行了理论分析. 采用 Furukawa 的模型^[17]计算了 0-3 型压电复合材料的弹性常数、相对介电常数、压电常数、声速和特性

[†] E-mail: lizhcat@pku.edu.cn

声阻抗. 由压电覆盖层的厚度模式的机电方程, 导出声波在压电覆盖层中的传递矩阵. 然后结合非压电覆盖层的传递矩阵, 建立一维的电声模型. 采用

该模型计算了压电复合材料覆盖层的水下吸声性能, 并从声阻抗匹配的角度分析了负电容分流电路提升吸声性能的机理.

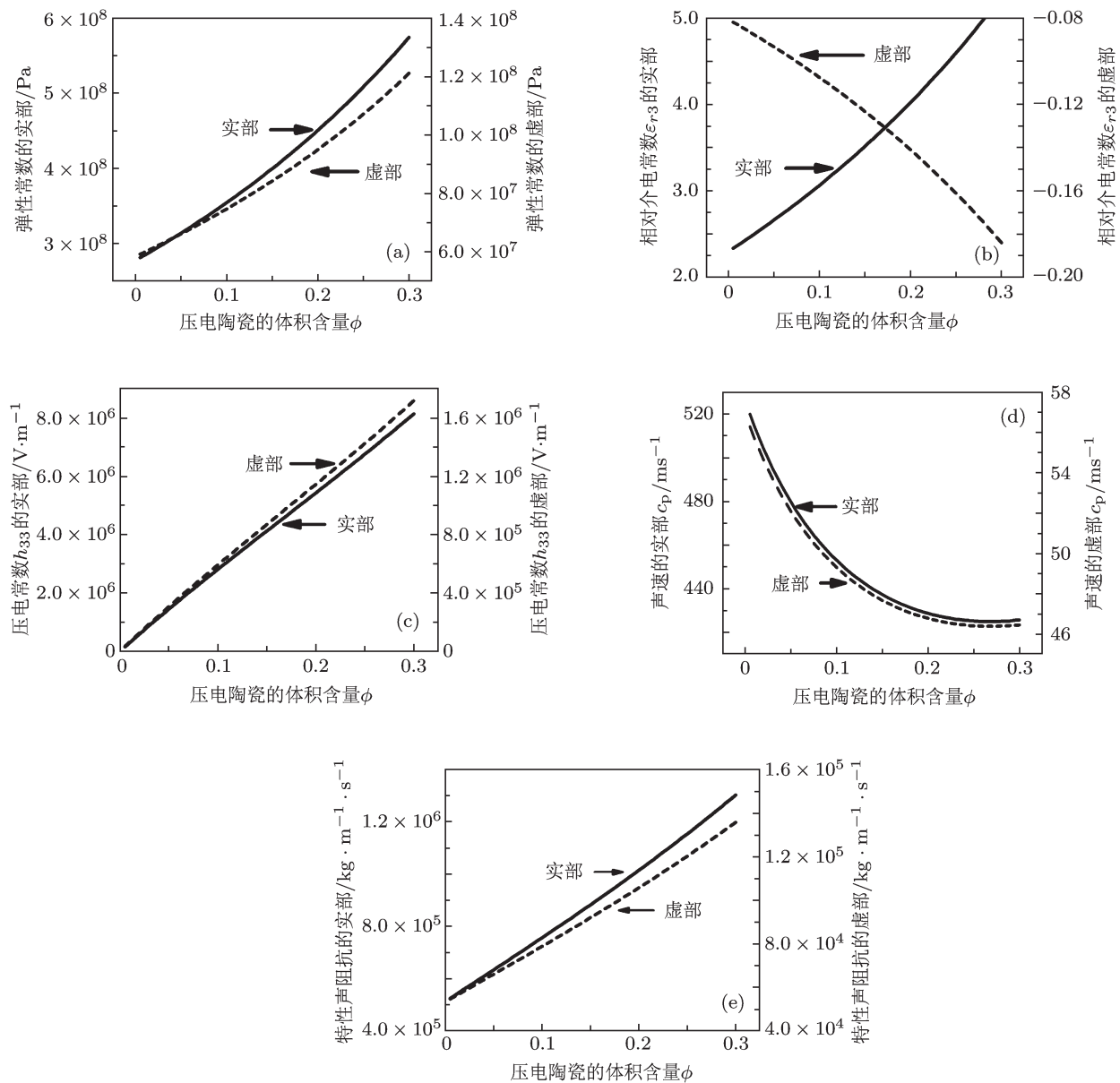


图1 0-3型压电复合材料的物理参数随压电陶瓷体积分量的变化 (a) 弹性常数; (b) 相对介电常数; (c) 压电常数; (d) 声速; (e) 特性声阻抗

2 0-3型压电复合材料物理参数的计算

本文采用了 Furukawa 所建立的模型计算了 PZT 压电陶瓷颗粒和橡胶形成的 0-3 型压电复合材料的弹性系数、介电常数和压电常数. 由于压电陶瓷的弹性常数和介电常数远大于橡胶, 0-3 型压电复合材料的弹性系数、介电常数和压电常

数可近似为^[17]

$$C_{33} = \frac{2+3\phi}{2(1-\phi)} C_{33}^1, \quad (1)$$

$$\epsilon_{r3} = \frac{1+2\phi}{1-\phi} \epsilon_{r3}^1, \quad (2)$$

$$h_{33} = \frac{15\phi}{2(1+2\phi)(1-\phi)} \frac{C_{33}^1}{C_{33}^2} h_{33}^2, \quad (3)$$

C_{33} , ε_{r3} 和 h_{33} 分别表示 0-3 型压电复合材料的弹性常数、相对介电常数和压电常数. 上标 1 和 2 分别代表橡胶和压电陶瓷, ϕ 是压电陶瓷的体积百分比. 0-3 型压电复合材料的密度 ρ_p 也是影响覆盖层吸声性能的重要的参数, 可以由下式计算:

$$\rho_p = \rho_1(1 - \phi) + \rho_2\phi, \quad (4)$$

ρ_1 , ρ_2 分别为橡胶和压电陶瓷的密度. 橡胶和压电陶瓷的参数如表 1 所示.

图 1(a), (b) 和 (c) 分别为 0-3 型压电复合材料的弹性常数、相对介电常数和压电常数随压电陶瓷的体积含量的变化. 随着压电陶瓷的体积含量的增加, 弹性常数的实部和虚部都变大. 相对介电常数的实部变大, 虚部变小. 由于相对于介电常数的实部远大于其虚部, 因此其幅值变大. 压电常数的实部和虚部都随着压电陶瓷体积含量的增加而增大. 由于压电覆盖层的机电转换系数的表达式为

$$n = \frac{\varepsilon_{r3}\varepsilon_0 h_{33}A}{l_p}, \quad (5)$$

ε_0 为真空介电常数. l_p , A 分别为压电覆盖层的厚度和面积. 显然, 较大的相对介电常数和压电常数可以使压电覆盖层获得较大的机电转换系数, 从而有利于分流电路对压电覆盖层的吸声性能进行控制.

表 1 橡胶和 PZT 压电陶瓷的参数

橡胶	
$\rho_1/(\text{kg}/\text{m}^3)$	941.4
C_{33}^1/Pa	$2.76 \times 10^8 + j5.85 \times 10^7$
ε_{r3}^1	$2.3 - j0.08$
PZT 压电陶瓷	
$\rho_2/(\text{kg}/\text{m}^3)$	7550
C_{33}^2/Pa	1.47×10^{11}
ε_{r3}^2	1700
$h_{33}^2/\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$	2.15×10^9

0-3 型压电复合材料的纵波声速和特性声阻抗是由其密度和弹性常数决定的, 可以由下式计算;

$$c_p = \sqrt{\frac{C_{33}}{\rho_p}}, \quad (6)$$

$$Z_{ch} = \rho_p c_p. \quad (7)$$

如图 1(d), (e) 所示, 随着压电陶瓷体积含量的增加, 压电复合材料的声速会先降低, 然后略有增加. 降

低压电复合材料的声速, 有利于改善其低频吸声性能. 随着压电陶瓷体积含量的增加, 复合材料的特性声阻抗增加. 复合材料的特性声阻抗对吸声性能的影响要具体结合边界条件进行分析, 在此不做讨论.

3 一维电声模型的建立

本文建立了一维电声模型对 0-3 型压电复合材料覆盖层的吸声性能进行了理论分析. 如图 2 所示, 假设 0-3 型压电材料覆盖层黏贴在一层钢板上, 压电覆盖层和钢板分别与水和空气接触. 水和空气均为半无限大空间. 当声波由水中垂直入射到压电覆盖层上, 在各层介质中只产生纵波, 声波在各个界面上发生反射和透射.

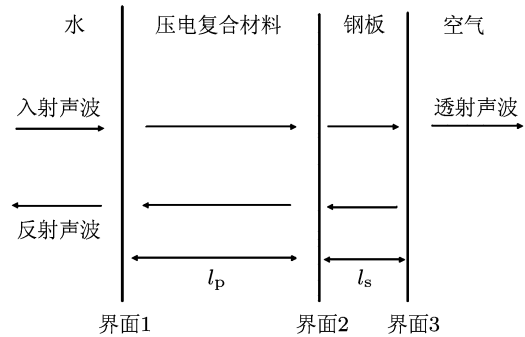


图 2 声波传播的示意图

压电覆盖层是沿厚度方向极化的均匀介质, 其横向的尺寸远远大于厚度以及入射声波的波长. 当压力 F_1 和 F_2 分别作用于压电覆盖层的前后端面 (界面 1 和 2) 时, 在前后端面的电极间产生电压 V , 机电方程可以写为 [18,19]

$$F_1 = Z_1 U_1 + \left(Z_2 - \frac{n^2}{j\omega C_0} \right) (-U_2 + U_1) + nV, \quad (8)$$

$$F_2 = -Z_1 U_2 + \left(Z_2 - \frac{n^2}{j\omega C_0} \right) (-U_2 + U_1) + nV, \quad (9)$$

U_1 和 U_2 分别为压电覆盖层前后端面上的质点振速, $Z_1 = jZ_{ch}A \tan(\frac{1}{2}k_p l_p)$ 和 $Z_2 = \frac{Z_{ch}A}{j \sin(k_p l_p)}$ 为机械阻抗. $C_0 = \frac{\varepsilon_{r3}\varepsilon_0 A}{l_p}$ 为固有电容, $n = \frac{\varepsilon_{r3}\varepsilon_0 h_{33}A}{l_p}$ 为机电转换系数. $k_p = \omega/c_p$ 为波数.

由 (8) 和 (9) 式可以得到压电覆盖层的机电等效图 (图 3).

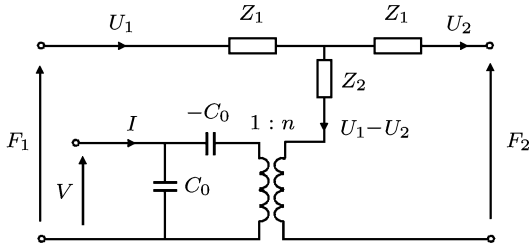


图 3 压电覆盖层厚度模式的机电等效图

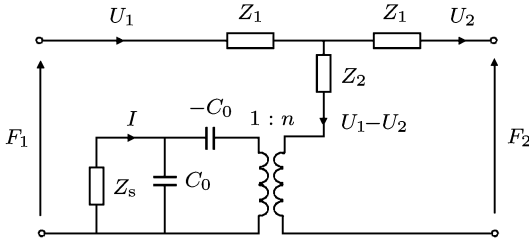


图 4 分流的压电覆盖层的机电等效图

当压电覆盖层和一个阻抗为 Z_s 的分流电路相接, 其机电等效图如图 4 所示, 机电方程可以写为

$$F_1 = \left(Z_1 + Z_2 + n^2 \left(\frac{Z_s}{1 + j\omega C_0 Z_s} - \frac{1}{j\omega C_0} \right) \right) U_1 - \left(Z_2 + n^2 \left(\frac{Z_s}{1 + j\omega C_0 Z_s} - \frac{1}{j\omega C_0} \right) \right) U_2, \quad (10)$$

$$F_2 = \left(Z_2 + n^2 \left(\frac{Z_s}{1 + j\omega C_0 Z_s} - \frac{1}{j\omega C_0} \right) \right) U_1 - \left(Z_1 + Z_2 + n^2 \left(\frac{Z_s}{1 + j\omega C_0 Z_s} - \frac{1}{j\omega C_0} \right) \right) U_2. \quad (11)$$

(10) 和 (11) 式的两边同除以压电覆盖层的面积 A , 整理可得压电覆盖层前后端面的压力和质点振速的传递矩阵

$$\begin{bmatrix} P_1 \\ U_1 \end{bmatrix} = B_1 \begin{bmatrix} P_2 \\ U_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{x_1}{x_2} & \frac{x_1^2 - x_2^2}{x_2} \\ \frac{1}{x_2} & \frac{x_1}{x_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_2 \\ U_2 \end{bmatrix}, \quad (12)$$

$$x_1 = (Z_1 + Z_2 + Z_e)/A, \quad (13)$$

$$x_2 = (Z_2 + Z_e)/A, \quad (14)$$

$$Z_e = n^2 \left(\frac{Z_s}{1 + j\omega C_0 Z_s} - \frac{1}{j\omega C_0} \right). \quad (15)$$

令 $n = 0$, (12) 式可以退化为普通介质的传递矩阵.

钢板的前后端面的声压和质点振速的传递矩阵可以写为 [20]

$$\begin{bmatrix} P_2 \\ U_2 \end{bmatrix} = B_2 \begin{bmatrix} P_3 \\ U_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(k_s l_s) & j\rho_s c_s \sin(k_s l_s) \\ \frac{j \sin(k_s l_s)}{\rho_s c_s} & \cos(k_s l_s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_3 \\ U_3 \end{bmatrix}, \quad (16)$$

ρ_s , c_s 和 l_s 分别为钢板的密度、声速和厚度. $k_s = \omega/c_s$ 为波数. 界面 1 与界面 3 的声压和质点振速的关系为

$$\begin{bmatrix} P_1 \\ U_1 \end{bmatrix} = B_1 B_2 \begin{bmatrix} P_3 \\ U_3 \end{bmatrix}. \quad (17)$$

若 $B = B_1 B_2 = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix}$, 由 (17) 式可以得到图 2 中界面 1 处的表面声阻抗为

$$Z_{1i} = \frac{P_1}{U_1} = \frac{b_{11} P_3 + b_{12} U_3}{b_{21} P_3 + b_{22} U_3} = \frac{\frac{P_3}{U_3} b_{11} + b_{12}}{\frac{P_3}{U_3} b_{21} + b_{22}} = \frac{\rho_a c_a b_{11} + b_{12}}{\rho_a c_a b_{21} + b_{22}}, \quad (18)$$

$\rho_a c_a$ 为空气的特性声阻抗, 界面 3 的声压和质点振速比值等于空气的特性声阻抗 ($\frac{P_3}{U_3} = \rho_a c_a$). 界面 1 处的反射系数和吸声系数分别为

$$R = \left| \frac{P_{1i}}{P_{1r}} \right|^2 = \left| \frac{Z_{1i} - \rho_w c_w}{Z_{1i} + \rho_w c_w} \right|^2, \quad (19)$$

$$A = 1 - R, \quad (20)$$

P_{1i} , P_{1r} 为界面 1 的入射声压和反射声压. $\rho_w c_w$ 为水的特性声阻抗, 声波在水中的损耗很小, 其特性声阻抗近似为实数.

以上的计算方法可以扩展应用于任意的层数的压电和非压电覆盖层. 假设层数为 N , 相应的传递矩阵为

$$\begin{bmatrix} P_1 \\ U_1 \end{bmatrix} = B_1 B_2 \cdots B_i \cdots B_N \begin{bmatrix} P_{N+1} \\ U_{N+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{N+1} \\ U_{N+1} \end{bmatrix}, \quad (21)$$

矩阵 $B_i (i = 1, 2, \dots, N)$ 是各覆盖层的传递矩阵. 对于分流的压电层, B_i 的表达式为 (12) 式; 对于非压电层, B_i 的表达式为 (16) 式. 覆盖层的表面声阻抗为

$$Z_{1i} = \frac{b_{11}P_3 + b_{12}U_3}{b_{21}P_3 + b_{22}U_3} = \frac{\frac{P_{N+1}}{U_{N+1}}b_{11} + b_{12}}{\frac{P_{N+1}}{U_{N+1}}b_{21} + b_{22}}, \quad (22)$$

若第 N 层介质与半无限大的介质空间相连, 则 $\frac{P_{N+1}}{U_{N+1}} = \rho_{N+1}c_{N+1}$, $\rho_{N+1}c_{N+1}$ 为半无限大介质的特性声阻抗; 若第 N 层介质的背面是固定的, 则 $\frac{P_{N+1}}{U_{N+1}} = \infty$; 若第 N 层介质的背面是自由的, 则 $\frac{P_{N+1}}{U_{N+1}} = 0$.

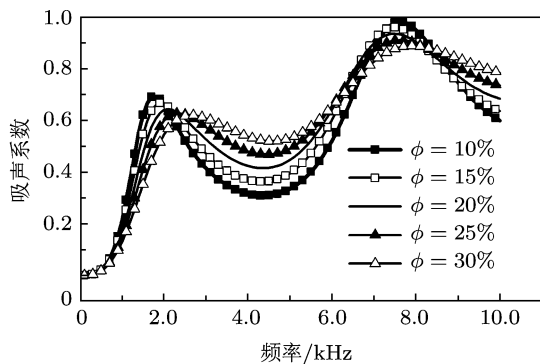


图5 0-3型压电复合材料覆盖层在开路状态下的吸声系数

4 0-3型压电复合材料覆盖层的吸声性能

首先, 采用所建立的一维电声模型计算了图2中的0-3型压电复合材料覆盖层在开路状态下的吸声系数. 压电覆盖层中压电陶瓷的体积含量分别为10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 压电覆盖层的面积为 $30\text{ cm} \times 30\text{ cm}$, 厚度为 3 cm . 水、钢板和空气的参数如表2所示. 开路状态下, 声波通过压电效应转换的电能不能被损耗, 压电覆盖层仅通过机械阻尼获得吸声性能. 如图5所示, 压电覆盖层的吸声系数在较低的频率和较高的频率各有一峰值. 随着压电覆盖层中压电陶瓷的体积含量的增加, 较低频率的峰值会移向较高频率, 曲线变得平坦. 虽然压电陶瓷的体积含量可以影响其吸声性能, 但是调整

压电陶瓷的体积含量不能显著提高覆盖层的吸声性能.

本文也计算了不同厚度的压电覆盖层的吸声系数. 压电覆盖层中的压电陶瓷的体积含量为20%, 仍处于开路状态. 如图6所示, 随着厚度从 1 cm 增加到 5 cm , 压电覆盖层的吸声性能会有明显的提高. 但是由于覆盖层的厚度和重量在实际应用中是有限制的, 因此依靠增加压电覆盖层的厚度, 提高吸声性能是不现实的.

表2 水和钢板的参数

	水	钢板	空气
密度/(kg/m^3)	1000	7910	1.4
声速/(m/s)	1480	5775	340
厚度/ cm	半无限大	1	半无限大

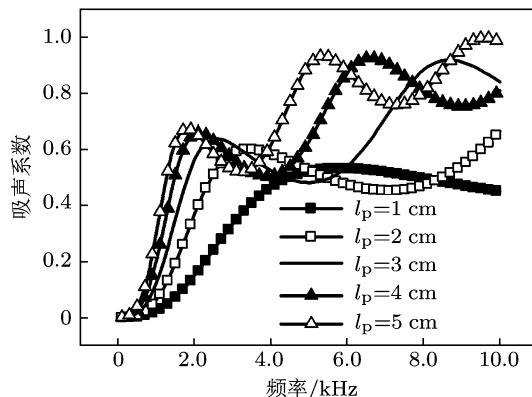


图6 不同厚度的压电覆盖层在开路状态下的吸声系数

本文尝试通过压电分流阻尼提高压电复合材料覆盖层的吸声性能. 将压电覆盖层和分流电路相接, 声波转化的电能可以通过分流电路损耗掉. 为了获得宽带高效的吸声效果, 并降低理论计算的复杂性, 本文采用负电容和电阻串联的分流电路提升压电覆盖层吸声性能. 分流电路的阻抗表达式为

$$Z_s = -C_0 + R_s, \quad (23)$$

$-C_0$ 为和覆盖层的固有电容大小相同的负电容, R_s 为分流电阻. 分流的压电覆盖层的等效电路如图7所示.

负电容可以由运算放大器实现, 图8所示的运算放大器的输入阻抗可以表示为

$$Z_{\text{in}} = -C \frac{R_1}{R_2}. \quad (24)$$

采取合适的电容 C 及电阻 R_1 和 R_2 , 可以获得和压电覆盖层的固有电容大小相同的负电容, 即 $Z_{in} = -C_0^{[9]}$.

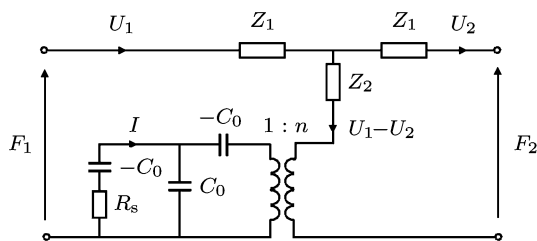


图7 负电容电路分流的压电覆盖层的等效电路

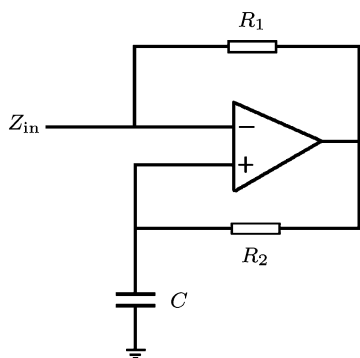


图8 负电容的电路图

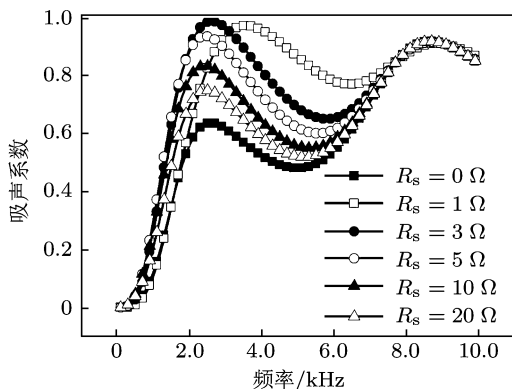


图9 负电容电路分流的 0-3 型压电复合材料覆盖层的吸声系数

本文计算了负电容电路分流的 0-3 型压电复合材料覆盖层的吸声系数. 压电覆盖层中的压电陶瓷的体积含量为 20%, 厚度为 3 cm. 如图 9 所示, 当 $R_s = 0$, 吸声系数曲线和图 5 中相应的曲线相比, 没有明显改变. 当 $R_s = 1 \Omega$, 吸声系数在较宽的频率范围 (1—7 kHz) 的得到很大提高. 当分流电

阻 $R_s = 3 \Omega$, 吸声系数进一步升高. 当 R_s 从 3Ω 升高到 5Ω , 10Ω 和 20Ω , 吸声系数随分流电阻的升高反而降低了. 因此, 采用合适的分流电阻, 负电容分流电路可以在较宽的频率范围显著提高压电覆盖层的吸声性能.

5 负电容电路提升压电覆盖层吸声性能的机理

对于负电容电路提升压电器件吸声性能的机理 Kim 等人已有研究. 认为压电器件的固有电容 c_0 对吸声有一定的阻碍作用. 一方面, 一部分声波通过压电效应转化的电能会被储存在压电器件的固有电容中而不能被损耗掉; 另一方面固有电容的电抗 $1/j\omega c_0$ 是随频率变化的, 会影响吸声系数峰值的带宽. 负电容电路可以抵消压电器件的固有电容, 使电能能够通过分流电阻损耗掉, 而分流电阻的阻抗与频率无关, 因此可以获得宽带的吸声效果 [9].

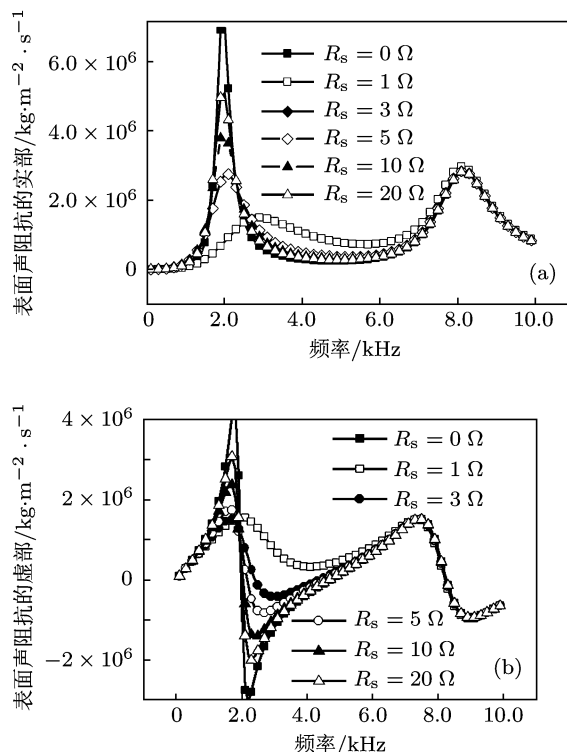


图10 负电容电路分流的 0-3 型压电复合材料覆盖层的表面声阻抗 (a) 实部; (b) 虚部

本文从声阻抗匹配的角度分析了负电容电路提升吸声性能的机理. (17) 和 (18) 式表明: 要提

高压电覆盖层的吸声系数, 必须使其表面声阻抗尽可能和水的特性声阻抗相匹配^[18]. 而从压电覆盖层的等效电路图 4 和图 7 可以看出: 分流电路可以通过压电效应调整压电覆盖层的表面声阻抗. 图 10(a), (b) 分别为压电覆盖层表面声阻抗的实部和虚部. 从图中可以看出, 负电容电路可以有效地在较宽的频率范围 1—7 kHz 内调整压电覆盖层的表面声阻抗. 本文中水的特性声阻抗的实部为 $1.5 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 虚部为零. 比较图 10 和图 9 可以发现, 吸声系数是和表面声阻抗与水的特性声阻抗的匹配相关联的. 压电覆盖层的表面声阻抗与水的特性声阻抗的匹配越好, 吸声系数就越大. 例如, 和其他的分流电阻相比, $R = 1 \Omega$ 和 3Ω 时, 表面声阻抗和水的特性声阻抗匹配更好, 从而可以获得更好的吸声效果. 另外, 负电容分流电路在频率范围 7—10 kHz 内对表面声阻抗的调整并不显

著, 因此图 9 中不同分流电阻的吸声系数曲线在该频率范围内是重合的. 总之, 负电容分流电路可以调整压电覆盖层的表面声阻抗, 从而提升其吸声性能.

6 结论

0-3 型压电复合材料覆盖层可以通过机械阻尼和压电分流阻尼获得混合吸声效果. 负电容分流电路可以调节覆盖层的界面声阻抗, 使之与水的特性声阻抗相匹配. 这样, 压电覆盖层的吸声性能就会得到很大的提升. 因此, 采用 0-3 型压电复合材料和压电分流阻尼技术发展新型的水下吸声覆盖层是很有希望的.

感谢北京大学王仁乾教授、栾桂冬教授和张金铎教授对本文工作的支持和指导.

-
- [1] Moheimani S O R, Fleming A J, Behrens S 2003 *Smart Mater. Struct.* **12** 49
 - [2] Hagood H W, Flotow A van 1994 *Journal of Sound and Vibration* **146** 243
 - [3] Wu S Y 1996 *Proc. SPIE* **2720** 259
 - [4] Niederberger D, Fleming A J, Moheimani S O R, Morari M 2004 *Smart Mater. Struct.* **13** 1025
 - [5] Moheimani S O R 2004 *IEEE Transactions on Control Systems Technology* **12** 484
 - [6] Guyomar D, Richard T, Richard C 2008 *Journal of Intelligent Material Systems and Structure* **19** 791
 - [7] Ciminello M, Calabro A, Ameduri S, Concilio A 2008 *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* **19** 1089
 - [8] Neubauer M, Wallaschek J 2008 *Smart Mater. Struct.* **17** 035003
 - [9] Kim J, Jung Y C 2006 *Journal of Acoustical Society of America* **120** 2017
 - [10] Marneffe B de, Preumont A 2008 *Smart Mater. Struct.* **17** 035015
 - [11] Neubauer M, Wallaschek J 2009 *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics* 1100
 - [12] Xu X R, Chen W, Zhou J 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 4292 (in Chinese) [徐任信, 陈文, 周静 2006 物理学报 **55** 4292]
 - [13] Zhang J M, Chang W, Varadan V K, Varadan V V 2001 *Smart Mater. Struct.* **10** 414
 - [14] Kim J, Lee J 2002 *J. Acoust. Soc. Am.* **112** 990
 - [15] Kim J, Choi J Y 2005 *Smart Mater. Struct.* **14** 587
 - [16] Chang D Q, Liu B L, Li X D 2010 *J. Acoust. Soc. Am.* **128** 639
 - [17] Furukawa T, Ishida K, Fukada E 1979 *J. Appl. Phys.* **50** 4904
 - [18] Mason W P 1964 *Physical acoustics principles and methods, vol. 1, Part A*, Academic Press New York and London 238–239
 - [19] Luan G D, Zhang J D, Wang R Q 2005 *Piezoelectric transducers and arrays* (revised edition) (Peking University Press) 114–118 (in Chinese) [栾桂冬, 张金铎, 王仁乾 2005 压电换能器和换能器阵 (修订版) (北京大学出版社) 第 114–118 页]
 - [20] He Z Y, Wang M 1996 *Applied Acoustics* **9** 12 (in Chinese) [何祚镛, 王曼 1996 应用声学 **9** 12]
 - [21] Ma L L, Wang R Q 2006 *Technical Acoustics* **25**(3) 175 (in Chinese) [马黎黎, 王仁乾 2006 声学技术 **25**(3) 175]

Theoretical analysis of underwater sound absorption of 0-3 type piezoelectric composite coatings

Yu Li-Gang Li Zhao-Hui[†] Ma Li-Li

(School of Electronic Engineering and Computer Science, Peking University, Beijing 100871, China)

(Received 9 December 2010; revised manuscript received 9 May 2011)

Abstract

Recently piezoelectric shunt damping has attracted a lot of attention in vibration and noise control. In this article, piezoelectric shunt damping is used in underwater sound absorption in order to enhance the sound absorption of the coating. A one-dimensional electro-acoustic model is established for the calculation by combining the equivalent circuit of thickness mode of a piezoelectric composite coating with the transfer matrix of plane wave propagation. This model can be used to calculate the sound absorption of multiple layers of piezoelectric and non-piezoelectric mediums. Underwater sound absorption of the 0-3 type piezoelectric composite coatings is theoretically analyzed. Elastic, piezoelectric and dielectric constants of the 0-3 type piezoelectric composites are calculated by Furukawa's model. Results show that the negative capacitance circuit can adjust the surface acoustic impedance of the piezoelectric composite coating at broadband frequencies. Suitable shunt resistances can make it match the characteristic acoustic impedance of water better. Therefore, the sound absorption can be greatly promoted.

Keywords: piezoelectric composite, piezoelectric shunt damping, sound absorption, negative capacitance

PACS: 43.20.+g, 43.30.+m

[†] E-mail: lizhcat@pku.edu.cn