

吸声材料对水下小平台上矢量传感器声学特性的影响研究*

梁国龙 庞福滨 张光普†

(哈尔滨工程大学水声技术重点实验室, 哈尔滨 150001)

(2013年7月10日收到; 2013年8月24日收到修改稿)

本文围绕粘贴黏弹性吸声材料方法对水下小平台上安装矢量传感器的指向性和测向的影响展开理论分析和实验研究. 首先建立了吸声材料和平台结构组成的复合层结构的数学模型, 对声波经过复合层结构的声学特性进行了分析, 在此基础上利用有限元耦合边界元法对粘贴吸声材料前后的水下小平台上的矢量传感器的声学特性进行研究. 通过理论计算和数值分析研究了吸声材料对矢量传感器的各通道的指向性的影响, 并计算了覆盖吸声材料前后矢量传感器的测向精度. 水池实验验证了分析结果的正确性.

关键词: 吸声材料, 小平台, 矢量传感器, 声学特性

PACS: 43.30.+m, 43.20.Fn, 43.35.Mr, 43.58.-e

DOI: 10.7498/aps.63.034303

1 引言

随着海洋资源开发及军事应用的迫切需求, 装载矢量传感器的水下小平台以其可机动、灵活地获取更多的声场信息^[1], 将成为水下探测的主要工具. 然而, 平台的声散射会导致矢量传感器的声学特性发生改变, 从而制约其在工程上的实现与应用.

水下平台的声散射一直是水声学研究的热点问题. 对于给定平台条件和声源特性来求解散射场的正问题, 其研究方法和理论均已相当成熟^[2-8]. 但对于如何从声场中将入射场与散射场分离, 以及采取有效措施以减小平台声散射的影响, 现有的研究仍有不足. 近场声全息技术 (NAH) 虽然可以实现空间声场的全息重建^[9-11], 但受测量孔径尺寸的限制, 该技术存在固有的窗效应和卷绕误差, 在被测源面尺寸较大时会带来严重的重建误差; 另外, NAH要求全息接收面与物体的距离远低于声

波波长以尽量保留全息数据, 这必然导致对高频声波的重建精度受到影响. 因此, 近场声全息技术更多地停留在实验研究阶段, 在实际工程中应用的很少^[12].

近年来, 吸声材料的研究和使用受到越来越多的关注^[13-16]. Jiang等^[17]基于局域共振吸声基元网络化的宽频水下吸声材料构想, 利用多孔材料骨架并结合共振吸声原理, 构筑了具有宽频多模态振动模式的吸声材料, 实现了宽频强吸声特性. 于利刚等^[18,19]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研究, 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. 在水下目标表面覆盖吸声材料, 可以有效地减小声波的反射, 实现水下目标的声隐身^[20]. 借鉴这种思想, 本文将吸声材料应用到装载矢量传感器的水下小平台, 以期借助吸声材料和水下小平台的复合层结构的声吸收作用来降低声波的散射, 使安装在平台上的矢量传感器具有良好的声学特性.

* 国家自然科学基金 (批准号: 51279043, 61201411, 51009042)、水声技术重点实验室基金 (批准号: 9140C200203110C2003) 和国家高技术研究发展计划 (863 计划) (批准号: 2013AA09A503) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: guangpu_zhang@163.com

2 复合层结构的声学特性

水下小平台多为内充空气腔的弹性柱体结构. 将吸声材料覆盖在平台的端面, 组成包括吸声材料、平台壳体、空气腔、平台壳体的四层复合层结构. 设声波以 θ_0 入射至复合层结构, 经过各层介质的透射, 最终穿出复合层结构, 如图 1 所示.

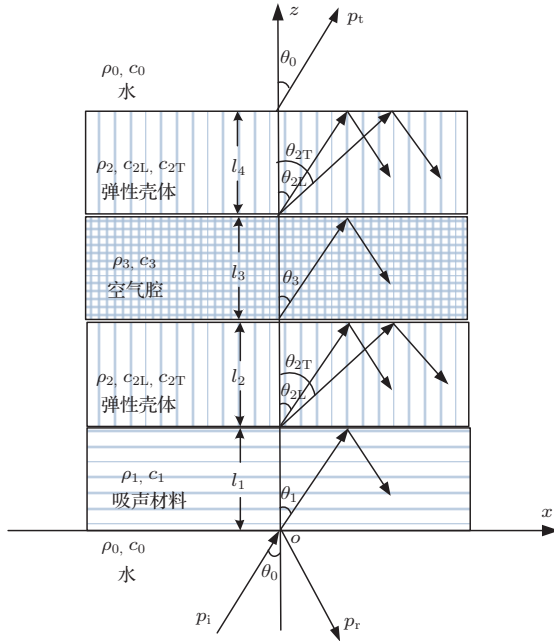


图 1 复合层介质模型

不失一般性, 考虑声波在 xoz 平面内传播的情况. 当声波斜入射时, 在固体介质中会激发纵波和横波 [21]. 由于黏弹性吸声材料的剪切模量远小于体积压缩模量, 可以看作高粘性的液体, 因此声波在通过该类材料时只产生纵波. 各层介质中的声波传播方向由 Snell 定律给出.

由于固体中存在切应力, 因此对每一层介质, 可以列出介质的分界面上 x 方向振速 u_x , z 方向振速 u_z , 应力张量的法向分量 σ_{zz} 和切向分量 σ_{zx} 在内的四个参数的连续方程. 这样, 每增加一层介质, 就需要增加 4 个方程, 求解非常繁琐. 为此, 在各层中引入振速的标量势函数 Γ 和向量势函数 Λ . 由于在两度空间中 $\Lambda_x = \Lambda_z = 0$, 因此 $\Lambda = \Lambda_y$. 考察第 i 层介质的后界面与其前界面上振速与应力分量的关系. 设其前后界面对应的振速、应力张量分量分别为 $u_x^{(i-)}, u_z^{(i-)}, \sigma_{zz}^{(i-)}, \sigma_{zx}^{(i-)}$ 和 $u_x^{(i+)}, u_z^{(i+)}, \sigma_{zz}^{(i+)}, \sigma_{zx}^{(i+)}$, 在介质的前界面 (当 $z = \sum_{m=1}^{i-1} l_m$ 时) 有

$$\begin{bmatrix} u_x^{(i-)} \\ u_z^{(i-)} \\ \sigma_{zz}^{(i-)} \\ \sigma_{zx}^{(i-)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11}^{(i-)} & a_{12}^{(i-)} & a_{13}^{(i-)} & a_{14}^{(i-)} \\ a_{21}^{(i-)} & a_{22}^{(i-)} & a_{23}^{(i-)} & a_{24}^{(i-)} \\ a_{31}^{(i-)} & a_{32}^{(i-)} & a_{33}^{(i-)} & a_{34}^{(i-)} \\ a_{41}^{(i-)} & a_{42}^{(i-)} & a_{43}^{(i-)} & a_{44}^{(i-)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Gamma' + \Gamma'' \\ \Gamma' - \Gamma'' \\ \Lambda' - \Lambda'' \\ \Lambda' + \Lambda'' \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中 $\mathbf{A}_i^{(-)} = [a_{mn}^{(i-)}]$ ($m, n = 1, 2, 3, 4$) 为与第 i 层介质的厚度、弹性常数及声波频率有关的前界面矩阵, $\Gamma', \Gamma'', \Lambda', \Lambda''$ 分别为介质中横波与纵波振动位移的入射波和反射波幅值, 它们与标量势和向量势函数的关系由下式给出:

$$\begin{aligned} \Gamma &= (\Gamma' e^{-jk_{iL}z \cos \theta_{iL}} + \Gamma'' e^{jk_{iL}z \cos \theta_{iL}}) \\ &\quad \times e^{-jk_{iL}x \sin \theta_{iL}}, \\ \Lambda &= (\Lambda' e^{-jk_{iT}z \cos \theta_{iT}} + \Lambda'' e^{jk_{iT}z \cos \theta_{iT}}) \\ &\quad \times e^{-jk_{iT}x \sin \theta_{iT}}, \end{aligned} \quad (2)$$

式中 $k_{iL}, k_{iT}, \theta_{iL}, \theta_{iT}$ 分别为第 i 层介质中纵波与横波的波数和透射角. 同理, 在介质的后界面 (当 $z = \sum_{m=1}^i l_m$ 时) 有

$$\begin{bmatrix} u_x^{(i+)} \\ u_z^{(i+)} \\ \sigma_{zz}^{(i+)} \\ \sigma_{zx}^{(i+)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11}^{(i+)} & a_{12}^{(i+)} & a_{13}^{(i+)} & a_{14}^{(i+)} \\ a_{21}^{(i+)} & a_{22}^{(i+)} & a_{23}^{(i+)} & a_{24}^{(i+)} \\ a_{31}^{(i+)} & a_{32}^{(i+)} & a_{33}^{(i+)} & a_{34}^{(i+)} \\ a_{41}^{(i+)} & a_{42}^{(i+)} & a_{43}^{(i+)} & a_{44}^{(i+)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Gamma' + \Gamma'' \\ \Gamma' - \Gamma'' \\ \Lambda' - \Lambda'' \\ \Lambda' + \Lambda'' \end{bmatrix}. \quad (3)$$

令 $\mathbf{A}_i^{(+)} = [a_{mn}^{(i+)}]$ ($m, n = 1, 2, 3, 4$) 为第 i 层介质后界面矩阵. 根据 (1), (3) 式可得介质后界面与前界面上振速和应力张量的关系为

$$\begin{bmatrix} u_x^{(i+)} \\ u_z^{(i+)} \\ \sigma_{zz}^{(i+)} \\ \sigma_{zx}^{(i+)} \end{bmatrix} = \mathbf{A}_i^{(+)} \left(\mathbf{A}_i^{(-)} \right)^{-1} \begin{bmatrix} u_x^{(i-)} \\ u_z^{(i-)} \\ \sigma_{zz}^{(i-)} \\ \sigma_{zx}^{(i-)} \end{bmatrix} = \mathbf{A}_i \begin{bmatrix} u_x^{(i-)} \\ u_z^{(i-)} \\ \sigma_{zz}^{(i-)} \\ \sigma_{zx}^{(i-)} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

其中 $\left(\mathbf{A}_i^{(-)} \right)^{-1}$ 为介质前界面矩阵的逆, $\mathbf{A}_i = \mathbf{A}_i^{(+)} \left(\mathbf{A}_i^{(-)} \right)^{-1}$ 为描述第 i 层介质后界面与前界面上振速与应力张量关系的传递矩阵. 考虑到固液相间的介质分界面上应力张量的切向分量为 0, 需

要将传递矩阵由3阶扩展为4阶, 此时有

$$\mathbf{A}_i = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & 0 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

将复合层结构看作一个整体, 其后界面与前界面的振速与应力分量的关系为

$$\begin{bmatrix} u_x^{(4+)} \\ u_z^{(4+)} \\ \sigma_{zz}^{(4+)} \\ \sigma_{zx}^{(4+)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & b_{24} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & b_{34} \\ b_{41} & b_{42} & b_{43} & b_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_x^{(1-)} \\ u_z^{(1-)} \\ \sigma_{zz}^{(1-)} \\ \sigma_{zx}^{(1-)} \end{bmatrix} \\ = \mathbf{B} \begin{bmatrix} u_x^{(1-)} \\ u_z^{(1-)} \\ \sigma_{zz}^{(1-)} \\ \sigma_{zx}^{(1-)} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

其中 $\mathbf{B} = \mathbf{A}_4 \mathbf{A}_3 \mathbf{A}_2 \mathbf{A}_1$ 为所有介质层传递矩阵的乘积, 其连乘次序不可交换, 可以看出复合层结构的声学特性与其排列次序有关, 文献 [22] 给出了传递矩阵中元素具体形式的推导过程.

当声波斜入射至复合层结构时, 复合层结构的入射波、反射波、透射波可表示为

$$\begin{aligned} p_i &= e^{j(\omega t - k_0 x \sin \theta_0 - k_0 z \cos \theta_0)}, \\ p_r &= R e^{j(\omega t - k_0 x \sin \theta_0 + k_0 z \cos \theta_0)}, \\ p_t &= D e^{j(\omega t - k_0 x \sin \theta_0 - k_0 z \cos \theta_0)}, \end{aligned} \quad (7)$$

R, D 为复合层结构的反射、透射系数. 由于复合层结构处于无限流体介质中, 其边界处的切应力为0. 在复合层的前界面, 即 $z = 0$ 时, 边界条件为

$$\begin{aligned} u_x^{(1-)} &= -\frac{1}{\rho_0} \int \frac{\partial (p_i + p_r)}{\partial x} dt, \\ -\sigma_{zz}^{(1-)} &= (p_i + p_r), \\ u_z^{(1-)} &= -\frac{1}{\rho_0} \int \frac{\partial (p_i + p_r)}{\partial z} dt, \\ \sigma_{zx}^{(1-)} &= 0. \end{aligned} \quad (8)$$

在复合层的后界面, 即 $z = \sum_{i=1}^4 l_i$ 时, 边界条件为

$$\begin{aligned} u_x^{(4+)} &= -\frac{1}{\rho_0} \int \frac{\partial p_t}{\partial x} dt, \quad -\sigma_{zz}^{(4+)} = p_t, \\ u_z^{(4+)} &= -\frac{1}{\rho_0} \int \frac{\partial p_t}{\partial z} dt, \quad \sigma_{zx}^{(4+)} = 0. \end{aligned} \quad (9)$$

将 (8), (9) 式代入 (7) 式中, 并引入以下参数:

$$Q_{22} = b_{22} - \frac{b_{21} b_{42}}{b_{41}}, \quad Q_{23} = b_{23} - \frac{b_{21} b_{43}}{b_{41}},$$

$$Q_{32} = b_{32} - \frac{b_{31} b_{42}}{b_{41}}, \quad Q_{33} = b_{33} - \frac{b_{31} b_{43}}{b_{41}}, \quad (10)$$

可以求得复合层结构的反射系数为

$$R = \frac{Q_{32} + Q_{22} Z_0 - Q_{33} Z_0 - Q_{23} Z_0^2}{Q_{32} + Q_{22} Z_0 + Q_{33} Z_0 + Q_{23} Z_0^2}, \quad (11)$$

式中 $Z_0 = \frac{\rho_0 c_0}{\cos \theta_0}$. 需要说明的是, 由于黏弹性材料的弛豫过程导致在其内传播的声速为复数, 因此吸声材料层介质的传递矩阵也为复数矩阵, 它体现了黏弹性介质的损耗特性.

3 有限元耦合边界元法计算声场

矢量传感器安装在水下小平台上, 其接收指向性可归结为平台的声散射问题. 有限元法是一种适用于复杂问题求解的数值分析方法, 通过将连续物体划分为一定大小的单元, 并根据弹性理论中的能量原理建立单元节点力与节点位移之间的关系, 随后将所有单元组合起来求解以得到对应场问题的解答. 边界元法将求解区域划分为单元网格, 通过对未知量的差值离散, 将边界积分方程离散化为线性方程组以求得分析域内的参数. 有限元法适合求解复杂形状物体, 而边界元法适用于求解无限域问题, 将两者结合起来可以求解无限域内复杂物体的声散射问题 [23].

声波作用在平台结构上, 引起结构的振动, 其有限元结构方程为

$$[\mathbf{K} + j\omega \mathbf{C} - \omega^2 \mathbf{M}] \mathbf{a} + \mathbf{L}_c = \mathbf{Q}, \quad (12)$$

其中 $\mathbf{K}, \mathbf{C}, \mathbf{M}$ 分别为结构的总刚度矩阵、总阻尼矩阵和整体质量矩阵, \mathbf{a}, \mathbf{Q} 分别为结构所有节点的位移向量、载荷向量, \mathbf{L}_c 为耦合矩阵, 其表达式为

$$\mathbf{L}_c = \sum_{i=1}^e \int_{\Gamma_e} \mathbf{N}_S^T \mathbf{N}_B \bar{\mathbf{n}} d\Gamma, \quad (13)$$

其中 \mathbf{N}_S 为平台的单元型函数矩阵, \mathbf{N}_B 为边界元型函数矩阵, $\bar{\mathbf{n}}$ 为单元的法线方向. 对 Kirchhoff-Helmholtz 积分方程进行离散化, 可以得到边界元求解方程

$$j\omega \mathbf{B} \mathbf{a} + \mathbf{C} \mathbf{P} = \mathbf{F}, \quad (14)$$

其中 \mathbf{B}, \mathbf{C} 为影响矩阵, \mathbf{P} 为节点声压向量, \mathbf{F} 为流体模型载荷向量. 将 (12) 和 (14) 式联立, 可得有限元耦合边界元方程

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K} + j\omega \mathbf{C} - \omega^2 \mathbf{M} & \mathbf{L}_c \\ j\omega \mathbf{B} & \mathbf{C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{a} \\ \mathbf{P} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Q} \\ \mathbf{F} \end{bmatrix}. \quad (15)$$

4 数值计算

4.1 理论模型计算模型

图2给出了计算模型的侧向和俯向示意图. 水下小平台为有限长圆柱体, 柱高 $h = 0.5 \text{ m}$, 半径 $r = 0.26 \text{ m}$. 吸声材料与平台端面面积相同, 黏覆在平台端面上. 矢量传感器安装在平台的端面处, 其声中心距柱心的距离为 s , x, y 方向振速通道分别与 xoy 平面内的 x 轴、 y 轴正方向一致. 入射平面波在 xoy 平面内绕平台旋转 360° , 当目标声源由 x 轴正方向入射时, 入射角定义为 0° ; 入射方向逆时针旋转与 x 轴正向所形成的夹角 φ 为指向性角.

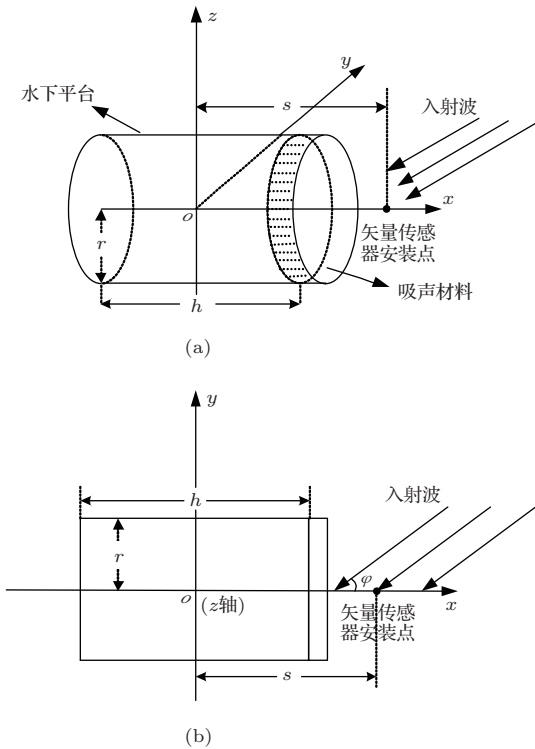


图2 计算模型意图 (a) 侧向示意图; (b) 俯向示意图

表1 复合层结构中各层介质中参数

层序	介质	密度/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	声速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	厚度/mm
1	吸声材料	1180	$932+244j$	25
2	钢	7850	5848(横波) 3232(纵波)	5
3	空气	1.29	340	490
4	钢	7850	5848(横波) 3232(纵波)	5

水下小平台置于无限、均匀的水介质中, 由吸声材料和平台结构组成了图1中的复合层结构, 其

中各层介质的排列顺序及其属性如表1所示. 由于黏弹性吸声材料的弛豫过程, 其声速为复数. 钢质壳体材料的密度为 7850 kg/m^3 , 介质中的纵波与横波的波速分别为 5848 m/s , 3232 m/s . 壳体内部为空气腔, 腔体厚度为 490 mm .

4.2 复合层结构的反射系数

利用传递矩阵法计算了表1中复合层结构的反射系数. 声波的入射频段为 $50\text{--}10000 \text{ Hz}$, 入射角度为 $0^\circ\text{--}90^\circ$, 计算结果如图3所示.

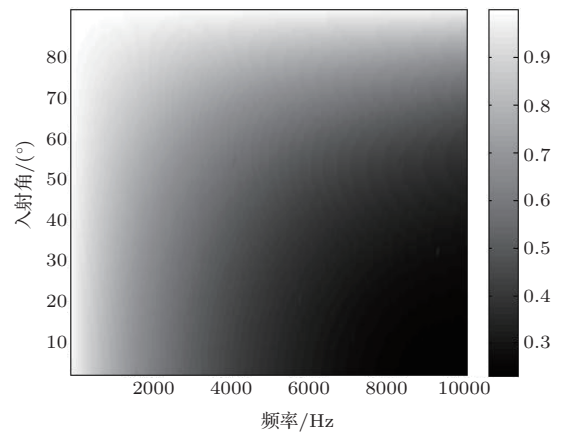


图3 复合层结构的反射系数

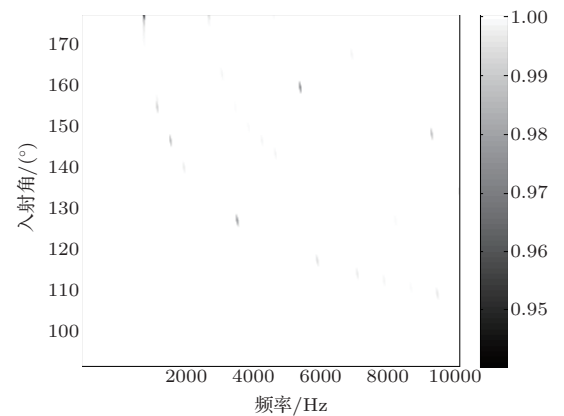


图4 材料位于平台背部时的反射系数

从图3可以看出, 在入射角不变的情况下, 复合层结构对低频声波的反射较强, 对高频声波的反射较弱, 这表明复合层结构对声波的吸收性能与其频率有关, 对高频声波的吸收性能强. 当入射波频率一定时, 垂直入射时复合层结构的反射系数最小, 随着入射角度的增加反射系数逐渐增加. 不难看出, 复合层结构的等反射系数曲线随声波的入射

角度、频率大致呈双曲线变化趋势, 对低频声波的反射强于对高频声波的反射.

当目标声源旋转至 x 轴负半轴区域时, 吸声材料背对声波的入射方向, 相当于沿声波入射方向观察时, 表 1 中复合层的排列顺序反转. 图 4 给出了这种条件下结构的反射系数随入射角和频率变化的关系. 此时由于平台内的钢-空气界面严重阻碍了声波的透射, 结构对高频、低频声波的反射能力都很强, 声波基本被全部反射. 因此, 吸声材料只有在面向声波入射方向时才能有效地减小声波的反射. 这也进一步说明复合层结构的声学特性与其各层介质的排列顺序密切相关.

4.3 矢量传感器的声场特性

安装在水下小平台上的矢量传感器受平台散射影响导致其接收声场发生变化, 在这里通过考察其接收指向性的变化来反映声场受影响的程度. 利用有限元耦合边界元法, 对覆盖吸声材料前后平台的声散射对矢量传感器指向性的影响进行研究. 图 5 给出了矢量传感器的声中心距柱心 0.35 m, 即距平台端面 0.1 m 时, 不同入射波频率下矢量传感器各通道的指向性图. 为了直观地显示覆盖吸声材料对矢量传感器指向性的影响, 在图中同时给出了自由场条件下矢量传感器的指向性图作为对比.

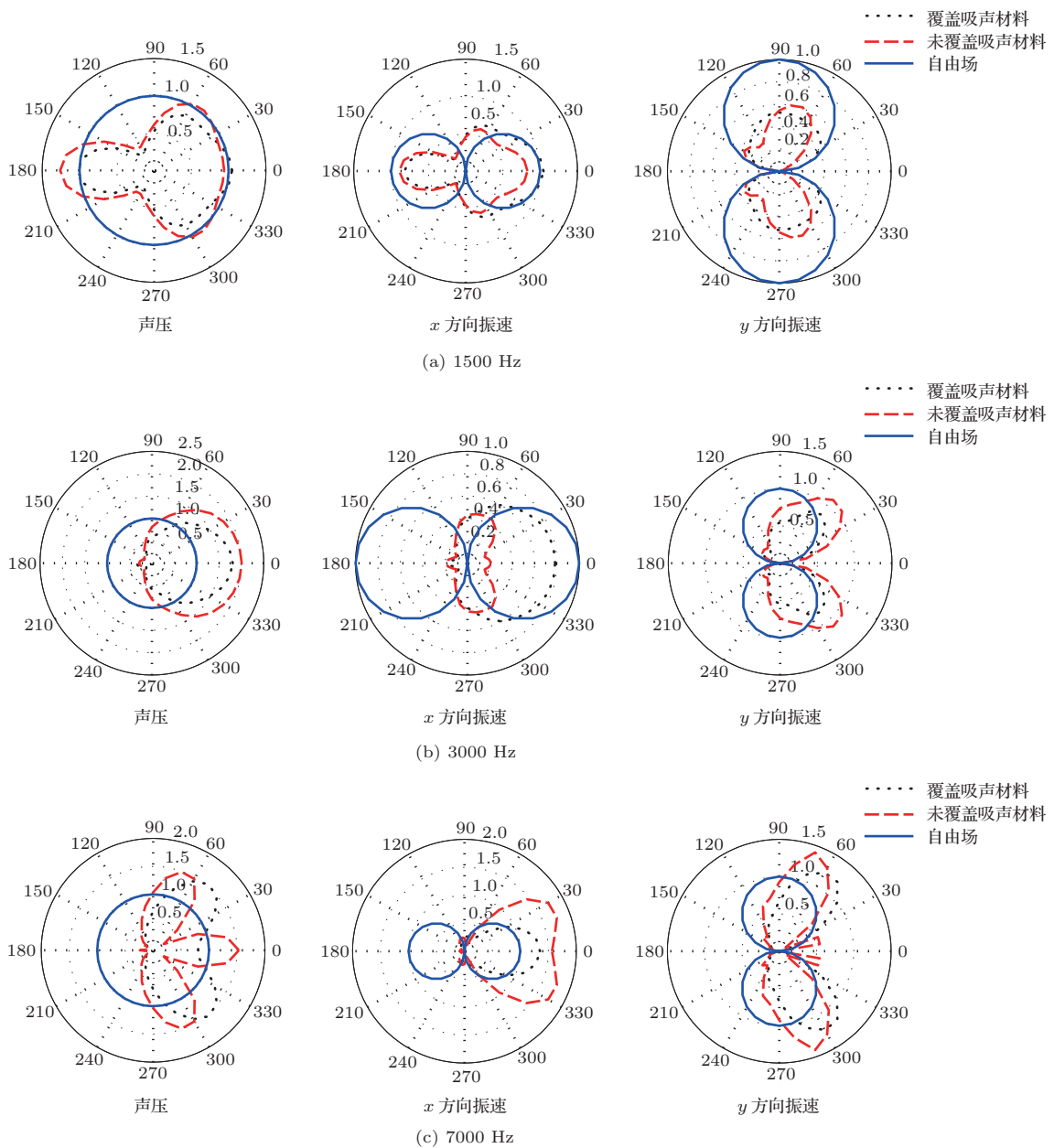


图 5 覆盖材料前后矢量传感器的指向性

从图5可以看出,未敷设吸声材料时,当入射声波频率较低时矢量传感器的指向性相对较好;随着入射声波频率的升高,矢量传感器的声压和振速通道的指向性变差,这与有限长柱壳散射场的变化规律相符.覆盖吸声材料后,矢量传感器各通道指向性图的右半部分(即吸声材料面向声波入射方向时)得到了改善,特别是平台端面附近的扇形区域,各通道的改善作用最明显;随着目标绕平台的转动,声波入射角度发生变化,小平台上未黏贴吸声材料的部分引起的散射波在总声场中的作用逐渐增大,直接表现为斜入射时矢量传感器的指向性变差,且指向性图的左半部分(即吸声材料背对声波入射方向时)基本无改善作用,这与4.2节中的分析结论一致.

从整体上看,由于散射波的声能主要集中在 x 轴方向,因此未敷设吸声材料时 x 方向振速通道受散射波的影响程度较大;将吸声材料敷设在小平台端面后,对 x 方向振速通道的改善作用最为明显.此外,由于在低频(1500 Hz)时吸声材料的吸声效果不明显,而在高频(7000 Hz)时散射波幅值较强,因此在中频(3000 Hz)时覆盖吸声材料对矢量传感器接收指向性的改善效果较显著.

4.4 吸声材料对矢量传感器测向的影响

矢量传感器同时测量声场中的声压与质点振速信息,利用单个矢量传感器就能分辨出目标的方位.从图5中可以看出,矢量传感器安装在未覆盖吸声材料的小平台上时,其振速通道的接收指向性严重畸变,这将导致其测向结果出现较大误差.为了进一步分析吸声材料对小平台上矢量传感器声学特性的影响,忽略背景噪声的影响,计算了覆盖吸声材料前后矢量传感器的测向误差(取绝对值),计算结果如图6所示.由于矢量传感器指向性图的左半部分受散射波影响严重,故只计算了目标真实方位在 0° — 90° 范围内矢量传感器的测向结果.

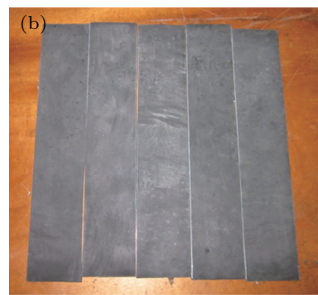


图7 实验模型 (a) 实验小平台; (b) 吸声材料

从图6可以看出,由于散射波的影响,覆盖吸声材料前小平台上的矢量传感器存在较大的测向误差.当入射波频率为1500 Hz时,矢量传感器在目标位于 $[0^\circ, 40^\circ]$ 区间内的最大测向误差由覆盖吸声材料前的 20° ,降至覆盖吸声材料后的 6° .在7000 Hz处,目标在 $[0^\circ, 30^\circ]$ 区间最大测向误差也由覆盖吸声材料前的 27° 降至 7° .当入射波频率为3000 Hz时,吸声材料对矢量传感器测向的改善作用最为明显,在目标真实方位为 20° 时其测向误差由 56° 降至 11° ,且在目标真实方位位于 $[0^\circ, 60^\circ]$ 区间内其测向误差均不高于 11° .

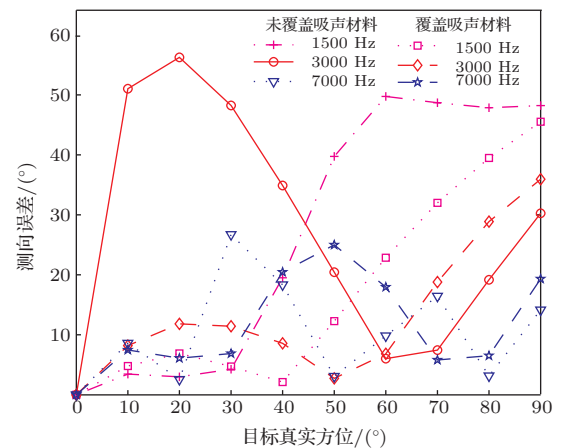


图6 覆盖材料前后矢量传感器的测向误差

由以上分析可知,覆盖吸声材料可以改善安装在小平台上的矢量传感器的测向精度,实现矢量传感器对某一扇形区域内目标的方位测量.测向精度的改善程度与入射波的频率有关,对中频段目标的测向精度改善效果最明显,对低频、高频段目标的测向精度改善效果相对较小.

5 实验和分析

为了对理论分析和数值计算结果的正确性进行验证,在消声水池进行了实验研究.

5.1 实验设计

如图7所示, 实验小平台为内充空气腔的钢质圆柱壳, 利用夹具固定在旋转装置上; 吸声材料为黏弹性橡胶材料, 将其裁剪为与平台端面的面积相同, 黏贴在平台端面上. 平台与吸声材料的尺寸及介质参数均与4.1节中计算模型相同.

实验在哈尔滨工程大学消声水池中进行. 消声水池长25 m, 宽15 m, 四周布满消声尖劈. 发射换能器与矢量传感器、平台的轴线在同一平面内, 距矢量传感器的声中心12 m, 以保证入射波可近似为平面波. 平台的吊放深度为2 m, 由刚性夹具连接在旋转装置上. 实验方案设计如图8所示, 保持发射换能器位置不变, 以5°为间隔旋转水下小平

台, 利用采集器采集并储存矢量传感器各通道的接收信号.

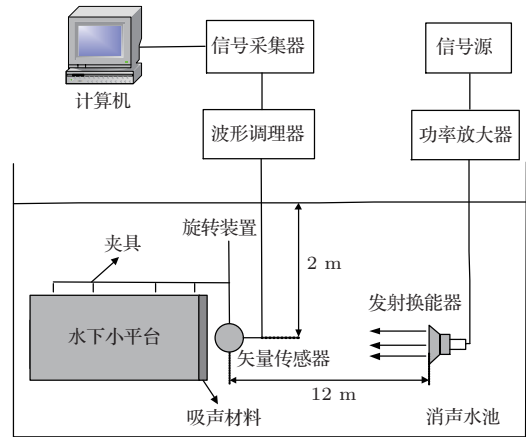


图8 实验方案设计图

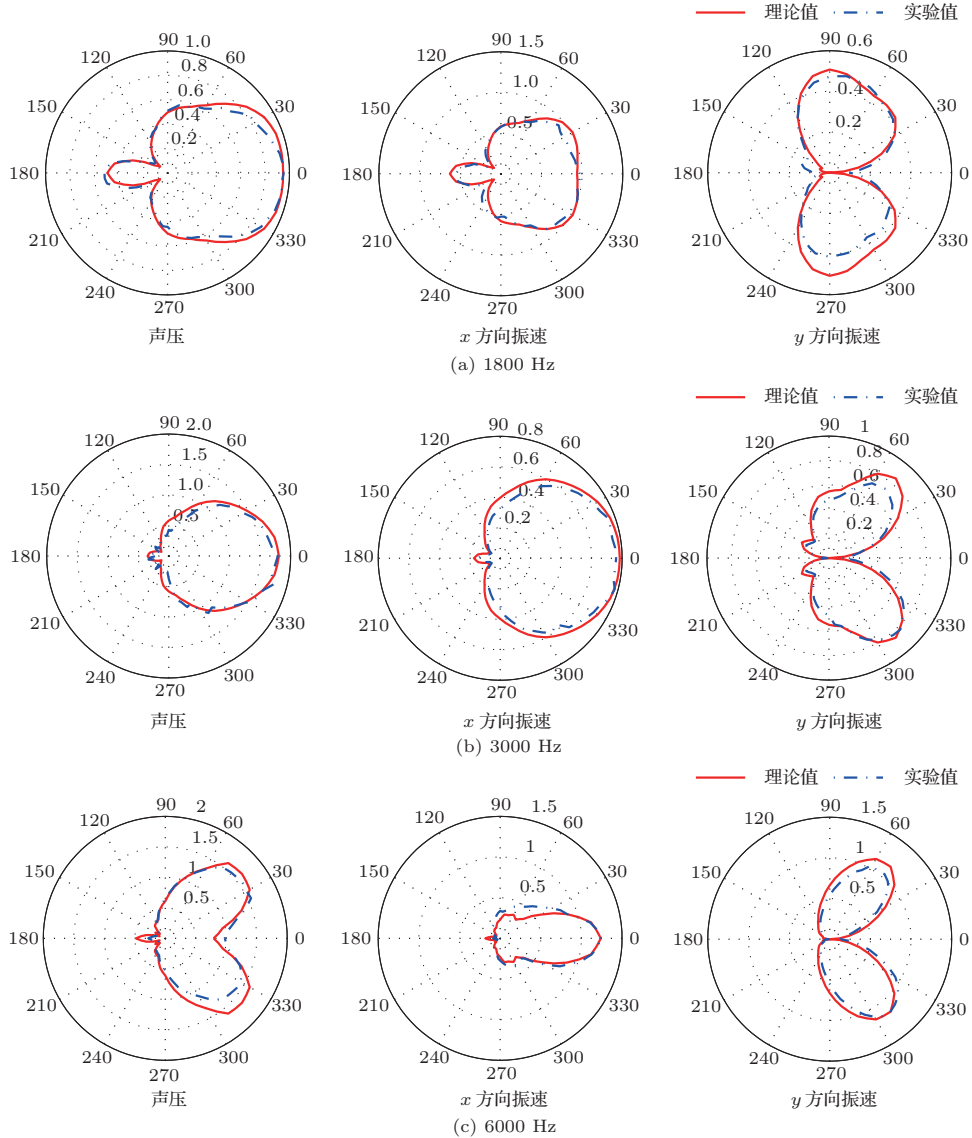


图9 矢量传感器的指向性实验结果

5.2 实验结果

图9为矢量传感器距平台端面为0.1 m时,覆盖吸声材料后矢量传感器指向性的理论值与实验值比较.可以看出,随着入射波频率的升高,矢量传感器各通道的指向性变差.在6000 Hz处,由于散射波幅值增强,固定平台的支架的声散射会干扰矢量传感器的接收声场,导致理论值与实验值的偏差增大.从整体上看,平台端面附近的扇形区域内矢量传感器的指向性得到明显改善,随着入射角度的增大各通道的指向性变差,实验结果与理论值基本一致.

6 结 论

本文针对矢量声场受水下小平台的声散射影响及改善方法进行了研究.对声波斜入射条件下的吸声材料和平台结构组成的复合层结构的声学特性进行了理论分析和数值仿真,在此基础上对黏贴吸声材料的水下小平台上安装的矢量传感器的声场变化进行了理论分析.分析结果表明,在仅对平台端面覆盖吸声材料的条件下,吸声材料对平台上矢量传感器声学特性的改善作用有限,仅在端向附近的一个扇形区域内对其指向性和测向精度有明显的改善效果;随着目标真实方位偏转角的增大,平台上未粘贴吸声材料的部分引起的散射波在总声场中的作用变大,对矢量传感器的指向性及建立在此基础上的测向性能仍有较大影响.消声水池的实验结果证明了理论分析和数值计算的正确性.

参考文献

- [1] Sun G Q, Li Q H 2004 *Acta Acoust.* **29** 481 (in Chinese) [孙贵青, 李启虎 2004 声学学报 **29** 481]
- [2] Kosobrodov R A, Nekrasov V N 2001 *Acoust Phys.* **47** 382
- [3] Robert J B, Kevin B S, Harold T V 2010 *J. Acoust. Soc. Am.* **129** 2772
- [4] Seyyed M H, M R 2007 *J. Sound Vibr.* **302** 208
- [5] Lin F M, Hong P Y, Lee C Y 2010 *Appl. Acust.* **71** 68
- [6] Romanov A G, Tolokonnikov L A 2009 *J. Appl. Math. Mech.* **73** 336
- [7] He Y A, He Z Y 2002 *Acta Acoust.* **27** 507 (in Chinese)[何元安, 何祚镛 2002 声学学报 **27** 507]
- [8] Ying Y Z, Ma L, Guo S M 2011 *Chin. Phys. B* **20** 054301
- [9] Yu F, Chen J, Li W B, Chen X Z 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 789 (in Chinese)[于飞, 陈剑, 李卫兵, 陈心昭 2005 物理学报 **54** 789]
- [10] Zhang H B, Jiang W K, Wan Q 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 313 (in Chinese)[张海滨, 蒋伟康, 万泉 2008 物理学报 **57** 313]
- [11] Bi C X, Hu D Y, Zhang Y B, X L 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 084301 (in Chinese)[毕传兴, 胡定玉, 张永斌, 徐亮 2013 物理学报 **62** 084301]
- [12] Xu L 2009 *Ph. D. Dissertation* (Hefei: Hefei University of Technology) (in Chinese) [徐亮, 2009 博士学位论文(合肥: 合肥工业大学)]
- [13] Wang R Q, Ma L L 2004 *J Harbin Eng Univ.* **3** 288 (in Chinese)[王仁乾, 马黎黎 2004 哈尔滨工程大学学报 **3** 288]
- [14] Bai G F, Yin Z, Zhou C G, Liu B L, Liu K 2010 *Acta Acoust.* **35** 107 (in Chinese)[白国锋, 尹铤, 周城光, 刘碧龙, 刘克 2010 声学学报 **35** 107]
- [15] Baird A M, Kerr F H, Townend D J 1999 *J. Acoust. Soc. Am.* **105** 1527
- [16] Zhao H G, Liu Y Z, Wen J H, Yu D L, Wen X S 2007 *J. Appl. Phys.* **101** 123518
- [17] Jiang H, Zhang M L, Wang Y R, Hu Y P, Lan D, Wei B C 2009 *Chin. Phys. Lett.* **26** 106202
- [18] Y L G, L Z H, M L L 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 024301 (in Chinese) [于利刚, 李朝晖, 马黎黎 2012 物理学报 **61** 024301]
- [19] Yu L G, Li Z H, Wang R Q, M L L 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 064301 (in Chinese)[于利刚, 李朝晖, 王仁乾, 马黎黎 2013 物理学报 **62** 064301]
- [20] Sven M I 2006 *J. Acoust. Soc. Am.* **119** 3558
- [21] Brekhovskikh L M 1980 *Waves in Layered Media* (New York: Academic Press) p61
- [22] Шендеров, He Z Y, Zhao J Y 1983 *Wave Propagation Problems of Underwater Acoustics* (Beijing: National Defense Industry Press) p267 (in Chinese) [沈杰罗夫, 何祚镛, 赵晋英 1983 水声学波动问题(北京: 国防工业出版社) 第267页]
- [23] Ji J F 2012 *Ph. D. Dissertation* (Harbin: Harbin Engineering University) (in Chinese) [嵇建飞 2012 博士学位论文(哈尔滨: 哈尔滨工程大学)]

Influences of sound absorption material on acoustic characteristics of acoustic vector sensor installed on a small underwater carrier*

Liang Guo-Long Pang Fu-Bin Zhang Guang-Pu[†]

(Science and Technology on Underwater Acoustic Laboratory, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

(Received 10 July 2013; revised manuscript received 24 August 2013)

Abstract

In this paper the influences of viscoelastic absorption of materials on the directivity and DOA estimation of acoustic vector sensor installed on the carrier are investigated by virtue of theoretical analysis and experimental results. First, the mathematical model, consisting of absorption material and carrier structure, is established, and the acoustic characteristics of the composite materials in the case of sound propagation are analyzed. On that basis, the acoustic characteristics picked up by the vector sensor are studied by finite element method (FEM) coupling boundary element method (BEM) before and after the covering of absorption material. The influences of absorption material on the directivity of vector sensor are studied by theoretical calculation and numerical analysis, and the DOA estimation accuracy of the vector sensor before and after covering by sound absorption material is calculated. Results are proved to be valid by the experiment in the anechoic tank.

Keywords: sound absorption material, small underwater carrier, acoustic vector sensor, acoustic characteristics

PACS: 43.30.+m, 43.20.Fn, 43.35.Mr, 43.58.-e

DOI: [10.7498/aps.63.034303](https://doi.org/10.7498/aps.63.034303)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 51279043, 61201411, 51009042), the Foundation of Science and Technology on Underwater Acoustic Laboratory, China (Grant No. 9140C200203110C2003), and the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2013AA09A503).

[†] Corresponding author. E-mail: guangpu_zhang@163.com