

【引用格式】赖喜悦, 陈美霞, 董文凯. 二维透声窗遮挡损失计算方法研究[J]. 数字海洋与水下攻防, 2023, 6(3): 346-352.

## 二维透声窗遮挡损失计算方法研究

赖喜悦, 陈美霞\*, 董文凯

(华中科技大学 船舶与海洋工程学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要** 为了水下探测和声对抗, 舰艇艏部舱室通常安装主动声呐设备, 声呐发射声波经由透声窗向外传播, 因此, 开展透声窗声学特性的相关研究具有重大现实意义。为解决实际工程中透声窗透声性能计算较困难这一问题, 一种用于快速预报透声窗的遮挡损失的解析-数值混合方法被提出。该方法用球谐波展开法和叠加原理求解阵列活塞声源声场, 得到声激励下透声窗模型表面的声压和法向振速, 进而利用 COMSOL 的 Kirchhoff-Helmholtz 模块通过再辐射的方法求解模型的遮挡损失。最后, 建立了一个二维透声窗模型, 分别采用解析-数值混合方法和纯有限元法计算了其全方位的遮挡损失, 验证了该方法的准确性、有效性。

**关键词** 活塞声源; 阵列; 遮挡损失; 透声窗

中图分类号 TN929.3

文献标识码 A

文章编号 2096-5753(2023)03-0346-07

DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2023.03.012

### Research on Calculation Method of Insertion Loss of Two-dimensional Sound Transmission Window

LAI Xiyue, CHEN Meixia\*, DONG Wenkai

(School of Marine and Offshore Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract** For the purpose of underwater detection and acoustic countermeasures, active sonar equipment is usually installed in the bow compartment of ships, and the sonar-emitting acoustic waves are propagated outward through the transmissive windows. Therefore, the research on the sound transmission properties of transmissive windows is of great practical significance. In order to solve the practical problem that it is difficult to calculate the sound transmission performance of the transmissive window, a hybrid analytical-numerical method is proposed for fast prediction of the insertion loss of the transmissive window. Firstly, the spherical harmonic expansion method and the superposition principle are utilized to calculate the sound field of the array piston source and then to obtain the sound pressure and normal vibration velocity caused by the source excitation. Secondly, the method of re-radiation, included in the Kirchhoff-Helmholtz module of COMSOL, is invoked to solve the insertion loss. Finally, a two-dimensional transmissive window model is established, and its all-round insertion loss is calculated by the method of this paper and the pure finite element method, respectively, to verify the accuracy and effectiveness of the method.

**Key words** piston sources; arrays; insertion loss; transmissive windows

收稿日期: 2023-03-23

作者简介: 赖喜悦 (1998-), 男, 硕士生, 主要从事结构振动研究。

\*通信作者: 陈美霞 (1975-), 女, 博士, 教授, 主要从事舰船结构振动与辐射噪声解析/数值/试验混合计算新方法、舰船新型复合材料声学结构设计及实现等方向的研究。

基金项目: 国家自然科学基金项目“含点阵增强和空腔的加筋夹层板的水下声振特性机理研究”(5207110672)。

## 0 引言

装有声呐设备的舰艇艏部透声窗是水下反潜作战的探测窗口<sup>[1]</sup>。透声窗内部声呐设备工作时, 基阵发射的声波经过导流罩透射到外部声场, 由于透声窗的遮挡和导流罩内部结构的透声损失, 波束会发生畸变, 并伴随着能量损失。因此, 透声窗设计在满足结构强度、阻力和耐用性等要求的前提下, 还需要着重考虑其声学特性<sup>[2]</sup>。

因透声窗遮挡作用带来的声波能量损失被定义为遮挡损失, 是透声窗声学特性设计关注的重点之一。然而, 由于透声窗结构比较复杂且模型尺寸一般较大, 加之工程中关注的频率范围并不局限于低频, 透声窗遮挡损失的准确计算较为困难。因此, 在许多文献中往往通过对平面波入射下单层或多层介质模型的透声性能进行研究计算来粗略预报透声窗的声学性能。LEE 等<sup>[3]</sup>利用三层和四层介质模型对复合透声窗材料在一定频率下的插入损失进行了理论计算, 并开展实验验证了计算结果的准确性。童晖等<sup>[4]</sup>利用三层介质模型对透声窗材料在高频下的声学特性进行了研究, 并探讨了材料属性和平面波入射角度对其插入损失的影响。易燕等<sup>[5]</sup>提出了一种低频宽带测试技术, 解决了双层钛合金导流罩平板模型低频段和大角度测试难度问题, 得

到了模型试样低频宽带范围内插入损失的频率谱和角度谱。李东升等<sup>[6]</sup>利用夹芯透声窗的简化模型研究了夹芯透声窗参数对其声学性能的影响, 并对比了不同频段下夹芯透声窗与单层玻璃钢透声窗透声性能的差异。此外, 李源源<sup>[7]</sup>等建造了实际舰艇球鼻艏导流罩模型, 实验得到了球鼻首的全向和定向发射透声损失。

综上, 对透声窗声学性能进行准确预报是对其进行声学设计的前提, 而简化的单层或多层介质模型无法考虑实际透声窗的复杂结构、复杂边界和复杂声源, 只能粗略地估算透声窗的声学性能。实验方法研究透声窗模型的声学性能又会带来较大的实验成本, 因此, 提出一种准确预报透声窗遮挡损失的计算方法具有切实意义。

本文提出了一种解析-数值混合方法, 用于快速预报透声窗的遮挡损失。首先, 利用球谐波展开法得到了单活塞声源的声场分布, 并通过叠加原理得到阵列声源的声场分布, 进而根据透声窗有限元模型各网格节点的坐标得到模型表面任意一点由声源激励引起的声压和法向振速。将之插值回 COMSOL 有限元模型之中, 调用 COMSOL 的 Kirchhoff-Helmholtz 模块通过再辐射的方法求解模型的遮挡损失, 最后建立简单二维透声窗模型, 验证了方法的有效性。具体的计算流程如图 1 所示。

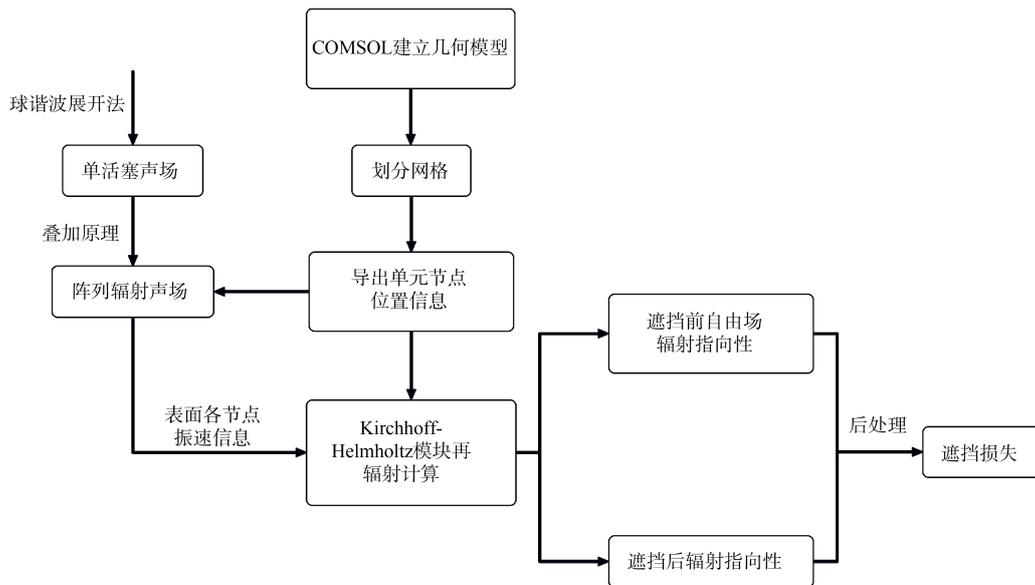


图 1 解析-数值混合方法计算流程图

Fig. 1 Flowchart of the calculation process of analysis-numerical hybrid method

### 1 活塞阵列声源声场分布

要想对透声窗模型遮挡损失进行准确计算,声源的建模和求解是第一步应该做的内容。圆柱形基阵是目前国内外舰壳声呐最普遍的一种基阵形式,受水面舰吃水深度的限制,通常采用收发合置的声基阵,使得这种基阵形式对水平 360°范围具有相同的探测能力。实际研究中可以将这种基阵简化为圆面活塞阵列,在定向发射时,可以根据相控规则调控各活塞振元的振动相位,使得各个活塞辐射声场波阵面重叠,实现波束聚焦都效果<sup>[8]</sup>。

#### 1.1 球谐波展开法求解单活塞声场

文献[9]和[10]采用球谐波展开法求解了圆盘形辐射体在声场中的声辐射,对于二维模型来说,阵列的每一个振元都可以简化为以一定振速在自由空间中简谐振动的线段,线段在  $y>0$  方向的法向振速为  $V_0$ ,在  $y<0$  方向的法向振速幅值为  $-V_0$ ,活塞半径为  $a$ ,  $r$  和  $\theta$  分别为测点半径及其与  $y$  轴正方向的夹角,模型示意图如图 2 所示。

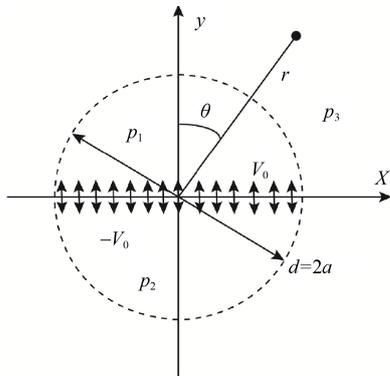


图 2 单活塞声场分布示意图

Fig. 2 Schematic diagram of sound field distribution of single piston

将无限水域划分为子域 I ( $0 \leq r \leq a, 0 \leq \theta \leq \pi/2$ ), II ( $0 \leq r \leq a, \pi/2 \leq \theta \leq \pi$ ), III ( $r \geq a, 0 \leq \theta \leq \pi$ ) 后,各子域声压满足时间简谐形式如式 (1) 所示:

$$p_{\mu}(r, \theta, t) = p_{\mu}(r, \theta) \exp(-j\omega t) \quad (1)$$

式中:  $\omega$  为振动圆频率;  $j$  为虚数单位;  $\mu=1, 2, 3$ 。

忽略时间项  $\exp(-j\omega t)$ , 各子域声压还应满足如下边界条件:  $Z_0$  为介质特性阻抗;  $k$  为流体中的波数。

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial p_1}{\partial \theta} \right|_{\theta=\pi/2} &= -jkrZ_0V_0; \quad 0 \leq r \leq a \\ \left. \frac{\partial p_2}{\partial \theta} \right|_{\theta=\pi/2} &= -jkrZ_0V_0; \quad 0 \leq r \leq a \\ \lim_{r \rightarrow \infty} r \left( \frac{\partial p_3}{\partial r} - jkp_3 \right) &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

从而, 各子域的声压函数可以假设为式 (3) 中的形式:

$$\begin{cases} p_1(r, \theta) = Z_0V_0 \sum_{n=0}^{\infty} A_n J_{2n}(kr) \cos(2n\theta) + \\ \quad Z_0V_0 e^{jkr \cos \theta}; \quad 0 \leq r \leq a, 0 \leq \theta \leq \pi/2 \\ p_2(r, \theta) = Z_0V_0 \sum_{n=0}^{\infty} B_n J_{2n}(kr) \cos(2n\theta) - \\ \quad Z_0V_0 e^{-jkr \cos \theta}; \quad 0 \leq r \leq a, \pi/2 \leq \theta \leq \pi \\ p_3(r, \theta) = Z_0V_0 \sum_{n=0}^{\infty} C_n H_{2n+1}^{(1)}(kr) \cos(2n+1)\theta; \\ \quad r \geq a, 0 \leq \theta \leq \pi \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $A_n, B_n$  和  $C_n$  为未知系数;  $J$  和  $H$  分别表示一类贝塞尔函数和汉克尔函数,  $H$  的下标表示其阶数, 上标表示其为第一类汉克尔函数。

各子域之间需要满足的声压-振速连续性条件如下:

$$\begin{cases} \left. \frac{\partial p_1}{\partial r} \right|_{r=a} = \left. \frac{\partial p_3}{\partial r} \right|_{r=a}; \quad 0 \leq \theta \leq \pi/2 \\ \left. \frac{\partial p_3}{\partial r} \right|_{r=a} = \left. \frac{\partial p_2}{\partial r} \right|_{r=a}; \quad \pi/2 \leq \theta \leq \pi \\ p_3(a, \theta) = p_1(a, \theta); \quad 0 \leq \theta \leq \pi/2 \\ p_3(a, \theta) = p_2(a, \theta); \quad \pi/2 \leq \theta \leq \pi \end{cases} \quad (4)$$

将各子域假设的声压函数代入到上述连续性条件中, 可以得到式 (5):

$$\begin{cases} \sum_{n=0}^{\infty} C_n H_{2n+1}^{(1)}(ka) \cos(2n+1)\theta = \\ \quad \sum_{n=0}^{\infty} A_n J_{2n}(ka) \cos(2n\theta) + e^{jka \cos \theta}, \quad 0 < \theta < \pi/2 \\ \sum_{n=0}^{\infty} C_n H_{2n+1}^{(1)}(ka) \cos(2n+1)\theta = \\ \quad \sum_{n=0}^{\infty} B_n J_{2n}(ka) \cos(2n\theta) - e^{-jka \cos \theta}, \quad \pi/2 < \theta < \pi \\ A_n = -B_n \end{cases} \quad (5)$$

式 (5) 的第 2、3 个方程左右两边同时乘以  $\cos(m\theta)$ ,  $m$  和  $n$  均为自然数, 并在两方程  $\theta$  的取值区间内积分, 可以得到式 (6):

$$\left\{ \begin{aligned} &\sum_{n=0}^{\infty} C_n H_{2n+1}^{(1)}(ka) p_{mn}(2n+1, m) - \\ &\sum_{n=0}^{\infty} A_n J_{2n}(ka) p_{mn}(2n, m) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} e^{jka \cos \theta} \cos(m\theta) d\theta \\ &\sum_{n=0}^{\infty} C_n H_{2n+1}^{(1)}(ka) q_{mn}(2n+1, m) - \\ &\sum_{n=0}^{\infty} B_n J_{2n}(ka) q_{mn}(2n, m) = -\int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} e^{-jka \cos \theta} \cos(m\theta) d\theta \end{aligned} \right. \quad (6)$$

其中分部积分可求得:

$$\left. \begin{aligned} p_{mn}(m, n) &= \frac{n \cos(\frac{m\pi}{2}) \sin(\frac{n\pi}{2}) - m \cos(\frac{n\pi}{2}) \sin(\frac{m\pi}{2})}{n^2 - m^2} \\ q_{mn}(m, n) &= \frac{m \cos(\frac{n\pi}{2}) \sin(\frac{m\pi}{2}) - n \cos(\frac{m\pi}{2}) \sin(\frac{n\pi}{2})}{n^2 - m^2} \end{aligned} \right\} m \neq n \quad (7)$$

式中,  $p_{mn}(m, n) = q_{mn}(m, n) = \frac{\pi}{4}, m = n$ , 且  $m, n$  为奇数。

从而可知  $p_{mn}$  和  $q_{mn}$  有下面的性质,

$$m \neq n \text{ 时, } p_{mn} + q_{mn} = 0 \quad (8)$$

取  $m=2s+1, s$  为自然数, 将式 (6) 中的 2 个方程相加, 利用上述  $p_{mn}$  和  $q_{mn}$  的性质可以得到式 (9):

$$\begin{aligned} &2C_s H_{2s+1}^{(1)}(ka) p_{mn}(2s+1, 2s+1) - \\ &\sum_{n=0}^{\infty} A_n J_{2n}(ka) (q_{mn}(2n, 2s+1) - p_{mn}(2n, 2s+1)) = \\ &2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} e^{jka \cos \theta} \cos(2s+1)\theta d\theta \end{aligned} \quad (9)$$

式 (9) 等式两边同时在  $r=a$  处对  $r$  求导, 可以得到式 (10):

$$\begin{aligned} &2C_s H_{2s+1}^{(1)'}(ka) p_{mn}(2s+1, 2s+1) - \\ &\sum_{n=0}^{\infty} A_n J_{2n}'(ka) (q_{mn}(2n, 2s+1) - p_{mn}(2n, 2s+1)) = \\ &2j \int_0^{\frac{\pi}{2}} e^{jka \cos \theta} \cos \theta \cos(2s+1)\theta d\theta \end{aligned} \quad (10)$$

联立式 (9) 和式 (10), 取截断数  $s=n=N$ , 即可以得到一个由  $2*(N+1)$  个方程组成的线性方程组, 求解线性方程组, 得到声压函数中的未知系数  $A_n, B_n$  和  $C_n$ , 回代到式 (3), 即可得到单活塞辐射声场。

### 1.2 叠加原理求解活塞阵列声源声场分布

多个活塞组成阵列时, 阵列半径为  $R_r$ , 活塞个数为  $2*N_s+1$ , 即以第  $N_s+1$  个活塞为中心, 左右两边各有  $N_s$  个活塞, 活塞间隔圆心角为  $\delta\theta$ , 第  $i$  个活塞与中心活塞的夹角为  $\varphi_i$ , 阵列发射方向与中心活塞的夹角为  $\theta_r$ 。为了实现定向发射的功能, 不同活塞振动在时域上需要存在一定的时延关系, 这种关系可以通过调节频域上的相位差来实现, 即不同活塞的速度振幅可以由如下形式表出:

$$V_{0i} = V_0 e^{jkR_r \cos(\theta_r - \varphi_i)} \quad (11)$$

式中,  $V_{0i}$  表示第  $i$  个活塞的法向振动速度幅值。

忽略活塞之间的相互作用, 阵列辐射声场可以看作是单活塞声场叠加而成, 从而总声场可以表示为

$$P(T_R, T_\theta) = \sum_{i=1}^{2N_s+1} p(V_{0i}, r_i, \theta_i) \quad (12)$$

式中:  $T_R, T_\theta$  表示测点坐标;  $r_i, \theta_i$  表示测点在第  $i$  个活塞局部坐标系下的坐标。如图 3 所示, 对于平面上任意一点  $(T_R, T_\theta)$ , 我们都可以由余弦定理将其在第  $i$  个活塞局部坐标系下的坐标  $(r_i, \theta_i)$  表示成式 (13) 的形式:

$$\left\{ \begin{aligned} r_i &= \sqrt{(T_R^2 + R_r^2 - 2rR_r \cos(T_\theta - \varphi_i))} \\ \theta_i &= \arccos\left(\frac{(T_R^2 - r_i^2 - R_r^2)}{(2r_i R_r)}\right) \end{aligned} \right. \quad (13)$$

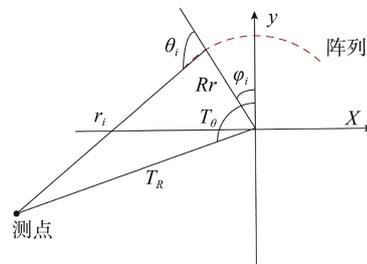


图 3 局部坐标系下测点坐标示意图

Fig. 3 Schematic diagram of measurement point coordinates in local coordinate system

获取了阵列辐射声场任意一点的声压  $P(T_R, T_\theta)$

后,结合透声窗舱室几何信息,就可以获取透声窗及舱室表面任意一点处的声压与法向振速。

## 2 透声窗遮挡损失计算

以阵列中心为全局坐标系的原点建立透声窗舱室轮廓模型,对于透声窗舱室表面上任意一点,其坐标向量可以设为  $\bar{x}=[x,y]^T$ ,该点处的外法向单位矢量为  $\bar{n}=[n_x,n_y]^T$ ,从而该点处由阵列声源激励起的法向振速  $v_n(\bar{x})$  可以表示为式(14)的形式,式中  $\Delta d$  为一较小的值,可取对应频率下流场声波波长的  $1/20$ 。

$$v_n(\bar{x}) = \frac{1}{j\omega\rho_0} \frac{P(\bar{x} + \Delta d\bar{n}) - P(\bar{x} - \Delta d\bar{n})}{2\Delta d} \quad (14)$$

依据惠更斯原理,文献[11]提出了一种再辐射的方法来计算透声窗内声呐基阵的远场辐射指向性,这种再辐射的方法很好的适应了实际透声窗内的声场分布情况,运算比较简单。结合这一方法,可以将遮挡损失的计算分为2步:第一步是计算阵列在自由场中的远场声压级指向性,第二步是计算透声窗遮挡后远场声压级指向性,两者之差即为遮挡损失。

依据图1,获取表面振速信息后,调用有限元软件 COMSOL Multiphysics 6.0 的 Pressure Acoustics, Kirchhoff-Helmholtz 模块(压力声学,基尔霍夫-亥姆霍兹模块)进行再辐射计算。通过输入振速,该模块基于基尔霍夫-亥姆霍兹积分公式对高频辐射问题进行计算,而无需对周围流体进行建模,可以极大地降低有限元模型的复杂度,使得计算较为迅速。调用 Kirchhoff-Helmholtz 模块后,在 COMSOL 中调用 MATLAB 插值函数将振速输入到几何和网格表面,得到再辐射源。计算无遮挡声场源特性时,需要将整个舱室外表面选中,给每个节点插值对应的法向振速,而计算遮挡后的辐射声场时,只需要将透声表面选中并赋予振速计算。最后,只需要在后处理中将2次计算结果相减,即可得到模型的遮挡损失。

## 3 方法有效性验证

### 3.1 单活塞声场有限元验证

在 COMSOL 中建立二维单活塞模型,活塞半

径为 35.5 mm,计算频率为 10 kHz,活塞法向速度幅值为 1 m/s。有限元模型如图4所示,其中内圆的水平直径即为活塞,内圆和中间圆为水域,水的密度为  $1\,000\text{ kg/m}^3$ ,水中声速为  $1\,500\text{ m/s}$ ,外圆为 PML 层。理论与有限元计算得到的该频率下距离圆心  $r=1\,000\text{ m}$  处一周的声压如图5所示。可以看到两者的计算结果吻合较好,说明球谐波展开法能较准确地求解单活塞在水中的辐射声场。

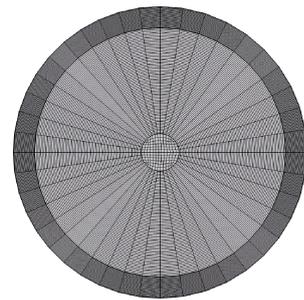


图4 单活塞有限元模型

Fig. 4 Finite element model of single piston

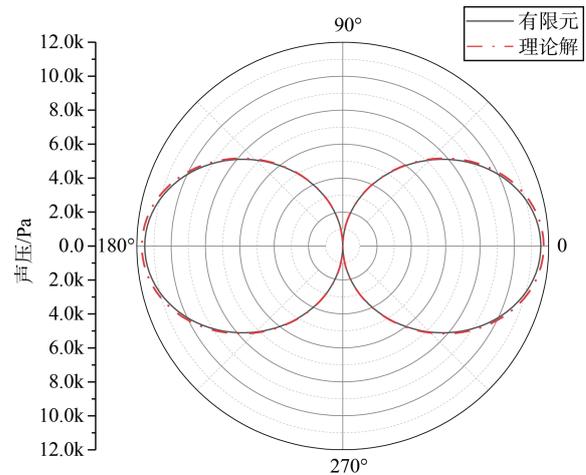


图5 单活塞  $r=1\,000\text{ m}$  指向性图

Fig. 5 Directivity pattern of single piston at  $r=1\,000\text{ m}$

### 3.2 活塞阵列声场有限元验证

在 COMSOL 中建立活塞阵列模型,  $N_S=10$ ,各活塞的直径均为 35.5 mm,活塞法向速度幅值为 1 m/s,阵列半径为 1.2 m,活塞间隔圆心角为  $3.5^\circ$ ,  $\theta_r=0^\circ$ ,计算频率为 10 kHz,有限元模型示意图如图6所示,理论与解析计算得到的该频率下距离圆心  $r=1\,000\text{ m}$  处一周的声压如图7所示。也可以看到理论结果能与有限元结果吻合较好,阵列定向发

射时, 能量主要集中在发射方向。

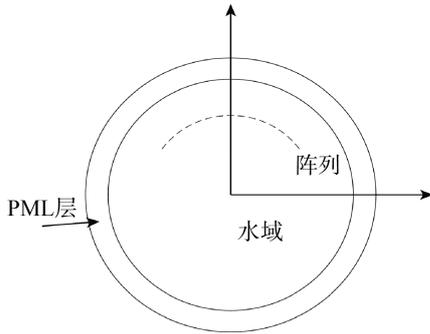


图 6 活塞阵列有限元模型示意图

Fig. 6 Schematic diagram of finite element model for piston array

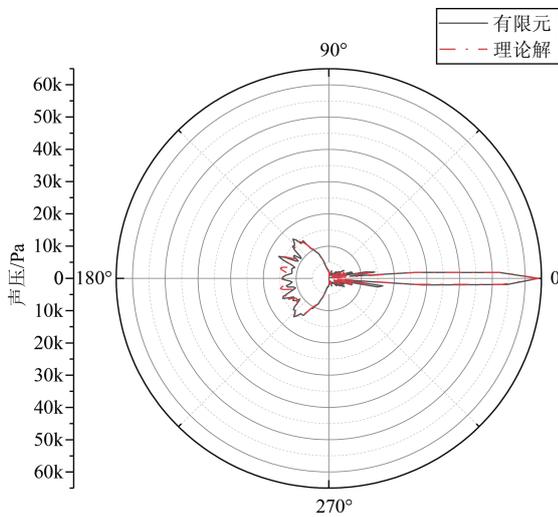


图 7 活塞阵列  $r=1\ 000\ \text{m}$  指向性图

Fig. 7 Directivity pattern of piston array at  $r=1\ 000\ \text{m}$

### 3.3 透声窗遮挡损失计算有限元验证

为验证本文提出方法的准确性, 下面将建立一个简单的二维模型, 分别采用本文方法与有限元法对模型的遮挡损失进行计算, 并对结果进行对比验证。

在计算时, 取阵列发射角度为  $0^\circ$ , 通过改变阵列发射方向与透声窗中轴的夹角  $\theta_x$ , 可以在扫描扇面内进行周向扫描, 取遮挡前后阵列平面内沿着阵列发射方向距阵列中心  $r=1\ 000\ \text{m}$  处的场点声压级之差, 为模型在  $\theta_x$  角度时的遮挡损失, 记为  $SL(\theta_x)$ , 即

$$SL(\theta_x) = L_p(\theta_x) - L_p'(\theta_x) \quad (15)$$

式中:  $L_p(\theta_x)$  为遮挡前的场点声压级,  $L_p'(\theta_x)$  为

遮挡后的场点声压级。以  $\theta_x$  为周向坐标,  $SL(\theta_x)$  为径向坐标, 绘制极坐标曲线, 就可以表征透声窗全向的遮挡损失特性。

以一椭圆模型为验证模型, 椭圆长半径为  $2.3\ \text{m}$ , 短半径为  $1.8\ \text{m}$ , 椭圆中心在原点, 截取长边顶点两边各  $5/16$  椭圆弧长作为透声窗, 其余弧为吸声侧壁验证模型的阵列参数与 3.2 节一致, 全局坐标系原点与阵列中心重合。模型示意图如图 8 所示。

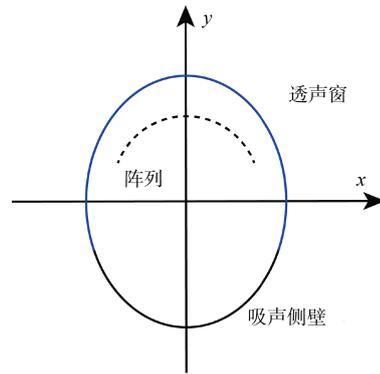


图 8 验证模型示意图

Fig. 8 Schematic diagram of verification model

分别采用纯有限元和解析-数值混合方法得到的模型全向遮挡损失计算结果如图 9 所示, 可以看到, 本文提出的方法准确性较高, 且相较于有限元, 该方法无需建立出完美匹配边界和复杂的阵列活塞声源, 模型简单, 计算效率较高。

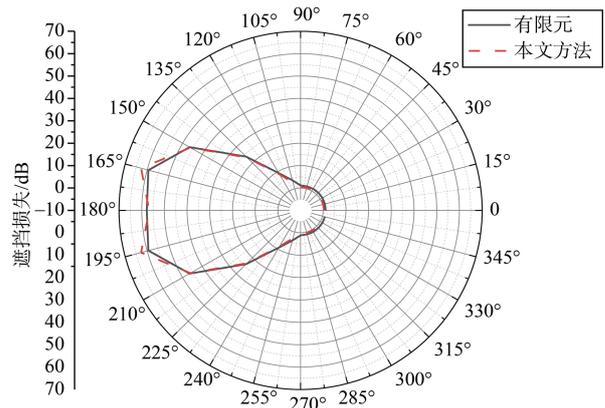


图 9 模型全向遮挡损失结果对比

Fig. 9 Comparison of results of model omnidirectional obstruction loss

## 4 结束语

本文提出了一种用于透声窗遮挡损失计算的

解析-数值混合方法,并通过二维简单模型进行了方法验证,得到了以下结论。

1)球谐波展开法可以有效求解二维活塞声场,结果与有限元吻合较好,本文对各子域的声压函数假设合理。

2)不考虑活塞间的相互作用,运用叠加原理,可以较准确的计算出活塞阵列的声场分布,计算结果与有限元吻合较好,阵列定向发射时,声能量主要集中在发射方向上。

3)本文提出的解析-数值混合方法可以较准确的预报二维透声窗模型的全向遮挡损失,思路清晰,计算简单,相较于纯有限元方法,不涉及无限域的模拟,也不需要建出活塞阵列(纯有限元模型一般在活塞阵列附近网格质量要求较高),对硬件要求较低且耗时较短。

后续可以依据这一思路,继续将该方法拓展至三维模型,方法快速性的优点将得到更充分的体现。

#### 参考文献

- [1] 金武雷,周心桃,陈昆渊,等. 错层式钛合金球鼻首导流罩结构形式研究[J]. 中国舰船研究, 2010, 5(4): 32-35, 43.
- [2] 费国强,沈文苗. 国外大舰导流罩概述[J]. 声学与电子工程, 2012(2): 1-5.
- [3] LEE J H, KIM B N, SHIN K, et al. Insertion loss of sound waves through composite acoustic window materials[J]. Current Applied Physics, 2010, 10(1): 138-144.
- [4] 童晖,周益明,王建中,等. 高频换能器透声窗声学特性研究[C]// 2015年上海-西安声学学会第四届声学学术交流会. 2015年上海-西安声学学会第四届声学学术交流会论文集. 上海:上海市声学学会, 2015.
- [5] 易燕,李水. 双层钛合金导流罩平板模型的低频斜入射透声性能测试[J]. 声学与电子工程, 2019(1): 35-39.
- [6] 李东升,俞孟萨. 夹芯透声窗的透声特性研究[C]// 第十一届船舶水下噪声学术讨论会. 第十一届船舶水下噪声学术讨论会论文集. 北京:中国造船工程学会, 2007.
- [7] 李源源,陈炜,朱泉,等. 舰艇球鼻首金属导流罩的结构声学设计[J]. 中国舰船研究, 2007(1): 39-41, 55.
- [8] 董文凯,陈美霞. 基于球谐波展开的球面障板上活塞相控弧阵辐射特性分析[C]// 第十八届船舶水下噪声学术讨论会. 第十八届船舶水下噪声学术讨论会论文集. 北京:中国造船工程学会, 2021.
- [9] VOVK I V, GRINCHENKO V T, MATSYUPURA V T. A new approach to estimation of acoustic properties of the disk-shaped sound radiator[J]. Acoustic Bulletin, 2008(11): 13-26.
- [10] RDZANEK W P. Sound radiation of a circular piston in the outlet of a finite hemispherical cavity of a finite inner impedance[J]. Wave Motion, 2019: 17-31.
- [11] 赵安邦,赵智姗,宋雪晶,等. 透声窗尺寸对窗内基阵辐射声场影响仿真分析[J]. 华中科技大学学报:自然科学版, 2013, 41(10): 30-34.

(责任编辑:肖楚楚)