



(21) 申请号 202210145733.9

(22) 申请日 2022.02.17

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 114545331 A

(43) 申请公布日 2022.05.27

(73) 专利权人 浙江工业大学

地址 310014 浙江省杭州市拱墅区潮王路
18号

(72) 发明人 周达仁 卢免采 程相乐 汝泽宇

(74) 专利代理机构 杭州天正专利事务所有限公
司 33201

专利代理师 王兵 舒良

(51) Int. Cl.

G01S 5/20 (2006.01)

(56) 对比文件

CN 109885945 A, 2019.06.14

CN 111707353 A, 2020.09.25

审查员 何强

权利要求书4页 说明书9页 附图2页

(54) 发明名称

半开放空间中重构声源直接辐射声场的方法

(57) 摘要

半开放空间中重构声源直接辐射声场的方法,是在含有平面反射边界的半开放空间中,重构声源直接辐射声场的方法,包括:1.建立以半空间球面波基函数的线性叠加表述声源直接辐射与边界反射声贡献的总声压场的数学模型;2.在声源近场布置全息测量面进行声压全息测量;3.以部分测点的全息测量值作为输入,重构其余测点的声压值,以声压重构误差为最小为原则确定最优基函数展开项数;4.在最优展开项数条件下求解半空间球面波基函数系数,获取表述声源直接辐射声场的自由空间球面波基函数系数,实现声源直接辐射声场的重构。本发明对于大尺寸结构声源辐射的测量和评估提供了数学基础,能够实现半开放空间中声场成像和结构声源的识别和定位。

1. 半开放空间中重构声源直接辐射声场的方法,其特征在于:包含如下步骤:

S1. 建立以半空间球面波基函数的线性叠加表述声源直接辐射与边界反射声贡献的总声压场的数学模型;以声源几何中心 O_1 在边界上的投影 O 为原点建立全局坐标系, O_1 的全局坐标记为 $\mathbf{x}_{O_1} = (0, 0, h_s)$, h_s 为 O_1 到边界的距离; O_1 关于边界的镜像点记为 O_2 ;通过对全局坐标系平移,以 O_1 和 O_2 分别为原点建立局部坐标系,场点 x 在两局部坐标系中的坐标分别记为 $\mathbf{x}_1 \equiv (r_1, \theta_1, \phi_1)$ 和 $\mathbf{x}_2 \equiv (r_2, \theta_2, \phi_2)$,三者之间满足如下关系:

$$\mathbf{x}_1 = \mathbf{x} - h_s \mathbf{e}_z, \mathbf{x}_2 = \mathbf{x} + h_s \mathbf{e}_z \quad (1)$$

其中, $\mathbf{e}_z$ 为 z -向单位向量;

对于稳态声场,场点 x 处的半空间总声压 $p_{\text{half}}(\mathbf{x}; \omega)$ 可以表述为有限项半空间球面波基函数的线性叠加:

$$p_{\text{half}}(\mathbf{x}; \omega) \approx \sum_{j=1}^J c_j(\omega) \psi_{j\text{half}}(\mathbf{x}; \omega) \quad (2)$$

其中, ω 为声波角频率; $\psi_{j\text{half}}(\mathbf{x}; \omega)$ 为半空间球面波基函数; $c_j(\omega)$ 为基函数展开项系数; j 为展开项序数, J 为展开项项数;半空间球面波基函数 $\psi_{j\text{half}}(\mathbf{x}; \omega)$ 的表达式为:

$$\psi_{j\text{half}}(\mathbf{x}; \omega) = \psi_j(\mathbf{x} | \mathbf{x} - h_s \mathbf{e}_z; \omega) + \psi_j(\mathbf{x} | \mathbf{x} + h_s \mathbf{e}_z; \omega) + \xi_j(\mathbf{x} | \mathbf{x} + h_s \mathbf{e}_z; \omega) \quad (3)$$

其中, $\psi_j(\mathbf{x} | \mathbf{x} - h_s \mathbf{e}_z; \omega)$ 和 $\psi_j(\mathbf{x} | \mathbf{x} + h_s \mathbf{e}_z; \omega)$ 分别为表述声源及其镜像虚源直接辐射声的第 j 项自由空间球面波基函数;在球面坐标系中, ψ_j 的表达式为:

$$\psi_j(\mathbf{x}; \omega) \equiv \psi_n(r, \theta, \phi) = h_n^{(1)}(kr) Y_n^l(\theta, \phi) \quad (4)$$

其中, $h_n^{(1)}(kr)$ 为第一类球汉克尔函数, $k = \omega / c$ 为声波波数, c 为声速; $Y_n^l(\theta, \phi)$ 为球谐函数;在式(2)~式(4)中,整数 n, l 和 j 满足关系式 $j = n^2 + n + 1 + 1$,其中, $-n \leq l \leq n, 0 \leq n \leq N, N$ 为 n 的截断值;在计算式(3)时,其右边的前两项分别代入局部坐标 $\mathbf{x}_1$ 和 $\mathbf{x}_2$ 进行计算; $\xi_j(\mathbf{x} | \mathbf{x} + h_s \mathbf{e}_z; \omega)$ 表述边界声,其表达式为:

$$\xi_j(\mathbf{x} | \mathbf{x} + h_s \mathbf{e}_z; \omega) = (-i)^{n+1} (1 - R_p(\theta_2; \omega)) \left[Y_n^l(\mu_p, \phi_2) F(w) - Y_n^l(\theta_2, \phi_2) \right] \frac{e^{ikr_2}}{kr_2} \quad (5)$$

其中,

$$R_p(\theta_2; \omega) = \frac{\cos \theta_2 - \beta}{\cos \theta_2 + \beta} \quad (6)$$

$$F(w) = 1 + i\sqrt{\pi} w e^{-w^2} \text{erfc}(-iw) \quad (7)$$

以及

$$w = \left(\frac{1}{2} i k r_2 \right)^{1/2} (\beta + \cos \theta_2) \quad (8)$$

在式(5)~式(8)中, $R_p(\theta_2; \omega)$ 、 $F(w)$ 和 w 分别为声压反射系数、边界损失因子 Boundary Loss Factor 和数值间距 Numerical Distance;局部坐标 r_1 和 r_2 分别为声源几何中心和镜像虚源几何中心到场点的距离; θ_2 为声波入射角,为场点和虚源几何中心的连线与 z -轴正方向的夹角; $i = \sqrt{-1}$;复角 μ_p 为:

$$\mu_p = \frac{\pi}{2} + \cos^{-1} \sqrt{1 - \beta^2} \quad (9)$$

其中, β 为归一化的边界声导纳,

$$\beta = \frac{\rho_0 c}{Z} = \frac{1}{Z_0} \quad (10)$$

其中, Z 为边界声阻抗率, Z_0 为归一化的边界声阻抗率, ρ_0 为流体介质密度; 本方法的实施假定声阻抗率 Z_0 为已知量, Z_0 可以根据声阻抗的原位测量方法获取;

S2. 在声源近场布置全息测量面进行声压全息测量;

在声源近场布置一组声压传感器, 形成声压全息测量面, 测量声源直接辐射声与边界反射声共同贡献的总声压分布;

S3. 以部分测点的全息测量值作为输入, 重构其余测点的声压值, 以声压重构误差为最小为原则确定最优基函数展开项数;

将全息测量面上的测点坐标记为 $\mathbf{x}_m^{\text{meas}}$, $m=1, 2, \dots, M$, M 为声压测点数目; 按照隔点取点的方式, 将声压测点分为两组; 第一组测点坐标记为 $\mathbf{x}_{m'}^{\text{meas}}$, $m'=1, 2, \dots, M'$, $M' = \lceil M/2 \rceil$; 第二组测点坐标记为 $\mathbf{x}_{m''}^{\text{meas}}$, $m''=1, 2, \dots, M''$, $M'' = \lfloor M/2 \rfloor$, 其中, $\lceil \cdot \rceil$ 和 $\lfloor \cdot \rfloor$ 分别表示向上取整和向下取整;

设定基函数展开项数 J 可能取值的上限为 $J_{\max}$, 即 $1 \leq J \leq J_{\max}$; 对于该范围内的任意 J , 根据式 (2), 全息测量面的第一组测点采集的声压值可以表示为如下矩阵形式:

$$\{\mathbf{p}_{\text{half}}(\mathbf{x}_{m'}^{\text{meas}}; \omega)\}_{M' \times 1} = [\Psi_{\text{half}}(\mathbf{x}_{m'}^{\text{meas}}; \omega)]_{M' \times J} \{\mathbf{C}(\omega)\}_{J \times 1} \quad (11)$$

其中, $\{\mathbf{p}_{\text{half}}(\mathbf{x}_{m'}^{\text{meas}}; \omega)\}_{M' \times 1}$ 为半空间总声压测量值组成的列向量:

$$\{\mathbf{p}_{\text{half}}(\mathbf{x}_{m'}^{\text{meas}}; \omega)\}_{M' \times 1} = \{p_{\text{half}}(\mathbf{x}_1^{\text{meas}}; \omega), \dots, p_{\text{half}}(\mathbf{x}_{m'}^{\text{meas}}; \omega), \dots, p_{\text{half}}(\mathbf{x}_{M'}^{\text{meas}}; \omega)\}_{M' \times 1}^T \quad (12)$$

其中, 上标 T 为向量转置; $\{\mathbf{C}(\omega)\}_{J \times 1}$ 为半空间球面波基函数系数组成的列向量:

$$\{\mathbf{C}(\omega)\}_{J \times 1} = \{c_1(\omega), \dots, c_j(\omega), \dots, c_J(\omega)\}_{J \times 1}^T \quad (13)$$

$[\Psi_{\text{half}}(\mathbf{x}_{m'}^{\text{meas}}; \omega)]_{M' \times J}$ 为半空间球面波基函数在各测点的展开项组成的矩阵:

$$[\Psi_{\text{half}}(\mathbf{x}_{m'}^{\text{meas}}; \omega)]_{M' \times J} = \begin{bmatrix} \psi_{1\text{half}}(\mathbf{x}_1^{\text{meas}}; \omega) & \cdots & \psi_{j\text{half}}(\mathbf{x}_1^{\text{meas}}; \omega) & \cdots & \psi_{J\text{half}}(\mathbf{x}_1^{\text{meas}}; \omega) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \psi_{1\text{half}}(\mathbf{x}_{m'}^{\text{meas}}; \omega) & \cdots & \psi_{j\text{half}}(\mathbf{x}_{m'}^{\text{meas}}; \omega) & \cdots & \psi_{J\text{half}}(\mathbf{x}_{m'}^{\text{meas}}; \omega) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \psi_{1\text{half}}(\mathbf{x}_{M'}^{\text{meas}}; \omega) & \cdots & \psi_{j\text{half}}(\mathbf{x}_{M'}^{\text{meas}}; \omega) & \cdots & \psi_{J\text{half}}(\mathbf{x}_{M'}^{\text{meas}}; \omega) \end{bmatrix}_{M' \times J} \quad (14)$$

对式 (11) 求解, 可得系数列向量:

$$\{\mathbf{C}(\omega)\}_{J \times 1} = [\Psi_{\text{half}}(\mathbf{x}_{m'}^{\text{meas}}; \omega)]_{J \times M'}^\dagger \{\mathbf{p}_{\text{half}}(\mathbf{x}_{m'}^{\text{meas}}; \omega)\}_{M' \times 1} \quad (15)$$

其中,上标 $\dagger$ 表示对矩阵求伪逆,

$$\begin{aligned} \left[\Psi_{\text{half}}(\mathbf{x}_{m'}^{\text{meas}}; \omega) \right]_{J \times M'}^{\dagger} &= \left(\left[\Psi_{\text{half}}(\mathbf{x}_{m'}^{\text{meas}}; \omega) \right]_{J \times M'}^H \left[\Psi_{\text{half}}(\mathbf{x}_{m'}^{\text{meas}}; \omega) \right]_{M' \times J} \right)^{-1} \\ &\quad \times \left[\Psi_{\text{half}}(\mathbf{x}_{m'}^{\text{meas}}; \omega) \right]_{J \times M'}^H \end{aligned} \quad (16)$$

其中,上标H为矩阵的共轭转置;

当系数列向量 $\{C(\omega)\}_{J \times 1}$ 确定之后,可以进一步重构第二组测点的声压:

$$\left\{ \mathbf{p}_{\text{half}}(\mathbf{x}_{m'}^{\text{rec}}; \omega) \right\}_{M' \times 1} = \left[\Psi_{\text{half}}(\mathbf{x}_{m'}^{\text{rec}}; \omega) \right]_{M' \times J} \{C(\omega)\}_{J \times 1} \quad (17)$$

并计算第二组测点的声压重构值与测量值之间的相对误差:

$$\varepsilon = \frac{\left\| \left\{ \mathbf{p}_{\text{half}}(\mathbf{x}_{m'}^{\text{rec}}; \omega) \right\} - \left\{ \mathbf{p}_{\text{half}}(\mathbf{x}_{m'}^{\text{meas}}; \omega) \right\} \right\|_2}{\left\| \left\{ \mathbf{p}_{\text{half}}(\mathbf{x}_{m'}^{\text{meas}}; \omega) \right\} \right\|_2} \times 100\% \quad (18)$$

其中, $\|\cdot\|_2$ 为向量的2-范数;

从 $1 \sim J_{\max}$ 遍历所有的J,利用式(11)~式(18),计算相对误差 ε ,将 ε 最小值对应的展开项数确定为最优展开项数 J_{opt} ;

S4.在最优展开项数条件下求解半空间球面波基函数系数,获取表述声源直接辐射声场的自由空间球面波基函数系数,实现声源直接辐射声场的重构;

设定基函数展开项数为 J_{opt} ,根据式(2),全息测量面采集的声压值可以表示为如下矩阵形式:

$$\left\{ \mathbf{p}_{\text{half}}(\mathbf{x}_m^{\text{meas}}; \omega) \right\}_{M \times 1} = \left[\Psi_{\text{half}}(\mathbf{x}_m^{\text{meas}}; \omega) \right]_{M \times J_{\text{opt}}} \{C(\omega)\}_{J_{\text{opt}} \times 1} \quad (19)$$

对式(19)求伪逆以求解系数列向量 $\{C(\omega)\}_{J_{\text{opt}} \times 1}$,

$$\{C(\omega)\}_{J_{\text{opt}} \times 1} = \left[\Psi_{\text{half}}(\mathbf{x}_m^{\text{meas}}; \omega) \right]_{J_{\text{opt}} \times M}^{\dagger} \left\{ \mathbf{p}_{\text{half}}(\mathbf{x}_m^{\text{meas}}; \omega) \right\}_{M \times 1} \quad (20)$$

从而,可得声压重构面上声源直接辐射声压的重构值:

$$\left\{ \mathbf{p}(\mathbf{x}_s^{\text{rec}}; \omega) \right\}_{S \times 1} = \left[\Psi(\mathbf{x}_s^{\text{rec}} | \mathbf{x}_s^{\text{rec}} - h_s \mathbf{e}_z; \omega) \right]_{S \times J_{\text{opt}}} \{C(\omega)\}_{J_{\text{opt}} \times 1} \quad (21)$$

其中, $\mathbf{x}_s^{\text{rec}}$ 为声压重构点坐标, $s=1,2,\dots,S$,S为重构点数目; $\left[\Psi(\mathbf{x}_s^{\text{rec}} | \mathbf{x}_s^{\text{rec}} - h_s \mathbf{e}_z; \omega) \right]_{S \times J_{\text{opt}}}$

为自由空间球面波基函数在重构点 $\mathbf{x}_s^{\text{rec}}$ 的展开项组成的矩阵:

$$\begin{aligned}
& \left[\Psi \left(\mathbf{x}_s^{\text{rec}} \middle| \mathbf{x}_s^{\text{rec}} - h_s \mathbf{e}_z; \omega \right) \right]_{S \times J_{\text{opt}}} \\
& = \begin{bmatrix} \psi_1 \left(\mathbf{x}_1^{\text{rec}} \middle| \mathbf{x}_1^{\text{rec}} - h_s \mathbf{e}_z; \omega \right) & \cdots & \psi_j \left(\mathbf{x}_1^{\text{rec}} \middle| \mathbf{x}_1^{\text{rec}} - h_s \mathbf{e}_z; \omega \right) & \cdots & \psi_{J_{\text{opt}}} \left(\mathbf{x}_1^{\text{rec}} \middle| \mathbf{x}_1^{\text{rec}} - h_s \mathbf{e}_z; \omega \right) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \psi_1 \left(\mathbf{x}_s^{\text{rec}} \middle| \mathbf{x}_s^{\text{rec}} - h_s \mathbf{e}_z; \omega \right) & \cdots & \psi_j \left(\mathbf{x}_s^{\text{rec}} \middle| \mathbf{x}_s^{\text{rec}} - h_s \mathbf{e}_z; \omega \right) & \cdots & \psi_{J_{\text{opt}}} \left(\mathbf{x}_s^{\text{rec}} \middle| \mathbf{x}_s^{\text{rec}} - h_s \mathbf{e}_z; \omega \right) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \psi_1 \left(\mathbf{x}_S^{\text{rec}} \middle| \mathbf{x}_S^{\text{rec}} - h_s \mathbf{e}_z; \omega \right) & \cdots & \psi_j \left(\mathbf{x}_S^{\text{rec}} \middle| \mathbf{x}_S^{\text{rec}} - h_s \mathbf{e}_z; \omega \right) & \cdots & \psi_{J_{\text{opt}}} \left(\mathbf{x}_S^{\text{rec}} \middle| \mathbf{x}_S^{\text{rec}} - h_s \mathbf{e}_z; \omega \right) \end{bmatrix}_{S \times J_{\text{opt}}} \\
& \quad (22)。
\end{aligned}$$

2. 如权利要求1所述的半开放空间中重构声源直接辐射声场的方法, 其特征在于: 步骤S2所述的声压传感器, 根据声源所在流体介质的不同, 采用传声器或水听器。

半开放空间中重构声源直接辐射声场的方法

技术领域：

[0001] 本发明涉及在含有平面反射边界的半开放空间中,利用传感器阵列测量由声源直接辐射与平面边界反射叠加的总声学量分布,获得声源的直接辐射声学量分布的方法。属于声源识别定位、声场成像、近场声全息、声波分离以及噪声控制技术领域。

背景技术：

[0002] 声源辐射声学量的测量和评估一般需要在全消声或半消声标准环境中进行。对于大尺寸、复杂装备而言,通常没有这样的理想声学测量环境。例如,大型舰船的声辐射测试通常只能于存在反射边界的船坞或码头中进行。在这种情况下,受到边界反射污染的声学测量值既不能如实反映声源在测点处的辐射量级,也不能结合建立在自由空间中的近场声全息方法,来重构声源在三维空间中的外辐射声学量分布。

[0003] 基于傅里叶声学法的半空间声场重构方法仅适用于全息测量面为规则的几何形状(平面、柱面或者球面)的情形。基于逆边界元法和等效源法的半空间声场重构方法需要针对声源表面设置大量离散节点和等效源点,由此而引出巨大测点数目和求逆计算量的需求。

发明内容：

[0004] 本发明要克服现有技术的上述缺点,提供一种半开放空间中重构声源直接辐射声场的方法。

[0005] 本发明可以在含有反射边界的半开放空间中,实现声源直接辐射声场的重构。

[0006] 本发明将声源直接辐射与平面边界反射声贡献的总声压场表述为一组半空间球面波基函数的线性叠加;在声源近场布置声压全息测量面,测得一组半空间总声压值,将其与半空间球面波基函数的线性叠加相匹配;通过求伪逆求解半空间球面波基函数系数;利用一组自由空间球面波基函数与求得的基函数系数重构声源在全息测量面或者任意场点处的直接辐射声压值,实现声场的重构。

[0007] 半开放空间的平面边界为局部反应(Locally Reaction)边界,其边界声阻抗率是与声波入射角和入射声波波前无关的常量,且为已知量。

[0008] 构造半空间球面波基函数的基础,是利用最速下降法(Steepest Descent Method)求解非齐次Helmholtz方程和边界条件得到的多极子声源在半开放空间中激励的声压场的解析解。

[0009] 解析解的表达式中包含三个叠加项,分别表述多极子直接辐射声、关于边界的镜像多极子辐射声和边界声。

[0010] 表述总声压场的一组半空间球面波基函数与表述声源直接辐射声压场的一组自由空间球面波基函数共用同一组基函数系数。

[0011] 本发明适用于具有任意几何形状的声源,声压全息测量面可以是不规则的单层测量面。

[0012] 本发明的半开放空间中重构声源直接辐射声场的方法,包含以下内容:

[0013] 1.建立以半空间球面波基函数的线性叠加表述声源直接辐射与边界反射声贡献的总声压场的数学模型;

[0014] 以声源几何中心 O_1 在边界上的投影 O 为原点建立全局坐标系, O_1 的全局坐标记为 $x_{O1} = (0, 0, h_s)$, h_s 为 O_1 到边界的距离; O_1 关于边界的镜像点记为 O_2 。通过对全局坐标系平移,以 O_1 和 O_2 分别为原点建立局部坐标系,场点 x 在两局部坐标系中的坐标分别记为 $x_1 = (r_1, \theta_1, \phi_1)$ 和 $x_2 = (r_2, \theta_2, \phi_2)$,三者之间满足如下关系:

$$[0015] \quad x_1 = x - h_s e_z, x_2 = x + h_s e_z \quad (1)$$

[0016] 其中, e_z 为 z -向单位向量。

[0017] 对于稳态声场,场点 x 处的半空间总声压 $p_{\text{half}}(x; \omega)$ 可以表述为有限项半空间球面波基函数的线性叠加:

$$[0018] \quad p_{\text{half}}(x; \omega) \approx \sum_{j=1}^J c_j(\omega) \psi_{j\text{half}}(x; \omega) \quad (2)$$

[0019] 其中, ω 为声波角频率; $\psi_{j\text{half}}(x; \omega)$ 为半空间球面波基函数; $c_j(\omega)$ 为基函数展开项系数; j 为展开项序数, J 为展开项项数。半空间球面波基函数 $\psi_{j\text{half}}(x; \omega)$ 的表达式为:

$$[0020] \quad \psi_{j\text{half}}(x; \omega) = \psi_j(x|x-h_s e_z; \omega) + \psi_j(x|x+h_s e_z; \omega) + \xi_j(x|x+h_s e_z; \omega) \quad (3)$$

[0021] 其中, $\psi_j(x|x-h_s e_z; \omega)$ 和 $\psi_j(x|x+h_s e_z; \omega)$ 分别为表述声源及其镜像虚源直接辐射声的第 j 项自由空间球面波基函数。在球面坐标系中, ψ_j 的表达式为:

$$[0022] \quad \psi_j(x; \omega) \equiv \psi_{nl}(r, \theta, \phi) = h_n^{(1)}(kr) Y_n^l(\theta, \phi) \quad (4)$$

[0023] 其中, $h_n^{(1)}(kr)$ 为第一类球汉克尔函数, $k = \omega/c$ 为声波波数, c 为声速; $Y_n^l(\theta, \phi)$ 为球谐函数。在式(2)~式(4)中,整数 n, l 和 j 满足关系式 $j = n^2 + n + 1 + 1$,其中, $-n \leq l \leq n, 0 \leq n \leq N$, N 为 n 的截断值。在计算式(3)时,其右边的前两项分别代入局部坐标 x_1 和 x_2 进行计算。 $\xi_j(x|x+h_s e_z; \omega)$ 表述边界声,其表达式为:

$$[0024] \quad \xi_j(x|x+h_s e_z; \omega) = (-i)^{n+1} (1 - R_p(\theta_2; \omega)) \left[Y_n^l(\mu_p, \phi_2) F(w) - Y_n^l(\theta_2, \phi_2) \right] \frac{e^{ikr_2}}{kr_2} \quad (5)$$

[0025] 其中,

$$[0026] \quad R_p(\theta_2; \omega) = \frac{\cos \theta_2 - \beta}{\cos \theta_2 + \beta} \quad (6)$$

$$[0027] \quad F(w) = 1 + i\sqrt{\pi} w e^{-w^2} \text{erfc}(-iw) \quad (7)$$

[0028] 以及

$$[0029] \quad w = \left(\frac{1}{2} i k r_2 \right)^{1/2} (\beta + \cos \theta_2) \quad (8)$$

[0030] 在式(5)~式(8)中, $R_p(\theta_2; \omega)$ 、 $F(w)$ 和 w 分别为声压反射系数、边界损失因子和数值间距;局部坐标 r_1 和 r_2 分别为声源几何中心和镜像虚源几何中心到场点的距离; θ_2 为声波入射角,为场点和虚源几何中心的连线与 z -轴正方向的夹角; $i = \sqrt{-1}$;复角 μ_p 为:

$$[0031] \quad \mu_p = \frac{\pi}{2} + \cos^{-1} \sqrt{1 - \beta^2} \quad (9)$$

[0032] 其中, β 为归一化的边界声导纳,

$$[0033] \quad \beta = \frac{\rho_0 c}{Z} = \frac{1}{Z_0} \quad (10)$$

[0034] 其中, Z 为边界声阻抗率, Z_0 为归一化的边界声阻抗率, ρ_0 为流体介质密度。本方法的实施假定声阻抗率 Z_0 为已知量, Z_0 可以根据声阻抗的原位测量方法获取。

[0035] 2. 在声源近场布置全息测量面进行声压全息测量; 在声源近场布置一组声压传感器, 形成声压全息测量面, 测量声源直接辐射声与边界反射声共同贡献的总声压分布, 其中, 根据声源所在流体介质的不同, 本方法采用的声压传感器可以是传声器、水听器或其它类型的传感器。

[0036] 3. 以部分测点的全息测量值作为输入, 重构其余测点的声压值, 以声压重构误差为最小为原则确定最优基函数展开项数; 将全息测量面上的测点坐标记为 $\mathbf{x}_m^{\text{meas}}, m=1, 2, \dots, M$, M 为声压测点数目。按照隔点取点的方式, 将声压测点分为两组。第一组测点坐标记为 $\mathbf{x}_{m'}^{\text{meas}}, m'=1, 2, \dots, M', M'=\lceil M/2 \rceil$; 第二组测点坐标记为 $\mathbf{x}_{m''}^{\text{meas}}, m''=1, 2, \dots, M'', M''=\lfloor M/2 \rfloor$, 其中, $\lceil \cdot \rceil$ 和 $\lfloor \cdot \rfloor$ 分别表示向上取整和向下取整。

[0037] 设定基函数展开项数 J 可能取值的上限为 $J_{\max}$, 即 $1 \leq J \leq J_{\max}$ 。对于该范围内的任意 J , 根据式 (2), 全息测量面的第一组测点采集的声压值可以表示为如下矩阵形式:

$$[0038] \quad \left\{ \mathbf{p}_{\text{half}}(\mathbf{x}_{m'}^{\text{meas}}; \omega) \right\}_{M' \times 1} = \left[\Psi_{\text{half}}(\mathbf{x}_{m'}^{\text{meas}}; \omega) \right]_{M' \times J} \{ \mathbf{C}(\omega) \}_{J \times 1} \quad (11)$$

[0039] 其中, $\left\{ \mathbf{p}_{\text{half}}(\mathbf{x}_{m'}^{\text{meas}}; \omega) \right\}_{M' \times 1}$ 为半空间总声压测量值组成的列向量:

$$[0040] \quad \left\{ \mathbf{p}_{\text{half}}(\mathbf{x}_{m'}^{\text{meas}}; \omega) \right\}_{M' \times 1} = \left\{ p_{\text{half}}(\mathbf{x}_1^{\text{meas}}; \omega), \dots, p_{\text{half}}(\mathbf{x}_{m'}^{\text{meas}}; \omega), \dots, p_{\text{half}}(\mathbf{x}_{M'}^{\text{meas}}; \omega) \right\}_{M' \times 1}^T \quad (12)$$

[0041] 其中, 上标 T 为向量转置。 $\{ \mathbf{C}(\omega) \}_{J \times 1}$ 为半空间球面波基函数系数组成的列向量:

$$[0042] \quad \{ \mathbf{C}(\omega) \}_{J \times 1} = \{ c_1(\omega), \dots, c_j(\omega), \dots, c_J(\omega) \}_{J \times 1}^T \quad (13)$$

[0043] $\left[\Psi_{\text{half}}(\mathbf{x}_{m'}^{\text{meas}}; \omega) \right]_{M' \times J}$ 为半空间球面波基函数在各测点的展开项组成的矩阵:

$$[0044] \quad \left[\Psi_{\text{half}}(\mathbf{x}_{m'}^{\text{meas}}; \omega) \right]_{M' \times J} = \begin{bmatrix} \psi_{1\text{half}}(\mathbf{x}_1^{\text{meas}}; \omega) & \cdots & \psi_{j\text{half}}(\mathbf{x}_1^{\text{meas}}; \omega) & \cdots & \psi_{J\text{half}}(\mathbf{x}_1^{\text{meas}}; \omega) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \psi_{1\text{half}}(\mathbf{x}_{m'}^{\text{meas}}; \omega) & \cdots & \psi_{j\text{half}}(\mathbf{x}_{m'}^{\text{meas}}; \omega) & \cdots & \psi_{J\text{half}}(\mathbf{x}_{m'}^{\text{meas}}; \omega) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \psi_{1\text{half}}(\mathbf{x}_{M'}^{\text{meas}}; \omega) & \cdots & \psi_{j\text{half}}(\mathbf{x}_{M'}^{\text{meas}}; \omega) & \cdots & \psi_{J\text{half}}(\mathbf{x}_{M'}^{\text{meas}}; \omega) \end{bmatrix}_{M' \times J} \quad (14)$$

[0045] 对式 (11) 求解, 可得系数列向量:

$$[0046] \quad \{ \mathbf{C}(\omega) \}_{J \times 1} = \left[\Psi_{\text{half}}(\mathbf{x}_{m'}^{\text{meas}}; \omega) \right]_{J \times M'}^\dagger \left\{ \mathbf{p}_{\text{half}}(\mathbf{x}_{m'}^{\text{meas}}; \omega) \right\}_{M' \times 1} \quad (15)$$

[0047] 其中, 上标 $\dagger$ 表示对矩阵求伪逆,

$$[0048] \quad \left[\Psi_{\text{half}}(\mathbf{x}_{m'}^{\text{meas}}; \omega) \right]_{J \times M'}^{\dagger} = \left(\left[\Psi_{\text{half}}(\mathbf{x}_{m'}^{\text{meas}}; \omega) \right]_{J \times M'}^H \left[\Psi_{\text{half}}(\mathbf{x}_{m'}^{\text{meas}}; \omega) \right]_{M' \times J} \right)^{-1} \times \left[\Psi_{\text{half}}(\mathbf{x}_{m'}^{\text{meas}}; \omega) \right]_{J \times M'}^H, \quad (16)$$

[0049] 其中,上标H为矩阵的共轭转置。

[0050] 当系数列向量 $\{C(\omega)\}_{J \times 1}$ 确定之后,可以进一步重构第二组测点的声压:

$$[0051] \quad \left\{ \mathbf{p}_{\text{half}}(\mathbf{x}_{m'}^{\text{rec}}; \omega) \right\}_{M' \times 1} = \left[\Psi_{\text{half}}(\mathbf{x}_{m'}^{\text{rec}}; \omega) \right]_{M' \times J} \{C(\omega)\}_{J \times 1} \quad (17)$$

[0052] 并计算第二组测点的声压重构值与测量值之间的相对误差:

$$[0053] \quad \varepsilon = \frac{\left\| \left\{ \mathbf{p}_{\text{half}}(\mathbf{x}_{m'}^{\text{rec}}; \omega) \right\} - \left\{ \mathbf{p}_{\text{half}}(\mathbf{x}_{m'}^{\text{meas}}; \omega) \right\} \right\|_2}{\left\| \left\{ \mathbf{p}_{\text{half}}(\mathbf{x}_{m'}^{\text{meas}}; \omega) \right\} \right\|_2} \times 100\% \quad (18)$$

[0054] 其中, $\|\cdot\|_2$ 为向量的2-范数。

[0055] 从1 ~ $J_{\max}$ 遍历所有的J,利用式(11) ~ 式(18),计算相对误差 ε ,将 ε 最小值对应的展开项数确定为最优展开项数 J_{opt} 。

[0056] 4. 在最优展开项数条件下求解半空间球面波基函数系数,获取表述声源直接辐射声场的自由空间球面波基函数系数,实现声源直接辐射声场的重构;设定基函数展开项数为 J_{opt} ,根据式(2),全息测量面采集的声压值可以表示为如下矩阵形式:

$$[0057] \quad \left\{ \mathbf{p}_{\text{half}}(\mathbf{x}_m^{\text{meas}}; \omega) \right\}_{M \times 1} = \left[\Psi_{\text{half}}(\mathbf{x}_m^{\text{meas}}; \omega) \right]_{M \times J_{\text{opt}}} \{C(\omega)\}_{J_{\text{opt}} \times 1} \quad (19)$$

[0058] 对式(19)求伪逆以求解系数列向量 $\{C(\omega)\}_{J_{\text{opt}} \times 1}$,

$$[0059] \quad \{C(\omega)\}_{J_{\text{opt}} \times 1} = \left[\Psi_{\text{half}}(\mathbf{x}_m^{\text{meas}}; \omega) \right]_{J_{\text{opt}} \times M}^{\dagger} \left\{ \mathbf{p}_{\text{half}}(\mathbf{x}_m^{\text{meas}}; \omega) \right\}_{M \times 1} \quad (20)$$

[0060] 从而,可得声压重构面上声源直接辐射声压的重构值:

$$[0061] \quad \left\{ \mathbf{p}(\mathbf{x}_s^{\text{rec}}; \omega) \right\}_{S \times 1} = \left[\Psi(\mathbf{x}_s^{\text{rec}} | \mathbf{x}_s^{\text{rec}} - h_s \mathbf{e}_z; \omega) \right]_{S \times J_{\text{opt}}} \{C(\omega)\}_{J_{\text{opt}} \times 1} \quad (21)$$

[0062] 其中, $\mathbf{x}_s^{\text{rec}}$ 为声压重构点坐标, $s=1, 2, \dots, S$, S为重构点数目;

[0063] $\left[\Psi(\mathbf{x}_s^{\text{rec}} | \mathbf{x}_s^{\text{rec}} - h_s \mathbf{e}_z; \omega) \right]_{S \times J_{\text{opt}}}$ 为自由空间球面波基函数在重构点 $\mathbf{x}_s^{\text{rec}}$ 的展开项组成的矩阵:

$$[0064] \quad \left[\Psi(\mathbf{x}_s^{\text{rec}} | \mathbf{x}_s^{\text{rec}} - h_s \mathbf{e}_z; \omega) \right]_{S \times J_{\text{opt}}} = \begin{bmatrix} \psi_1(\mathbf{x}_1^{\text{rec}} | \mathbf{x}_1^{\text{rec}} - h_1 \mathbf{e}_z; \omega) & \cdots & \psi_j(\mathbf{x}_1^{\text{rec}} | \mathbf{x}_1^{\text{rec}} - h_j \mathbf{e}_z; \omega) & \cdots & \psi_{J_{\text{opt}}}(\mathbf{x}_1^{\text{rec}} | \mathbf{x}_1^{\text{rec}} - h_{J_{\text{opt}}} \mathbf{e}_z; \omega) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \psi_1(\mathbf{x}_s^{\text{rec}} | \mathbf{x}_s^{\text{rec}} - h_s \mathbf{e}_z; \omega) & \cdots & \psi_j(\mathbf{x}_s^{\text{rec}} | \mathbf{x}_s^{\text{rec}} - h_j \mathbf{e}_z; \omega) & \cdots & \psi_{J_{\text{opt}}}(\mathbf{x}_s^{\text{rec}} | \mathbf{x}_s^{\text{rec}} - h_{J_{\text{opt}}} \mathbf{e}_z; \omega) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \psi_1(\mathbf{x}_S^{\text{rec}} | \mathbf{x}_S^{\text{rec}} - h_S \mathbf{e}_z; \omega) & \cdots & \psi_j(\mathbf{x}_S^{\text{rec}} | \mathbf{x}_S^{\text{rec}} - h_j \mathbf{e}_z; \omega) & \cdots & \psi_{J_{\text{opt}}}(\mathbf{x}_S^{\text{rec}} | \mathbf{x}_S^{\text{rec}} - h_{J_{\text{opt}}} \mathbf{e}_z; \omega) \end{bmatrix}_{S \times J_{\text{opt}}} \quad (22)$$

[0065] 本发明在基于自由空间球面波基函数叠加表述声源辐射声场的数学模型基础上,以边界声阻抗作为参量,构造满足Helmholtz方程和边界条件的半空间球面波基函数,建立基于半空间球面波基函数叠加表述半空间总声场的数学模型。对含有平面边界的半开放空间中具有任意几何形状的结构声源的声场进行全息测量,通过逆向求解基函数系数,获取声源直接辐射声场的基函数系数,实现声源直接辐射声场的重构。

[0066] 本发明的有益效果:

[0067] 1.本发明提出的基于半空间球面波基函数叠加的数学模型,可以表述含有限阻抗边界的半开放空间声场,对于在不具备理想声学测量条件的情况下,实施结构声源,特别是大尺寸结构声源辐射的测量和评估,提供了数学基础。

[0068] 2.以阵列测量的半空间总声压分布,代入声场的数学模型进行求解,可以实现近场声全息方法能够实现的目的,即能够实现半开放空间中声场成像和结构声源的识别和定位。

[0069] 3.本发明适用于具有任意几何形状的结构声源,声压全息测量面可以是不规则的单层全息测量面。

附图说明:

[0070] 图1是声源和平面边界构成的半开放空间声场示意图;

[0071] 图2是声源及其镜像虚源的几何中心、场点和平面边界之间的几何关系;

[0072] 图3是选取最优展开项数时测点分组示意图;

[0073] 图4是脉动球声源、平面边界和水听器阵列组成的仿真声场示意图;

[0074] 图5是阵列上水听器的分布和编号规则示意图;

[0075] 图6是半空间总声压值、声源直接辐射声压重构值和声源直接辐射声压真实值在全息测点上的分布曲线。

具体实施方式:

[0076] 下面结合附图具体说明本发明的实施方式。

[0077] 本发明的半开放空间中重构声源直接辐射声场的方法的实施按以下步骤进行:

[0078] 步骤1,建立基于半空间球面波基函数叠加的声场数学模型。

[0079] 如图1和图2所示,以声源几何中心 O_1 在边界上的投影 O 为原点建立全局坐标系, O_1 的全局坐标记为 $\mathbf{x}_{O_1} = (0, 0, h_s)$, h_s 为 O_1 到边界的距离; O_1 关于边界的镜像点记为 O_2 。通过对全局坐标系平移,以 O_1 和 O_2 分别为原点建立局部坐标系,场点 $\mathbf{x}$ 在两局部坐标系中的坐标分别记为 $\mathbf{x}_1 = (r_1, \theta_1, \varphi_1)$ 和 $\mathbf{x}_2 = (r_2, \theta_2, \varphi_2)$,三者之间满足如下关系:

$$[0080] \quad \mathbf{x}_1 = \mathbf{x} - h_s \mathbf{e}_z, \mathbf{x}_2 = \mathbf{x} + h_s \mathbf{e}_z \quad (1)$$

[0081] 其中, $\mathbf{e}_z$ 为 z -向单位向量。

[0082] 对于稳态声场,场点 $\mathbf{x}$ 处的半空间总声压 $p_{\text{half}}(\mathbf{x}; \omega)$ 可以表述为有限项半空间球面波基函数的线性叠加:

$$[0083] \quad p_{\text{half}}(\mathbf{x}; \omega) \approx \sum_{j=1}^J c_j(\omega) \psi_{j\text{half}}(\mathbf{x}; \omega) \quad (2)$$

[0084] 其中, ω 为声波角频率; $\psi_{\text{jhalf}}(x; \omega)$ 为半空间球面波基函数; $c_j(\omega)$ 为基函数展开项系数; j 为展开项序数, J 为展开项项数。半空间球面波基函数 $\psi_{\text{jhalf}}(x; \omega)$ 的表达式为:

$$[0085] \quad \psi_{\text{jhalf}}(x; \omega) = \psi_j(x|x-h_s e_z; \omega) + \psi_j(x|x+h_s e_z; \omega) + \xi_j(x|x+h_s e_z; \omega) \quad (3)$$

[0086] 其中, $\psi_j(x|x-h_s e_z; \omega)$ 和 $\psi_j(x|x+h_s e_z; \omega)$ 分别为表述声源及其镜像虚源直接辐射声的第 j 项自由空间球面波基函数。在球面坐标系中, ψ_j 的表达式为:

$$[0087] \quad \psi_j(\mathbf{x}; \omega) \equiv \psi_{nl}(r, \theta, \phi) = h_n^{(1)}(kr) Y_n^l(\theta, \phi) \quad (4)$$

[0088] 其中, $h_n^{(1)}(kr)$ 为第一类球汉克尔函数, $k = \omega/c$ 为声波波数, c 为声速; $Y_n^l(\theta, \phi)$ 为球谐函数。在式 (2) ~ 式 (4) 中, 整数 n, l 和 j 满足关系式 $j = n^2 + n + 1$, 其中, $-n \leq l \leq n, 0 \leq n \leq N$, N 为 n 的截断值。在计算式 (3) 时, 其右边的前两项分别代入局部坐标 x_1 和 x_2 进行计算。 $\xi_j(x|x+h_s e_z; \omega)$ 表述边界声, 其表达式为:

$$[0089] \quad \xi_j(\mathbf{x}|\mathbf{x}+h_s \mathbf{e}_z; \omega) = (-i)^{n+1} (1 - R_p(\theta_2; \omega)) \left[Y_n^l(\mu_p, \phi_2) F(w) - Y_n^l(\theta_2, \phi_2) \right] \frac{e^{ikr_2}}{kr_2} \quad (5)$$

[0090] 其中,

$$[0091] \quad R_p(\theta_2; \omega) = \frac{\cos \theta_2 - \beta}{\cos \theta_2 + \beta} \quad (6)$$

$$[0092] \quad F(w) = 1 + i\sqrt{\pi} w e^{-w^2} \text{erfc}(-iw) \quad (7)$$

[0093] 以及

$$[0094] \quad w = \left(\frac{1}{2} i k r_2 \right)^{1/2} (\beta + \cos \theta_2) \quad (8)$$

[0095] 在式 (5) ~ 式 (8) 中, $R_p(\theta_2; \omega)$ 、 $F(w)$ 和 w 分别为声压反射系数、边界损失因子和数值间距; 局部坐标 r_1 和 r_2 分别为声源几何中心和镜像虚源几何中心到场点的距离; θ_2 为声波入射角, 为场点和虚源几何中心的连线与 z -轴正方向的夹角, 如图2所示; $i = \sqrt{-1}$; 复角 μ_p 为:

$$[0096] \quad \mu_p = \frac{\pi}{2} + \cos^{-1} \sqrt{1 - \beta^2} \quad (9)$$

[0097] 其中, β 为归一化的边界声导纳,

$$[0098] \quad \beta = \frac{\rho_0 c}{Z} = \frac{1}{Z_0} \quad (10)$$

[0099] 其中, Z 为边界声阻抗率, Z_0 为归一化的边界声阻抗率, ρ_0 为流体介质密度。本方法的实施假定声阻抗率 Z_0 为已知量, Z_0 可以根据声阻抗的原位测量方法获取。

[0100] 步骤2, 获取全息测量值。

[0101] 如图1所示, 在声源近场布置一组声压传感器, 形成声压全息测量面, 测量声源直接辐射声与边界反射声共同贡献的总声压分布, 其中, 根据声源所在流体介质的不同, 本方法采用的声压传感器可以是传声器、水听器或其它类型的传感器。

[0102] 步骤3, 选取半空间球面波基函数的最优展开项数。

[0103] 将全息测量面上的测点坐标记为 $\mathbf{x}_m^{\text{meas}}$, $m = 1, 2, \dots, M$, M 为声压测点数目。按照隔

点取点的方式,将声压测点分为两组。第一组测点坐标记为 $\mathbf{x}_{m'}^{\text{meas}}$, $m'=1,2,\dots,M'$, $M'=\lceil M/2 \rceil$; 第二组测点坐标记为 $\mathbf{x}_{m''}^{\text{meas}}$, $m''=1,2,\dots,M''$, $M''=\lfloor M/2 \rfloor$,其中, $\lceil \cdot \rceil$ 和 $\lfloor \cdot \rfloor$ 分别表示向上取整和向下取整。以6行6列均匀分布的声压测点组成的平面阵列为例,对测点进行分组,其示意图如图3所示。

[0104] 设定基函数展开项数 J 可能取值的上限为 $J_{\max}$,即 $1 \leq J \leq J_{\max}$ 。对于该范围内的任意 J ,根据式(2),全息测量面的第一组测点采集的声压值可以表示为如下矩阵形式:

$$[0105] \quad \{\mathbf{p}_{\text{half}}(\mathbf{x}_{m'}^{\text{meas}}; \omega)\}_{M' \times 1} = [\Psi_{\text{half}}(\mathbf{x}_{m'}^{\text{meas}}; \omega)]_{M' \times J} \{\mathbf{C}(\omega)\}_{J \times 1} \quad (11)$$

[0106] 其中, $\{\mathbf{p}_{\text{half}}(\mathbf{x}_{m'}^{\text{meas}}; \omega)\}_{M' \times 1}$ 为半空间总声压测量值组成的列向量:

$$[0107] \quad \{\mathbf{p}_{\text{half}}(\mathbf{x}_{m'}^{\text{meas}}; \omega)\}_{M' \times 1} = \{p_{\text{half}}(\mathbf{x}_1^{\text{meas}}; \omega), \dots, p_{\text{half}}(\mathbf{x}_{m'}^{\text{meas}}; \omega), \dots, p_{\text{half}}(\mathbf{x}_{M'}^{\text{meas}}; \omega)\}_{M' \times 1}^T \quad (12)$$

[0108] 其中,上标 T 为向量转置。 $\{\mathbf{C}(\omega)\}_{J \times 1}$ 为半空间球面波基函数系数组成的列向量:

$$[0109] \quad \{\mathbf{C}(\omega)\}_{J \times 1} = \{c_1(\omega), \dots, c_j(\omega), \dots, c_J(\omega)\}_{J \times 1}^T \quad (13)$$

[0110] $[\Psi_{\text{half}}(\mathbf{x}_{m'}^{\text{meas}}; \omega)]_{M' \times J}$ 为半空间球面波基函数在各测点的展开项组成的矩阵:

$$[0111] \quad [\Psi_{\text{half}}(\mathbf{x}_{m'}^{\text{meas}}; \omega)]_{M' \times J} = \begin{bmatrix} \psi_{1\text{half}}(\mathbf{x}_1^{\text{meas}}; \omega) & \cdots & \psi_{j\text{half}}(\mathbf{x}_1^{\text{meas}}; \omega) & \cdots & \psi_{J\text{half}}(\mathbf{x}_1^{\text{meas}}; \omega) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \psi_{1\text{half}}(\mathbf{x}_{m'}^{\text{meas}}; \omega) & \cdots & \psi_{j\text{half}}(\mathbf{x}_{m'}^{\text{meas}}; \omega) & \cdots & \psi_{J\text{half}}(\mathbf{x}_{m'}^{\text{meas}}; \omega) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \psi_{1\text{half}}(\mathbf{x}_{M'}^{\text{meas}}; \omega) & \cdots & \psi_{j\text{half}}(\mathbf{x}_{M'}^{\text{meas}}; \omega) & \cdots & \psi_{J\text{half}}(\mathbf{x}_{M'}^{\text{meas}}; \omega) \end{bmatrix}_{M' \times J} \quad (14)$$

[0112] 对式(11)求解,可得系数列向量:

$$[0113] \quad \{\mathbf{C}(\omega)\}_{J \times 1} = [\Psi_{\text{half}}(\mathbf{x}_{m'}^{\text{meas}}; \omega)]_{J \times M'}^{\dagger} \{\mathbf{p}_{\text{half}}(\mathbf{x}_{m'}^{\text{meas}}; \omega)\}_{M' \times 1} \quad (15)$$

[0114] 其中,上标 $\dagger$ 表示对矩阵求伪逆,

$$[0115] \quad [\Psi_{\text{half}}(\mathbf{x}_{m'}^{\text{meas}}; \omega)]_{J \times M'}^{\dagger} = \left([\Psi_{\text{half}}(\mathbf{x}_{m'}^{\text{meas}}; \omega)]_{J \times M'}^H [\Psi_{\text{half}}(\mathbf{x}_{m'}^{\text{meas}}; \omega)]_{M' \times J} \right)^{-1} \times [\Psi_{\text{half}}(\mathbf{x}_{m'}^{\text{meas}}; \omega)]_{J \times M'}^H, \quad (16)$$

[0116] 其中,上标 H 为矩阵的共轭转置。

[0117] 当系数列向量 $\{\mathbf{C}(\omega)\}_{J \times 1}$ 确定之后,可以进一步重构第二组测点的声压:

$$[0118] \quad \{\mathbf{p}_{\text{half}}(\mathbf{x}_{m''}^{\text{rec}}; \omega)\}_{M'' \times 1} = [\Psi_{\text{half}}(\mathbf{x}_{m''}^{\text{rec}}; \omega)]_{M'' \times J} \{\mathbf{C}(\omega)\}_{J \times 1} \quad (17)$$

[0119] 并计算第二组测点的声压重构值与测量值之间的相对误差:

$$[0120] \quad \varepsilon = \frac{\|\{\mathbf{p}_{\text{half}}(\mathbf{x}_{m''}^{\text{rec}}; \omega)\} - \{\mathbf{p}_{\text{half}}(\mathbf{x}_{m''}^{\text{meas}}; \omega)\}\|_2}{\|\{\mathbf{p}_{\text{half}}(\mathbf{x}_{m''}^{\text{meas}}; \omega)\}\|_2} \times 100\% \quad (18)$$

[0121] 其中, $\|\cdot\|_2$ 为向量的2-范数。

[0122] 从1 ~ $J_{\max}$ 遍历所有的J, 利用式 (11) ~ 式 (18), 计算相对误差 ε , 将 ε 最小值对应的展开项数确定为最优展开项数 J_{opt} 。

[0123] 步骤4, 重构声源的直接辐射声场。

[0124] 设定基函数展开项数为 J_{opt} , 根据式 (2), 全息测量面采集的声压值可以表示为如下矩阵形式:

$$[0125] \quad \left\{ \mathbf{p}_{\text{half}}(\mathbf{x}_m^{\text{meas}}; \omega) \right\}_{M \times 1} = \left[\Psi_{\text{half}}(\mathbf{x}_m^{\text{meas}}; \omega) \right]_{M \times J_{\text{opt}}} \left\{ \mathbf{C}(\omega) \right\}_{J_{\text{opt}} \times 1} \quad (19)$$

[0126] 对式 (19) 求伪逆以求解系数列向量 $\left\{ \mathbf{C}(\omega) \right\}_{J_{\text{opt}} \times 1}$,

$$[0127] \quad \left\{ \mathbf{C}(\omega) \right\}_{J_{\text{opt}} \times 1} = \left[\Psi_{\text{half}}(\mathbf{x}_m^{\text{meas}}; \omega) \right]_{J_{\text{opt}} \times M}^{\dagger} \left\{ \mathbf{p}_{\text{half}}(\mathbf{x}_m^{\text{meas}}; \omega) \right\}_{M \times 1} \quad (20)$$

[0128] 从而, 可得声压重构面上声源直接辐射声压的重构值:

$$[0129] \quad \left\{ \mathbf{p}(\mathbf{x}_s^{\text{rec}}; \omega) \right\}_{S \times 1} = \left[\Psi(\mathbf{x}_s^{\text{rec}} | \mathbf{x}_s^{\text{rec}} - h_s \mathbf{e}_z; \omega) \right]_{S \times J_{\text{opt}}} \left\{ \mathbf{C}(\omega) \right\}_{J_{\text{opt}} \times 1} \quad (21)$$

[0130] 其中, $\mathbf{x}_s^{\text{rec}}$ 为声压重构点坐标, $s=1, 2, \dots, S$, S 为重构点数目; $\left[\Psi(\mathbf{x}_s^{\text{rec}} | \mathbf{x}_s^{\text{rec}} - h_s \mathbf{e}_z; \omega) \right]_{S \times J_{\text{opt}}}$

为自由空间球面波基函数在重构点 $\mathbf{x}_s^{\text{rec}}$ 的展开项组成的矩阵:

$$[0131] \quad \left[\Psi(\mathbf{x}_s^{\text{rec}} | \mathbf{x}_s^{\text{rec}} - h_s \mathbf{e}_z; \omega) \right]_{S \times J_{\text{opt}}} = \begin{bmatrix} \psi_1(\mathbf{x}_1^{\text{rec}} | \mathbf{x}_1^{\text{rec}} - h_1 \mathbf{e}_z; \omega) & \cdots & \psi_j(\mathbf{x}_1^{\text{rec}} | \mathbf{x}_1^{\text{rec}} - h_1 \mathbf{e}_z; \omega) & \cdots & \psi_{J_{\text{opt}}}(\mathbf{x}_1^{\text{rec}} | \mathbf{x}_1^{\text{rec}} - h_1 \mathbf{e}_z; \omega) \\ \vdots & & \ddots & & \vdots \\ \psi_1(\mathbf{x}_s^{\text{rec}} | \mathbf{x}_s^{\text{rec}} - h_s \mathbf{e}_z; \omega) & \cdots & \psi_j(\mathbf{x}_s^{\text{rec}} | \mathbf{x}_s^{\text{rec}} - h_s \mathbf{e}_z; \omega) & \cdots & \psi_{J_{\text{opt}}}(\mathbf{x}_s^{\text{rec}} | \mathbf{x}_s^{\text{rec}} - h_s \mathbf{e}_z; \omega) \\ \vdots & & \ddots & & \vdots \\ \psi_1(\mathbf{x}_S^{\text{rec}} | \mathbf{x}_S^{\text{rec}} - h_S \mathbf{e}_z; \omega) & \cdots & \psi_j(\mathbf{x}_S^{\text{rec}} | \mathbf{x}_S^{\text{rec}} - h_S \mathbf{e}_z; \omega) & \cdots & \psi_{J_{\text{opt}}}(\mathbf{x}_S^{\text{rec}} | \mathbf{x}_S^{\text{rec}} - h_S \mathbf{e}_z; \omega) \end{bmatrix}_{S \times J_{\text{opt}}} \quad (22)$$

[0132] 实施例: 脉动球声源和平面边界的布置如图4所示, 其中, 边界位于 $z=0$ 平面, 声阻抗率 $Z_0=2+3i$; 脉动球的半径 $a=0.05\text{m}$, 其几何中心 O_1 的坐标 $\mathbf{x}_{O_1}=(0,0,0.3\text{m})$, 表面质点径向振动速度 $V_0=0.01\text{m/s}$, 频率 $f=3000\text{Hz}$; 使用平面水听器阵列进行声压全息测量, 阵列面与 x -轴垂直, 其几何中心与球心 O_1 的连线垂直于阵列面, 距离球心 $d_s=0.15\text{m}$; 阵列孔径 $0.15\text{m} \times 0.15\text{m}$, 由 6×6 个测点组成, 相邻测点间距为 0.03m 。为了便于描述和分析计算结果, 对36个测点依次编号, 如图5所示, 其中, 第1号测点坐标为 $(0.150\text{m}, -0.075\text{m}, 0.375\text{m})$, 第36号测点坐标为 $(0.150\text{m}, 0.075\text{m}, 0.225\text{m})$ 。水介质密度为 $\rho_0=1000\text{kg/m}^3$, 声速为 $c=1500\text{m/s}$ 。模拟水听器测量误差的影响, 对测量值附加信噪比为30dB的高斯白噪声。

[0133] 图6所示为各测点处的无量纲声压幅值 $|p/\rho_0 c V_0|$ 的分布, 包括半空间总声压值、声源直接辐射声压的重构值和声源直接辐射声压的真实值。观察图6发现, 声源直接辐射声压的重构值与真实值能够很好地吻合。结果表明, 本发明能够实现半开放空间中声源直接辐射声场的重构。

[0134] 本说明书实施例所述的内容仅仅是对发明构思的实现形式的案例之一。本发明的保护范围包含但不限于实施例所陈述的具体形式和参数,也包含本领域技术人员根据本发明构思所能够想到的同等技术手段。

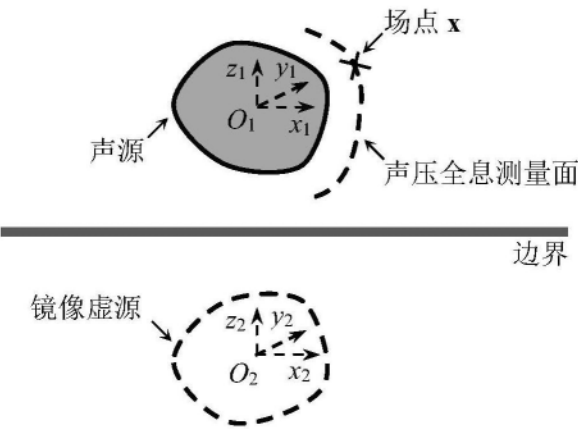


图1

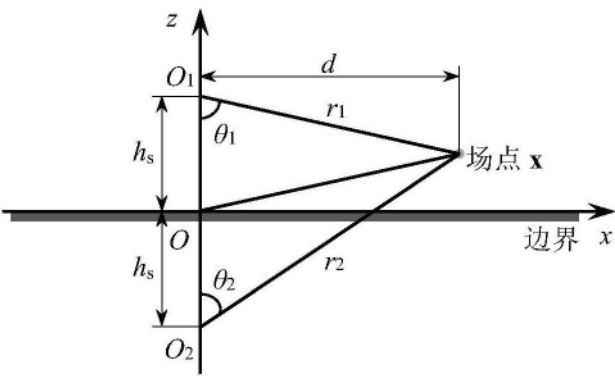


图2

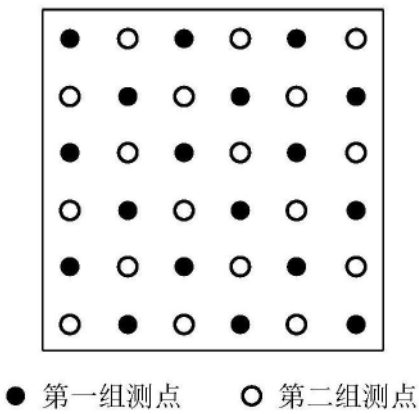


图3

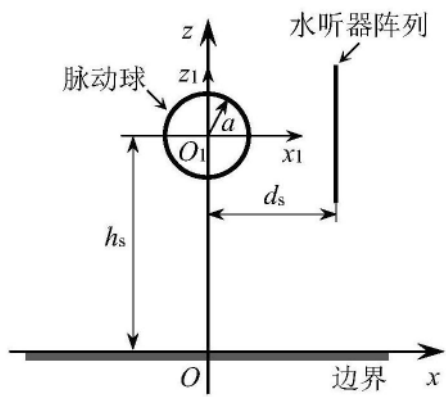


图4

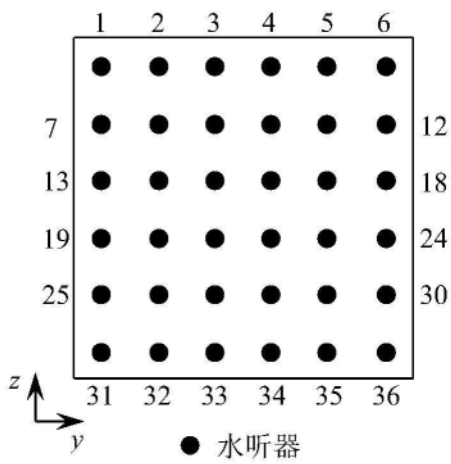


图5

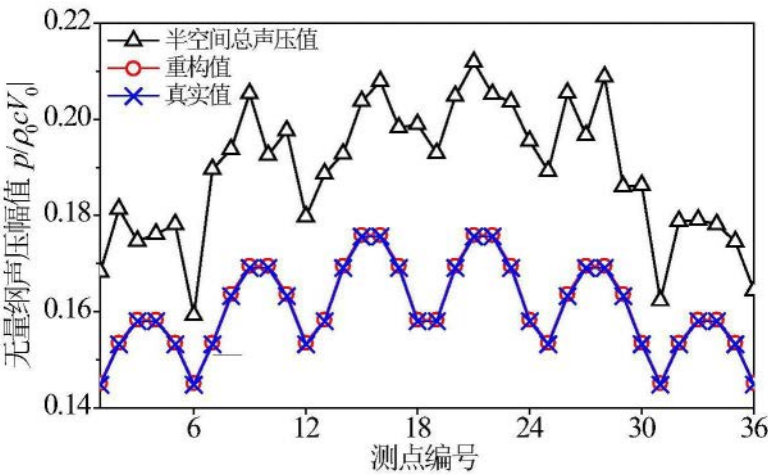


图6