



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 108226866 A

(43)申请公布日 2018.06.29

(21)申请号 201711332032.1

(22)申请日 2017.12.13

(71)申请人 贵州航天计量测试技术研究所
地址 550009 贵州省贵阳市小河区红河路7号

(72)发明人 丁丹丹 徐军 成建宏

(74)专利代理机构 贵阳中新专利商标事务所
52100

代理人 商小川

(51) Int. Cl.
G01S 5/18(2006.01)

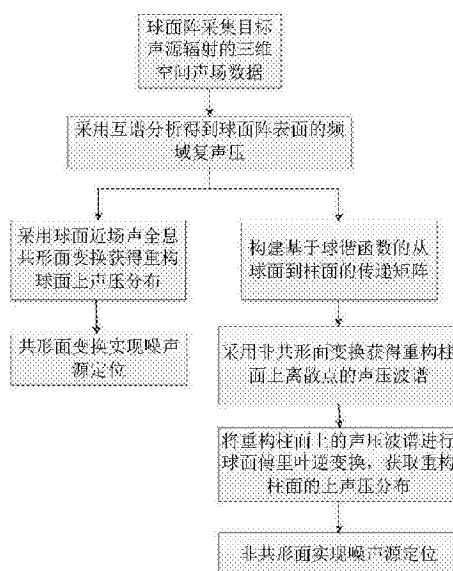
权利要求书3页 说明书7页 附图3页

(54)发明名称

基于球谐函数展开的非共形面变换噪声源的定位方法

(57)摘要

本发明公开了一种基于球谐函数展开的非共形面变换噪声源的定位方法,利用球谐函数展开构造球面到柱面的传递矩阵,将球面阵测量数据重构到柱面结构,从而可对柱形结构中噪声源或类柱形噪声源进行精准有效的定位,与现有技术相比,本发明具有以下优点:1)球面阵经纬角全指向性和三维对称性,能一次性测量三维空间各个方向的声场信息。2)构建从球面到柱面的传递矩阵,能够将球面阵测量数据通过声全息算法重构到柱面,实现对类柱形声源或柱形结构中的噪声源的定位问题。



1. 一种基于球谐函数展开的非共形面变换噪声源的定位方法,其特征在于:包括以下步骤:

(1) 采用阵元数为Q的球形传声器阵列对目标声源辐射到三维空间的声压信号进行采集 $P(r, t)$;

(2) 对球形阵的Q个传声器数据分别和第1个传声器数据进行互谱分析,获取整个球形阵的频域复声压 $P(r, \theta, \phi)$;

(3) 基于球形阵的频域复声压,利用球面近场声全息算法重构声源附近表面的声压 $p(r_s, \theta, \phi)$,通过该声压分布确定噪声源在球坐标下的位置;

(4) 根据球坐标系和柱坐标系的转换关系构造球面到圆柱面的传递矩阵W和U;

(5) 求解重构圆柱面所有离散化点的球面波谱组成的矩阵 P_{cylinder} ;

(6) 对重构圆柱面所有离散化点的球面波谱进行傅里叶逆变换,得到重构柱面上每一离散点的声压分布 $P(r_s, \theta, \phi)$;

(7) 通过柱面离散点的声压分布来确定类柱形声源或柱形空间中的噪声源位置。

2. 根据权利要求1所述的基于球谐函数展开的非共形面变换噪声源的定位方法,其特征在于:所述步骤(1)中由Q个球面传声器组成球形阵列整个球形阵测量数据的复声压数据为:

$$\begin{aligned} \mathbf{P}(r, t) &= [p_1(r_{10}, t), \dots, p_q(r_{q0}, t), \dots, p_Q(r_{Q0}, t)] \\ &= P_0 e^{i\omega t} \left[\frac{1}{r_{10}} e^{ikr_{10}}, \dots, \frac{1}{r_{q0}} e^{ikr_{q0}}, \dots, \frac{1}{r_{Q0}} e^{ikr_{Q0}} \right] \end{aligned}$$

其中:以随机球形阵中心为坐标原点(0,0,0);

球形阵阵元个数Q,阵元编号为1, ..., q, ..., Q,第q个传声器的空间坐标为 (x_q, y_q, z_q) ;

P_0 为距离点声源1m处的声压幅值,pa;

$r_{q0} = \sqrt{(x_q - x_0)^2 + (y_q - y_0)^2 + (z_q - z_0)^2}$ 为第q个传声器到点声源 (x_0, y_0, z_0) 的距离,m;

ω 为角频率,rad/s;t为时间点,s;k为波数。

3. 根据权利要求1所述的基于球谐函数展开的非共形面变换噪声源的定位方法,其特征在于:所述步骤(2)中对球形阵的Q个传声器数据分别和第1个传声器数据进行互谱分析,获取整个球形阵的频域复声压为:

$$\mathbf{P}(r, \theta, \phi) = P_0 \left[\frac{1}{r_{10}} e^{ikr_{10}}, \dots, \frac{1}{r_{q0}} e^{ikr_{q0}}, \dots, \frac{1}{r_{Q0}} e^{ikr_{Q0}} \right]$$

4. 根据权利要求1所述的基于球谐函数展开的非共形面变换噪声源的定位方法,其特征在于:所述步骤(3)中采用球面近场声全息算法重构声源附近表面的声压分布的计算公式如下:

$$p(r_s, \theta, \phi) = \sum_{n=0}^N \sum_{m=-n}^n P_{nm}(r_s) Y_n^m(\theta, \phi)$$

式中: r_s 为重构面半径, r_H 为全息面半径; $Y_n^m(\theta, \phi)$ 为n阶m次的球谐函数;

重构球面声压球面波谱 $P_{nm}(r_s)$ 的计算公式如下:

$$P_{nm}(r_s) = \frac{j_n(kr_s)}{j_n(kr_H)} P_{nm}(r_H)$$

式中： $P_{nm}(r_s)$ 为全息面的球面波谱；

$j_n(kr)$ 为第一类球Bessel函数， $j_n(kr_s)/j_n(kr_H)$ 为全息面球面波谱 $P_{nm}(r_s)$ 与重构面球面波谱 $P_{nm}(r_H)$ 之间的传递函数，全息面的球面波谱的计算公式如下：

$$P_{nm}(r_H) = \sum_{q=1}^Q a_q p_q(r_q, \theta_q, \phi_q) Y_n^m(\theta_q, \phi_q) \quad n \in (0, 1, \dots, N); m \in (-n, -n+1, \dots, n)$$

式中： (r_q, θ_q, ϕ_q) 为第 q 个传声器位置的坐标， $p_q(r_q, \theta_q, \phi_q)$ 为第 q 个传声器采样获取的声压；

$a_q = 4\pi a^2/Q$ 为权重系数，是每个传声器位置对应的球面网格面积。

5. 根据权利要求1所述的基于球谐函数展开的非共形面变换噪声源的定位方法，其特征在于：所述步骤(4)中球坐标 (r, ϕ, θ) 和柱坐标 (r', ϕ, z') 之间的转换关系为：

$$\begin{cases} r = \sqrt{r'^2 + z'^2} \\ \phi = \phi \\ \theta = \arctan(r'/z') \end{cases}$$

所述传递矩阵 W 为：

$$W = \begin{bmatrix} j_n(k\sqrt{r'^2 + z_1'^2}) & j_n(k\sqrt{r'^2 + z_2'^2}) & \dots & j_n(k\sqrt{r'^2 + z_j'^2}) & \dots & j_n(k\sqrt{r'^2 + z_J'^2}) \end{bmatrix}^T$$

所述传递矩阵 U 为：

$$U = \begin{bmatrix} Y_n^m\left(\arctan\left(\frac{r'}{z_1}\right), \phi_1\right) & Y_n^m\left(\arctan\left(\frac{r'}{z_1}\right), \phi_2\right) & \dots & Y_n^m\left(\arctan\left(\frac{r'}{z_1}\right), \phi_l\right) & \dots & Y_n^m\left(\arctan\left(\frac{r'}{z_1}\right), \phi_i\right) \\ Y_n^m\left(\arctan\left(\frac{r'}{z_2}\right), \phi_1\right) & Y_n^m\left(\arctan\left(\frac{r'}{z_2}\right), \phi_2\right) & \dots & Y_n^m\left(\arctan\left(\frac{r'}{z_2}\right), \phi_l\right) & \dots & Y_n^m\left(\arctan\left(\frac{r'}{z_2}\right), \phi_i\right) \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ Y_n^m\left(\arctan\left(\frac{r'}{z_j}\right), \phi_1\right) & Y_n^m\left(\arctan\left(\frac{r'}{z_j}\right), \phi_2\right) & \dots & Y_n^m\left(\arctan\left(\frac{r'}{z_j}\right), \phi_l\right) & \dots & Y_n^m\left(\arctan\left(\frac{r'}{z_j}\right), \phi_i\right) \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ Y_n^m\left(\arctan\left(\frac{r'}{z_J}\right), \phi_1\right) & Y_n^m\left(\arctan\left(\frac{r'}{z_J}\right), \phi_2\right) & \dots & Y_n^m\left(\arctan\left(\frac{r'}{z_J}\right), \phi_l\right) & \dots & Y_n^m\left(\arctan\left(\frac{r'}{z_J}\right), \phi_i\right) \end{bmatrix}$$

式中：上标 $[\]^T$ 表示转置；

$j_n(k\sqrt{r'^2 + z_j'^2})$ 为第一类球Bessel函数， $j=1, \dots, J$ ；

$Y_n^m\left(\arctan\left(\frac{r'}{z_j}\right), \phi_i\right)$ 为 n 阶 m 次的球谐函数。

6. 根据权利要求1所述的基于球谐函数展开的非共形面变换噪声源的定位方法，其特征在于：所述步骤(5)中构造 P_{cylinder} 如下：

$$P_{cylinder} = \begin{bmatrix} p(r', \phi_1, z'_1) & p(r', \phi_2, z'_1) & \cdots & p(r', \phi_l, z'_1) & \cdots & p(r', \phi_l, z'_1) \\ p(r', \phi_1, z'_2) & p(r', \phi_2, z'_2) & \cdots & p(r', \phi_l, z'_2) & \cdots & p(r', \phi_l, z'_2) \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ p(r', \phi_1, z'_j) & p(r', \phi_2, z'_j) & \cdots & p(r', \phi_l, z'_j) & \cdots & p(r', \phi_l, z'_j) \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ p(r', \phi_1, z'_j) & p(r', \phi_2, z'_j) & \cdots & p(r', \phi_l, z'_j) & \cdots & p(r', \phi_l, z'_j) \end{bmatrix}$$

其计算公式如下：

$$P_{cylinder} = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=-n}^n D_{nm} \cdot W \otimes E \cdot U$$

式中：E为维数是 $1 \times J$ 元素全为1的矩阵；

“ \cdot ”表示点乘，“ \otimes ”表示Kronecker积；

D_{nm} 为声场展开系数，其计算公式如下：

$$D_{nm} = \frac{1}{j_n(kr)} \iint_s p(r, \theta, \phi) Y_n^m(\theta, \phi)^* \sin \theta d\theta d\phi。$$

7. 根据权利要求1所述的基于球谐函数展开的非共形面变换噪声源的定位方法，其特征在于：所述步骤(6)中将重构柱面的声压进行傅里叶逆变换的公式为：

$$P(r', \theta, \phi) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=-n}^n P_{cylinder} Y_n^m(\theta, \phi)$$

8. 根据权利要求1所述的基于球谐函数展开的非共形面变换噪声源的定位方法，其特征在于：在步骤(7)中，选取声源面所在面附近的柱面作为重构面，得到重构柱面的声压分布，利用重构面上的声压分布对目标声源进行定位识别。

基于球谐函数展开的非共形面变换噪声源的定位方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种柱形结构中噪声源或类柱形噪声源的定位方法,尤其涉及一种基于球谐函数展开的非共形面变换,将球面测量数据通过近场声全息算法重构到柱面,从而实现柱形结构中噪声源或类柱形噪声源进行定位的方法。

背景技术

[0002] 在噪声源定位领域,传声器阵列进行声场测量是最常用的手段。球形阵列具有经纬角全指向性和三维对称性,能一次性测量三维空间各个方向的声场信息。其特殊的结构使其具有很大的灵活性,测量速度快,因此可用于潜艇、飞机、汽车等内部空间的声场测量。

[0003] 在噪声源定位识别领域,近场声全息技术是一种适用于低频段噪声源定位的算法。基于傅里叶变换的近场声全息是最经典的算法,但传统的基于广义空间傅里叶变换的球面近场声全息要求球面到球面共形面变换,这为利用球面声全息方法对柱形结构中噪声源或类柱形噪声源的定位识别带来困难。

发明内容

[0004] 本发明要解决的技术问题是:提供一种基于球谐函数展开的非共形面变换噪声源的定位方法,以解决现有技术中利用球面声全息方法对柱形结构中噪声源或类柱形噪声源的定位识别存在困难的问题。

[0005] 本发明的技术方案是:一种基于球谐函数展开的非共形面变换噪声源的定位方法,包括以下步骤:

[0006] (1) 采用阵元数为 Q 的球面传声器阵列对目标声源辐射到三维空间的声压信号进行采集 $P(r, t)$;

[0007] (2) 对球形阵的 Q 个传声器数据分别和第1个传声器数据进行互谱分析,获取整个球形阵的频域复声压 $P(r, \theta, \phi)$;

[0008] (3) 基于球形阵的频域复声压,利用球面近场声全息算法重构声源附近表面的声压 $p(r_s, \theta, \phi)$,通过该声压分布确定噪声源在球坐标下的位置;

[0009] (4) 根据球坐标系和柱坐标系的转换关系构造球面到圆柱面的传递矩阵 W 和 U ;

[0010] (5) 求解重构圆柱面所有离散化点的球面波谱组成的矩阵 P_{cylinder} ;

[0011] (6) 对重构圆柱面所有离散化点的球面波谱进行傅里叶逆变换,得到重构柱面上每一离散点的声压分布 $P(r_s, \theta, \phi)$;

[0012] (7) 通过柱面离散点的声压分布来确定类柱形声源或柱形空间中的噪声源位置。

[0013] 所述步骤(1)中由 Q 个球面传声器组成球形阵列整个球形阵测量数据的复声压数据为:

$$\begin{aligned}
 [0014] \quad P(r, t) &= \left[p_1(r_{10}, t), \dots, p_q(r_{q0}, t), \dots, p_Q(r_{Q0}, t) \right] \\
 &= P_0 e^{j\omega t} \left[\frac{1}{r_{10}} e^{jkr_{10}}, \dots, \frac{1}{r_{q0}} e^{jkr_{q0}}, \dots, \frac{1}{r_{Q0}} e^{jkr_{Q0}} \right]
 \end{aligned}$$

[0015] 其中:以随机球形阵中心为坐标原点(0,0,0);

[0016] 球形阵阵元个数Q,阵元编号为1,⋯,q,⋯Q,第q个传声器的空间坐标为(x_q,y_q,z_q);

[0017] P₀为距离点声源1m处的声压幅值,pa;

[0018] $r_{q0} = \sqrt{(x_q - x_0)^2 + (y_q - y_0)^2 + (z_q - z_0)^2}$ 为第q个传声器到点声源(x₀,y₀,z₀)的距离,m;

[0019] ω为角频率,rad/s;t为时间点,s;k为波数。

[0020] 所述步骤(2)中对球形阵的Q个传声器数据分别和第1个传声器数据进行互谱分析,获取整个球形阵的频域复声压为:

$$[0021] \quad P(r, \theta, \phi) = P_0 \left[\frac{1}{r_{10}} e^{jkr_{10}}, \dots, \frac{1}{r_{q0}} e^{jkr_{q0}}, \dots, \frac{1}{r_{Q0}} e^{jkr_{Q0}} \right]$$

[0022] 所述步骤(3)中采用球面近场声全息算法重构声源附近表面的声压分布的计算公式如下:

$$[0023] \quad p(r_s, \theta, \phi) = \sum_{n=0}^N \sum_{m=-n}^n P_{nm}(r_H) Y_n^m(\theta, \phi)$$

[0024] 式中:rs为重构面半径,r_H为全息面半径;Y_n^m(θ,φ)为n阶m次的球谐函数;

[0025] 重构球面声压球面波谱P_{nm}(r_s)的计算公式如下:

$$[0026] \quad P_{nm}(r_s) = \frac{j_n(kr_s)}{j_n(kr_H)} P_{nm}(r_H)$$

[0027] 式中:P_{nm}(r_s)为全息面的球面波谱;

[0028] j_n(kr)为第一类球Bessel函数,j_n(kr_s)/j_n(kr_H)为全息面球面波谱P_{nm}(r_s)与重构面球面波谱P_{nm}(r_s)之间的传递函数,全息面的球面波谱的计算公式如下:

$$[0029] \quad P_{nm}(r_H) = \sum_{q=1}^Q \alpha_q p_q(r_q, \theta_q, \phi_q) Y_n^{m*}(\theta_q, \phi_q) \quad n \in (0, 1, \dots, N); m \in (-n, -n+1, \dots, n)$$

[0030] 式中:(r_q,θ_q,φ_q)为第q个传声器位置的坐标,p_q(r_q,θ_q,φ_q)为第q个传声器采样获取的声压;

[0031] α_q=4πa²/Q为权重系数,是每个传声器位置对应的球面网格面积。

[0032] 所述步骤(4)中球坐标(r,φ,θ)和柱坐标(r',φ,z')之间的转换关系为:

$$[0033] \quad \begin{cases} r = \sqrt{r'^2 + z'^2} \\ \phi = \phi \\ \theta = \arctan(r'/z') \end{cases};$$

[0034] 所述传递矩阵W为:

[0035]

$$W = \left[j_n \left(k \sqrt{r'^2 + z_1'^2} \right) \quad j_n \left(k \sqrt{r'^2 + z_2'^2} \right) \quad \dots \quad j_n \left(k \sqrt{r'^2 + z_j'^2} \right) \quad \dots \quad j_n \left(k \sqrt{r'^2 + z_J'^2} \right) \right]^T$$

[0036] 所述传递矩阵U为:

[0037]

$$U = \begin{bmatrix} Y_n^m \left(\arctan \left(\frac{r'}{z_1} \right), \phi_1 \right) & Y_n^m \left(\arctan \left(\frac{r'}{z_1} \right), \phi_2 \right) & \dots & Y_n^m \left(\arctan \left(\frac{r'}{z_1} \right), \phi_i \right) & \dots & Y_n^m \left(\arctan \left(\frac{r'}{z_1} \right), \phi_l \right) \\ Y_n^m \left(\arctan \left(\frac{r'}{z_2} \right), \phi_1 \right) & Y_n^m \left(\arctan \left(\frac{r'}{z_2} \right), \phi_2 \right) & \dots & Y_n^m \left(\arctan \left(\frac{r'}{z_2} \right), \phi_i \right) & \dots & Y_n^m \left(\arctan \left(\frac{r'}{z_2} \right), \phi_l \right) \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ Y_n^m \left(\arctan \left(\frac{r'}{z_j} \right), \phi_1 \right) & Y_n^m \left(\arctan \left(\frac{r'}{z_j} \right), \phi_2 \right) & \dots & Y_n^m \left(\arctan \left(\frac{r'}{z_j} \right), \phi_i \right) & \dots & Y_n^m \left(\arctan \left(\frac{r'}{z_j} \right), \phi_l \right) \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ Y_n^m \left(\arctan \left(\frac{r'}{z_J} \right), \phi_1 \right) & Y_n^m \left(\arctan \left(\frac{r'}{z_J} \right), \phi_2 \right) & \dots & Y_n^m \left(\arctan \left(\frac{r'}{z_J} \right), \phi_i \right) & \dots & Y_n^m \left(\arctan \left(\frac{r'}{z_J} \right), \phi_l \right) \end{bmatrix}$$

;

[0038] 式中:上标 $[\]^T$ 表示转置;[0039] $j_n \left(k \sqrt{r'^2 + z_j'^2} \right)$ 为第一类球Bessel函数, $j=1, \dots, J$;[0040] $Y_n^m \left(\arctan \left(\frac{r'}{z_j} \right), \phi_i \right)$ 为n阶m次的球谐函数。[0041] 所述步骤(5)中构造 $P_{cylinder}$ 如下:

$$P_{cylinder} = \begin{bmatrix} p(r', \phi_1, z_1') & p(r', \phi_2, z_1') & \dots & p(r', \phi_i, z_1') & \dots & p(r', \phi_l, z_1') \\ p(r', \phi_1, z_2') & p(r', \phi_2, z_2') & \dots & p(r', \phi_i, z_2') & \dots & p(r', \phi_l, z_2') \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ p(r', \phi_1, z_j') & p(r', \phi_2, z_j') & \dots & p(r', \phi_i, z_j') & \dots & p(r', \phi_l, z_j') \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ p(r', \phi_1, z_J') & p(r', \phi_2, z_J') & \dots & p(r', \phi_i, z_J') & \dots & p(r', \phi_l, z_J') \end{bmatrix}$$

[0043] 其计算公式如下:

$$P_{cylinder} = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=-n}^n D_{nm} \cdot W \otimes E \cdot U$$

[0045] 式中:E为维数是 $1 \times J$ 元素全为1的矩阵;[0046] “ \cdot ”表示点乘,“ \otimes ”表示Kronecker积;[0047] D_{nm} 为声场展开系数,其计算公式如下:

$$D_{nm} = \frac{1}{j_n(kr)} \iint_s p(r, \theta, \phi) Y_n^m(\theta, \phi)^* \sin \theta d\theta d\phi。$$

[0049] 所述步骤(6)中将重构柱面的声压进行傅里叶逆变换的公式为:

$$[0050] \quad \mathbf{P}(r_s, \theta, \phi) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=-n}^n P_{cylinder} Y_n^m(\theta, \phi)$$

[0051] 在步骤(7)中,选取声源面所在面附近的柱面作为重构面,得到重构柱面的声压分布,利用重构面上的声压分布对目标声源进行定位识别。

[0052] 本发明的有益效果是:本发明利用球谐函数展开构造球面到柱面的传递矩阵,将球面阵测量数据重构到柱面结构,从而可对柱形结构中噪声源或类柱形噪声源进行精准有效的定位。与现有技术相比,本发明具有以下优点:

[0053] 1) 球面阵经纬角全指向性和三维对称性,能一次性测量三维空间各个方向的声场信息。

[0054] 2) 构建从球面到柱面的传递矩阵,能够将球面阵测量数据通过声全息算法重构到柱面,实现对类柱形声源或柱形结构中的噪声源的定位问题。

附图说明

[0055] 图1为本发明的球阵数据采集模型;

[0056] 图2为本发明的流程图;

[0057] 图3为本发明的球面到球面共形面变换的噪声源定位结果;(a)对应球面到球面共形变换的噪声源定位结果的三维图;(b)是以球坐标系下 (ϕ, θ) 展开的球面到球面共形变换的噪声源定位结果;

[0058] 图4为本发明的球面到柱面非共形面变换的噪声源定位结果;(a)对应球面到柱面非共形面变换的噪声源定位结果的三维图;(b)是以柱坐标系下 (ϕ, z) 展开的球面到球面共形变换的噪声源定位结果。

具体实施方式

[0059] 下面结合附图及具体的实施例对发明进行进一步介绍:

[0060] 球形阵噪声源数据采集模型如图1,在空旷条件下,球面阵放置于空间中某一点,球阵阵元数为Q,第q个传声器的位置为 (x_q, y_q, z_q) 。以球面阵球心为坐标原点 $(0, 0, 0)$,在距离球面阵球心放为0.5m处放置一点声源,空气中,声源位置在柱坐标下 (r_0', ϕ_0, z) 为 $(0.5m, 200^\circ, 0m)$,在球坐标下 (r_0, θ_0, ϕ_0) 为 $(0.5m, 90^\circ, 200^\circ)$ 。声源频率为800Hz,仿真中加入信噪比SNR=35dB的高斯白噪声。

[0061] 本发明实施例的流程如图2所示,首先采用球面阵采集噪声源在三维空间中的辐射声场;将Q个通道数据分别与第1通道数据做互谱分析,获取球面阵的频域复声压,采用球面阵近场声全息算法共形面重构声源附近球面的声压分布,确定声源在球坐标系下的位置;构造球面到柱面的传递矩阵,采用球面阵的频域复声压,选取声源在柱坐标系下的半径为柱面重构半径,采用非共形面变换重构柱面上的声压分布,通过该声压分布确定噪声源在柱坐标系下的位置,实现类柱形噪声源或柱形结构中噪声源的定位。其中,

[0062] (1) 球面阵采集到的三维空间声场数据为:

$$\begin{aligned}
 P(r, t) &= [p_1(r_{10}, t), \dots, p_q(r_{q0}, t), \dots, p_Q(r_{Q0}, t)] \\
 [0063] \quad &= P_0 e^{j\omega t} \left[\frac{1}{r_{10}} e^{jkr_{10}}, \dots, \frac{1}{r_{q0}} e^{jkr_{q0}}, \dots, \frac{1}{r_{Q0}} e^{jkr_{Q0}} \right]
 \end{aligned}$$

[0064] 其中:以随机球形阵中心为坐标原点(0,0,0);

[0065] 球形阵阵元个数Q,阵元编号为1, ..., q, ..., Q,第q个传声器的空间坐标为(x_q, y_q, z_q);

[0066] P₀为距离点声源1m处的声压幅值,pa;

[0067] $r_{q0} = \sqrt{(x_q - x_0)^2 + (y_q - y_0)^2 + (z_q - z_0)^2}$ 为第q个传声器到点声源(x₀, y₀, z₀)的距离, m;

[0068] ω 为角频率,rad/s;t为时间点,s;k为波数。假设空间有K个点源目标入射到球形阵列上,则每个传声器接收的数据为K个点源目标的叠加。

[0069] (2)将球面所测的Q个通道数据分别与第1通道数做互谱分析,获取球形阵频域复声压,采用球面近场声全息算法重构声源附近球面的声压分布为:

$$[0070] \quad p(r_s, \theta, \phi) = \sum_{n=0}^N \sum_{m=-n}^n P_{nm}(r_s) Y_n^m(\theta, \phi)。$$

[0071] (3)利用球面近场声全息算法重构声源附近表面的声压p(r_s, θ , ϕ),通过该声压分布确定噪声源在球坐标下的位置。计算公式如下:

$$[0072] \quad p(r_s, \theta, \phi) = \sum_{n=0}^N \sum_{m=-n}^n P_{nm}(r_s) Y_n^m(\theta, \phi)$$

[0073] 式中:r_s为重构面半径,r_H为全息面半径;Y_n^m(θ , ϕ)为n阶m次的球谐函数。

[0074] 重构球面声压球面波谱P_{nm}(r_s)的计算公式如下:

$$[0075] \quad P_{nm}(r_s) = \frac{j_n(kr_s)}{j_n(kr_H)} P_{nm}(r_H)$$

[0076] 式中:P_{nm}(r_s)为全息面的球面波谱;

[0077] j_n(kr)为第一类球Bessel函数,j_n(kr_s)/j_n(kr_H)为全息面球面波谱P_{nm}(r_s)与重构面球面波谱P_{nm}(r_s)之间的传递函数,全息面的球面波谱的计算公式如下:

$$[0078] \quad P_{nm}(r_H) = \sum_{q=1}^Q \alpha_q p_q(r_q, \theta_q, \phi_q) Y_n^{m*}(\theta_q, \phi_q) \quad n \in (0, 1, \dots, N); m \in (-n, -n+1, \dots, n)$$

[0079] 式中:(r_q, θ_q , ϕ_q)为第q个传声器位置的坐标,p_q(r_q, θ_q , ϕ_q)为第q个传声器采样获取的声压;

[0080] $\alpha_q = 4\pi a^2/Q$ 为权重系数,是每个传声器位置对应的球面网格面积。

[0081] (4)根据球坐标系和柱坐标系的转换关系构造球面到圆柱面的传递矩阵W和U。

[0082] 其中重构柱面按照柱坐标选取,声场预测公式中是球坐标,因此要完成从柱坐标到球坐标的转换。球坐标(r, ϕ , θ)和柱坐标(r', ϕ , z')之间的转换关系为:

$$[0083] \quad \begin{cases} r = \sqrt{r'^2 + z^2} \\ \phi = \phi \\ \theta = \arctan(r'/z') \end{cases}$$

[0084] 球面声全息重构时选定一个重构球面半径即可实现,若要将球面测量数据通过球面声全息算法后重构到柱面上,首先构建从球面到圆柱变换面的传递矩阵,由于重构面为圆柱面,首先需要对重构柱面进行离散化,柱坐标原点和球形阵中心点重合,假设重构柱面半径为 r ,分别在重构圆柱面上沿圆周方向和纵轴方向离散化,圆周方向 $\phi_i \in [0, 2\pi]$, $i = 1: I$,按 $\Delta \phi$ 间隔离散化,则 $I = [2\pi / \Delta \phi]_{\text{int}}$ 。纵轴方向 $z_j \in [z_{\min}, z_{\max}]$, $j = 1: J$ 半径方向,按 Δz 间隔离散化,则 $J = [(z_{\max} - z_{\min}) / \Delta z]_{\text{int}}$ 。

[0085] 所述步骤(5)构建传递矩阵 W 和 U 如下:

$$[0086] \quad W = \begin{bmatrix} j_n(k\sqrt{r'^2 + z_1'^2}) & j_n(k\sqrt{r'^2 + z_2'^2}) & \dots & j_n(k\sqrt{r'^2 + z_j'^2}) & \dots & j_n(k\sqrt{r'^2 + z_J'^2}) \end{bmatrix}^T$$

$$[0087] \quad U = \begin{bmatrix} Y_n^m\left(\arctan\left(\frac{r'}{z_1}\right), \phi_1\right) & Y_n^m\left(\arctan\left(\frac{r'}{z_1}\right), \phi_2\right) & \dots & Y_n^m\left(\arctan\left(\frac{r'}{z_1}\right), \phi_i\right) & \dots & Y_n^m\left(\arctan\left(\frac{r'}{z_1}\right), \phi_I\right) \\ Y_n^m\left(\arctan\left(\frac{r'}{z_2}\right), \phi_1\right) & Y_n^m\left(\arctan\left(\frac{r'}{z_2}\right), \phi_2\right) & \dots & Y_n^m\left(\arctan\left(\frac{r'}{z_2}\right), \phi_i\right) & \dots & Y_n^m\left(\arctan\left(\frac{r'}{z_2}\right), \phi_I\right) \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ Y_n^m\left(\arctan\left(\frac{r'}{z_j}\right), \phi_1\right) & Y_n^m\left(\arctan\left(\frac{r'}{z_j}\right), \phi_2\right) & \dots & Y_n^m\left(\arctan\left(\frac{r'}{z_j}\right), \phi_i\right) & \dots & Y_n^m\left(\arctan\left(\frac{r'}{z_j}\right), \phi_I\right) \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ Y_n^m\left(\arctan\left(\frac{r'}{z_J}\right), \phi_1\right) & Y_n^m\left(\arctan\left(\frac{r'}{z_J}\right), \phi_2\right) & \dots & Y_n^m\left(\arctan\left(\frac{r'}{z_J}\right), \phi_i\right) & \dots & Y_n^m\left(\arctan\left(\frac{r'}{z_J}\right), \phi_I\right) \end{bmatrix}$$

[0088] 式中:上标 $[]^T$ 表示转置;

[0089] $j_n(k\sqrt{r'^2 + z_j'^2})$ 为第一类球Bessel函数, $j = 1, \dots, J$;

[0090] $Y_n^m\left(\arctan\left(\frac{r'}{z_j}\right), \phi_i\right)$ 为 n 阶 m 次的球谐函数。

[0091] (5) 求解重构圆柱面所有离散化点的球面波谱组成的矩阵 P_{cylinder} ,

$$[0092] \quad P_{\text{cylinder}} = \begin{bmatrix} p(r', \phi_1, z'_1) & p(r', \phi_2, z'_1) & \dots & p(r', \phi_i, z'_1) & \dots & p(r', \phi_I, z'_1) \\ p(r', \phi_1, z'_2) & p(r', \phi_2, z'_2) & \dots & p(r', \phi_i, z'_2) & \dots & p(r', \phi_I, z'_2) \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ p(r', \phi_1, z'_j) & p(r', \phi_2, z'_j) & \dots & p(r', \phi_i, z'_j) & \dots & p(r', \phi_I, z'_j) \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ p(r', \phi_1, z'_J) & p(r', \phi_2, z'_J) & \dots & p(r', \phi_i, z'_J) & \dots & p(r', \phi_I, z'_J) \end{bmatrix}$$

[0093] 其计算公式如下:

$$[0094] \quad P_{\text{cylinder}} = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=-n}^n D_{nm} \cdot W \otimes E \cdot U$$

[0095] 式中: E 为维数是 $1 \times J$ 元素全为1的矩阵;

[0096] “ \cdot ”表示点乘，“ \otimes ”表示Kronecker积。

[0097] D_{nm} 为声场展开系数，其计算公式如下：

$$[0098] \quad D_{nm} = \frac{1}{j_n(kr)} \iint_s p(r, \theta, \phi) Y_n^m(\theta, \phi)^* \sin \theta d\theta d\phi。$$

[0099] (6) 对重构圆柱面所有离散化点的球面波谱进行傅里叶逆变换，得到重构柱面上每一离散点的声压分布 $P(r_s, \theta, \phi)$ ，其计算公式为：

$$[0100] \quad \mathbf{P}(r_s, \theta, \phi) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=-n}^n P_{cylinder} Y_n^m(\theta, \phi)。$$

[0101] (7) 选取声源面所在面附近的柱面作为重构面，得到重构柱面的声压分布，利用重构面上的声压分布对目标声源进行定位识别。

[0102] 图3和图4分别为共形面变换和非共形面变换的噪声源定位结果。图中“+”表示理论声源位置，声源位置在柱坐标下 (r_0', ϕ_0, z) 为 $(0.5\text{m}, 200^\circ, 0\text{m})$ ，在球坐标下 (r_0, θ_0, ϕ_0) 为 $(0.5\text{m}, 90^\circ, 200^\circ)$ 。图3 (a) 对应球面到球面共形变换的噪声源定位结果的三维图，图3 (b) 是以球坐标系下 (ϕ, θ) 展开的球面到球面共形变换的噪声源定位结果。图4 (a) 对应球面到柱面非共形面变换的噪声源定位结果的三维图，图4 (b) 是以柱坐标系下 (ϕ, z) 展开的球面到球面共形变换的噪声源定位结果。通过对比图3 (b) 和图4 (b) 的结果可知，采用球面阵测量数据，进行球面到球面共形面变换和球面到柱面非共形面变换都能对噪声源准确定位。

[0103] 以上内容是结合具体的优选实施方式对本发明所作的进一步详细说明，不能认定本发明的具体实施只局限于这些说明。对于本发明所属技术领域的普通技术人员来说，在不脱离本发明构思的前提下，还可以做出若干简单推演或替换，都应当视为属于本发明的保护范围。

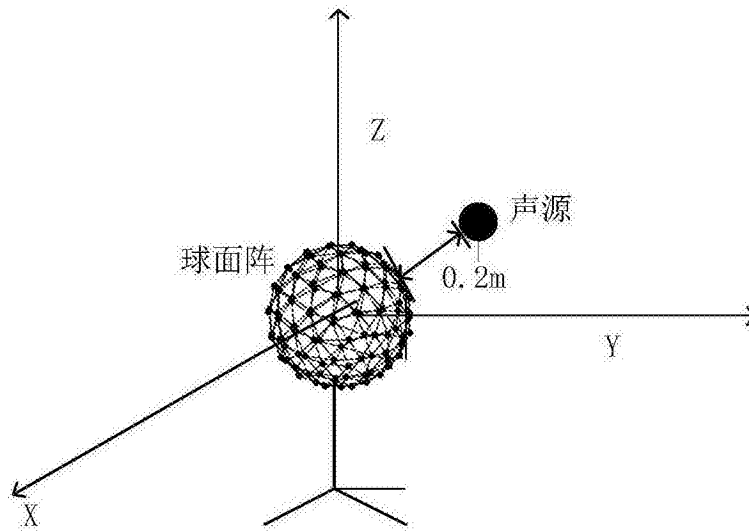


图1

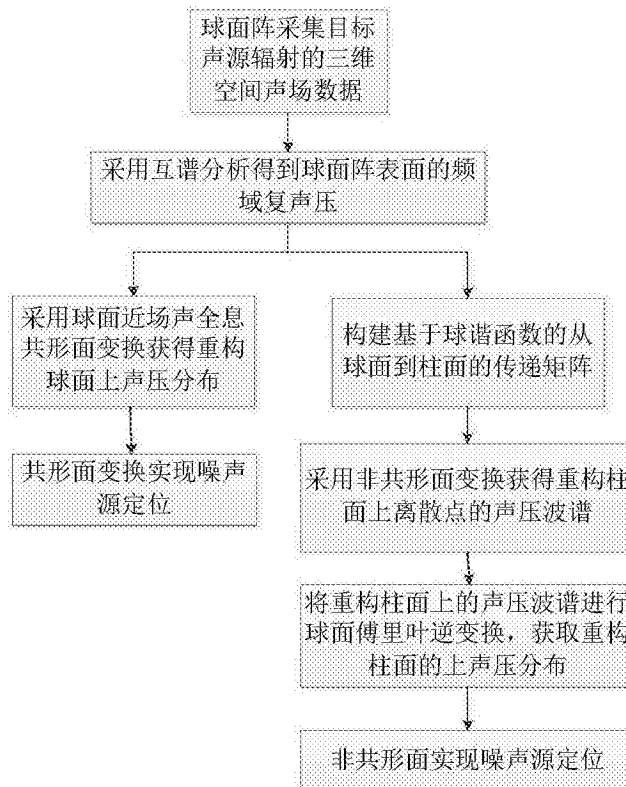
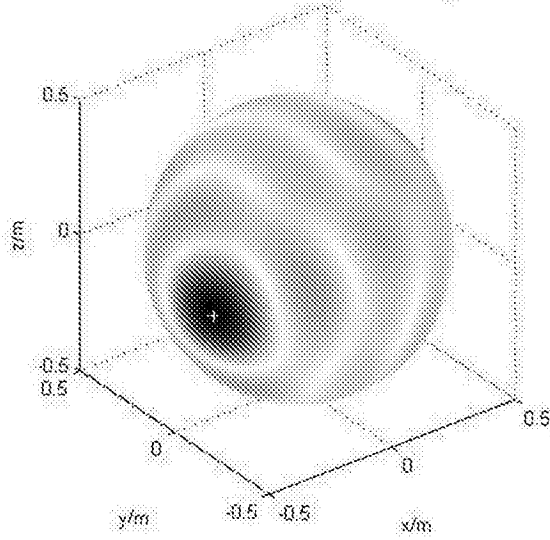


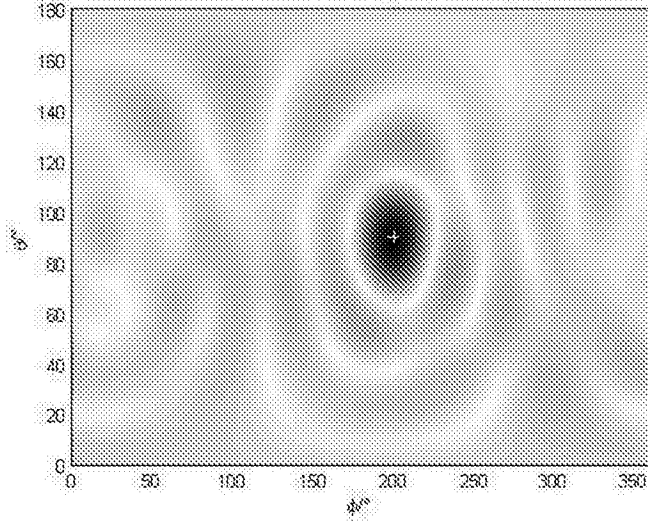
图2

64元球面阵近场声全息,球面到球面, $f=800\text{Hz}$



(a)

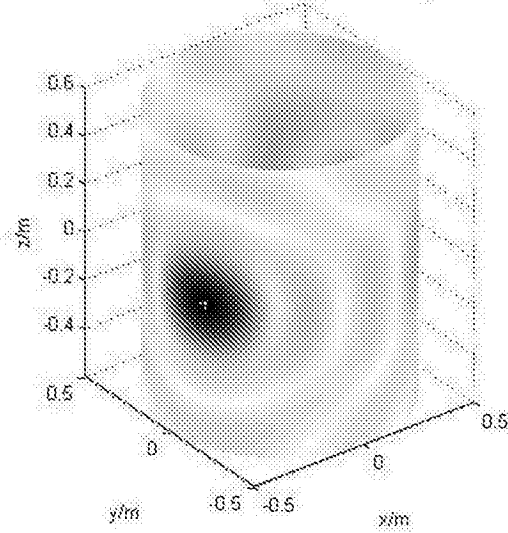
64元球面阵近场声全息,球面到球面, $f=800\text{Hz}$



(b)

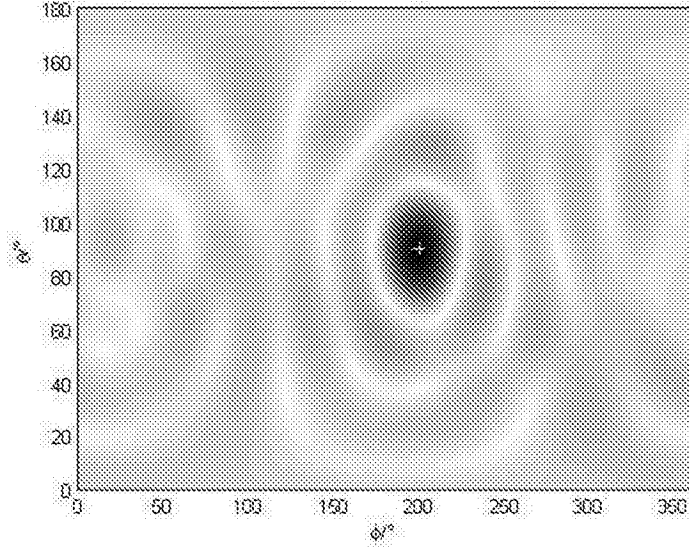
图3

64元球面阵近场声全息,球面到柱面, $f=800\text{Hz}$



(a)

64元球面阵近场声全息,球面到球面, $f=800\text{Hz}$



(b)

图4