



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 109211399 B

(45)授权公告日 2020.07.28

(21)申请号 201811211082.9

(22)申请日 2018.10.17

(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 109211399 A

(43)申请公布日 2019.01.15

(73)专利权人 西安交通大学
地址 710049 陕西省西安市碑林区咸宁西路28号

(72)发明人 成玮 倪晶磊 陈雪峰 周光辉
加正正 朱岩 陆建涛

(74)专利代理机构 西安通大专利代理有限责任公司 61200
代理人 徐文权

(51)Int.Cl.
G01H 17/00(2006.01)

(56)对比文件

CN 108629081 A,2018.10.09,
CN 103743469 A,2014.04.23,
CN 101344428 A,2009.01.14,
CN 101556187 A,2009.10.14,
CN 106358129 A,2017.01.25,
CN 102141431 A,2011.08.03,
GB 1263093 A,1972.02.09,
李卫兵 等.统计最优柱面近场声全息.《机械工程学报》.2005,第41卷(第4期),第123-127页.

Tracianne Neilsen etc..Near-field acoustic holography in conical coordinates.<Acoustical Society of America>.2009,第2-7页.

审查员 苏秦

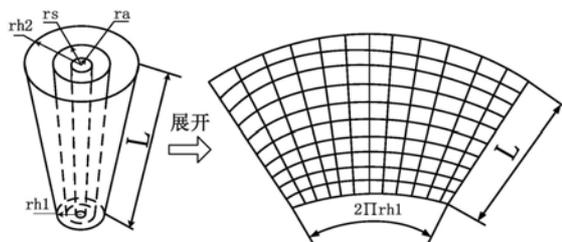
权利要求书3页 说明书8页 附图6页

(54)发明名称

一种锥面声源统计近场声全息方法

(57)摘要

本发明公开了一种锥面声源统计近场声全息方法,利用与壳体结构装备共形的测量面获取全息声压数据,在统计最优柱面近场声全息理论方法的基础上,通过柱面-锥面坐标变换,直接通过空间域全息面上复声压的线性叠加来计算锥形壳体结构装备辐射声场,填补了近场声全息技术在锥面声源中的应用空白,展示了其在低频噪声分析中的有效性,适用于锥形壳体结构水下兵器,从而为锥形壳体结构装备的声隐身性能评估提供了理论基础,具有重要的理论意义及工程应用价值.适用于主要处于低频振动噪声的锥形壳体结构装备的辐射声场重构,将锥形壳体结构装备辐射声场以可视化的方式显示出来,从而可以直观看出辐射声场的大小及分布情况。



1. 一种锥面声源统计近场声全息方法,其特征在于,包括以下步骤:

步骤1),获取待测锥形结构外侧全息声压数据;

步骤2),通过柱面-锥面坐标变换,构造适用于锥面声源的单元面波;具体的:通过柱面-锥面坐标变换,采用分离变量法求解Helmholtz方程,得到空间任意点处的复声压,其过程如下:

首先,得到稳态声波场Helmholtz方程在柱面坐标系下的行波解为

$$p(r, \theta, z) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} e^{in\theta} \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} [D_n^{(1)}(k_z) H_n^{(1)}(k_r r) e^{ik_z z}] dk_z \quad (1)$$

式中, $p(r, \theta, z)$ 为空间任意点声压,定义 $e^{in\theta}$ 和 $e^{ik_z z}$ 为柱面波函数, k_z 为轴向波数, $k_r = \sqrt{k^2 - k_z^2}$, k 为声波数, n 为周向波数; $D_n^{(1)}(k_z)$ 为待定未知数, $H_n^{(1)}$ 表示 n 阶第一类Henkel函数;在柱面坐标系下,令 $P_n(r, n, k_z)$ 为 $p(r, \theta, z)$ 的二维傅氏变换,为

$$P_n(r, n, k_z) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} e^{-in\theta} d\theta \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-ik_z z} p(r, \theta, z) dz \quad (2)$$

同时给出其傅氏反变换为

$$p(r, \theta, z) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} dk_z P_n(r, n, k_z) e^{-in\theta} e^{-ik_z z} \quad (3)$$

令上式 $r=a$ 得,

$$p(a, \theta, z) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} dk_z P_n(a, n, k_z) e^{-in\theta} e^{-ik_z z} \quad (4)$$

由(1)(2)(3)(4)式可解得:

$$p(r, \theta, z) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} e^{in\theta} \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \left[P_n(a, k_z) \times e^{ik_z z} \frac{H_n^{(1)}(k_r r)}{H_n^{(1)}(k_r a)} \right] dk_z \quad (5)$$

式中, $P_n(a, k_z)$ 为 $p(a, \theta, z)$ 的二维傅氏变换;

由波数矢量 $K = (n, k_z)$ 确定的柱面上的空间频率域单元柱面波为:

$$\Phi_k(r, \theta, z) = e^{in\theta} e^{ik_z z} \frac{H_n^{(1)}(k_r r)}{H_n^{(1)}(k_r a)} \quad (6)$$

将积分运算离散化,则全息面和重建面上的复声压表示为:

$$\begin{aligned} p(r_H, \theta, z) &\approx \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \frac{1}{2\pi} \sum_{k_z=-\infty}^{+\infty} P_n(a, k_z) \frac{H_n^{(1)}(k_r r)}{H_n^{(1)}(k_r a)} e^{in\theta} e^{ik_z z} \\ &= \frac{1}{2\pi} \sum_{m=1}^M P_n(a, K_m) \frac{H_n^{(1)}(k_r r)}{H_n^{(1)}(k_r a)} e^{in\theta} e^{ik_z z} = \frac{1}{2\pi} \sum_{m=1}^M P_n(a, K_m) \Phi_{K_m}(r_H, \theta, z) \end{aligned} \quad (7);$$

锥面测量结构时,锥角 β 保持不变,将式(6)中的柱面不变量 r 用锥面锥角 β 表示,式(6)可变为如下形式:

$$\Phi_k((z \times \tan \beta + rh_1), \theta, z) = e^{in\theta} e^{ik_z z} \frac{H_n^{(1)}(k_r z \times \tan \beta + rh_1)}{H_n^{(1)}(k_r z \times \tan \beta)} \quad (8)$$

再将式(7)在锥面下为:

$$\begin{aligned}
p((z \times \tan \beta + rh_1), \theta, z) &\approx \frac{1}{2\pi} \sum_{m=1}^M P_n(a, K_m) \Phi_{K_m}(r_H, \theta, z) \\
&= \frac{1}{2\pi} \sum_{m=1}^M P_n(k_r z \times \tan \beta, K_m) e^{in\theta} e^{ik_z z} \frac{H_n^{(1)}(k_r z \times \tan \beta + rh_1)}{H_n^{(1)}(k_r z \times \tan \beta)}
\end{aligned} \quad (9)$$

重建锥面上任意点 $r_s = (r_s, \theta, z)$ 处波数矢量为 K_m 的单元面波由全息面上所有点 $r_{Hn} = (r_H, \theta_n, z_n)$ 处波数矢量为 K_m 的单元面波叠加而得到, 即:

$$\Phi_{K_m}(r_s) = \sum_{n=1}^N C_n(r_s) \Phi_{K_m}(r_{Hn}) \quad m=1, 2, \dots, M \quad (10)$$

式中, $r_{Hn} = (r_H, \theta_n, z_n)$ 为全息锥面上 N 个声压测量点, $n=1, 2, 3, \dots, N$, M 为重建锥面和全息锥面上复声压所包含的单元面波数目, $C_n(r_s)$ 为叠加系数;

根据上式 (7) - 式 (10) 可得:

$$p(r_s, \theta, z) \approx \frac{1}{2\pi} \sum_{m=1}^M P_n(a, K_m) \Phi_{K_m}(r_H, \theta, z) = \sum_{n=1}^N C_n(r_s) p(r_{Hn}) \quad (11)$$

式中, $p(r_s, \theta, z)$ 和 $p(r_{Hn})$ 分别为重建锥面和全息锥面上各点声压;

再由式 (8), 确定的 M 个线性方程所构成的方程组:

$$\alpha(r_s) = \begin{bmatrix} \Phi_{K_1}(r_s) \\ \Phi_{K_2}(r_s) \\ \vdots \\ \Phi_{K_M}(r_s) \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$C_n(r_s) = \begin{bmatrix} C_1(r_s) \\ \vdots \\ \vdots \\ C_N(r_s) \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$A = \begin{bmatrix} \Phi_{K_1}(r_{H1}) & \Phi_{K_1}(r_{H2}) & \cdots & \Phi_{K_1}(r_{HN}) \\ \Phi_{K_2}(r_{H1}) & \Phi_{K_2}(r_{H2}) & \cdots & \Phi_{K_2}(r_{HN}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \Phi_{K_M}(r_{H1}) & \Phi_{K_M}(r_{H2}) & \cdots & \Phi_{K_M}(r_{HN}) \end{bmatrix} \quad (14)$$

其中 $M \geq N$, 则方程组可以表示为:

$$\alpha(r_s) = AC_n(r_s) \quad (15)$$

其中 M 根据柱面 SONAH 理论中确定波数矢量的方法来确定;

通过正则化来抑制小幅度倏逝波的影响, 得上式的正则化解为:

$$C_n(r_s) = (A^H A + \lambda^2 I)^{-1} A^H \alpha(r_s) \quad (16)$$

式中, A^H 为矩阵 A 的共轭转置矩阵, λ 为正则化参数, 起滤波作用, I 为单位对角阵;

步骤3), 利用 Nyquist 采样定理选择声波波数矢量, 选取的单元面波包含锥形面所有全息声压数据;

步骤4), 采用标准 Tikhonov 正则化方法, 使用基于后验准则的广义交叉验证 (GCV) 选取正则化参数;

步骤5), 利用步骤4) 标准Tikhonov正则化结合GCV方法求取叠加系数矩阵;

步骤6), 将锥形壳体结构装备表面声压表示为共形测量面声压的线性叠加, 获得锥形壳体结构装备辐射声场。

2. 根据权利要求1所述的一种锥面声源统计近场声全息方法, 其特征在于, 使用与锥形壳体结构装备表面共形的测量面, 布置声压传感器, 获取高效的全息声压数据。

3. 根据权利要求2所述的一种锥面声源统计近场声全息方法, 其特征在于, 使用传声器测量声场全息声压数据, 采用锥面统计最优近场声全息算法采集全息声压数据。

4. 根据权利要求1所述的一种锥面声源统计近场声全息方法, 其特征在于, 利用标准Tikhonov正则化结合基于后验准则的广义交叉验证选取正则化参数, 确定 λ 使GCV目标函数达到极小, 其中GCV函数定义为:

$$G(\lambda) = \frac{\|Ax - b\|^2}{(\Gamma(\lambda))^2} \quad (17)$$

$$\Gamma(\lambda) = \text{trace}(I_m - A(A^T + \lambda^2 I^T I)^{-1} A^T) = m - n + \sum_{i=1}^p \frac{\lambda^2}{\lambda^2 + \sigma_i^2} \quad (18)$$

其中, $\text{trace}()$ 表示方阵的迹, 即方阵的对角线各个元素的和, σ_i 为矩阵A的特征值。

5. 根据权利要求1所述的一种锥面声源统计近场声全息方法, 其特征在于, 利用正则化去除测量误差的方法, 结合公式(12)、(13)和(14), 求取叠加系数 $C(r_s) = (A^+ A + \lambda^2)^{-1} A^+ b$;

利用求取的叠加系数 $C(r_s)$ 和在全息面上测得的各点声压 $p(r_{Hn})$, 将锥形壳体结构装备表面各点声压表示为共形测量面声压的线性叠加, 即 $p(r_s) = C(r_s) p(r_{Hn})$, 获得锥形壳体结构装备辐射声场。

一种锥面声源统计近场声全息方法

技术领域

[0001] 本发明属于机械结构声辐射信号处理领域,特别涉及一种锥面声源统计近场声全息方法。

背景技术

[0002] 作为海军作战装备,水下航行器的续航力大,机动性强,独立作战能力强,但其产生的噪声波在海水中可传递至数百海里,易被地方探测,严重削弱了其声隐身性能,降低了其作战性能。因此,提高其声隐身性能是保证其安全性和作战能力关键。目前,首要解决的技术问题是获得水下航行器辐射声场,以实现对其隐身性能的精确评估。但对于内部声源繁多、传播路径复杂的水下航行器壳体装备,难以对其声隐身性能进行精确评估。当前,普遍利用装备有高精度固定式测量分析系统的水声试验场测试评估水下航行器声隐身性能,然而,水声试验场选址要求极高、技术复杂且成本高昂。

[0003] 近场声全息(Nearfield Acoustic Holography,NAH)是一种非常有效的噪声源识别、定位与声场可视化方法,是通过近场测试获取足够多低空间频率传播波和高空间频率倏逝波成分重建出分辨率不受分析波长限制的高精度全息图像和丰富空间声场信息。然而传统NAH是通过空间二维傅立叶变换来实现解卷积运算得到重建面声压,在全息计算过程中会带来窗效应和卷绕误差,因而要求测试孔径面积至少为声源面积两倍,对于大尺寸锥形壳体结构装备,满足NAH要求的精确测试很难实现。除此,在水下航行器低速航行时,机械设备振动噪声为主要噪声,其声源位于锥形结构,然而在目前的NAH研究中,还未出现锥面声源辐射声场重构的研究。

发明内容

[0004] 本发明的目的在于提供一种锥面声源统计近场声全息方法,以克服现有技术的不足。

[0005] 为达到上述目的,本发明采用如下技术方案:

[0006] 一种锥面声源统计近场声全息方法,包括以下步骤:

[0007] 步骤1),获取待测锥形结构外侧全息声压数据;

[0008] 步骤2),通过柱面-锥面坐标变换,构造适用于锥面声源的单元面波;

[0009] 步骤3),利用Nyquist采样定理选择声波波数矢量,选取的单元面波包含锥形面所有全息声压数据;

[0010] 步骤4),采用标准Tikhonov正则化方法,使用基于后验准则的广义交叉验证(GCV)选取正则化参数;

[0011] 步骤5),利用步骤4)标准Tikhonov正则化结合GCV方法求取叠加系数矩阵;

[0012] 步骤6),将锥形壳体结构装备表面声压表示为共形测量面声压的线性叠加,获得锥形壳体结构装备辐射声场。

[0013] 进一步的,使用与锥形壳体结构装备表面共形的测量面,布置声压传感器,获取

高效的全息声压数据。

[0014] 进一步的,使用传声器测量声场全息声压数据,采用锥面统计最优近场声全息算法采集全息声压数据。

[0015] 进一步的,步骤2)中,通过柱面-锥面坐标变换,采用分离变量法求解 Helmholtz 方程,得到空间任意点处的复声压,其过程如下:

[0016] 首先,得到稳态声波场Helmholtz方程在柱面坐标系下的行波解为

$$[0017] \quad p(r, \theta, z) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} e^{in\theta} \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} [D_n^{(1)}(k_z) H_n^{(1)}(k_r r) e^{ik_z z}] dk_z \quad (1)$$

[0018] 式中, $p(r, \theta, z)$ 为空间任意点声压,定义 $e^{in\theta}$ 和 $e^{ik_z z}$ 为柱面波函数, k_z 为轴向波数, $k_r = \sqrt{k^2 - k_z^2}$ (k 为声波数), n 为周向波数; $D_n^{(1)}(k_z)$ 为待定未知数, $H_n^{(1)}$ 表示 n 阶第一类Henkel函数;

[0019] 在柱面坐标系下,令 $P_n(r, n, k_z)$ 为 $p(r, \theta, z)$ 的二维傅氏变换,为

$$[0020] \quad P_n(r, n, k_z) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} e^{-in\theta} d\theta \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-ik_z z} p(r, \theta, z) dz \quad (2)$$

[0021] 同时给出其傅氏反变换为

$$[0022] \quad p(r, \theta, z) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} dk_z P_n(r, n, k_z) e^{-in\theta} e^{-ik_z z} \quad (3)$$

[0023] 令上式 $r=a$ 得,

$$[0024] \quad p(a, \theta, z) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} dk_z P_n(a, n, k_z) e^{-in\theta} e^{-ik_z z} \quad (4)$$

[0025] 由(1)(2)(3)(4)式可解得:

$$[0026] \quad p(r, \theta, z) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} e^{in\theta} \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \left[P_n(a, k_z) \times e^{ik_z z} \frac{H_n^{(1)}(k_r r)}{H_n^{(1)}(k_r a)} \right] dk_z \quad (5)$$

[0027] 式中, $P_n(a, k_z)$ 为 $p(a, \theta, z)$ 的二维傅氏变换。

[0028] 进一步的,由波数矢量 $K = (n, k_z)$ 确定的柱面上的空间频率域单元柱面波为:

$$[0029] \quad \Phi_k(r, \theta, z) = e^{in\theta} e^{ik_z z} \frac{H_n^{(1)}(k_r r)}{H_n^{(1)}(k_r a)} \quad (6)$$

[0030] 将积分运算离散化,则全息面和重建面上的复声压表示为:

$$[0031] \quad \begin{aligned} p(r_H, \theta, z) &\approx \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \frac{1}{2\pi} \sum_{k_z=-\infty}^{+\infty} P_n(a, k_z) \frac{H_n^{(1)}(k_r r)}{H_n^{(1)}(k_r a)} e^{in\theta} e^{ik_z z} \\ &= \frac{1}{2\pi} \sum_{m=1}^M P_n(a, K_m) \frac{H_n^{(1)}(k_r r)}{H_n^{(1)}(k_r a)} e^{in\theta} e^{ik_z z} = \frac{1}{2\pi} \sum_{m=1}^M P_n(a, K_m) \Phi_{K_m}(r_H, \theta, z) \end{aligned} \quad (7)。$$

[0032] 进一步的,锥面测量结构时,锥角 β 保持不变,将式(6)中的柱面不变量 r 用锥面锥角 β 表示,式(6)可变为如下形式:

$$[0033] \quad \Phi_k((z \times \tan \beta + r h_1), \theta, z) = e^{in\theta} e^{ik_z z} \frac{H_n^{(1)}(k_r z \times \tan \beta + r h_1)}{H_n^{(1)}(k_r z \times \tan \beta)} \quad (8)$$

[0034] 再将式(7)在锥面下为:

$$\begin{aligned}
[0035] \quad p((z \times \tan \beta + rh_1), \theta, z) &\approx \frac{1}{2\pi} \sum_{m=1}^M P_n(a, K_m) \Phi_{K_m}(r_H, \theta, z) \\
&= \frac{1}{2\pi} \sum_{m=1}^M P_n(k_r z \times \tan \beta, K_m) e^{in\theta} e^{ik_z z} \frac{H_n^{(1)}(k_r z \times \tan \beta + rh_1)}{H_n^{(1)}(k_r z \times \tan \beta)}
\end{aligned} \quad (9)$$

[0036] 重建锥面上任意点 $r_S = (r_S, \theta, z)$ 处波数矢量为 K_m 的单元面波由全息面上所有点 $r_{Hn} = (r_{Hn}, \theta_n, z_n)$ 处波数矢量为 K_m 的单元面波叠加而得到, 即:

$$[0037] \quad \Phi_{K_m}(r_S) = \sum_{n=1}^N C_n(r_S) \Phi_{K_m}(r_{Hn}) \quad m = 1, 2, \dots, M \quad (10)$$

[0038] 式中, $r_{Hn} = (r_{Hn}, \theta_n, z_n)$ ($n = 1, 2, \dots, N$) 为全息锥面上 N 个声压测量点, M 为重建锥面和全息锥面上复声压所包含的单元面波数目, $C_n(r_S)$ 为叠加系数;

[0039] 根据上述原理, 可得:

$$[0040] \quad p(r_S, \theta, z) \approx \frac{1}{2\pi} \sum_{m=1}^M P_n(a, K_m) \Phi_{K_m}(r_H, \theta, z) = \sum_{n=1}^N C_n(r_S) p(r_{Hn}) \quad (11)$$

[0041] 式中, $p(r_S, \theta, z)$ 和 $p(r_{Hn})$ 分别为重建锥面和全息锥面上各点声压;

[0042] 再由式 (8), 确定的 M 个线性方程所构成的方程组:

$$[0043] \quad \alpha(r_S) = \begin{bmatrix} \Phi_{K_1}(r_S) \\ \Phi_{K_2}(r_S) \\ \vdots \\ \Phi_{K_M}(r_S) \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$[0044] \quad C_n(r_S) = \begin{bmatrix} C_1(r_S) \\ \vdots \\ \vdots \\ C_N(r_S) \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$[0045] \quad A = \begin{bmatrix} \Phi_{K_1}(r_{H1}) & \Phi_{K_1}(r_{H2}) & \cdots & \Phi_{K_1}(r_{HN}) \\ \Phi_{K_2}(r_{H1}) & \Phi_{K_2}(r_{H2}) & \cdots & \Phi_{K_2}(r_{HN}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \Phi_{K_M}(r_{H1}) & \Phi_{K_M}(r_{H2}) & \cdots & \Phi_{K_M}(r_{HN}) \end{bmatrix} \quad (14)$$

[0046] 其中 $M \geq N$, 则方程组可以表示为:

$$[0047] \quad \alpha(r_S) = A C_n(r_S) \quad (15)$$

[0048] 其中 M 根据柱面 SONAH 理论中确定波数矢量的方法来确定;

[0049] 通过正则化来抑制小幅度倏逝波的影响, 得上式的正则化解为:

$$[0050] \quad C_n(r_S) = (A^H A + \lambda^2 I)^{-1} A^H \alpha(r_S) \quad (16)$$

[0051] 式中, A^H 为矩阵 A 的共轭转置矩阵, λ 为正则化参数, 起滤波作用, I 为单位对角阵。

[0052] 进一步的, 利用标准 Tikhonov 正则化结合基于后验准则的广义交叉验证 选取正则化参数, 确定 λ 使 GCV 目标函数达到极小, 其中 GCV 函数定义为:

$$[0053] \quad G(\lambda) = \frac{\|Ax - b\|^2}{(\Gamma(\lambda))^2} \quad (17)$$

$$[0054] \quad \Gamma(\lambda) = \text{trace}(I_m - A(A^T + \lambda^2 I^T I)^{-1} A^T) = m - n + \sum_{i=1}^p \frac{\lambda^2}{\lambda^2 + \sigma_i^2} \quad (18)$$

[0055] 其中, $\text{trace}()$ 表示方阵的迹, 即方阵的对角线各个元素的和, σ_i 为 矩阵A的特征值。

[0056] 进一步的, 利用正则化去除测量误差的方法, 结合公式(12)、(13)和(14), 求取叠加系数 $C(r_s) = (A^+ A + \lambda^2) A^+ b$;

[0057] 利用权利要求5)中求取的叠加系数 $C(r_s)$ 和在全息面上测得的各点声压 $p(r_{Hn})$, 将锥形壳体结构装备表面各点声压表示为共形测量面声压的线性叠加, 即 $p(r_s) = C(r_s) p(r_{Hn})$, 获得锥形壳体结构装备辐射声场。

[0058] 与现有技术相比, 本发明具有以下有益的技术效果:

[0059] 本发明公开了一种锥面声源统计近场声全息方法, 利用与壳体结构装备共形的测量面获取全息声压数据, 在统计最优柱面近场声全息理论方法的基础上, 通过柱面-锥面坐标变换, 直接通过空间域全息面上复声压的线性叠加来计算锥形壳体结构装备辐射声场, 填补了近场声全息技术在锥面声源中的应用空白。本方法充分展示了其在低频噪声分析中的有效性, 适用于锥形壳体结构水下兵器, 从而为锥形壳体结构装备的声隐身性能评估提供了理论基础, 具有重要的理论意义及工程应用价值。适用于主要处于低频振动噪声的锥形壳体结构装备的辐射声场重构, 将锥形壳体结构装备辐射声场以可视化的方式显示出来, 从而可以直观看出辐射声场的大小及分布情况。

[0060] 本发明在统计最优柱面近场声全息及技术的基础上, 通过柱面-锥面坐标变换, 直接通过空间域中全息面上复声压的叠加来计算重建面上的复声压, 不但从原理上解决了NAH带来的窗效应和卷绕误差。

[0061] 采用本发明提供的方法测量声场信息时, 除了记录传播波成分外, 还能记录高空间频率且随传播距离按指数规律衰减的倏逝波成分, 获得了丰富的声场信息, 提高了重构精度。

[0062] 本发明提供的方法对锥形壳体结构装备辐射声场进行重构, 适用于锥形结构水下兵器, 能够实现锥形壳体结构装备辐射声场重构, 为其声隐身性能评估提供了理论基础。

[0063] 本发明锥面声源统计最优近场声全息可以很好地解决以上问题, 适用于锥形结构水下兵器, 可实现锥形壳体结构装备辐射声场的重构。

附图说明

[0064] 图1为本发明全息测量面加噪声理论声压图;

[0065] 图2为本发明锥形壳体结构装备表面理论声压图;

[0066] 图3为本发明锥形壳体结构装备表面重建声压图;

[0067] 图4为本发明 $\theta=0$ 母线上声压分布曲线;

[0068] 图5为本发明不同测量距离下 $\theta=0$ 母线上声压分布曲线;

[0069] 图6为本发明全息测量面加噪声理论声压图;

[0070] 图7为本发明锥形壳体结构装备表面理论声压图;

[0071] 图8为本发明锥形壳体结构装备表面重建声压图;

- [0072] 图9为本发明 $\theta=0$ 母线上声压分布曲线；
 [0073] 图10为本发明不同正则化参数选取方法的重构误差曲线。
 [0074] 图11为本发明锥面近场声全息测量结构示意图。
 [0075] 图12为本发明锥面近场声全息测量结构测量面正视图。

具体实施方式

- [0076] 下面结合附图对本发明做进一步详细描述：
 [0077] 如图1至图10所示，一种锥面声源统计近场声全息方法，包括以下步骤：
 [0078] 步骤1)，获取待测锥形结构外侧全息声压数据；
 [0079] 步骤2)，通过柱面-锥面坐标变换，构造适用于锥面声源的单元面波；
 [0080] 步骤3)，利用Nyquist采样定理选择声波波数矢量，选取的单元面波包 含锥形面所有全息声压数据；
 [0081] 步骤4)，采用标准Tikhonov正则化方法，使用基于后验准则的广义交叉验证(GCV)选取正则化参数；
 [0082] 步骤5)，利用步骤4)标准Tikhonov正则化结合GCV方法求取叠加系数 矩阵；
 [0083] 步骤6)，将锥形壳体结构装备表面声压表示为共形测量面声压的线性叠 加，获得锥形壳体结构装备辐射声场。
 [0084] 本发明为模拟锥形、类锥形壳体结构装备，采用轴向为1.2m、大截面半 径为0.3m，小截面半径为0.12m的锥形壳体为研究对象；使用与锥形壳体结 构装备表面共形的测量面，选择合理的测量参数，布置声压传感器，获取高 效的全息声压数据；
 [0085] 步骤1)中，使用传声器测量声场全息声压数据；
 [0086] 采用锥面统计最优近场声全息算法采集全息声压数据；
 [0087] 在统计最优柱面近场声全息技术基础上，通过柱面-锥面坐标变换，采用 分离变量法求解Helmholtz方程，仅考虑向外发散传播的声波，得到空间任 意点处的复声压。其实现过程如下：

[0088] 首先，得到稳态声波场Helmholtz方程在柱面坐标系下的行波解为

$$[0089] \quad p(r, \theta, z) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} e^{in\theta} \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} [D_n^{(1)}(k_z) H_n^{(1)}(k_r r) e^{ik_z z}] dk_z \quad (1)$$

[0090] 式中， $p(r, \theta, z)$ 为空间任意点声压，定义 $e^{in\theta}$ 和 $e^{ik_z z}$ 为柱面波函数， k_z 为 轴向波数， $k_r = \sqrt{k^2 - k_z^2}$ (k 为声波数)， n 为周向波数。 $D_n^{(1)}(k_z)$ 为待定未知数， $H_n^{(1)}$ 表示 n 阶第一类Henkel函数；

[0091] 在柱面坐标系下，令 $P_n(r, n, k_z)$ 为 $p(r, \theta, z)$ 的二维傅氏变换，为

$$[0092] \quad P_n(r, n, k_z) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} e^{-in\theta} d\theta \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-ik_z z} p(r, \theta, z) dz \quad (2)$$

[0093] 同时给出其傅氏反变换为

$$[0094] \quad p(r, \theta, z) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} dk_z P_n(r, n, k_z) e^{-in\theta} e^{-ik_z z} \quad (3)$$

[0095] 令上式 $r=a$ 得，

$$[0096] \quad p(a, \theta, z) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} dk_z P_n(a, n, k_z) e^{-in\theta} e^{-ik_z z} \quad (4)$$

[0097] 由(1)(2)(3)(4)式可解得:

$$[0098] \quad p(r, \theta, z) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} e^{in\theta} \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \left[P_n(a, k_z) \times e^{ik_z z} \frac{H_n^{(1)}(k_r r)}{H_n^{(1)}(k_r a)} \right] dk_z \quad (5)$$

[0099] 式中, $P_n(a, k_z)$ 为 $p(a, \theta, z)$ 的二维傅氏变换。

[0100] 由波数矢量 $K = (n, k_z)$ 确定的柱面上的空间频率域单元柱面波为:

$$[0101] \quad \Phi_k(r, \theta, z) = e^{in\theta} e^{ik_z z} \frac{H_n^{(1)}(k_r r)}{H_n^{(1)}(k_r a)} \quad (6)$$

[0102] 将积分运算离散化, 则全息面和重建面上的复声压表示为:

$$[0103] \quad \begin{aligned} p(r_H, \theta, z) &\approx \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \frac{1}{2\pi} \sum_{k_z=-\infty}^{+\infty} P_n(a, k_z) \frac{H_n^{(1)}(k_r r)}{H_n^{(1)}(k_r a)} e^{in\theta} e^{ik_z z} \\ &= \frac{1}{2\pi} \sum_{m=1}^M P_n(a, K_m) \frac{H_n^{(1)}(k_r r)}{H_n^{(1)}(k_r a)} e^{in\theta} e^{ik_z z} = \frac{1}{2\pi} \sum_{m=1}^M P_n(a, K_m) \Phi_{K_m}(r_H, \theta, z) \end{aligned} \quad (7)$$

[0104] 在柱面SONAH技术中, 单元柱面波表达式(6)中, 对于一确定的圆柱测量面, 其半径 r 是确定的, 包围声源的圆柱面半径 a 也是确定的, 两者都不随圆柱面轴向位置的变化而变化。然而对于锥面声源, 其半径大小是随轴向距离位置的变化而变化, 但同样地, 考虑到一固定的锥面, 无论是锥面测量面还是包含声源的圆锥面, 其锥角的大小是固定不变的。锥面近场声全息测量方案如图11所示, 最外层圆锥面为全息测量面, 测量面沿锥面母线的长度为 L , 上表面半径为 r_s 所在的圆锥面为重建面, 声源都包含在上表面半径为 r_a 所在的圆锥面内。

[0105] 测量面正视图如图12所示, 在整个锥面上, 锥角 β 保持不变, 源面位于图中虚线位置。故可将式(6)中的柱面不变量 r 用锥面锥角 β 表示, 式(6)可变为如下形式:

$$[0106] \quad \Phi_k((z \times \tan \beta + r h_1), \theta, z) = e^{in\theta} e^{ik_z z} \frac{H_n^{(1)}(k_r z \times \tan \beta + r h_1)}{H_n^{(1)}(k_r z \times \tan \beta)} \quad (8)$$

[0107] 再将式(7)在锥面下为:

$$[0108] \quad \begin{aligned} p((z \times \tan \beta + r h_1), \theta, z) &\approx \frac{1}{2\pi} \sum_{m=1}^M P_n(a, K_m) \Phi_{K_m}(r_H, \theta, z) \\ &= \frac{1}{2\pi} \sum_{m=1}^M P_n(k_r z \times \tan \beta, K_m) e^{in\theta} e^{ik_z z} \frac{H_n^{(1)}(k_r z \times \tan \beta + r h_1)}{H_n^{(1)}(k_r z \times \tan \beta)} \end{aligned} \quad (9)$$

[0109] 同样, 根据波场的叠加原理可知: 重建面上任意点处任意波数矢量的单元柱面波, 只能由全息面上所有点处相同波数矢量的单元柱面波叠加而成, 则重建锥面上任意点 $r_s = (r_s, \theta, z)$ 处波数矢量为 K_m 的单元面波都可以由全息面上所有点 $r_{Hn} = (r_H, \theta_n, z_n)$ 处波(在这里 $r_{Hn} = z_n \times \tan \beta + r h_1$) 数矢量为 K_m 的单元面波叠加而得到, 即:

$$[0110] \quad \Phi_{K_m}(r_s) = \sum_{n=1}^N C_n(r_s) \Phi_{K_m}(r_{Hn}) \quad m=1, 2, \dots, M \quad (10)$$

[0111] 式中, $r_{Hn} = (r_H, \theta_n, z_n)$ ($n=1, 2, \dots, N$) 为全息锥面上 N 个声压测量点, M 为重建锥面

和全息锥面上复声压所包含的单元面波数目, $C_n(r_s)$ 为叠加系数;

[0112] 根据上述原理, 可得:

$$[0113] \quad p(r_s, \theta, z) \approx \frac{1}{2\pi} \sum_{m=1}^M P_n(a, K_m) \Phi_{K_m}(r_H, \theta, z) = \sum_{n=1}^N C_n(r_s) p(r_{Hn}) \quad (11)$$

[0114] 式中, $p(r_s, \theta, z)$ 和 $p(r_{Hn})$ 分别为重建锥面和全息锥面上各点声压。

[0115] 再由式 (8), 确定的 M 个线性方程所构成的方程组:

$$[0116] \quad \alpha(r_s) = \begin{bmatrix} \Phi_{K1}(r_s) \\ \Phi_{K2}(r_s) \\ \vdots \\ \Phi_{KM}(r_s) \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$[0117] \quad C_n(r_s) = \begin{bmatrix} C_1(r_s) \\ \vdots \\ \vdots \\ C_N(r_s) \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$[0118] \quad A = \begin{bmatrix} \Phi_{K1}(r_{H1}) & \Phi_{K1}(r_{H2}) & \cdots & \Phi_{K1}(r_{HN}) \\ \Phi_{K2}(r_{H1}) & \Phi_{K2}(r_{H2}) & \cdots & \Phi_{K2}(r_{HN}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \Phi_{KM}(r_{H1}) & \Phi_{KM}(r_{H2}) & \cdots & \Phi_{KM}(r_{HN}) \end{bmatrix} \quad (14)$$

[0119] 其中 $M \geq N$, 则方程组可以表示为:

$$[0120] \quad \alpha(r_s) = AC_n(r_s) \quad (15)$$

[0121] 其中 M 根据柱面SONAH理论中确定波数矢量的方法来确定;

[0122] 通过正则化来抑制小幅度倏逝波的影响, 得上式的正则化解为:

$$[0123] \quad C_n(r_s) = (A^H A + \lambda^2 I)^{-1} A^H \alpha(r_s) \quad (16)$$

[0124] 式中, A^H 为矩阵 A 的共轭转置矩阵, λ 为正则化参数, 起滤波作用, I 为单位对角阵。以上在统计最优柱面近场声全息理论的基础上推倒了基于声压 重构的锥面统计最优近场声全息技术的基本公式。

[0125] 进一步地, 利用标准Tikhonov正则化结合基于后验准则的广义交叉验证 (GCV) 选取正则化参数, 抑制噪声、随机误差等引起的测量误差; 该方法求解正则化参数是指: 确定 λ 使GCV目标函数达到极小, 其中GCV函数定义为:

$$[0126] \quad G(\lambda) = \frac{\|Ax - b\|^2}{(\Gamma(\lambda))^2} \quad (17)$$

$$[0127] \quad \Gamma(\lambda) = \text{trace}(I_m - A(A^T + \lambda^2 I^T I)^{-1} A^T) = m - n + \sum_{i=1}^p \frac{\lambda^2}{\lambda^2 + \sigma_i^2} \quad (18)$$

[0128] 其中, $\text{trace}()$ 表示方阵的迹, 即方阵的对角线各个元素的和, σ_i 为 矩阵 A 的特征值。GCV函数的分子项为正则化解的残差, 这一项在许多正则 化方法中均很容易计算。

[0129] 根据权利要求4所述的算法及权利要求5的正则化去除测量误差的方法, 结合公式 (12)、(13) 和 (14), 求取叠加系数 $C(r_s) = (A^H A + \lambda^2 I)^{-1} A^H b$ 。

[0130] 利用权利要求5)中求取的叠加系数 $C(r_s)$ 和在全息面上测得的各点声压 $p(r_{Hn})$,将锥形壳体结构装备表面各点声压表示为共形测量面声压的线性叠加,即 $p(r_s) = C(r_s)p(r_{Hn})$,获得锥形壳体结构装备辐射声场。

[0131] 为验证所提出锥面声源统计最优近场声全息对锥形壳体结构装备辐射声场重构的有效性,以轴向长度为1.2m、锥面大截面半径为0.30m,小截面半径为0.12m的锥形面模拟锥形壳体结构装备;在壳体内部使用半径逐渐增大的脉动球紧密排列,振动频率为 f ,半径由0.01m以0.02m为间隔增大到0.15m,位于 $0.1m \leq z \leq 1.12m$ 处。

[0132] 采用全息测量面与壳体结构装备表面共形的测量方案。全息锥面大截面半径为0.38m,小截面半径为0.20m,传声器在轴向的间隔为0.1m,周向间隔为 30° ,重构距离为0.08m,重构面锥形水下兵器结构表面。

[0133] 在全息测量面施加信噪比为40的随机噪声,在不同声源频率时,得到全息测量面加噪声理论声压如图1和图6所示,图1中 $f = 300\text{Hz}$,图6中 $f = 150\text{Hz}$,图2和图7为不同频率下锥形壳体结构装备表面理论声压图,图2中 $f = 300\text{Hz}$,图7中 $f = 150\text{Hz}$ 。利用锥面声源统计最优近场声全息方法对锥形壳体结构装备辐射声场进行重构,直接通过空间域全息面测量上复声压的线性叠加来计算壳体结构装备辐射声场,得到不同频率声源辐射声场分布图如图3和图8所示,图3中 $f = 300\text{Hz}$,图8中 $f = 150\text{Hz}$ 。在测量距离为 $d = 0.08\text{m}$ 和 0.04m 时,得到不同声源频率下 $\theta = 0$ 母线上声压分布曲线图如图4和图9所示,图4中 $f = 300\text{Hz}$, $d = 0.08\text{m}$,图9中 $f = 150\text{Hz}$, $d = 0.04\text{m}$,可见,锥面SONAH可以实现对锥面声源空间声场的重建,重建声场的计算值和理论值在各点都有较好的吻合。在 $d = 0.05\text{m}$ 和 0.1m 两个不同的测量距离下得到 $\theta = 0$ 母线上声压分布曲线如图5所示,图5中 $f = 300\text{Hz}$,当重建距离变小时,其所得到的重建值与理论值的吻合程度越好。图10为分别采用不同正则化参数选取方法,得到在不同频率(从 200Hz 以 100Hz 为步长变化到 1500Hz)下重构的总体相对误差曲线,可以看到,基于后验准则的GCV参数选取方法的重建效果要好于基于先验知识的Hald准则方法。而且GCV方法在实际应用中无需预先知道测量信号的误差水平,因此实用性更好。

[0134] 在现有的近场声全息技术中,还没有将NAH技术应用于锥面声源,因而对于锥形结构水下兵器辐射空间声场重构问题还尚未解决。本发明方法利用统计最优近场声全息技术实现了锥面声源辐射声场的重构,展示了其在低频噪声分析中的有效性,适用于锥形壳体结构水下兵器,从而为锥形壳体结构装备的声隐身性能评估提供了理论基础,具有重要的理论意义及工程应用价值。

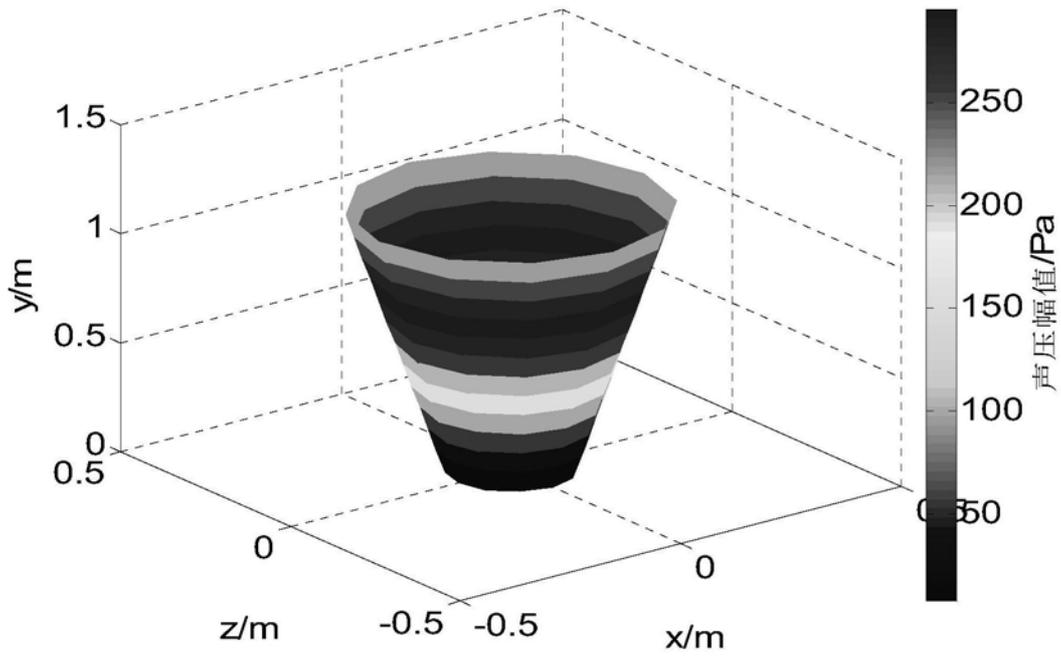


图1

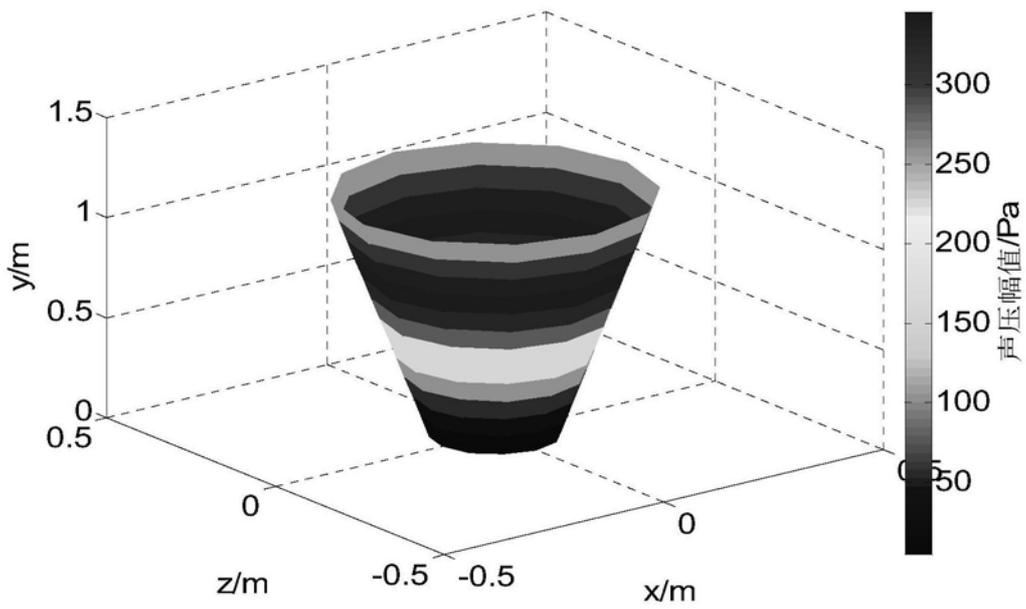


图2

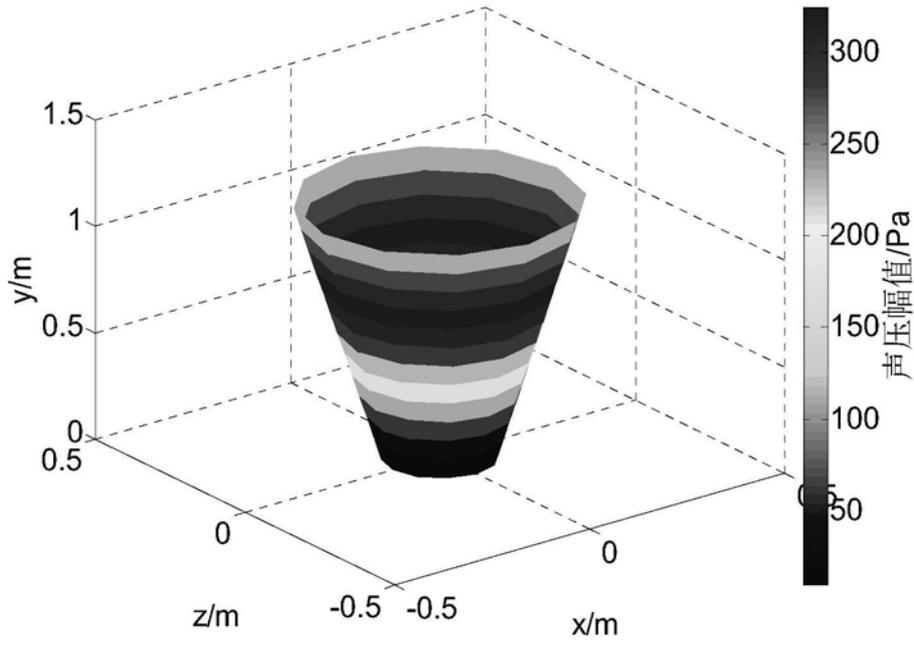


图3

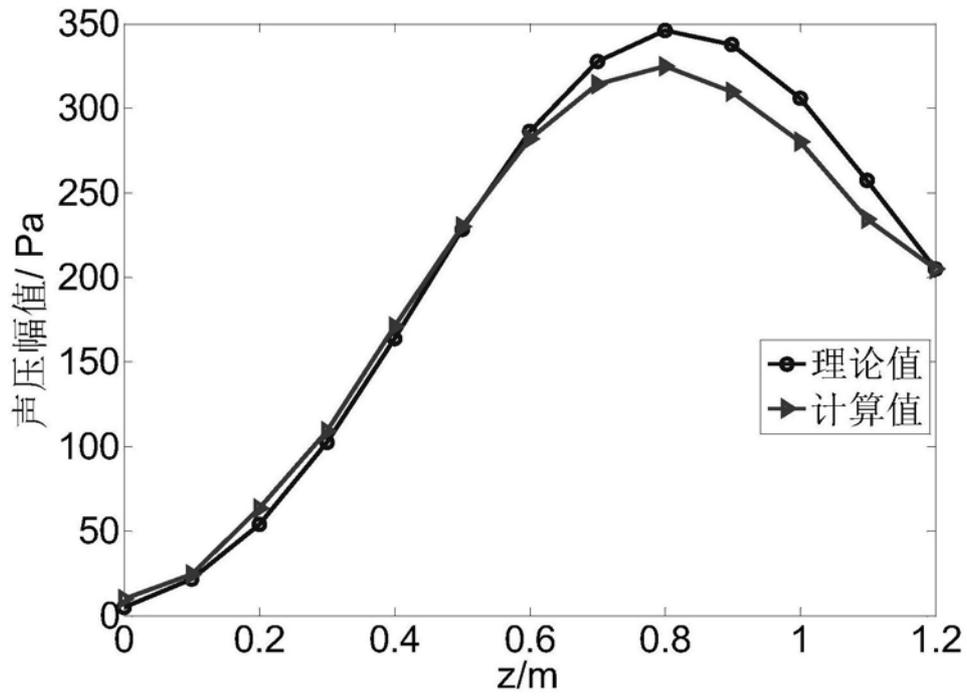


图4

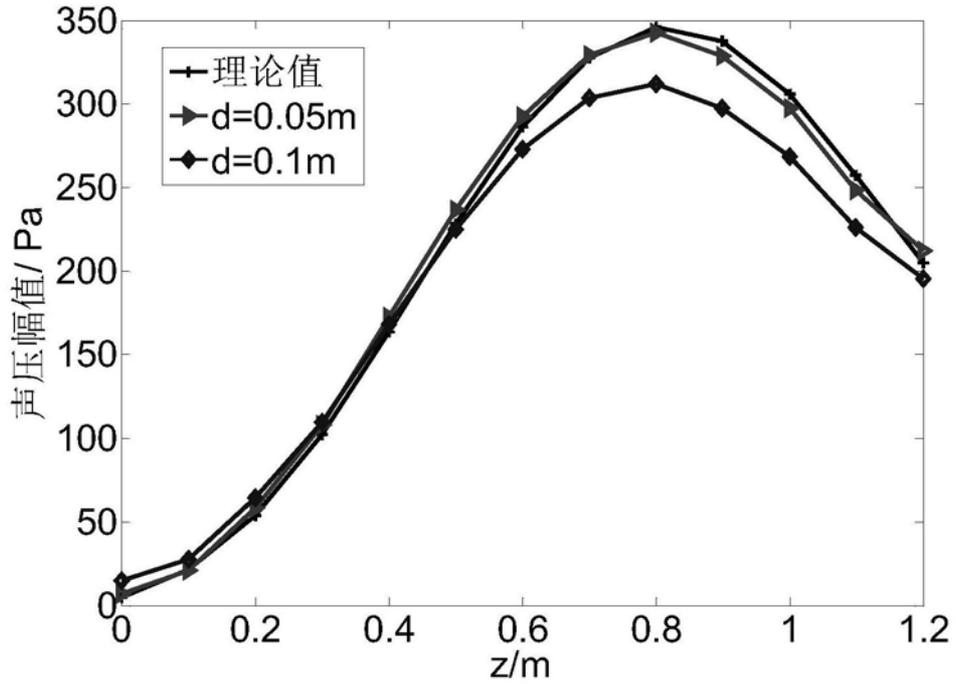


图5

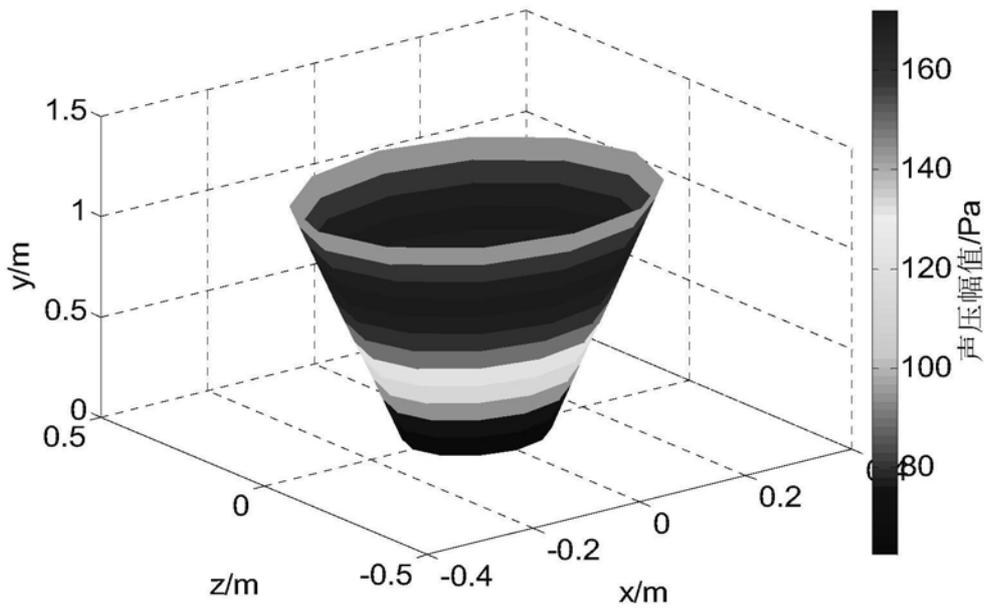


图6

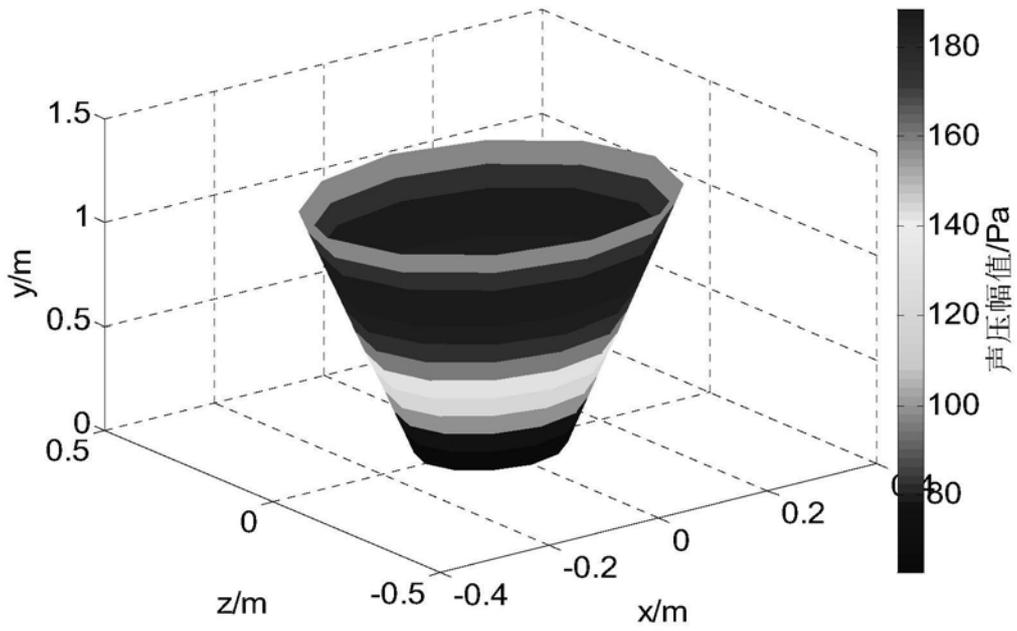


图7

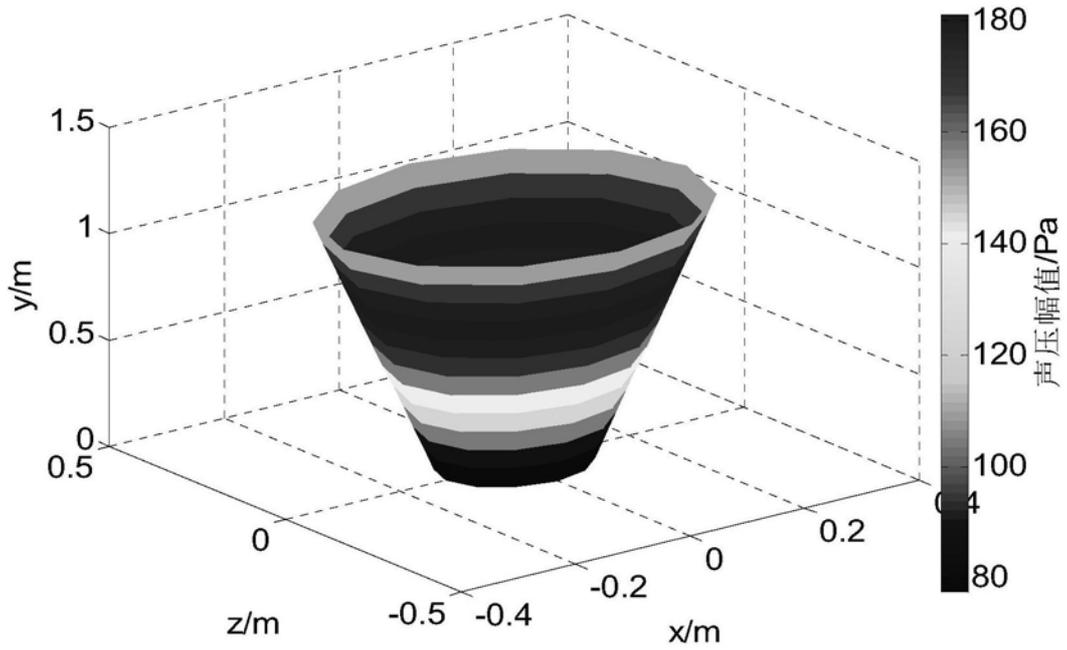


图8

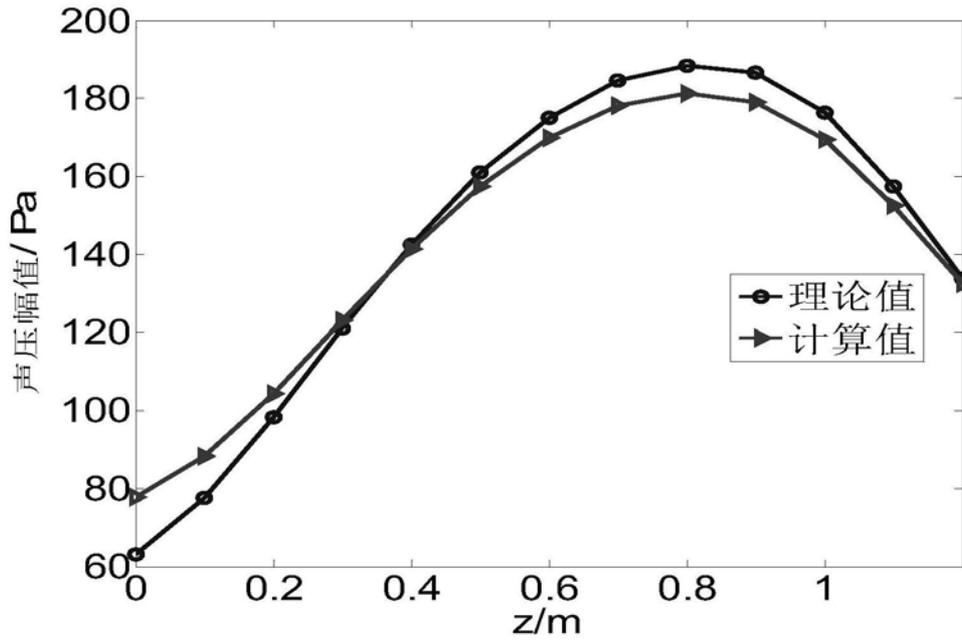


图9

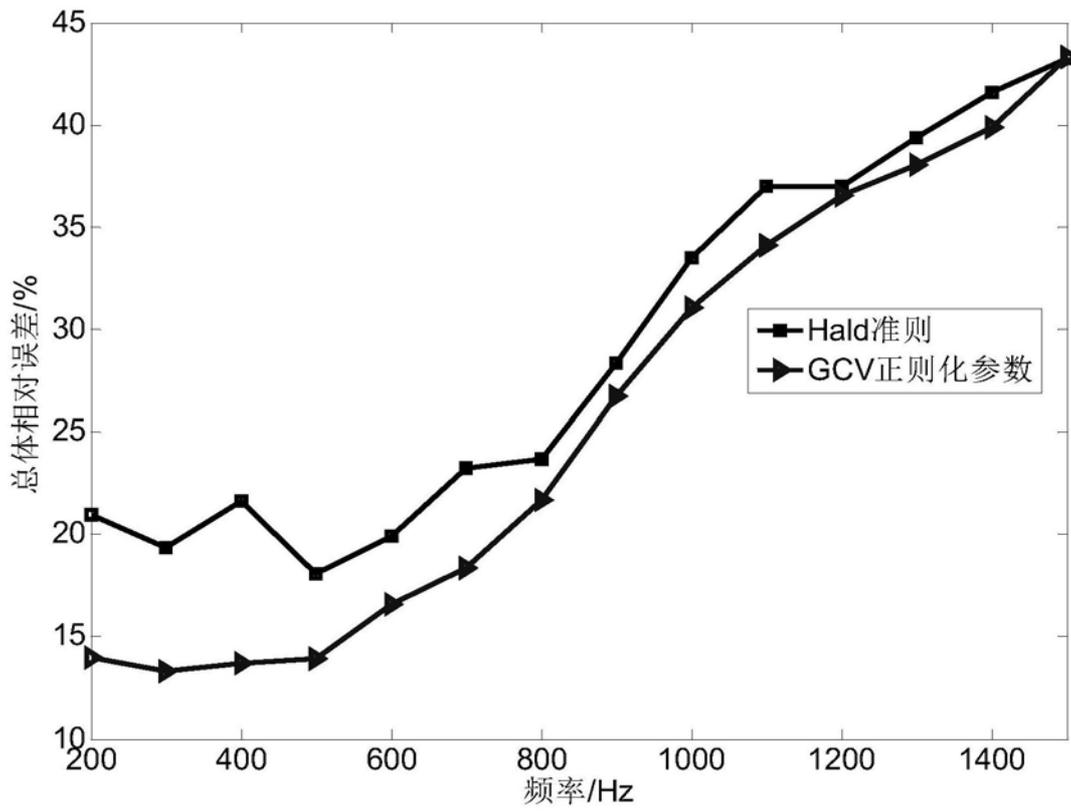


图10

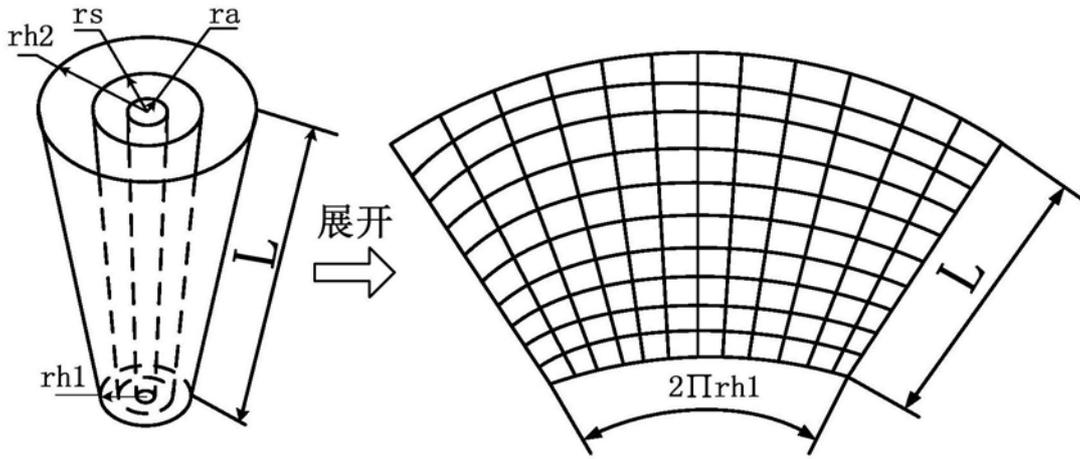


图11

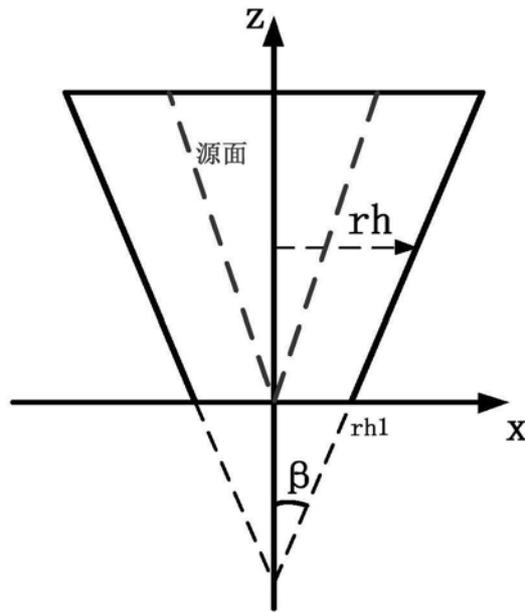


图12