



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 109764956 B

(45)授权公告日 2020.03.31

(21)申请号 201811607626.3

审查员 苏秦

(22)申请日 2018.12.27

(65)同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 109764956 A

(43)申请公布日 2019.05.17

(73)专利权人 西安交通大学

地址 710049 陕西省西安市咸宁西路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)

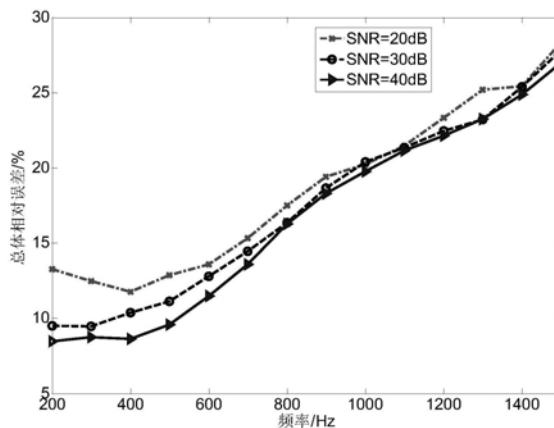
权利要求书3页 说明书8页 附图6页

(54)发明名称

一种基于组合优化正则化方法的近场声全息方法

(57)摘要

本发明公开了一种基于组合优化正则化方法的近场声全息方法,利用在全息面上测得的各点声压,在统计最优柱面近场声全息理论方法的基础上,对选取的波数矢量采用截断奇异值和标准Tikhonov组合优化正则化方法抑制噪声和随机误差引起的波数矢量的测量误差,即组合优化正则化方法,利用组合优化正则化方法和GCV方法求取叠加系数矩阵和在全息面上测得的各点声压,将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,即可获得壳体结构装备表面声场,充分展示了其在壳体辐射噪声分析中的有效性,适用于柱形壳体结构,将柱形水下航行器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,具有重要的理论意义及工程应用价值。



1. 一种基于组合优化正则化方法的近场声全息方法,其特征在于,包括以下步骤:

步骤1),在最大波数限定的空间波数平面上非等间隔地选取各波数矢量;

步骤2),对选取的波数矢量采用截断奇异值和标准Tikhonov组合优化正则化方法抑制噪声和随机误差引起的波数矢量的测量误差;具体的:对于截断点前的较大奇异值所对应的不含噪声的低空间频率成分采用TSVD方法进行处理,不进行正则化处理;对于截断点后的小奇异值,采用Tikhonov正则化方法,控制其对噪声的过度方法,同时保留高频细节信息;

经组合正则化得到的解为

$$x_{T\&Tik} = \sum_{i=1}^k \frac{u_i^T b}{\sigma_i} v_i + \sum_{i=k+1}^n \frac{\sigma_i^2}{\sigma_i^2 + \lambda^2} \frac{u_i^T b}{\sigma_i} v_i \quad (11);$$

步骤3),利用步骤2)组合优化正则化方法和GCV方法求取叠加系数矩阵C(rs)和在全息面上测得的各点声压p(r_{Hn}),将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(rs,θ,z)=C(rs)p(r_{Hn}),即可获得壳体结构装备表面声场。

2. 根据权利要求1所述的一种基于组合优化正则化方法的近场声全息方法,其特征在于,

步骤1)中,在最大波数限定的空间波数平面上非等间隔地选取各波数矢量:

最优柱面近场声全息方法过程如下:

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,θ,z)为空间任意点声压,定义e^{inθ}和e^{ik_zz}为柱面波函数,k_z为轴向波数,k_r=√(k²-k_z²),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,θ,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,θ,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:

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

重建柱面壳体结构装备表面上任意点 $r_s = (r_s, \theta, z)$ 处波数矢量为 K_m 的单元柱面波都可以由全息面上所有点 $r_{Hn} = (r_{Hn}, \theta_n, z_n)$ 处的波数矢量为 K_m 的单元柱面波叠加得到,即

$$\Phi_{km}(r_s) = \sum_{n=1}^N C(r_s) \Phi_{km}(r_{Hn}), m = 1, 2, 3, \dots, M \quad (7)$$

式中, $r_{Hn} = (r_{Hn}, \theta_n, z_n)$ ($n = 1, 2, \dots, N$)为全息柱面上 N 个声压测量点, M 为重建柱面和全息柱面上复声压所包含的单元柱面波的数目, $C(r_s)$ 为叠加系数矩阵;令

$$b = \begin{bmatrix} \Phi_{K1}(r_s) \\ \vdots \\ \Phi_{KM}(r_s) \end{bmatrix}, \quad C(r_s) = \begin{bmatrix} C_1(r_s) \\ \vdots \\ C_N(r_s) \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} \Phi_{K1}(r_{H1}) & \cdots & \Phi_{K1}(r_{HN}) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \Phi_{KM}(r_{H1}) & \cdots & \Phi_{KM}(r_{HN}) \end{bmatrix} \quad (8)$$

由上式确定的 M 个线性方程所构成的线性方程组表示成矩阵形式为

$$b = AC(r_s) \quad (9)$$

得到重建面上各点声压:

$$p(r_s, \theta, z) \approx \frac{1}{2\pi} \sum_{m=1}^M P_n(a, K_m) \Phi_{km}(r_s, \theta, z) = \sum_{n=1}^N C(r_s) p(r_{Hn}) \quad (10)$$

式中, $p(r_s, \theta, z)$ 为重建面上各点声压, $p(r_{Hn})$ 为测量面上各点声压。

3. 根据权利要求2所述的一种基于组合优化正则化方法的近场声全息方法,其特征在于,在Nyquist采样定理基础上,在波数域辐射圆内和辐射圆外采用不同大小的采样间隔。

4. 根据权利要求3所述的一种基于组合优化正则化方法的近场声全息方法,其特征在于,在波数域辐射圆内采样间隔小于在辐射圆外采样间隔。

5. 根据权利要求4所述的一种基于组合优化正则化方法的近场声全息方法,其特征在于,在辐射圆外的高波数区域按照满足采样定理的最大采样间隔 Δl 选取波数矢量,在辐射圆内低波数域以小采样间隔 $\frac{1}{2}\Delta l$ 选取波数矢量。

6. 根据权利要求1所述的一种基于组合优化正则化方法的近场声全息方法,其特征在于,使用基于后验准则的广义交叉验证选取截断点和正则化参数:

采用广义交叉验证方法确定截断点 k ,对于公式(11)中正则化参数 λ 的选取,以截断点 k 为正则化处理截断点之后奇异值的正则化参数,优化后的组合正则化方法得到的解为:

$$C(r_s) = \sum_{i=1}^k \frac{u_i^T b}{\sigma_i} v_i + \sum_{i=k+1}^n \frac{\sigma_i^2}{\sigma_i^2 + k^2} \frac{u_i^T b}{\sigma_i} v_i \quad (12)$$

结合公式(8)、(9)和(12),求取叠加系数矩阵 $C(r_s)$ 。

7. 根据权利要求6所述的一种基于组合优化正则化方法的近场声全息方法,其特征在于,根据求取的叠加系数矩阵 $C(r_s)$ 和在全息面上测得的各点声压 $p(r_{Hn})$,将柱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 $p(r_s, \theta, z) = C(r_s) p(r_{Hn})$,获得柱形壳体结构装备辐射声场。

8. 根据权利要求1所述的一种基于组合优化正则化方法的近场声全息方法,其特征在

于,使用与柱形壳体结构装备表面共形的测量面,根据测量距离、传感器间隔、测量面积,获取在全息面上测得的各点声压 $p(r_{\text{Hn}})$ 。

一种基于组合优化正则化方法的近场声全息方法

技术领域

[0001] 本发明属于机械结构声辐射信号处理领域,特别涉及一种基于组合优化正则化方法的近场声全息方法。

背景技术

[0002] 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,因此,提高其声隐身性能是保证其安全性的关键。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,海军强国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,对于大尺寸柱形壳体结构装备,满足NAH要求的精确测试很难实现。统计最优近场声全息技术(SONAH)直接通过全息测量面复声压的线性叠加实现空间声场的重建,从根本上避免了传统NAH存在的窗效应和卷绕误差,克服了对测量尺寸的严格要求。然而,国内学者对该方法进行了大量的理论和实验研究,不过往往偏重于统计最优平面近场声全息问题,对于水下航行器这种柱形声源研究较少,而且缺少对此声学不适应性问题的研究。

发明内容

[0004] 本发明的目的在于提供一种基于组合优化正则化方法的近场声全息方法,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] 一种基于组合优化正则化方法的近场声全息方法,包括以下步骤:

[0007] 步骤1),在最大波数限定的空间波数平面上非等间隔地选取各波数矢量;

[0008] 步骤2),对选取的波数矢量采用截断奇异值和标准Tikhonov组合优化正则化方法抑制噪声和随机误差引起的波数矢量的测量误差;

[0009] 步骤3),利用步骤2)组合优化正则化方法和GCV方法求取叠加系数矩阵 $C(r_s)$ 和在全息面上测得的各点声压 $p(r_{hn})$,将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 $p(r_s, \theta, z) = C(r_s) p(r_{hn})$,即可获得壳体结构装备表面声场。

[0010] 进一步的,步骤1)中,在最大波数限定的空间波数平面上非等间隔地选取各波数矢量:

[0011] 最优柱面近场声全息方法过程如下：

[0012] 稳态声波场Helmholtz方程在柱面坐标系下的行波解为

$$[0013] \quad p(r, \theta, z) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} e^{in\theta} \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} [D_n^{(1)}(k_z) H_n^{(1)}(k_r r) e^{ik_z z}] dk_z \quad (1)$$

[0014] 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;

[0015] 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

$$[0016] \quad P_n(r, n, k_z) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} e^{-in\theta} d\theta \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-ik_z z} p(r, \theta, z) dz \quad (2)$$

[0017] 同时给出其傅氏反变换为

$$[0018] \quad p(r, \theta, z) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} dk_z P_n(r, n, k_z) e^{-in\theta} e^{-ik_z z} \quad (3)$$

[0019] 令上式 $r=a$ 得,

$$[0020] \quad p(a, \theta, z) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} dk_z P_n(a, n, k_z) e^{-in\theta} e^{-ik_z z} \quad (4)$$

[0021] 由 (1) (2) (3) (4) 式可解得:

$$[0022] \quad p(r, \theta, z) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} e^{in\theta} \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \left[P_n(a, k_z) \times e^{ik_z z} \frac{H_n^{(1)}(k_r r)}{H_n^{(1)}(k_r a)} \right] dk_z \quad (5)$$

[0023] 式中, $P_n(a, k_z)$ 为 $p(a, \theta, z)$ 的二维傅氏变换。

[0024] 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:

$$[0025] \quad \Phi_k(r, \theta, z) = e^{in\theta} e^{ik_z z} \frac{H_n^{(1)}(k_r r)}{H_n^{(1)}(k_r a)} \quad (6)$$

[0026] 重建柱面壳体结构装备表面上任意点 $r_s = (r_s, \theta, z)$ 处波数矢量为 K_m 的单元柱面波都可以由全息面上所有点 $r_{Hn} = (r_{Hn}, \theta_n, z_n)$ 处的波数矢量为 K_m 的单元柱面波叠加得到, 即

$$[0027] \quad \Phi_{km}(r_s) = \sum_{n=1}^N C(r_s) \Phi_{km}(r_{Hn}), m=1, 2, 3, \dots, M \quad (7)$$

[0028] 式中, $r_{Hn} = (r_{Hn}, \theta_n, z_n)$ ($n=1, 2, \dots, N$) 为全息柱面上 N 个声压测量点, M 为重建柱面和全息柱面上复声压所包含的单元柱面波的数目, $C(r_s)$ 为叠加系数矩阵;

$$[0029] \quad \text{令 } b = \begin{bmatrix} \Phi_{K1}(r_s) \\ \vdots \\ \Phi_{KM}(r_s) \end{bmatrix}, \quad C(r_s) = \begin{bmatrix} C_1(r_s) \\ \vdots \\ C_N(r_s) \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} \Phi_{K1}(r_{H1}) & \cdots & \Phi_{K1}(r_{HN}) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \Phi_{KM}(r_{H1}) & \cdots & \Phi_{KM}(r_{HN}) \end{bmatrix} \quad (8)$$

[0030] 由上式确定的 M 个线性方程所构成的线性方程组表示成矩阵形式为

$$[0031] \quad b = AC(r_s) \quad (9)$$

[0032] 得到重建面上各点声压:

$$[0033] \quad p(r_s, \theta, z) \approx \frac{1}{2\pi} \sum_{m=1}^M P_n(a, K_m) \Phi_{K_m}(r_H, \theta, z) = \sum_{n=1}^N C(r_s) p(r_{Hn}) \quad (10)$$

[0034] 式中, $p(r_s, \theta, z)$ 为重建面上各点声压, $p(r_{Hn})$ 为测量面上各点声压。

[0035] 进一步的, 在Nyquist采样定理基础上, 在波数域辐射圆内和辐射圆外采用采用不同大小的采样间隔。

[0036] 进一步的, 在波数域辐射圆内采样间隔小于在辐射圆外采样间隔。

[0037] 进一步的, 在辐射圆外的高波数区域按照满足采样定理的最大采样间隔 Δl 选取波数矢量, 在辐射圆内低波数域以小采样间隔 $\frac{1}{2} \Delta l$ 选取波数矢量。

[0038] 进一步的, 采用截断奇异值和标准Tikhonov组合优化的正则化方法: 对于截断点前的较大奇异值所对应的不含噪声的低空间频率成分采用TSVD方法进行处理, 不进行正则化处理; 对于截断点后的小奇异值, 采用Tikhonov正则化方法, 控制其对噪声的过度方法, 同时保留高频细节信息;

[0039] 经组合正则化得到的解为

$$[0040] \quad x_{T\&Tik} = \sum_{i=1}^k \frac{u_i^T b}{\sigma_i} v_i + \sum_{i=k+1}^n \frac{\sigma_i^2}{\sigma_i^2 + \lambda^2} \frac{u_i^T b}{\sigma_i} v_i \quad (11)。$$

[0041] 进一步的, 使用基于后验准则的广义交叉验证选取截断点和正则化参数:

[0042] 采用广义交叉验证方法确定截断点k, 对于公式(11)中正则化参数 λ 的选取, 以截断点k为正则化处理截断点之后奇异值的正则化参数, 优化后的组合正则化方法得到的解为:

$$[0043] \quad C(r_s) = \sum_{i=1}^k \frac{u_i^T b}{\sigma_i} v_i + \sum_{i=k+1}^n \frac{\sigma_i^2}{\sigma_i^2 + k^2} \frac{u_i^T b}{\sigma_i} v_i \quad (12)$$

[0044] 结合公式(8)、(9)和(12), 求取叠加系数矩阵C(r_s)。

[0045] 进一步的, 根据求取的叠加系数矩阵C(r_s)和在全息面上测得的各点声压p(r_{Hn}), 将柱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 $p(r_s, \theta, z) = C(r_s) p(r_{Hn})$, 获得柱形壳体结构装备辐射声场。

[0046] 与现有技术相比, 本发明具有以下有益的技术效果:

[0047] 本发明公开了一种基于组合优化正则化方法的近场声全息方法, 利用在全息面上测得的各点声压p(r_{Hn}), 在统计最优柱面近场声全息理论方法的基础上, 提出改进方法, 对选取的波数矢量采用截断奇异值和标准Tikhonov组合优化正则化方法抑制噪声和随机误差引起的波数矢量的测量误差, 提出了组合优化正则化方法, 利用组合优化正则化方法和GCV方法求取叠加系数矩阵C(r_s)和在全息面上测得的各点声压p(r_{Hn}), 将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 $p(r_s, \theta, z) = C(r_s) p(r_{Hn})$, 即可获得壳体结构装备表面声场, 本方法充分展示了其在壳体辐射噪声分析中的有效性, 适用于柱形壳体结构, 将柱形水下航行器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, 具有重要的理论意义及工程应用价值。

[0048] 本发明在统计最优柱面近场声全息及技术的基础上, 在最大波数限定的空间波数平面上非等间隔地选取各波数矢量, 这样选取能够有效地获取声场中低波数主要能量, 又

可以保证高波数域能量的获取,保证了声场信息获得的完整性,有效地减少了噪声信号对重建精度的影响。

[0049] 采用本发明提供的组合优化方法,比TSVD包含更多的细节信息,同时Tikhonov正则化保留高频细节信息且抑制了小奇异值对噪声的放大作用,能够获得更高的重建精度和稳定性。

附图说明

- [0050] 图1为柱形壳体结构表面理论声压图;
 [0051] 图2为传统方法重建柱形壳体结构表面声压图;
 [0052] 图3为本发明重建柱形壳体结构表面声压图;
 [0053] 图4为本发明和传统方法在 $\theta=0$ 母线上声压分布曲线图;
 [0054] 图5为本发明中改进近场声全息方法对噪声的抑制作用图;
 [0055] 图6本发明中改进近场声全息方法对噪声的抑制作用图;
 [0056] 图7为本发明方法的重建声压沿轴向分布图;
 [0057] 图8为本发明与现有不同正则化方法的重建误差图;
 [0058] 图9为本发明与不同正则化方法的重建误差图;
 [0059] 图10为本发明方法对噪声的抑制作用图;
 [0060] 图11为柱面波数矢量图。

具体实施方式

[0061] 下面结合附图对本发明做进一步详细描述:

[0062] 如图1至图10所示,一种基于组合优化正则化方法的近场声全息方法,包括以下步骤:

[0063] 步骤1),在最大波数限定的空间波数平面上非等间隔地选取各波数矢量:在Nyquist采样定理基础上,在波数域辐射圆内和辐射圆外采用采用不同大小的采样间隔,提高重建精度;在波数域辐射圆内采样间隔小于在辐射圆外采样间隔;

[0064] 步骤2),对选取的波数矢量采用截断奇异值(TSVD)和标准Tikhonov组合优化正则化方法抑制噪声和随机误差引起的波数矢量的测量误差;

[0065] 步骤3),利用步骤2)组合优化正则化方法结合GCV方法求取叠加系数矩阵 $C(r_s)$ 和在全息面上测得的各点声压 $p(r_{Hn})$,将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 $p(r_s, \theta, z) = C(r_s) p(r_{Hn})$,即可获得壳体结构装备表面声场。

[0066] 本发明为模拟柱形壳体结构装备,采用轴向为2.0m、半径为0.2m的柱形壳体为研究对象;使用与柱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;

[0067] 步骤1)中,在最大波数限定的空间波数平面上非等间隔地选取各波数矢量:

[0068] 最优柱面近场声全息方法(SOCNAH)过程如下:

[0069] 稳态声波场Helmholtz方程在柱面坐标系下的行波解为

$$[0070] \quad p(r, \theta, z) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} e^{in\theta} \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} [D_n^{(1)}(k_z) H_n^{(1)}(k_r r) e^{ik_z z}] dk_z \quad (1)$$

[0071] 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;

[0072] 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

$$[0073] \quad P_n(r, n, k_z) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} e^{-in\theta} d\theta \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-ik_z z} p(r, \theta, z) dz \quad (2)$$

[0074] 同时给出其傅氏反变换为

$$[0075] \quad p(r, \theta, z) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} dk_z P_n(r, n, k_z) e^{-in\theta} e^{-ik_z z} \quad (3)$$

[0076] 令上式 $r=a$ 得,

$$[0077] \quad p(a, \theta, z) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} dk_z P_n(a, n, k_z) e^{-in\theta} e^{-ik_z z} \quad (4)$$

[0078] 由 (1) (2) (3) (4) 式可解得:

$$[0079] \quad p(r, \theta, z) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} e^{in\theta} \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \left[P_n(a, k_z) \times e^{ik_z z} \frac{H_n^{(1)}(k_r r)}{H_n^{(1)}(k_r a)} \right] dk_z \quad (5)$$

[0080] 式中, $P_n(a, k_z)$ 为 $p(a, \theta, z)$ 的二维傅氏变换。

[0081] 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:

$$[0082] \quad \Phi_k(r, \theta, z) = e^{in\theta} e^{ik_z z} \frac{H_n^{(1)}(k_r r)}{H_n^{(1)}(k_r a)} \quad (6)$$

[0083] 根据声场叠加原理可知, 重建柱面壳体结构装备表面上任意点 $r_s = (r_s, \theta, z)$ 处波数矢量为 K_m 的单元柱面波都可以由全息面上所有点 $r_{Hn} = (r_{Hn}, \theta_n, z_n)$ 处的波数矢量为 K_m 的单元柱面波叠加得到, 即

$$[0084] \quad \Phi_{km}(r_s) = \sum_{n=1}^N C(r_s) \Phi_{km}(r_{Hn}), m = 1, 2, 3, \dots, M \quad (7)$$

[0085] 式中, $r_{Hn} = (r_{Hn}, \theta_n, z_n)$ ($n = 1, 2, \dots, N$) 为全息柱面上 N 个声压测量点, M 为重建柱面和全息柱面上复声压所包含的单元柱面波的数目, $C(r_s)$ 为叠加系数矩阵;

$$[0086] \quad \text{令 } b = \begin{bmatrix} \Phi_{K1}(r_s) \\ \vdots \\ \Phi_{KM}(r_s) \end{bmatrix}, \quad C(r_s) = \begin{bmatrix} C_1(r_s) \\ \vdots \\ C_N(r_s) \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} \Phi_{K1}(r_{H1}) & \cdots & \Phi_{K1}(r_{HN}) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \Phi_{KM}(r_{H1}) & \cdots & \Phi_{KM}(r_{HN}) \end{bmatrix} \quad (8)$$

[0087] 由上式确定的 M 个线性方程所构成的线性方程组表示成矩阵形式为

$$[0088] \quad b = AC(r_s) \quad (9)$$

[0089] 所以, 只要确定了式 (7) 中的波数矢量 K_m , 则叠加系数矩阵 $C(r_s)$ 就可以唯一确定 ($M \geq N$), 进而可以得到重建面上各点声压:

$$[0090] \quad p(r_s, \theta, z) \approx \frac{1}{2\pi} \sum_{m=1}^M P_n(a, K_m) \Phi_{K_m}(r_H, \theta, z) = \sum_{n=1}^N C(r_s) p(r_{Hn}) \quad (10)$$

[0091] 式中, $p(r_s, \theta, z)$ 为重建面上各点声压, $p(r_{Hn})$ 为测量面上各点声压, 所以问题的关

键在于M波数矢量 K_m 的确定;

[0092] 然而,SOCNAH重建过程具有不适宜性,即矩阵A的病态性,产生的主要原因是矩阵A的小奇异值,实际中,因为高波数倏逝波衰减较快,即使在近场范围内进行测量,也很容易被测量误差掩盖,所以当全息面的测量数据中含有噪声等误差信号时,需要采用正则化方法限制小奇异值对测量误差的放大作用;进一步,在SOCNAH中,矩阵A的奇异值分布对应的是根据采样定理确定的波数域区间内的单元柱面波;在式(8)和(9)中,可以看到,要保证解的唯一性,需要矩阵A中 $M \geq N$,当 $M > N$ 时,奇异值和各项单元柱面波并不是一一对应的;实际上,较大的奇异值对应的是传播波和低波数的倏逝波,较小的奇异值对应的是高波数的倏逝波,在建立矩阵A时,使用的高波数倏逝波的项数越多,那么小奇异值的数目也越多,对测量误差的放大作用越明显;然而,如果在重建过程中完全舍弃声场中的高波数倏逝波的能量,会导致声场能量的部分丢失,无法保证重建的精度;鉴于以上分析,本发明改进了空间波数域中波数矢量数组的选取方法:

[0093] 在Nyquist采样定理基础上,在波数域辐射圆内采用小的采样间隔,在辐射圆外采用大的采样间隔,提高重建精度;如图11所示该方法在最大波数限定的空间波数平面上非等间隔地选取各波数矢量,在波数域辐射圆内采用小的采样间隔,在辐射圆外采用大的采样间隔;根据近场声全息原理,声场中的能量主要集中在低波数声波;所以在选取波数矢量时,改进方法在辐射圆外的高波数区域按照满足采样定理的最大采样间隔 Δl 选取波数矢

量,在辐射圆内低波数域以小采样间隔 $\frac{1}{2}\Delta l$ 选取波数矢量;这样选取可以有效地获取声场中的主要能量,又可以保证高波数域能量对声场重建的贡献,同时也减少了重建过程中测量误差的放大,保证声场重建精度。

[0094] 采用截断奇异值(TSVD)和标准Tikhonov组合优化的正则化方法:本方法对不同大小的奇异值区别对待,对于截断点前的较大奇异值所对应的不含噪声的低空间频率成分采用TSVD方法进行处理,不进行正则化处理;而对于截断点后的小奇异值,由于其对应包含噪声的高空间频率成分,并对测量中噪声等引起误差的信号起到放大作用,所以必须进行处理,但若采用TSVD中直接进行截断的方法,会损失高频的细节信息,降低了重建的精度,因此,对于小的奇异值,采用Tikhonov正则化方法,控制其对噪声的过度方法,同时保留高频细节信息;

[0095] 综合上述分析,经组合正则化得到的解为

$$[0096] \quad x_{T\&Tik} = \sum_{i=1}^k \frac{u_i^T b}{\sigma_i} v_i + \sum_{i=k+1}^n \frac{\sigma_i^2}{\sigma_i^2 + \lambda^2} \frac{u_i^T b}{\sigma_i} v_i \quad (11)$$

[0097] 使用基于后验准则的广义交叉验证(GCV)选取截断点和正则化参数;

[0098] 由于实际中通常无法确定声场中的噪声大小,所以再使用经验公式

$$20 \log_{10} \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_{k+1}} \right) \geq SNR \text{ 无法确定截断点, SNR为信噪比;故,在此处采用GCV方法确定截断点 } k,$$

对于公式(11)中后面一项的正则化参数 λ 的选取,直接以该截断点 k 为正则化处理截断点之后奇异值的正则化参数,这样既保证了组合正则化中只有一个未定的参数,又可以保证截断点后面的奇异值没有被直接赋零,所以,组合正则化比TSVD包含更多的细节信息,同时正则化抑制了小奇异值对噪声的放大作用,能够获得较高的重建精度。

[0099] 基于上述分析,最终组合正则化方法得到的解为

$$C(r_s) = \sum_{i=1}^k \frac{u_i^T b}{\sigma_i} v_i + \sum_{i=k+1}^n \frac{\sigma_i^2}{\sigma_i^2 + k^2} \frac{u_i^T b}{\sigma_i} v_i \quad (12)$$

[0101] 进一步地,利用组合优化正则化去除测量误差的方法,结合公式(8)、(9)和(12),求取叠加系数矩阵 $C(r_s)$;

[0102] 利用步骤3)中求取的叠加系数 $C(r_s)$ 和在全息面上测得的各点声压 $p(r_{Hn})$,将柱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 $p(r_s, \theta, z) = C(r_s) p(r_{Hn})$,获得柱形壳体结构装备表面声场。

[0103] 使用与柱形壳体结构装备表面共形的测量面,根据测量距离、传感器间隔、测量面积,获取待测结构外侧全息声压数据,即获取在全息面上测得的各点声压 $p(r_{Hn})$;

[0104] 为验证本发明对柱形壳体结构装备辐射声场重构的有效性,以轴向长度为2.0m、半径为0.2m的柱形面模拟柱形壳体结构装备;在壳体内部选取60个脉动球声源组成线阵声源,脉动球的间距为0.02m,振动频率为 f ,仿真测量用的传声器阵元间距为0.1m,全息测量尺寸为2m,测量距离为0.27m,重建距离(测量面到重建面的距离)为0.05m,为了模拟实际测量情况,在全息面上加信噪比为40dB的随机噪声。使用与柱形壳体结构装备表面共形的测量面,根据测量参数获取待测结构外侧全息声压数据;所述测量参数包括测量距离、传感器间隔和测量面积;使用传声器测量声场全息声压数据;

[0105] 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,图1、图2、图3、图4分别给出了柱形壳体结构表面理论声压图、传统方法重建柱形壳体结构表面声压图、本发明重建柱形壳体结构表面声压图和两种方法沿轴向的声压分布,可以看到,改进方法相比于传统方法可以更好地实现对重构面各个位置的重建,其重建值与理论值都有更为精确的吻合。

[0106] 图5给出了改进方法对噪声的抑制作用,可以看到,在改进方法中,当信噪比由40dB减小到20dB时,重建结果的相对平均误差变化很小,当信噪比再减小到10dB时,重建误差略有增大,充分说明了改进方法对噪声的抑制作用更好。

[0107] 在图5中,不同的频率下,重建的总体相对误差大多在30%以下,在频率为700Hz时达到最低,但总体相对误差仍有24%,这是因为当测量面边长大于波波长的3倍时,有着更好的重建精度,但此仿真所采用的测量面边长仅小于波波长的2倍。进一步,增大测量面边长至波波长的3.2倍,线阵声源长度由1.2m增大到2m,其他仿真条件不变,由此得到改进方法在Tikhonov正则化结合GCV正则参数选取方法下的重建误差如图6所示,由图6可以看到,在不同频带上,重建的总体相对误差均有大幅减小,其中在低频段已减小到10%以下,与图3-8比较,在信噪比同为40dB时,在低频段200~800Hz时,其重建总体相对误差都至少减小了10%,尤其在200Hz时,重建总体相对误差减小了近20%。为了直观地看到改进方法的重建效果,图7给出了改进方法的重建值与理论值的吻合程度,从中可以看到,在各个重构点上改进方法的重建值与理论值都有很好的吻合,充分验证了改进方法的有效性。

[0108] 图8和图9给出了在全息尺寸分别为波波长1.7倍和3.2倍时各正则化方法重建的总体相对误差,信噪比为20dB。可以看出,组合优化方法在高频段有更好的重建性能。显示了其对高频声场重建的优势;为了进一步验证组合优化方法对噪声的抑制作用,图10给出

了本发明的组合优化正则化方法对在测量面不同信噪比下重建的总体相对误差;在不同的信噪比条件下,组合方法重建的总体相对误差变化不大,尤其是在高频段,改方法的重建误差更小,充分说明了该方法对噪声有好的抑制作用。

[0109] 在现有的近场声全息技术中,对于水下航行器这种柱形声源研究较少,缺少对此声学不定性问题的研究。本发明方法在现有的统计最优近场声全息技术基础上,提出改进方法,在改进方法基础上,提出了组合优化正则化方法,有效提高了壳体结构装备表面声场重构精度和稳定性,从而为柱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。

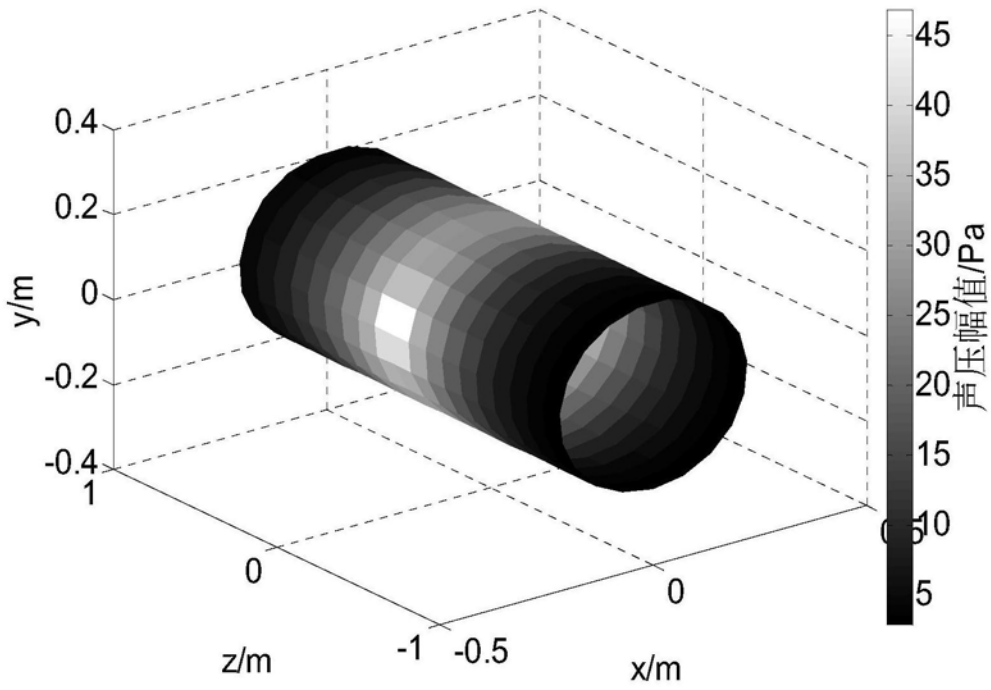


图1

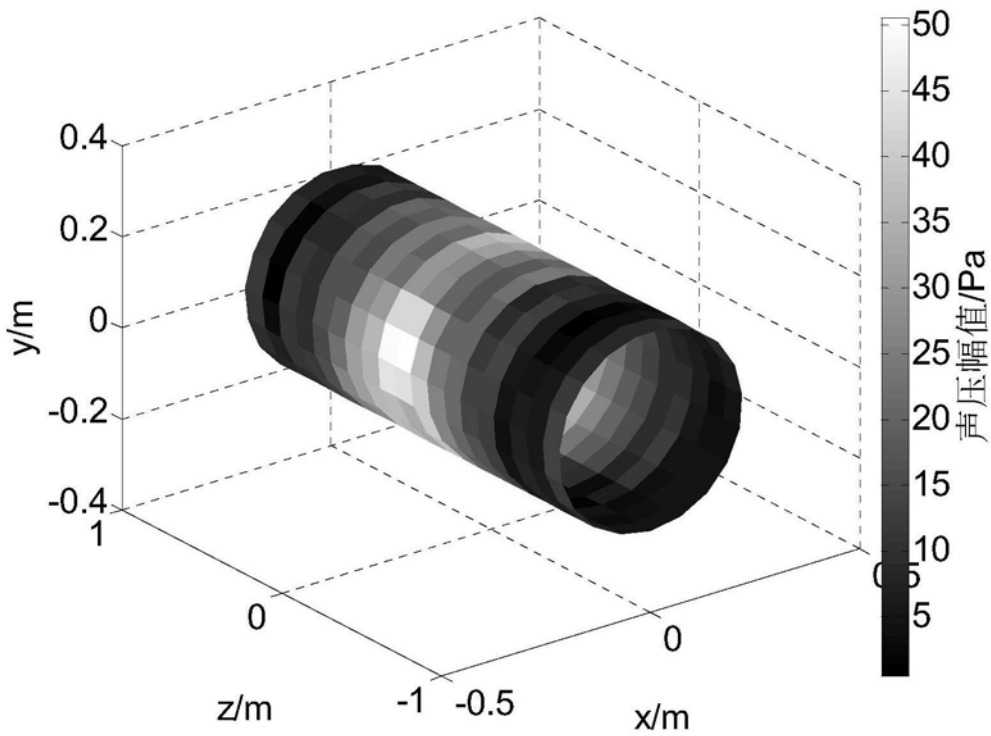


图2

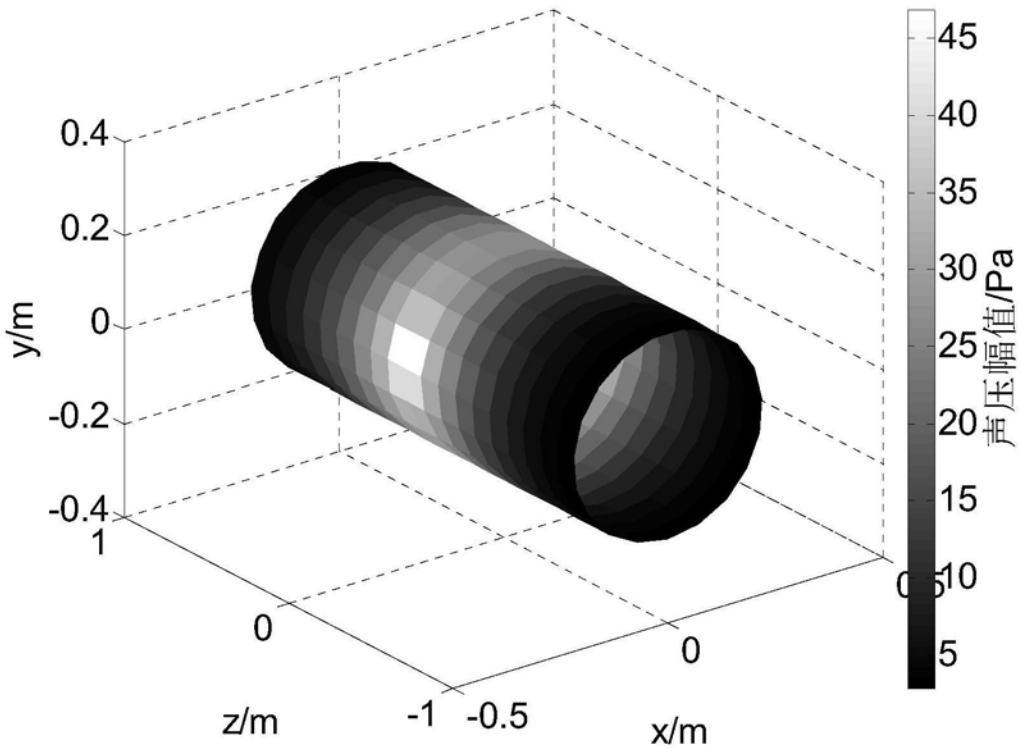


图3

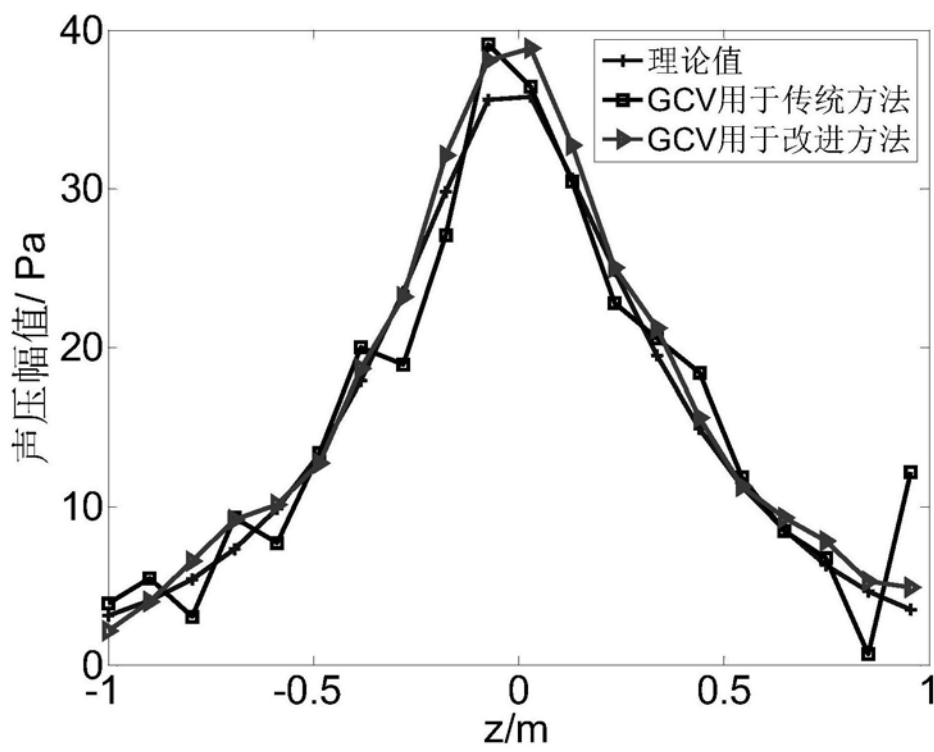


图4

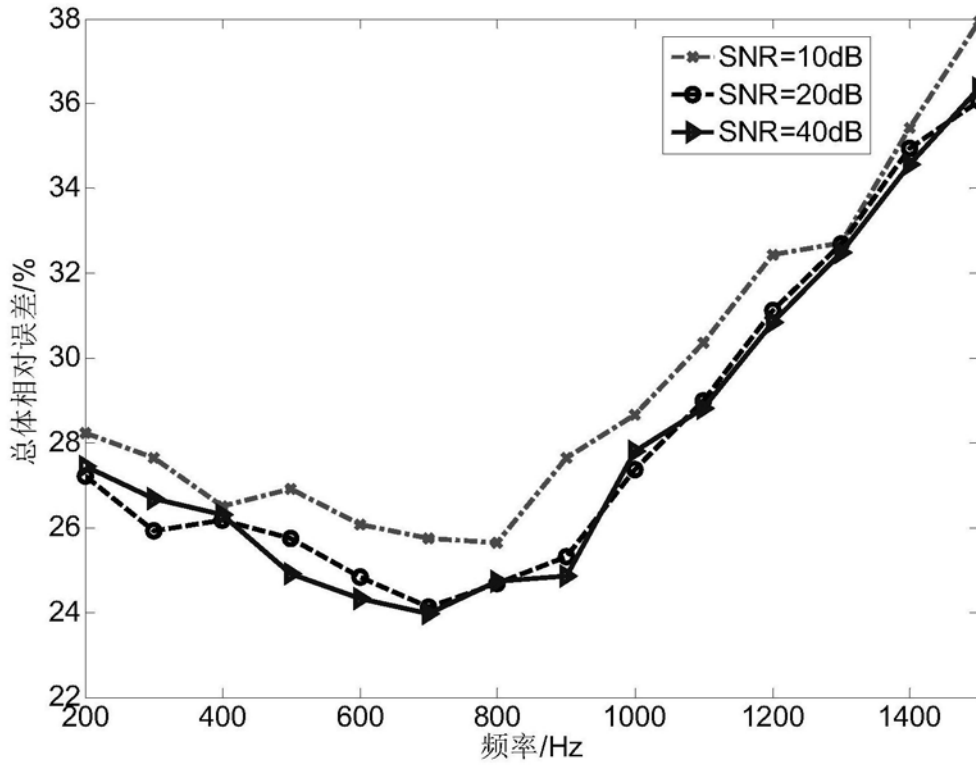


图5

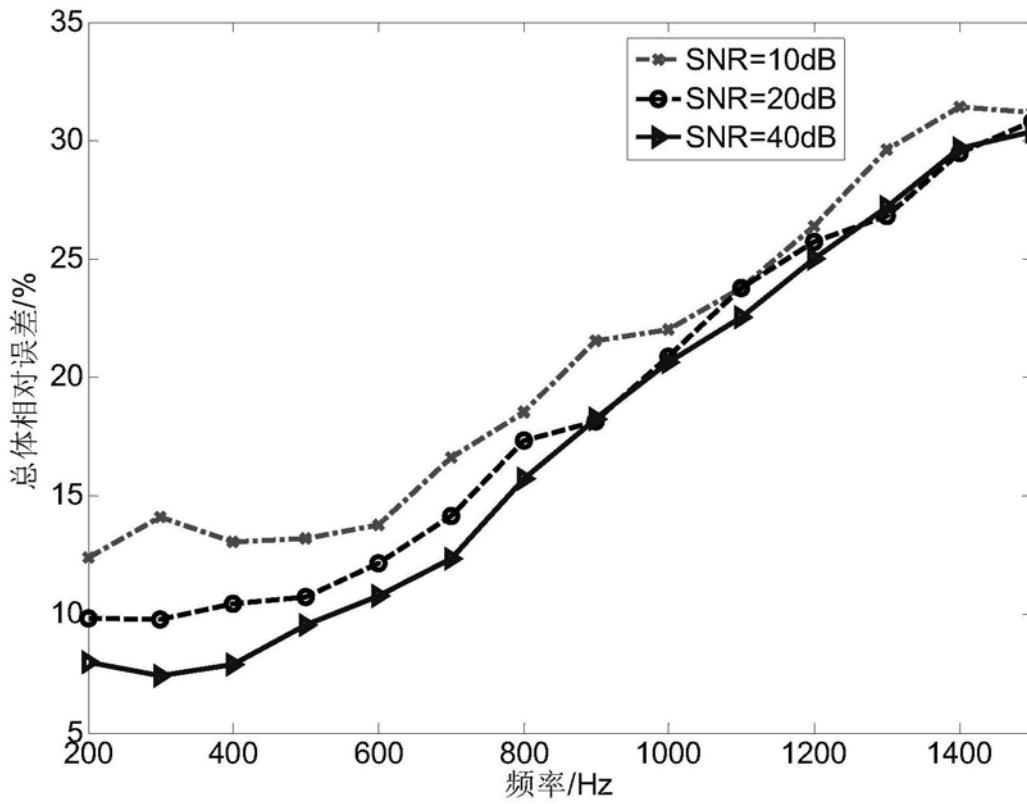


图6

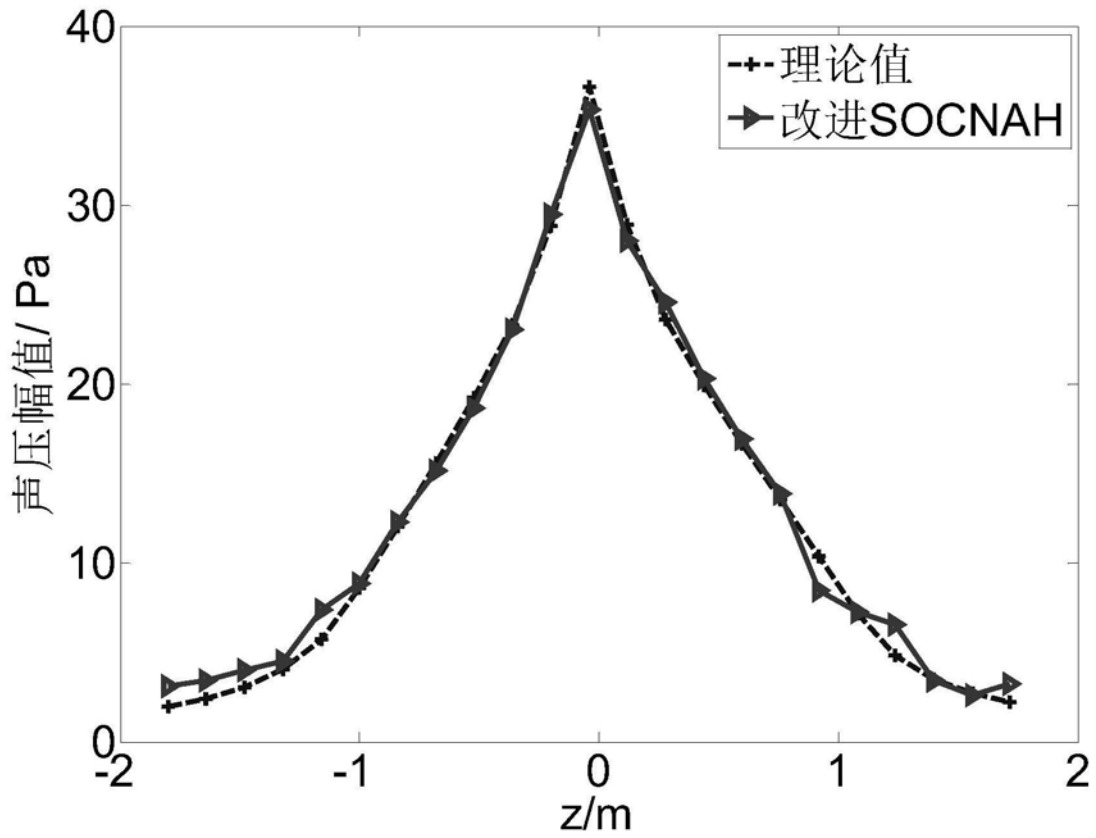


图7

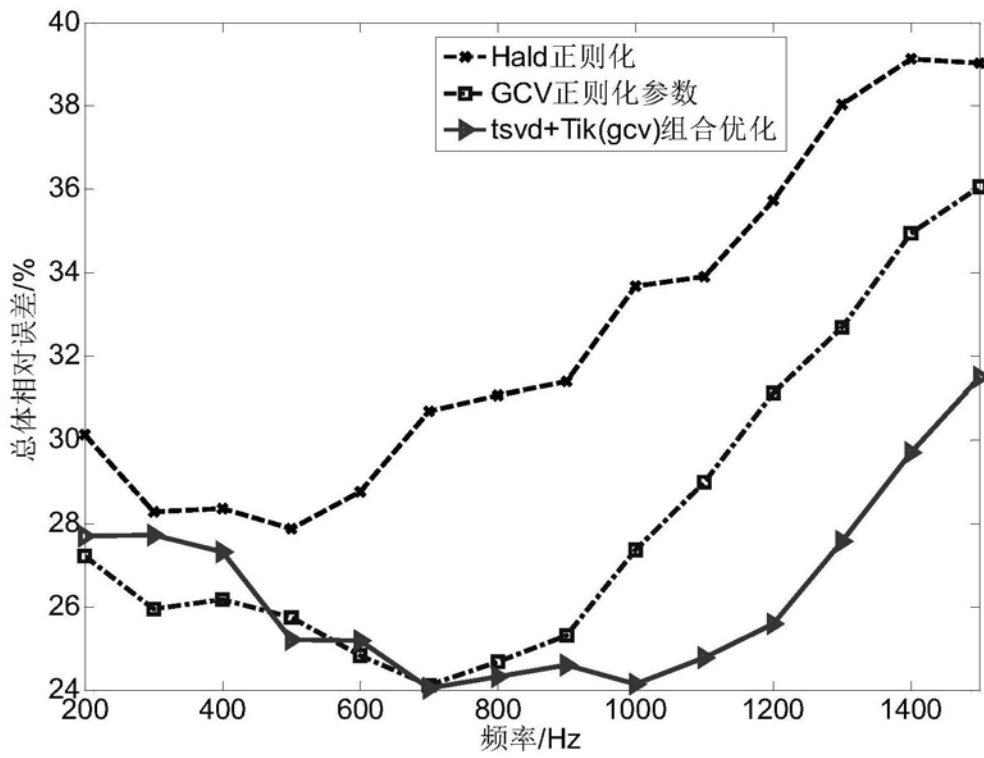


图8

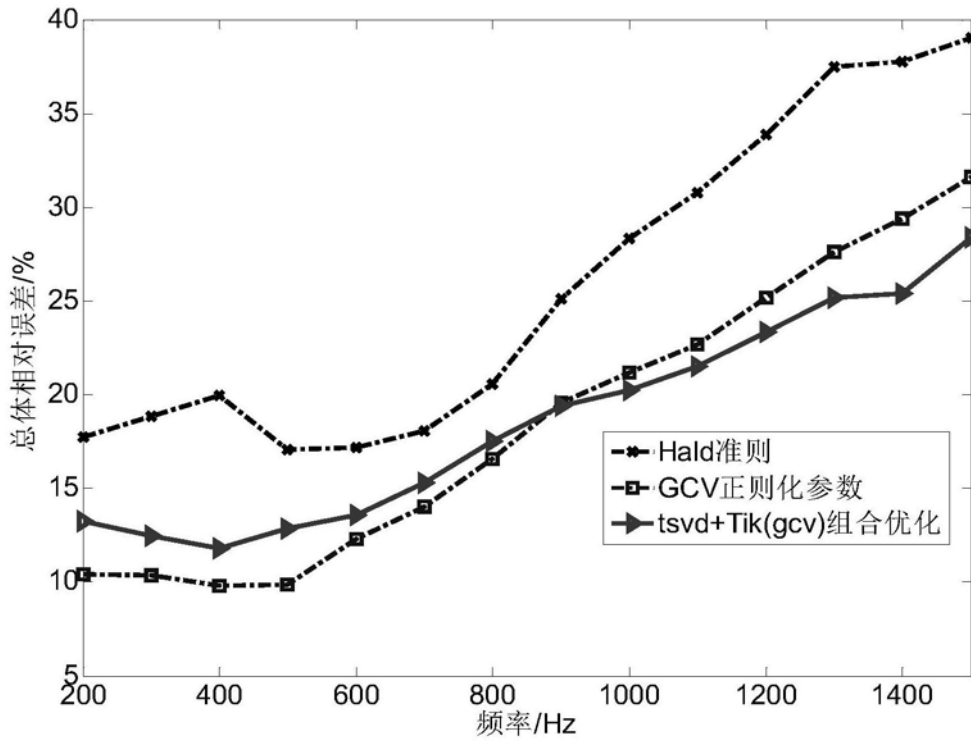


图9

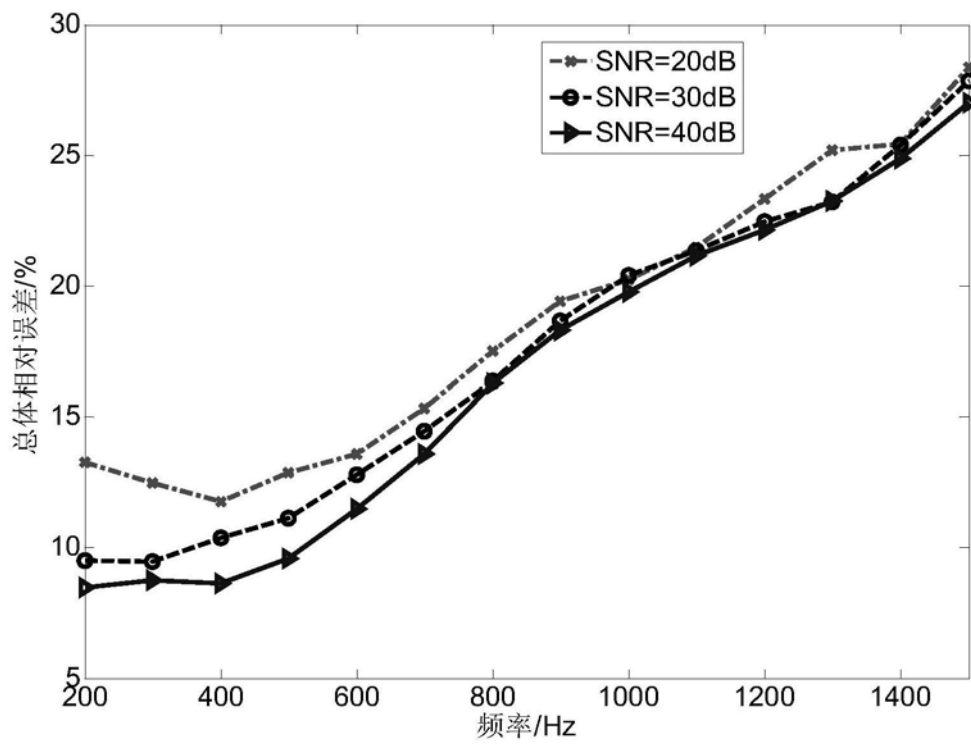


图10

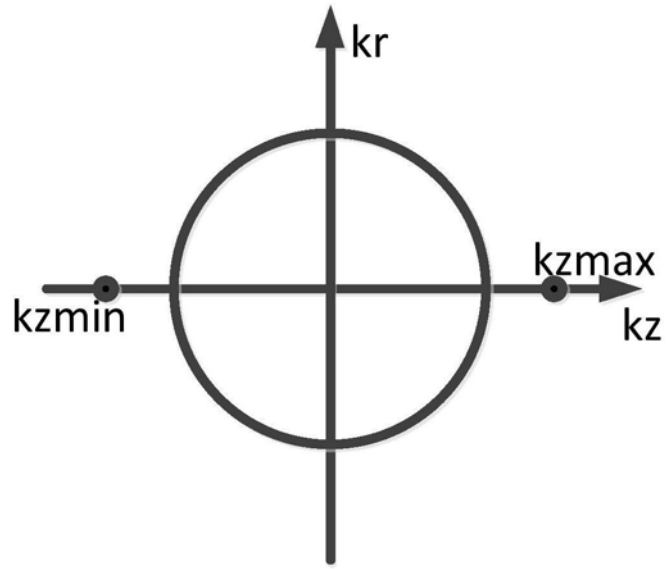


图11