

基于等效参数反演的敷设声学覆盖层的水下圆柱壳体声散射研究*

金国梁 尹剑飞 温激鸿† 温熙森

(国防科学技术大学机电工程与自动化学院, 装备综合保障技术重点实验室, 长沙 410073)

(2015年6月19日收到; 2015年8月18日收到修改稿)

应用了一种等效方法计算敷设声学覆盖层无限长圆柱壳体水下声散射特性. 等效方法的核心是忽略复杂声学覆盖层内部的声学结构, 将其作为具有等效材料参数的均匀阻尼层进行建模, 该均匀阻尼层具有和原覆盖层相同的复反射系数. 进而, 应用 COMSOL Multiphysics 软件建立敷设均匀阻尼层圆柱壳体的有限元模型并求解其声散射特性. 等效方法的关键是等效材料参数的获取. 采用充水阻抗管实验和有限元数值实验两种方法获取声学覆盖层贴敷在与壳体具有相同厚度、相同材料背衬条件下的复反射系数, 在此基础上, 基于遗传算法反演材料的等效参数. 研究表明, 等效参数具有频变特性, 且尽管等效杨氏模量和等效泊松比在频率范围内存在较大波动, 但是等效前后复反射系数仍保持一致. 为了验证等效方法求解壳体声散射特性的准确性, 同时建立了敷设声学覆盖层壳体的完整有限元模型, 将覆盖层内部声学结构进行精细建模, 并求其声散射特性. 结果表明, 两种方法求得的形态函数符合得较好, 在整个频率范围内平均误差大约为 1 dB.

关键词: 声散射, 声学覆盖层, 等效参数, 有限元方法

PACS: 43.40.+s, 43.30.+m, 43.20.+g

DOI: 10.7498/aps.65.014305

1 引言

在潜艇壳体表面敷设声学覆盖层可以减小声波的反射, 是提高潜艇声隐身性能的主要手段之一. 声学覆盖层通常以橡胶等黏弹性阻尼材料作为基体, 并在其中嵌入人工设计的特殊声学结构, 如空腔等, 以实现有效吸收^[1-3]. 研究敷设声学覆盖层壳体的声散射特性具有重要的理论价值和军事应用价值, 是水声技术领域长期关注的热点和难点问题之一.

水下壳体声散射特性问题的研究已经有很长的历史. Gaunard 和 Werby^[4] 利用三维散射理论研究了水下弹性球壳声散射, 并基于二维弹性动力学散射理论研究了水下弹性柱壳的声散射. 汤渭霖和范军^[5] 利用严格的弹性壳体理论和分离变量法详细研究了双层弹性柱壳和弹性球壳的声散射问

题. 徐红兰和陈励军^[6] 从实验角度对不同角度入射声波激励下圆柱壳体声的散射特性进行了分析. 针对敷设声学覆盖层壳体的声散射问题, Huang 等^[7] 利用传递矩阵法研究了弹性波斜入射条件下多层圆柱的声散射问题. 朱蓓丽和任克明^[8] 利用传递函数法对含有圆柱通道以及具有多层均匀介质的声学覆盖层进行了回波特性分析.

以上述工作为代表的水下壳体声散射问题, 利用严格理论方法得到了解析解, 但是这些方法仅适用于简单壳体结构敷设简单声学覆盖层的情况. 而对于水下复杂结构, 且敷设了内部嵌有复杂声学结构覆盖层的情况, 其声散射的计算问题还没得到很好的解决. 范军^[9] 深入研究了板块元方法, 提出可以通过在模型中引入反射系数项, 计算敷设复杂声学覆盖层壳体的声散射特性, 但是板块元方法将结构假设为刚性体, 无法体现弹性目标的共振散射特

* 国家自然科学基金 (批准号: 51275519) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: wenjihong@vip.sina.com

性,而且只对高频散射特性预报较准确,无法解决低频问题.有限元方法虽然可以通过对复杂声学覆盖层和复杂目标进行建模计算而解决这一问题,但是在离散整个敷设复杂声学覆盖层的结构、壳体和水域时,计算代价极其高昂,对于大尺寸结构和高频域的声散射问题有时甚至无法进行计算,因此限制了这一方法的广泛应用.

研究复杂声学覆盖层声学特性的另一种思路是利用它们的宏观声学特性反演等效参数.为了解决敷设复杂声学覆盖层壳体声散射的计算问题,本文应用了一种等效方法.其基本思想是忽略覆盖层内部的复杂声学结构,考虑与原声学覆盖层具有相同复反射系数的均匀阻尼层作为等效覆盖层,其材料参数称为等效材料参数,进而计算敷设有等效覆盖层的水下结构的声散射特性.

同时,为了验证等效计算方法的准确性,采用有限元法构建了敷设复杂声学覆盖层壳体的完整模型,依托并行计算技术仿真计算其声散射特性,并与等效模型计算结果进行了比较.本文研究的等效方法为计算敷设复杂声学覆盖层的壳体回波特性提供了一种方法.

2 模型描述

本文以无限长圆柱壳体为研究对象,内径为0.5 m,考虑两种覆盖层:1)各向同性的均匀黏弹性阻尼层,主要用于模型的验证;2)空腔型,即在均匀黏弹性材料基体中嵌有周期分布式的圆柱空腔.图1(a)和图1(b)描述了浸在无限大理想声场(水)中的无限长圆柱壳体,其表面敷设了声学覆盖层,壳体内部为真空.圆柱壳体材料为钢, r_1 和 r_2 分别代表钢壳的内径和外径, r_3 为覆盖层外径,晶格常数为22 mm,如图1(b)所示.圆柱壳体在 z 方向是无限长的,假设一个时谐波,以平面波形式沿着 x 方向入射到敷设覆盖层的圆柱壳体上,平面波波阵面平行于 yz 平面,如图1(b)所示.

钢壳和声学覆盖层的结构尺寸如图2所示, d_1 和 h_1 分别代表圆柱空腔的直径和高, h_2 代表空腔底部到钢壳上部的距离, h_3 代表空腔型声学覆盖层基体的厚度, h_4 代表钢壳的厚度, h_m 代表均匀阻尼层的厚度.具体的圆柱壳及声学覆盖层几何参数和材料参数分别在表1和表2中列出.

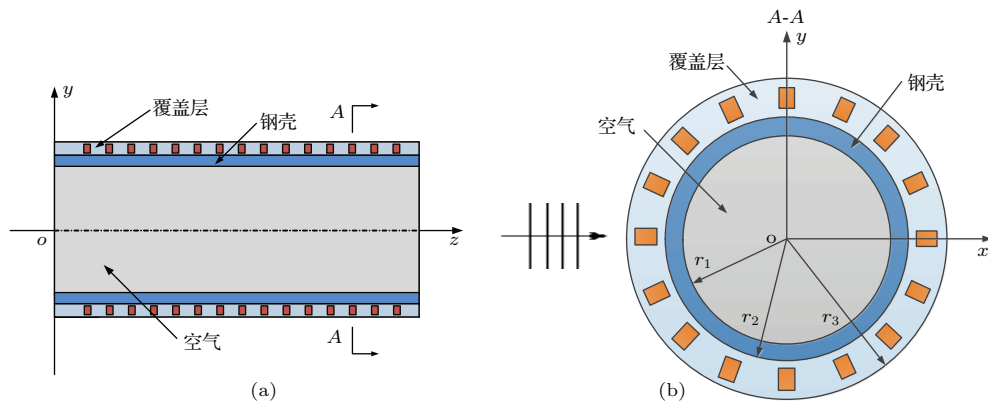


图1 敷设空腔型声学覆盖层圆柱壳体(图示空腔分布密度不代表实际情况) (a)中心纵向截面;(b)横截面
Fig. 1. Cylindrical shell coated with acoustic coating embedded with air cavities (the cavity distance shown in the figure does not reflect the real model): (a) Central vertical section view; (b) cross section view.

表1 圆柱壳和声学覆盖层的几何参数

Table 1. Geometric properties of the cylindrical shell and acoustic coating.

h_1/mm	h_2/mm	h_3/mm	h_4/mm	h_m/mm	d_1/mm	r_1/m	r_2/m
28	4	36	30	50	13	0.5	0.53

表2 圆柱壳和声学覆盖层的材料参数

Table 2. Material properties of the cylindrical shell and acoustic coating.

	密度 / $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	杨氏模量/Pa	泊松比	损耗因子
钢壳	7850	200×10^9	0.33	0
空腔覆盖层基体	1100	$2 \times 10^7 \times (1+0.5i)$	0.497	0.5
均匀阻尼层	1100	$2 \times 10^7 \times (1+0.5i)$	0.497	0.5

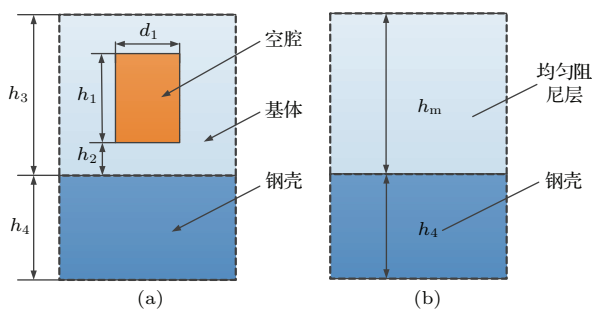


图2 声学覆盖层及圆柱壳体结构尺寸示意图 (a) 圆柱空腔型声学覆盖层; (b) 均匀阻尼层

Fig. 2. Schematic of the acoustic coating backed by steel layer: (a) Acoustic coating embedded with cylindrical air cavities; (b) acoustic coating of a homogeneous isotropic layer.

3 有限元方法

本文对结构水下声散射特性的计算分析采用有限元法, 利用的工具是COMSOL Multiphysics 4.4多物理场有限元分析软件中的声-固耦合模块. 建立了两类有限元模型: 1) 二维模型, 如图3所示, 计算敷设了均匀覆盖层的无限长圆柱壳体的声散射, 模型中, 在水的外边界上设置了圆柱波辐射边界条件, 模拟无限大声场空间, 它是敷设了空腔型声学覆盖层圆柱壳体的等效模型; 2) z 方向取单个周期的三维模型, 构建带有完整空腔结构的声学覆盖层, 如图4所示, 此模型用于直接计算敷设了空腔型声学覆盖层圆柱壳体的形态函数. 在图4所示的三维模型中, 在 z 方向的声场和固体边界上都添加有周期连续性边界条件, 模拟圆柱壳在 z 方向是无限长的; 在水的外边界上设置了圆柱波辐射边界条件, 模拟无限大声场空间.

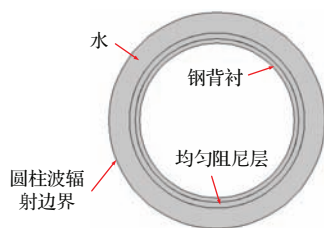


图3 敷设均匀阻尼层圆柱壳二维模型

Fig. 3. Two-dimensional model of cylindrical shell coated with homogeneous isotropic layer.

图3所示二维模型利用等效参数计算敷设空腔型声学覆盖层圆柱壳体形态函数的方法简单快捷, 省去了构建三维模型繁琐的过程, 而且更重要的是避免了带有完整空腔结构的三维模型计算规模大、计算效率低的问题.

针对壳体声散射, 定义散射声压为 p_s , 圆柱半径为 r_3 , 本文以远场散射形态函数 f_∞ 评估声散射特性, 其定义为

$$f_\infty = \left| \sqrt{2r/r_3} p_s \right|. \quad (1)$$

图4三维模型的构建可以对本文提出的等效方法进行验证, 可以检验利用参数等效方法计算壳体声散射结果的准确性.

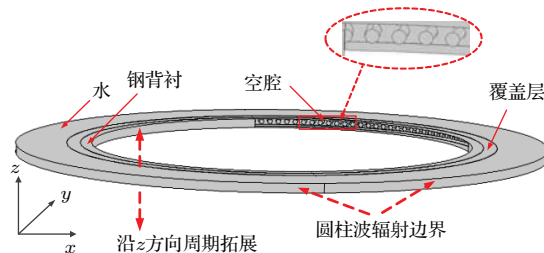


图4 敷设空腔型声学覆盖层圆柱壳三维模型

Fig. 4. Three-dimensional model of cylindrical shell coated with acoustic coating embedded with air cavities.

4 参数反演方法确定等效参数

4.1 参数反演的原理及方法

本文把具有复杂结构的声学覆盖层等效为均匀阻尼材料层, 再计算回波特性. 把等效后的均质材料层所具有的材料参数称为等效材料参数.

本文参数等效基本原则是等效前实验测定的复反射系数 R_0 与等效后均匀层复反射系数 R_1 相同, 即 $R_0 = R_1(E, \sigma, \eta)$, 其中 E, σ, η 分别代表本文要反演得到的等效后均匀材料的等效杨氏模量、等效泊松比和等效损耗因子, 在这个过程中不考虑等效后各参数的真实意义. 等效前的复反射系数可以利用(2)式计算得到

$$R_0 = \frac{P_{re}}{P_{in}}, \quad (2)$$

其中 P_{re} 和 P_{in} 分别代表反射声压和入射声压, 它们可以通过充水阻抗管实验或有限元仿真计算得到(详细计算见4.2小节).

等效后复反射系数可以利用(3)式计算得到

$$R_1 = \frac{Z - \rho_w C_w}{Z + \rho_w C_w}, \quad (3)$$

其中, ρ_w 代表水的密度, C_w 代表水中声速, Z 代表输入阻抗. 应用分层介质声传播理论^[10], 输入阻抗

Z 可以通过 (4) 式计算得到

$$Z = \left[\rho_h C_1 \left(-\rho_s C_{ls} \tan \left(\frac{\omega}{C_{ls}} d_s \right) \cdot i - \rho_h C_1 \tan \left(\frac{\omega}{C_1} d_h \right) \cdot i \right) \right] \left[\rho_h C_1 - \left(\rho_s C_{ls} \tan \left(\frac{\omega}{C_{ls}} d_s \right) \tan \left(\frac{\omega}{C_1} d_h \right) \right) \right]^{-1}, \quad (4)$$

其中, ω 代表入射波角频率, ρ_s 代表钢的密度, ρ_h 代表等效后均匀材料密度, C_{ls} 代表钢中纵波声速, C_1 代表等效后均匀材料中声速, d_s 代表刚壳的厚度, d_h 代表等效后均匀层的厚度. 等效后均匀材料中声速可以由 (5) 式计算得到

$$C_1 = \sqrt{\frac{E(1-\eta i)(1-\sigma)}{\rho_h(1+\sigma)(1-2\sigma)}}. \quad (5)$$

通过以上分析可知, 如果得到等效前复反射系数 R_0 , 就可以得到均匀层等效材料参数. 然而, 反演计算 E , σ 和 η 是求解超越方程问题, 会得到无穷多组解, 因此本文利用遗传优化算法获得反演等效参数的最优解.

表3 遗传算法主要参数设置

Table 3. Main properties of genetic algorithms.

参数名称	参数值
种群大小 (PopulationSize)	120
交叉概率 (CrossoverFraction)	0.8
适应度函数最小值 (FitnessLimit)	0.01
最大遗传代数 (Generations)	2000
存活到下一代个体数 (EliteCount)	2
停滞终止代数 (StallGenLimit)	50

遗传算法的本质是一种并行、高效的全局搜索优化方法, 它能够在搜索优化过程中自动累积有关搜索空间的知识, 并自适应控制搜索优化过程以得到最优解^[11]. 遗传算法与传统单点搜索方法不同, 它可以同时对群体中多个个体进行评估, 而在反演等效材料参数过程中, 寻找最优解要在很大的解空间范围内进行, 遗传算法的这种全局搜索性能可以大幅提高效率^[12]. 利用遗传算法反演等效参数的过程是通过 Matlab 中遗传算法工具箱来实现的^[13]. 本文中定义的适应度函数由 (6) 式给出:

$$F = \sqrt{\frac{(R_1 - R_0)(\overline{R_1 - R_0})}{|R_0|}}, \quad (6)$$

其中, R_1 是等效后复反射系数, R_0 是等效前测定的复反射系数, 适应度函数值 F 越小代表解的质量越高. 每产生一代等效参数, 计算等效后反射系数, 并与等效前反射系数对比, 差值越小即适应度函数

值 F 就越小, 当 F 小于设定的阈值时, 可以认为等效前后反射系数相同, 反演得到的等效材料参数有效. 另外, 遗传算法的几个主要参数设置见表 3.

4.2 复反射系数的测定

复反射系数可以通过充水阻抗管实验获得, 也可以通过有限元仿真数值实验获得. 本节将分别介绍这两种方法来测定复反射系数.

4.2.1 充水阻抗管实验获取复反射系数

测试中所用充水阻抗管的结构示意图见图 5. 钢背衬厚度为 30 mm, 空腔型声学覆盖层样品厚度为 36 mm, 均匀阻尼层样品厚度为 50 mm. 在阻抗管的另一端安装有扬声器, 可以生成宽带白噪声.

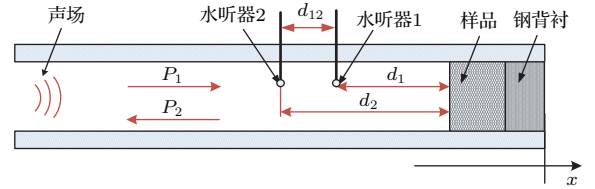


图5 充水阻抗管物理实验示意图

Fig. 5. Diagram of physical experiment with water-filled impedance tube.

测试原理是双水听器传递函数法^[14], 双水听器法可以把管中入射声波和反射声波分开, 然后通过 (7) 式计算反射系数:

$$|R| e^{j\phi} = \frac{H_{12} e^{j\theta} e^{jk d_1} - e^{jk d_2}}{e^{-jk d_2} - H_{12} e^{j\theta} e^{-jk d_1}}. \quad (7)$$

4.2.2 有限元数值实验获取复反射系数

当物理实验条件不具备时, 也可以采用有限元数值仿真方法获取无限大样品的复反射系数, 但是采取这一方法的前提是需要知道样品的内部结构尺寸和各部分的材料参数.

利用 COMSOL Multiphysics 软件进行仿真, 建模时只考虑带有声场、覆盖层和钢背衬的单个周期元胞. 然后在固体以及声场边界上添加 Floquet 周期边界条件, 使模型拓展至无限大. 有限元模型见图 6.

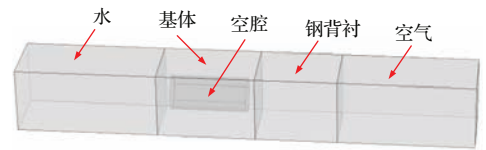


图6 计算复反射系数的单个周期单元有限元模型

Fig. 6. Finite element model for single periodic element to calculate the complex reflection coefficient.

5 结果与讨论

5.1 均匀覆盖层

5.1.1 不同方法获取复反射系数的结果对比

利用充水阻抗管实验和有限元数值实验两种方法,测定了均匀声学覆盖层的复反射系数,结果如图7所示.

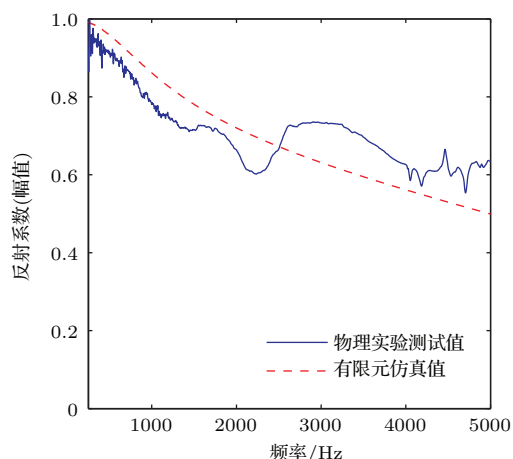


图7 (网刊彩色) 对于敷设均匀覆盖层圆柱壳体,两种不同方法获取反射系数的结果对比

Fig. 7. (color online) Comparison of the results of complex reflection coefficient (amplitude) obtained from experiments and finite element method for the homogeneous isotropic layer.

图7中虚线代表有限元数值实验得到的复反射系数幅值,实线代表的是充水阻抗管实验测试结果.由图7可知,在2400 Hz以下,实验测定的复反射系数幅值要略低于有限元仿真得到的结果,最小相差0.02,最大相差0.08,平均相差0.05左右;在2400 Hz以上,物理实验测试结果要整体略高于有限元仿真的结果,最大差值达到了0.1,平均差值在0.07左右.

有以下4个原因可能导致实验获取复反射系数存在误差: 1) 充水管内的声场受到外界复杂环境干扰; 2) 两个水听器之间的增益和相位存在一定失配; 3) 仪器设备测量精度带来的误差; 4) 测试样品的加工精度问题,导致样品的结构和尺寸与理论设计值和有限元仿真模型存在一定差异.

5.1.2 等效参数反演

根据本文4.1节介绍的等效参数反演方法,利用充水阻抗管实验得到的复反射系数对均匀覆盖层的等效材料参数进行反演,结果如图8所示.

由图8可知: 等效杨氏模量整体趋势随频率的升高而变大; 等效损耗因子呈类似指数下降趋势,在0—1000 Hz快速下降到1左右,在1000 Hz以后基本呈现缓慢下降趋势; 等效泊松比反演结果显得杂乱无章,没有呈现明显的规律.

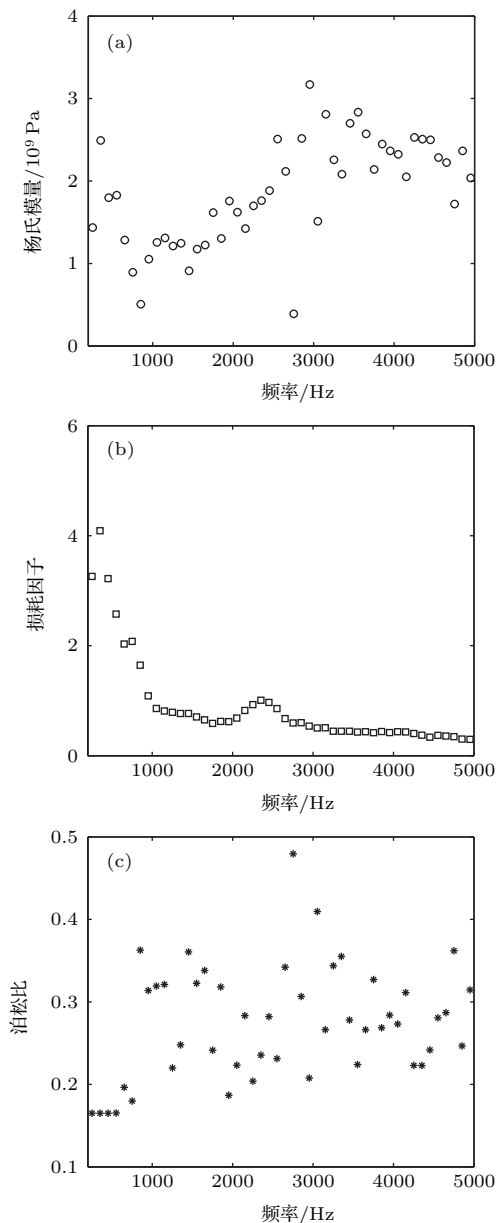


图8 均匀覆盖层等效参数反演结果 (a) 等效杨氏模量; (b) 等效损耗因子; (c) 等效泊松比

Fig. 8. Equivalent properties for homogeneous isotropic layer: (a) Equivalent Young's modulus; (b) equivalent loss factor; (c) equivalent Poisson's ratio.

5.1.3 形态函数计算结果及分析

本文采用两种方法计算形态函数: 1) 利用有限元三维模型直接对敷设均匀覆盖层的圆柱壳体建模计算(方法1); 2) 利用充水管实验获取反射系数

并反演得到等效参数, 然后把等效参数代入二维有限元模型中计算形态函数(方法2).

如图9所示, 纵坐标用 $10\log(f_\infty)$ 来表示, 其中 f_∞ 为形态函数. 图9中实线代表方法1得到的计算结果, 虚线代表方法2得到的计算结果. 对比两条曲线可以发现: 在2000 Hz以下的频段, 方法2的计算结果要略低于方法1的结果, 平均差值在1 dB左右, 最大差值达到了2 dB; 在2000 Hz以上的频段, 方法2的计算结果要整体大于方法1的结果, 而且方法2曲线的波谷略微向低频偏移.

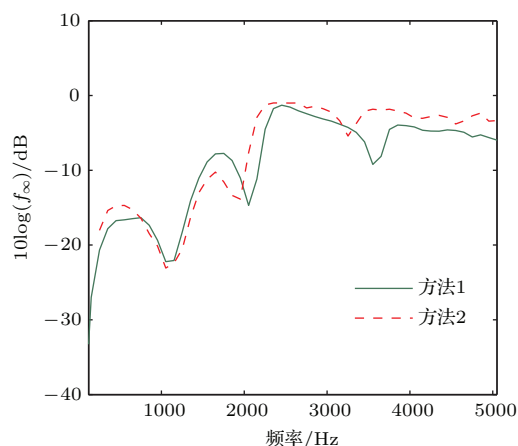


图9 (网刊彩色) 敷设均匀覆盖层圆柱壳体形态函数结果对比

Fig. 9. (color online) Comparison of the results of morphic function for the cylindrical shell coated with homogeneous isotropic layer.

利用方法1和方法2计算形态函数, 只有在复反射系数相同的情况下其结果才会相符. 然而, 通过对图7的对比分析, 方法1和方法2的复反射系数并不完全相同, 所以导致它们的形态函数并不完全相符. 在2000 Hz以下的频段, 方法2的复反射系数幅值要整体小于方法1的结果, 所以方法2的形态函数略小于方法1的形态函数; 在2000 Hz以上的频段, 方法2的复反射系数幅值整体大于方法1的结果, 所以方法2的形态函数大于方法1的形态函数.

总体来说, 两种方法得到的结果基本相符, 平均差值在1.5 dB左右, 验证了等效方法计算形态函数的可靠性和准确性.

5.2 空腔型声学覆盖层

5.2.1 不同方法获取复反射系数的结果对比

分别利用充水阻抗管实验和有限元数值实验两种方法, 测定了敷设图2(a)所示的空腔型声学

覆盖层的复反射系数, 其结果如图10所示.

由图10可知: 在1800 Hz以下的低频段, 两条曲线符合得比较好; 在1800 Hz以上, 实验测试结果要整体略低于有限元仿真的结果, 平均差值在0.05左右, 最大差值达到0.1. 200 Hz以下时, 受实验系统本身限制, 实验得到的复反射系数波动较大, 结果不可靠, 所以选取200 Hz以上的数据进行分析.

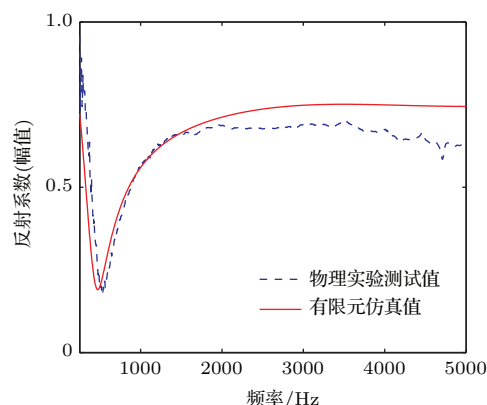


图10 (网刊彩色) 对于敷设空腔型声学覆盖层圆柱壳, 两种不同方法获取反射系数的结果对比

Fig. 10. (color online) Comparison of the results of complex reflection coefficient (amplitude) obtained from experiments and finite method for the cylindrical shell coated with acoustic coating embedded with air cavities.

5.2.2 等效参数反演

基于实验得到的复反射系数, 对空腔型声学覆盖层等效参数进行反演, 计算结果如图11所示.

由图11可知: 等效杨氏模量的反演结果整体上随着频率升高而升高, 在4000 Hz以后波动显著增大; 等效损耗因子基本呈指数下降趋势, 在0—1700 Hz快速下降到0.3左右, 在1700 Hz以后基本保持恒定; 等效泊松比显得杂乱无章, 没有呈现明显的规律.

5.2.3 形态函数计算结果与分析

采用两种方法计算形态函数: 1) 利用有限元三维模型直接对敷设空腔型声学覆盖层的圆柱壳体建模计算(方法1); 2) 利用充水阻抗管实验获取反射系数并反演得到等效参数, 然后把等效参数代入二维有限元模型中计算形态函数(方法2).

如图12所示, 实线代表方法1得到的计算结果, 虚线代表方法2得到的计算结果. 从图12可以发现: 在400 Hz以下, 方法2得到的形态函数要比方法1得到的结果小很多, 最大差值达6 dB;

在 400 Hz 到 1500 Hz 左右, 方法 1 得到的形态函数结果与方法 2 的形态函数结果符合得较好; 在 1500 Hz 以后, 方法 2 的计算结果整体比方法 1 的计算结果低 1—2 dB 左右.

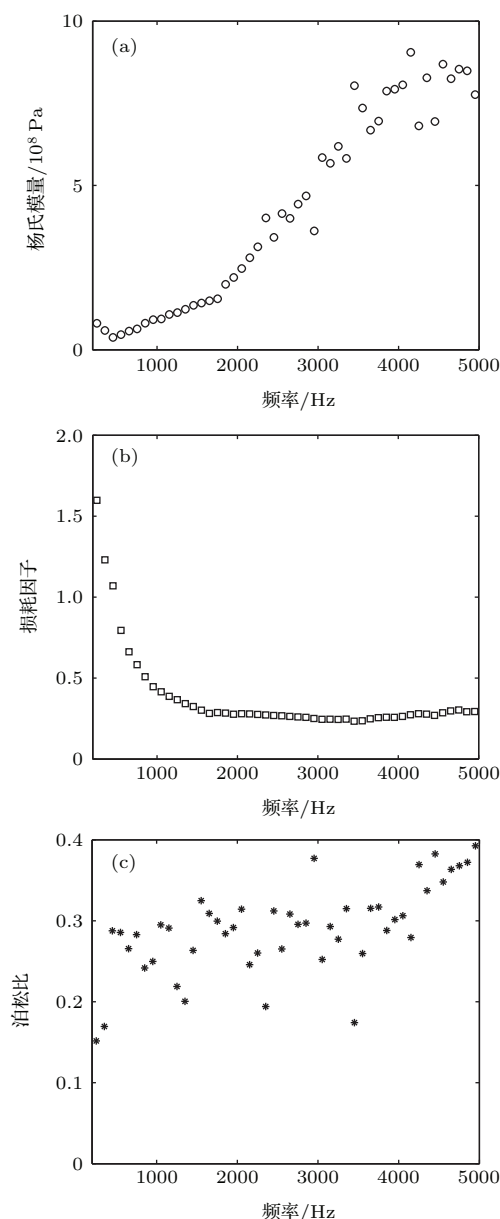


图 11 空腔型声学覆盖层等效参数反演 (a) 等效杨氏模量; (b) 等效损耗因子; (c) 等效泊松比

Fig. 11. Equivalent material properties for the acoustic coating with air-cavities: (a) Equivalent Young's modulus; (b) equivalent loss factor; (c) equivalent Poisson's ratio.

对照图 10 可以发现: 在 400—1600 Hz 的频段内, 两种方法获得的复反射系数基本相同, 同时形态函数也基本相同; 在 1600 Hz 以上的频段内, 物理实验获取的复反射系数幅值要整体小于有限元仿真得到的结果, 同时方法 2 的形态函数要整体小

于方法 1 的形态函数; 在 300 Hz 以下的频段, 虽然实验获取的复反射系数幅值比有限元仿真得到的反射系数幅值大, 但是方法 2 得到的形态函数却比方法 1 的结果小, 这是因为实验得到的复反射系数幅值在这个频段内波动很大, 导致反演得到的等效参数不准, 影响了形态函数计算结果.

另外, 基于参数反演结果的形态函数计算误差的另一个来源是: 声学覆盖层等效参数是基于正入射条件下的反演结果, 而平面波到达壳体时, 壳体不同位置处的声波入射角度亦不同, 而这一点未能够体现在参数反演结果中. 但是, 图 9 和图 12 表明这一误差在正横方向上较小, 因此本文不再进一步考虑入射角度造成的计算误差.

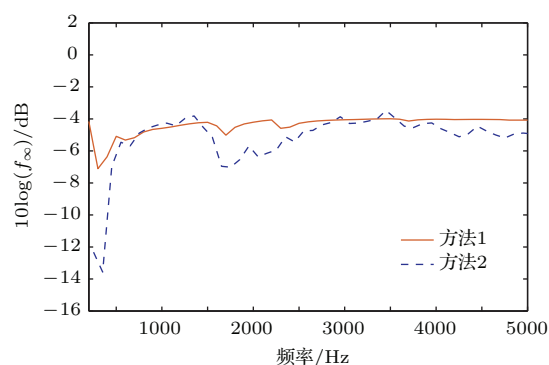


图 12 (网刊彩色) 敷设空腔型声学覆盖层圆柱壳形态函数结果对比

Fig. 12. (color online) Comparison of the results of the morphic function for the cylindrical shell coated with acoustic coating embedded with air cavities.

总体来说, 两种方法得到的结果基本相符, 平均差值在 1 dB 左右, 再次说明形态函数与复反射系数之间存在一定的关系, 同时也证明本文利用等效方法计算敷设声学覆盖层壳体形态函数的可靠性和准确性.

6 结 论

本文讨论了敷设声学覆盖层圆柱壳体的声散射特性. 介绍了一种等效方法, 即把内部含有复杂结构的声学覆盖层等效为均匀阻尼层, 利用遗传优化算法反演均匀阻尼层的等效参数, 这个过程基于等效前后复反射系数相同. 介绍了获取复反射系数的两种方法: 1) 充水管物理实验获取复反射系数; 2) 有限元仿真获取复反射系数. 采用有限元数值计算方法, 建立了两种模型来计算敷设声学覆盖层圆柱壳体的形态函数. 在此基础上, 首先反演了均匀

阻尼层材料参数, 计算了敷设均匀阻尼层圆柱壳体的形态函数, 对比分析了两种方法得到的敷设均匀阻尼层圆柱壳体的复反射系数以及两种方法得到的形态函数, 验证了本文等效方法的准确性. 最后, 计算了敷设空腔型声学覆盖层圆柱壳体的形态函数, 同样对比分析两种方法得到的复反射系数, 以及两种方法得到的形态函数, 说明了等效方法的准确性和可靠性.

参考文献

- [1] Yang H B, Li Y, Zhao H G, Wen J H, Wen X S 2014 *Chin Phys. B* **23** 104304
- [2] Zhao H G, Wen J H, Yang H B, Lü L M, Wen X S 2014 *Appl. Acoust.* **63** 134303 (in Chinese) [赵宏刚, 温激鸿, 杨海滨, 吕林梅, 温熙森 2014 应用声学 **63** 134303]
- [3] Zhao H G, Liu Y Z, Wen J H, Yu D L, Wen X S 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 4700 (in Chinese) [赵宏刚, 刘耀宗, 温激鸿, 郁殿龙, 温熙森 2007 物理学报 **56** 4700]
- [4] Gaunaurd G C, Werby M F 1990 *Appl. Mech. Rev.* **43** 171
- [5] Tang W L, Fan J 1999 *Acta Acoust.* **24** 174 (in Chinese) [汤渭霖, 范军 1999 声学学报 **24** 174]
- [6] Xu H L, Chen L J 2007 *Acoust. Electron. Eng.* **4** 9 (in Chinese) [徐红兰, 陈励军 2007 声学与电子工程 **4** 9]
- [7] Huang W, Wang Y J, Rokhlin S I 1996 *J. Acoust. Soc. Am.* **99** 2742
- [8] Zhu B L, Ren K M 1997 *J. Shanghai Jiaotong Univ.* **31** 20 (in Chinese) [朱蓓丽, 任克明 1997 上海交通大学学报 **31** 20]
- [9] Fan J 2001 *Ph. D. Dissertation* (Shanghai: Shanghai Jiaotong University) (in Chinese) [范军 2001 博士学位论文 (上海: 上海交通大学)]
- [10] Brekhovskikh L M (translated by Yang X R) 1960 *Waves in Layered Media* (Beijing: Science Press) p5 (in Chinese) [布列霍夫斯基赫 著 (杨训仁 译) 1960 分层介质中的波 (北京: 科学出版社) 第 5 页]
- [11] Chen G L, Wang X F 1996 *Genetic Algorithms and Application* (Beijing: Posts and Telecom Press) p3 (in Chinese) [陈国良, 王熙法 1996 遗传算法及其应用 (北京: 人民邮电出版社) 第 3 页]
- [12] Zhou M, Sun S D 1999 *Genetic Algorithms: Theory and Application* (Beijing: National Defense Industry Press) p12 (in Chinese) [周明, 孙树栋 1999 遗传算法原理及应用 (北京: 国防工业出版社) 第 12 页]
- [13] Lei Y J, Zhang S W, Li X W 2005 *MATLAB Genetic Algorithms Tool Box and Applications* (Xi'an: University of Electronic Science and Technology of Xi'an) p57 (in Chinese) [雷英杰, 张善文, 李续武 2005 MATLAB 遗传算法工具箱及应用 (西安: 电子科大出版社) 第 57 页]
- [14] Zhu B L, Huang X C 2012 *Key Technique of Invisible Submarine—Design of Acoustic Coating* (Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press) p116 (in Chinese) [朱蓓丽, 黄修长 2012 潜艇隐身关键技术——声学覆盖层的设计 (上海: 上海交通大学出版社) 第 116 页]

Investigation of underwater sound scattering on a cylindrical shell coated with anechoic coatings by the finite element method based on an equivalent parameter inversion^{*}

Jin Guo-Liang Yin Jian-Fei Wen Ji-Hong[†] Wen Xi-Sen

(Science and Technology on Integrated Logistics Support Laboratory, College of Mechatronic Engineering and Automation,
National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

(Received 19 June 2015; revised manuscript received 18 August 2015)

Abstract

Anechoic coating attached to the surface of an underwater object is used for absorbing sound wave thereby reducing the reflection. The anechoic coating is often made of viscoelastic materials embedded with designed acoustic substructures, such as air cavities. The prediction of sound scattering on underwater object coated with such materials can be challenging due to the complex geometry of the anechoic coating, and it has been a research subject of interest in underwater acoustics. In this paper, we study the sound scattering on an infinite cylindrical shell coated with anechoic coating. Two types of coatings are considered: one is a layer of homogeneous isotropic material, and the other is a layer of homogeneous isotropic material with periodically embedded cylindrical air cavities. We use an equivalent method, in which the anechoic coating with air-filled cavities is regarded as a homogeneous isotropic material with equivalent material properties. The key point of the equivalent method is to ignore the internal structure of the anechoic coating, and the anechoic coating is considered as a homogeneous isotropic layer with the same complex reflection coefficient. These equivalent material properties are acquired based on the data of complex reflection coefficient obtained from either the physical experiment using water-filled impedance tube or the numerical experiment using the finite element method with COMSOL Multiphysics software. Then a genetic algorithm is used to inversely calculate the equivalent Young's modulus, Poisson's ratio, and damping loss factor of the coating which has the same reflection coefficient as the original coating. The results of the equivalent material properties show that 1) the three properties are all frequency dependent; 2) in general, equivalent Young's modulus increases with the increase of frequency, meanwhile the equivalent damping loss factor tends to decrease; 3) there is a wide variation in the results of equivalent Poisson's ratio. Despite that, the reflection coefficient of the equivalent homogeneous isotropic coating accords well with that of the original coating.

Based on the above, the sound scattering on the infinite cylindrical shell coated with the equivalent coating is calculated by using the finite element method based on COMSOL Multiphysics software. In order to verify the accuracy of the equivalent model, we use COMSOL Multiphysics software to build up the full geometrical model of the coated shell to calculate the sound scattering. This can be considered as the benchmark. The results of morphic function show that the scattering calculated using equivalent material properties accords well with that obtained from the full finite element model with a mean error of about 1 dB in all frequency spectrum range.

Keywords: sound scattering, acoustic coating, equivalent parameter, finite element method

PACS: 43.40.+s, 43.30.+m, 43.20.+g

DOI: 10.7498/aps.65.014305

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51275519).

[†] Corresponding author. E-mail: wenjihong@vip.sina.com