

文章编号: 1007-7294(2026)02-0307-08

水下声学覆盖层低频高吸声的改进拓扑优化方法

闫 燕¹, 郭 君², 上官洋¹, 叶天贵¹, 靳国永¹, 步云彤¹

(1. 哈尔滨工程大学, 哈尔滨 150001; 2. 中国船舶集团有限公司 第七〇五研究所, 西安 710077)

摘要: 随着水下探测技术向低频方向的不断发展, 传统水下声学覆盖层的吸声能力需要显著提高。为了获得较好的低频吸声效果, 本文研究了一种拓扑-形状-拓扑 (Topology-Shape-Topology, TST) 优化方法。利用该方法可优化材料在声学覆盖层中的分布, 由此设计了一种新型的水下声学覆盖层。与传统空腔型覆盖层相比, 采用 TST 优化方法设计的覆盖层结构在 200~1000 Hz 范围内具有优异的吸声性能。在 321 Hz 处吸声系数峰值可达 0.9, 在研究频率范围内的吸声系数平均值在 0.8 以上, 有效改善了传统水下声学覆盖层的低频吸声效果。此外, 本文揭示了吸声特性背后的潜在机制, 从而进一步掌握了材料的分布规律。该研究为水下声学覆盖层的设计提供了新的思路。

关键词: 拓扑-形状-拓扑优化; 低频; 吸声; 声学覆盖层

中图分类号: TB564 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1007-7294.2026.02.011

An improved topology optimization method to obtain excellent low-frequency sound absorption performance of underwater acoustic coatings

YAN Yan¹, GUO Jun², SHANGGUAN Yang¹, YE Tian-gui¹, JIN Guo-yong¹, BU Yun-tong¹

(1. Harbin Engineering University, Harbin 150001, China; 2. The 705 Research Institute of CSSC, Xi'an 710077, China)

Abstract: With the continuous development of underwater detection technology towards low frequency domain, the sound absorption ability of conventional underwater acoustic coating needs to be significantly enhanced. In order to obtain better low-frequency sound absorption effect, a Topology-Shape-Topology (TST) optimization method is investigated in this paper. A new underwater acoustic coating is designed using the method which optimizes the distribution of materials in the anechoic layer. Compared with the traditional cavity-type acoustic coating, the acoustic structure designed by TST optimization method can achieve excellent sound absorption performance in the range of 200–1000 Hz. The peak value of sound absorption coefficient can come up to 0.9 at 321 Hz, and the average of sound absorption coefficient within the studied frequency range is above 0.8, resulting in an effective improvement of the low frequency sound absorption effect of the traditional underwater acoustic coating. Moreover, the underlying mechanism behind the sound absorption performance is revealed to obtain a further understanding of distribution regularities of materials. The study provides a new idea for the design of underwater acoustic coatings.

Key words: Topology-Shape-Topology optimization; low-frequency; sound absorption; acoustic coating

收稿日期: 2025-06-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52225109; 52241101; 52271309); 黑龙江省自然科学基金(YQ2022E104)

作者简介: 闫 燕(1997-), 女, 硕士研究生, E-mail: yany@hrbeu.edu.cn;

叶天贵(1975-), 男, 博士, 研究员, 通讯作者, E-mail: yetiangui@hrbeu.edu.cn。

0 引言

水下吸声材料在朝着低频、宽带和高吸声的方向发展。目前广泛用于水下吸声并有一定低频吸声能力的是含有各种空腔的橡胶材料^[1]。如何提高声学覆盖层的低频吸声性能一直是研究热点。最早研究的空腔结构是在二战时期德国设计的“Alberich”型空腔结构,研究至今空腔形式已多种多样,有圆柱形、锥形和喇叭形以及各种组合的空腔。Ye等^[2]采用传递函数法比较了圆柱、圆锥和喇叭形三种不同类型的空腔的吸声系数,结果表明在三种孔型中,喇叭孔型在正入射和斜入射下的低频吸声性能最佳。廖琳等^[3]设计了一种由圆柱和圆台组合的空腔,通过比较不同结构尺寸下的声学性能,得出了声学性能最优的某种圆柱尺寸下的空腔。然而,通过反复试验找到优异的空腔尺寸、形状和分布是非常困难的,但是运用逆向设计方法可以大大减少工作量。陶猛等^[4]以圆柱和圆台组合空腔结构为分析对象,利用遗传算法开展了多个材料属性及结构参数的优化工作,之后综合优化材料和结构参数,获得了更佳的宽频吸声性能。周帅龙等^[5]建立了一种描述空腔腔型结构的函数,利用 Nelder-Mead 算法得到最优隔声性能的腔型结构,随后在最优腔型的基础上对材料参数进行优化,从而使结构的隔声性能再次提升。相比于尺寸优化和形状优化,拓扑优化通过直接对材料分布进行优化,拥有更大的设计空间,随着拓扑优化技术的不断发展和完善,将拓扑优化方法应用到声学结构的设计受到越来越多学者的关注。Li等^[6]对橡胶层进行拓扑优化,在中频范围内获得了具有较低反射系数的覆盖层。Wang和Li等^[7-8]采用分段式的目标函数,用遗传算法在各自感兴趣的频段内设计出了具有较好声学性能的吸声结构。本文提出了一种新型的设计思路,即拓扑优化-形状优化-拓扑优化(TST)方法,该方法按照设计逻辑将拓扑优化与形状优化相结合,在优化空腔的基础上引入了第三种材料,拓展了设计变量,从而可以进一步提升优化目标。相比于单一的拓扑优化,由TST设计思路得出的声学结构的吸声系数,在低频段内有了明显的改善。

1 模型介绍

声学覆盖层通常假设为无限大,如图1(a)所示沿 x 和 y 方向周期性的排列,根据 Floquet-Bloch 定理,可以选择其中任意一个单元模型来计算吸声性能。为了减少计算成本,三维单胞模型可以进一步简化为二维轴对称结构。本文选择 $x-z$ 平面为子午面建立二维轴对称声学覆盖层模型,如图1(c)所示,结构主要包括四部分:半无限的水域、嵌有空腔的橡胶层、钢背衬、半无限的空气域。

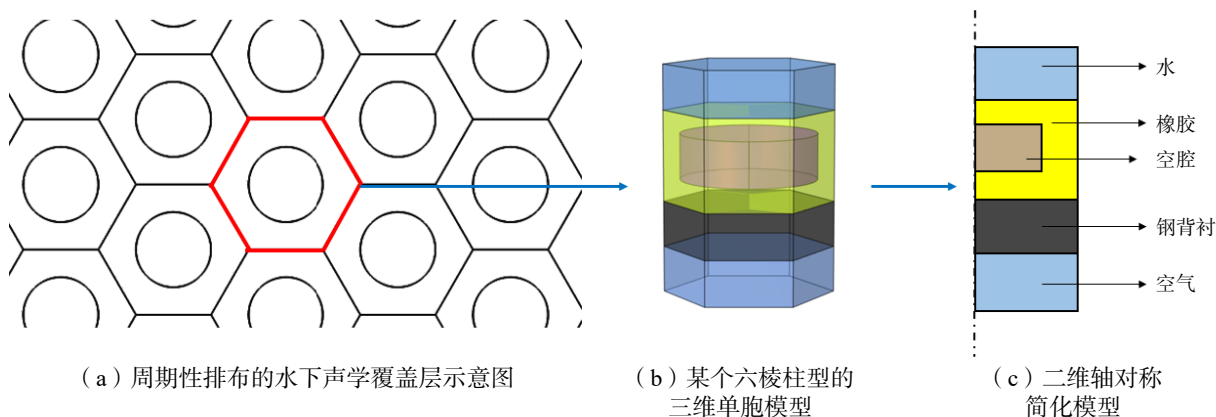


图1 水下声学覆盖层及其简化模型示意图

Fig.1 Schematic diagram of acoustic coating and simplified model

图2(a)将简化模型的吸声系数与文献[9]中的计算结果进行对比,曲线吻合良好,证明了本文简化模型的正确性与计算过程的可靠性。在此基础上,本文选择在二维空间上开展声学覆盖层的优化设计

工作,以缩短设计周期。图2(b)中的黑色虚线框区域为设计域,黄色区域为橡胶层的非设计域,其余部分与图1(c)所述一致。平面谐波从半无限的水域沿着 z 轴负方向入射进结构中,最后透射到空气域,在入射面和透射面均设置平面波辐射条件以完全吸收反射与透射声波。表1列出了模型的尺寸数据,表2则给出了相关的材料参数,为简单起见,假定材料参数不随频率变化。本文感兴趣的频段上限到1000 Hz,计算步长取为50 Hz。

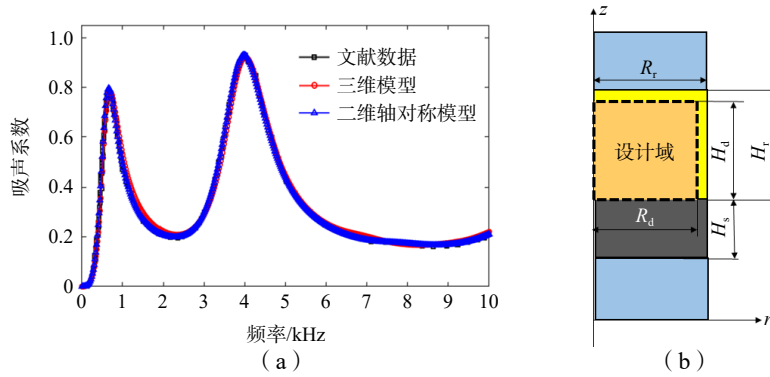


图2 简化模型验证和用于优化设计的二维轴对称模型示意图

Fig.2 Schematic of the simplified model validation and two-dimensional axisymmetric model for optimal design

表1 模型的结构参数

Tab.1 Structural parameters of the model

R_r/mm	R_d/mm	H_d/mm	H_r/mm	H_s/mm
38	40	40	38	30

表2 本文中的材料参数^[10]

Tab.2 Material parameters considered in this work^[10]

材料	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	体积模量/Pa	剪切模量/Pa	声速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
橡胶	1300	$1.67\times 10^9 + i\times 8.33\times 10^8$	$1.00\times 10^7 + i\times 5.01\times 10^6$	—
钢	7850	1.55×10^{11}	8.01×10^{10}	—
水	1000	—	—	1448
空气	1.25	—	—	343

2 拓扑优化理论

2.1 优化目标与约束条件

本文的优化目标是各频率点的吸声系数之和尽可能大。对于非均匀的结构,可采用有限元法计算其吸声系数,在流体域与固体域的有限元方程分别为

$$\mathbf{M}_f \ddot{\mathbf{p}} + \mathbf{K}_f \mathbf{p} + \rho_0 \mathbf{R} \dot{\mathbf{u}} = \mathbf{F}_f \quad (1)$$

$$\mathbf{M}_s \ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}_s \mathbf{u} - \mathbf{R}^T \dot{\mathbf{p}} = \mathbf{F}_s \quad (2)$$

式中: $\mathbf{M}$ 、 $\mathbf{K}$ 、 $\mathbf{F}$ 分别表示质量矩阵、刚度矩阵以及作用在结构上的作用力矩阵,下标f和s则分别代表流体与固体域; $\mathbf{R}$ 表示的是流固耦合矩阵; $\mathbf{p}$ 、 $\mathbf{u}$ 、 ρ 分别表示声压、质点位移与介质密度。结合公式(1)与(2),描述声固耦合的有限元方程可表示为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_s - \omega^2 \mathbf{M}_s & -\mathbf{R}^T \\ -\rho_0 \omega^2 \mathbf{R} & \mathbf{K}_p - \mathbf{C}_\phi - \omega^2 \mathbf{M}_p \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{u} \\ \mathbf{p} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{F}_s \\ \mathbf{F}_f \end{Bmatrix} \quad (3)$$

式中: ω 代表圆频率, $\mathbf{C}$ 代表了阻尼矩阵。通过求解方程(3)即可得到结构域中的位移 u 与流体域中的声压 p , 则模型的反射系数可表示为反射声压与入射声压之比

$$R = \frac{p_r}{p_i} \quad (4)$$

因为模型的透射侧的流体域材料为空气, 而钢背衬与空气的阻抗严重失配, 使得绝大部分的声波被反射回结构中, 声波的透射系数很小, 可以忽略不计, 因此吸声系数可由式(5)进行计算

$$A = 1 - |R|^2 \quad (5)$$

一般来说, 拓扑优化时要最小化结构体积, 在优化声学结构时, 若对优化材料体积有要求, 可设置相应的体积约束

$$V(x) = \frac{1}{\int_{\Omega_d} d\Omega} \int_{\Omega_d} x d\Omega - V_{\text{frac}} \leq 0 \quad (6)$$

式中: $V(x)$ 为优化后结构体积, $\int_{\Omega_d} d\Omega$ 为设计域面积, x 是设计变量, 下文会详细说明, 常数 V_{frac} 表示结构材料在设计域中的允许体积分数。

2.2 密度模型及数值不稳定现象的处理

目前, 变密度法是被广泛应用的拓扑优化建模方法之一, 其本质思想就是假设材料单元密度 x 是 0 到 1 之间的变量。至于材料的物理属性, 则是人为假定与密度之间存在一种函数关系, 这样一来材料的物理属性就可以用材料单元的密度函数来表示。但是引入这种密度单元会产生“灰度单元”问题, 即在拓扑优化结果中出现大量的中间密度单元, 这种中间密度单元会极大地降低结构的可制造性。为了解决问题, 将中间密度惩罚函数的材料插值模型应用到拓扑优化中, 使材料密度最大可能地趋向于 0 或者 1, 从而避免中间密度的产生。被运用较多的密度-刚度插值模型有 SIMP^[11] 和 RAMP^[12] 插值模型, SIMP 插值模型如下所示

$$\phi(x_i) = x_i^p \quad (7)$$

式中: x_i 是单元的相对密度, p 是惩罚因子。假设材料是各向同性的, 泊松比与密度无关, 可以人为地建立材料体积模量和剪切模量与密度的关系

$$Q(x_i) = Q_{\min} + \phi(x_i)(Q_0 - Q_{\min}) \quad (8)$$

式中: $Q(x_i)$ 是结构中单元 i 经过插值以后的体积模量或剪切模量, Q_0 和 $Q_{\min}$ 分别是 x 为“1”和“0”时对应的模量。惩罚因子的引入是为了使材料单元密度更快地向“0”或者“1”趋近, 因此, 式(8)中的模量向 Q_0 与 $Q_{\min}$ 逼近的趋势受到 p 的调控。如图 3 所示, 惩罚因子越大时, 材料密度会更快地趋近端点值, 所以理论上惩罚因子越大越好。但是当 p 增大到某一程度时, $Q(x_i)$ 则会快速地收敛于“0”, 这将导致拓扑优化的结果远离真正的最优结果, 因此需要选出合适的惩罚因子^[13]。

为了避免网格依赖和棋盘格现象, 本文采用 Lazarov 等^[14] 提出的亥姆霍兹过滤器作为过滤方案, 原始设计变量被转换为滤波后的设计变量 $\tilde{x}$, 表达式为

$$\tilde{x} = x_c + R_{\min}^2 \nabla^2 \tilde{x} \quad (9)$$

式中: x_c 是经优化程序修正的原始控制变量, $\tilde{x}$ 是过滤后的变量, $R_{\min}$ 是过滤器半径, 为了获得独立于网格的结果, $R_{\min}$ 通常被设置为一个大于网格边尺寸的固定长度。将过滤后的设计变量进行投影, 即施加一个平滑的阶梯函数可以降低灰度^[15], 这里的投影用双曲正切函数形式。

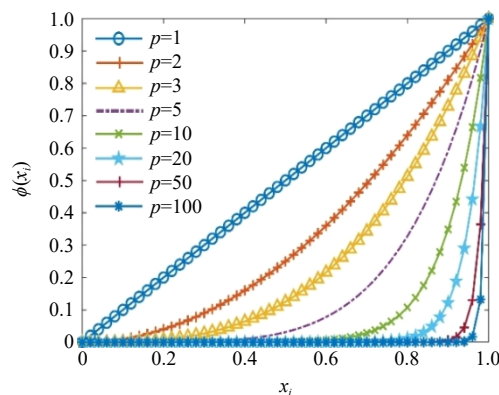


图3 SIMP 密度惩罚函数图

Fig.3 SIMP density penalty function

$$\tilde{x} = \frac{\tanh(\beta\eta) + \tanh(\beta(\tilde{x} - \eta))}{\tanh(\beta\eta) + \tanh(\beta(1 - \eta))} \quad (10)$$

式中： β 是投影斜率，用于控制灰度清晰度， η 是投影点也称为投影阈值，经过投影后的 $\tilde{x}$ 用于式(7)中的 x_i 进行密度插值。值得注意的是，投影在抑制灰度的同时也会使优化收敛变得更加困难^[16]，这就需要在后续的优化工作中不断调节 β 与 p ，直到能获得可靠且清晰的拓扑结果。本文采用移动渐近线(MMA)算法进行寻优，MMA 是一种基于梯度的算法，需要目标函数的导数和关于设计变量的约束，在拓扑优化领域被广泛采用，具体的优化原理可以参考文献[17]，本文不过多赘述。

3 结果与讨论

3.1 空腔的初次拓扑优化

在逐渐增加的 β 与 p 中选取合适的数值对时可以获得特殊构型的优化结果。经过探究，当 $\beta=12$ ， $p=2.75$ 时，在子午面上可以得到似“蘑菇”状的空腔构型。在提取该腔型的过程中注意到，改变过滤下限时，吸声系数有较大的差异，因此本章对过滤下限分别为 0.14 和 0.16 时提取出的结构进行研究，并分别命名为 D1、D2 见图 4(a)、(b)。因 D1 型空腔的过滤下限低于 D2，得以保存的材料体积较多，体现在结构上就是 D2 型的空腔是一个连通的腔体，而 D1 型空腔则被分割成两个互不相通的腔室。增加 β 与 p 的数值直到 20 和 3.75 时，则得到一种椭球形的空腔，命名为 D3，见图 4(c)。

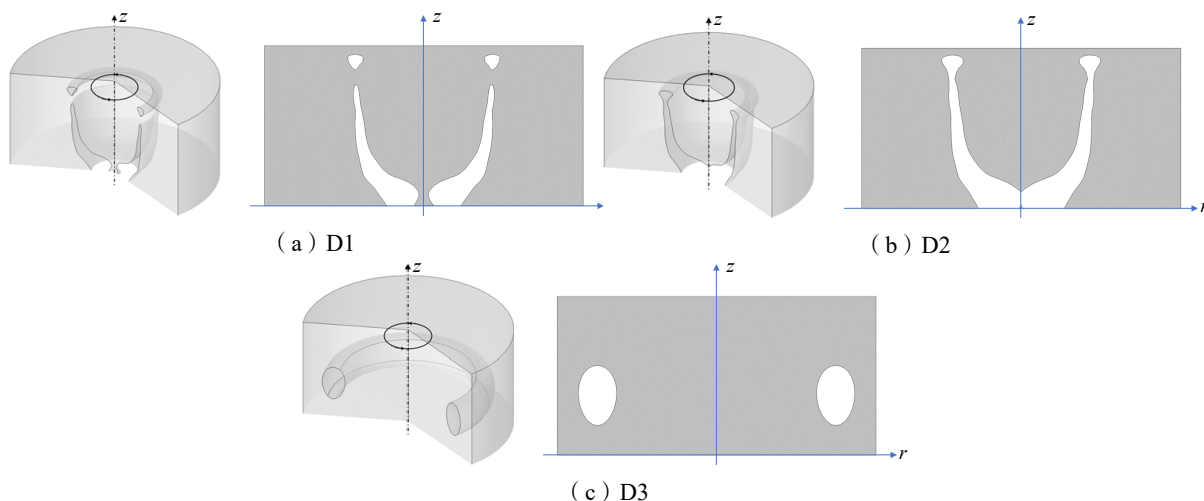


图4 初次拓扑优化得到的三种空腔结构

Fig.4 Three cavity structures obtained from the initial topology optimization

上述三种结构的吸声系数如图 5 所示，相比于单一均质的橡胶层，嵌有优化后的空腔结构在计算频段内的吸声性能大大提高，并且三者在该频段内均拥有较高的吸声峰：D1 的吸声峰对应 601 Hz，D3 的吸声系数变化情况与 D1 型相似，吸声曲线均是平缓变化的山丘状，但 D3 峰值对应的频率在 701 Hz。有意思的是 D2 的曲线在整个频段内出现了两处吸声峰，第一个吸声峰对应的频率低至 321 Hz，第二个则处于 931 Hz 处。为了解释这些吸声机理及差异，图 6 给出了各个峰值对应的位移分布。为了更加清晰的观

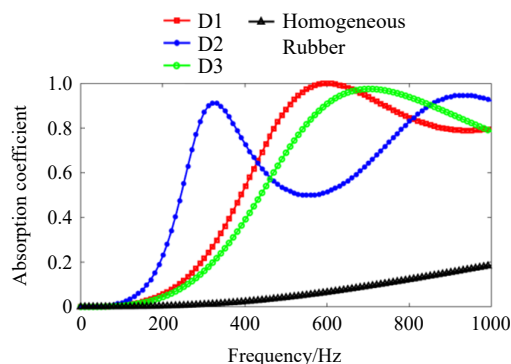


图5 三种空腔结构的吸声系数曲线

Fig.5 Sound absorption coefficients of three cavity structures

察运动模式,图中将表示位移的箭头和云图均做了不同程度的拉伸和变形。

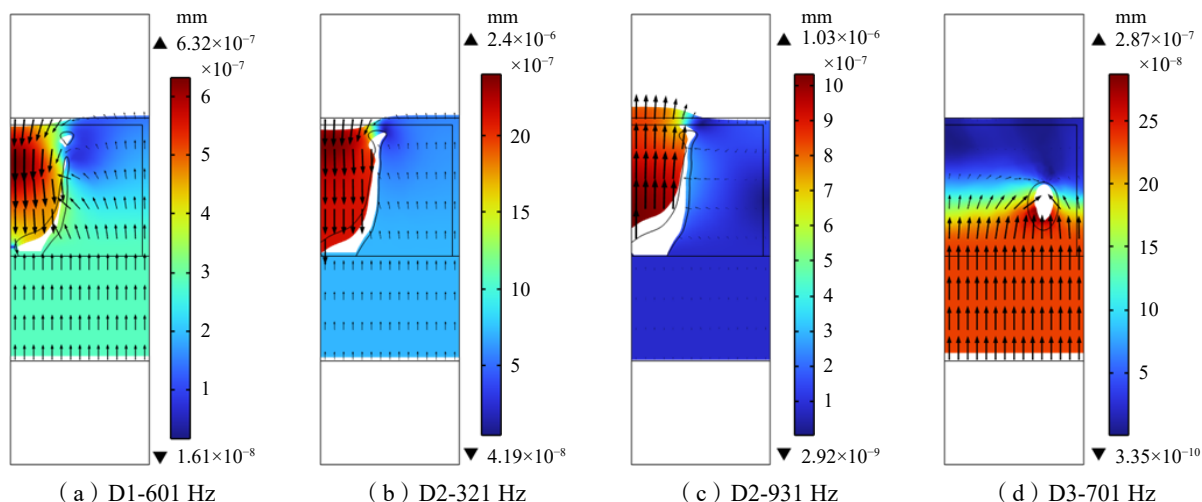


图6 吸声曲线峰值频率对应的位移矢量场

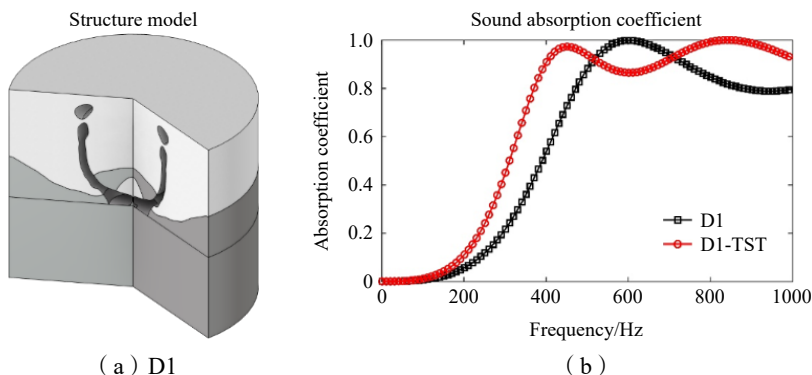
Fig.6 Displacement vector fields corresponding to peak frequencies of sound absorption curves

从图 6(a)~(c)可以看到, D1 和 D2 的吸声峰处, 外层橡胶做着和中心区域的橡胶以及钢背衬方向相反的运动, 振动能量主要集中在中心橡胶处。将目光集中在顶层橡胶位移上, 可以观察到顶层橡胶的位移模式被声腔一分为二, 在不同频率的声波激励下做着弯曲运动。由此可见, D1 与 D2 的吸声结构可以类似于局域共振系统, 即中心区域橡胶充当着振子的角色, 空腔相当于包覆层, 发挥了弹簧的作用, 外层橡胶相当于基体, 此系统将入射的声波能量转换为“振子-弹簧”系统的振动能量。至于 D3 结构, 如图 6(d), 覆盖层的位移幅值从下到上逐渐减小, 基体表现出被整体拉伸或压缩的形式, 因此该吸声峰是由覆盖层基体与钢背衬耦合共振引起的, 这是 D3 在振动模式方面与其他两个结构最大的不同之处。从位移矢量可以看出, 在空腔周围, 垂直入射的纵波大部分都转换成横波, 对于粘弹性材料, 其剪切损耗因子远大于体积模量损耗因子, 在橡胶的粘性内摩擦作用和吸声层基体共振效应的共同作用下, 绝大部分入射声能损耗, 这使得 D3 结构达到第一个吸声峰值。

3.2 空腔的 TST 优化

本节主要展开对上述结构的再优化, 通过 TST 方法在完善空腔形状的同时引入另一种材料, 从而进一步提高低频吸声能力。所用的金属选择钢, 材料参数和表 1 保持一致, 在插值函数上与上一节稍有区别, 变量 ρ 为 0 时表示橡胶而不是空气, 为 1 时则表示钢材料。为了对比明显, 所计算频段和目标函数等均不变, 优化后的结果如图 7 所示。

经过 TST 优化后 D1 的吸声曲线由原来的一个吸声峰增加为两个, 第一吸声峰向低频移动, 吸声系数超过 0.9 的频带得以大大拓宽。D2 的两个吸声峰均向低频移动, 第一个吸声峰值稍有减小, 但是第二峰值增加, 同时也抬高了两峰之间的峰谷。D3 吸声峰向低频移动的同时峰值也稍有增加。



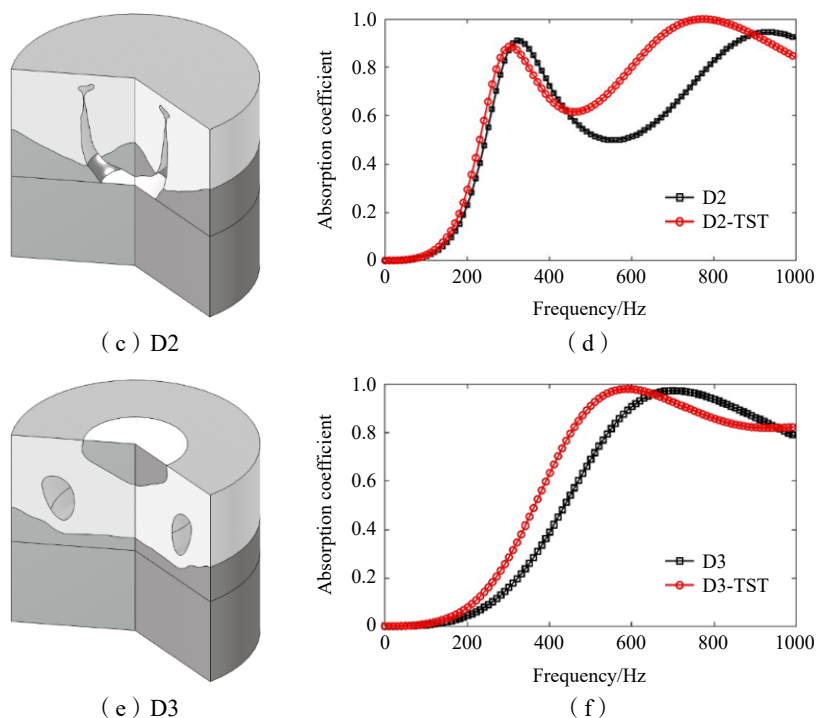


图7 TST 优化后的结构模型及吸声系数

Fig.7 Structure models and sound absorption coefficients after TST optimization

值得注意的是, TST 优化得到的钢材料主要分布在背衬上方与橡胶中心区域处。与背衬连接的钢材料一方面相当于增加了背衬质量, 另一方面弯曲的分界面会促进波形转换的发生, 这两者都对吸声性能有积极影响。但是中心区域的钢材料对顶部的橡胶层的弯曲振动有一定的抑制作用, 另外橡胶材料整体减少也会影响声能量的损耗, 这些因素对吸声起到消极作用。从计算频段的吸声系数变化情况来看, 添加钢材料起到的积极作用更为明显, 所以在一定程度上, 本文使用的 TST 优化方法得到的结构在低频段的吸声性能取得了更好的效果。但需要关心的是, 由于结构在拓扑优化过程中具有不可控性, 优化后的空腔和钢材料形状体积趋于异形, 使得优化模型的制作过程变得非常困难, 因此在应用到工程实际中时需要结构的形状进行规整优化, 但此工作又会不可避免地结构的声学性能产生影响, 这也是拓扑优化方法亟需解决的关键问题。

4 结 语

针对水下声学覆盖层低频吸声差、吸声频带较窄、研究方法单一等瓶颈问题, 本文引入了一种拓扑优化与形状优化相结合(TST)的逆向设计方法, 该方法与传统优化方法相比, 同时考虑了拓扑优化和形状优化。计算了在不同控制参数下的空腔结构, 并深入分析了背后的吸声机制。结果表明, 相对于单次拓扑优化, 利用 TST 逆向设计方法能进一步提高低频吸声能力, 从而为轻质、低频、宽带的水下声学结构设计提供了理论基础和方法支撑。

参 考 文 献:

- [1] 张燕妮, 陈克安, 郝夏影, 等. 水声超材料研究进展[J]. 科学通报, 2020, 65(15): 15.
Zhang Y N, Chen K A, Hao X Y, et al. Research progress of underwater acoustic metamaterials[J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65(15): 15. (in Chinese)
- [2] Ye C, Liu X, Xin F, et al. Influence of hole shape on sound absorption of underwater anechoic layers[J]. Journal of Sound

- and Vibration, 2018, 426: 54–74.
- [3] 廖琳, 向阳. 组合空腔声学覆盖层声学性能分析及其优化设计[J]. 噪声与振动控制, 2022, 42(2): 10–16+58.
Liao L, Xiang Y. Analysis of acoustic performance of combined cavity acoustic cladding and its optimal design[J]. Noise and Vibration Control, 2022, 42(2): 10–16+58. (in Chinese)
- [4] 陶猛, 赵阳, 王广玮. 基于遗传算法的圆柱空腔吸声覆盖层参数优化研究[J]. 振动与冲击, 2014, 33(2): 20–25.
Tao M, Zhao Y, Wang G W. Optimisation of parameters of acoustic cover layer for cylindrical cavity based on genetic algorithm[J]. Vibration and Shock, 2014, 33(2): 20–25. (in Chinese)
- [5] 周帅龙, 陈理添, 刘小侠, 等. 声学覆盖层的优化设计[J]. 噪声与振动控制, 2021, 41(4): 35–41+72.
Zhou S L, Chen L T, Liu X M, et al. Optimised design of acoustic cladding[J]. Noise and Vibration Control, 2021, 41(4): 35–41+72. (in Chinese)
- [6] Li J, Li S. Topology optimization of anechoic coating for maximizing sound absorption[J]. Journal of Vibration and Control, 2018, 24(11): 2369–2385.
- [7] Wang Y, Zhao H, Yang H, et al. Inverse design of structured materials for broadband sound absorption[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2021, 54(26): 265301.
- [8] Li Z, Ke Y, Wu G, et al. Topology optimization combined with a genetic algorithm to design structured materials for underwater broadband acoustic absorption[J]. Journal of Vibration and Control, 2022: 107754632211318.
- [9] Zhong J, Zhao H, Yang H, et al. On the accuracy and optimization application of an axisymmetric simplified model for underwater sound absorption of anechoic coatings[J]. Applied Acoustics, 145: 104–111.
- [10] Zhong J, Wen J, Zhao H, et al. Effects of core position of locally resonant scatterers on low-frequency acoustic absorption in viscoelastic panel[J]. Chinese Physics B, 2015, 24(8): 084301.
- [11] Stolpe M, Svanberg K. An alternative interpolation scheme for minimum compliance topology optimization[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2001(22): 116–124.
- [12] Sigmund O, Maute K. Topology optimization approaches: A comparative review[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2013, 48(6): 1031–1055.
- [13] 尹艳山. 基于变密度法的连续体结构拓扑优化[D]. 沈阳: 东北大学, 2014.
Yin Y S. Topology optimization of continuum structure based on variable density method[D]. Shenyang: Northeastern University, 2014. (in Chinese)
- [14] Lazarov B S, Sigmund O. Filters in topology optimization based on Helmholtz-type differential equations[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2011, 86: 767–784.
- [15] Wang F, Lazarov B S, Sigmund O. On projection methods, convergence and robust formulations in topology optimization[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2011, 43: 767–784.
- [16] Kook J, Chang J H. A high-level programming language implementation of topology optimization applied to the acoustic-structure interaction problem[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2021, 64(6): 4387–4408.
- [17] Svanberg K. The method of moving asymptotes—a new method for structural optimization[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2010, 24(2): 359–373.