



基于含气泡软媒质的高纯度水下声涡旋束产生

王蓉, 赵澄宇, 刘京京*, 梁彬*, 程建春

南京大学物理学院, 近代声学教育部重点实验室, 人工微结构科学与技术协同创新中心, 南京 210093

* 联系人, E-mail: liujingjing@nju.edu.cn; liangbin@nju.edu.cn

2024-06-23 收稿, 2024-08-31 修回, 2024-09-13 接受, 2024-09-14 网络版发表

国家重点研发计划(2022YFA1404402, 2017YFA0303700)、国家自然科学基金(12304493, 12174190)和江苏省自然科学基金(BK 20230767)资助

摘要 携带轨道角动量的涡旋声束在声通信、声力操控和微流控等领域具有显著的应用价值, 近年来受到了广泛的关注. 然而, 当前关于涡旋声束的产生和调控研究大多集中在空气环境中, 如何高效实现水下高纯度的声涡旋仍然是一个挑战性问题. 本文提出了一种基于含气泡软媒质的水下高纯度声涡旋束产生方法, 通过理论推导含气泡软媒质等效声学参数与结构参数间的对应关系, 设计了在低频段具有慢声速特性并能够对水下声波相位进行任意调控的超材料结构单元, 基于此构建了能够在亚波长的空间尺度内产生水下声涡旋的超表面. 进一步地, 发展了基于模拟退火算法的超表面全局优化设计方法, 解决了水下环境中由单元间耦合效应所导致的涡旋模式纯度低的问题. 最后, 通过数值仿真展示了单一阶数和复合阶数涡旋声场的产生, 相关结果验证了这种基于优化算法的水下超表面全局设计机制可以显著提升所生成涡旋声束的模式纯度, 为水下声涡旋的高效、精准产生提供了新思路.

关键词 含气泡软媒质, 水下声涡旋束, 模拟退火算法, 声学超表面, 等效媒质法

涡旋声束因其独特的动力学性质和模式正交性, 近年来吸引了国内外众多研究者对其产生和调控机理的研究. 利用涡旋场中心的声学势阱特性以及所携带的轨道角动量, 可以非接触式地对物体施加力和力矩, 从而对目标实现精准的空间诱导或旋转操控^[1,2]. 另一方面, 具有不同拓扑荷数的涡旋模式之间存在正交性, 可以提供独立于时间和频率的新的编解码自由度, 为扩充声波通信信道容量、提高通信速率提供了新的思路^[3,4]. 然而, 传统的涡旋声场产生方法通常依赖于多个可独立编址的换能器构成的有源相控阵列^[5,6], 存在系统复杂、成本高、器件尺寸大、调控精度差等问题, 其实际应用受限. 与之相比, 近年来新兴的声学超材料和声学超表面作为具有奇异特性的新型人工材料^[7-16], 可实现超越常规方式的声波特殊调控效果, 为涡旋声束的高效产生和精准调控提供了新的研究范式.

目前, 基于声学超材料/超表面的涡旋束产生方法主要聚焦于空气声系统中^[7,17-19], 例如在空气波导管中利用局域共振型声学超表面将入射平面波转化为携带轨道角动量的出射涡旋声束^[20], 在二维体系中设计超材料人工声波马达实现面内动量扭曲^[21], 以及利用二值化编码超表面实现自由空间中的宽带涡旋产生等^[22]. 尽管当前也发展了一些在水下环境中利用声学超材料产生声涡旋场的方法, 例如基于衍射原理的螺旋声栅结构^[23]和基于五模式超材料的平面结构^[24]等, 但是如何高效产生高纯度的水下涡旋声束仍然是一个亟待解决的问题^[25]. 这主要是因为大多数声学超材料都是以固体基材料为基本结构框架设计的, 而水与固体材料间的阻抗差异并不显著, 因此水下环境的声固耦合效应无法忽略, 由此导致的单元间耦合不仅会提高理论计算的难度, 也会致使基于单一结构单元设计

引用格式: 王蓉, 赵澄宇, 刘京京, 等. 基于含气泡软媒质的高纯度水下声涡旋束产生. 科学通报, 2025, 70: 1772-1781

Wang R, Zhao C Y, Liu J J, et al. Generating high-purity underwater acoustic vortex beam based on bubble-containing soft media (in Chinese). Chin Sci Bull, 2025, 70: 1772-1781, doi: 10.1360/TB-2024-0673

的超材料在全局作用下的声学响应出现偏差。

本文开展了基于模拟退火算法的含气泡软媒质全局设计及高纯度水下声涡旋产生研究。首先, 基于等效媒质理论分析了含气泡软媒质的等效声速和结构参数(气泡填充率)间的对应关系, 设计了在低频段具有慢声速特性并能够任意调控水下声波相位的超材料结构单元, 由此构建了能够产生水下声涡旋的单层超薄声学超表面; 其次, 发展了基于模拟退火算法的超表面全局优化设计方法, 以涡旋模式纯度作为目标函数对超表面各个组成单元的结构参数进行逆设计, 解决了水下环境中由单元间耦合效应导致的涡旋模式纯度低的问题; 最后, 通过数值仿真展示了水下高纯度单一和复合阶数涡旋声场的产生(模式纯度超过85%), 验证了所设计的含气泡软媒质水下声学超表面和所发展的全局优化方法的有效性。这种基于模拟退火算法设计的含气泡软媒质超表面在水下声涡旋束调控方面具有模式纯净、结构平整、尺寸紧凑等优点, 有望在水声通信、声力操控以及其他领域中发挥重要作用。

1 基于等效媒质法的含气泡软媒质声学特性分析

本文所设计的含气泡软媒质的典型结构及工作原理如图1(a)所示, 该结构由弱可压缩性软媒质和空气泡二元材料组合而成, 其中软媒质的密度为 ρ_s , 横波与纵波速度分别为 c_s 、 c_L , Lamé常数为 λ 、 μ , 空气泡的密度为 ρ_g , 填充率是 β , 半径为 R_0 。其基本工作原理可以解释为: 由于少量高可压缩性气泡的掺杂改变了背景媒质的本构关系, 复合材料的可压缩系数大幅提升, 从而导致声速显著降低, 利用这一慢声速(高折射率)特性可以在亚波长的尺度内对水下声波相位进行操控。下面将利用等效媒质法对含气泡软媒质的声学特性进行分析, 为后续的水下超材料结构单元设计奠定理论基础。等效媒质法的基本思想是利用近似的方法研究复合材料的整体属性, 即不考虑单元内部复杂的物理场效应或某一组分的声学响应而用等效的宏观参数来表示材料的整体性质, 从而达到简化问题的目的。这一理论在声学、光学、电磁学等多个领域广泛应用^[26], 是声学超材料研究的常用方法之一^[27]。

在忽略背景介质黏弹性的情况下, 由于气泡的几何尺寸远小于波长, 因此可以将这种含气泡软媒质结构视为各向同性的均匀媒质。根据含气泡软媒质结构单元与等效均匀媒质具有相同的密度和应力、应变分

量以及体积压缩率等关系, 可以对其等效密度和等效声速进行理论计算^[28,29], 解析表达式为:

$$\bar{\rho} = (1 - \beta)\rho_s + \beta\rho_g, \quad (1)$$

$$\bar{c} = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu/3}{\bar{\rho}[1 + V(\lambda + 2\mu/3)]}}, \quad (2)$$

其中, $V = \frac{4\pi R_0 Q}{\rho_s(\omega_0^2 - \omega^2 - iR_0\omega^3/c_s)}$, $\omega_0 = \sqrt{\omega_c^2 + \omega_g^2}$, $\omega_c = \sqrt{4\mu/\rho_s R_0^2}$, $\omega_g = \sqrt{3\gamma P_g/\rho_s R_0^2}$, V 是气泡振动产生的体积变化, ω_0 是气泡振动的固有频率, Q 是单位体积内的气泡数量, P_g 是气泡在平衡时的内部压强, γ 是气泡内气体的绝热系数。式(2)说明, 当气泡半径保持不变时, 通过改变气泡填充率 β 这一单一结构参数可以对含气泡软媒质的等效声速进行调节, 由此我们建立了含气泡软媒质等效声学特性与结构参数间的量化关系, 为后续的水下超表面设计提供了理论支撑。下面考虑一个实际的含泡软媒质结构, 并对其等效声学参数进行解析计算。根据等效媒质理论, 软媒质的背景材料只需满足纵波波长远大于气泡半径这一条件即可(即 $R_0/f/c_L \ll 1$, 其中 R_0 是气泡半径, f 是气泡共振频率, c_L 是纵波波长), 因此本机制适用于橡胶、水凝胶等任意的软媒质材料。这里我们选择嵌段室温硫化甲基硅橡胶(QD231型), 其材料参数为: $\rho_s = 1026 \text{ kg/m}^3$, $c_s = 1037 \text{ m/s}$, $c_L = 44 \text{ m/s}$; 气泡的参数设置为 $R_0 = 1 \text{ mm}$, $P_g = 1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$, $\gamma = 1.4$ 。在3000 Hz的工作频率下, 根据式(1)和(2)计算得到的含气泡软媒质的等效声学性质关于结构参数 β 的变化曲线如图1(b)所示, 结果显示气泡填充率在0.001~0.08范围内变化时, 结构的等效声速可以覆盖200~860 m/s, 而等效密度的变化较小。理论计算的结构等效声速小于水中的声速(1500 m/s), 而等效密度与水介质的密度(1000 kg/m^3)相差不大, 展现了所设计的含气泡软媒质二元复合材料的低声速特性以及在低插入损耗条件下调控水下声波传播相位的可能性。

基于上述的结构单元设计和理论计算结果, 我们进一步设计了由8块扇形含气泡软媒质单元组成的半径为 0.6λ 、厚度为 0.2λ 的圆形水下超表面(λ 为水中的声波波长), 其截面图如图1(c)所示。通过对超表面各个组分结构参数进行合理地调节, 可以引入所需的相位分布来产生目标阶数的水下涡旋声束。下面首先利用有限元数值仿真软件Comsol Multiphysics对单个单元在水下环境中的声学响应进行数值仿真计算。如图1(d)所示为单个含气泡软媒质结构单元的透射相位 φ

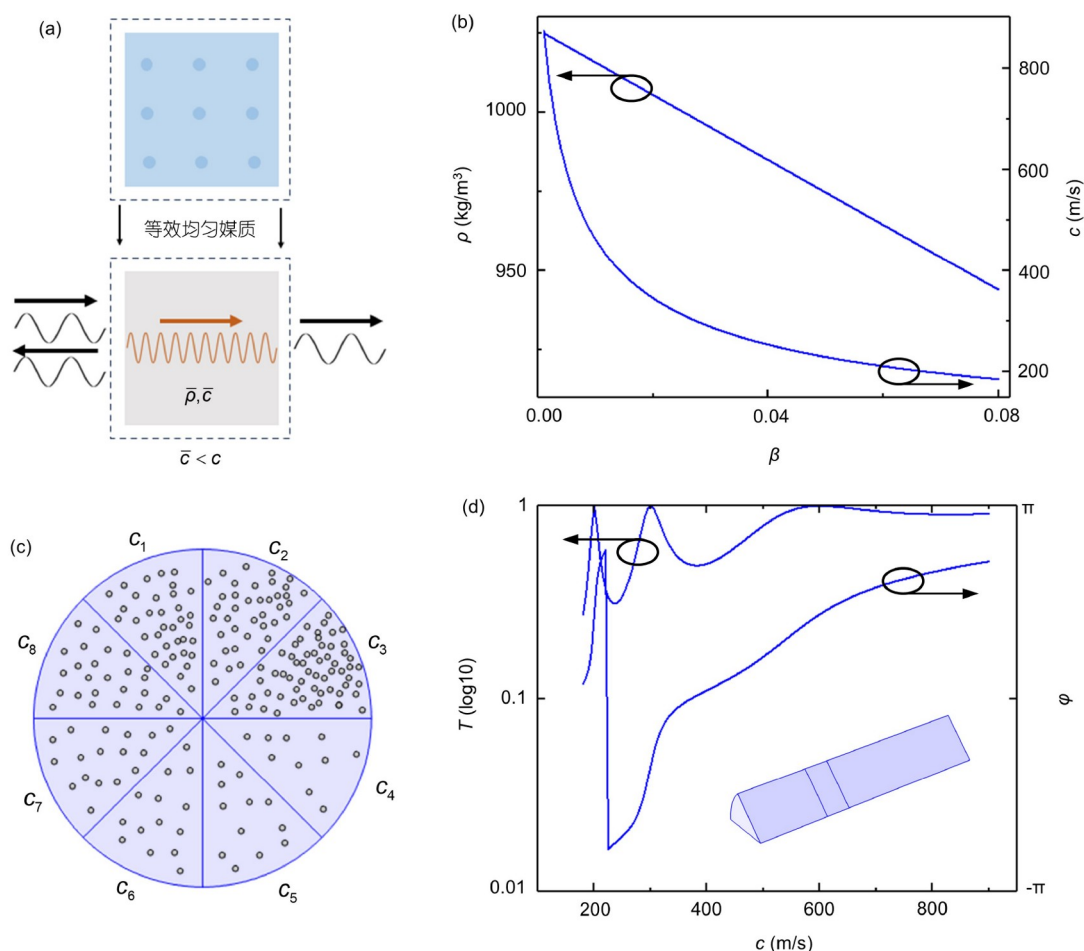


图 1 (网络版彩色)含气泡软媒质的工作原理及其声学特性分析。(a) 含气泡软媒质的结构示意图和工作原理图; (b) 根据式(1)和(2)计算的含气泡软媒质的等效声速 c 与等效密度 ρ 关于气泡填充率 β 的变化关系曲线; (c) 由8块扇形含气泡软媒质单元组成的圆形超表面的截面图; (d) 单元所提供的透射相位 ϕ 和透射率 T 关于等效声速 c 的响应关系

Figure 1 (Color online) Working principle and acoustic characteristics analysis of the bubble-containing soft medium. (a) Schematic diagram of the structure and working principle of the bubble-containing soft medium; (b) the variation curves of the equivalent sound speed c and the equivalent density ρ of the bubble-containing soft medium with respect to the bubble filling rate β , calculated according to Eqs. (1) and (2); (c) cross-sectional view of a circular metasurface composed of eight sector-shaped bubble-containing soft medium units; (d) the response relationship of the transmission phase ϕ and the transmission coefficient T provided by the unit in response to the equivalent sound speed c

及透射率 T 关于等效声速 c 的变化关系的数值仿真结果,可以看出所设计的单元能够在保证较高能量透射率的同时对出射相位实现 $0 \sim 2\pi$ 的全范围调控,为在亚波长的空间尺度内对水下声波进行高效、精准的操控提供了实际实现的可能。

2 含气泡软媒质超表面实现水下声涡旋产生

接下来,我们将利用数值仿真方法验证所设计的圆形含气泡软媒质超表面在水下圆柱管波导系统中产生涡旋声场的能力。利用环形阵列产生单一阶涡旋声场的必要条件为相邻两个单元之间的相位差

需要满足 $\Delta = 2\pi n/M$ (其中 n 是涡旋声场的阶数而 M 指代环形阵列的单元个数)^[30]。根据线叠加原理可以进一步推导得出为了产生 $n_1, n_2, \dots, n_N$ 阶相叠加的复合涡旋场,每一个单元需要提供的附加相位应为

$$\varphi_m = \arg \left(\sum_{i=1}^N \exp(2in_i\pi(m-1)/M) \right).$$

我们选择在半径为 0.6λ 的圆柱波导中分别演示 $n = 1, n = 2$ 的单一阶涡旋束以及 $n_1 = 1, n_2 = 2$ 的复合涡旋束的产生,工作频率仍选定为3000 Hz。根据含气泡软媒质声学特性与其等效参数的关系以及不同涡旋束产生情况下各个超表面组成单元所需提供的附加相位,可以确定与之对应的单

元等效声速, 结果如表1所列. 如图2(a)和(b)所示为3种涡旋声场产生情况下距离超表面2.8倍波长处声压场幅值和相位的空间分布, 结果展现了零声压中心以及螺旋形相位分布等涡旋声场的典型特征, 但声压幅值沿角向的空间分布不均匀, 在非中心位置也出现了多个相位奇点(图2(b)的中间图), 与理想的完美涡旋声场的差异较大. 为了定量地表征接收平面上各阶涡旋模式的能量占比情况, 我们定义了一个归一化模式系数 C_n 来分析涡旋的模式纯度^[31]:

$$C_n = \frac{|I_n|}{\sum |I_l|}, \quad (3)$$

其中

$$I_l = \frac{\int p^* p_l ds}{\int p_l^* p_l ds}, \quad (4)$$

其中, p 是接收面 s 上的声压, p_l 为圆柱形声波导管内 l 阶本征贝塞尔模式的声压分布, n 为目标阶数. 根据式(3)计算得到的接收面上各阶涡旋模式的能量占比柱状图如图2(c)所示. 需要说明的是, 在 $r = 0.6\lambda$ 的水下圆柱形波导管内, 三阶及以上模态涡旋的截止频率大于我们所设置的3000 Hz的工作频率, 无法在波导管内传播, 因此涡旋模式占比图中的最高阶模式只考虑到了二阶. 不过尽管当前只演示了在 $r = 0.6\lambda$ 的波导管中来产生涡旋声束, 但本质上该机制可以适用于不同半径的波导系统乃至自由空间. 结果显示, 对于产生单阶涡旋束的情况, 目标阶数的涡旋模式能量占比(C_1 , C_2)分别为0.58和0.61, 而对于复合涡旋束产生的情况, 一阶与二阶的目标涡旋模式占比分别为0.25与0.45. 以上声场空间仿真结果和模式纯度量化计算结果说明了尽管超表面各个子单元的结构参数和声学特性是按照理论预期进行设计的, 但是整个超表面所产生的水下涡旋模式的质量较低, 非目标阶数的涡旋模式对整个声场的影响不可忽略. 这是因为基于单结构单元设计的含气泡

软媒质超材料在全局作用下的声学响应出现偏差, 致使实际经过超表面的透射声波的相位空间分布不再符合预期.

3 基于模拟退火算法的涡旋模式纯度优化

为了解决上述问题, 本文提出一种基于模拟退火算法的含气泡软媒质超表面全局设计方法, 在考虑单元间耦合效应的情况下对超表面的结构参数进行全局设计, 以提高目标阶数涡旋模式的纯度. 模拟退火算法是一种启发式随机智能算法^[32], 其算法机制受到固体退火过程的启发, 从某个较高的初温出发, 在空间中进行大规模的搜索. 温度是模拟退火算法的重要因素, 能够控制搜索过程的随机性和解的接受概率. 高温时, 算法允许较大范围内的随机搜索, 随着温度的降低, 算法搜索过程逐步转向更精细的局部探索并逐渐收敛. 解的接受过程通过Metropolis准则($P(\Delta E) = \exp(-\Delta E / T)$, ΔE 是新解与当前解的目标函数值的差值, T 是当前温度)实现, 它保证了在高温条件下, 差的新解仍然有较大概率被接受, 从而避免陷入局部最优. 利用该算法进行涡旋模式纯度优化的具体流程图如图3所示, 算法停止与否的判断条件为是否达到温度迭代的最大次数, 这个条件能够控制算法执行时间, 确保算法不会无限地运行. 此外, 温度的变化率会影响算法的收敛过程, 一般情况下温度根据衰减系数 $\alpha = 0.94$ 进行更新, 但是为了控制收敛速度, 我们将温度变化小于1时的温度衰减系数 α 设置为0.98, 以保证算法在接近终止时更平稳地运行.

优化过程在Comsol with MATLAB联合仿真软件中进行. 这里我们采用上一节中理论计算的等效声速(表1)作为模拟退火算法的初始参数, 对超表面8个结构单元的等效声速进行同步优化. 为了在合理的时间内找到较优解, 并确保算法有足够的时间进行充分的探索和收敛, 本文设置初始温度为100℃, 每个温度下进行20次迭代, 温度迭代的最大次数为35. 单阶涡旋的优

表 1 为了产生单一阶涡旋束($n = 1, 2$)以及复合涡旋束($n_1 = 1, n_2 = 2$), 超表面8个结构单元所提供的等效声速(单位: m/s)

Table 1 The needed equivalent sound speeds in the unit of m/s provided by the eight structural units of the metasurface to generate single-mode vortex beams ($n = 1, 2$) and multiple-mode vortex sound beams ($n_1 = 1, n_2 = 2$)

阶数	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	c_7	c_8
一阶涡旋	272	294	309	348	469	559	672	800
二阶涡旋	780	498	318	284	780	498	318	284
复合涡旋	372	534	714	260	578	856	279	304

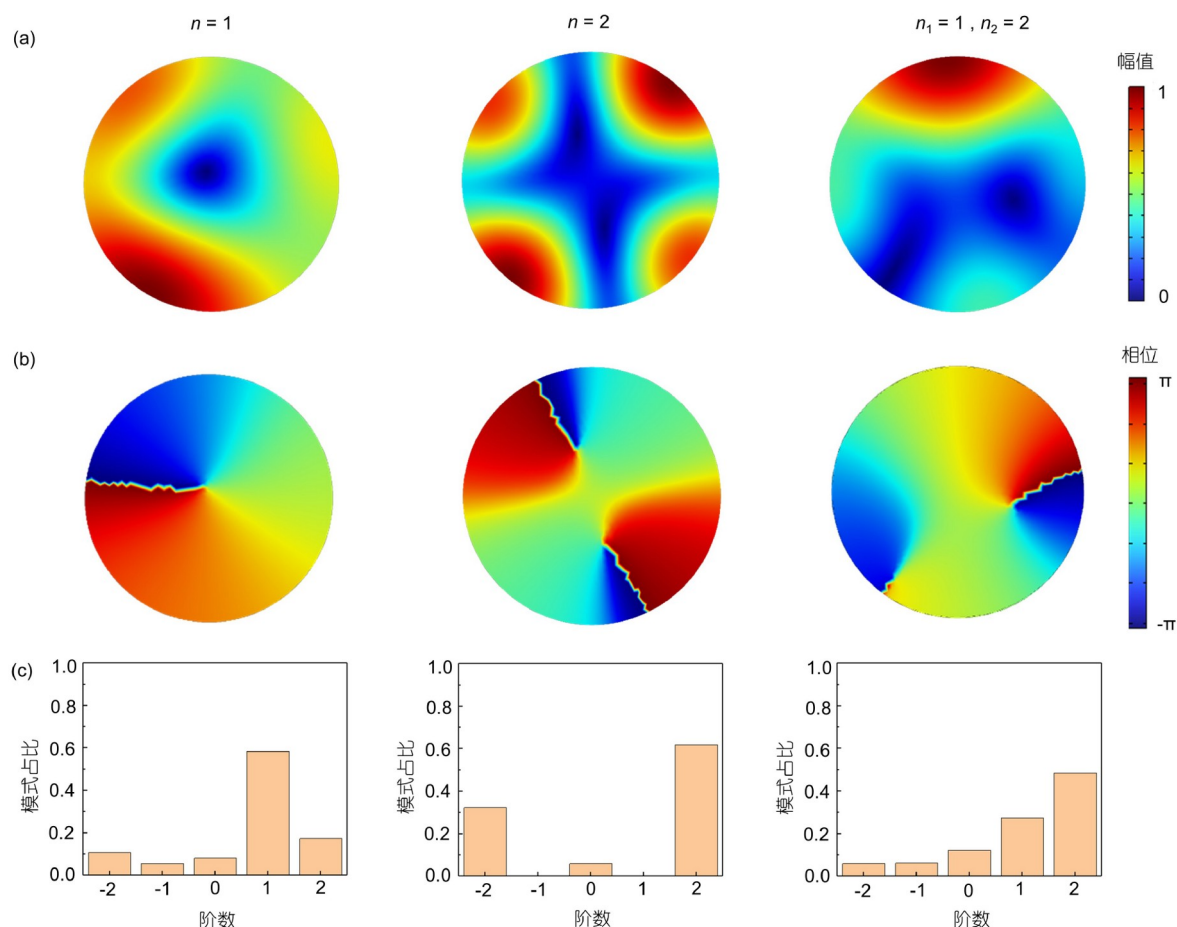


图 2 (网络版彩色)含气泡软媒质超表面在圆柱波导管内产生的单一阶涡旋束($n=1, n=2$)和复合涡旋束($n_1=1, n_2=2$). 距离超表面2.8倍波长处的归一化声压幅值分布(a)和相位分布(b)的数值仿真结果. (c) 根据式(3)计算得到的接收面上各阶涡旋模式的能量占比柱状图

Figure 2 (Color online) The generated single-mode vortex beams ($n=1, n=2$) as well as multiple-mode vortex beams ($n_1=1, n_2=2$) within cylindrical waveguides by metasurfaces consisting of bubble-containing soft media. Numerically simulated normalized amplitude (a) and phase distributions (b) of sound pressure at a distance of 2.8 wavelengths from the metasurface. (c) Histograms of energy proportions of different vortex modes on the receiving surface calculated by Eq. (3)

化目标函数即为目标阶数涡旋模式的能量占比 C_n ($n=1, 2$), 复合涡旋优化的目标函数需满足各阶能量占比最大且均匀, 本文将其设定为

$$C_{12} = -\text{abs} \left[\text{abs}(|I_1| - |I_2|) + \sum_{l \neq 1, 2} |I_l| \right], \quad (5)$$

目标函数的优化方向为最大化, 以保证一阶与二阶涡旋束的能量占比都趋于0.5, 即当 $C_{12} \rightarrow 0$ 时, $C_1 = C_2 = 0.5$. 3种不同初始参数和目标函数情况下的优化迭代过程如图4所示, 其中 C_n 是每个温度下的最优解, $C_{n\max}$ 是当前所有温度下的最优解. 可以看出, 经过35代的优化后, 结果收敛至最优, 其中 C_1 、 C_2 分别达到0.85和0.92, C_{12} 从-1.43提升至-0.49, 最终优化得到8个单元的等效

声速如表2.

为了展示这种基于模拟退火算法的超表面全局设计机制在产生高纯度水下声涡旋场方面的有效性, 我们用优化后的结构参数进行数值仿真验证, 结果如图5所示, 其中第一至三列分别为一阶($n=1$)、二阶($n=2$)及复合阶($n_1=1, n_2=2$)三种不同涡旋束产生情况的优化结果. 相较图2优化前的结果, 图5中优化后的涡旋场质量显著提升, 具体表现为优化后涡旋声场幅值分布沿角向的均一性明显提升, 零声压中心更靠近圆心区域, 且涡旋相位沿角向的梯度变化更加线性, 这些变化特征表明优化后的涡旋声场更加趋向理想的涡旋声场. 此外, 为了量化表征目标阶数模式系数的提升量, 图5(d)中给出了利用模拟退火算法优化后的涡旋模式占比

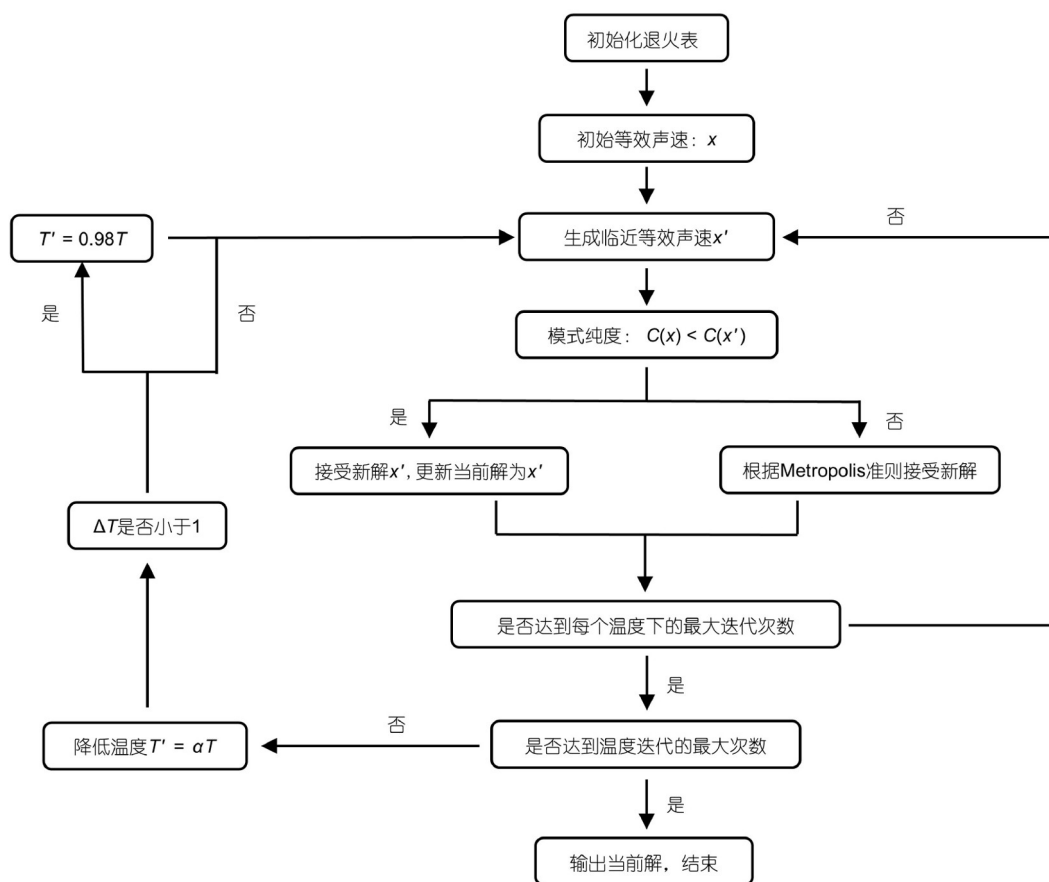


图3 基于模拟退火算法的涡旋模式纯度优化流程图, 其中优化参数为超表面8个结构单元的等效声速

Figure 3 Flowchart of vortex mode purity optimization based on the simulated annealing algorithm, wherein the optimization parameters are the equivalent sound speeds of the eight structural units of the metasurface

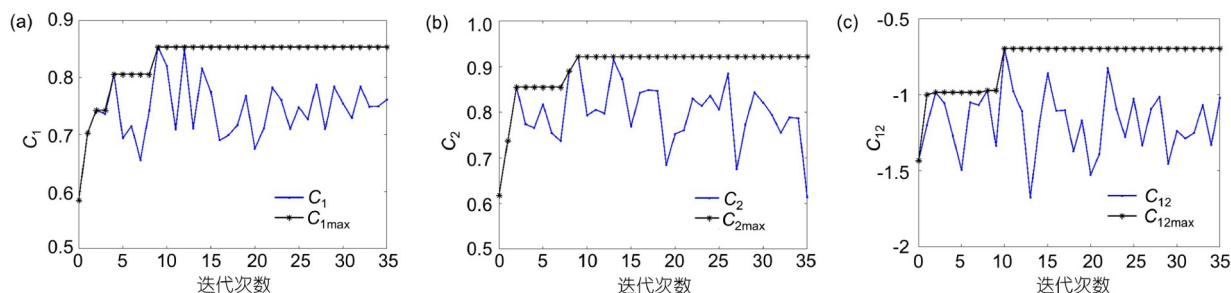


图4 (网络版彩色)3种不同初始参数和目标函数情况下的优化迭代过程, C_n 是每个温度下的最优解, C_{nmax} 是当前所有温度下的最优解. (a) 一阶涡旋束 ($n=1$); (b) 二阶涡旋束 ($n=2$); (c) 复合涡旋束 ($n_1=1, n_2=2$)

Figure 4 (Color online) Optimization iteration processes in cases of three different initial parameters and objective functions, where C_n represents the optimal solution at each temperature, and C_{nmax} represents the optimal solution across all temperatures. (a) First-order vortex beam ($n=1$); (b) second-order vortex beam ($n=2$); (c) composite vortex beam ($n_1=1, n_2=2$)

柱状图. 结果显示, 对于单阶涡旋声场产生的情况, 一阶和二阶模式系数由优化前的0.58和0.61提升至0.85和0.92, 而对于双模式复用涡旋声场产生的情况, 一阶与

二阶目标涡旋模式占比均达到了0.4左右. 上述结果表明本文提出的基于模拟退火算法的全局优化设计方法能够有效地解决由单元间耦合效应导致的涡旋模式不

表 2 优化后超表面8个结构单元所提供的等效声速(m/s)

Table 2 Equivalent sound speeds in the unit of m/s provided by the eight structural units of the metasurface after optimization (m/s)

阶数	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	c_7	c_8
一阶涡旋	282.00	292.85	310.27	358.74	477.03	594.89	688.39	771.88
二阶涡旋	765.87	524.42	286.24	240.51	765.87	524.42	286.24	240.51
复合涡旋	404.30	542.39	699.09	250.62	540.01	825.12	246.51	313.00

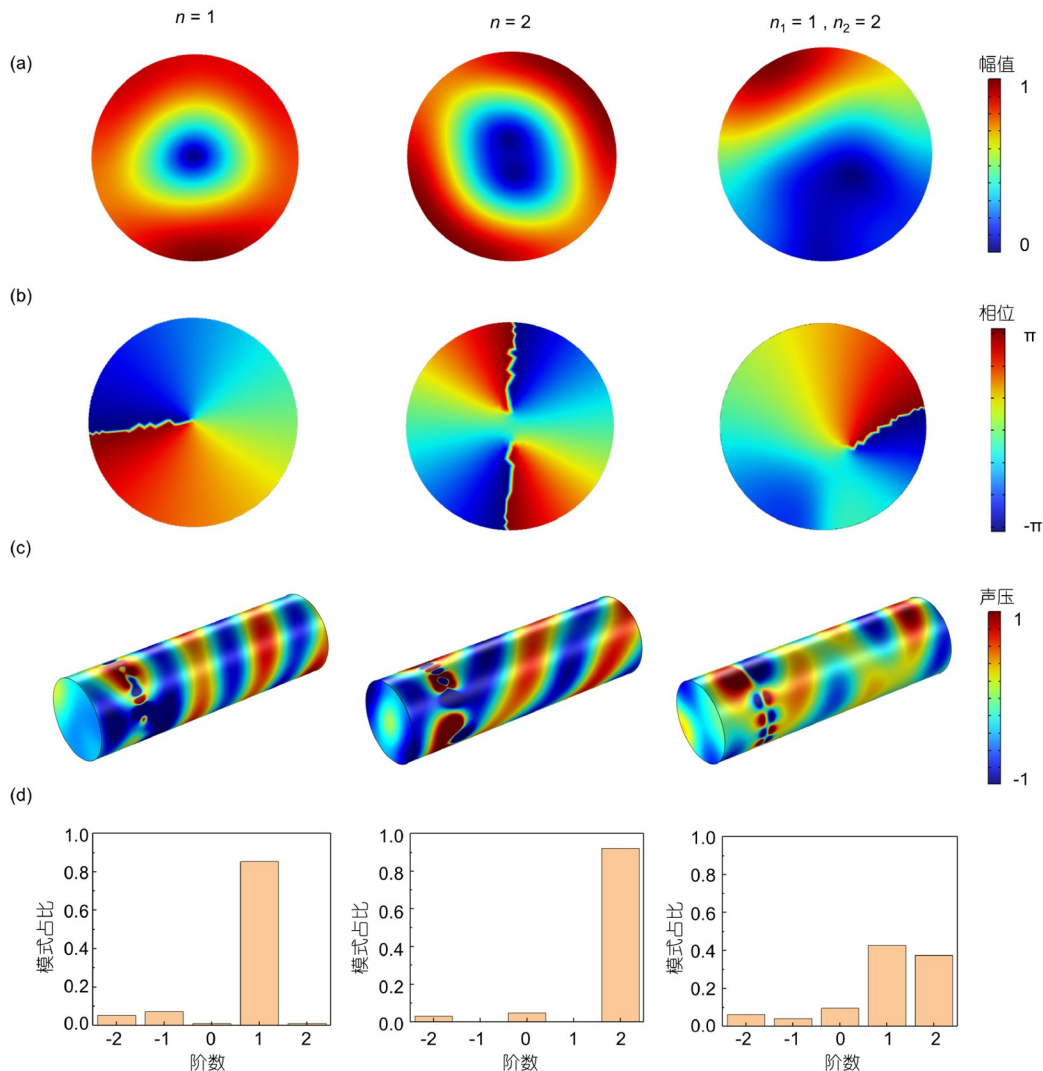


图 5 (网络版彩色)利用模拟退火算法全局优化后的超表面产生的单一阶涡旋束($n = 1, n = 2$)和复合涡旋束($n_1 = 1, n_2 = 2$). 距离超表面2.8倍波长处的归一化声压幅值分布(a)和相位分布(b)的数值仿真结果. (c) 圆柱波导管内的归一化三维声压场分布. (d) 根据式(3)计算得到的接收面上各阶涡旋模式的能量占比柱状图

Figure 5 (Color online) Single-mode vortex beams ($n = 1, n = 2$) as well as multiple-mode vortex beams ($n_1 = 1, n_2 = 2$) generated by optimized metasurfaces based on the simulated annealing algorithm. Numerically simulated normalized amplitude (a) and phase distributions (b) of sound pressure at a distance of 2.8 wavelengths from the metasurface. (c) Normalized three-dimensional sound pressure field distribution within the cylindrical waveguide. (d) Histograms of energy proportions of different vortex modes on the receiving surface calculated by Eq. (3)

纯净问题, 为水下高纯度涡旋声场产生提供了行之有效的实现方案. 需要说明的是, 虽然当前我们只演示了

单阶涡旋束产生和双阶涡旋复用等几种简单的情况, 但本质上该机制对涡旋的阶数和模式数并无限制, 可

以适用于更复杂的高阶、多模式复用的情况。此外,根据互易性原理,特定阶数的入射涡旋束经过此超表面后也会相应地降阶并转化为平面波,因此本机制也同样可以应用于涡旋束解调等场景。

4 结论

本文提出了一种基于模拟退火算法的含气泡软媒质超表面全局设计方法,用以实现水下高纯度的声涡旋产生。通过设计一种具有亚波长空间尺度和低声速特性的含气泡软媒质水下超材料,实现了对

水下声波传输相位的精准调控。利用模拟退火算法对由含气泡软媒质单元构成的圆形超表面进行全局优化设计,解决了由水下单元间的耦合效应导致的涡旋模式不纯净问题,并通过仿真模拟了高纯度的水下单一阶涡旋束与复合涡旋束产生,优化前后的结果对比验证了该机制能够有效地提高水下涡旋声场的纯度。这种基于优化算法设计的含气泡软媒质超表面为水下高质量涡旋声束产生提供了新思路,有望在声角动量通信、涡旋声粒子操控等领域产生实际应用。

参考文献

- 1 Hong Z Y, Zhang J, Drinkwater B W. Observation of orbital angular momentum transfer from bessel-shaped acoustic vortices to diphasic liquid-microparticle mixtures. *Phys Rev Lett*, 2015, 114: 214301
- 2 Zhang L. Reversals of orbital angular momentum transfer and radiation torque. *Phys Rev Appl*, 2018, 10: 034039
- 3 Jiang X, Liang B, Cheng J, et al. Twisted acoustics: Metasurface-enabled multiplexing and demultiplexing. *Adv Mater*, 2018, 30: 1800257
- 4 Wu K, Liu J J, Ding Y, et al. Metamaterial-based real-time communication with high information density by multipath twisting of acoustic wave. *Nat Commun*, 2022, 13: 5171
- 5 Hefner B T, Marston P L. An acoustical helicoidal wave transducer with applications for the alignment of ultrasonic and underwater systems. *J Acoust Soc Am*, 1999, 106: 3313–3316
- 6 Marchiano R, Thomas J L. Synthesis and analysis of linear and nonlinear acoustical vortices. *Phys Rev E*, 2005, 71: 066616
- 7 Assouar B, Liang B, Wu Y, et al. Acoustic metasurfaces. *Nat Rev Mater*, 2018, 3: 460–472
- 8 Dubois M, Shi C, Wang Y, et al. A thin and conformal metasurface for illusion acoustics of rapidly changing profiles. *Appl Phys Lett*, 2017, 110: 151902
- 9 Zhou H T, Fan S W, Li X S, et al. Tunable arc-shaped acoustic metasurface carpet cloak. *Smart Mater Struct*, 2020, 29: 065016
- 10 Zhu Y, Hu J, Fan X, et al. Fine manipulation of sound via lossy metamaterials with independent and arbitrary reflection amplitude and phase. *Nat Commun*, 2018, 9: 1632
- 11 Fan S W, Zhu Y, Cao L, et al. Broadband tunable lossy metasurface with independent amplitude and phase modulations for acoustic holography. *Smart Mater Struct*, 2020, 29: 105038
- 12 Hu C B, Liang B, Yang J, et al. Experimental demonstration of a three-dimensional omnidirectional and broadband acoustic concentrator using an anisotropic metamaterial. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2021, 64: 244304
- 13 Liu J, Liang B, Cheng J. Focusing a two-dimensional acoustic vortex beyond diffraction limit on an ultrathin structured surface. *Phys Rev Appl*, 2021, 15: 014015
- 14 Liu J, Wang W, Zhao C, et al. Static passive meta-sonar for dynamic sound beam scanning. *Sci Bull*, 2023, 68: 1862–1866
- 15 Chen Z J, Liu J J, Liang B, et al. Broadband cardiopulmonary auscultation device based on helical metamaterials (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2023, 68: 3472–3481 [陈政吉, 刘京京, 梁彬, 等. 基于螺旋形超材料的宽带心肺音听诊器件. 科学通报, 2023, 68: 3472–3481]
- 16 Lin Z B, Zhu S B, Peng Y G, et al. Design of functional ultra-thin ultrasonic planar meta-lens based on genetic algorithm (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2023, 68: 3464–3471 [林梓彬, 祝少博, 彭玉桂, 等. 基于遗传算法设计超薄超声平面透镜. 科学通报, 2023, 68: 3464–3471]
- 17 Wang W, Liu J, Liang B, et al. Controlling acoustic orbital angular momentum with artificial structures: From physics to application. *Chin Phys B*, 2022, 31: 094302
- 18 Guo Z, Liu H, Zhou H, et al. High-order acoustic vortex field generation based on a metasurface. *Phys Rev E*, 2019, 100: 053315
- 19 Fu Y, Shen C, Zhu X, et al. Sound vortex diffraction via topological charge in phase gradient metagratings. *Sci Adv*, 2020, 6: eaba9876
- 20 Jiang X, Li Y, Liang B, et al. Convert acoustic resonances to orbital angular momentum. *Phys Rev Lett*, 2016, 117: 034301
- 21 Liu J, Li Z, Ding Y, et al. Twisting linear to orbital angular momentum in an ultrasonic motor. *Adv Mater*, 2022, 34: 2201575
- 22 Wu K, Liu J J, Liang B, et al. Binary coding metasurface for broadband and flexible generation of acoustic vortex beams. *Appl Phys Lett*, 2023, 123: 211702
- 23 Jiang X, Zhao J, Liu S, et al. Broadband and stable acoustic vortex emitter with multi-arm coiling slits. *Appl Phys Lett*, 2016, 108: 203501

- 24 Allam A, Sabra K, Erturk A. 3D-printed gradient-index phononic crystal lens for underwater acoustic wave focusing. [Phys Rev Appl](#), 2020, 13: 064064
- 25 Dong E, Cao P, Zhang J, et al. Underwater acoustic metamaterials. [Natl Sci Rev](#), 2023, 10: nwac246
- 26 Smith D R, Pendry J B, Wiltshire M C K. Metamaterials and negative refractive index. [Science](#), 2004, 305: 788–792
- 27 Li J, Fok L, Yin X, et al. Experimental demonstration of an acoustic magnifying hyperlens. [Nat Mater](#), 2009, 8: 931–934
- 28 Liang B, Zou X, Cheng J. Effective medium method for sound propagation in a soft medium containing air bubbles. [J Acoust Soc Am](#), 2008, 124: 1419–1429
- 29 Qin B, Liang B, Zhu Z M, et al. Equivalent medium method for weakly compressible elastic materials containing bubbles (in Chinese). *Acta Acust*, 2007, (2): 110–115 [秦波, 梁彬, 朱哲民, 等. 含气泡弱可压缩弹性材料的等效媒质法. *声学学报*, 2007, (2): 110–115]
- 30 Liu J, Liang B, Yang J, et al. Generation of non-aliased two-dimensional acoustic vortex with enclosed metasurface. [Sci Rep](#), 2020, 10: 3827
- 31 Shi C, Dubois M, Wang Y, et al. High-speed acoustic communication by multiplexing orbital angular momentum. [Proc Natl Acad Sci USA](#), 2017, 114: 7250–7253
- 32 Delahaye D, Chaimatanan S, Mongeau M. Simulated annealing: From basics to applications. In: Gendreau M, Potvin J Y, eds. *Handbook of Metaheuristics*. Berlin: Springer, 2019. 1–35

Summary for “基于含气泡软媒质的高纯度水下声涡旋束产生”

Generating high-purity underwater acoustic vortex beam based on bubble-containing soft media

Rong Wang, Chengyu Zhao, Jingjing Liu^{*}, Bin Liang^{*} & Jianchun Cheng

School of Physics, Key Laboratory of Modern Acoustics of Ministry of Education, Collaborative Innovation Center of Advanced Microstructures, Nanjing University, Nanjing 210093, China

^{*} Corresponding authors, E-mail: liujingjing@nju.edu.cn; liangbin@nju.edu.cn

In recent years, vortex acoustic beams carrying orbital angular momentum have demonstrated pivotal application values in various scenarios spanning from acoustic communication to acoustic manipulation. However, the existing research about the vortex acoustic beam generation and manipulation mostly focuses on airborne acoustic. Despite recent advancements in the development of methods utilizing acoustic metamaterials to generate acoustic vortex fields in underwater environments, how to efficiently produce high-purity underwater vortex sound is still an immediate unresolved undertaking.

Here we propose and numerically demonstrate a method for the high-purity generation of underwater acoustic vortices based on bubble-containing soft media that is optimized through simulated annealing algorithm. An underwater metamaterial of bubble-containing soft media with slow sound speed characteristics is rationally designed to modulate the transmission phase of underwater sound wave precisely within subwavelength spatial dimension. Using the equivalent medium theory, we theoretically derive the relationship between the equivalent sound speed and structural parameters (bubble filling ratio) of the bubble-containing soft medium. Based on this, a single-layered ultra-thin acoustic metasurface is built to generate underwater acoustic vortices. Furthermore, an optimization method based on the simulated annealing algorithm is developed to inversely design the all structural parameters of the metasurface in a global way and address the problem of low vortex mode purity caused by unit coupling effects in underwater environments.

To validate the effectiveness of our designed underwater acoustic metasurface and the developed global optimization method, we numerically simulate the generation of single-mode vortex beams and multiple-mode vortex beams in an underwater waveguide system using a finite element method based on Comsol Multiphysics software. And the global optimization was performed using Comsol with MATLAB co-simulation software. The comparison between the results before and after optimization demonstrates significant improvements in terms of the quality of the generated vortex beam and mode purity. To be specific, the mode purity values of first-order and second-order modes in case of single-mode vortex generation increase from 0.58 and 0.61 to 0.85 and 0.92 respectively after optimization. And the improvement for the multiplexing case is also obvious. Although in the current study, we only demonstrate several simple examples of single-mode vortex beam generation and dual-mode vortex multiplexing, it is apparent that our mechanism is general and has no dependence on the order of vortex beams and mode number, ensuring its application in more complex systems calling for higher-order vortex generation or more-mode multiplexing. Besides, it can be further extended to other systems such as underwater free space.

In summary, the designed metasurface built by bubble-containing soft media and optimized by simulated annealing algorithm in our study can effectively generate high-purity underwater acoustic vortices. We anticipate such a metasurface with exceptional advantages in terms of compact size, high mode purity and simple configuration to find important applications in many diverse fields, such as underwater acoustic communication, particle manipulation, and beyond.

bubble-containing soft medium, underwater acoustic vortex beam, simulated annealing algorithm, acoustic metasurface, effective medium theory

doi: [10.1360/TB-2024-0673](https://doi.org/10.1360/TB-2024-0673)