

DOI:10.11784/tdxbz202308005

## 基于螺旋超材料的定向声传感装置的设计

李 想<sup>1</sup>, 李 健<sup>1</sup>, 李昱霖<sup>1</sup>, 赵云峰<sup>2</sup>, 郑健峰<sup>2</sup>, 黄新敬<sup>1</sup>

(1. 天津大学精密测试技术及仪器全国重点实验室, 天津 300072;

2. 国家管网集团北方管道有限责任公司, 廊坊 065000)

**摘要:** 传统定向声传感装置往往依赖于内部电路设计或多传感器复杂算法的方式压制特定方向的环境噪声以提高信号信噪比, 其具有较大的体积, 并且很难改变指向特性, 影响了在实际场景中的使用效果与普适性。基于螺旋超材料设计了一种可重配置的声学传感装置, 通过超单元的精巧设计与超结构的应用赋予了单麦克风声学系统良好的定向传感和频率筛选特性。该装置采用单叶片螺旋超单元实现独特频率和方向响应特性。根据声路与等效介质转换理论, 螺旋超材料具有周期性峰谷变化的频响特性。通过对螺距的调整, 在基频和倍频频段内设计出具有特定频率特性的超单元, 可控波长可达到自身长度的 15 倍。通过有限元仿真以及四传感器透射系数测量系统对超单元的频率透射特性进行了研究和测试, 实验结果证明了其峰值频率响应与理论模型相一致。进一步, 依据尺寸模型和多模型敏感角度分析, 提出了一套超结构的设计方案与实现方法, 并且具体制造了一种八角柱形超结构。分析了其中心测点处的声压变化与内外声压场, 结果表明: 在结构插槽内放入不同峰值频率的超单元, 将改变整个超结构的敏感频率; 重新排布超单元的排布顺序, 将实现超结构指向性的重构。采用自动旋转实验平台对超结构的指向性进行验证, 实验结果证明了超结构的定向传感性与仿真结果相一致, 并能够通过单元分布的简单重配置实现不同的定向声传感装置。本文提出的设计方法为构建高信噪比的可调定向声采集设备提供了新的可借鉴思路。

**关键词:** 声学指向性; 声学传感; 超材料; 超结构

中图分类号: TP212; TB935

文献标志码: A

文章编号: 0493-2137(2024)08-0877-13

## Design of a Directional Acoustic Sensing Device Based on Helical Metamaterials

Li Xiang<sup>1</sup>, Li Jian<sup>1</sup>, Li Yulin<sup>1</sup>, Zhao Yunfeng<sup>2</sup>, Zheng Jianfeng<sup>2</sup>, Huang Xinjing<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072,

China; 2. National Pipeline Network Group Northern Pipeline Company, Langfang 065000, China)

**Abstract:** Traditional directional acoustic sensing devices often rely on intricate internal circuit designs or multisensor complex algorithms to suppress ambient noise in a specific direction that improves the signal-to-noise ratio. However, these devices are large and difficult to adjust in terms of their directional characteristics, which can impact their effectiveness and universality in real-world situations. A new approach has been taken with the design of reconfigurable acoustic sensing devices based on helical metamaterials. This design enables a single-microphone acoustic system to have good directional sensing performance and frequency filtering characteristics, which achieved through the careful design of metaunits and the application of metastructures. By using single-blade helical metaunits, specific frequency and directional response characteristics can be attained. Drawing upon the theories of acoustic pathways and

收稿日期: 2023-08-08; 修回日期: 2023-11-06.

作者简介: 李 想 (1989—), 男, 博士研究生, 158218070@qq.com.

通信作者: 黄新敬, huangxinjing@tju.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62073233); 天津市自然科学基金资助项目(21JCQNJC00690); 国家管网集团北方管道公司科技项目(20210204).

**Supported by** the National Natural Science Foundation of China(No. 62073233), the Natural Science Foundation of Tianjin, China (No. 21JCQNJC00690), the National Pipeline Network Group Northern Pipeline Company Technology Project (No. 20210204).

effective medium conversion, the acoustic transmissions of helical metamaterials exhibit periodic peak-valley frequency response characteristics. The pitch can be adjusted to design a metaunit with unique frequency characteristics within the fundamental and octave frequency bands, allowing control of the acoustic wavelength up to 15 times its own length. Through finite element simulations and a set of four sensor transmittance measurement systems, the frequency transmission characteristics of metaunits were studied and tested. The experimental results showed consistency with theoretical models regarding peak frequency processes. Furthermore, based on size modeling and sensitive angle analysis, a set of structural design schemes and implementation methods were proposed, leading to the creation of an octagonal columnar metastructure. An examination of the pressure variation at the central probe point, along with the internal and external pressure fields of the metastructure, revealed that replacing different metaunits with peak frequencies adjusts the sensitivity frequency of the whole metastructure. Additionally, rearranging the order of the metaunits allows for the reconfiguration of the metastructure directivity. The directivities of the metastructures were verified by an automated rotating experimental platform. The results indicated that the directional sensing is consistent with simulation results and capable of realizing different directional acoustic sensing devices through simple reconfigurations of the metaunit distribution. The design methods of metastructures offer a fresh perspective for the construction of adjustable directional acoustic acquisition devices with high signal-to-noise ratios.

**Keywords:** acoustic directivity; acoustic sensing; metamaterial; metastructure

声学传感器具有广泛的应用场景,包括结构健康检测<sup>[1-3]</sup>、水下声学通信<sup>[4-5]</sup>、声纳探测<sup>[6-7]</sup>等。鉴于压制特定方位环境噪声以及提高信噪比的考虑,一些声学传感装置要求具有较好的定向传感能力。然而,传统的声学传感器需要通过电路与内部结构的复杂设计才能实现指向性可控。另外,为了提高传感信号的信噪比,装置往往依赖于多个传感器的布置和复杂算法<sup>[8-11]</sup>的实现。所以,目前声学传感装置很难通过低成本和简单的方式自由配置指向性,并获得特定频率敏感的高信噪比信号。

声学超材料的不断发展为实现具有灵活指向性的高性能声传感装置提供了实现路径。超材料可以在紧凑的体积下完成低频声波的精确控制,大大提高了对空气声波的操纵能力。通过结构的精巧构建,超材料的等效声学参数可以被设计为质量密度和弹性模量为正值、负值甚至为零。这些超材料的设计方法已经广泛地应用于隔声<sup>[12-14]</sup>、声学斗篷<sup>[15-16]</sup>、声学透镜<sup>[17-18]</sup>等领域,并取得了良好的效果。

在声学发射和传感指向性方面,研究人员进行了一些超材料的应用尝试。Jiang 等<sup>[19]</sup>通过阵列超材料实现了声辐射方向的旋转,并且证明了结构的宽频性能与辐射效能的独立性。Zhu 等<sup>[20]</sup>通过将超表面内封装声学硬核心的方式实现了 Mie 共振器,同时通过实验证明了 Mie 共振器的强烈激发可以增强声场强度并具有指向性。Chen 等<sup>[21]</sup>通过耦合渐进式与迷宫超结构的方式实现声源的定位检测,并且证明了该结构在低频频段的有效性。Sun 等<sup>[22]</sup>通过超材料实现了一套多声源听觉系统,结合压缩感知算法实现了声

源信号的重建以及定位。目前的研究成果说明了声学超材料在定向声传感研究的潜力,但大多数研究中超结构的体积较大,无法在紧凑体积下实现传感器的声学指向性调整。另外,超结构的设计灵活性受限,无法实现具有特定频率敏感特性的传感装置,这些严重影响了在实际场景中应用的效果与普适性。

本文设计了一种基于螺旋超材料的超单元,配合超结构可以将全向单传感器转变为具有明显指向性的定向声传感装置。更重要的是,该装置的频率敏感和指向性可以通过简单的配置快速调整,提高了声信号收集的双重抗扰能力。首先,本文将对螺旋超材料的声学特性进行研究,说明并验证超单元的对低频声波的峰谷传输特性。通过对螺距的调整,在基频和倍频频段内设计出具有特定频率特性的超单元。借助有限元仿真以及四传感器透射系数测量系统对超单元的频率透射特性进行了研究和测试。进一步,本文依据尺寸模型和多模型敏感角度分析,提出了一套超结构的设计方案与实现方法;制造了一种紧凑的八角柱形超结构,通过有限元仿真分析超结构腔体内外的声压场,说明其指向和频率敏感特性与超单元分布的关系;利用 3D 打印技术加工该结构主体与超单元组件。最后,搭建自动旋转实验平台,验证超结构具有良好的定向声收集及重配置能力。

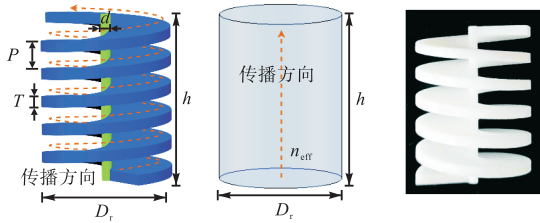
## 1 螺旋超材料声学特性与超单元设计

### 1.1 超单元设计

螺旋超材料是一种控制声传播路径的迷宫类结

构,其示意如图 1 所示.从图 1(a)中可以看出,螺旋超材料的结构主要由蓝色的螺旋叶片与绿色的中间支撑柱两部分构成,其中螺旋叶片部分将声学通路分割并引导声沿着橙色虚线的方向螺旋上升传播;中间的支撑柱保证整体结构的稳定性.

螺旋单元的几何结构由螺距  $P$ 、叶片厚度  $T$ 、高度  $h$ 、支撑柱直径  $d$  和螺旋叶片直径  $D_r$  决定.调节螺距  $P$  可有效改变螺旋传播路径的距离,进而调整超单元的等效参数.由于螺旋超单元的尺寸远远小于操纵声波的波长,所以可将其等效为一个同质超流体,其输入声波的等效传播路径如图 1(b)所示.



(a) 结构示意图 (b) 等效传播示意 (c) 结构照片

图 1 螺旋超材料示意

Fig.1 Schematic of a helical metamaterial

通过分析声波在超材料中沿螺旋上升与等效超流体中沿直线传播的路径,两者比值可得出螺旋超单元的等效折射率  $n_{\text{eff}}$  为

$$n_{\text{eff}} = \frac{\sqrt{(\pi D_e)^2 + P^2}}{P} \quad (1)$$

式中  $D_e$  为螺旋超单元的等效直径,对于  $D_r$  为 25 mm 的螺旋结构,取  $D_e = 0.4D_r$ .从等效介质的观点出发<sup>[23]</sup>,超单元的传输效率可由声波穿过超流体的等效模型进行推导,即

$$T_p = \frac{4}{4\cos^2 K_1 + K_2^2 \sin^2 K_1} \quad (2)$$

其中  $T_p$  为透射系数,  $K_1$  和  $K_2$  可分别表示为

$$K_1 = \frac{2\pi f}{c_0} n_{\text{eff}} h \quad (3)$$

$$K_2 = \frac{\rho_{\text{eff}}}{\rho_0 n_{\text{eff}}} + \frac{\rho_0 n_{\text{eff}}}{\rho_{\text{eff}}} \quad (4)$$

式中:  $f$  和  $c_0$  分别代表应用频率和空气声速;  $\rho_{\text{eff}}$  和  $\rho_0$  分别表示超流体的等效密度与空气密度.空气中声速与空气密度分别采用 343 m/s 和 1.21 kg/m<sup>3</sup>.当  $f$  不断变化时,传输效率将在峰值和谷值之间周期性地转化.求解等式(2)的极值,极值点的分布为

$$\frac{4\pi f_p}{c_0} n_{\text{eff}} h = 2N\pi \quad N = 1, 2, \dots \quad (5)$$

$$\frac{4\pi f_v}{c_0} n_{\text{eff}} h = (2N-1)\pi \quad N = 1, 2, \dots \quad (6)$$

传输的峰值和谷值与结构的法布里-珀罗共振模式相关,分别采用  $f_p$  与  $f_v$  表示传输效率峰值和谷值发生时的频率.当等式(5)和(6)成立时,分别得到传输效率的最大值和最小值,并且可知最大值时的传输效率为 100%.通过变换式(3)获得  $f_p$  与  $n_{\text{eff}}$  的关系为

$$n_{\text{eff}} = \frac{c_0}{2f_p h} N \quad N = 1, 2, \dots \quad (7)$$

式中:当  $N=1$  时,称此时的  $f_p$  为超单元的基频峰值频率;当  $N>1$  时,称此时的  $f_p$  为超单元的倍频峰值频率.联立式(1)和式(7),可以得到螺距与峰值频率的关系为

$$f_p = \frac{P c_0}{2\sqrt{(\pi D_e)^2 + P^2} h} N \quad N = 1, 2, \dots \quad (8)$$

通过式(8)可以看出透射峰值频率完全取决于超单元结构的几何参数,并且峰值分布具有周期性.另外,也可以通过峰值频率反推出超单元螺距  $P$  的值来设计特定的超单元,即

$$P = \frac{2h\pi D_e f_p}{\sqrt{N c_0^2 - 4(h f_p)^2}} \quad N = 1, 2, \dots \quad (9)$$

本文设计了 8 种螺距不同的螺旋超单元,分别用超单元 A~H 来命名.所有超单元的  $T$ 、 $d$ 、 $D_r$ 、 $h$  参数具有相同的值,分别为 2 mm、2 mm、25 mm、30 mm.8 种超单元的螺距为等差数列,公差为 0.45 mm,具体如表 1 所示.

表 1 8 种超单元的螺距

Tab.1 Pitches of eight types of metaunits

超单元	螺距/mm
A	4.00
B	4.45
C	4.90
D	5.35
E	5.80
F	6.25
G	6.70
H	7.15

超单元 C 的照片如图 1(c)所示,其采用 3D 打印光敏树脂制造而成.由于空气与材料之间密度相差很大,可以认为声在硬边界范围内传播,并忽略声固耦合作用影响.这里需要说明的是,本文使用的螺旋单元与传统的结构不同<sup>[24]</sup>,采用了一种单叶片螺旋超材料<sup>[25-26]</sup>.这种设计可以避免在螺距较小时,由于空隙太小而导致打印叶片产生粘连,并且易于清理螺旋缝隙内必要的额外支撑部分.所以,螺距具有

更宽的设计范围.

### 1.2 超单元特性的仿真与实验

采用有限元仿真软件 COMSOL 验证 8 种超单元的声学性能, 观察并分析传输声场与峰值频率. 仿真设置如图 2 所示, 1 Pa 的声场由左侧传入, 并穿过超单元从右侧传出. 在仿真边界条件设置上, 管壁和螺旋部分均是声学硬边界, 而两端采用辐射边界条

件, 避免了反射带来的影响. 图 2 中分别展示了 710 Hz 和 794 Hz 下, 输入声波分别穿过超单元 A 和 B 时的传输声场. 可以看到传出声场稳定保持在 1 Pa, 说明峰值频率处的传输效率接近 100%. 另外, 在左侧插图中展示了法布里-珀罗共振发生时超单元内部的详细声场分布.

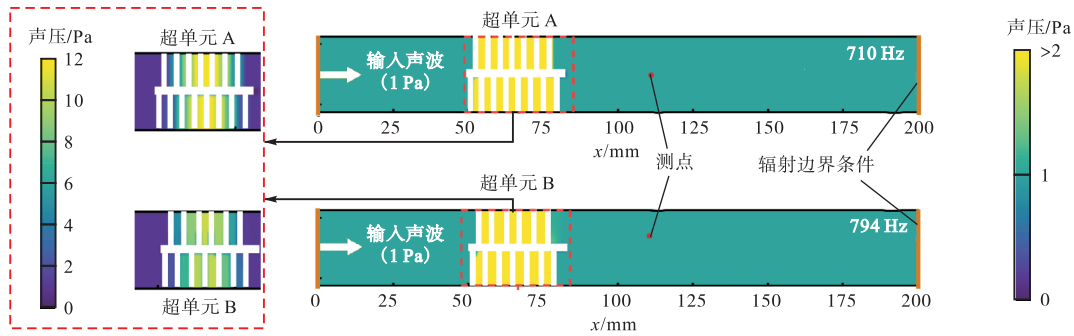


图 2 仿真设置与传输声场

Fig.2 Simulation setup and acoustic transmission fields

对 8 种超单元 A ~ H 在基频区间的透射传播进行扫频仿真, 比较超单元传输效率的频率响应特性. 同时, 提取了 110 mm 处的测点声压, 其位置如图 2 中所示. 从图 3 中可以看出, 在基频段内, 每种超单元都具有峰-谷的频率响应模式, 峰值点处透射系数接近 1.0(透射率 100%), 谷值点处均在 0.4 以下.

倍频峰值响应频率 2 075 Hz 接近. 所以, 在倍频频段内应用超单元时, 要区分使用传输峰值频率接近的单元.

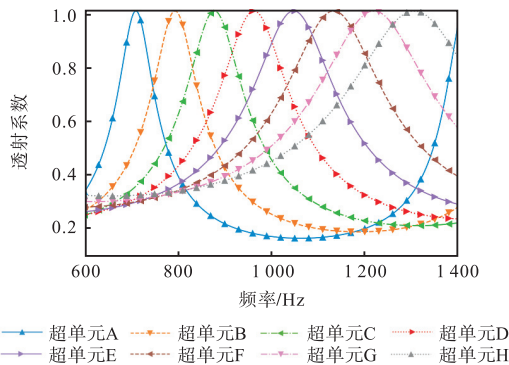


图 3 超单元基频区间透射系数

Fig.3 Transmittance coefficient of metaunits in the base frequency range

同样地, 为了验证超单元在倍频区间的峰值响应特性 ( $N > 1$ ), 进行了扫频仿真并提取测点声压. 从图 4 中可以看出, 在倍频区间范围内, 超单元同样具有良好的峰-谷值响应曲线. 其峰值频率与基频基本成倍数关系, 峰值点处透射系数也接近 1.0(透射率 100%). 值得注意的是, 倍频区间内不同超单元的响应峰值可能会出现非常接近的情况, 例如超单元 A 的 3 倍频响应峰值频率为 2 102 Hz, 与超单元 E 的 2

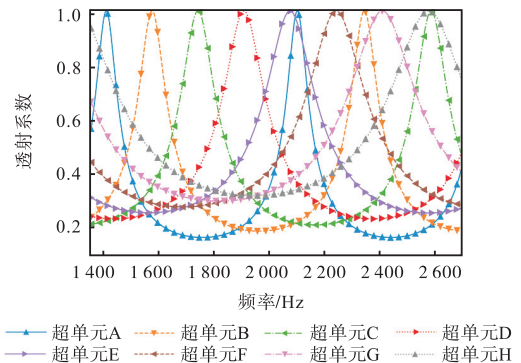


图 4 超单元倍频区间透射系数

Fig.4 Transmittance coefficient of metaunits in the octave frequency range

为了验证超单元的频率响应实际效果, 搭建了如图 5(a) 所示的实验系统. 该装置可以通过同步采集 4 个声传感器的信号, 分析样品管内超单元的透射系数. 首先, 在样品管内分别放入超单元, 然后将各部件使用弹簧紧固夹具固定, 保证内部的声信号不会受到外部干扰并减小声泄露. 信号发生/功率放大器驱动扬声器端内的喇叭播放固定频率的正弦信号, 在正常测量前先播放 10 min, 保证其工作稳定. 测定管内的温度, 并估算管中的声速, 其公式为

$$c_0 = 343.2\sqrt{T_U / 293} \tag{10}$$

式中  $T_U$  为管内温度, K. 同时, 保证测量时管内的背

景噪声要比信号低 10 dB. 准备工作完成后, 调节至需要测量的信号频率, 通过采集卡同时采集 4 路传感信号, 并发送至电脑进行记录、分析. 不断重复上述流程并测量超单元在一个频率区间内的传输效率.

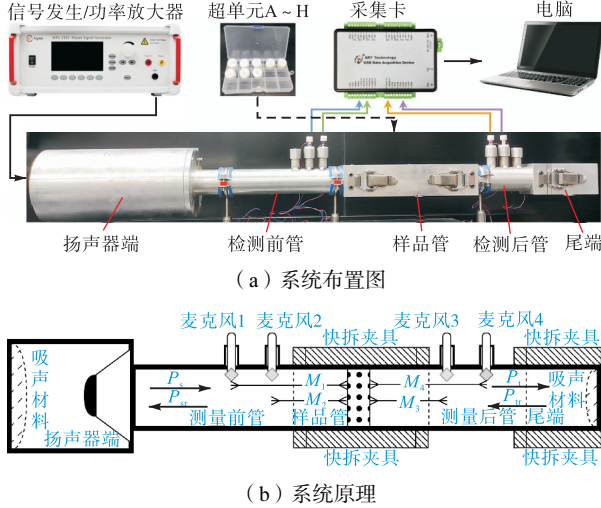


图 5 超单元透射系数测量系统

Fig.5 Transmittance coefficient measurement system of the metaunit

图 5(b) 中展示了本套测量系统的原理, 通过对管内声波传播过程的分析, 不同传感器位置处声压变化可分别表示为

$$P_1 = P_s e^{jkM_1} + P_{sr} e^{-jkM_1} \quad (11)$$

$$P_2 = P_s e^{jkM_2} + P_{sr} e^{-jkM_2} \quad (12)$$

$$P_3 = P_t e^{-jkM_3} + P_{tr} e^{jkM_3} \quad (13)$$

$$P_4 = P_t e^{-jkM_4} + P_{tr} e^{jkM_4} \quad (14)$$

式中:  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$ 、 $P_4$  分别为传感器 1、2、3、4 处的声压;  $P_s$  和  $P_{sr}$  分别为超单元前表面的传入声压幅值和反射声压幅值;  $P_t$  和  $P_{tr}$  分别为超单元后表面的传出声压幅值和反射声压幅值;  $M_1$ 、 $M_2$ 、 $M_3$ 、 $M_4$  分别为传感器 1、2、3、4 到超单元前后表面的距离;  $k = 2\pi f/c_0$ ,  $f$  为应用频率. 根据式 (11) ~ 式 (14) 可以求得透射系数  $T_p$  为

$$T_p = \frac{\sin[k(M_1 - M_2)]}{\sin[k(M_4 - M_3)]} \frac{A_3 e^{j\omega\Delta t_3} e^{jk(M_4 - M_3)} - A_4 e^{j\omega\Delta t_4}}{A_1 - A_2 e^{j\omega\Delta t_2} e^{-jk(M_1 - M_2)}} e^{jk(M_2 + M_3)} \quad (15)$$

式中  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$ 、 $A_4$  为对应麦克风的声压幅值. 对于位置不同的 4 个麦克风, 可将麦克风 1 作为基准, 并采用相位差的形式表示其余相位. 4 个麦克风相对相位分别为  $0$ 、 $\omega\Delta t_2$ 、 $\omega\Delta t_3$ 、 $\omega\Delta t_4$ . 由采集卡同步采集的 4 个麦克风的信号, 通过互谱的方式分别获取麦克风 2、3、4 与麦克风 1 的差值, 最终由式 (15) 获得超单元的透射系数.

采用上述系统对超单元 E 和 G 峰值频率周边区间进行透射系数的测定实验, 实验结果如图 6 所示. 从结果可以看出, 在宽频范围内超单元具有单峰, 超单元 E 的峰值频率为 1062 Hz, 峰值透射系数达到 0.8. 更换为超单元 G 后, 透射峰值频率为 1204 Hz. 测定峰值非常接近于仿真和模型得到的结果, 这证明了超单元对于特定频率的声波具有高透射能力, 调整螺距  $P$  可以有效实现峰值频率的转换.

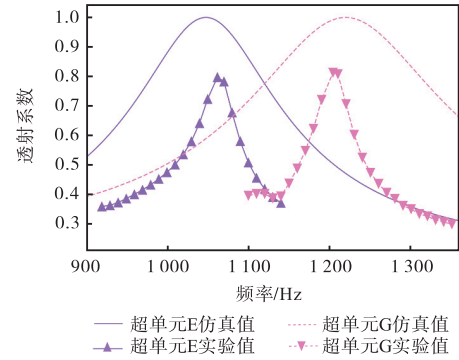


图 6 超单元 E 和 G 的基频区间透射系数

Fig.6 Transmittance coefficient of metaunits E and G in the base frequency range

另外, 对超单元 G 在倍频峰值频率周边区间进行透射系数的测定实验. 如图 7 所示, 仿真峰值频率为 2408 Hz, 实验测定峰值频率为 2420 Hz, 非常接近. 说明了提出的超单元设计和实现方法在倍频区间的准确性. 值得注意的是, 实验透射系数未达到仿真中的峰值透射系数, 这主要是因为超单元的制造误差以及热黏滞效应的作用. 但这并不影响本文应用该超单元的两种特性: 第一是在设计的特定频率具有高透射系数; 第二是通过单一尺寸的调整(螺距)实现峰值透射系数的可调, 所以不会影响应用于超结构后其灵活的定向传感调整能力.

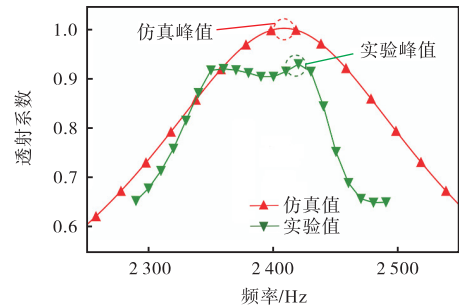


图 7 超单元 G 的倍频区间透射系数

Fig.7 Transmittance coefficient of metaunit G in the octave frequency range

另外, 为了验证 8 种超单元频率响应的符合程度, 应用上述测试系统获取超单元 A ~ H 的基频峰值

频率. 表 2 中对比了计算值、仿真值和实验值的结果. 从结果可以看出实验数据与仿真值、计算值的预测值差距很小, 证明了理论模型的正确性.

表 2 不同超单元峰值频率比较

Tab.2 Comparison of peak frequency between different metaunits

超单元	仿真值/Hz	计算值/Hz	实验值/Hz
A	710	722	693
B	794	802	804
C	878	881	856
D	963	960	962
E	1 048	1 038	1 062
F	1 133	1 115	1 155
G	1 219	1 192	1 204
H	1 306	1 269	1 313

超单元的长度为 30 mm, 但其对基频和倍频频段的声波均表现出良好的控制性能, 可以操控的声波 (710 Hz) 波长是其自身长度的 15 倍以上. 所以, 将单螺旋超单元应用于定向传感的装置时可以大大缩小体积.

综上所述, 螺旋超单元在深亚波长尺度具有良好的峰-谷频率响应特性与周期性, 并且通过调整螺距可自由设定峰值频率.

## 2 超结构设计与其特性改变

### 2.1 超结构设计方法

根据超单元频率响应的峰-谷特性, 本文设计了一种指向性可调的超结构. 超结构为正多边形柱体, 其内部具有一空腔用于放置声学传感器. 另外, 结构的外壁有开槽的设计, 用于插入对应单元. 图 8 中展示了多边形柱形结构截面局部示意, 其中内部多边形的边长为  $S_i$ , 单元插槽的长度为  $L_0$ , 外部多边形的外接圆半径为  $r$ .

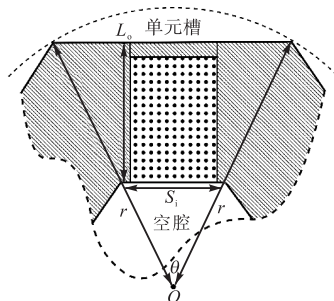


图 8 多边形柱形结构截面局部示意

Fig.8 Localized schematic of the polygonal columnar structure section

对于边数为  $n$  的正多边形,  $\theta = 360^\circ/n$  代表边对应的中心角. 根据尺寸之间的几何关系, 其直径  $R$  表

示为

$$R = 2r = \frac{S_i}{\sin(\theta/2)} + \frac{2L_0}{\cos(\theta/2)} \quad (16)$$

对于应用的超单元 A ~ H, 设定  $S_i = 29 \text{ mm}$ ,  $L_0 = 35 \text{ mm}$ . 图 9 中显示了正三角至正十一边形时对应的外接圆直径. 多边形的边数大于 5 时, 外接圆直径为单向递增的趋势.

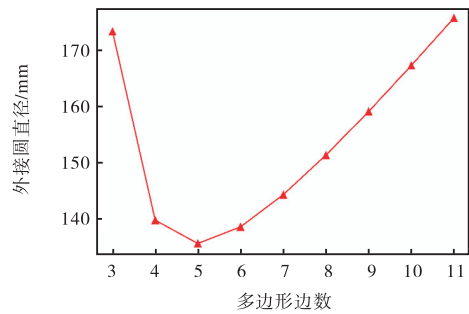
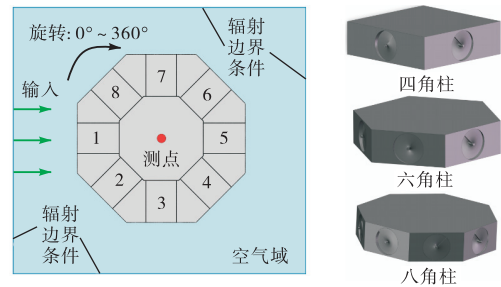


图 9 边数与外接圆直径的关系

Fig.9 Relationship between the number of sides and the diameter of the outer circle

另一方面, 多边形柱体的面数影响调控角度的精细程度. 仿真示意如图 10(a) 所示, 在空气域内放入超结构, 声波从左侧传入. 不断旋转中间的超结构, 获取中间空腔内测点处的声压, 最终取得超结构的声压方向响应雷达图. 需要注意的是, 四周边界均为辐射边界条件来消除反射带来的影响.



(a) 超结构方向响应仿真示意 (b) 不同柱形超结构

图 10 多边形柱形超结构方向响应的仿真示意

Fig.10 Simulation schematic of the directional response of the polygonal columnar metastructure

为了测定超单元数量对于响应角度的影响, 逐渐增加超单元的使用数量, 而在其他位置封闭插孔. 例如: 对于八角柱形超结构, 分别在位置 1, 位置 1、2、8, 位置 1、2、3、7、8... 放置超单元 C, 进行峰值频率测点处声压响应的仿真. 进一步, 使用上述仿真方法分别对图 10(b) 所示的 3 种柱形的超结构进行分析. 图 11(a)、(b)、(c) 分别展示了四角柱形、六角柱形和八角柱形超结构的归一化声压响应雷达图. 可以看出随着单元数量的增加高响应的角度范围也在

不断增加,当所有插槽内都放入超单元时,超结构转为了全向响应的声收集装置.

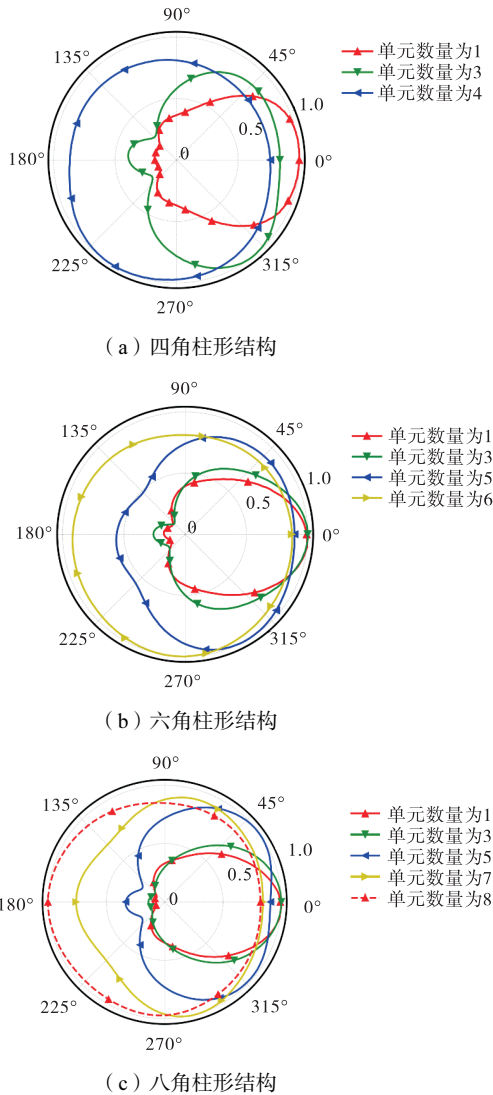


图 11 不同柱形超结构的声压响应雷达图

Fig.11 Acoustic pressure response radars for different columnar metastructures

为了比较不同类型柱体超结构在应用单元个数增多时其响应角度调节的精细程度. 设定高于峰值响应 70% 的区域为特征响应角度,其覆盖角度范围如图 12 所示. 可以看出,随着多边形柱体面数的增加超结构对于特征响应角度控制的精细程度是逐步增加的. 也就是说,多边形柱体面数越多,其定向信号收集能力的可控性越高.

综上所述,多边形超结构的设计是考虑大小和角度响应调节能力两方面后确定的. 所以,在应用本文的结构实现特定频段的声收集装置时,应该首先根据式(9)确定超单元的尺寸. 进而,根据式(16)确定超结构的尺寸范围,在此基础上尽量选择面数更多超结构,以获取到更好的调节能力和控制性.

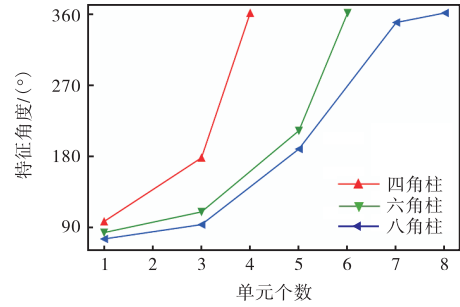


图 12 不同柱体的特征角度范围

Fig.12 Feature angle ranges for different columns

### 2.2 八角柱形超结构

本文将构造由超单元 C、E、G 组成的并应用于其倍频峰值频段的一种超结构声收集装置. 对比 3 种单元峰值频率声波的波长,分别为 197 mm、165 mm、142 mm,设计的超结构应在接近或小于波长的紧凑尺寸下实现低频声波的可变指向性控制. 根据超结构的设计方法,完成了一种八角柱形超结构. 如图 13(a)所示,主要由上顶盖、下底盖、声孔塞以及超单元构成. 上顶盖与下底盖为对称结构,唯一的区别是上顶盖中间有一个探孔,用于放置麦克风收集信号. 需要说明的是,探孔应具有较小的直径,保证到达中心腔体的声波主要经侧面放置超单元的插槽传入.

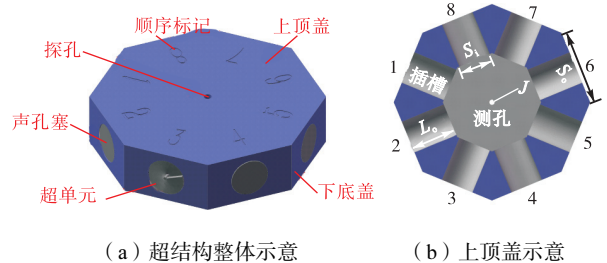


图 13 超结构的尺寸示意

Fig.13 Dimensional schematic of the metastructure

为了使超结构完全容纳超单元,并且保障 3D 打印后结构的稳定性. 根据设计方法确定的几何参数,在如图 13(b)中进行了标注,其中单元插槽直径、正八边形边长、插槽长度、麦克风探孔直径分别由  $S_i$ 、 $S_o$ 、 $L_o$  和  $J$  表示. 具体数值如表 3 所示,并且插槽顺序按照图 13 中 1~8 标记排列.

表 3 超结构参数

参数名称和符号	取值/mm
插槽直径 $S_i$	25
正八边形边长 $S_o$	58
插槽长度 $L_o$	35
麦克风探孔直径 $J$	4

插槽中可以放置的单元包括声孔塞和超单元两种. 声孔塞隔绝了外部声场的传入而超单元改变了腔体内部声场的响应模式. 为了测试超结构的声学特性, 设计了如图 14 中所示的两种超结构分布方案. 如果将放置声孔塞和超单元的插槽分别以字符“0”和“1”表示, 则结构 1 和结构 2 可分别简化为序列“00100110”和“00001110”. 可以看出, 将结构分布 1 变换为分布 2 仅需要交换序列中 3 和 5 的位置.

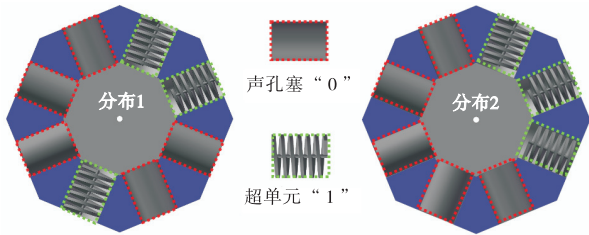
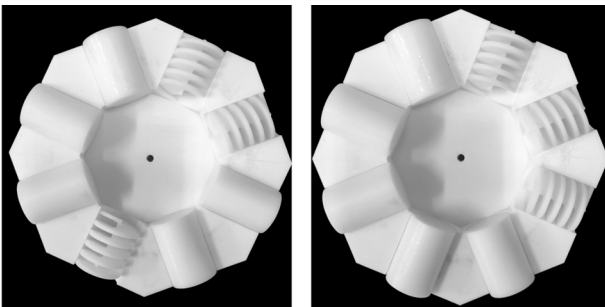


图 14 超结构分布与序列表示

Fig.14 Distributions and sequence representation of the metastructures

改变该超结构整体性质的方法如下. 调整内部单元的排列顺序实现装置指向性的改变, 例如将分布 1 转换为分布 2; 替换插槽内的超单元实现频率敏感特性的改变, 例如将超单元 C 换成超单元 E. 另外, 指向性区间范围也可以通过增减两种单元的数量实现. 最终, 采用光敏树脂材料 3D 打印了上顶盖、下底盖、声孔塞和 8 种类型的超单元, 并按照两种分布进行配置, 分布 1 和分布 2 的实物照片分别如图 15(a) 和 (b) 所示.



(a) 分布 1 (b) 分布 2

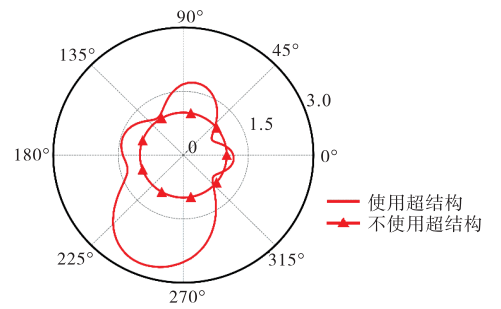
图 15 超结构实物照片

Fig.15 Photos of the metastructure samples

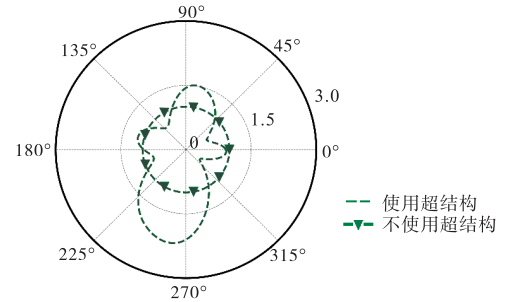
### 2.3 超结构性能仿真

为了说明两种超结构分布的声定向传感与频率敏感特性, 采用图 10(a) 的仿真方法, 测得超结构运用分布 1 时, 中心测点不同角度的声压响应. 图 16(a)、(b) 和 (c) 分别展示了超结构分布 1 应用超单元 C、E、G 在二倍峰值频率为 1 740 Hz、2 063 Hz 和 2 377 Hz 时的声压响应雷达图, 并对比同频但不使用

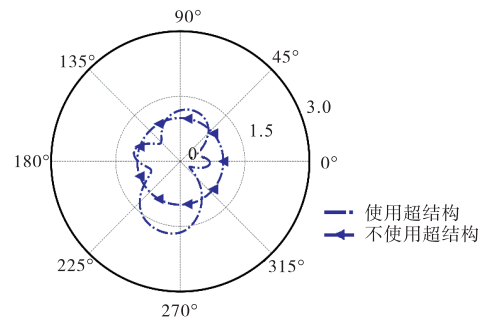
超结构的声压响应.



(a) 超单元 C



(b) 超单元 E



(c) 超单元 G

图 16 分布 1 时峰值频率声压响应雷达图

Fig.16 Peak frequency radars of the acoustic pressure response at distribution 1

可以看出, 不使用超结构时测点具有相同的全向声响应. 应用超结构时, 声信号表现出明显的指向性特征, 且指向形状、幅值与插槽内的超单元分布方式密切相关. 由于分布 1 的超单元放置在位置 3、6 和 7, 所以当旋转角度在 90° 和 270° 附近时, 具有更高的声压幅值, 达到了增强特定方向信号的目的.

由于超单元具有频率敏感特性, 仅当传入声场为对应峰值频率时测点处具有较高声压. 观察图 17 可以看出: 超单元 C 在 2 063 Hz 和 2 377 Hz、超单元 E 在 1 740 Hz 和 2 377 Hz、超单元 G 在 1 740 Hz 和 2 063 Hz 下均具有较低的声压. 对比图 16 中的频率响应峰值, 超结构在非峰值频率时所有方向声压响应均不强, 在敏感角度时其幅值不足敏感峰值频率幅值的 1/8.

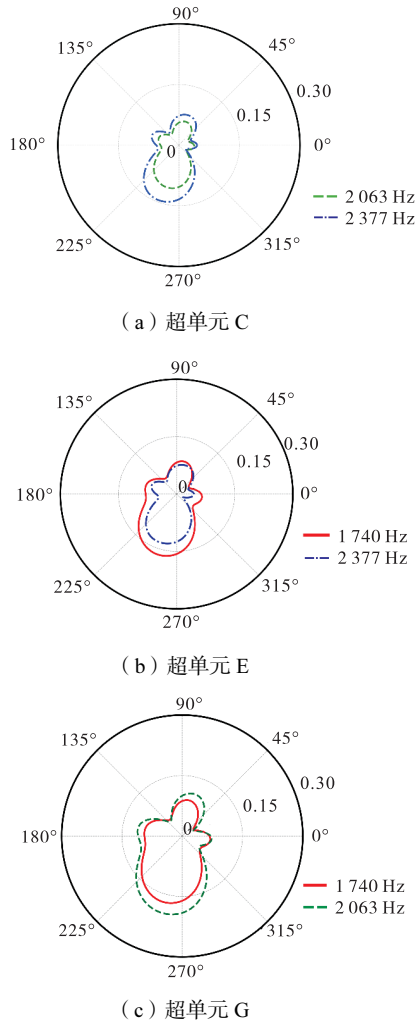


图 17 分布 1 时非峰值频率声压响应雷达图

Fig.17 Nonpeak frequency radars of the acoustic pressure response at distribution 1

为了进一步比较超结构对于声场的影响,图 18 中展示了 1 740 Hz 频率下结构腔体内外空气域的响应声场与横纵截线上的声压分布.可以看出,由于超结构放入了单元 C,声波可以透过超单元并在腔体内部表现出高声压响应;图 19 和图 20 分别展示了 2 063 Hz 和 2 377 Hz 的声波输入时腔体内外声压场与横纵截线声压分布.可以看出,大部分声波被超结构隔绝了,其内部腔体声场幅值较小,而外部空气域的超单元入口处声场幅值较高.这说明非峰值周边频率的声波难以穿透超结构到达内部,而是反射了大部分的声波.同时,对比图 18 ~ 图 20 中横纵截线上的声压分布,可以看出,峰值频率对应幅值一直处于高位,而非峰值频率时幅值在低位浮动.

在分布 1 情况下将超单元 C 替换为超单元 E,结构腔体内部和外部空气域声场分布将完全改变.在 2 063 Hz 时声波可以通过超单元进入结构内部,获得近似图 18(a)的声场;1 740 Hz 和 2 377 Hz 的声波隔

绝在外结构之外,分别获得近似图 19 (a)和图 20 (a)的声场.

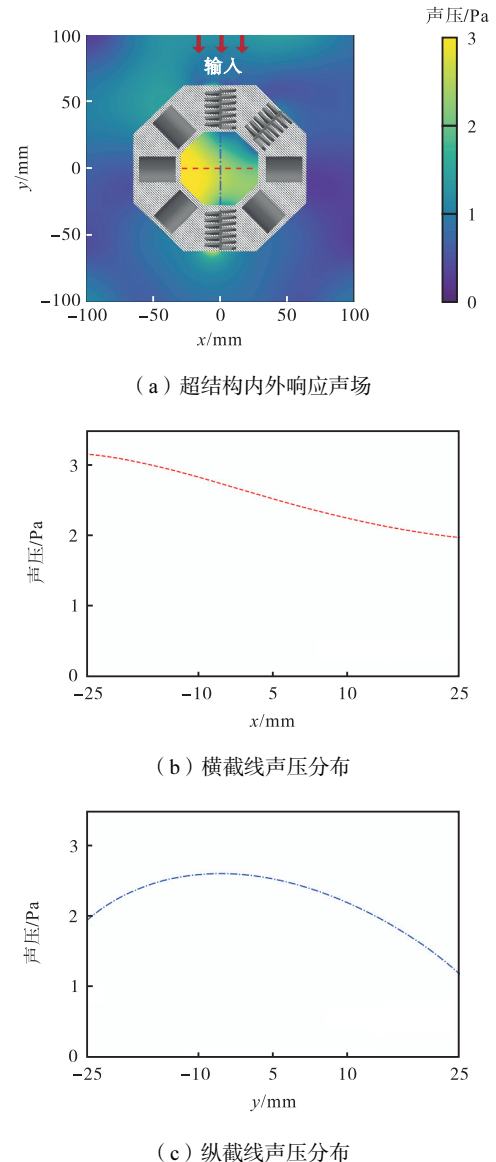
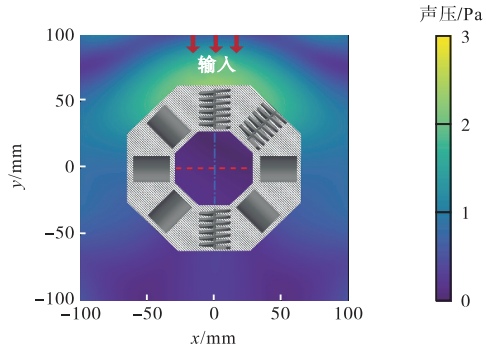


图 18 1 740 Hz 时超结构内部沿截线声压

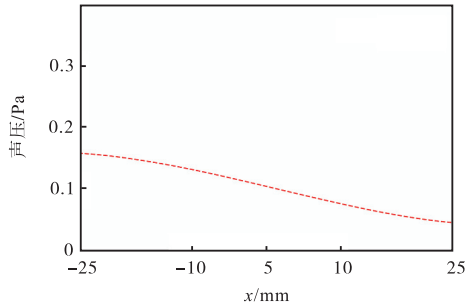
Fig.18 Acoustic pressure along the cross-sectional line inside the metastructure at 1 740 Hz

图 21 中展示了超结构分布 2 分别运用超单元 C、E 和 G 在 1 740 Hz、2 063 Hz 和 2 377 Hz 时的声压响应雷达图.同样地,对比不使用超结构的全向响应特征,超结构增强了在特定方向的敏感性.并且,当分布 1 转变为分布 2 时,装置的定向传感特征完全发生了改变.其指向性曲线呈现水滴型,输入角度为 90°时不再具有高声压,270°时取得最大值.

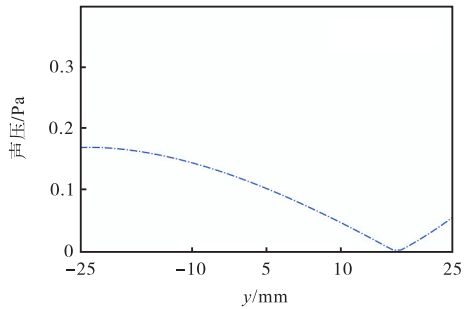
更重要的是,分布 1 到分布 2 仅仅需要交换位置 3 和 5 对应的声孔塞和超单元.所以,通过廉价和高效的方式就彻底改变了整个装置的指向性能,本文提出的超结构具有灵活的定向传感调整能力.



(a) 超结构内外响应声场



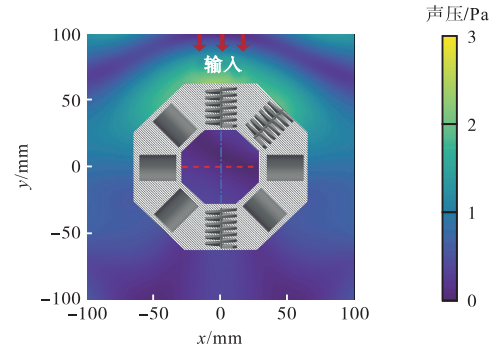
(b) 横截线声压分布



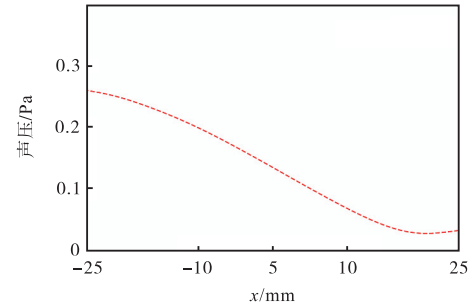
(c) 纵截线声压分布

图 19 2 063 Hz 时超结构内部沿截线声压

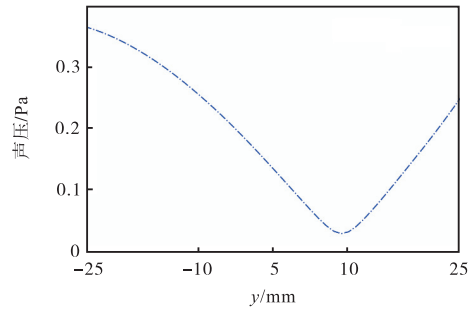
Fig.19 Acoustic pressure along the cross-sectional line inside the metastructure at 2 063 Hz



(a) 超结构内外响应声场



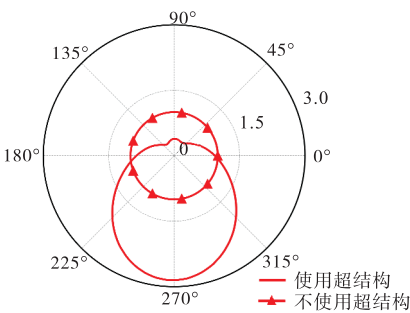
(b) 横截线声压分布



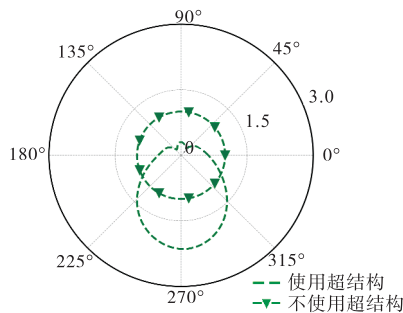
(c) 纵截线声压分布

图 20 2 377 Hz 时超结构内部沿截线声压

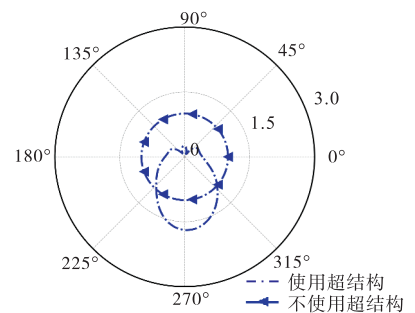
Fig.20 Acoustic pressure along the cross-sectional line inside the metastructure at 2 377 Hz



(a) 超单元 C



(b) 超单元 E



(c) 超单元 G

图 21 分布 2 时峰值频率声压响应雷达图

Fig.21 Peak frequency radars of the acoustic pressure response at distribution 2

综上所述,超结构能够明显转变全向单传感器的指向特性,并且指向性的分布与超单元的排布高度相关.另外,超结构具有高度的频率敏感性,在特定宽频段内,仅在对应单元的峰值频率处腔体内的声场响应强.

### 3 超结构实验

为了实际验证本文提出的超结构的定向传感性能及其调整能力,设计了一套旋转实验平台,如图 22

所示. 声源在固定位置发射声波, 在较远位置发射的声波传输至超结构时可近似为平面波. 扬声器连接至功率放大器, 其播放内容为信号发生器产生的特定频率正弦波.

根据分布 1 或 2 的排布, 将声孔塞与超单元放入对应位置的插槽内, 并将其放置在电动转盘上. 随后, 转盘沿顺时针方向均匀自动旋转. 麦克风放置在探孔内并进行固定, 其连接至信号采集卡上. 在实验装置运行时, 声信号可通过采集卡在电脑上实时展示指向性曲线. 为了减小反射和外部干扰源对实验的干扰, 测试装置外围布置了消音棉.

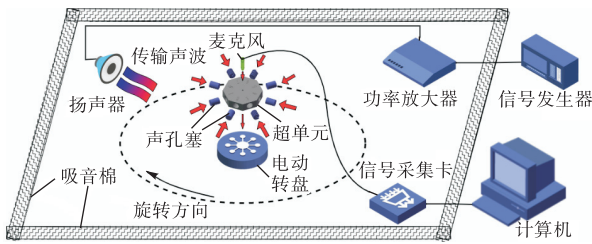


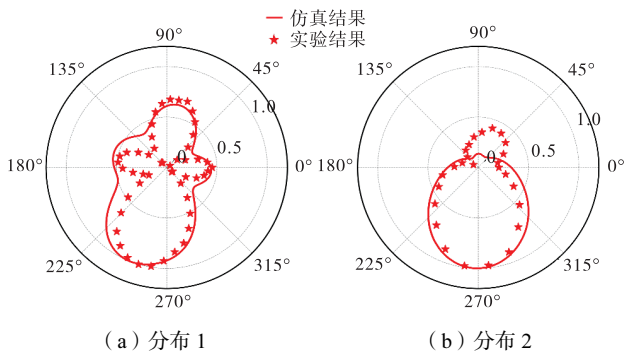
图 22 旋转实验台设置

Fig.22 Rotating experimental platform setup

本文采用了该实验装置分别对超结构分布 1 和分布 2 的指向性进行测试. 观察图 23 中超结构应用超单元 C、E 和 G 的声压幅值指向性归一化图. 可以看出, 在超单元对应峰值频率 1 740 Hz、2 063 Hz、2 377 Hz 声波输入时, 图 23(a)、图 24(a)和图 25(a)展示分布 1 的指向性实验与仿真数据非常相近, 其指向性的较大值出现在 90°与 270°附近位置.

将超结构重配置为分布 2 后再次实验, 分析图 23(b)、图 24(b)、图 25(b)中超结构的指向性曲线. 可以看出, 分布 1 的指向性已经完全转变为分布 2 的指向特征, 且指向性极大值出现在 270°附近.

进一步, 对超结构分布 1 时放入超单元 C 的非



(a) 分布 1

(b) 分布 2

图 23 分布 1 和分布 2 时超单元 C 指向性仿真与实验结果对比

Fig.23 Comparison between simulation and experimental results of directionality with distributions 1 and 2 of metaunit C

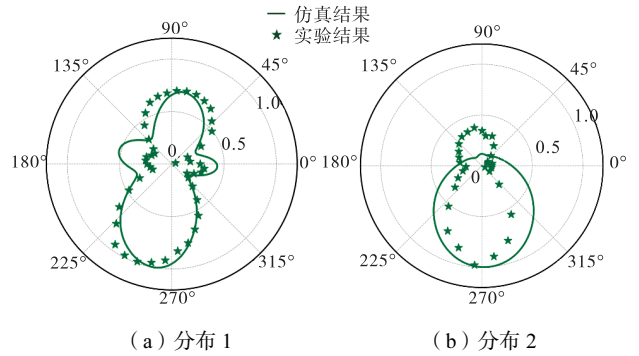


图 24 分布 1 和分布 2 时超单元 D 指向性仿真与实验结果对比

Fig.24 Comparison between simulation and experimental results of directionality with distributions 1 and 2 of metaunit D

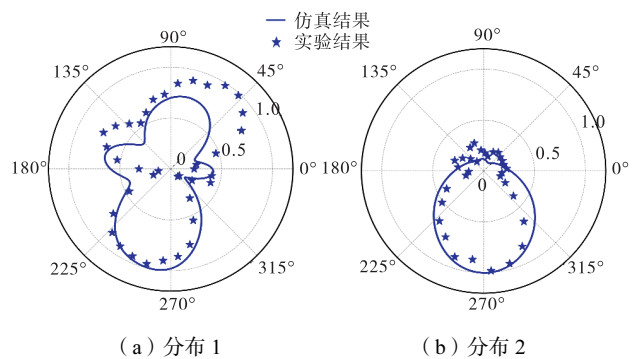


图 25 分布 1 和分布 2 时超单元 G 指向性仿真与实验结果对比

Fig.25 Comparison between simulation and experimental results of directionality with distributions 1 and 2 of metaunit G

峰值频率的声压响应进行了测量, 如图 26 所示. 对比图 17(a)的非峰值响应仿真可以发现, 实验测量的响应分布与其非常接近. 并且, 对比图 23(a)的峰值频率响应可以发现, 在非峰值频率, 超单元的响应最大值仅为峰值响应的 0.38 倍. 这说明放入超单元 C 的超结构对于超单元 E 和 G 的峰值频率响应不敏感, 证明了超结构的频率敏感特性.

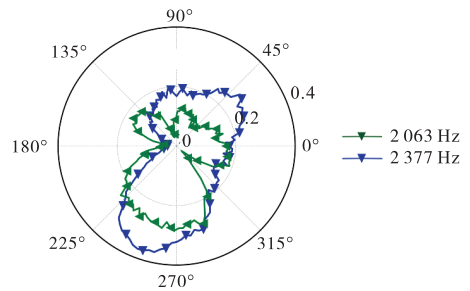


图 26 超结构在非峰值频率的实验结果

Fig.26 Experimental results for metastructures at non-peak frequencies

综上所述, 实验说明了本文提出的超结构具有良

好的指向可变性和频率敏感特性. 并且上述转变仅仅通过简单的重配置即可实现.

## 4 结 语

本文基于螺旋超材料设计了一种可重配置的声学传感装置, 通过超单元的精巧设计与超结构的应用赋予了单麦克风声学系统良好的定向传感性能, 并使其具有特定频率高透射特性. 单叶片螺旋超材料的声透射具有周期性峰谷变化频率曲线, 其控制低频声波的波长可达自身长度的 15 倍. 通过有限元仿真以及四传感器透射系数测量系统证明了其峰值频率理论模型的正确性. 进一步, 依据尺寸模型和多模型的敏感角度分析, 提出了一套超结构的设计方案与实现方法. 并且, 本文设计了一种八角柱形的超结构, 通过调整内部单元的排列顺序, 在紧凑体积下实现超结构指向性的完全改变; 通过替换不同峰值频率的超单元, 实现超结构频率敏感特性的调整. 之后, 通过旋转实验平台对 3D 打印的超结构进行了实验验证. 最终证明, 仿真与实验结果高度一致, 说明本文提出超结构能够将全向单传感转置改造为具有明显指向性的定向声传感装置, 并且通过高效的重配置方法实现双性能调整. 本文提出的设计方法为构建高信噪比的可调定向声采集设备提供了新的可借鉴思路.

## 参考文献:

- [1] 徐云飞, 孙永顺, 丁晓喜, 等. 基于 Lamb 波的数据传输与缺陷检测同步实现方法[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(3): 24-31.  
Xu Yunfei, Sun Yongshun, Ding Xiaoxi, et al. A synchronous implementation method of data transmission and defect detection based on lamb waves[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(3): 24-31 (in Chinese).
- [2] 廖韦韬, 王海涛, 江 奕, 等. 基于激光超声体波的轨头内部缺陷检测方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(10): 221-229.  
Liao Weitao, Wang Haitao, Jiang Yi, et al. Research on the internal defect detection method of rail head based on laser ultrasonic body wave[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(10): 221-229 (in Chinese).
- [3] Yu Y C, Safari A, Niu X D, et al. Acoustic and ultrasonic techniques for defect detection and condition monitoring in water and sewerage pipes: A review[J]. Applied Acoustics, 2021, 183(82): 108282-108295.
- [4] 吴尚尚. 具水声通讯功能的水下滑翔机运动行为与前端数据处理研究[D]. 天津: 天津大学机械工程学院, 2020.  
Wu Shangshang. Research on Motion Behavior and Front-End Data Processing of Acoustic-Communication Underwater Glider[D]. Tianjin: School of Mechanical Engineering, Tianjin University, 2020 (in Chinese).
- [5] Cai C, Chen Z, Luo J, et al. Boosting chirp signal based aerial acoustic communication under dynamic channel conditions[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2021, 21(9): 3110-3121.
- [6] 董聚兵, 刘晓东. 基于四阶累积量的测深侧扫声纳波达方向估计方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(8): 235-244.  
Dong Jubing, Liu Xiaodong. Research on the DOA estimation method of bathymetric side scan sonar based on fourth-order cumulant[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(8): 235-244 (in Chinese).
- [7] Li J W, Jiang P, Zhu H. A local region-based level set method with Markov random field for side-scan sonar image multi-level segmentation[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 21(1): 510-519.
- [8] Wang Y, Yang Y X, Yu S D. Design of unidirectional acoustic probes with flexible directivity patterns using two acoustic particle velocity sensors[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2018, 144(1): 13-19.
- [9] De S E, Hacıhabiboglu H, Cvetkovic Z. On the design and implementation of higher order differential microphones[J]. IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing, 2011, 20(1): 162-174.
- [10] Zhao G Z, Shi K B, Zhong S M. Research on array structures of acoustic directional transducer[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2021, 2021(5): 1-5.
- [11] 薛 燕. 超指向性相控阵列波束形成设计与实现[J]. 电声技术, 2016, 40(12): 58-61.  
Xue Yan. Design and implementation of acoustic array acoustic electric function onshore field inspection device[J]. Audio Engineering, 2016, 40(12): 58-61 (in Chinese).
- [12] 陈传敏, 乔钊熙, 郭兆枫, 等. 半主动式薄膜型声学超材料超低频隔声特性研究[J]. 噪声与振动控制, 2023, 43(3): 60-65.  
Chen Chuanmin, Qiao Chuanxi, Guo Zhao Feng, et al. Study on ultra-low frequency sound insulation characteristics of semi-active membrane type acoustic metamaterials[J]. Noise and Vibration Control, 2023, 43(3): 60-65 (in Chinese).

- [13] 李安康, 杨 坤, 彭 安, 等. 微薄膜超材料复合隔声结构的低频宽带隔声研究[J]. 噪声与振动控制, 2023, 43(3): 260-264.
- Li Ankang, Yang Kun, Peng An, et al. Study on micro-membrane metamaterial composite structures for low-frequency and broadband sound insulation[J]. Noise and Vibration Control, 2023, 43(3): 260-264 (in Chinese).
- [14] Lu Z Q, Zhao L, Ding H, et al. A dual-functional metamaterial for integrated vibration isolation and energy harvesting[J]. Journal of Sound and Vibration, 2021, 509(16): 116251-116269.
- [15] Zaremanesh M, Bahrami A. Multilayer acoustic invisibility cloak based on composite lattice[J]. Scientific Reports, 2022, 12(1): 16096-16105.
- [16] Xue Y H, Zhang X. Self-adaptive acoustic cloak enabled by soft mechanical metamaterials[J]. Extreme Mechanics Letters, 2021, 46(47): 101347-101352.
- [17] Zhang C, Cao W K, Wu L T, et al. A reconfigurable active acoustic metalens[J]. Applied Physics Letters, 2021, 118(13): 133502-133506.
- [18] Kim C, Kim J, Jeon W. Realization of an acoustic metalens exhibiting broadband high transmission[J]. Journal of Sound and Vibration, 2022, 529(15): 116910-116920.
- [19] Jiang X, Zhang L K, Liang B, et al. Radiation directivity rotation by acoustic metamaterials[J]. Applied Physics Letters, 2015, 107(9): 93506-93510.
- [20] Zhu X F, Liang B, Kan W W, et al. Deep-subwavelength-scale directional sensing based on highly localized dipolar mie resonances[J]. Physical Review Applied, 2016, 5(5): 54015-54022.
- [21] Chen T G, Wang C Y, Yu D J. Pressure amplification and directional acoustic sensing based on a gradient metamaterial coupled with space-coiling structure[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2022, 181(24): 109499-109506.
- [22] Sun X C, Jia H, Zhang Z, et al. Sound localization and separation in 3D space using a single microphone with a metamaterial enclosure[J]. Advanced Science, 2020, 7(3): 1902271-1902277.
- [23] Fokin V, Ambati M, Sun C, et al. Method for retrieving effective properties of locally resonant acoustic metamaterials[J]. Physical Review B, 2007, 76(14): 144302-144306.
- [24] Zhu X F, Li K, Zhang P, et al. Implementation of dispersion-free slow acoustic wave propagation and phase engineering with helical-structured metamaterials[J]. Nature Communications, 2016, 7(1): 11731-11737.
- [25] Li X, Li J, Huang X J. Acoustic meta-lens for enhanced sensing consisting of single-helicoid array[J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(14): 13989-13998.
- [26] Li X, Li J, Huang X J. Reconfigurable coding acoustic meta-lens based on helical metamaterials[J]. Applied Acoustics, 2023, 211(53): 109538-109548.

(责任编辑: 孙立华)