

# 主动式声学超表面研究及其控制系统设计

欧阳华江<sup>1</sup>, 周鑫<sup>2,3</sup>, 龚柯梦<sup>2,3</sup>, 莫继良<sup>\*2,3</sup>

(1. 利物浦大学 工程学院, 利物浦 L69 3GH, 英国;

2. 西南交通大学 轨道交通运维技术与装备四川省重点实验室, 四川 成都 610031;

3. 西南交通大学 机械工程学院, 四川 成都 610031)

**摘要:** 为克服目前声学超表面存在可重构性差、功能单一以及稳定性较差等不足, 基于声学理论并结合可编程逻辑控制器设计了一种可精密调节的多模式共振腔型声学超表面. 首先建立了超表面狭缝宽度与相位变化的理论模型, 并利用此模型分别计算出实现连续可调的声聚焦及声折射功能所需的狭缝宽度, 且基于执行系统中的电机最大速度对其进行修正; 其次设计包含单主多从模式硬件平台和电机运动软件算法的控制系统; 最后利用自主研发的声场测试试验台对该超表面进行声波波阵面调制试验, 并基于有限元方法分别对超表面调节入射平面波的声场进行数值模拟. 试验和数值仿真结果表明, 设计的控制系统可精确同步调控超表面狭缝宽度实现多种功能, 设计的算法误差在 0~1.1%, 系统运行平顺性和鲁棒性得到提高, 提出的主动式声学超表面解决了传统声学超表面可重构性差和因流体波动性导致共振腔室体积时变问题, 增强了超表面的实际应用性, 对声学超表面在主动声波操控方面提供了一定的指导.

**关键词:** 共振腔型声学超表面; 狭缝宽度计算与修正; 可编程逻辑控制器; 电机运动输出算法; 声波波阵面调制试验

中图分类号: O429

文献标识码: A

## 0 引言

声学超材料是一种具有亚波长厚度的人造材料, 因其能实现多种近于零或者负值的声学有效参数等自然材料无法实现的功能而受到科研人员的广泛关注. 国内外物理学等领域的研究人员对超材料问题展开了一定的研究, 先后发展出 4 种类型的超材料: 负密度型, 已成功应用于低频降噪<sup>[1-2]</sup>、角度滤波<sup>[3]</sup>、亚波长成像<sup>[4]</sup>和能量隧穿<sup>[5]</sup>等声波操控领域; 负体积模量型, 已实现声吸收<sup>[6]</sup>等功能; 双负型, 对声传播模式有一定影响; 有效密度近零型, 有望应用于噪声控制、声隐身和能量收集等领域. 超材料结构复杂, 使得声波在超材料内部过度损耗, 进而造成透射率较低等问题, 因此, 研究人员基于广义斯奈尔定理 (generalized Snell's law, GSL) 发展出了具有亚波长厚度和小

尺寸的声学超表面<sup>[7]</sup>.

首先对于折叠型声学超表面, 其有效材料参数为正, 利用此类超表面已实现声聚焦<sup>[8]</sup>、近场成像<sup>[9-12]</sup>和准直声束<sup>[13]</sup>等现象. 此外, Fang 等发现由间隔膜和侧孔组成的复合结构的超表面具有负的有效质量密度和负的有效体积模量<sup>[14]</sup>, 其他研究者利用具有这两种负有效材料参数的超材料设计了薄膜型和共振腔型超表面. 前者<sup>[15-16]</sup>因其具有很好的吸声性能<sup>[17]</sup>和易实现声学负折射率现象<sup>[18]</sup>, 在声滤波、声传感等方面<sup>[19]</sup>具有较大的应用价值. 而后者<sup>[20]</sup>因具有良好的阻抗匹配性质, 可实现一些声波操控方式. 除此之外, 研究人员进一步提出的遵循 GSL 的共振腔型声学超表面已实现波阵面转化<sup>[21]</sup>、异常传播<sup>[22]</sup>、声透镜<sup>[23-25]</sup>、声隐身<sup>[26-28]</sup>、自弯曲<sup>[29]</sup>以及声波波前连续调节<sup>[30]</sup>等功能. 值得注意的是, 与空间折叠型和薄

收稿日期: 2021-11-02; 修回日期: 2022-07-26.

基金项目: 西南交通大学牵引动力国家重点实验室自主研究课题(2020TPL-T06); 四川省科技计划资助项目(2020JDTD0012).

作者简介: 欧阳华江(1962-), 男, 博士, 教授, E-mail: h.ouyang@liverpool.ac.uk; 周鑫(1995-), 男, 硕士生, E-mail: 18328074972@163.com; 龚柯梦(1991-), 男, 博士, 讲师, E-mail: kemengcong@my.swjtu.edu.cn; 莫继良\*(1982-), 男, 博士, 研究员, E-mail: jlmo@swjtu.edu.cn.

膜型声学超表面相比,共振腔型声学超表面的结构因其与介质可以形成良好的阻抗匹配特性,使得其在理论和实际中拥有接近 1 的透射率,故采用共振腔型声学超表面来实现声波操控.共振腔型声学超表面在结构上可分为被动式和主动式两种.被动式声学超表面结构较为固定,但存在重构性差和功能单一等缺点.对于主动式声学超表面,研究人员通过调节流体实现了焦点运动等功能<sup>[31]</sup>,然而该方法也存在一定的局限性,表现在不可倾斜翻转等,鲁棒性较差,实际应用性相对不足.

目前,以微处理器为核心的可编程逻辑控制器(programmable logic controller, PLC)因其可靠性强、抗干扰能力强、适用性强和适应面广等优点受到广泛关注,采用 PLC 调节声学超表面单元上表面与上盖板之间狭缝宽度的方法来调制平面波的研究具有一定价值,设计稳定且可连续调节的声学超表面使其作为信息元件应用于医学、工程和通信领域的研究具有重要实际意义.为此,本文提出一种可精密调节的主动式共振腔型声学超表面.首先设计声学超表面物理结构,再基于 GSL 并利用有效模量计算出狭缝宽度,为满足电机运行速度要求,对其进行修正.此后再结合可编程逻辑控制器设计一种包含软硬件的控制系统,基于此再计算出该运动算法对控制系统的误差影响,进而分析控制系统的鲁棒性.在试验部分,利用数据采集仪分析通过麦克风采集平面波发生器产生的位于入射声场和透射声场的声波信号,验证所设计的控制系统对声波的调制情况.此外,采用有限元手段对声学超表面调节平面波在始末时刻的声场进行数值模拟.最后综合试验和有限元模拟结果分析控制系统控制声学超表面调节平面波实现声聚焦的焦点自左向右(AMS-LR)和自下向上(AMS-BT)以及声折射(AMS-R)运动所具有的多功能性,为主动式声学超表面的优化设计提供试验依据和理论指导.

## 1 主动式声学超表面狭缝宽度调节方法

### 1.1 声学超表面狭缝宽度计算

为提高系统鲁棒性和解决传统超表面的功能单一问题,选择将狭缝宽度  $d$  作为调节变量.亥姆霍兹单元的共振角频率可描述为  $\omega_0 = 1/\sqrt{C_{HR}M_{HR}}$ ,其中  $C_{HR} = ab/E_0$ ,为共振腔声顺,参

数尺寸如图 1 所示. $a=7.5$  mm,为腔体宽度; $b=7.5$  mm,为腔体高度;空气体积模量  $E_0 = \rho_0 c_0^2$  ( $\rho_0 = 1.21$  kg/m<sup>3</sup>,  $c_0 = 343$  m/s);声质量  $M_{HR} = \rho_0 h_{eff}/\omega$ ,其中  $\omega = 4.4$  mm,为共振腔颈部宽度,  $h_{eff} = h + 8\omega/3\pi$ ,为共振腔颈部有效长度,共振腔颈部厚度  $h = 1$  mm.综上求得  $\omega_0 = 4.4087 \times 10^4$  rad/s,根据  $f_0 = \omega_0/2\pi$  可知共振腔的共振频率  $f_0 = 7016.6$  Hz.

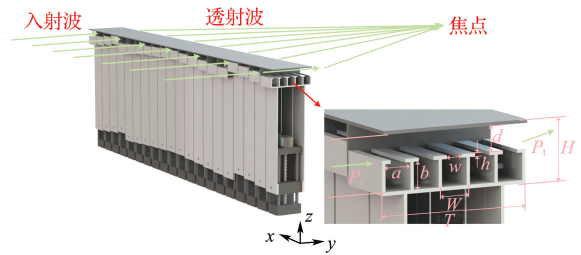


图 1 声学超表面聚焦功能原理图和超表面结构图  
Fig. 1 Focusing principle and metasurface structure diagrams of acoustic metasurface

平面波波长  $\lambda = c/f$ ,其中  $c = 343$  m/s,为声速,  $f = 5000$  Hz,为平面波工作频率.因超表面总宽度  $T = 43.5$  mm  $< \lambda = 68.6$  mm,故可将超表面视为均匀介质.此时,通过改变超表面单元狭缝宽度  $d$  即可调节和控制有效模量  $E_{eff}$ <sup>[29]</sup>,两者关系可表示为

$$\frac{1}{E_{eff}} = \frac{1}{E_0} \left( 1 - \frac{F\omega_0^2}{\omega^2 - \omega_0^2 - j\Gamma\omega} \right) \quad (1)$$

式中: $\omega = 2\pi f$ ,为系统工作角频率; $\Gamma$ 为共振腔单元的耗散损失; $F = S_{HR}/S_{slit} = ab/Wd$ ,为几何因子; $d$ 为狭缝宽度;超表面单元的透射波相位为  $\varphi$ :

$$\varphi = \omega T/c_{eff} \quad (2)$$

式中: $c_{eff} = \sqrt{E_{eff}/\rho_0}$ ,为入射声波穿过超表面的无耗散损失声波; $W = 8.5$  mm,为超表面单元宽度.将式(2)代入式(1)得到相位  $\varphi$  与狭缝宽度  $d$  的关系表达式为

$$\varphi^2(d) = \left( \frac{\omega T}{c_0} \right)^2 \left( 1 - \frac{\omega_0^2 ab}{\omega^2 - \omega_0^2 Wd} \right) \quad (3)$$

对于具有折射功能的声学超表面(AMS-R),假设入射角为  $0^\circ$ ,平面波经过超表面调节后与法线夹角  $\theta_1 = -\pi/4$ ,设超表面调节平面波运动在  $t_1 = 3$  s 后停止,此时的透射声波与法线夹角  $\theta_2 = \pi/4$ ,平面波在这个过程中的偏转角速度  $\omega_r = (\theta_2 - \theta_1)/t_1$ ,此时,入射角与折射角可分别描述为

$$\sin \theta_i(x, t) = 0 \quad (4)$$

$$\sin \theta_r(x, t) = \sin(\theta_1 + \omega_r t) \quad (5)$$

同种介质中的折射角与入射角遵循的 GSL 为

$$\sin \theta_r - \sin \theta_i = \frac{\lambda_0}{2\pi} \frac{d\varphi(x)}{dx} \quad (6)$$

式中： $\varphi(x)$  是声学超表面中的界面相位突变，平面波波长  $\lambda_0 = c_0/f$ ，结合波数  $k_0 = 2\pi f/c_0$ ，并将式(4)和(5)代入式(6)可得透射波相位  $\varphi$  与  $x$  的关系表达式：

$$\varphi(x, t) = k_0 \sin(\theta_1 + \omega_r t)x + \varphi_1 \quad (7)$$

式中： $\varphi_1$  为积分常数，利用式(3)反解出狭缝宽度  $d$  与  $x$  的关系并将式(7)代入可得 AMS-R 狭缝宽度  $d$  与  $x$  的关系：

$$d(x) = \frac{\omega_0^2 ab}{(\omega^2 - \omega_0^2)W} \times \frac{1}{1 - \left\{ \frac{c_0}{\omega T} [k_0 \sin(\theta_1 + \omega_r t)x + \varphi_1] \right\}^2} \quad (8)$$

对于声聚焦焦点自左向右(AMS-LR)和自下向上(AMS-BT)运动的超表面，设起始焦点  $F_s(x_s, y_s)$  在控制系统的调控下运动在  $t_1 = 3$  s 后到终止焦点  $F_e(x_e, y_e)$  的速度为  $v = \sqrt{(x_e - x_s)^2 + (y_e - y_s)^2} / t_1$ ，此时， $x$  轴和  $y$  轴的速度分量分别为

$$v_x = \frac{v(x_e - x_s)}{\sqrt{(x_e - x_s)^2 + (y_e - y_s)^2}} \quad (9)$$

$$v_y = \frac{v(y_e - y_s)}{\sqrt{(x_e - x_s)^2 + (y_e - y_s)^2}} \quad (10)$$

入射角与透射角可分别描述为

$$\sin \theta_i(x, t) = 0 \quad (11)$$

$$\sin \theta_t(x, t) = \frac{-[x - x(t)]}{\sqrt{[x - x(t)]^2 + [y(t)]^2}} \quad (12)$$

其中  $x(t) = x_s + v_x t$ ， $y(t) = y_s + v_y t$ 。此外，声波与两种介质界面相遇时的折射角与入射角遵循的 GSL 为

$$\frac{1}{\lambda_2} \sin \theta_t - \frac{1}{\lambda_1} \sin \theta_i = \frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi(x)}{dx} \quad (13)$$

式中： $\lambda_1 = c_1/f$  和  $\lambda_2 = c_2/f$  分别为平面波在介质 1 和介质 2 中的波长，将式(11)和(12)代入式(13)可得透射波相位  $\varphi$  与  $x$  的关系表达式为

$$\varphi(x, t) = -k_2 \sqrt{[x - x(t)]^2 + [y(t)]^2} + \varphi_2 \quad (14)$$

式中： $k_2 = \omega/c_2$ ，为波数； $\omega = 2\pi f$ ，为角频率； $\varphi(x,$

$t)$  为沿  $x$  轴的相位分布； $\varphi_2$  为积分常数。

利用式(3)反解出  $d$  与  $x$  的关系并将式(14)代入可得聚焦功能的超表面狭缝宽度  $d$  与  $x$  的关系：

$$d(x) = \frac{\omega_0^2 ab}{(\omega^2 - \omega_0^2)W} \times \frac{1}{1 - \left\{ \frac{c_0}{\omega T} [-k_2 \sqrt{[x - x(t)]^2 + [y(t)]^2} + \varphi_2] \right\}^2} \quad (15)$$

经以上理论推导，为体现该主动式声学超表面所具有的多功能性，下面将设计超表面操控平面波实现焦点运动及声折射所必需的焦点坐标和折射角度值，设焦点自左向右运动的起始( $t = 0$  s 时)焦点为  $F_1(x_1 = -0.1$  m,  $y_1 = 0.3$  m)，终止( $t = 3$  s 时)焦点为  $F_2(x_2 = 0.1$  m,  $y_2 = 0.3$  m)，同理设焦点自下向上运动的起始焦点为  $F_3(x_3 = 0, y_3 = 0.1$  m)，终止焦点为  $F_4(x_4 = 0, y_4 = 0.35$  m)，再将 4 个点分别代入式(15)可得出 4 种状态时的 20 个超表面单元狭缝宽度数组。将起始折射角  $\theta_1 = -\pi/4$  与终止透射角  $\theta_2 = \pi/4$  分别代入式(8)可得出两种状态时的 20 个超表面单元狭缝宽度数组，此时，将计算出的狭缝宽度数组与时间  $t$  形成的曲线设为狭缝宽度原曲线，再将在  $t = 0$  s 时与  $t = 3$  s 时实现 3 种功能对应的所有超表面单元狭缝宽度数组用于控制系统中电机运动算法的设计和有限元模型的建立，最后利用试验和仿真手段分析所设计的主动式声学超表面的多功能性。

图 2(a) 与 (b) 分别为 AMS-R 第 1~10 和 11~20 超表面单元狭缝宽度数组原曲线图，从两图可看出超表面单元中的所有连续两特征点(特征点指图中连续两点的斜率趋于无穷的数据点)之间的斜率分别为负和正。图 3(a)、(b)、(c) 分别为 AMS-LR 第 1~7、8~13、14~20 超表面单元狭缝宽度数组原曲线图，可看出所有连续两特征点之间的斜率为负或正，特殊超表面无连续特征点。图 4(a) 与 (b) 分别为 AMS-BT 第 1~10 和 11~20 超表面单元狭缝宽度数组原曲线图，可看出所有连续两特征点之间的斜率为负。

## 1.2 声学超表面狭缝宽度修正

对于所推导出的狭缝宽度数组在控制系统中也是电机的位移数组，即连续两点的斜率为电机运行速度，从图 2、3 和 4 看出，狭缝宽度原曲线上连续两点的斜率趋于无穷，电机实际运行速度不

可能达到,所以必须对所有狭缝宽度原曲线进行修正.其次,为使从控制器稳定运行,其RAM动态内存的使用不超过80%,故将所有狭缝宽度数

组  $d_m^p$  ( $m=1,2,\dots,20$  代表第1~20超表面;  $p=1,2,3$  分别表示 AMS-R、AMS-LR、AMS-BT 超表面) 中的数据值类型设计为占用内存

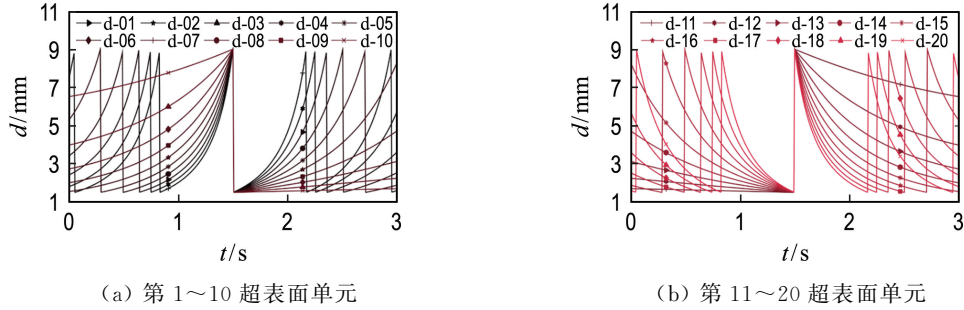


图2 AMS-R狭缝宽度原曲线

Fig. 2 Original curves of AMS-R slit widths

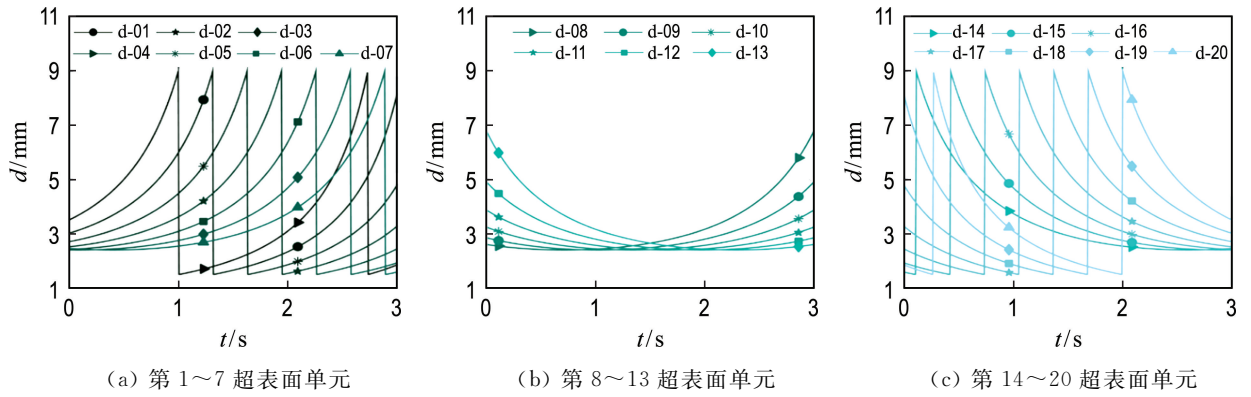


图3 AMS-LR狭缝宽度原曲线

Fig. 3 Original curves of AMS-LR slit widths

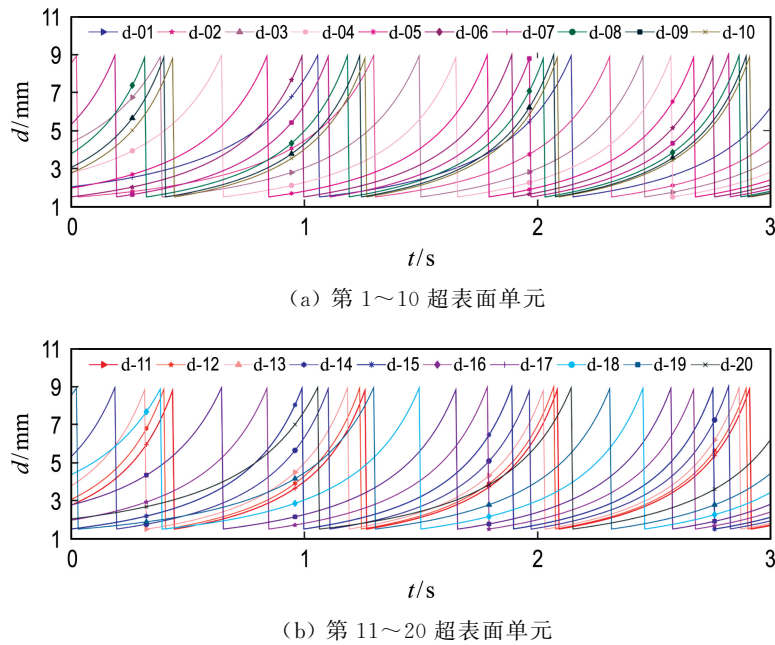


图4 AMS-BT狭缝宽度原曲线

Fig. 4 Original curves of AMS-BT slit widths

1 byte 的 char 字符型, 该类型数值范围为  $-128 \sim 127$ , 同时设每个  $d_m^p$  中的数据点为 400. 此时, 将  $d_1^1, d_1^2$  和  $d_1^3$  数组写入同一个从控制器后该控制器的内存占比为  $(1\ 200/2\ 048) \times 100\% = 58.6\% < 80\%$ , 满足试验要求.

此后再对所有狭缝宽度原曲线进行分类. 从图 2、3 和 4 看出, 因 AMS-R 第 1~10 和 AMS-LR 第 1~7 以及 AMS-BT 第 1~20 超表面单元狭缝宽度原曲线中的所有连续两特征点(图 5 中连续两点的斜率趋于无穷的数据点)之间存在负斜率, 故依次划分为  $A_1, A_2$  和  $A_3$  类超表面单元. 因 AMS-R 第 11~20 和 AMS-LR 第 8~13 超表面单元狭缝宽度原曲线中的所有连续两特征点之间存在正斜率, 故依次划分为  $B_1$  和  $B_2$  类超表面单元. AMS-LR 第 14~20 超表面单元狭缝宽度原曲线无连续特征点, 将其划分为  $C_2$  类超表面单元. 再将狭缝宽度原曲线上连续两特征点的左右特征点分别标记为  $L_{mL_n}^{pq} (t_{mL_n}^{pq}, d_{mL_n}^{pq})$  和  $R_{mR_n}^{pq} (t_{mR_n}^{pq}, d_{mR_n}^{pq})$ , 两者中点标记为  $d_{mM_e}^{pq} \left( \frac{t_{mL_n}^{pq} + t_{mR_n}^{pq}}{2}, \frac{d_{mL_n}^{pq} + d_{mR_n}^{pq}}{2} \right)$  ( $q = A_1, B_2, \dots$ , 代表不同类型超表面单元;  $L_n, R_n$  与  $M_e$  依次代表  $m$  超表面单元中的第  $n$  个左和第  $n$  个右特征点以及第  $e$  个中点), 两点的斜率记为  $k_{mM_e}^{pq}$  并用下式描述:

$$k_{mM_e}^{pq} = \frac{d_{mR_n}^{pq} - d_{mL_n}^{pq}}{t_{mR_n}^{pq} - t_{mL_n}^{pq}} \quad (16)$$

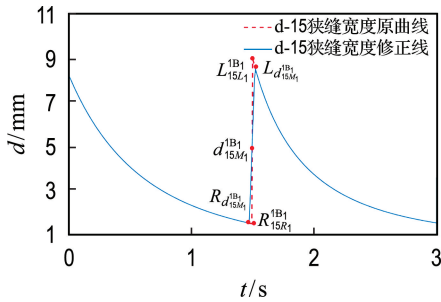


图 5 AMS-R 第 15 超表面单元狭缝宽度修正原理图

Fig. 5 Principle diagram of AMS-R 15th metasurface unit slit widths modification

通过式(16)计算出所有两特征点之间的斜率均大于电机的最大运动速度  $v_{\max} = 154$  mm/s, 故必须对狭缝宽度原曲线进行修正.

设过中点  $d_{mM_e}^{pq}$  的直线  $y_{mM_e}^{pq}$  (可参考图 5) 为

$$y_{mM_e}^{pq} = \frac{d_{mL_n}^{pq} + d_{mR_n}^{pq}}{2} = \begin{cases} -v_{\max} \left( x_{mM_e}^{pq} - \frac{t_{mL_n}^{pq} + t_{mR_n}^{pq}}{2} \right); & k_{mM_e}^{pq} < 0 \\ v_{\max} \left( x_{mM_e}^{pq} - \frac{t_{mL_n}^{pq} + t_{mR_n}^{pq}}{2} \right); & k_{mM_e}^{pq} > 0 \end{cases} \quad (17)$$

此时, 直线  $y_{mM_e}^{pq}$  与原曲线交于两点, 依次设为左交点  $L_{d_{mM_e}^{pq}} (L_{x_{mM_e}^{pq}}, L_{y_{mM_e}^{pq}})$  和右交点  $R_{d_{mM_e}^{pq}} (R_{x_{mM_e}^{pq}}, R_{y_{mM_e}^{pq}})$ , 再将狭缝宽度原曲线中位于左右交点之间的数据用直线  $y_{mM_e}^{pq}$  上对应的数据替换, 其他数据保留, 修正即完成, 修正完成后的新狭缝宽度原曲线上的数据集记为数组  $D_m^p (m = 1, 2, \dots, 20; p = 1, 2, 3)$ .

因所有狭缝宽度原曲线修正方法皆相同, 故以 AMS-R 第 15 超表面单元的狭缝宽度修正为例. 如图 5 所示, 可看出该狭缝宽度曲线上存在 1 组特征点. 根据前述的标记方法, 因该超表面单元可实现声折射且属于  $B_1$  类中的第 15 超表面单元, 故  $p = 1, q = B_1, m = 15$ , 图中两特征点的中点为第一中点, 所以  $n = 1$ , 此时的左右特征点分别为  $L_{15L_1}^{1B_1} (t_{15L_1}^{1B_1} = 1.492\ 5, d_{15L_1}^{1B_1} = 1.511\ 7)$  和  $R_{15R_1}^{1B_1} (t_{15R_1}^{1B_1} = 1.5, d_{15R_1}^{1B_1} = 9.041\ 8)$ , 两点的斜率为  $k_{15M_1}^{1B_1} \approx 1\ 004.01 > 0$ , 根据式(17)和  $v_{\max} = 154$  mm/s, 过中点  $d_{15M_1}^{1B_1}$  的直线为  $y_{15M_1}^{1B_1}$ :

$$y_{15M_1}^{1B_1} - 5.276\ 8 = 154(x_{15M_1}^{1B_1} - 1.496\ 3) \quad (18)$$

此时, 直线  $y_{15M_1}^{1B_1}$  与原曲线相交的左右交点分别为  $L_{15M_1}^{1B_1} (L_{x_{15M_1}^{1B_1}} = 1.47, L_{y_{15M_1}^{1B_1}} = 1.539\ 4)$  和  $R_{15M_1}^{1B_1} (R_{x_{15M_1}^{1B_1}} = 1.522\ 5, R_{y_{15M_1}^{1B_1}} = 8.572\ 7)$ , 将原曲线上位于两交点之间的数据用直线  $y_{15M_1}^{1B_1}$  上的数据替换, 保留原曲线上的其他数据, 修正即完成, 修正后的数组为  $D_{15}^1$ . 其余超表面单元的狭缝宽度原曲线修正方法与第 15 超表面单元修正方法相同, 无特征点的原曲线不修正, 最后得出修正后的狭缝宽度数组为  $D_m^1 (m = 1, 2, \dots, 20)$ . AMS-LR 和 AMS-BT 与 AMS-R 的修正方法相同, 修正后的狭缝宽度数组记为  $D_m^2 (m = 1, 2, \dots, 20)$  和  $D_m^3 (m = 1, 2, \dots, 20)$ .

## 2 主动式声学超表面控制系统设计

### 2.1 硬件平台设计

为改善由流体不稳定性导致的腔室体积时变

问题和解决声学超表面重构性问题,提出了一种由可编程逻辑控制器控制电机调节声学超表面狭缝宽度的控制方法,该控制系统的硬件设计如图6所示,主要由上位监视器、主控制器、CAN通信模块、从控制器、电机驱动器和电机等组成。

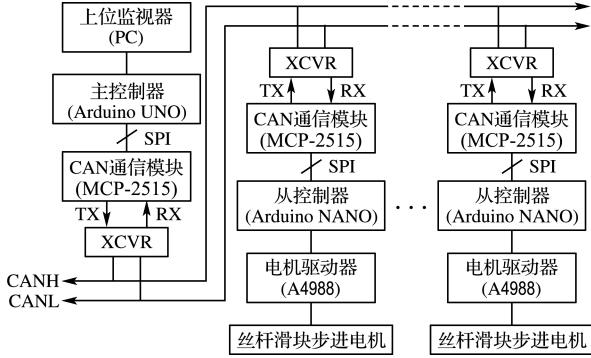


图6 主动式声学超表面硬件平台实现方法图  
Fig. 6 The implementation method diagram of active acoustic metasurface hardware platform

## 2.2 软件算法设计

在控制系统的软件算法设计中,主要是电机运动算法设计,为保证所有电机在3 s内精准实时同步控制超表面调制平面波实现多种功能并维持系统平顺运行,硬件平台中的电机驱动器工作模式设计为全步进模式和16细分模式。若 $D_m^p$ 中的数据与 $y_{mM_e}^p$ 上的数值等值,则采用全步进模式,此时,电机实际运动脉冲量 $y_m^p(E)$ 可描述为

$$y_m^p(E) = \left\lfloor \frac{D_m^p(E+1) - D_m^p(E)}{S_{p1}} + \frac{1}{2} \right\rfloor \quad (19)$$

式中: $D_m^p(E)$ 为狭缝宽度数组中的元素; $S_{p1} = 0.15 \text{ mm}$ ,为电机在全步进模式下的步幅。

若 $D_m^p$ 中的数据与 $y_{mM_e}^p$ 上的数值不等值,则采用16细分模式,此时,电机实际运动脉冲量 $y_m^p(E)$ 可描述为

$$y_m^p(E) = \left\lfloor \frac{D_m^p(E+1) - D_m^p(E)}{S_{p2}} - \frac{1}{2} \right\rfloor \quad (20)$$

式中: $S_{p2} = S_{p1}/16 = 9.375 \times 10^{-3} \text{ mm}$ ,为电机在16细分模式下的步幅。

通过式(19)和式(20)可推导出最优脉冲量数组 $y_m^p(m=1,2,\dots,20;p=1,2,3)$ 。下面进一步讨论电机运动算法,如图7所示, $D_m^p(E)$ 、 $D_m^p(E+1)$ 和 $D_m^p(E+2)$ 为 $D_m^p$ 中的连续3个元素。从理论上讲,电机在电机驱动器的脉冲控制下,从上一点运动至下一点应完全重合,但由于在计算 $y_m^p$ 时采

用了四舍五入的计数保留法,故电机在实际运动过程中,将从点 $D_m^p(E)$ 运动至上偏差点 $D_m^p(E+1)$ 或下偏差点 $D_m^p(E+1)$ ,此时,将上偏差点 $D_m^p(E+1)$ 与理论点 $D_m^p(E+1)$ 之间的偏差记为上偏差 $\delta_{E+1}^t$ ,下偏差点 $D_m^p(E+1)$ 与理论点 $D_m^p(E+1)$ 之间的偏差记为下偏差 $\delta_{E+1}^b$ 。

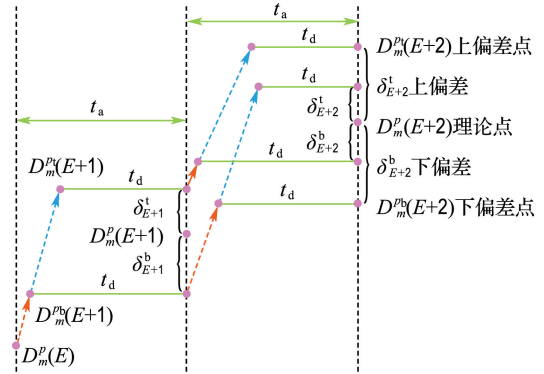


图7 电机运动算法  
Fig. 7 Motor motion algorithm

因所有电机需同时运行才能使超表面体现多功能性,即所有电机从 $D_m^p(E)$ 运动至 $D_m^p(E+1)$ 的时间应保持相等。设电机在每一个 $D_m^p$ 中的任意两点之间的运行时间为 $t_a$ ,且 $t_a$ 由同一功能下所有 $y_m^p$ 中的数值的绝对值的最大值与脉冲周期的乘积决定,此时,若 $y_m^p$ 中的值不为最大,则将该值与脉冲周期的乘积而形成的时间设为 $t_d$ , $t_d \leq t_a$ ,所以,若20个电机从 $D_m^p(E)$ 运动至 $D_m^p(E+1)$ 或 $D_m^p(E+1)$ 时再延迟 $t_d$ ,此后所有电机将同步从实际位移点运动至下一点,即可保证所有电机实现同步运行,从而解决系统的实时性。

经以上理论分析,电机从点 $D_m^p(E)$ 运动至 $D_m^p(E+1)$ 的延迟时间 $t_d$ 将满足以下公式:

$$t_d = t_a - y_m^p(E) \cdot \Delta t \quad (21)$$

式中: $t_a = y_{\max} \cdot \Delta t$ ,为 $D_m^p(E)$ 至 $D_m^p(E+1)$ 的运行时间,且连续两点之间的时间间隔 $t_a$ 相等, $y_{\max}$ 为同一功能下的 $y_m^p$ 中的元素绝对值的最大值; $y_m^p(E)$ 为数组 $y_m^p$ 中的元素; $\Delta t = 100 \text{ ms}$ ,为脉冲周期。

下面讨论该电机运动算法对整个系统的误差影响。电机的实际运动位移与理论运动位移误差 $\mu$ 可描述为

$$\mu = \left| \frac{\sum (S_p \cdot y_m^p(E)) - D_m^p(E+1)}{D_{m\max}^p - D_{m\min}^p} \right| \times 100\%$$



$d$  调制进入透射声场,最后由完美匹配层将声波吸收.如图 10 所示为 20 个共振腔  $U_1 \sim U_{20}$  与狭缝宽度  $d_1 \sim d_{20}$  之间的关系示意图,值得注意的是,  $xz$  平面的零点将取自第 10 个狭缝宽度( $d_{10}$ )和第 11 个狭缝宽度( $d_{11}$ )的两上表面之间连线的中点.此外,实现折射角从  $-\pi/4$  运动至  $\pi/4$ 、声

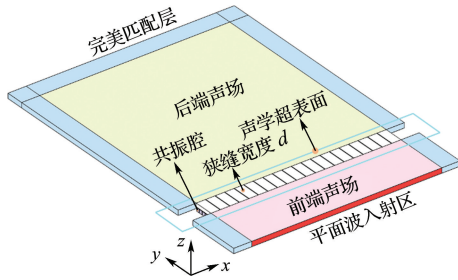


图 9 声学超表面三维简化有限元模型  
Fig. 9 Three-dimensional simplified finite element model of acoustic metasurface

聚焦的焦点从  $F_1(x_1 = -0.1 \text{ m}, y_1 = 0.3 \text{ m})$  自左向右运动至  $F_2(x_2 = 0.1 \text{ m}, y_2 = 0.3 \text{ m})$  以及从  $F_3(x_3 = 0, y_3 = 0.1 \text{ m})$  自下向上运动至  $F_4(x_4 = 0, y_4 = 0.35 \text{ m})$  3 种功能的超表面 (AMS-R、AMS-LR 和 AMS-BT) 在  $t = 0 \text{ s}$  时和  $t = 3 \text{ s}$  时 20 个单元对应的  $d$  分别如矩阵图 11(a)、(b)、(c) 所示.另一方面,在两时刻与狭缝宽度对应的透射率和相位分别如矩阵图 11(d)、(e)、(f) 和图 11(g)、

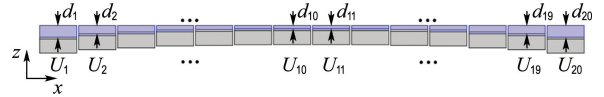


图 10 20 个声学超表面单元的狭缝宽度  $d_1 \sim d_{20}$  与共振腔  $U_1 \sim U_{20}$  关系截面示意图

Fig. 10 Cross-sectional schematic diagram of the relationship between the slit widths  $d_1 \sim d_{20}$  and the resonator type  $U_1 \sim U_{20}$  of twenty acoustic metasurface units

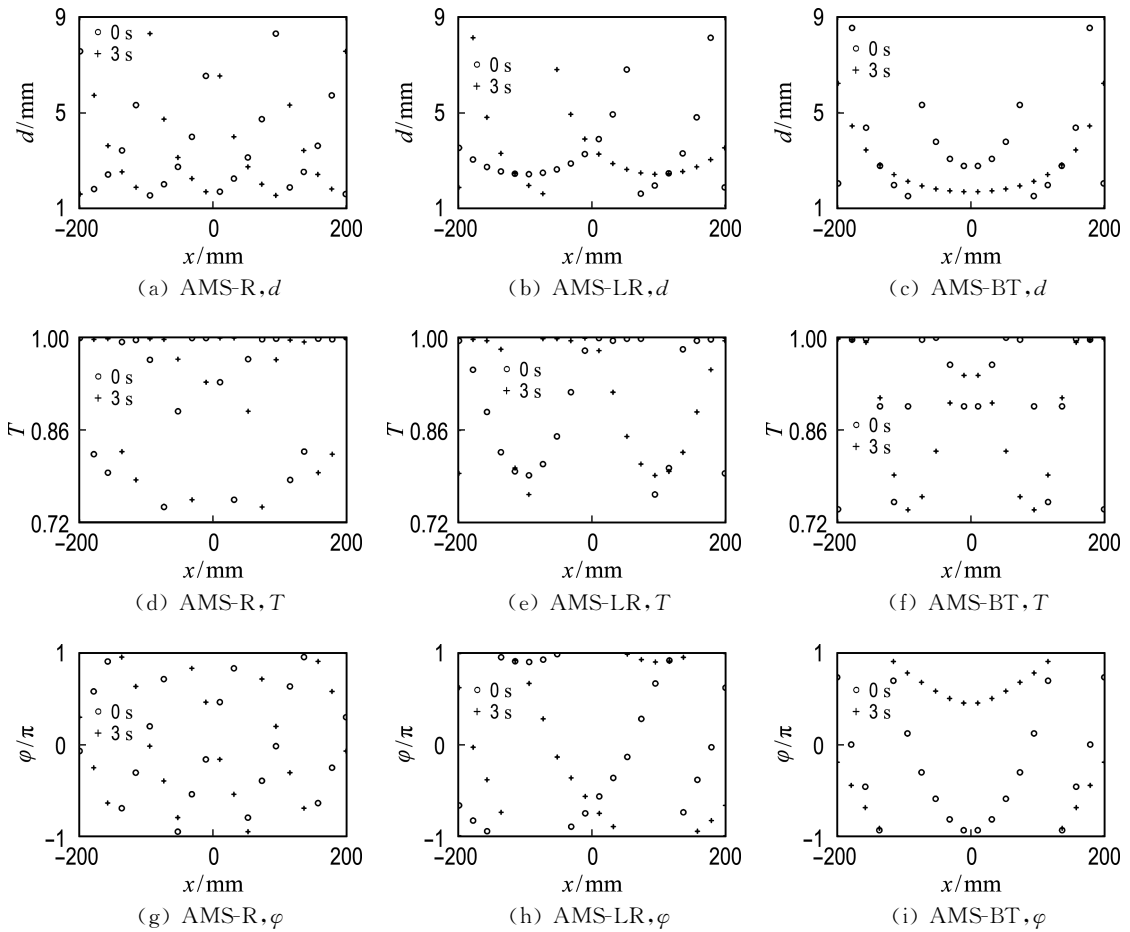


图 11 由声学超表面性能(狭缝宽度  $d$ 、透射率  $T$  和相位  $\varphi$ )和其所具有的功能(AMS-R、AMS-LR 和 AMS-BT)两因素群构成的矩阵图

Fig. 11 A matrix diagram composed of two factor groups of acoustic metasurface performance (slit width  $d$ , transmittance  $T$  and phase  $\varphi$ ) and its functions (AMS-R, AMS-LR and AMS-BT)



(h)、(i)所示。

计算参数中的  $c=343$  m/s,  $f=5\ 000$  Hz, 入射声场与透射声场的网格数量总和为 1 193 597, 最大网格单元尺寸为  $(c/f)/20=3.43\times 10^{-3}$  m, 最小网格单元质量为 0.172 8(网格单元质量在 0~1 的计算结果较好), 平均网格单元质量为 0.659 3. 共振腔与狭缝宽度网格数量总和为 16 186 318, 最大网格单元尺寸为  $(c/f)/120=5.716\ 7\times 10^{-4}$  m, 最小网格单元质量为 0.159 5, 平均网格单元质量为 0.663 3.

### 3.3 试验结果与数值仿真结果对比分析

所设计的超表面控制声波从左焦点运动至右焦点的仿真和试验结果如图 12 所示. 图 12(b)和 (f)分别表示采用仿真方法得到的左焦点  $F_1$  和右焦点  $F_2$  的声压场图, 从两图的关键声场可分析出设计的控制系统可以控制超表面操控声波实现声聚焦功能, 并且从两静态声压场可观察到该超表面具有操控声波的焦点从  $F_1$  平移至  $F_2$  的运动趋势. 图 12(a)和 (e)分别表示采用试验方法得到的  $F_1$  和  $F_2$  的声压场图, 试验结果与仿真结果的一致性较好. 图 12(d)和 (h)分别表示  $F_1$  和  $F_2$  的仿真声强场图, 利用两图可大致分析出左右焦点的近似坐标为  $F_1(x_1=-0.1\text{ m}, y_1=0.24\text{ m})$  和  $F_2(x_2=0.1\text{ m}, y_2=0.24\text{ m})$  以及聚焦强度(最大值为  $5\times 10^{-3}$  W/m<sup>2</sup>, 在分析声强场时, 均将各点的值除以最大值以实现归一化). 此外,  $F_1$  和  $F_2$  的试验声强场分别如图 12(c)和 (g)所示, 从两图可近似得出左右焦点的坐标为  $F_1(x_1=-0.075\text{ m}, y_1=0.23\text{ m})$  和  $F_2(x_2=0.06\text{ m}, y_2=0.24\text{ m})$ .

将利用仿真和试验方法分别得到的左右焦点近似坐标与理论焦点坐标  $F_1(x_1=-0.1\text{ m}, y_1=0.3\text{ m})$  和  $F_2(x_2=0.1\text{ m}, y_2=0.3\text{ m})$  进行分析对比可知, 三者的结果存在一定区别. 首先分析试验误差, 该误差主要来源于电机在运动时存在丢步问题进而造成超表面的狭缝宽度与理论值不同; 另一方面, 环境噪声也是一个造成试验误差的重要因素, 两个关键的试验误差最终导致由试验测得的结果  $F_1(x_1=-0.075\text{ m}, y_1=0.23\text{ m})$  和  $F_2(x_2=0.06\text{ m}, y_2=0.24\text{ m})$  的两横纵坐标均与理论值  $F_1(x_1=-0.1\text{ m}, y_1=0.3\text{ m})$  和  $F_2(x_2=0.1\text{ m}, y_2=0.3\text{ m})$  存在差异. 对于电机丢步问题, 该问题主要由超表面单元的共振腔与两侧隔

板之间的摩擦造成, 所以在设计共振腔时, 需使其在  $x$  轴方向上的厚度等于两隔板之间的距离减去 0.1 mm, 此方法既可减少漏音, 又可防止电机

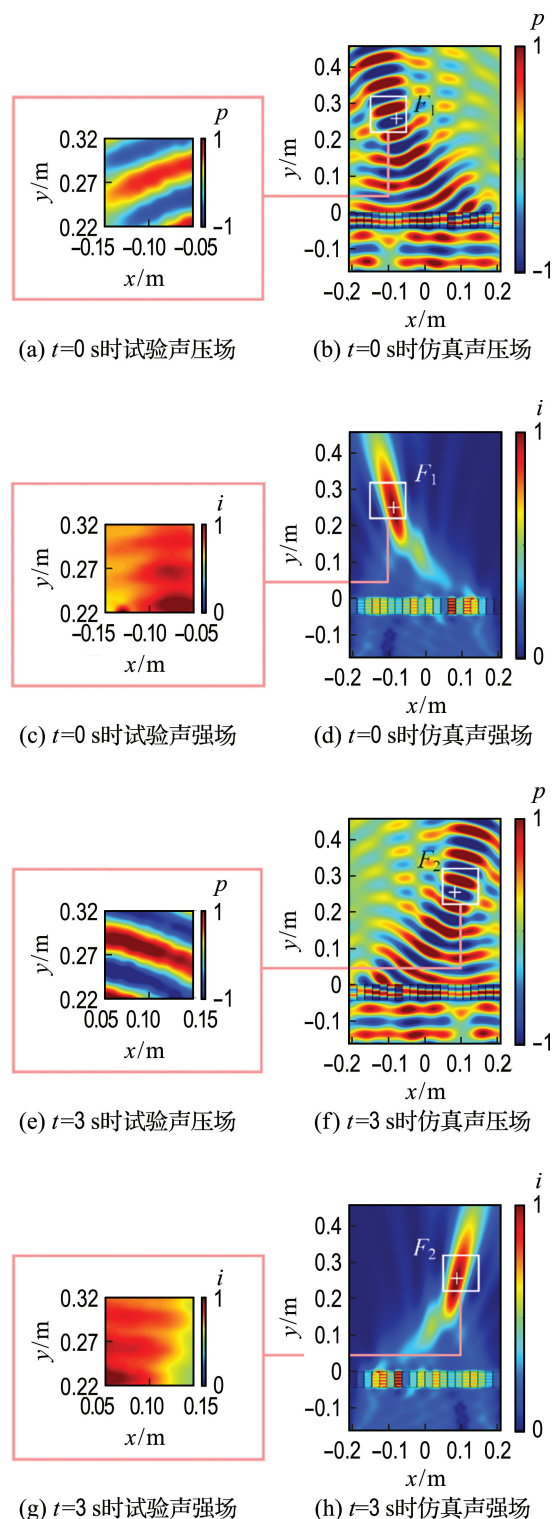


图 12 AMS-LR 仿真和试验声压场及声强场图  
Fig. 12 AMS-LR simulation and test sound pressure field and sound intensity field diagrams

丢步,并且也能满足增材制造的精度要求.对于环境噪声而言,由于本试验在一个独立实验室进行,并且试验设备设计有两个8 mm厚的亚克力板和厚度接近1个波长的楔形吸音泡沫;此外,测试设备的前后麦克风放置在由上下两片亚克力板和四周为吸音泡沫组成的接近封闭的环境中,所以能够较好地降低环境噪声(路噪、飞行器噪声和其他噪声等)对本试验造成的影响.

其次分析采用有限元方法导致的误差,从图12(d)和(h)仿真声强场图可近似推导出由仿真模拟得到的  $F_1(x_1 = -0.1 \text{ m}, y_1 = 0.24 \text{ m})$  和  $F_2(x_2 = 0.1 \text{ m}, y_2 = 0.24 \text{ m})$ ,与试验不同的是,仿真结果的两横坐标与理论值基本相同,但两纵坐标均略小于理论值,其原因主要是设计的横坐标理论值与零点较为接近,而纵坐标理论值与零点较远,并且有限元仿真条件非常理想化,忽略了许多实际的现实因素,所以会导致一定的误差.

最后,由于试验结果和仿真结果与理论值的一致性较好,采用本试验以及仿真方法可在一定程度上证明所设计的控制系统能够控制声学超表面操控声波实现声聚焦的焦点从  $F_1(x_1 = -0.1 \text{ m}, y_1 = 0.3 \text{ m})$  自左向右运动至  $F_2(x_2 = 0.1 \text{ m}, y_2 = 0.3 \text{ m})$  的功能.

对于具有声聚焦且焦点自下向上运动的声学超表面(AMS-BT)而言,仿真和试验结果如图13所示,其中图13(b)和(f)分别表示采用仿真方法得到的下焦点  $F_3$  和上焦点  $F_4$  的声压场图,从两静态声压场可分析出该超表面具有操控声波的焦点从  $F_3$  平移至  $F_4$  的运动趋势.图13(a)和(e)分别表示采用试验方法得到的  $F_3$  和  $F_4$  的声压场图,试验结果与仿真结果的一致性较好.图13(d)和(h)分别表示  $F_3$  和  $F_4$  的仿真声强场图,利用两图可大致分析出上下仿真焦点的坐标分别为  $F_3(x_3 = 0, y_3 = 0.1 \text{ m})$  和  $F_4(x_4 = 0, y_4 = 0.33 \text{ m})$ ,而最大聚焦强度与左右焦点的仿真强度几乎一致.此外,  $F_3$  和  $F_4$  的试验声强场分别如图13(c)和(g)所示,从两图可近似得出上下试验焦点的坐标为  $F_3(x_3 = 0, y_3 = 0.12 \text{ m})$  和  $F_4(x_4 = 0.012 \text{ m}, y_4 = 0.32 \text{ m})$ .将利用仿真和试验方法分别得到的下上焦点近似坐标与理论焦点坐标  $F_3(x_3 = 0, y_3 = 0.1 \text{ m})$  运动至  $F_4(x_4 = 0, y_4 = 0.35 \text{ m})$  进行分析对比可知,三者的纵横坐标的

偏差均小于0.03.产生偏差的原因与超表面操控声波从左焦点运动至右焦点的原因大概一致.由于试验结果和仿真结果与理论设计结果的一致性

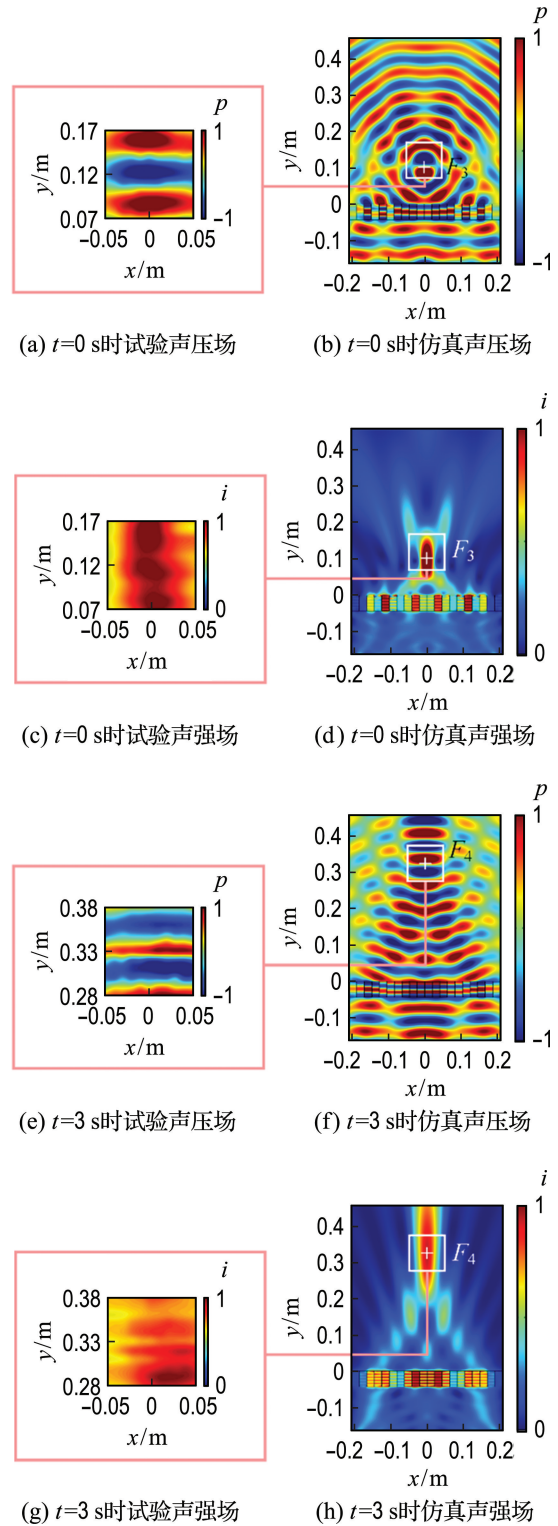


图13 AMS-BT 仿真和试验声压场及声强场图  
Fig. 13 AMS-BT simulation and test sound pressure field and sound intensity field diagrams

较好,可在一定程度上证明所设计的控制系统能够控制声学超表面操控声波实现声聚焦的焦点从下焦点  $F_3(x_3=0, y_3=0.1 \text{ m})$  自下向上运动至上焦点  $F_4(x_4=0, y_4=0.35 \text{ m})$  的功能。

对于具有声折射功能的声学超表面(AMS-R)而言,仿真和试验结果如图 14 所示,图 14(b)和(d)分别表示采用仿真手段得到的折射角从  $-\pi/4$  运动至  $\pi/4$  的声压场图,从两静态仿真声压场可分析出所设计的超表面可操控声波实现声偏转功能. 对应测量区域声场的试验声压场分别如图 14(a)和(c)所示. 从两图可分别近似得出  $t=0 \text{ s}$  时的试验起始偏转角为  $-\pi/4$  以及  $t=3 \text{ s}$  时的试验终止偏转角为  $\pi/4$ . 将利用理论、仿真和试验方法分别得到的起始偏转角和终止偏转角进行分析对比可知,三者的结果存在一定误差. 误差产生的原因与超表面操控声波实现焦点运动功能的原因类似. 由于试验结果和仿真结果与理论设计结果的一致性较好,可在一定程度上证明所设计的控制系统能够控制声学超表面操控声波实现声异常折射功能,并且控制系统运行较为平顺,稳定性较好。

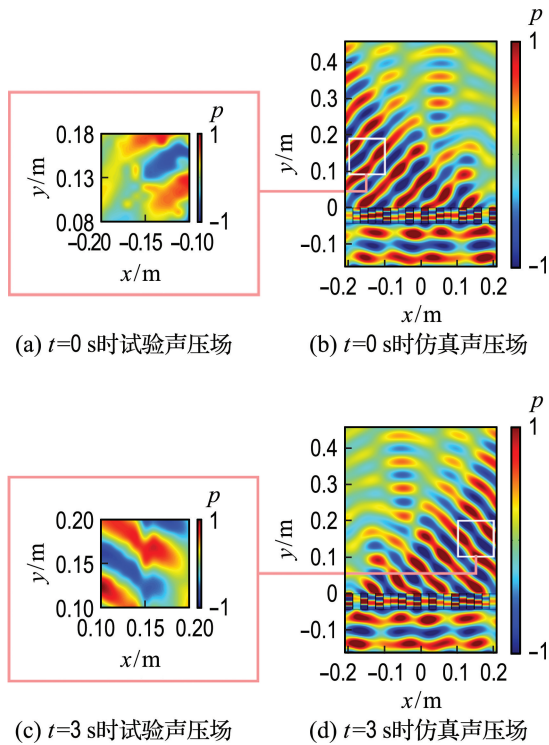


图 14 AMS-R 仿真和试验声压场图

Fig. 14 AMS-R simulation and test sound pressure field diagrams

## 4 结 论

(1)提出的一种主动式共振腔型声学超表面狭缝宽度  $d$  的修正方法可较好地满足电机运行速度要求,设计的控制系统改善了传统超表面因结构固定导致的可重构性差问题。

(2)设计的电机运动算法可使控制系统控制声学超表面调节狭缝宽度  $d$  实现声折射及平面波聚焦焦点自左向右运动和自下向上运动功能,且该算法对整个系统的误差影响在  $0\sim 1.1\%$ ,无累计误差,减少了系统运行时的噪声影响,系统运行平顺性得到提高,丰富了超表面功能。

(3)采用将狭缝宽度作为调节变量并结合可编程逻辑控制器的方法解决了目前主动式超表面因使用流体导致腔室体积时变引起的鲁棒性差问题,试验装置在不同倾斜状态下也能保持功能的完整性,增强了声学超表面的实际应用性。

## 参考文献:

- [1] LEE S H, PARK C M, SEO Y M, *et al.* Acoustic metamaterial with negative density [J]. **Physics Letters A**, 2009, **373**(48): 4464-4469.
- [2] YAO Shanshan, ZHOU Xiaoming, HU Gengkai. Investigation of the negative-mass behaviors occurring below a cut-off frequency [J]. **New Journal of Physics**, 2010, **12**(10): 103025.
- [3] JING Yun, XU Jun, FANG N X. Numerical study of a near-zero-index acoustic metamaterial [J]. **Physics Letters A**, 2012, **376**(45): 2834-2837.
- [4] XU Xianchen, LI Pei, ZHOU Xiaoming, *et al.* Experimental study on acoustic subwavelength imaging based on zero-mass metamaterials [J]. **Europhysics Letters**, 2015, **109**(2): 28001.
- [5] FLEURY R, ALÙ A. Extraordinary sound transmission through density-near-zero ultranarrow channels [J]. **Physical Review Letters**, 2013, **111**(5): 055501.
- [6] LI J, WANG W, XIE Y, *et al.* A sound absorbing metasurface with coupled resonators [J]. **Applied Physics Letters**, 2016, **109**(9): 091908.
- [7] YU Nanfang, GENEVET P, KATS M A, *et al.* Light propagation with phase discontinuities: Generalized laws of reflection and refraction [J]. **Science**, 2011, **334**: 333-337.

- 
- [8] CAI Feiyan, LIU Fengming, HE Zhaojian, *et al.* High refractive-index sonic material based on periodic subwavelength structure [J]. **Applied Physics Letters**, 2007, **91**(20): 203515.
- [9] ZHU J, CHRISTENSEN J, JUNG J, *et al.* A holey-structured metamaterial for deep-subwavelength acoustic imaging [J]. **Nature Physics**, 2011, **7**(1): 52-55.
- [10] LIU Fengming, CAI Feiyan, PENG Shanshan, *et al.* Parallel acoustic near-field microscope: A steel slab with a periodic array of slits [J]. **Physical Review E, Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics**, 2009, **80**(2 Pt 2): 026603.
- [11] JIA Han, KE Manzhu, HAO Rui, *et al.* Subwavelength imaging by a simple planar acoustic superlens [J]. **Applied Physics Letters**, 2010, **97**(17): 173507.
- [12] LI J, LEE F, YIN X, *et al.* Experimental demonstration of an acoustic magnifying hyperlens [J]. **Nature Materials**, 2009, **8**(12): 931-934.
- [13] CHRISTENSEN J, MARTÍN-MORENO L, GARCÍA-VIDAL F J. Enhanced acoustical transmission and beaming effect through a single aperture [J]. **Physical Review B**, 2010, **81**(17): 174104.
- [14] FANG N, XI Dongjuan, XU Jianyi, *et al.* Ultrasonic metamaterials with negative modulus [J]. **Nature Materials**, 2006, **5**(6): 452-456.
- [15] YANG Z, MEI Jun, YANG Ming, *et al.* Membrane-type acoustic metamaterial with negative dynamic mass [J]. **Physical Review Letters**, 2008, **101**(20): 204301.
- [16] 梅 军, 杨 旻, 杨志宇, 等. 薄膜型负质量密度声学超常介质 [J]. **物理**, 2010, **39**(4): 243-247.  
MEI Jun, YANG Min, YANG Zhiyu, *et al.* Membrane-type acoustic metamaterial with negative dynamic mass [J]. **Physics**, 2010, **39**(4): 243-247. (in Chinese)
- [17] MEI Jun, MA Guancong, YANG Min, *et al.* Dark acoustic metamaterials as super absorbers for low-frequency sound [J]. **Nature Communications**, 2012, **3**: 756.
- [18] YANG Min, MA Guancong, YANG Zhiyu, *et al.* Coupled membranes with doubly negative mass density and bulk modulus [J]. **Physical Review Letters**, 2013, **110**(13): 134301.
- [19] MA Guancong, YANG Min, XIAO Songwen, *et al.* Acoustic metasurface with hybrid resonances [J]. **Nature Materials**, 2014, **13**(9): 873-878.
- [20] LEE S H, PARK C M, SEO Y M, *et al.* Composite acoustic medium with simultaneously negative density and modulus [J]. **Physical Review Letters**, 2010, **104**(5): 054301.
- [21] YUAN Baoguo, CHENG Ying, LIU Xiaojun. Conversion of sound radiation pattern via gradient acoustic metasurface with space-coiling structure [J]. **Applied Physics Express**, 2015, **8**(2): 027301.
- [22] TANG Kun, QIU Chunyin, KE Manzhu, *et al.* Anomalous refraction of airborne sound through ultrathin metasurfaces [J]. **Scientific Reports**, 2014, **4**: 6517.
- [23] LI Yong, YU Gaokun, LIANG Bin, *et al.* Three-dimensional ultrathin planar lenses by acoustic metamaterials [J]. **Scientific Reports**, 2014, **4**: 6830.
- [24] LI Yong, LIANG Bin, GU Zhongming, *et al.* Reflected wavefront manipulation based on ultrathin planar acoustic metasurfaces [J]. **Scientific Reports**, 2013, **3**: 2546.
- [25] LI Yong, JIANG Xue, LI Ruiqi, *et al.* Experimental realization of full control of reflected waves with subwavelength acoustic metasurfaces [J]. **Physical Review Applied**, 2014, **2**(6): 064002.
- [26] YANG Yihao, WANG Huaping, YU Faxin, *et al.* A metasurface carpet cloak for electromagnetic, acoustic and water waves [J]. **Scientific Reports**, 2016, **6**: 20219.
- [27] ZHU Yifan, ZOU Xinye, LI Ruiqi, *et al.* Dispersionless manipulation of reflected acoustic wavefront by subwavelength corrugated surface [J]. **Scientific Reports**, 2015, **5**: 10966.
- [28] FAURE C, RICHOUX O, FÉLIX S, *et al.* Experiments on metasurface carpet cloaking for audible acoustics [J]. **Applied Physics Letters**, 2016, **108**(6): 064103.
- [29] GONG Keming, WANG Xiaofan, OUYANG Huajiang, *et al.* Tuneable gradient Helmholtz-resonator-based acoustic metasurface for acoustic

- focusing [J]. **Journal of Physics D - Applied Physics**, 2019, **52**(38): 385303.
- [30] GONG Keming, ZHOU Xin, OUYANG Huajiang, *et al.* Continuous manipulation of acoustic wavefront using a programmable acoustic metasurface [J]. **Journal of Physics D - Applied Physics**, 2021, **54**(30): 305302.
- [31] TIAN Zhenhua, SHEN Chen, LI Junfei, *et al.* Programmable acoustic metasurfaces [J]. **Advanced Functional Materials**, 2019, **29**(13): 1808489.

## Study of active acoustic metasurface and design of its control system

OUYANG Huajiang<sup>1</sup>, ZHOU Xin<sup>2,3</sup>, GONG Kemeng<sup>2,3</sup>, MO Jiliang<sup>\*2,3</sup>

- ( 1. School of Engineering, University of Liverpool, Liverpool L69 3GH, UK;  
2. Technology and Equipment of Rail Transit Operation and Maintenance Key Laboratory of Sichuan Province, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;  
3. School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China )

**Abstract:** In order to overcome the deficiencies of poor reconfigurability, single functionality and insufficient stability of current acoustic metasurfaces, a precision-tuneable multi-mode resonator-type acoustic metasurface is presented based on acoustics which contains a programmable logic controller. Firstly, the theoretical model of the slit width and phase variation of the metasurface is proposed. The slit width distributions required to achieve continuously tuneable acoustic focusing and acoustic refraction are calculated, respectively. Then they are modified based on the maximum speed of the motor in the actuation system. Secondly, the control system including a hardware system with single-master multi-slaver mode and an algorithm for regulating the motor rotation output is designed. Finally, several tests to modulate acoustic wave fronts are carried out on the proposed metasurface by using a self-developed test apparatus. How the metasurface manipulates the acoustic field of an incident plane wave is numerically simulated based on the finite element method. The experimental and numerical results show that the designed control system can accurately and synchronously tune the slit width of each unit of the metasurface and achieve multi functions. The error of the designed algorithm is between 0 and 1.1%. Moreover, the initial design of the control system is improved to achieve smoothness and robustness in its operation. The problems of the poor reconfigurability of the conventional acoustic metasurfaces as well as the time-varying volume of the resonator chamber caused by the fluctuation of the fluidic system are overcome by the proposed active acoustic metasurface, which can enhance the practical applicability of the metasurface. Thus, this research provides a certain guidance for acoustic metasurfaces in active acoustic wave manipulation.

**Key words:** resonator-type acoustic metasurface; calculation and modification of slit width; programmable logic controller; motor rotation output algorithm; acoustic wave fronts modulation experiment