

文章编号: 2095-2163(2021)03-0085-06

中图分类号: TN911.7

文献标志码: B

# 基于超声波相控阵的触觉反馈技术

包成杰<sup>1</sup>, 党征刚<sup>2</sup>, 张 兵<sup>1,2</sup>

(1 浙江理工大学 信息学院, 杭州 310018; 2 像航(上海)科技有限公司, 上海 200000)

**摘要:** 随着人机交互领域研究的不断发展, 交互途径已经从传统的视觉和听觉途径扩展到触觉途径。触觉是人类感知外界信息的重要途径之一。非接触式触觉反馈能够在 AR/VR 领域有更好的表现, 为虚拟现实中的场景交互提供触觉反馈。本文提出一种基于相控阵技术的方法来使超声波的波束聚焦以模拟触觉。通过 Matlab 进行超声波换能器声场仿真分析设计开发了基于 DSP (Digital Signal Processing) 和 FPGA (Field Programmable Gate Array) 双核结构的相控阵超声发射系统, 并进行了实验验证工作。系统通过 DSP 完成相位计算, 并通过 FPGA 实现高精度的相位控制。基于 Matlab 的声场分析结果与实验结果预期相符, 完成了基于超声波相控阵的非接触式触觉反馈原理样机的开发。

**关键词:** 超声相控阵; 触觉反馈; 仿真; 超声波束聚焦; FPGA

## Tactile feedback technology based on ultrasonic phased array

BAO Chengjie<sup>1</sup>, DANG Zhenggang<sup>2</sup>, ZHANG Bing<sup>1,2</sup>

(1 School of Informatics Science and Technology, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China;

2 Xianghang (Shanghai) Technology Co., Ltd., Shanghai 200000, China)

**[Abstract]** With the continuous development of research in the field of human-computer interaction, the interactive approach has expanded from the traditional visual and auditory approach to the tactile approach. Touch is one of the important ways for humans to perceive information from the outside world. Non-contact tactile feedback can perform better in the AR/VR field, providing tactile feedback for scene interaction in virtual reality. This paper proposes a method based on phased array technology to focus the ultrasonic beam for simulating touch. Using Matlab to perform sound field simulation analysis of ultrasonic transducer, and designing and developing a phased array ultrasonic transmission system based on DSP (Digital Signal Processing) and FPGA (Field Programmable Gate Array) dual-core structure and carrying out experimental verification, this system completes phase calculation through DSP, and realizes high-precision phase control through FPGA. The Matlab-based sound field analysis results are consistent with the experimental results, and the prototype of the non-contact tactile feedback principle based on ultrasonic phased array is completed. The final experimental results are consistent with the simulation results.

**[Key words]** ultrasonic phased array; tactile feedback; simulation; ultrasonic beam focusing; Field Programmable Gate Array

## 0 引言

随着现阶段人机交互领域的不断研究和发展, 对各种交互途径的准确性和可靠性提出越来越高的要求。触觉反馈提供了一种新的人机交互方式, 是现阶段人机交互领域的重要研究方向。触觉反馈的方式可分为 2 种: 接触式触觉反馈和非接触式触觉反馈, 这取决于其在使用过程中是否与设备直接接触。在非接触触觉反馈的研究中, 基于超声波相控阵的触觉反馈是国内外研究的热点。通过超声波在空中形成的声束聚焦而产生触觉反馈, 创造性地使用户能够摆脱设备的束缚, 增加了交互的舒适度, 可以广泛应用于教育、医疗、游戏等多个领域, 具有广阔的应用前景<sup>[1]</sup>。

目前, 超声波激发技术主要是通过通过在换能器两端施加高压脉冲产生超声波, 这种激发方式简单可靠, 但是发射信号参数难以调控, 需要搭配相控阵技术才能完成声束聚焦。本文通过声场仿真对超声波相控阵的声束聚焦进行分析, 并且利用 DSP 和 FPGA 双核结构来实现超声波换能器相位的精确控制, 提出了一种新型的多通道超声波相控阵发射系统。本文主要讨论了系统的设计结构与工作原理, 并通过实验对比仿真结果来验证通过超声波相控阵实现非接触式触觉反馈的可行性。

## 1 触觉反馈技术实现原理

### 1.1 超声波聚焦技术原理

超声波触觉反馈技术, 需要涉及到超声波相控

**作者简介:** 包成杰(1994-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 智能控制; 党征刚(1989-), 男, 高级工程师, 主要研究方向: 新一代电子技术、装备制造; 张兵(1963-), 女, 博士, 教授, 主要研究方向: 无线通信、无介质全息技术。

**通讯作者:** 张 兵 Email: zhang@feixiangtec.com

**收稿日期:** 2020-12-01

阵技术<sup>[2]</sup>。在电子学中,阵列是元素的排列,可以是输入或输出设备,例如扬声器和麦克风、无线电发射器或接收器、超声波换能器甚至是照相机。在本方案中用到的超声波换能器是输出设备,本文将在这种情况下讨论阵列排布方式。相控阵的几何排列可以有多个形状,如图1所示。

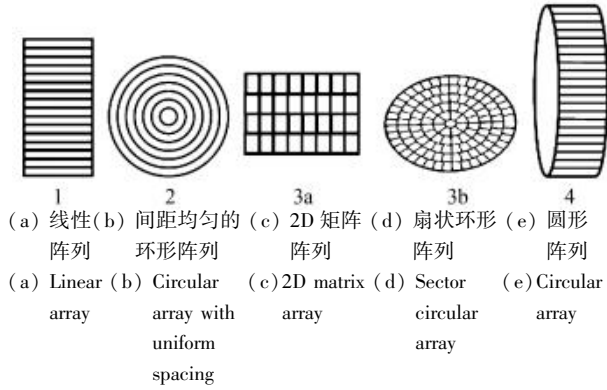


图1 相控阵换能器元件的几何形状示例

Fig. 1 Examples of the geometry of phased array transducer elements

阵列元素可以被多种方式驱动,可以是一次一行,也可以是单独激励等。当阵列中的每个元素的相位可以被单独控制时,将其称为相控阵。使用相控阵技术,可以通过控制每个超声波换能器的相位将发射的声场集中在给定方向上或者是一个很小的区域内。其原理是多个超声波换能器发射的超声波在聚焦点处产生叠加效应。通过控制各个超声波换能器激发信号的相位,从而使得每个超声波换能器发射的超声波在到达空间中指定某一点时具有相同的相位,即会在该点叠加增强,在该点外的空间由于相位不同则产生叠加减弱、甚至抵消,这样就实现了超声波的聚焦<sup>[3]</sup>,如图2所示。

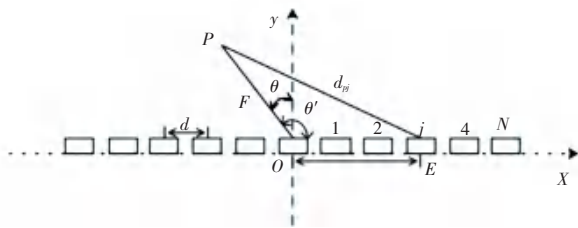


图2 相控超声聚焦原理图

Fig. 2 Principle diagram of phase-controlled ultrasonic focusing

对于超声波偏转聚焦,每个阵元的发射相位可以参考图2进行计算。以其内部的换能器的中间的点O作为参考发射点,超声波与y的偏转角为 $\theta$ ,焦距为F,聚焦点为P,设 $d_j$ 是第j个换能器E的坐标

位置, $\theta'$ 为发射声束和x方向夹角。则换能器E到聚焦点P的距离为:

$$d_{pj} = \sqrt{F^2 + d_j^2 - 2Fd_j \cos\theta'}, \quad (1)$$

其中, $d_j = (j-1)d$ , $d$ 表示相邻换能器间距( $j = 1, 2, \dots, N$ ), $N$ 表示换能器数目,则换能器E相对于参考点O的发射延时为:

$$\Delta_{ij} = \frac{F - d_{pj}}{c} = \frac{F - \sqrt{F^2 + d_j^2 - 2Fd_j \cos\theta'}}{c}. \quad (2)$$

## 1.2 超声波辐射压力的技术原理

本文提到的非接触式触觉反馈是基于超声波的非线性现象<sup>[4]</sup>:声波辐射压力。如果假设声波为平面波,声辐射压力 $P$ [Pa]可以被描述为:

$$P = \alpha E = \alpha \frac{I}{c} = \alpha \frac{p^2}{\rho c^2}, \quad (3)$$

其中, $E$ [ $J/m^3$ ]为超声波的能量密度; $I$ [ $W/m^2$ ]为声音强度; $c$ [ $m/s$ ]为声速; $p$ [pa]表示超声波的声压; $\rho$ [ $kg/m^3$ ]为介质的密度; $\alpha$ 是一个常数,范围为1~2,具体取决于物体表面的振幅反射系数 $R$ ; $\alpha = 1 + R^2$ 。如果物体表面可以完美地反射入射超声波, $\alpha = 2$ ;如果物体表面吸收了整个人射超声波, $\alpha = 1$ 。在超声波束在物体表面垂直反射的情况下,该表面在入射的方向上承受恒定的垂直力。上述公式表明,可以通过合成超声波 $p$ 的空间分布来控制辐射压力 $P$ 的空间分布。

在本文中使用的空气来作为超声波的媒介,而在过去的研究中水通常作为媒介。使用空气作为媒介具有2个优点。首先,由于对于恒定的声强 $I$ ,辐射压力 $P$ 与声速 $c$ 成反比,因此理论上在相同功率的刺激下,空气中的力( $c = 340$  m/s)是水中的力的4.4倍( $c = 1500$  m/s)。其次,与反射系数有关。皮肤(软组织) $Z_s$ 和空气 $Z_a$ 的声特性阻抗分别为 $1.63 \times 10^6$ 和 $0.0004 \times 10^6$  N·s/ $m^3$ 。在这种情况下,反射系数 $R$ 被确定为:

$$R = \left| \frac{Z_s - Z_a}{Z_s + Z_a} \right| \approx 0.9995, \quad (4)$$

由于99.9%( $=R^2 \times 100$ )的入射声能在皮肤表面反射,并具有可接受的侵入性,因此可以将超声波直接施加到皮肤上。在水作为介质的情况下,表面则需要反射膜,以避免通过水介质时大量能量被吸收。

采用空气作为介质是对于声波聚焦的空间分辨率和超声波频率的权衡。随着超声波频率变高,超声焦点的直径变小。从空间分辨率的角度出发,优

先选择较小的直径。但是,空气是有损耗的介质,平面声波的衰减系数 $\beta$ [Np/m]根据频率而变化,距离阵列平面距离 $z$ [m]处的能量密度 $E$ 被描述为:

$$E = E_0 e^{-2\beta z}. \quad (5)$$

其中, $E_0$ 是换能器表面的能量密度( $z=0$  mm)。假定在40 kHz的情况下,衰减系数值为 $1.15 \times 10^{-1}$  Np/m(即100 dB/100 m),并且与频率的平方成正比。超声波频率与 $z=100$  mm处的能量损失率间的关系即如图3所示。当频率为40 kHz时,能量损失为4%。但是,如果频率变成四倍大,则会损失50%的发射能量。所以本文针对40 kHz超声波频率进行分析验证,因为衰减相对较小,并且40 kHz超声换能器也比较容易由市面来购得。

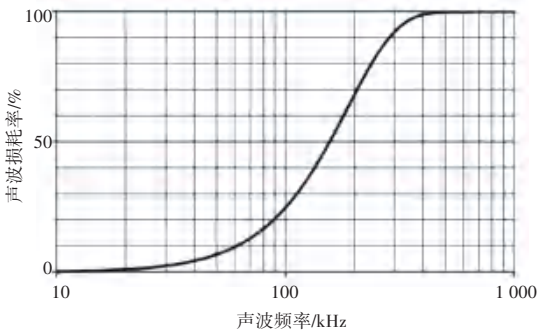


图3 平面距离为100 mm时声波频率与能量损耗率的关系

Fig. 3 The relationship between sound wave frequency and energy loss rate when the plane distance is 100 mm

## 2 超声波声场建模和仿真

影响超声波相控阵的声场聚焦效果的因素有很多,比如波速、阵元个数、焦点距离、平面距离等。要实现超声波聚焦实现触觉反馈,预先对影响相控阵的各个参数进行建模和仿真,是必不可少的重要环节。本文使用Field\_II来进行仿真分析。Field\_II是一个超声系统的Matlab仿真程序,由丹麦超声专家Jensen等设计,可以模拟超声波换能器的声场、使用线性声学原理进行超声成像<sup>[5]</sup>,能够控制动态聚焦和轨迹。

采用正弦调制的高斯脉冲信号作为仿真的信号波形,表达式为:

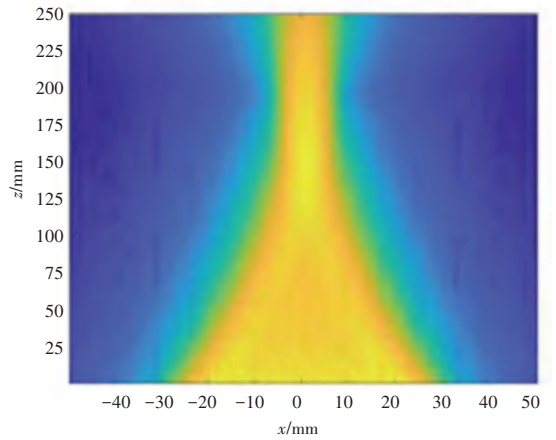
$$s(t) = \exp\left\{-2\pi\frac{\alpha t}{\tau} - \frac{\pi}{\tau} \left(\frac{t-t_0}{\tau}\right)^2\right\} \cos(2\pi f_c t). \quad (6)$$

其中, $f_c$ 为信号的中心频率, $t_n$ 为脉冲宽度参数。

超声相控阵发射声场仿真基本参数:信号的中

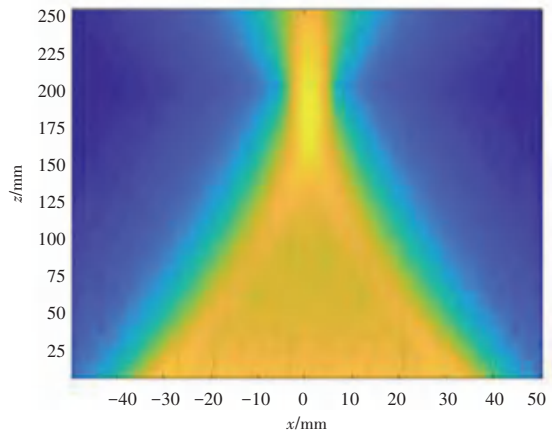
心频率 $f_c = 40$  kHz,声速 $c = 340$  m/s。阵元排布方式分别为 $6 \times 6$ 和 $9 \times 9$ 的矩阵。

研究后可得阵元个数对聚焦声场的影响见图4。由图4可知,图4(a)和图4(b)分别是相同聚焦距,36阵元和81阵元的聚焦声场比较。由仿真结果看出,在其他参数不变的情况下,阵元个数 $N$ 越大,换能器阵列的聚焦效果越理想,焦点越小,波束的能量越集中。阵元个数的增加,使得有效聚焦区域减少,可以提高聚焦点的分辨率,但阵元个数的增加也使得处理的数据量增加。



(a) 36阵元,200 mm 焦距

(a) The number of array elements is 36, focal length is 200 mm



(b) 81阵元,200 mm 焦距

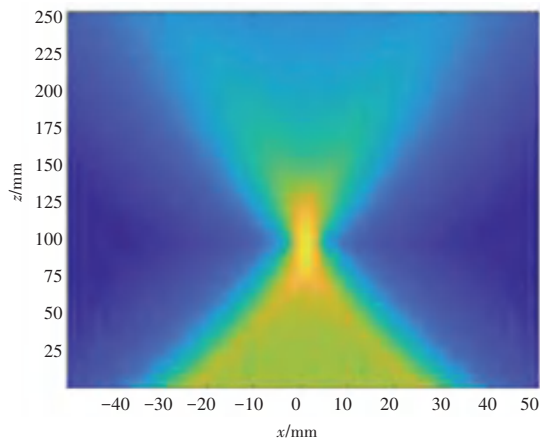
(b) The number of array elements is 81, focal length is 200 mm

图4 阵元个数对聚焦声场的影响

Fig. 4 The influence of the number of array elements on the focused sound field

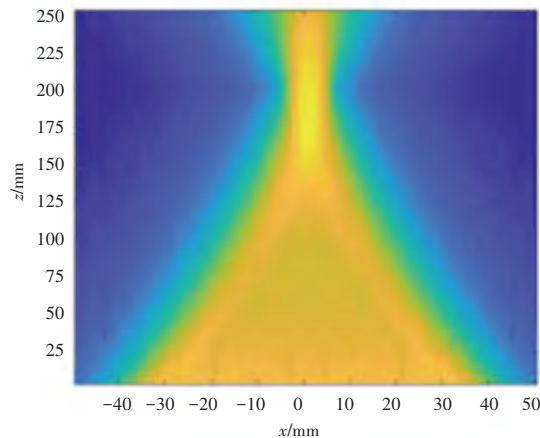
接下来,研究中得到的聚焦深度对聚焦声场的影响见图5。由图5可知,焦距越大,声束越宽,焦点越发散,聚焦点的分辨率越低。至此,在本文中,将焦点固定在辐射表面上方100 mm处,由此来实现基于超声波相控阵的触觉反馈技术。





(a) 81 阵元, 100 mm 焦距

(a) The number of array elements is 81, focal length is 100 mm



(b) 81 阵元, 200 mm 聚焦

(b) The number of array elements is 81, focal length is 200 mm

图 5 聚焦深度对聚焦声场的影响

Fig. 5 The effect of the depth of focus on the focused sound field

### 3 试验平台

#### 3.1 系统的结构框图及功能概述

为了实现空中非接触式触觉反馈的目的,依据超声波相控阵和超声波辐射压力的技术原理,本文设计了一个基于超声波相控阵技术的非接触式触觉反馈系统。系统整体架构如图 6 所示,整个系统分为超声波换能器阵列、驱动模块和主控模块三个部分。

整个基于超声波相控阵的非接触式触觉反馈系统的工作流程为:首先将聚焦点坐标参数通过串口发送给 DSP,由 DSP 完成主控单元的核心算法计算,根据聚焦坐标来计算出各个换能器所对应的相位。DSP 主频可以高达 465 Mhz,以确保相位实时计算的低延时、高分辨率,来保证聚焦点的精度。然后,将相位信息发送给驱动模块的 FPGA。因为 FPGA 芯片的信号输出电压为 3.3 V,而换能器的驱

动电压为 24 V,所以驱动单元的 FPGA 根据接收到的相位信息,要将信号输出到运算放大电路,运算放大器将该控制信号放大后,输出给超声波换能器阵列。

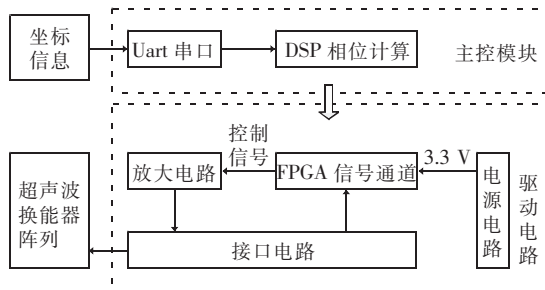


图 6 超声波相控阵的非接触式触觉反馈整体架构

Fig. 6 Overall architecture of the non-contact haptic feedback of the ultrasonic phased array

超声波换能器阵列在接收到控制信号后,各个发射器开始工作,完成在空中位置的超声波聚焦,从而实现非接触式触觉反馈的功能。

#### 3.2 超声波驱动设计

超声波换能器需要提供高达 24 V<sub>pp</sub> 的激励电压,市面上很容易找到一款满足要求且低成本的超声波专用驱动芯片。本文采用的超声波发射头内部采用压电陶瓷片结构,当在其两级外加脉冲信号,其频率等于压电晶片的固有震荡频率时,压电晶片将会产生共振,并带动共振板振动,产生超声波<sup>[6]</sup>。设计中采用双路运算放大器,其特点是:具有较低的输入偏置电压和偏移电流,输入级配有较高的输入阻抗;内部具有补偿电路;谐波失真率 0.003%,增益带宽为 3 MHz;最大工作电压为 ±24 V,有着较大的工作电压范围。另一方面,可以同时驱动 2 个超声波换能器单元,减少驱动器芯片的用量。整个驱动电路由 41 个运算放大器组成,对 81 个通道的超声波换能器控制信号进行放大。以第一个放大电路为例,阐述放大电路的组成及增益,如图 7 所示。

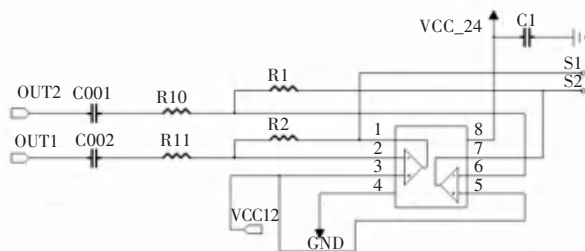


图 7 放大电路单个功放原理图

Fig. 7 Schematic diagram of a single power amplifier of the amplifier circuit

放大电路采用双相放大电路结构, 单相放大器的输入输出增益计算如公式为:

$$\frac{S}{OUT} = -\frac{R_1}{R_{10}} \quad (7)$$

根据实际需要设计放大电路放大倍数为 7.5 倍。输入端加入隔直电容 C001 隔离输入端的直流电流, 由于增加隔直电容会对调制信号滤波, 造成信号失真, 选用经测试合适的电容, 确保放大后的输出信号失真较小。经测试输入信号峰值为 3.3 V, 输出电压峰值约为 24 V<sub>pp</sub>, 放大倍数约为 7.5, 符合设计要求, 输出电压能够满足超声波换能器所需的驱动电压要求。

### 3.3 超声波换能器阵列设计

超声波相控阵有多种几何排列形状参见图 1, 但是在本文中需要兼顾触觉反馈模块化设计, 用来与各种虚拟现实技术进行结合以提升交互的自然性、准确性, 更方便地对阵列进行拓展, 采用了平面矩阵阵列。通过对各个换能器的激励信号进行相位控制, 平面超声波相控阵可以实现触觉反馈、超声悬浮、方向扬声器等应用需求。

本文中采用 9×9 平面超声阵列。超声波换能器支持将 40 kHz 的激励信号转换为超声波。所有换能器的 2 个引脚均通过连接器引出, 用于连接超声波驱动模块。

### 3.4 驱动模块各通道相位仿真

首先, 由 DSP 获取的焦点坐标信息后, 通过算法得出各个换能器的相位数据, 驱动模块中的 FPGA 芯片接收来自 DSP 的串口信息。然后, 利用 FPGA 完成对各个换能器的信号激励。采用 VHDL 硬件语言在片内构建算法模块, 在 ISE 软件中进行编译、综合、仿真, 最终实现控制相位发射。利用 ModelSim (软件) 对部分通道的相位仿真如图 8 所示。

驱动模块选取最中间的线性阵列的输出信号时序见图 8, 仅展示图 9 中 S<sub>1</sub> ~ S<sub>9</sub> 九个通道的相位信号时序。



图 8 超声波相控阵聚焦发射相位信号时序图

Fig. 8 Timing diagram of phase signal emitted by ultrasonic phased array focusing

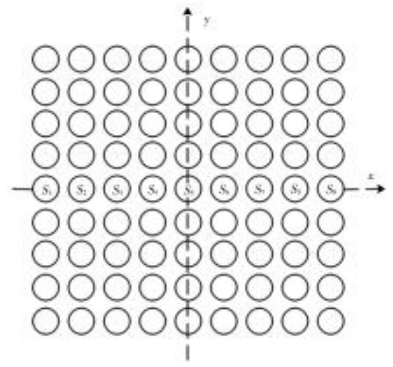


图 9 换能器阵列通道示意图

Fig. 9 Schematic diagram of transducer array channel

## 4 实际测试

本文设定超声波换能器相控阵聚焦的焦距为距离换能器发声部位 100 mm 处, 并根据相控阵聚焦算法算出 81 通道之间的相位。通过 DSP 将计算得到的各相位值发送给 FPGA 并进行相应的相位配置, 使各个通道根据各自不同的相位发射激励脉冲信号。设置聚焦点为阵列中心位置上方, FPGA 的单个周期为 1/24 μs。超声波换能阵列图 9 中的 S<sub>1</sub> ~ S<sub>9</sub> 通道的相位见表 1。与理论计算得到的相位对比, 可以得出, 实际相位和理论相位误差小。

表 1 相位数据对比

Tab. 1 Phase data comparison				ns
通道数	理论相位	实际相位	绝对误差	
S <sub>1</sub> , S <sub>9</sub>	27.80	27.60	0.2	
S <sub>2</sub> , S <sub>8</sub>	16.00	16.50	- 0.5	
S <sub>3</sub> , S <sub>7</sub>	7.25	7.25	0	
S <sub>4</sub> , S <sub>6</sub>	1.80	1.70	0.1	
S <sub>5</sub>	0	0	0	

为了验证超声波相控阵聚焦效果, 实验过程详见图 10。由图 10 可以看到, 将超声波换能器放置于水平桌面上, 在换能器阵列上方 100 mm 的平面上, 均匀悬挂 9 个小圆纸片参见图 10(a), 通过驱动聚焦点在中间中心位置以及右侧中心位置的上方, 来验证在空中聚焦点的聚焦效果。在聚焦位置上, 由于纸片受到了聚焦力的作用发生偏移。由图 10(b) 可见聚焦点位于中间位置上方, 由图 10(c) 可见聚焦点位于右边位置上方, 由此验证了超声波声场的聚焦的效果。

(下转第 93 页)