

基于 1-3 压电复合材料的相控聚焦系统

郝 琦¹, 何 敏¹, 王科鑫¹, 曾德平^{1,2}, 叶方伟^{1,2}

(1. 重庆医科大学 生物医学工程学院, 省部共建超声医学工程国家重点实验室培育基地, 超声医学工程重庆市重点实验室, 重庆 400016;

2. 超声医疗国家工程研究中心, 重庆 401121)

摘 要:针对相控聚焦超声系统控制电路复杂、移相精度低, 锆钛酸铅(PZT)材料制备的换能器转换效率较低的问题。控制电路采用 Verilog HDL 语言将通信、倍频锁相、信号发生及信号移相功能集成在现场可编程门阵列(FPGA)中。换能器采用 1-3 型压电复合材料制作。实验结果显示, 该相控聚焦系统提高了电路集成度与移相精度及换能器的电声转换效率。

关键词:相控阵; 现场可编程门阵列(FPGA); 超声聚焦; 1-3 压电复合材料

中图分类号:TM282

文献标识码:A

Realization of Phased Focused Ultrasound System Based on 1-3 Piezoelectric Composites

HAO Qi¹, HE Min², WANG Kexin¹, ZENG Deping^{1,2}, YE Fangwei^{1,2}

(1. School of Biomedical Engineering, Chongqing Medical University, State Key Lab. of Ultrasound in Medicine Engineering of Ministry training base, Ultrasound Medical Engineering Lab. of Chongqing, Chongqing 400016, China;

2. National Engineering Research Center of Medical Ultrasound, Chongqing 401121, China)

Abstract: Aiming at the complexity of the control circuitry, low phase shift accuracy and the low conversion efficiency of transducer for phased focused ultrasound system, we integrate communications, frequency lock, signal generation, signal phase shift function in a FPGA chip by Verilog HDL language. The transducer is fabricated with 1-3 piezoelectric composites. The experimental results show that the phased focused system improves the circuit integration, phase shift accuracy of circuit and electro-acoustic conversion efficiency of transducer.

Key words: phased array; FPGA; focused ultrasound; 1-3 piezoelectric composites

0 引言

经过 10 余年的发展, 高强度聚焦超声(HIFU)技术^[1-2]从检测领域拓展到治疗领域, 逐渐成为肿瘤治疗的新手段。它让医生在不破坏正常组织的基础上便能切除肿瘤, 实现了“治疗——让病人受伤害更小”的梦想, 被喻为 21 世纪“科技前沿”。

近年来, 采用相控阵进行电子调焦和聚焦的方法正在逐步发展。其核心是控制超声换能器中不同单元的触发时序, 在精确的时序控制下, 不同单元发出的超声波在空间发生干涉, 产生所需要的合成波

束, 实现电子聚焦和焦点运动。相控的关键是信号的控制, 目前多为单片机与延时电路混合控制, 该方式电路复杂, 精度较低。本研究采用一块现场可编程门阵列(FPGA)芯片实现了 61 路信号的高精度控制^[3-4]。

换能器采用 1-3 压电复合材料^[5-6]制作的 61 阵元相控超声换能器, 1-3 型压电复合材料是未来高强度聚焦超声换能器的重要材料, 研究表明 1-3 型压电复合材料具有特殊结构, 能克服压电陶瓷在弹性、脆性等方面的缺点, 增强复合材料在纵向振动耦合能力, 增加换能器带宽, 降低声阻抗, 提高电声转

收稿日期: 2015-04-04

基金项目: 国家自然科学基金委重大科学仪器设备研制专项基金资助项目(81127901), 国家自然科学基金资助项目(81201102, 112744040), 国家重点基础研究发展计划(“九七三”计划)基金资助项目(2011CB707900)

作者简介: 郝琦(1989-), 男, 河北石家庄人, 硕士生, 主要从事相控聚焦电路设计的研究。通信作者: 曾德平, 女, 副教授, 主要从事压电陶瓷及换能器的研究。

换效率。

1 1-3型压电复合材料的制备

本研究制备1-3型压电复合材料的方法是“切割-填充法”,即

1) 沿与压电陶瓷片极化轴相垂直方向进行准确的切割出符合设计要求的凹槽。

2) 将双酚A型环氧树脂与甲基四氢苯酐固化剂(材料参数见表1)按1:1的质量比混合均匀后浇注在切割出的凹槽内。

表1 环氧树脂与固化剂参数

材料	黏度/ (mPa·s)	密度/ (kg/m ³)	环氧/ (eq/100 g)	酐基 含量
双酚A型 环氧树脂	9 000~ 1 300	1 200	0.52	—
甲基四氢 苯酐固化剂	100~300	1 200	—	34%

3) 将材料置于常温下凝固0.5 h后,放入烘箱中在80℃下进行10 h软固化,然后再升温至100℃固化,形成1-3复合材料。最后经被覆电极,极化后制成换能器阵元,制备流程如图1所示。

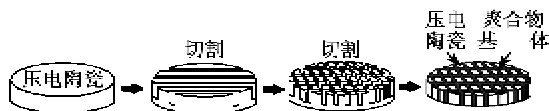


图1 “切割-填充法”制备基本步骤

对1-3型压电复合材料制作电极是一个难点,目前通用方法为化学电镀膜法、磁控溅射镀膜法和铜箔覆膜法。其中化学电镀膜法与磁控溅射被覆膜法所镀电极附着力较好,但焊点不稳定易脱落,且成本较高;铜箔覆膜法的附着力较前两种方法稍差,但由于铜箔电极的完整性使其焊点不易脱落,且成本较低。故本设计采用加压加温的方法对材料进行铜箔覆膜,覆膜流程为在50℃恒温下,用工业压机,在水平支撑体上对1-3复合材料进行1 h的持续加压。通过此种覆膜方式,在不影响1-3型复合材料性能的基础上,既增强了电极焊点的脱落拉力,又增强了铜箔与复合材料间的附着力。

2 相控阵聚焦系统换能器制作

本研究中相控阵聚焦换能器采用1-3压电复合材料,设计制作了一个焦距150 mm,开口直径 $\varnothing 150$ mm,频率790 kHz的壳式聚焦换能器。其中每个压电阵元直径为 $\varnothing 14.5$ mm,压电陶瓷柱为

1.08 mm $\times$ 1.08 mm $\times$ 2.0 mm,压电相所占复合材料体积比为60.72%。相控阵共61阵元,图2为相控阵换能器的平面排布示意图。图3为相控聚焦换能器实物。为了比较研究,设计了一个相同尺寸的传统压电陶瓷换能器。

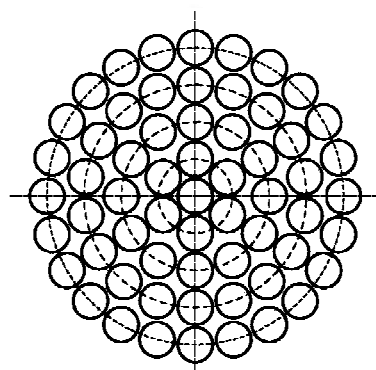


图2 相控阵换能器阵元排布平面图

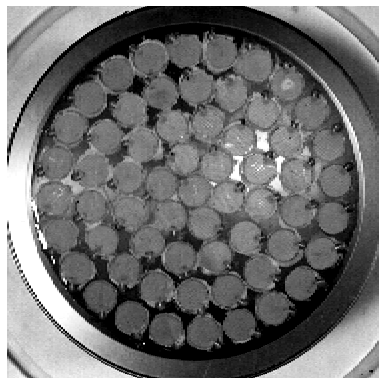


图3 1-3型相控阵换能器实物图

3 FPGA相控电路设计

本研究采用Verilog HDL作为硬件描述语言,它是一种以文本形式来描述数字系统硬件的结构和行为的语言,用它可表示逻辑电路图、逻辑表达式,还可表示数字逻辑系统所完成的逻辑功能。采用Quartus II开发工具,Quartus II可完成FPGA的设计、综合、仿真等环节。FPGA^[7-9]芯片的主要功能是实现信号的控制与延时。相应的在用Verilog HDL语言编写时设计了信号控制模块和信号延时模块及RS-232串口通信模块和倍频锁相(PLL)模块。

PC机与FPGA通过RS-232接口进行通信,如图4(a)所示。输入FPGA的信号有时钟信号,复位信号和549位的串行信号3路。当时钟达到上升沿时,FPGA开始工作,从而驱动谐振功率放大器。复位信号Reset能使FPGA的全部(I/O)置为低电平

使谐振功率放大器停止工作。

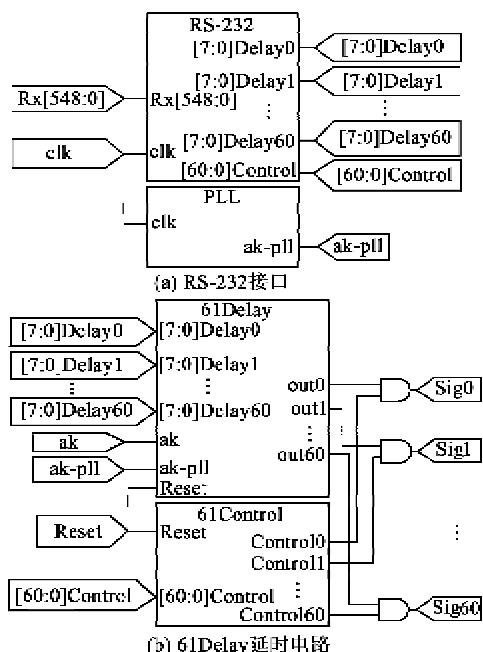


图4 FPGA内部模块原理图

RS-232电路将输入的549位串行信号译码为1路61位的[60:0]Control信号与61路8位的[7:0]Delay0、[7:0]Delay1、...[7:0]Delay60信号。随后将[60:0]Control信号送入61Control控制电路,将8位的[7:0]Delay0、[7:0]Delay1、...[7:0]Delay60信号送入61Delay延时电路。

PLL倍频锁相电路将输入的时钟信号Clk倍频锁相为Clk-pll时钟信号并输入到61Delay电路中,如图4(a)所示。其中时钟Clk的频率为50 MHz,倍频锁相后的时钟Clk-pll频率为200 MHz。

61Delay延时电路主要实现信号的移相,如图4(b)所示,61路移相信号送入电路后,电路首先通过工作在200 MHz的延时电路产生PC机所要求的延时,产生后将使能信号置为高电平,同时信号发生电路在检测到使能信号达到上升沿时刻,通过工作在50 MHz的时钟产生频率为790 kHz的方波并送入相应的逻辑与门内。设 f_1 为输出信号频率, f_2 为延时控制器的时钟频率,那么输出信号的相位延时精度为

$$\alpha = \frac{360^\circ}{(f_1/f_2)} \quad (1)$$

本设计所使用的换能器谐振频率为790 kHz,故输出信号频率为790 kHz,延时控制器采用200 MHz的时钟。即相位延时精度为 $360^\circ/253 =$

1.42°,这个精度满足设计要求。

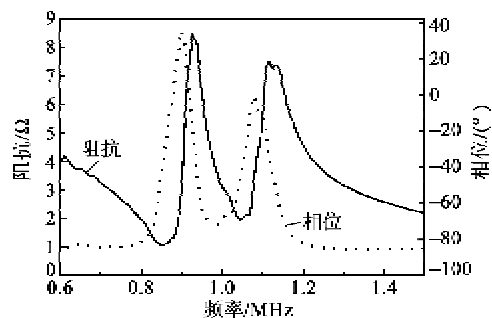
61Control控制电路主要将控制信号译码并送入相应的逻辑与门内,如图4(b)所示,61位[60:0]Control信号送入电路后,电路将其译为61路1位的控制信号并送入相应的逻辑与门内。当控制信号为高电平时,逻辑与门输出方波;当控制信号为低电平时,逻辑与门无输出。

FPGA的I/O端口可以自动锁定,即如果无新的指令到达,所有输出引脚处于原有状态。只有在PC机的控制下,FPGA的I/O端口输出状态才会改变。FPGA输出接入到LM5114和谐振功率放大器上,以此控制阵元的通断,这样就可实现全部模块功能。

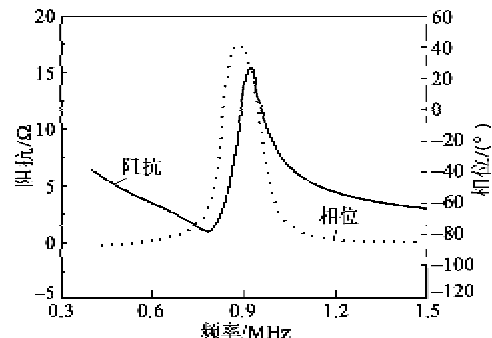
4 结果与讨论

4.1 换能器测试

采用Agilent 4294A阻抗分析仪分别测试了1-3型相控阵换能器和同尺寸的传统自聚焦换能器的频率特性曲线,结果如图5所示。



(a) 基于PZT材料的传统自聚焦换能器的频率特性曲线图



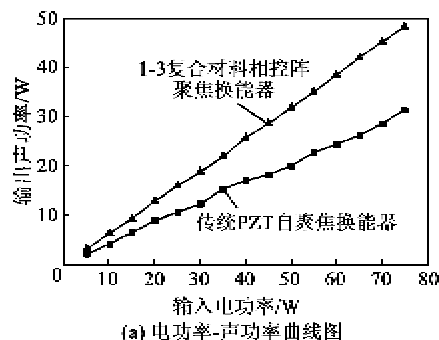
(b) 1-3复合材料的相控聚焦换能器的频率特性曲线图

图5 传统自聚焦换能器与1-3材料相控阵换能器频率特性曲线

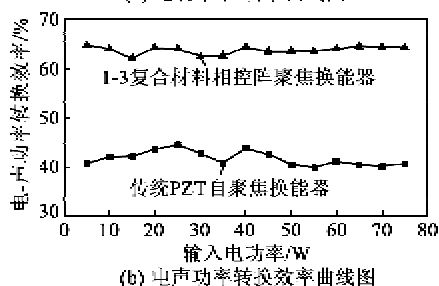
对比图5(a)、(b)可知,基于1-3材料的相控阵换能器有良好的阻抗特性曲线,波形和带宽优于传统自聚焦换能器。较宽的频带有助于提高换能器的工作稳定性,可见采用1-3压电复合材料能有效改善换能器的性能。

本实验采用OHAUS公司生产的AdventureTM Pro超声功率计对PZT型和1-3型换能器

进行了声功率测试。图6(a)、(b)分别为PZT型和1-3型聚焦换能器的电功率-声功率转换曲线图。从图6(b)分析可得,基于PZT材料的换能器电声转换效率约为41.95%,而基于1-3材料的换能器电声转换效率约为63.89%。由此可见,1-3材料能有效地提高换能器的电声转换效率,比传统换能器提高约88%。



(a) 电功率-声功率曲线图



(b) 电声功率转换效率曲线图

图6 电声转换曲线图

4.2 相位调节与测试

利用以上开发的61路实验系统,结合谐振式功率放大器,进行实验验证,通过移相模块产生相位差为 45° 、 90° 、 180° 的输出信号,并使用Agilent示波器对移相信号和功率放大器的输出信号进行测量,结果如图7所示。通过对比可发现,移相信号及功率放大器的输出信号相位差均保持了初始相差,证明该系统实现了相位调节功能。

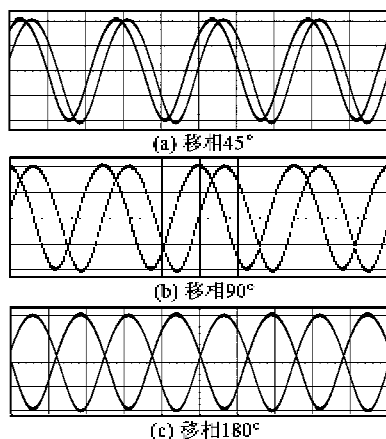


图7 相位控制输出信号

4.3 聚焦性能测试

为了验证相控聚焦系统性能,我们将相控阵聚焦系统所有61路信号输出相位调整一致,使超声聚焦于换能器的几何中心处并进行声场扫描^[10-11],扫描结果如图8所示。

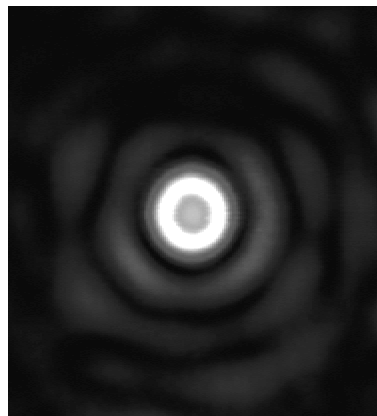


图8 平面声场扫描结果

该结果表明本研究设计的相控聚焦系统能很好的控制换能器每一路阵元的相位。图像表明声压在换能器几何中心处达到最大,即超声聚焦于换能器几何中心处,证明相控聚焦系统拥有良好的超声聚焦性能。

5 结束语

本研究采用1-3压电复合材料制作的相控阵换能器,并基于FPGA芯片设计制作了61路移相精度为 1.42° 的相控聚焦系统。该系统相对于传统相控系统转换效率提高约80%,信号延时方式拥有更高的移相精度。将设计程序通过Quartus软件下载到EP4C10E22C8N为核心芯片的控制板上进行测试,观察信号移相及声场聚焦性能,测试结果满足设计需求。该系统的应用可实现根据肿瘤区域的大小及深度,通过相控聚焦系统调节相位与幅度实现焦点的精准控制,且可实现多焦点聚焦,提高治疗效率。

参考文献:

- [1] 陈刚,王洪诚,王钰涵,等.基于FPGA的自动相机聚焦电机伺服控制系统集成电路(IC)设计与实现[J].微电机,2012,45(7):50-54.
- [2] 王平,高阳,范文政,等.一种基于相对声程差的高精度逐点聚焦实现方法[J].声学学报,2012,37(5):508-515.
- [3] 刘文杰,沈国峰,吴昊,等.基于FPGA技术的P-HIFU系统相控信号发生器的研制[J].中国医疗器械杂志,

- 2012, 36(1):1-3.
- [4] 史兴,刘丽佳,余龙江. 一种基于 FPGA 的数字超声电子聚焦系统的设计[J]. 计算机与数字工程, 2006, 33(12):132-135.
- [5] 鲜晓军,林书玉,王登攀,等. 基于 1-3-2 型压电复合宽频带水声换能器研究[J]. 压电与声光, 2014, 36(4): 491-493.
- XIAN Xiaojun, LIN Shuyu, WANG Dengpan, et al. Study of broad-band underwater transducers based on 1-3-2 piezocomposite material [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2014, 36(4):491-493.
- [6] 汤旭东,曾德平,杨增涛,等. 基于 1-3 压电复合材料的透镜式聚焦换能器设计[J]. 压电与声光, 2013, 35(4): 545-548.
- TANG Xudong, ZENG Deping, YANG Zengtao, et al. Designing of a lens-focused transducer using 1-3 piezoelectric composites [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2013, 35(4):545-548.
- [7] 殷帅峰,何富连. 基于相控延时原理的综放设备超声无损检测技术[J]. 煤矿安全, 2013, 44(7):91-94.
- [8] 马锐锋,沈国峰,乔杉,等. MRI 引导的相控型 HIFU 系统框架设计与软件开发[J]. 中国医疗器械杂志, 2013, 2(5):96-99.
- [9] 邱明波,李乔亮,陈昕,等. 超声弹性成像声辐射力激励模块设计[J]. 中国医疗器械杂志, 2013, 37(5):322-326.
- [10] 周文征,王意喆,张千,等. 64 阵元高强度聚焦超声相控换能器的仿真研究[J]. 压电与声光, 2014, 36(3): 424-427.
- ZHOU Wenzheng, WANG Yizhe, ZHANG Qian, et al. Simulation study on a 64-element phased array for high intensity focused ultrasound [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2014, 36(3):424-427.
- [11] HUANG G L, CHUNG H Y, LIU H L. A transmit/receive 256-channel ultrasound phased array driving system design and strategy for transrib thermal therapy[C]//S. I.: Ultrasonics Symposium (IUS), 2011 IEEE International, 2011:494-497.
-
- (上接第 661 页)
- [8] KALITA G, ARYAL H R, ADHIKARI S, et al. Fluorine incorporated amorphous carbon thin films prepared by Surface Wave Microwave Plasma CVD[J]. Diamond and Related Materials, 2008, 17(7/10):1697-1701.
- [9] LUKASZKOWICZ K, MUKHERJEE S, BALIN K, et al. Characteristics of CrAlSiN+DLC coating deposited by lateral rotating cathode arc PVD and PACVD process[J]. Applied Surface Science, 2014(312):126-133.
- [10] BANERJEE D, MUKHERJEE S, CHATTOPADHYAY K K. Synthesis of amorphous carbon nanowalls by DC-PECVD on different substrates and study of its field emission properties[J]. Applied Surface Science, 2011, 257(8):3717-3722.
- [11] 鲁占灵,张兵临,姚宁,等. 非晶碳膜中 sp^2 和 sp^3 相的检测方法[J]. 材料导报, 2006(6):98-101.
- LU Zhanling, ZHANG binlin, YAO Ning, et al. The characterization methods used to determine sp^2 and sp^3 bonding carbon of amorphous carbon film[J]. Materials Review, 2006(6):98-101.
- [12] LIAO M, ZHANG Z, WANG W, et al. Field-emission current from diamond film deposited on molybdenum [J]. Journal of Applied Physics, 1998, 84(2):1081-1084.
- [13] 陈亮. 非线性方程的迭代解法及其理论分析[D]. 上海:上海大学, 2013.
- [14] MAITY S, GOSWAMI S, CHATTOPADHYAY K K. Amorphous carbon nanotube-polyaniline core-shell nanostructures for efficient cold cathode applications [J]. RSC Advances, 2013, 3(48):26321-26327.