

# 超声数字式相控阵换能器动态聚焦系统研制 \*

刘 晨 魏 炜 姜永亮 汪承灏 祖庆夕 平云轩

(中国科学院声学研究所 北京 100080)

(涿州物探研究院 涿州 072752)

1999 年 9 月 17 日收到

**摘要** 本文是研制超声相控阵换能器动态聚焦系统, 它包括数字式多通道信号发射系统和两种超声相控阵换能器。用数字式多通道信号发射系统产生多路数字信号, 通过改变每路信号的时延(相位), 控制相控阵换能器的各个阵元, 使它们发出的声束在空间某点聚焦。我们对这两种相控阵进行了实验测量, 结果表明, 用数字控制的相控阵换能器, 可以实现精密的动态聚焦, 并可取得良好的聚焦效果。

**关键词** 超声聚焦, 动态聚焦, 超声换能器, 相控阵

## Ultrasounic digital phased array dynamic focusing system

Liu Chen Wei Wei Jiang Yongliang Wang Chenghao

(Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Zu Qingxi Ping Yunxuan

(Geophysical Prospecting Institute, ZhuoZhou 072752)

**Abstract** This paper focuses on developing a digital ultrasonic phased array transducer system which can realize the focusing and scanning of sound beams. The system consists of a digital multi-channel transmitting circuit and two kinds of ultrasonic phased array transducers. Sound beams, produced by the array elements, can be focused onto a point by using this digital transmitting circuit to control the signal phase of each channel. Experimental results indicate that the phased array transducers can realize dynamic focusing with high precision.

**Key words** Ultrasonic focusing, Dynamic focusing, Ultrasound transducer, Phased array

## 1 引言

利用超声进行诊断和治疗, 已经成为医学

生物工程上最重要的分支之一。其中用聚焦声束实现加热来治疗肿瘤, 粉碎结石等, 已得到人们的重视<sup>[1]</sup>。超声聚焦对于超声诊断学也愈

\* 国家自然科学基金重点项目资助(批准号 19634050)

来愈重要, 因为很自然, 人们总是希望看到更小、更细微的组织结构, 这不仅要求提高工作频率, 而且要求声束聚焦。

声束的聚焦与光束一样, 可以用几何透镜、物理透镜(菲涅耳条带)、或者将换能器直接作成凹面阵实现聚焦<sup>[2]</sup>。这些声束聚焦的方法, 其焦点都是固定的, 而超声治疗和超声诊断成像都常需要调整焦点(改变焦距和聚焦的方向), 用以上这些方法, 只有用机械方法调焦, 但是机械调焦很不方便, 速度也慢, 这就限制了它的应用。

于是相控阵(Phased Array)方法被提出来, 它是用电子技术调整焦点位置和聚焦的方向, 实现动态聚焦调节。它的基本思想是调整各阵元发射信号的相位, 使得各阵元到达焦点的声束具有相同相位, 这就实现了聚焦。最初这种调相的移相器还是模拟的<sup>[3]</sup>, 而模拟式调相的精度不高。后来改成数字式延迟线进行调相<sup>[4]</sup>。实际上目前集成电路技术发展已经可以产生全数字控制信号, 即不但信号的延时、相移可以控制, 就连信号的波形(包括频率、幅度、包络)都可以任意改变。研制这样一套数字式多通道信号发射设备已成为可能, 它的功能更为强大, 不但可以在连续波状态下工作, 而且也能在脉冲波状态下工作。这特别适合于超声成像方面的要求。

目前常用的相控阵换能器有两种, 一是线性相控阵(Linear Phased Array), 一是同心圆环相控阵(Concentric Annular Phased Array)。下面将介绍我们研制的数字式多通道信号发射系统, 和相应的两类相控阵, 它们构成了超声数字式动态聚焦系统。

## 2 数字式多通道信号发射系统

我们研制的数字控制多通道信号发射系统的基本工作原理是: 根据不同的相控阵的要求, 由微机编程, 产生所需的发射信号。信号的频率、包络、时延、幅度和长度等特性都是由

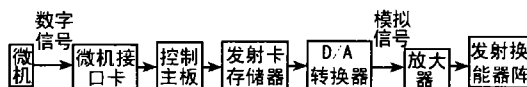


图1 系统工作流程图

数字控制的, 这些数据经过微机接口卡传到控制主板上, 由通道译码器控制是否送入信号发射卡各个通道的存储器中, 然后进行D/A转换为模拟信号, 经过放大后, 激励换能器阵的各个阵元, 将电信号转换为声信号发射出去。系统的工作流程如图1所示。

要发射的信号数据是由c语言编程产生的, 信号产生程序可实现如下功能:

改变程序中变量start和end的值, 可以控制信号的延时和长度; 改变变量volts的值, 可以控制信号的幅度; 改变变量freq的值, 可以控制信号的频率, 改变变量phase的值, 可以控制信号的初始相位; 采用不同的函数, 可以控制信号的波形。因此, 此系统可以产生任意波形的信号。

信号发射系统的电路部分包括多通道发射卡、控制主板和微机接口卡三部分, 由一台工控机控制。

微机接口卡由译码器、缓冲器和锁存器组成, 它的功能是实现微机对发射系统控制主板的控制和数据的传送。

控制主板的功能除了提供各个器件所需的直流电源, 主要是控制信号发射卡正常工作。控制部分由地址计数器、通道译码器、40MHz晶振和一些逻辑电路组成。

计数器共有5个, 依次串联, 每个计数器都是4位的。其中15条数据线用作数据地址计数,  $2^{15}=32768$ , 4条数据线用作选通通道计数,  $2^4=16$ , 可以计数16路, 尚空余1条数据线没有使用。因此, 此系统可扩充至32通道。

通道译码器是一个4—16译码器, 其功能是选通16路中的某一路发射通道, 以便将数据写入该通道的存储器中。

40MHz晶振用来产生基准时钟和D/A转

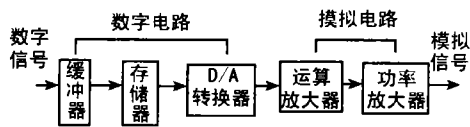


图2 信号发射卡结构图

换的触发脉冲,即每隔 25ns 读取一个数据。其它一些逻辑门电路用来辅助完成控制主板对发射卡的控制。

信号发射卡包括数字电路与模拟电路两部分,如图 2 所示。

数字电路部分主要由缓冲器、存储器和 D/A 转换器组成,这部分的功能是存储待发射的数据,并在发射时由多个通道将数字信号同时转换为模拟信号输出。

每一路发射通道有两个 32K×8bit 的存储器。只有当通道译码器选中某通道时,数据才能被送进存储器中保存起来。

高速 D/A 转换器的转换速率为 25ns,动态范围 12bit。它采用差分输出,以便后续电路进行差分放大。

模拟电路部分主要由运算放大器和功率放大器组成,这部分的功能是将 D/A 转换器输出的信号经过逐级放大后,产生具有足够幅度的信号,去激发换能器。

每通道有两个视频双路运算放大器,第一个运放作为差分放大器,第二个运放的第一级放大器采用双端输入,单端输出放大方式,第二级放大器是跟随放大。

信号最后经过一对高频大功率三极管,它们采用推挽输出方式。这一对三极管与第二个运放的第二级放大器一起作为功率放大器。

系统达到的主要技术指标如下:

- 通道数: 16(可扩展为 32 通道)
- 单通道存储器容量: 32kbyte
- D/A 转换器: 动态范围 12bit
- 读出频率(采样率): 40MHz
- 输出电压最大幅度: -15V~15V
- 工作频率: ≤5MHz
- 输出阻抗: 50Ω

系统的读出频率为 40MHz,相当于每个采样点的时间间隔为 25ns,因此延时控制精度为 25ns。对于 1MHz 的信号频率,每个周期内有 40 个采样点,点之间的相(位)移  $\Delta\phi = 9^\circ$ 。

系统的动态范围为 12bit,对应 -15V~15V,其 0~2048 为 -15V~0V,2048~4096 为 0V~15V。

系统的每通道数据容量为 32kbyte,相应的总时延,即能产生信号的总长度为:

$$\tau = 32768 \times 25 \times 10^{-9} = 819.2\mu s$$

它相当于水中声程约 1.2m。

### 3 线性相控阵换能器

目前常用的相控阵换能器有两类。一类是线性相控阵,它是由一组平行的条状换能器阵元组成,能实现在垂直于阵元长度方向的平面内作二维扫描的线聚焦;另一类是同心圆环形相控阵,它能实现点聚焦,但只能沿轴线聚焦扫描。

我们制作的线性相控阵换能器由 16 个阵元组成,如图 3 所示。每个阵元的正面是一组电极,背面与下端是另一组电极。阵元宽度  $l=2\text{mm}$ ,阵元间距  $d=1.5\text{mm}$ ,阵元长度  $h=20\text{mm}$ ,换能器工作中心频率  $f=1.6\text{MHz}$ 。

对于第  $i$  个条状源,设激励信号为  $U = A \cdot e^{j(\omega_0 t + \Delta\phi_i)}$ ,则在空间某点  $(r, \theta)$  处的声场为:

$$P_i(r, \theta, t) = \frac{A\rho l\omega_0}{\sqrt{2\pi k r_i}} e^{j\pi/4} \cdot \frac{\sin(kl \sin \theta_i/2)}{kl \sin \theta_i/2} \cdot e^{-j(kr_i - \omega_0 t + \Delta\phi_i)}$$

其中相移  $\Delta\phi_i = \omega_0 \cdot \Delta t_i$ ,  $k = \omega_0/c$ ,  $c$  为介质中声速,  $\rho$  为介质密度,  $r$  为条源中心到场点的距离,  $\theta$  为矢径  $r$  与阵列中心法线的夹角,而  $r_i$ ,  $\theta_i$  为第  $i$  个阵元中心到场点  $(r, \theta)$  处的距离与夹角。

如果我们在点  $(y_0, z_0)$ , 对应极坐标

$(r_0, \theta_0)$  处聚焦, 则第  $i$  个阵元相对于中心阵元补偿的延时应提前:

$$\Delta t_i = \frac{r_i - r_0}{c}$$

对应的相差为:  $\Delta \phi_i = \omega_0 \cdot \Delta t_i$ 。对于有  $n$  个阵元的换能器阵, 它们发射具有相同振幅而有所需的不同时延 (相位) 的声束, 使声束在点  $(r_0, \theta_0)$  处同相相干叠加, 即聚焦于此点。

作为例子, 图 4 表示当控制各阵元的信号相位, 使聚焦于点  $(Y, Z)=(0, 120\text{mm})$  时, 测得的焦平面上横向声场分布。图中散点为实验测量结果, 实线为理论计算结果。

理论计算的主瓣 3dB 半束宽为 1mm, 实验测得的主瓣 3dB 半束宽为 1.2mm, 两者基本符合。

对此一维线性相控阵的电子调焦实验表明, 在  $50\text{mm} \times 50\text{mm}$  的范围内能够准确有效地调焦。更详尽的动态聚焦结果和分析我们将另文报道。

#### 4 同心圆环形相控阵换能器

圆环形相控阵换能器由 9 个同心圆环组成, 如图 5 所示。每个圆环的上表面是一组电极, 背面是另一组电极, 换能器厚度为 4.1mm, 第一个阵元宽 2.5mm, 内径 18mm, 其余阵元宽度均为 2mm, 相邻阵元间距 1.4mm, 槽深 3.5mm, 换能器中心频率  $f=410\text{kHz}$ 。在实际使用时, 换能器阵最外面一个环形阵元没有被用来发射信号, 而是用于固定换能器。

设同心圆环换能器阵位于  $X-Z$  平面内,  $Y$  轴通过其中心, 其中每个阵元的平均半径为  $r_i$ 。为了使声场聚焦于  $Y$  轴上一点  $F(0, y_0, 0)$ , 需要给第  $i$  个圆环阵元的发射信号加延时  $\Delta t_i$ :

$$\Delta t_i = \frac{\sqrt{y_0^2 + r_i^2} - y_0}{c}$$

对应的相差为  $\Delta \phi_i = \omega_0 \cdot \Delta t_i$ , 这样各圆环发出的声束在轴上  $(0, y_0, 0)$  点是同相叠加的。

应用声学

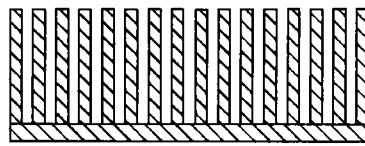


图 3 线性相控阵换能器

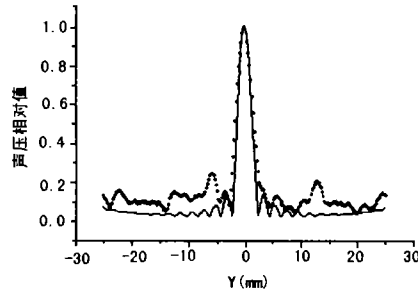


图 4 线阵的横向声场分布

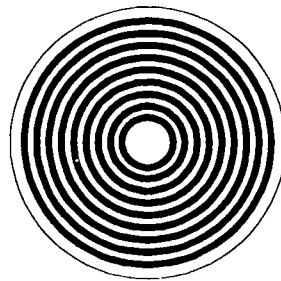


图 5 同心圆环相控阵换能器

当声场聚焦于  $Y$  轴上一点  $F, (0, y_0, 0)$ , 时, 对于其中一个平均半径为  $r_i$ , 圆环宽度为  $l_i$  的阵元 ( $i = 1, 2, \dots, n$ ), 其在空间某点  $F', (x, y, 0)$ , 产生的声场公式为

$$P_i = - \frac{jA\rho\omega_0 l_i}{2\pi} \cdot \int_0^{2\pi} \frac{\exp(-j(KR_i - \omega_0 t + \Delta \phi_i))}{R_i} \cdot r_i \cdot d\theta$$

$$R_i = \sqrt{y^2 + x^2 + r_i^2 - 2xr_i \cos \theta}$$

$n$  个同心圆环阵元发出具有相同振幅但有所需的不同时延 (相位) 的信号, 就能在适当点同相相干叠加。

作为例子, 当焦点坐标为  $(X, Y, Z)=(0, 100, 0)$  时, 测得的焦平面上声场横向分布如图

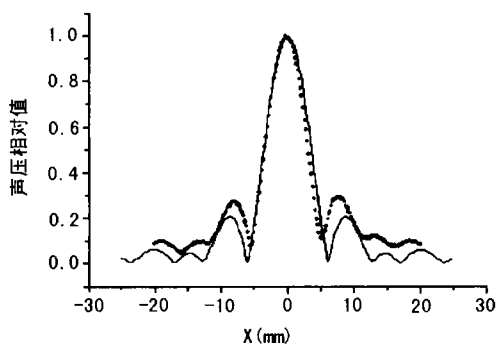


图 6 圆环阵的横向声场分布

6 所示。图中散点为实验测量结果，实线为理论计算结果。

理论计算的主瓣 3dB 半束宽为 2.65mm，实验测得的主瓣 3dB 半束宽为 2.4mm，两者符合较好。

实验表明，此环形相控阵电子动态聚焦在轴向 80–120mm 范围内进行扫描。该系统动态聚焦的详细结果和分析也将另文报道。

## 5 小结

我们研制了数字式多通道相控阵换能器动态聚焦系统，采用数控电子动态聚焦方法，在相当的范围内良好地实现了声束的聚焦扫描。

由于采用了数字控制的信号发射系统，它可以方便地调延时、调相、调频、调幅，可以实现任意的信号形式，这对于模拟系统是难以实现的。我们在研究中的系统还是用于稳态，即只进行数字式调相（延时）。实际上它完全能实现脉冲状态工作，而且任意脉冲形状理论上

在我们的系统适用的范围内都能达到。所以此系统不仅比模拟系统优越，而且比目前有的系统所采用的数字式延迟线或移相器也优越。因为后者只能完成特定的功能，如延迟线只能改变延时，要改变波形、发射脉冲信号等就不可能了。

数字式系统能够实现快速的聚焦扫描，这在有些场合有时是决定性的。如果用固定焦距的超声聚焦系统，并采取机械方式进行扫描，其速度之慢往往是不能接受的。因此，采用能快速扫描的数字式电子聚焦设备是必须的。

对此超声数字式相控阵动态聚焦系统，下一步可增加通道数，加大输出功率，对相控阵换能器进行改进，以扩大它的应用范围，甚至发展成为一个实用系统。

**致谢** 感谢黄振俨研究员、宫俊杰副研究员在电路设计过程中的悉心指导和帮助；感谢刘永怀副研究员、刘乃钧高工在换能器制作方面的大力协助；感谢沈建中研究员、邓京军副研究员在声场测量方面的支持与帮助。

## 参 考 文 献

- 1 Hynnen K. Review of Ultrasonic Therapy. IEEE 1997 Ultrasonic Symposium, 1305–1313.
- 2 Kino G S. Acoustic Waves: Device, Imaging to Analog Signal Processing. Prentree-Hall, 1987, ch.3
- 3 Do-Hun J P, Hartmann P. IEEE 1981 Ultrasonic Symposium, 705–710.
- 4 Chapelon J Y, Faure P, Plantier M, et al. IEEE 1993 Ultrasonic Symposium, 1211–1214.

## 欢迎订阅 2001 年度《应用科技》(月刊)

《应用科技》杂志是由哈尔滨工程大学主办，国内外公开发行的技术类期刊。杂志紧紧围绕“应用科技”四个字，辟有机械工程、电子工程、化学工程、实用专利、成果推广等精品栏目。旨在推广新技术、新成果，促进科研成果尽快转化为现实生产力。本刊刊号：CN23-1191/U，欢迎大家订阅。

邮发代号：14-160 每期定价：4.80 元 全年定价：57.60 元 刊社地址：哈尔滨市南岗区文庙街 41 号楼 电话：(0451)2519357 邮编：150001