

基于直接数字合成技术超声电源 控制器的研究*

朱武^{1†} 张佳民² 许立衡²

(1 上海电力学院 上海 200090)

(2 上海三基电子工业有限公司 上海 200333)

摘要 功率超声技术在国民经济各部门的日益广泛应用,越来越需要一种通用型智能化大功率超声电源。控制器是大功率超声电源的核心,它应具有根据大功率超声应用的具体情况自动跟踪振动系统的谐振频率和进行功率大小自动控制的功能。本文以现场可编程门阵列器件(FPGA)作为控制器核心,采用直接数字频率合成技术控制信号输出频率,用改变输出信号占空比的方式实现功率调整,用振动系统的电流和电压相位差信息自动跟踪频率。仿真结果表明,该控制器不仅对信号频率稳定性高,便于功率调整,而且易于实现频率自动跟踪。

关键词 直接数字合成, 功率超声, 信号源, 频率跟踪, 功率调节

A controller of ultrasonic power based on DDS technology

ZHU Wu¹ ZHANG Jia-Min¹ XU Li-Heng²

(1 Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090)

(2 Shanghai Sanki Electronic Industries Co., LTD, Shanghai 200333)

Abstract With the increasingly wide use of power ultrasonic technology in many areas of economy, a new type of high-power ultrasonic power supply is urgently required. The controller is the core of high ultrasonic power, it has the functions of auto-tracking the resonance frequency of the vibration system and adjusting power according to the specific application. This paper used field programmable gate array as the kernel of controller, using the technique of direct digital frequency synthesis to control output frequency of the signal source, the technique employing the change of duty ratio of signal to realize power regulation. Automatic frequency tracking is realized according to the phase difference between the voltage and current. Simulation results show that the controller not only has good frequency stability and convenient power regulation, but also easily achieve automatic frequency tracking.

Key words DDS, Power Ultrasonic, Signal source, Frequency-tracking, Power regulation

2007-08-10 收稿; 2008-04-10 定稿

*上海市教委一般项目资助(05LZ13);上海市重点学科建设资助项目(P1303)

作者简介:朱武(1969-),男,湖北随州人,博士,副教授,硕士生导师。主要从事大功率超声应用、检测技术、智能仪器等方面的研究。张佳民(1970-),女,讲师,硕士生。许立衡(1982-),男,本科,工程师。

†通信联系人 E-mail: zjmzwsy@126.com

1 引言

随着电子技术的发展、新型材料的日新月异,大功率超声的产生、基本效应的研究和应用取得了较大进展,渗透到国民经济的各个部门,并取得了很好的社会效益和经济效益^[1-3]。因此,提供稳定、可靠、高效、经济的智能化超声功率发生器是超声电源技术研究的最终目标。功率超声发生器是多种多样的,按其激励形式分为两种,一种是自激式,另一种是它激式。目前应用较多的是晶体管自激式超声波发生器,其线路简单,造价低,但频率跟踪能力较差^[4]。在许多情况下,换能器用于负载变化剧烈或其刚度、质量缓慢变化的场合,并且换能器以及与之配合使用的变幅杆、工具头的参数也常因发热、老化、磨损、疲劳等原因而发生改变,这些都使得换能器的谐振频率漂移,如果发生器的工作频率不随之改变,换能器将工作于失谐状态而使效率降低,甚至停振。因此,这一类发生器要逐步退出市场。它激式超声发生器具有一定频率自动跟踪能力,对频率漂移具有较好的适应性。但是这类信号发生器大多是采用分立元件构成的振荡器,主要有 LC 振荡器、RC 振荡器等。这类电路普遍存在着控制精度低、频率稳定性差的缺

点。本文以现场可编程门阵列器件(FPGA)为核心,采用直接数字频率技术以控制信号输出频率,用改变输出信号占空比的方式以实现功率调整,用振动系统的电流和电压相位差信息自动跟踪系统频率漂移,从而提高超声电源的频率的稳定性和频率跟踪精度。

2 直接数字合成产生控制信号的原理

它激式超声电源一般采用半桥或全桥逆变方式,要求控制器能够提供两路快速的矩形脉冲,相位相差 180 度,并且脉冲宽度及频率均为可调。目前,用于产生两路快速矩形脉冲信号的电路很多,常用的主要是脉宽调制器(PWM),其集成化电路种类很多,如 TL494, 3524, 3525 等。这类电路输出信号的频率易受温度、时间和外界电磁干扰的影响,稳定性差。本文采用大规模可编程器件,直接数字合成双路双错电源控制信号。

2.1 相位累加器的工作原理

直接数字合成技术是一种用数字控制信号的相位增量技术,具有频率分辨率高、稳定性极好、单周期实现频率的任意调整等优点。基于 DDS 的波形发生器是通过改变频率控制字来改变输出信号频率,如图 1 所示^[5]。

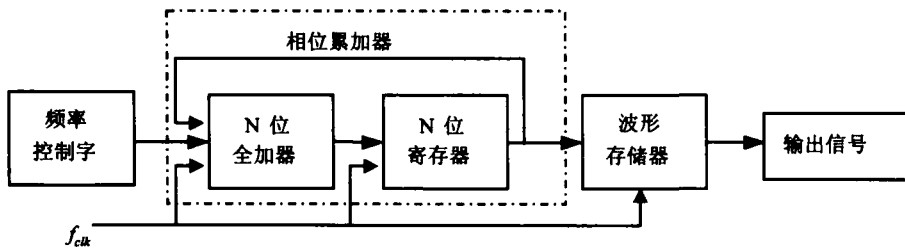


图1 DDS的基本工作原理

由 N 位全加器和 N 位寄存器组成的相位累加器中,每来一个时钟脉冲 f_{ck} , N 位全加器将频率控制字 f_w 与 N 位寄存器输出进行相位累加,把相加后的结果送至累加寄存器的输入

端,累加寄存器将在上一时钟周期作用后所产生新的相位数据反馈到全加器的输入端,以使全加器在下一时钟的作用下继续与频率控制字 f_w 相加。这样,相位累加器在参考时钟的

作用下,进行线性相位累加,当相位累加器累加满量时就会产生一次溢出,完成一个周期性的动作,这个周期就是 DDS 合成信号的一个频率周期,累加器的溢出频率就是 DDS 输出的信号频率。因此,通过改变频率控制字 f_{sw} ,使相位累加器累加溢出频率的改变,能够产生不同频率的信号。波形存储器中存储了待合成信号一个周期的幅度离散量化信息,相位累加器所输出二进制数据作为波形存储器的寻址地址,在系统时钟的作用下,相位累加器的输出对波形存储器寻址,波形幅度信息被读出,得到所要求的合成信号。因此,根据频率控制字和波形存储器的数据可以得到所需要的方波信号。假设累加器的位数为 N ,系统时钟频率为 f_{clk} ,频率控制字为 f_{sw} ,则输出信号的频率由下式给定^[6]

$$f_{out} = (f_{sw} \times f_{clk}) / 2^N \quad (1)$$

DDS 输出信号频率的分辨率为:

$$\Delta f_{out} = f_{clk} 2^{-N} \quad (2)$$

2.2 双路双错信号产生原理

用 DDS 技术产生双相逆变驱动信号如图 2 所示。两路相位累加器在同一时钟信号 f_{clk} 驱动下进行相位累加运算,其中一路信号从地址 0 开始累加,另一路从地址 2^{N-1} 开始累加,使两路信号在起始位置错开半个周期。在本文应用中,波形存储器是数据宽度为 1 位的线阵结构,如图 3 所示。线阵存储器从 A 到 B 和从 C 到 D 为地址增量寻址,线阵长度为 n (为偶数),其一个周期的波形数据如图 3 所示。在 n 个数据中,前半周期全部填充为 0,在后半周期的起始部分填充 q 个 0,形成输出双路信号之间的死区时间,其余部分填充 m 个 1。此时,输出信号的占空比就由线阵存储器的长度和填充 1 的个数 m 精确确定,死区时间也可以精确确定。设占空比为 β ,死区时间为 τ ,则:

$$\beta = m/n \quad (3)$$

$$\tau = \frac{2^N}{f_{sw} \cdot f_{clk}} \cdot \frac{q}{n} \quad (4)$$

由式(3)(4)可知,只要改变填充 1 的个数就可以使占空比精确方便可调,改变 q 的值就可以精确控制双路脉冲信号的死区时间。

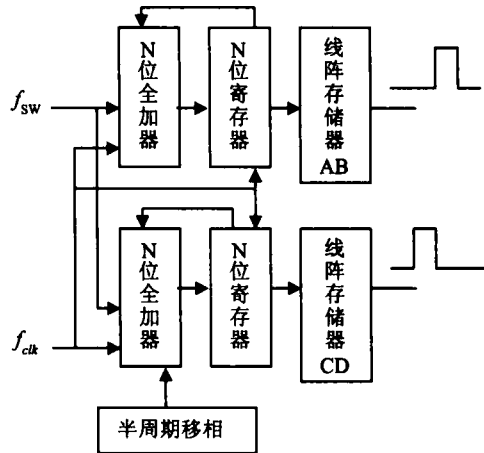


图 2 DDS 技术产生双相信号原理图

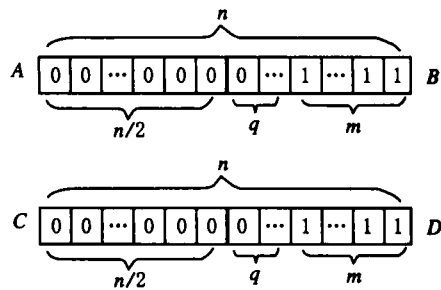


图 3 波形存储器线阵结构

3 超声电源控制器频率自动跟踪原理

3.1 压电换能器的谐振特性

在谐振频率附近压电换能器的等效电路如图 4 所示^[7]。图中 L_m 为换能器的动态等效质量, C_m 为换能器的等效力顺, R_m 为换能器的机械阻, C_o 为静态电容。为了使压电振子工作在谐振状态,消除静态电容的影响,在其两端并联匹配电感 L_o ,并且满足

$$\omega^2 = \frac{1}{L_o C_o} = \frac{1}{L_m C_m} \quad (5)$$

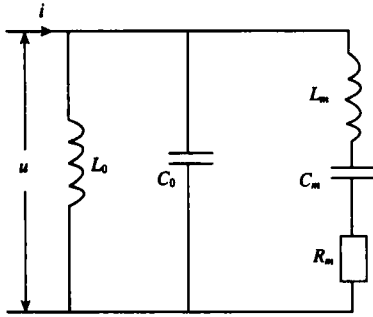


图4 换能器的等效电路

ω 为换能器的谐振频率。

设加在换能器两端的电压为 u , 通过的电流为 i , 则换能器在谐振状态时有:

$$u = iR_m \quad (6)$$

即当换能器处于谐振时, 加在换能器两端的电压和电流是同相的。当激励信号的频率偏离换能器的谐振频率时, 换能器工作在失谐状态, 其两端的电压和电流不同相。其电抗-频率特性曲线如图5所示, 图中 ω_s 为串联谐振频率, ω_p 为并联谐振频率; 当 $\omega < \omega_s$ 时, 电路呈容性, 电流超前电压; 当 $\omega_s < \omega < \omega_p$ 时, 电路呈感性, 电压超前电流; 当 $\omega = \omega_s$ 时, 电路呈纯阻性, 电压和电流同相位。因此, 换能器两端的电压和流过换能器的电流之间的相位信息表明了激励信号频率与振动系统固有频率的关系, 为频率跟踪提供依据。所以, 可以把电压和电流的相位差信号取出, 作为激励振动系统谐振频率变化的控制信号。

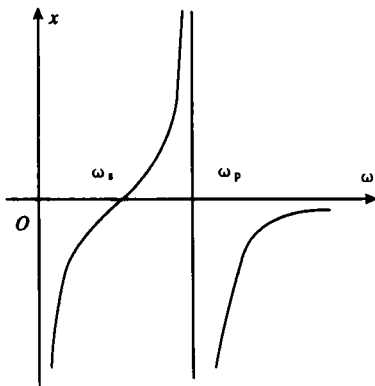


图5 压电换能器电抗-频率特性曲线

3.2 相位检测线路及频率跟踪

本文相位检测器的主要作用是判断电流与电压的相位关系, 如图6所示^[8]。

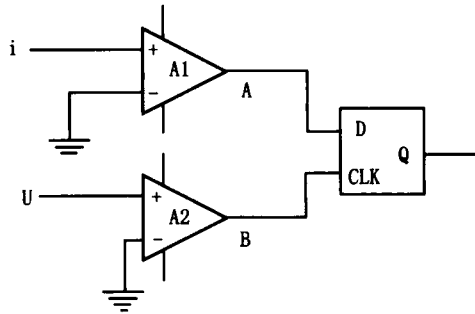


图6 相位指示器

由电压和电流取样电路分别取得换能器输入电流 i 和电压信息 u , 将它们分别接到两个过零比较器 $A1, A2$ 上。输入为正半周时, 比较器输出为逻辑高电平; 输入为负时, 输出为零。这样就完成了取样信号的逻辑处理。电压比较器输出接 D 触发器的时钟端, 电流比较器的输出端 D 触发器的 D 端, 在每个时钟的上升沿采样数据。当触发器输出端 (Q) 为低电平时, 电压超前电流时, 说明激励信号频率高于谐振频率, 控制器将减小频率控制字, 减小控制器输出信号频率; 当触发器输出端 (Q) 为高电平时, 电流超前电压, 说明激励信号频率低于谐振频率, 控制器将增大频率控制字, 增大控制器输出信号频率。其算法流程如图7所示。

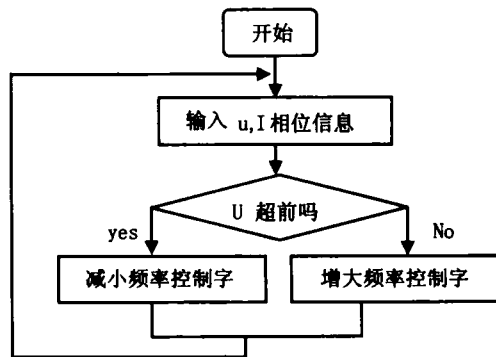


图7 频率跟踪算法流程图

4 控制器的 FPGA 实现和仿真

超声波信号发生控制器是采用 ALTERA 公司的 FLEX10K 系列芯片 EPF10K70RC240-4 实现的,电子设计工具是采用 QUARTUS II 6.0 软件。在设计中,底层设计使用 VHDL 语言来实现,顶层设计原理图如图 8 所示。控制器的顶层设计主要由输入模块(inblock)、频率控制字更新模块(lpm_dff2)、相位累加器模块(adbblock)、波形存储模块(ram)等共四个模块组成。其中,输入模块完成两个功能,一是在串行使能(SE)有效时,在 CPU 串行时钟(SC)的控制下,把系统设置的 24 位频率控制字初值通过串行线(SD)送入控制器模块,同时完成串并转换;二是采样振动系统的电流和电压的相位信息,在频率跟踪信号(Fren)有效时,根据相位信息,按照图 7 的跟踪算法在每个信号周期更新一次频率控制字,并把频率控制字送入频率控制字更新模块(lpm_dff2)。频率控制字更新模块在每个信号周期(超声信号)更新一次结果,作为新的频率控制字送入相位累加器,并在一个信号周期内保持不变,

实现单周期频率调整。相位累加器模块(adbblock)实现 24 位相位累加功能。在系统时钟(MC)的作用下,对 24 位频率控制字进行累加,把累加结果的高 10 位作为 FPGA 内部 RAM 波形存储器的寻址线。波形存储模块具有两个功能,一是存储产生两路方波信号的波形数据,二是实现半周期移相。波形存储模块由 FPGA 内部的 RAM 组成,将其配置为两个部分,每一部分都设置为 1 × 1024 位的存储方式,存储器的内容可以根据实际需要超声功率大小不同,参照式(3)设置成不同的占空比。在 CPU 的写时钟(WC)控制下,通过写总线把如图 3 所示的波形数据写入内部 RAM 中,波形数据写入后,关闭写使能(WE),启动内部 RAM 读使能,在系统时钟作用,累加器输出高 10 位地址分别对内部两个 1 位线性存储器寻址,输出波形数据,产生 a、b 两路信号^[9]。

本设计中,系统时钟频率采用 10MHz,相位累加器的长度为 24 位。内部 RAM 地址宽度为 10 位,数据宽度为 1 位,频率控制字设置为 31457(7AE1H),输出信号频率为 18749.8Hz。仿真波形如图 9 所示。图中 a、b 为输出的双路信号。

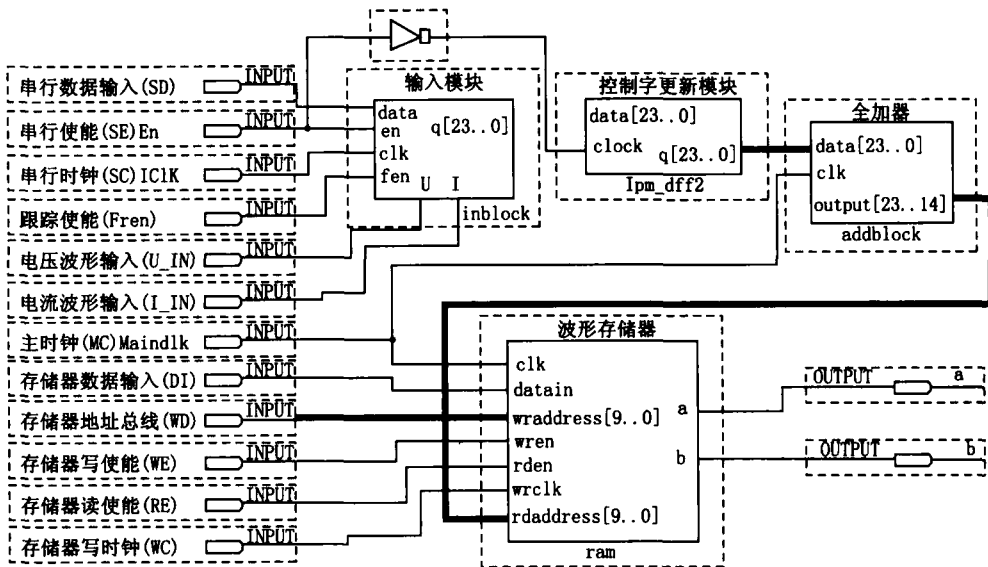


图 8 控制器的顶层示意图

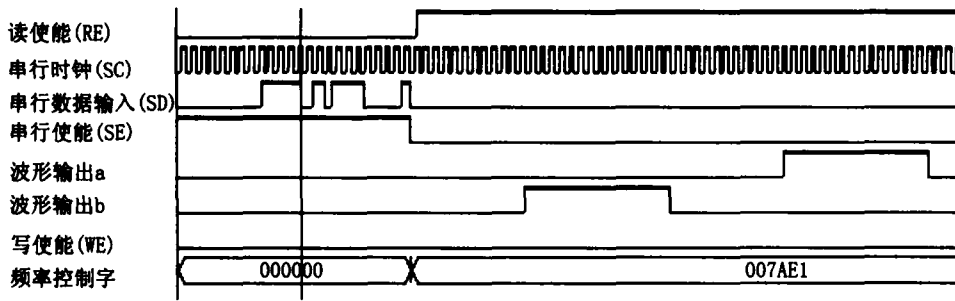


图9 控制器的仿真时序图

5 结论

用FPGA器件和DDS技术设计的超声电源控制器,其频率稳定性取决于系统石英晶振(MC)的稳定性。因此,本文设计的控制器完全克服了传统振荡式控制器的温漂和时漂问题,具有更高的频率稳定性;频率可以在大功率超声应用范围内精确可调,分辨率可达0.596Hz。占空比设置准确度达到千分之一,可以方便地进行功率调整。此外,该控制器还具有频率跟踪能力,跟踪精度高,抗电磁干扰能力强,很好满足超声电源的应用要求。

参 考 文 献

- [1] 程永清,尹晓敏,刘银凤,等. 超声法提取余甘树皮中单宁的研究. 应用声学,2007,26(3):185-189.
- [2] 李光,冯伟骏,李喜孟,等. 功率超声作用下纳米氧化铜粉体的制备. 材料导报,2003,17(9):44-45.
- [3] 李守华,陈永昌,谭家隆. 应用功率超声技术制备乳化柴油. 石油化工,2006,35(11):1030-1033.
- [4] 袁易全著. 近代超声原理与应用. 南京:南京大学出版社,1992:284-28.
- [5] 蓝天,张金林. 直接数字频率合成器DDS的优化设计[J]. 电子技术应用,2007,33(5):42-44.
- [6] 毛敏,王淑仙,刘锦高. 新型直接数字合成式扫频仪的原理和研制. 仪器仪表学报,2004,25(4):534-537.
- [7] 范世忠,张福成,丁大成. 锁相式超声振动系统频率自动跟踪的初步研究. 应用声学,1992,11(1):28-33.
- [8] 朱武,金长善,蔡鹤皋. 大功率高Q值超声振动系统频率自动跟踪. 自动化技术与应用,2000,19(4):8-10.
- [9] 胡振华. VHDL与FPGA设计. 北京:中国铁道出版社,2003:50-77.