

◇ 研究报告 ◇

# 频率自动跟踪超声波电源设计\*

陈 鹏 覃庆良<sup>†</sup> 冯宇平

(青岛科技大学自动化与电子工程学院 青岛 266042)

**摘要** 针对超声波电源工作时负载状态改变,换能系统产生谐振漂移的问题,提出了一种基于 STM32 的频率自动跟踪超声波电源的设计。电源逆变电路采用带辅助网络的全桥结构,阻抗匹配电路选择了一种改进型的 T 型匹配网络,应用 PWM 移相调功技术控制电源的输出功率,通过数字鉴相技术得到电压电流的相位差作为电路谐振状态的反馈信号,结合 STM32 主控制器进行 PI 控制,调节 PWM 波的输出频率使电路始终工作于谐振状态,实现了谐振频率的自动跟踪。最后基于该设计方案,实际制作了一款应用于超声波清洗仪的电源,并通过实验验证了该电源具有输出功率稳定,负载适应性强,输出频率自动跟踪等特点。

**关键词** 超声波电源, STM32, 阻抗匹配, PWM, 频率跟踪

中图分类号: TB553 文献标识码: A 文章编号: 1000-310X(2017)06-0533-07

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2017.06.009

## Design of frequency automatic tracking ultrasonic power based on STM32

CHEN Peng QIN Qingliang FENG Yuping

(College of Automation and Electronic Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266042, China)

**Abstract** In view of the frequency drift problem in transducer system when the stage of load changes, a design of frequency automatic tracking ultrasonic power based on STM32 is put forward. The power inverter circuit adopted a full-bridge structure with auxiliary network, an improved T-type matching network is selected for impedance matching, and the constant power output of power supply is realized by PWM phase shift power technology. The phase difference of the voltage and current is obtained as the feedback signal of the resonant state of the circuit, and the PI controller is controlled by the STM32 main controller. The output frequency of the PWM wave is adjusted so that the circuit always works in the resonant state, and the resonant frequency is automatically tracked. Finally based on the design, a power supply for the ultrasonic cleaner is produced. The experimental results show that the power supply has the characteristics of stable output power, strong load adaptability and automatic tracking of output frequency.

**Key words** Ultrasonic power, STM32, Impedance matching, PWM, Frequency tracking

2017-04-04 收稿; 2017-06-01 定稿

\*山东省高等学校科技计划项目 (J15LN39), 山东省自然科学基金 (ZR2015FL008)

作者简介: 陈鹏 (1995-), 男, 江苏泰州人, 本科生, 研究方向: 电源技术、数字电路系统设计。

<sup>†</sup> 通讯作者 E-mail: qql\_qd@163.com

## 1 引言

随着压电材料、全控型电子器件与嵌入式芯片的飞速发展,超声波技术正逐渐走进人们的生活。不同功率的超声波电源在清洗、诊断、治疗、遥测、焊接等领域有着广泛的应用。随着超声技术的高精度化与高频化发展,超声波电源的性能在超声波应用中有了越来越严格的要求<sup>[1]</sup>。

当系统的环境、温度发生改变时,换能系统固有的谐振频率会发生漂移,导致换能器失谐,这将使得声学系统温度升高,振幅呈指数级下降,换能器的电声转换效率将大大下降。超声波电源的频率跟

踪能力决定着换能系统是否能长时间处于谐振状态,因此频率跟踪系统在超声波电源的研究中具有重要的地位。本文采用STM32微控制器结合数字鉴相技术,设计了一款输出功率可调、谐振频率自动跟踪的新型超声波电源。

## 2 系统组成

图1为本文设计的超声波电源的核心系统框图,大虚线框内为电源的组成,主要由整形滤波电路、逆变电路、阻抗匹配电路、保护电路、数字鉴相器、驱动电路、STM32主控制器等组成,虚线外的换能器为超声波电源的负载。

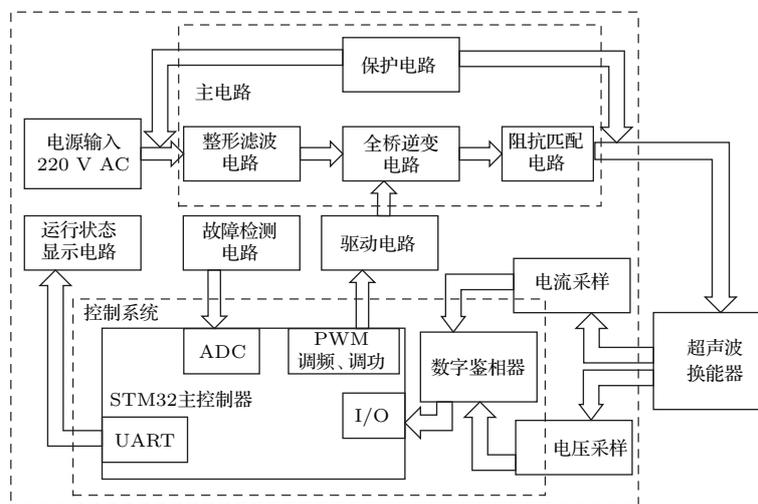


图1 超声波电源的核心系统框图

Fig. 1 Block diagram of the core system of ultrasonic power supply

整形滤波电路采用BUCK降压斩波电路将220 V的市电整形为直流信号,直流信号经MOSFET全桥逆变电路逆变为高频交流信号,阻抗匹配电路通过阻抗变换与调谐匹配使得系统工作于谐振状态。保护电路由过流保护、过压保护、过温保护三种保护电路组成,作用于整个电源系统,保障了电能转化的安全。系统运行过程中故障检测电路实时检测电路中关键部位电位,运行状态显示电路显示电源当前的工作状态参数,二者实现了对整个电源系统的状态监测,为电源的稳定工作提供了可靠保证。实时采集换能器两端的电压和电流信号,通过数字鉴相电路检测出信号间的相位差,以此作为谐振状态的反馈信号,通过STM32主控制器对信号偏差进行数字PI调节<sup>[2]</sup>,改变输出PWM波的相位差

与频率,实现对输出功率的控制与谐振频率的自动跟踪<sup>[3-4]</sup>。

## 3 主电路结构的设计

超声波电源主电路由逆变电路与阻抗匹配电路两部分组成,本文逆变电路采用一种带辅助网络的全桥结构,阻抗匹配电路采用一种改进的T型匹配网络,具有输出效率高、性能稳定的特点,具体设计如下所示。

### 3.1 逆变电路拓扑结构的选择

逆变效率与逆变电信号波形的保真度是逆变电路质量的衡量因素,决定着超声波电源的工作性能。本文设计的带辅助网络的全桥结构如图2所示,

开关器件 MOSFET 管一侧并联的缓冲电容  $C_2$ - $C_5$  与串联的谐振电感  $L_3$  在器件开关前后引入了谐振, 延缓开关关断后电压上升的速率, 使得电压在开关开通前先降到零, 从而减少开关过程中电压的重叠, 有效的解决了高频工作条件下的开关损耗<sup>[5]</sup>, 同时起到了稳定输出电压的波形的作用。高频变压器  $T_1$  实现电压变换, 功率传递以及输入、输出之间的

隔离。额外增设的电感  $L_4$  与续流二极管  $D_5$ 、 $D_6$  消除了一部分由漏感产生的瞬时电压, 使得反激能量得以恢复和利用。通过 PWM 波控制  $Q_1$ 、 $Q_3$  和  $Q_2$ 、 $Q_4$  的交替通断实现直流到交流的逆变过程。逆变出的交流电信号的频率即 PWM 波驱动 MOSFET 管通断的频率。

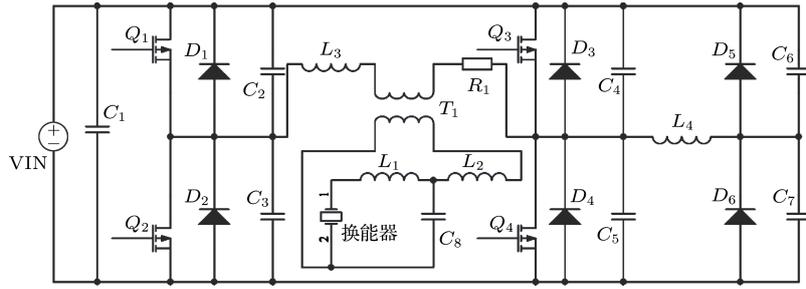


图2 高频逆变电路

Fig. 2 High frequency inverter circuit

### 3.2 阻抗匹配网络的设计

超声波换能器是超声波电源的负载, 大都呈容性, 在谐振工作过程中需要与超声波电源之间进行阻抗匹配。常用的匹配方法是在换能器两端并联或串联一个电感来抵消其自身的容性负载。串联相比并联具有降低有功阻抗和滤波的功能, 因此选用串联匹配的方式, 但串联单个电感往往会带来阻抗变换不明显的问题。为解决这个问题采用了一种改进的T型匹配网络即在串联电感  $L_1$  旁额外增加了一个匹配电容  $C_8$  与匹配电感  $L_2$ , 其等效电路如图3所示。

图3中  $C_n$  为换能器的静态电容, 是真正的电学量, 可以通过施加远低于谐振频率的电信号测量出来,  $L_m$ 、 $C_m$ 、 $R_m$  是由换能器质量、机械损耗折算过来的等效参数, 谐振状态下近似用  $R_m$  等效。当电路处于谐振点  $\omega_s$  附近时, 此时换能器等效电路与串联电感的等效阻抗  $Z_{eq} = j\omega_s L_1 + \frac{1}{\frac{1}{j\omega_s C_n} + \frac{1}{R_m}}$ 。

取串联电感  $L_1 = \frac{C_n R_m^2}{1 + (\omega_s C_n R_m)^2}$  以抵消谐振时换能器的容性特性, 此时谐振状态下换能器阻抗等效为  $R_w = \frac{R_m}{1 + (\omega_s C_n R_m)^2}$ 。从  $a$ 、 $b$  两端往里看的

等效电路如图4所示。同理取匹配电感  $L_2$  的大小为  $\frac{C_8 R_w^2}{1 + (\omega_s C_8 R_w)^2}$ , 在谐振状态下整个电路程纯阻性, 其等效阻抗值  $Z_{eq} = \frac{R_w}{1 + (\omega_s C_8 R_w)^2}$ , 从该式中可以看出, 改变电容  $C_8$  的大小, 可以调节系统的阻抗值, 实现了阻抗匹配功能<sup>[6]</sup>。实验中使用的换能器为常用换能器其静态电容  $C_n$  约为 3.2 nF, 内阻  $R_m$  约为 1074  $\Omega$  谐振频率约为 28 kHz, 选取匹配电容  $C_8 = 0.01 \mu\text{F}$ , 由于  $(\omega_s C_8 R_m)^2 \ll 1$ , 近似取  $R_w$  等于  $R_m$  为 1074  $\Omega$ , 带入公式选取匹配电感  $L_2 = 2.5 \text{ mH}$ , 串联电感  $L_1 = 2.7 \text{ mH}$ , 经验证该匹配网络有效地提高了阻抗变换能力。

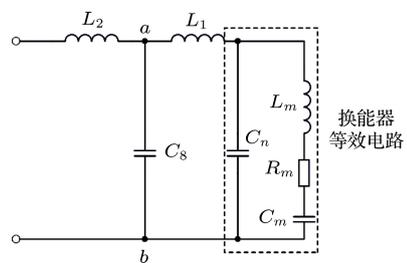


图3 T型匹配网络

Fig. 3 T - type matching network

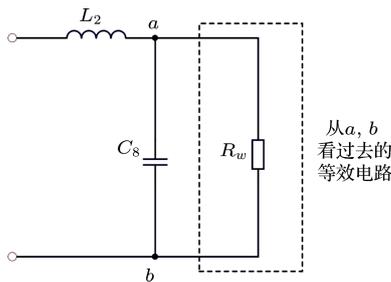


图4 a, b 两端等效电路图

Fig. 4 a, b equivalent of the circuit diagram

## 4 控制系统的设计

电源的控制系统由功率控制与频率自动跟踪两部分组成,用来控制电源的恒功率输出和保证电路实时处于谐振状态。选取STM32F103RBT6芯片作为核心处理器。它是基于ARM Cortex-M3内核的32位高性能、低功耗处理器<sup>[7]</sup>,具有2个16通道的12位A/D采样器,7通道的DMA控制器以及支持DAC、SPI、IIC和USART等多种外设。有着强大的数据处理能力与较强的实时性,可以很好地对电源系统进行控制。

### 4.1 功率控制的实现

功率控制采用逆变侧移相调功的方式来实现,通过改变两对驱动功率管开关的PWM波的相位差来改变输出电压的有效值以达到调节功率的目的。对作用于换能器两端的逆变电压 $U_{ab}$ 进行傅里叶展开,其表达式如式(1)所示:

$$U_{ab} = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{4U_d}{n\pi} \cos \frac{n\varphi}{2} \times \sin \left[ n \left( \omega t + \frac{\varphi}{2} \right) \right], \quad (1)$$

其中, $U_d$ 为整形滤波电路输入给逆变电路的直流电压, $\varphi$ 为移相角, $n$ 为谐波次数取1,3,5,……。由于换能器品质因数数值很高,所以流经负载回路中的电流为基波电流,在功率因数为1时,基波输出功率 $P$ 与移相角 $\varphi$ 的关系为

$$P = \frac{U_{1m}^2}{Z_{1m}} = \frac{8U_d^2}{\pi^2 R_1} \cos^2 \left( \frac{\varphi}{2} \right), \quad (2)$$

其中, $U_{1m}$ 与 $Z_{1m}$ 分别为基波电压与基波下的等效阻抗, $R_1$ 为图4中的谐振状态下换能器的等效阻抗,利用公式(2)可以精确控制输出功率<sup>[8]</sup>。STM32实时采集流经换能器的电压电流信号,计算出电源当

前功率,与设定功率进行比较得到功率偏差,通过STM32输出四个移相PWM脉冲波作为逆变电路的控制信号来实现功率控制,同时增设 $1\mu\text{s}$ 的死区时间以防上下桥臂同时导通造成短路故障<sup>[9]</sup>。在移相角 $\varphi$ 为 $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$ 时通过互感器采集输出PWM脉冲波与流经换能器的电流,波形分别如图5所示,实验结果表明该方法具有良好的功率控制特性。

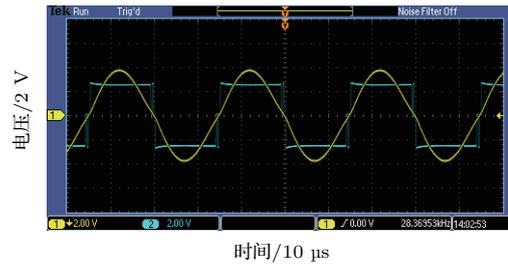
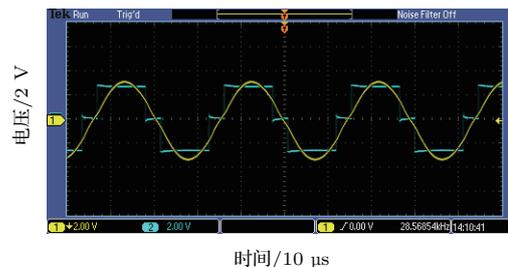
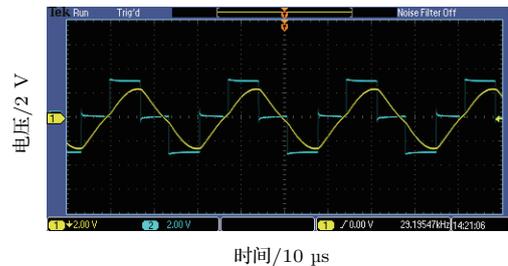
(a)  $\varphi = 0^\circ$  时输出的波形(b)  $\varphi = 45^\circ$  时输出的波形(c)  $\varphi = 90^\circ$  时输出的波形

图5 输出电流与移相角的关系

Fig. 5 The relationship between the output current and the phase shift angle

### 4.2 频率自动跟踪控制的实现

当电源系统工作在失谐状态时,流经的电流与其两端的电压存在一定的相位差。通过构建数字鉴相器采集相位差信号<sup>[10-11]</sup>,其原理如图6所示。采集回来的电流、电压信号经过零比较器与反相器转换为同频率方波信号。将两路信号进行与非,得到的新的方波的脉冲宽度反映着电压电流信号的

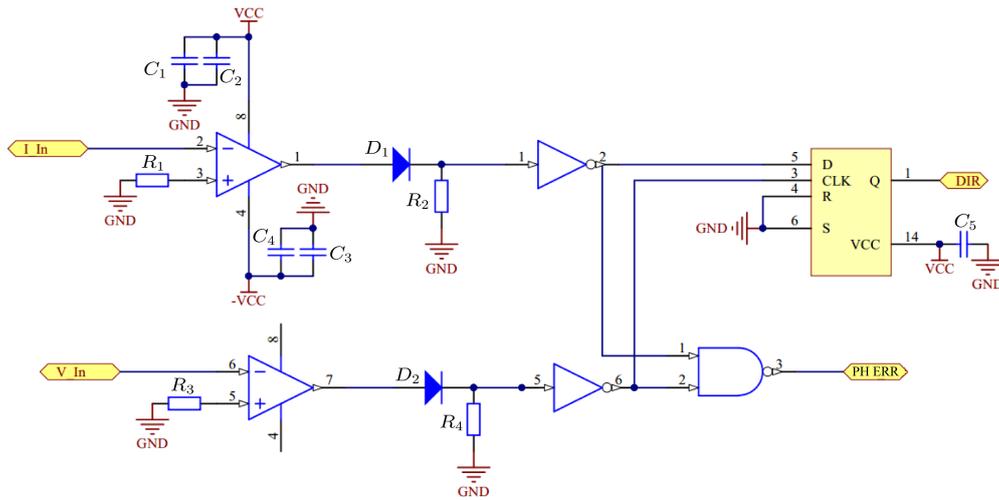


图6 数字鉴相器

Fig. 6 Digital phase detector

相位差大小。同时将电压方波信号输入到D触发器的CLK端，电流方波信号输入到D触发器的D端。若D触发器的输出端为逻辑高电平，则表示电流超前于电压；若为逻辑低电平，则表示电流滞后于电压。以相位差作为偏差信号，通过STM32进行PI调节实现频率的自动跟踪。

超声波电源系统是复杂非线性系统，很难推出精确的数学模型，结合STM32输出信号的离散特性用数值积分近似代替积分，矩形法一阶向后差分近似代替微分。离散后的PID控制器表达式为

$$u_k = K_p e_k + K_i \sum_{j=0}^k e_j + K_d (e_k - e_{k-1}), \quad (3)$$

其中， $U_k$ 为输出控制量， $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$ 为比例系数、积分系数和微分系数， $e_k$ 表示期望值与实际输出值的误差。

微分控制会在该超声波电源系统中引起系统的震荡，所以将其省去，简化为PI控制器，此时的第 $k$ 次采样与第 $k-1$ 次采样的输出差为 $\Delta u = (K_p + K_i)e_k - K_p e_{k-1}$ 。当误差范围大时，选择P调节器，可以防止超调，快速消除系偏差；当误差范围小时，选择PI调节器，从而尽快消除稳态误差，改善系统响应和控制品质。得到编程式

$$\Delta u = p_0 e_k + p_1 e_{k-1}, \quad (4)$$

其中 $p_0 = K_p(1 + T/T_i)$ ， $p_1 = -K_p$ ， $T$ 为采样周期， $T_i$ 为积分常数<sup>[10]</sup>。

运用MATLAB进行仿真，仿真结果如图7，表明该算法具有超调量小、调节时间短的优点，能有效地减小系统偏差，基本达到无静差控制，实现了频率自动跟踪。

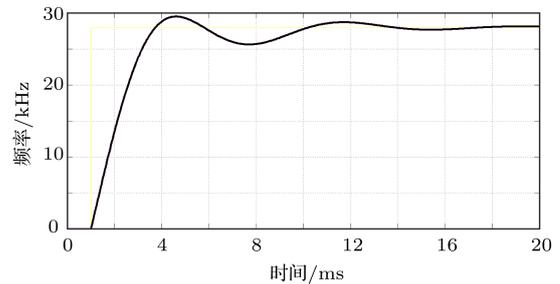


图7 PI算法仿真图

Fig. 7 PI algorithm simulation

### 4.3 控制系统软件流程图

整个电源系统的控制通过主控芯片STM32实现。软件的流程图如图8所示。系统运行前完成函数、参数的初始化，然后由用户设定电源的输出频率和输出功率。STM32通过外围电路实时采集换能器的工作状态，根据电压、电流相位差信号进行PI调节，输出频率合适的PWM波，再根据电压电流大小计算出当前功率，与预设功率进行比较，改变两路PWM波相位差进行功率调节，使得超声波换能器始终工作于最佳状态，系统同时显示当前的工作状态参数。该方案具有操作简单、工作性能稳定、可视化程度高的优点。

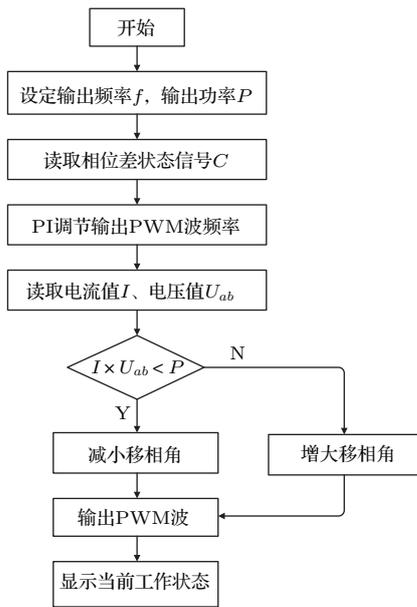


图8 系统软件流程图

Fig. 8 System software flow chart

### 5 实验验证

为了验证该电源输出功率的稳定性与谐振频率跟踪的效果,基于上述方案制作了一款应用于超声波清洗仪的电源,图9为连接超声波换能器进行带负载测试的实物图,图10为清洗前后效果图。



图9 超声波电源实物图

Fig. 9 Ultrasonic power supply

已知该换能器谐振频率为28 kHz,额定功率为60 W。设定系统初始频率为28 kHz,输出功率为60 W。将换能器置于清洗槽中进行清洗测试,系统稳定后测得换能器两端电压如图11所示,谐振频率为28.67 kHz,电压波形光滑,工作性能稳定。每分钟对系统参数进行记录,其值见表1,其中 $f$ 为输出频率, $P$ 为输出功率。可以看出输出功率稳定

在60 W左右,输出频率随着清洁状况变化自动在28 kHz~29 kHz范围内变化,实现了谐振频率的自动跟踪。清洁结果如图10所示,清洗效果显著。实验证明该电源输出功率稳定,具有较强的频率自动跟踪能力。

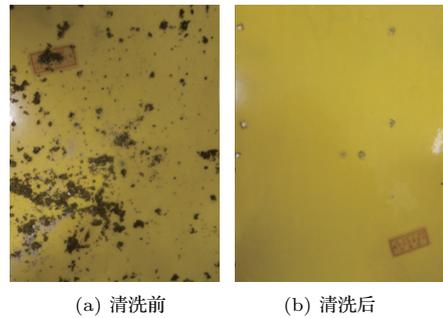


图10 清洗前后效果图

Fig. 10 Before and after cleaning

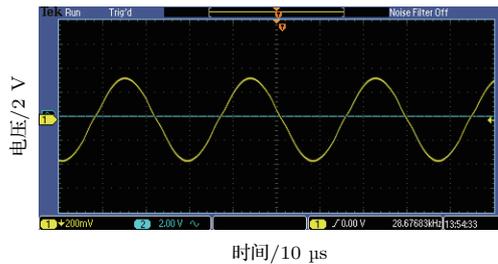


图11 输出电压波形图

Fig. 11 Output voltage waveform

表1 电源输出参数

Table 1 Power output parameters

时间 (min)	$f$ (kHz)	$P$ (W)	时间 (min)	$f$ (kHz)	$P$ (W)
1	28.58	60.1	6	29.03	60.3
2	28.62	60.1	7	28.79	60.2
3	28.63	59.9	8	28.52	60.4
4	28.70	60.3	9	28.48	60.2
5	28.92	60.4	10	28.36	60.1

### 6 结论

本文基于STM32主控制器设计了一款频率自动跟踪的超声波电源。电源电路设计采用带辅助网络的全桥逆变结构与改进的T型匹配网络,结合PWM移相调功技术,有效地控制电源输出功率。通过数字鉴相技术结合PI控制算法调节电源输出频

率,克服了因负载状态变化导致的谐振频率漂移的问题,实现了频率的自动跟踪。实验结果表明该设计具有输出功率稳定、频率自动跟踪的特点,有着较高的研究与应用价值。

### 参 考 文 献

- [1] 向风云. 超声波换能器可调驱动电源的研究 [D]. 重庆: 重庆理工大学, 2012.
- [2] 于猛, 刘润华, 刘静. 基于 56F803 型 DSP 的大功率超声波电源的研究 [J]. 国外电子元件, 2006(4): 52-55.  
YU Meng, LIU Runhua, LIU Jing. Study on high-power ultrasonic power supply based on DSP 56F803[J]. International Electronic Elements, 2006(4): 52-55.
- [3] 杜劲超, 罗辞勇, 肖洪伟, 等. 基于最小电压法的超声换能器谐振频率自动跟踪 [J]. 应用声学, 2013, 32(5): 336-340.  
DU Jinchao, LUO Ciyong, XIAO Hongwei, et al. Based on the minimum voltage method for resonant frequency automatic tracking of the ultrasonic transducer[J]. J. Appl. Acoust., 2013, 32(5): 336-340.
- [4] 滕旭东, 傅友登, 王弘辉. 基于数字 PWM 的新型超声波清洗电源的研制 [J]. 电子技术应用, 2007, 33(9): 154-157.  
TENG Xudong, FU Youdeng, WANG Honghui. Development of a new ultrasonic cleaning power supply based on digital[J]. Electronic Technology & Application, 2007, 33(9): 154-157.
- [5] 常诚, 王强, 姜德巍. 一种控制简单的谐振极型软开关逆变器 [J]. 电子世界, 2014(3): 104-106.  
CHANG Cheng, WANG Qiang, JIANG Dewei. A simple resonant pole type soft - switching inverter[J]. Electronic World, 2014(3): 104-106.
- [6] 李炳毅. 超声波电源功率控制的研究 [D]. 洛阳: 河南科技大学, 2013.
- [7] 罗秦. 基于 STM32 的逆变电源设计与研究 [D]. 天津: 天津理工大学, 2015.
- [8] 薛嘉. 基于 DSP 的超声波电源系统研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009.
- [9] 张加胜, 张磊. 电力电子技术 [M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2007.
- [10] 刘丽晨, 杨明, 李世阳, 等. 超声换能器并联谐振频率的复合式跟踪方法研究 [J]. 应用声学, 2015, 34(1): 45-50.  
LIU Lichen, YANG Ming, LI Shiyang, et al. Study on compound tracking method of parallel resonant frequency of ultrasonic transducer[J]. J. Appl. Acoust., 2015, 34(1): 45-50.
- [11] 冯丽娟, 聂建华, 沈建国. 基于 STM32 的大功率超声电源的研究 [J]. 声学技术, 2012, 31(5): 497-501.  
FENG Lijuan, NIE Jianhua, SHEN Jianguo. STM32-based high-power ultrasonic power supply research [J]. Technical Acoustics, 2012, 31(5): 497-501.