

文章编号: 2095-4980(2020)02-0339-06

## 一种频率可调超声波发生器设计

原艺博<sup>a,b</sup>, 李琳<sup>a,b</sup>, 刘海龙<sup>a,b</sup>

(西安石油大学 a.电子工程学院; b.陕西省钻机控制重点实验室, 陕西 西安 710065)

**摘要:** 不同清洗物所需的清洗频段不同, 需要接入的超声波换能器也不同。为了提高超声波发生器对不同频段换能器的适应性, 设计了一种由上位机进行频率给定、锁相环电路进行频率跟踪的闭环控制系统。整个系统由 STM32 主控制器产生脉冲宽度调制(PWM)脉冲信号, 控制 EXB841 优化驱动电路, 驱动高频全桥逆变电路; 通过阻抗匹配和输出电流的检测, 保证作用于换能器输出的功率值最大。同时对于不同频段的超声波换能器, 需要调整给定输入, 保持发生器在频率基准值的一定范围内进行频率跟踪。超声波换能器测试样机工作频率点为 28.8 kHz, 最大功率 1 500 W, 将本系统接入后谐振频率保持在 28.8 kHz 左右, 输出功率近似为最大值。经测试, 该系统对于工作频率点为 20~40 kHz 的超声波换能器都具有较好的适应性。

**关键词:** 输入给定; 驱动优化; 最大功率; 频率跟踪

**中图分类号:** TN710

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11805/TKYDA2019028

## Design of an adjustable frequency ultrasound generator

YUAN Yibo<sup>a,b</sup>, LI Lin<sup>a,b</sup>, LIU Hailong<sup>a,b</sup>

(a.Electronic Engineering School; b.Key Laboratory of Oil and Gas Well Measurement and Control Technology, Xi'an Petroleum University, Xi'an Shaanxi 710065, China)

**Abstract:** In view of the different cleaning frequency ranges required by different cleaning materials in the industry, the ultrasonic transducers that need to be connected are also different. In order to improve the adaptability of the ultrasonic generator to transducers of different frequency ranges, this paper designs a closed-loop control system for frequency reference and frequency-locked loop circuit tracking by the upper monitor. The whole system generates Pulse Width Modulation(PWM) pulse signals by STM32 main controller. It controls the EXB841 optimized driving circuit, driving high frequency full bridge invert circuit, and ensuring the maximum output power of the transducer through impedance matching and output current detection. At the same time, for different frequency ranges of ultrasonic transducers, it is necessary to adjust the given input and keep the generator in a certain range of base-value for frequency tracking. The working frequency of the ultrasonic transducer test prototype is 28.8 kHz and the maximum power is 1 500 W. The resonant frequency of the system is kept around 28.8 kHz after the system is connected, and the output power is approximately the maximum. The test results show that the system has good adaptability to the ultrasonic transducer whose working frequency is 20–40 kHz.

**Keywords:** input given; drive optimization; maximum power; frequency tracking

超声波清洗机弥补了传统清洗存在的清洗范围小, 清洗效果差, 影响产品寿命等不足, 广泛用于各行业。目前很多行业对不同清洗物所用的超声波换能器不同, 更换换能器, 超声波发生器则无法保证提供有效的触发信号, 导致换能器不能运行在谐振频率点上, 甚至根本无法正常工作<sup>[1-2]</sup>。针对这一问题, 本文设计了一款基于上位机和 STM32 主控芯片的超声波发生器闭环控制系统, 通过给定输入和功率频率的双闭环调节, 能在一定频段内接入不同类型的超声波换能器, 系统输出信号满足其工作的频率谐振点, 提高了超声波发生器对不同频段换能器的适应性。

**收稿日期:** 2019-01-30; **修回日期:** 2019-02-26

**基金项目:** 陕西省重点研发计划资助项目(2017ZDXM-GY-097); 西安石油大学研究生创新与实践能力的培养计划资助项目(YCS18213077)

**作者简介:** 原艺博(1992-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为电力电子应用。email:350052191@qq.com

### 1 超声波清洗系统的整体框图

超声波清洗设备主要由 3 大部分组成：超声波发生器、超声波换能器和清洗水槽。具体结构框图如图 1 所示。超声波清洗设备最主要的部件为超声波发生器，即超声波电源部分。超声波电源主要由主功率电路、主保护电路、主控制电路和状态显示部分组成。主功率电路将 220 V 的两相电接入二极管不可控整流模块，输出的直流电经过降压式变换斩波电路(Buck)输入给单相全桥逆变电路<sup>[3-4]</sup>，最后经由匹配阻抗接入超声波换能器。在整个主功率电路的各个模块中加入了过电流、过电压、温度监测和保护电路，若主功率电路发生不正常运行状态，保护电路会立即切断当前运行状态，并向主控制器发出报警<sup>[5-6]</sup>。主控制电路由上位机设定初始频率、初始功率、清洗时间和清洗温度等实际参数传输给 STM32 主控制器，由此发出脉冲信号作用于驱动电路，从驱动电路输出的触发信号能有效控制绝缘栅双极型晶体管(Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT)全桥电路的交替导通，最后将换能器采集的电压电流信号经锁相环电路输出两者的偏差值反馈给主控制器<sup>[7-8]</sup>，同时检测输出电流的最大值，由主控制器刷新脉宽调制(PWM)脉冲信号，重新作用于驱动电路达到对输出频率和输出功率的双闭环控制，状态显示部分显示当前的输出频率、输出电流、输出电压和清洗水温。

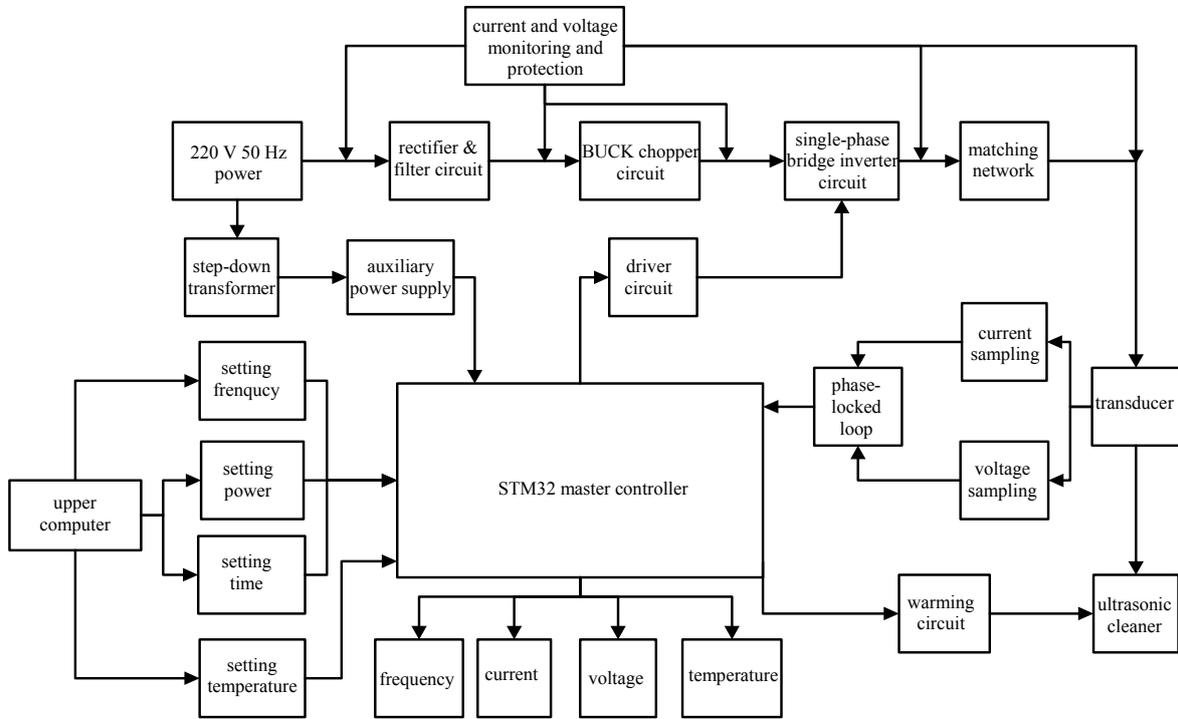


Fig.1 Diagram of ultrasonic cleaning equipment  
图1 超声波清洗设备结构框图

### 2 主功率电路

#### 2.1 高频逆变电路

设计的高频逆变电路为具有辅助性质的吸收电路网络架构。如图 2 所示， $U_{T1} \sim U_{T4}$  为 4 个用作逆变开关管的 IGBT，IGBT 旁边并联的  $C_2 \sim C_5$ 、 $R_2 \sim R_5$  分别为其对应的吸收网络，产生对逆变电路作为感性负载的阻尼作用<sup>[9-10]</sup>，有效抑制了 IGBT 在关断时阳极电压会产生上升速度过快的现象，防止门极未接入触发信号的晶闸管误导通。同时，避免了电容器通过晶闸管放电电流过大，造成过电流而损坏晶闸管。 $C_2 \sim C_5$  的容值由式(1)计算：

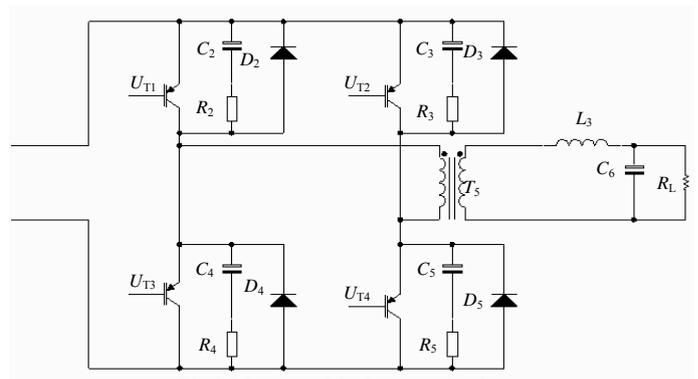


Fig.2 Diagram of the inverter circuit  
图2 逆变电路原理图

$$C = 4 \times 10^{-8} I_f \tag{1}$$

式中  $I_f$  为流过整流模块的最大电流值。本文设计的整流器件采用 S50VB60 整流桥，流过电流的最大值为 50 A，电容最终选择为  $2 \mu\text{F}$ , 1 kV 无极性电容。 $R_2 \sim R_5$  的阻值公式：

$$R = 4 \times 535 I_f \tag{2}$$

选取  $10 \Omega$  的水泥电阻。高频变压器  $T_5$  将逆变电路与阻抗电路进行隔离，将电压转换为匹配电压，提高输出的可靠性与能量转换的效率。IGBT 的门极接收从驱动电路输出的 PWM 信号，驱动每个 IGBT 管的导通与关断，将高压直流逆变为高压交流。

### 2.2 辅助电源电路

辅助电源电路如图 3 所示，由降压变压器  $T_3$  输出 24 V 交流电，经 KBPC810 模块整流为直流电，FU 为 3 A 的保险管， $C_{21}$  为滤波电容，滤除高频谐波干扰， $C_{22}, C_{28}, C_{12}$  为去耦电容，防止对芯片产生电磁干扰。选用 LM317 进行直流转换，根据表达式： $U_o = 1.25(1 + R_1 / R_6)$ ，取  $R_1 = 3 \text{ k}\Omega$ ， $R_6 = 200 \Omega$ ，则  $U_o$  输出 +20 V 电压供给驱动电路的信号输入端。LM7812 和 LM7805 分别将输入电压稳定在 +12 V 和 +5 V 电压，供给采集电路和主控制器。 $C_9, C_{10}, C_{11}$  用于稳定 2 个稳压管内部放大器的工作状态，同时改善电压调整的过渡响应。ICL7660 将 +5 V 电压转换为 -5 V 电压， $C_{14}$  为充电电容， $C_{13}$  为稳压电容。-5 V 电压供给双电源高阻抗的电压采集电路。

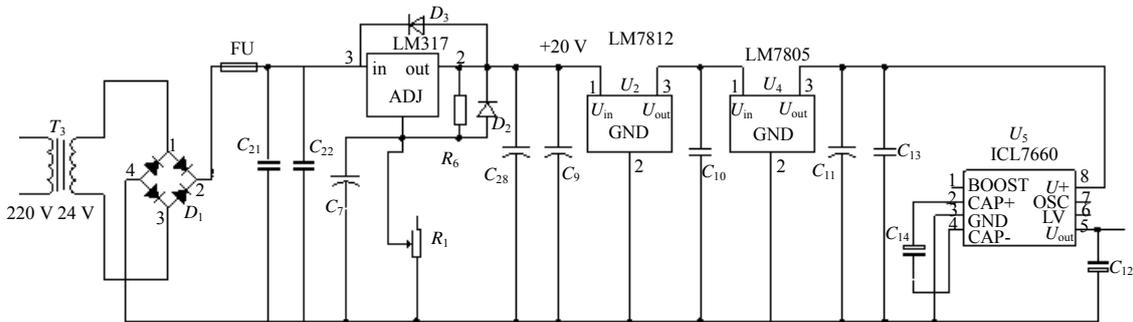


Fig.3 Circuit of auxiliary power supply  
图 3 辅助电源电路

### 2.3 驱动电路

设计了 EXB841 的优化驱动电路，如图 4 所示。优化电路能对脉冲信号提供保护，同时减小输出损耗，提高转换效率。在  $U_5$  的 6 脚  $D_5$  后加入稳压二极管  $D_7$ ，有效降低过流检测的电压阈值。在 2 脚和 9 脚之间接入  $2 \text{ k}\Omega$  电阻  $R_{37}$  和 5 V 稳压管  $D_9$ ，用于保护内部电路的稳压结构，同时提高芯片寿命。在 14 引脚的输入端加入外部定时器 NE555P 用于延时 IGBT 的输入信号，在 IGBT 关断时，利用几微秒的延时状态，确保其完全关断后，再接入触发信号，保证每次 IGBT 都可实现软关断的功能。TLP521 光耦合器保护电路与内部信号传输电路进行隔离。

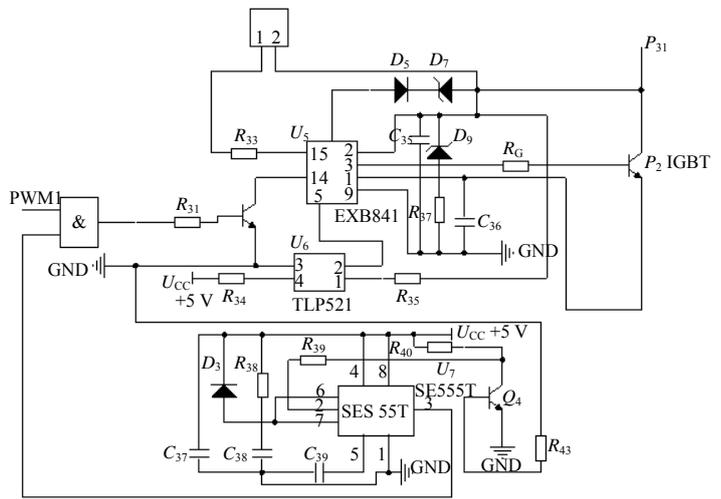


Fig.4 Driver circuit  
图 4 驱动电路

### 2.4 匹配阻抗网络

超声波换能器可以看作是系统的负载部分，要使负载能够获得最大的输出电流和输出功率，必须将负载的运行保持在谐振状态。如图 5 所示， $C_0$  为超声波换能器的静态电容，通过利用一个远远小于谐振频率的频率值来测量，是一个纯粹的电学量； $L_m, C_m$  和  $R_m$  是由超声波换能器的质量、机械损耗等方面折算过来的等效参数，是一个非纯粹的电学量<sup>[11-12]</sup>。由于超声波换能器的整体负载呈现容性性质，一般在其等效阻抗前端串联一电感元件补偿容性阻抗，同时降低有功损耗和高次谐波的影响。但实际使用时，超声波换能器会在运行过程中由于温度、时间、损耗等不确定因素，造成超声波换能器的等效负载阻抗从谐振状态漂移为非谐振状态，减小

了输出电流，降低了输出功率，严重时损坏超声波换能器的内部振子。因此本文设计了一种由可变电容  $C_1$  和电感  $L_1, L_3$  组合起来的匹配网络。整个匹配电路的等效阻抗  $Z_{eq}$  可表示为：

$$Z_{eq} = \frac{j\omega_s L_1 + 1}{j\omega_s C_1 R_1} \quad (3)$$

式中  $\omega_s$  为换能器的工作频率。

为使等效阻抗的虚部为零，则取

$$L_1 = \frac{C_1 R_1^2}{1 + (\omega_s C_1 R_1)^2} \quad (4)$$

$$L_3 = \frac{C_0 R_m^2}{1 + \omega_s^2 C_0^2 R_m^2} \quad (5)$$

由于 3 个参数  $\omega_s^2 R_m^2 C_0^2 \ll 1$ ，因此取  $R_1 = R_m$ ，则式(3)可变为：

$$Z_{eq} = \frac{R_m}{1 + \omega_s C_1 R_m} \quad (6)$$

由式(6)可直观反映等效阻抗  $Z_{eq}$  直接取决于可变电容  $C_1$  的大小。实际操作中由主控制芯片的实时监测电路和报警电路给出系统是否运行在最大输出功率状态，若不满足条件，则报警提醒，此时只需改变匹配电路中的可变电容  $C_1$  即可满足匹配阻抗的要求。

### 3 频率跟踪系统的设计

超声波换能器在发生频率漂移时会产生失谐的运行状态，导致输出功率降低，影响运行效率。为解决这一问题，本文采用锁相环网络锁定输出电压电流的相位差，将差值反馈给 STM32 主控芯片进行处理。整个频率跟踪系统如图 6 所示，AD736 是一种经过激光修正的单片精密真有效值转换器，主要由输入放大器、全波整流器、有效值单元、偏置电路、输出放大器等单元器件组成<sup>[13-14]</sup>。可以将 200 mV

之内的交流信号转换为直流信号，并且其测量的综合性误差不超过  $\pm 3\%$ ，具有准确度高，灵敏性好，测量速率快，频率特性好，电源范围宽且功耗低等优势。芯片  $U_5, U_6$  的 1 脚为低阻抗输入端，2 脚为高阻抗输入端， $C_{33} \sim C_{36}$  为平均电容，其大小会影响测量精确度<sup>[15]</sup>，本文选用 33  $\mu\text{F}$  容值的电容。整个系统采用电流互感器和电压互感器分别对输出到换能器的电流和电压按一定比例进行缩小。将缩小后的信号经 2 个 AD736 芯片转换为直流数值，再经过 2 个比较器输出数字信号传输给 D 触发器 74HC74。若最后输出的结果为高，则表明电压相位滞后于电流；若结果为低，则表明电压相位超前于电流。

### 4 系统软件设计

STM32 控制器可以通过自身定时器产生 PWM 脉冲信号，在定时器中 ARR 寄存器确定频率，CCRx 寄存器确定占空比，BDTR 寄存器决定死区时间，主控制器的时钟频率为 72 MHz，由预装载寄存器的值 ARR、预分频系数 PSC、捕获比较寄存器的值 CCRx 等参数可得出系统产生 PWM 脉冲信号的频率( $F_{\text{PWM}}$ ):

$$F_{\text{PWM}} = \frac{72 \times 10^6}{(ARR + 1) \times (PSC + 1)} \quad (7)$$

PWM 波的占空比(dutycircle)为：

$$\text{dutycircle} = CCRx / ARR \quad (8)$$

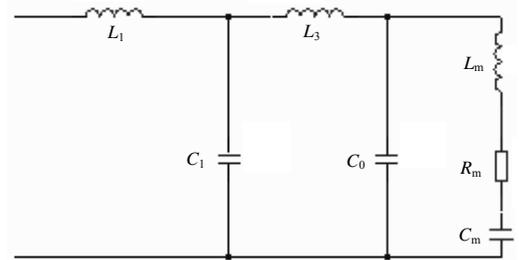


Fig.5 Resistance match circuit  
图 5 匹配阻抗电路

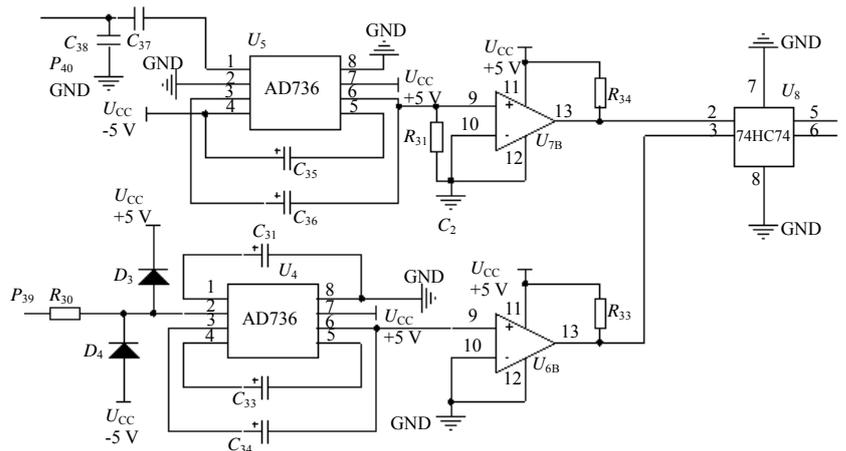


Fig.6 Frequency tracking circuit  
图 6 频率跟踪电路

本系统中超声波换能器的工作频率为 28.8 kHz，选取  $ARR=2\ 499$ ， $PSC=0$ ， $CCR_x=1\ 250$ ，则 PWM 脉冲频率与换能器的工作频率相匹配。整个系统的软件流程图如图 7 所示。

若检测输出到换能器的电压电流相位不一致时，需调节定时器 PWM 的输出频率；若检测到输出电流不同于最大电流时，调节移相角刷新 PWM 频率和占空比，达到对频率和功率的闭环控制。

### 5 实验结果

高频全桥逆变电路的门极需要 4 个 EXB841 芯片驱动，每个驱动芯片需各自的 PWM 触发脉冲。主控芯片 STM32 的 TIM1 高级定时器可发出 4 路信号互补 PWM 脉冲波，对应各自的上下桥臂。为了防止上下桥臂可能在某一时刻同时导通，需在驱动程序中加入死区时间，本系统的死区时间设置为  $3\ \mu s$ 。如图 8 所示，利用 Debug 进行软件仿真，图中的脉冲频率为 28.8 kHz。

将驱动电路接入 IGBT 后，测量 IGBT 门极输入的驱动信号。如图 9 所示，触发脉冲的正半轴的峰值电压为 16.2 V，负半轴的峰值电压为 -9.8 V，满足 IGBT 的导通与关断条件。表 1 记录了温度为  $40\ ^\circ C$ 、频率为 28.8 kHz、功率为 1 500 W 的系统运行时显示模块各项参数的实际值。

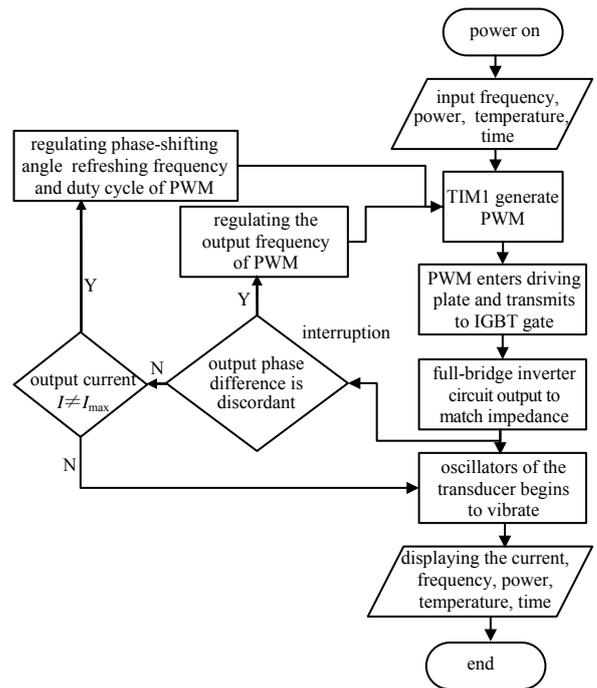


Fig.7 System flow chart  
图 7 系统流程图

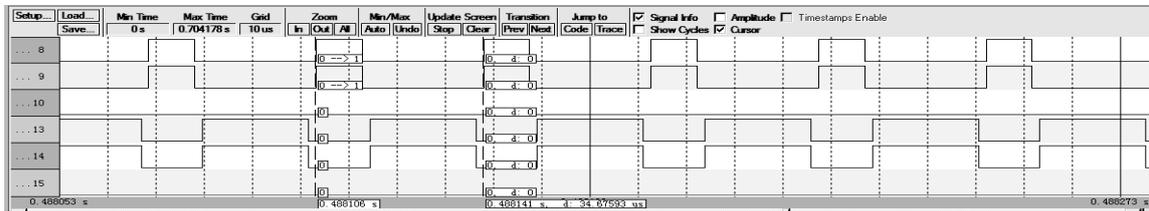


Fig.8 Four complementary PWM pulse outputs  
图 8 4 路互补的 PWM 波形输出

表 1 运行状态显示  
Table1 Display of working states

t/min	f/kHz	I/A	U/V	P/W	T/°C
1	28.72	4.22	353	1 490	40
2	28.77	4.31	346	1 491	40
3	28.81	4.35	344	1 496	40
4	28.78	4.30	347	1 492	40
5	28.70	4.21	354	1 490	40

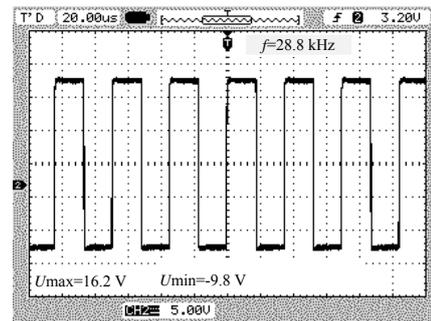


Fig.9 Trigger signal of IGBT  
图 9 IGBT 触发信号

### 6 结论

本文利用 STM32 高级定时器产生 4 路互补 PWM 脉冲信号，结合 EXB841 优化驱动电路，给 IGBT 提供了一个理想的触发信号，控制 IGBT 的通断，后续采用 AD736 转换芯片从换能器采集电压电流信号并作用于 74HC74 触发器产生相位差，同时比较输出电流与最大电流的差值，将两种结果传输给主控芯片进行 PWM 波的调整，刷新频率和占空比。与传统的超声波发生器相比，本系统接入频率谐振点为 20~40 kHz 的超声波换能器上都具有较好的适应性，能正常工作，且稳定性良好。

## 参考文献:

- [1] 屈百达,屈环宇,廖建庆. 基于可编程片上系统的宽频带超声波电源系统设计[J]. 声学技术, 2016,35(3):243-247. (QU Baida,QU Huanyu,LIAO Jianqing. Design of broadband ultrasonic power supply system based on SOPC[J]. Technical Acoustics, 2016,35(3):243-247.)
- [2] 熊敬清,蒙万俊,陈小峰,等. 有限双极性软开关 PWM 控制和 IGBT 驱动电路设计[J]. 电焊机, 2008,38(12):73-76. (XIONG Jingqing,MENG Wanjun,CHEN Xiaofeng,et al. Bipolar limited soft-switching PWM control and IGBT drive circuit design[J]. Electric Welding Machine, 2008,38(12):73-76.)
- [3] 张兴红,蔡伟,邱磊,等. 基于 FPGA 与 DDS 技术的可调超声波驱动电源设计[J]. 仪表技术与传感器, 2015(6):84-87. (ZHANG Xinghong,CAI Wei,QIU Lei,et al. Design of ultrasonic power supply based on FPGA and DDS[J]. Instrument Technique and Sensor, 2015(6):84-87.)
- [4] 李夏林,刘雅娟,朱武. 超声电源频率自动跟踪的模糊控制算法研究[J]. 应用声学, 2017,36(2):135-141. (LI Xialin, LIU Yajuan,ZHU Wu. The fuzzy control algorithm of frequency auto-tracking of the ultrasonic power supply[J]. Journal of Applied Acoustics, 2017,36(2):135-141.)
- [5] 梁校勇,张永俊,李春红. 超声电源频率跟踪电路的改进[J]. 电加工与模具, 2009(1):38-40,67. (LIANG Xiaoyong, ZHANG Yongjun,LI Chunhong. Improvement of frequency tracking circuit for ultrasonic power[J]. Electromachining & Mould, 2009(1):38-40,67.)
- [6] 冯平法,郑书友,张京京. 功率超声加工关键技术的研究进展[J]. 制造技术与机床, 2009(5):57-62. (FENG Pingfa, ZHENG Shuyou,ZHANG Jingjing. Development of the study on key techniques of power ultrasonic machining[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2009(5):57-62.)
- [7] 李长有,李帅涛,刘遵. 超声波电源的复合频率跟踪策略研究[J]. 电子技术应用, 2016,42(10):135-137,141. (LI Changyou,LI Shuaitao,LIU Zun. Research on the composite frequency tracking strategy of ultrasonic power[J]. Application of Electronic Technique, 2016,42(10):135-137,141.)
- [8] 涂晓凯,吴彦,李国锋,等. 一种高频超声波换能器驱动电路的设计[J]. 电子测量技术, 2009,32(4):23-25. (TU Xiaokai, WU Yan,LI Guofeng,et al. Design of a high frequency driving circuit of ultrasonic wave transducer[J]. Electronic Measurement Technology, 2009,32(4):23-25.)
- [9] 苏文虎,陈迅. 基于 FPGA 的宽频超声波电源频率跟踪系统设计[J]. 电子技术应用, 2017,43(3):59-62. (SU Wenhua, CHEN Xun. Research on frequency tracking system of wide-band ultrasonic power supply based on FPGA[J]. Application of Electronic Technique, 2017,43(3):59-62.)
- [10] 刘润华,王丙义,彭星. 基于磁通控制可调电抗器的超声波换能器动态匹配策略[J]. 电气应用, 2013,32(19):82-85. (LIU Runhua,WANG Bingyi,PENG Xing. Dynamic matching strategy of ultrasonic transducer based on flux-controlled adjustable reactor[J]. Electrotechnical Application, 2013(19):82-85.)
- [11] WYNDRUM R W. Microwave filters impedance-matching networks and coupling structures[J]. Proceedings of the IEEE, 2005,53(7):766.
- [12] 李涛,胡和平,杨洪,等. 大功率激光二极管驱动电源研制[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2015,13(3):454-457,472. (LI Tao,HU Heping,YANG Hong,et al. Development of high-power laser diode power supply[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2015,13(3):454-457,472.)
- [13] 王玉江,王志斌,宋雁鹏,等. 压电超声换能器阻抗特性分析与匹配设计[J]. 压电与声光, 2016,38(4):633-638. (WANG Yujiang, WANG Zhibin,SONG Yanpeng,et al. Impedance characteristic analysis and matching design of piezoelectric ultrasonic transducer[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2016,38(4):633-638.)
- [14] 于泽旭,宋锦春,王天骄,等. 换能器驱动电路的设计及实验研究[J]. 机械与电子, 2015(3):50-53. (YU Zexu,SONG Jinchun,WANG Tianjiao,et al. Design and experimental investigation of transducer drive electronic circuit[J]. Machinery & Electronics, 2015(3):50-53.)
- [15] 姚俊,陈骥,张旭茹,等. 压电脉冲超声波发生器激励电源的设计[J]. 电子设计工程, 2015,23(24):56-59. (YAO Jun, CHEN Ji,ZHANG Xuru,et al. Design of piezoelectric ultrasonic generator power supply[J]. Electronic Design Engineering, 2015,23(24):56-59.)