

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.12.001

# FNA41560 智能功率模块在超声波发生器中的应用\*

计时鸣<sup>1</sup>, 陈 凯<sup>1,2</sup>, 谭大鹏<sup>1</sup>, 张 利<sup>1</sup>

(1. 浙江工业大学 机械工程学院, 浙江 杭州 310014;

2. 丽水学院 浙江省特色文创产品数字化设计与智能制造重点实验室, 浙江 丽水 323000)

**摘要:**针对磨粒流抛光中对超声发生器的功能有特殊要求的问题,专门设计制作了一种超声波发生系统,探讨了超声波发生器的3个主要组成部分即换能器、变幅杆和超声电源,研究了各部分的设计理论和具体参数的选择,指出了利用智能功率模块设计制作的超声发生器,有线路简单、体积小、功能全、成本低、性能好的优势,介绍了以FNA41560为主要功率元件的超声发生器的设计,包括了主电路拓扑结构、保护、控制策略、阻抗匹配、频率跟踪、换能器、变幅杆等方面的内容,该样机在实际加工中获得了很好的效果。研究表明:在低频超声波发生器的领域,功率模块结合微处理器控制技术,有其他电子器件无法比拟的优势。

**关键词:**智能功率模块;超声发生器;D类放大器;IGBT

中图分类号:TH16;TM315

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2017)12-1369-07

## Application of IPM FNA41560 in ultrasonic generator

Ji Shi-ming<sup>1</sup>, Chen Kai<sup>1,2</sup>, Tan Da-peng<sup>1</sup>, Zhang Li<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China;

2. Key Laboratory of Digital Design and Intelligent Manufacturing for Creative Cultural Products of Zhejiang Province, Lishui University, Lishui 323000, China)

**Abstract:** Aiming at the special requirements to the ultrasonic function for soft abrasive flow machining, the specialized ultrasonic generation system was researched and designed. The ultrasonic generator was mainly composed of transducer, horn and ultrasonic generator power supply. The advantages such as simple circuit, small size, multi-function, low cost and good performance were introduced by design of an ultrasonic generator power with intelligent power module. An ultrasonic generator with FNA41560 as the key component was introduced. The main circuit topology, protection, control strategy, impedance matching and frequency tracking were introduced. The results indicate that the power module combined with microprocessor control technology has the advantage that other electronic devices can not match in the field of low frequency ultrasonic generator.

**Key words:** intelligent power module; ultrasonic generator; class d amplifier; IGBT

## 0 引 言

在磨粒流抛光过程中,合理利用超声空化效应可以起到非常显著的辅助作用<sup>[1-3]</sup>。所谓超声空化就是超声波以纵波的形式在流体里传播时,流体质点间距会发生疏密变化,其内部某些尺寸的气泡会在一个超

声周期内被拉大、压小发生溃灭而产生高温、高压和冲击波<sup>[4-5]</sup>。空化的发生有一定条件,它对超声波的频率、强度有要求,加上磨粒流抛光的工艺需要,还要求有快速停波、发波,间断时间可变的特殊功能,因此需要专门设计制作超声波发生装置。一般超声波发生装置由换能器、变幅杆和超声波电源3部分组成。

收稿日期:2017-07-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51575494,51375446);浙江省科技厅公益性项目(2014C31031)

作者简介:计时鸣(1957-),男,浙江温州人,博士,教授,博士生导师,主要从事精密制造和机器人技术方面的研究。E-mail: jishiming@zjut.edu.cn

换能器的作用是把某种频率的交流电变成同样频率的机械振动,实现电能到机械能的转化。对于一个机械振动系统,只有发生共振时其振幅值才能达到最大,因此换能器的谐振频率是有固定范围的。

发生谐振的换能器,其振动幅值只有几微米,超声波辅助抛光时还需要用变幅杆把振幅放大,另外,变幅杆可以作为机械阻抗变换器,在换能器和声负载之间进行阻抗匹配,使超声能量更有效地从换能器向负载传输,变幅杆和换能器的谐振频率要一致,设计成阶梯轴的变幅杆最为简单。

超声波电源的核心功能是实现两个方面的控制:(1)输出功率信号的控制。需要稳定输出功率,通过功率反馈信号相应调整功率放大器,使得功率放大稳定;(2)提供频率跟踪功能。换能器的谐振频率点会由于各种原因改变,频率跟踪信号可以控制信号发生器,使信号发生器的频率在一定范围内跟踪换能器的谐振频率点,让发生器工作在最佳状态。

本研究结合磨粒流抛光的具体情况,探讨超声波发生装置的设计。

### 1 超声波换能器及其阻抗匹配

压电换能器的发展是以压电效应的发现和压电材料的发展为前提的。早期的压电效应研究仅限于晶体材料,现在则多采用性能更佳的压电陶瓷<sup>[6]</sup>。

当对压电元件施加应力时,就会在压电元件的两个表面上会出现极性相反的等量束缚电荷,电荷的大

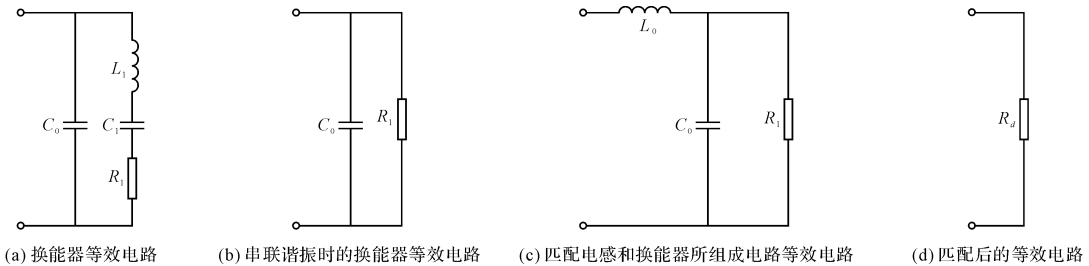


图 1 换能器匹配等效电路

因此,压电陶瓷振子在谐振时的机电特性可由图 1(a) 所示的 LC 串并联回路表示。在图中,称 C<sub>0</sub> 支路为电学臂,由 L<sub>1</sub>, C<sub>1</sub>, R<sub>1</sub> 组成的电路为机械臂。L<sub>1</sub> 等效表示压电片振动的惯性, C<sub>1</sub> 等效表示压电片振动的弹性, R<sub>1</sub> 等效表示换能器的损耗,消耗在 R<sub>1</sub> 上的功率越大,则说明换能器振动系统振动得越强烈,能量转换效果越好。

当换能器工作在串联谐振状态时,其等效电路如图 1(b) 所示。为保证信号能高效而安全地传输给换能器,需要进行阻抗匹配,如图 1(c) 所示,合理选择匹

小与外力成正比,当外力移除后,又回复电中性的状态,这种现象称为正压电效应。反过来将压电元件置于外电场中,引起内部正负电荷中心产生相对移动,同样会导致压电元件的变形。位移的大小与材料的压电常数有关,当电场强度远小于压电材料的极化电场时,位移与施加的电场强度成正比。这种现象称为逆压电效应,其表达式为<sup>[7-10]</sup>:

$$\begin{cases} S_i = d_{ni} E_i \\ T_i = e_{ni} E_i \end{cases} \quad (i = 1, 2, 3; n = 1, 2, 3, 4, 5, 6) \quad (1)$$

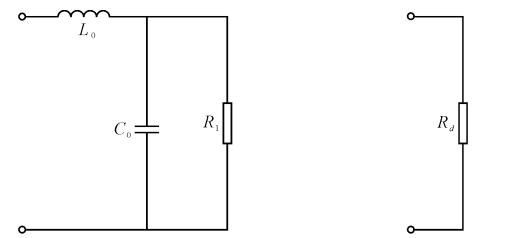
式中: S<sub>i</sub>—应变; T<sub>i</sub>—应力; d<sub>ni</sub>, e<sub>ni</sub>—压电常数; E<sub>i</sub>—外加电场。

为能定量分析换能器的性能,需要分析它的压电元件的性能,要用压电元件的运动方程、元件介质的压电方程、描述元件介质电学性质的方程,以及元件的具体力学边界条件和电学边界条件。

虽然可以直接用数学方法求解上述一些基本方程,推导压电片的表面上各物理量之间的数量关系,得到梅森等效电路来描述力学量和电学量之间的关系。但是人们习惯于把这里所涉及的力学和电学问题相互耦合等效电路<sup>[11-13]</sup>。

根据高频交流电路理论,压电陶瓷振子的等效阻抗随频率而变化的曲线与 LC 串并联谐振回路的阻抗特性完全相似,在谐振频率附近, LC 串并联谐振回路的阻抗特性与压电陶瓷振子的等效阻抗特性和谐振特性一致。

换能器匹配等效电路如图 1 所示。



配电感 L<sub>0</sub>, 就可以让电路工作在图 1(d) 所示的理想状态,这时能量转换效果是最好的。

匹配电感和换能器所组成系统的输入阻抗为:

$$Z = R_d + jX = j\omega_0 L + \frac{j\omega_0 C_0 R_1}{1 + (\omega_0 C_0 R_1)^2} = j\omega_0 L + \frac{R_1(1 - j\omega_0 C_0 R_1)}{1 + (\omega_0 C_0 R_1)^2} = \frac{R_1}{1 + (\omega_0 C_0 R_1)^2} + j\left[\omega_0 L - \frac{\omega_0 C_0 R_1^2}{1 + (\omega_0 C_0 R_1)^2}\right] \quad (2)$$

取式中的  $\omega_0 = 2\pi f_s$  为压电换能器串联谐振角频

率时,可得静态匹配电感为:

$$L_0 = \frac{C_0 R_1^2}{1 + (\omega_0 C_0 R_1)^2} \quad (3)$$

这样就可以实现静态匹配,但这只是理想的情况,实际工作的中的换能器,由于负载变化、信号幅值增大、温度变化等原因,谐振频率会发生变化,还需要借助超声电源实现动态匹配。

## 2 变幅杆的设计计算

常用的变幅杆分为二分之一波长变幅杆和四分之一波长变幅杆两种,变幅杆的形状一般有圆锥形、悬链形、指数形和阶梯形以及复合变幅杆。虽然复合变幅杆的形状因数一般优于阶梯形变幅杆,有些变幅杆的放大倍数也都比阶梯形的放大倍数要大,由于外形的特殊性,不易加工,选择阶梯形的变幅杆更为方便。使用半波长变幅杆阶梯形变幅杆由于直径大小的突然变化引起极大的应力集中,会导致变幅杆疲劳断裂,一般在阶梯形变幅杆的中间加一段过渡圆弧,使其既有高振幅放大倍数,又可以使工作应力在许用应力范围内<sup>[14-16]</sup>。

在材料方面,45# 钢价格便宜、可加工性好、振动能耗系数较小、声弹性也好,故非常适合作为变幅杆的材料,不足之处是强度稍显不足。

阶梯形变幅杆由两段不同截面的均匀杆组成,其纵向振动示意图如图 2 所示。

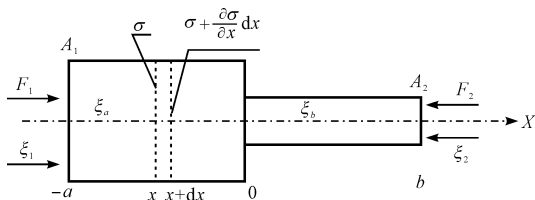


图 2 阶梯形变幅杆的纵向振动

其对称轴为坐标轴  $x$ , 作用在微小体元(区间  $x, x + dx$ ) 上的张应力为  $\frac{\partial \sigma}{\partial x} dx$ , 根据牛顿定律可以写出动力学方程:

$$\frac{\partial(A \cdot \sigma)}{\partial x} dx = A \cdot \rho \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} dx \quad (4)$$

式中: $A$ —杆的横截面积函数,  $A = A(x)$ ;  $\xi$ —质点位移函数,  $\xi = \xi(x)$ ;  $\sigma$ —应力函数,  $\sigma = \sigma(x) = E \cdot \partial \xi / \partial x$ ;  $\rho$ —杆的密度;  $E$ —弹性模量。

推导可得质点位移公式:

$$\begin{cases} \xi_a = \xi_1 \cos[K(a+x)] \\ \xi_b = \xi_2 \cos K a \cos K x - \frac{A_1}{A_2} \xi_1 \sin K a \sin K x \end{cases} \quad (5)$$

式中: $K$ —圆波数,  $K = \omega/c$ ;  $c$ —纵波在变幅杆中的传播速度,  $c = \sqrt{E/\rho}$ 。

令  $\xi_b = 0$ , 得位移节点  $x_0 = b - \lambda/4$ , 使用半波长变幅杆。当  $b = a = \lambda/4$  时, 节点  $x_0 = 0$ , 即在中心位置, 节点处位移为零, 取该位置为变幅杆固定位置, 能量损失最小。

变幅杆工作于谐振状态时输出端的振幅与输入端激振振幅的比值, 即放大系数为:

$$M_p = \frac{A_1}{A_2} = N^2 \quad \left( b = a = \frac{\lambda}{4} \right) \quad (6)$$

这里的理论推导的变幅杆特性都是在空载的形式下得出的, 即变幅杆仅仅是单一的构件, 既没有与换能器发生结构联系, 也没有连接负载, 处在两端自由状态。超声变幅杆的负载是指被处理对象介质在变幅杆输出端面所呈现的机械阻抗, 通常情况下既有力阻分量也有力抗分量, 也就是阻性负载和抗性负载。

在实际加工过程中, 变幅杆的输出端面都是有负载的, 负载则随水的流速、磨料液浓度、大小等因素的差异而变化, 目前尚没有有效的方法可以直接测量变幅杆的工作性能, 只能通过研究变幅杆输出端负载的表现形式来间接分析负载效应对超声加工效率的影响, 以材料去除为依据, 通过实验评价整个系统的工作性能。

## 3 超声波电源的设计

超声波电源的设计分硬件和软件两部分。电源主电路是超声波电源硬件的核心部分, 本质上来说, 超声波发生器的主电路就是一种单相逆变电路<sup>[17-19]</sup>。软件部分扩展了超声电源的性能, 磨粒流抛光中的一些特殊要求, 只有借助于软件才能完成。

### 3.1 电源电路主要功率器件的选择

常见的功率放大拓扑结构有 A 类、B 类、AB 类及 D 类。D 类放大器是通过控制开关单元的开关, 以驱动负载的放大器, 常采用脉宽调制(PWM) 技术。随着电子技术的发展, D 类放大器在低频超声波发生领域可以体现出其优势。

低频超声波的频率只在 20 kHz 左右, MOSFET 和 IGBT 完全可以胜任。FNA41560 可以方便地运用在单相逆变电路中。

FNA41560 采用 Fairchild 公司的智能功率模块<sup>[20]</sup>, 其内部集成了耐压 600 V, 峰值电流最大可达 15 A 的三相 IGBT 逆变器桥, 逆变器的每相电流可单独监视。

FNA41560 内部等效电路和输入/输出引脚图如图 3 所示。

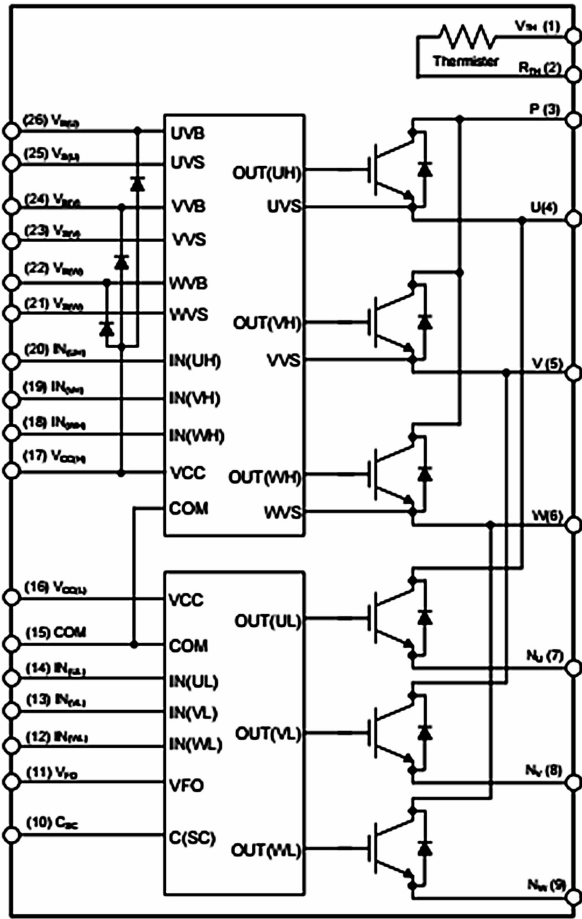


图 3 FNA41560 内部等效电路和输入/输出引脚图

为简化电路结构,功率模块多采用单电源驱动,这就不可避免地要处理上管驱动的问题,常采用充电泵电路。对于图 3 中的 3 个下管来说,直接采用 +15 V 电源供电,上管的驱动要依靠上管电压输出端 VB 和“浮地”VS 之间外接的自举电容获得供电电压。当上管截止时,+15 V 电源通过图 3 中的 3 个内置快恢复二极管对自举电容充电;当上管工作时,自举电容放电以维持上管导通。自举电容的存在使得同一桥臂上、下管的驱动电路只需外接一个电源,自举电容的电压必须在 13 V ~ 18.5 V 的范围,确保驱动电路可完全打开上管。功率模块内置一个电压检测功能,如果自举电容上的电压  $V_{BS}$  低于额定电压下限,上管将自动关闭,防止 IGBT 运行在高耗散模式。

充电泵电路带来的问题是控制信号的占空比不能达到 100%,否则会导致自举电容电荷耗尽而关断上管。控制信号的占空比和开关周期时间是决定了自举电容的容量,自举电容的充电电路由内置二极管  $D$ 、电阻  $R_{BS}$ 、+15 V 驱动电源、自举电容和下管 IGBT 组成。当下管 IGBT 导通或者电流可以流经负载到地形成通电回路,电容就可以充电。模块上电初始化时要保证自

举电容有足够的时间充电,充电时间要满足:

$$t_{\text{充电}} \geq C_{BS} \times R_{BS} \times \frac{1}{\delta} \times \left( \frac{V_{CC}}{V_{CC} - V_{BS(\min)} - V_f - V_{LS}} \right) \quad (7)$$

式中: $V_f$ —二极管  $D$  的管压降; $V_{LS}$ —IGBT 下管或者负载的压降; $V_{BS(\min)}$ —自举电容上的电压  $V_{BS}$  的下限; $\delta$ —开关周期时间。

在正常工作时间,充电时间要满足上式的要求。

另外一个要注意的问题是“浮地下冲”的问题,如图 4 所示。

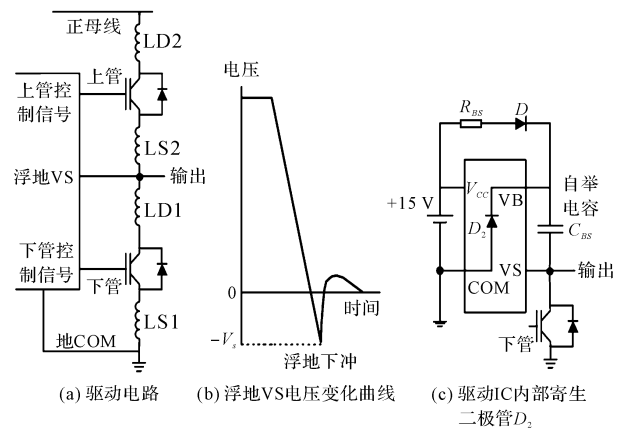


图 4 浮地下冲示意图

在理想状况下,上管导通时浮地 VS 的电压为母线电压;下导通时浮地 VS 的电压为零。实际电路中,桥臂向感性负载输出电流时,一旦上管关断导致负载电流突然换流至下管的续流二极管,由于有杂散电感的存在,LS1 和 LD1 上的感应电动势会导致 VS 的电压低于负母线地的电压,VS 的电压变化如图 4(b) 所示。

由于半导体制造工艺上的原因,驱动电路的内部有一个寄生二极管  $D_2$ ,当浮地 VS 的电压下冲到极限时,由于自举电容两端的电压基本保持不变,使得 VB 的电压比地还低,寄生二极管  $D_2$  意外导通,严重时母线的高压窜入控制电路,导致芯片损坏。

最后是“死区保护”问题,因为 FNA41560 的驱动电路不会自己产生死区时间,这就需要微处理器负责死区时间的产生。

### 3.2 FNA41560 保护功能的使用

采用上、下管结构的半桥电路都存在直通短路的隐患,另外外部负载的意外短路也同样会导致巨大的短路电流。FNA41560 有一个内置的短路保护功能,这样可以减少 IGBT 的关断时的  $di/dt$ ,同时送出故障信号给微处理器。

模块还使用外部电流采样检测电阻来检测短路或桥臂电流,电路的连接示意图如图 5 所示。

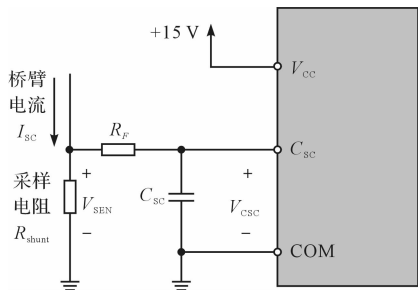


图 5 使用单电流采样电阻时电路的连接

笔者推荐使用  $0.1 \mu\text{F} \sim 0.22 \mu\text{F}$  的滤波电容来滤波,电容需要正确的连接,采样电阻和芯片间的连线要尽可能的短。通过 RC 滤波器监视流到负母线(地)的电流,如果电流超过规定值,即电容  $C_{SC}$  上的电压超过规定值,模块就关闭 IGBT,并发送故障信号到微处理器。由于该保护动作不会重复进行,微处理器收到故障信号时必须立即响应并作相应处理。

采样电阻的阻值为:

$$R_{SHUNT} = \left( \frac{V_{SC(REF)}}{I_{SC}} \right) \quad (8)$$

式中:  $V_{SC(REF)}$ —动作时参考电压;  $I_{SC}$ —桥臂电流。

RC 滤波器是必不可少的,可以起到去噪和调节响应时间的功能。RC 时间常数是建议设置在  $1.5 \mu\text{s} \sim 2 \mu\text{s}$  范围内。模块具有内部滤波功能会延迟响应  $0.5 \mu\text{s}$  左右,关断信号传输延迟也要  $1 \mu\text{s}$  左右,系统总的响应延迟时间为三者之和。

模块提供了过热保护功能,内置的热敏电阻的阻值会随模块的温度而变化,具有 AD 转换功能的微处理器可以利用一个阻值固定的电阻和该热敏电阻串联组成检测电路,用恒压电源供电,当热敏电阻上的电阻变化到预先设置的值时,可以切断输出或者报警。利用厂家提供的温度和热敏电阻阻值的数据,还可以比较准确地测出模块温度。

### 3.3 电源输出功率的调节

FNA41560 具有三相输出的能力,在超声波发生器中只用到其中两个半桥就足够。

超声波电源主电路如图 6 所示。

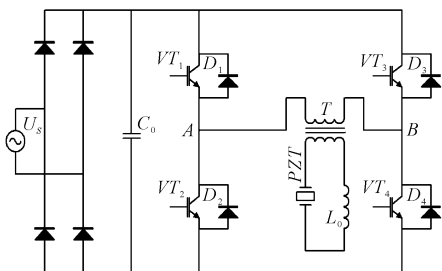


图 6 超声波电源主电路

主电路非常简单,220 V 的市电经过全桥整流后,经电容  $C_0$  输出 310 V 左右的直流电压(空载)。用模块的两个半桥组成全桥,桥臂 A 称为定相桥臂,桥臂 B 称为移相桥臂。逆变电路向负载变压器高频脉冲变压器 T 输出方波交流电,由于不存在直流励磁的问题,隔直电容可以省略。 $L_0$  为匹配电抗器,PZT 为压电换能器。

FNA41560 内部的 IGBT 并联有续流二极管,目的是让开关管在关断时产生的高电动势在回路以续流方式消耗,从而起到保护开关管的作用,但这也带来一个问题,由于二极管在导通时其两端电压差只有零点几伏,可以认为是短接,这会使桥臂输出端的电压不受开关状态的控制,不能简单地通过改变占空比的方法来改变图 6 中 A、B 两点间等效电压的变化。

在实现功率调节时,采用这样的策略:让逆变器每个桥臂的上下管成  $180^\circ$  互补导通,移相桥臂的驱动信号与定相桥臂驱动信号存在一个相位差,即移相角  $\varphi$ ,调节移相角  $\varphi$  的大小就实现了输出电压的脉宽调节,实现输出功率的连续调节<sup>[21-22]</sup>。移相控制逆变器的 4 个功率开关器件 IGBT 的驱动信号与输出电压  $U_{AB}$ 、电流  $i$  波形如图 7 所示。

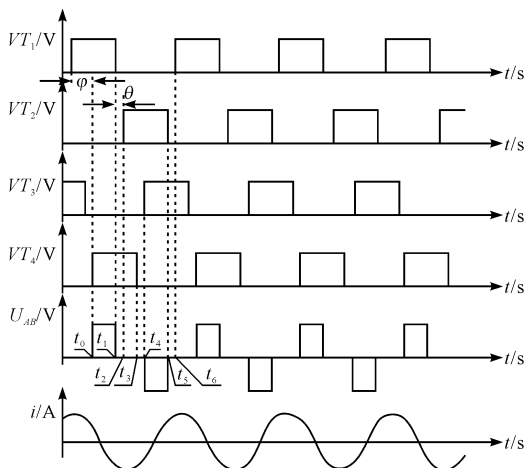


图 7 移相控制驱动与输出波形

图 7 也画出了移相角  $\varphi$  和死区时间  $\theta$ 。不算上死区时间,每个管在一个电周期内都有一半的时间导通,输出电压  $U_{AB}$  能够通过移相实现占空比的调节。

超声波电源基波有功功率为:

$$P_1 = \frac{u_1}{\sqrt{2}} I_1 \lambda = \frac{8U_d^2 \lambda}{\pi^2 R} \cos^2 \left( \frac{\varphi}{2} \right) \quad (9)$$

式中:  $u_1$ —输出电压;  $I_1$ —基波电流有效值;  $\lambda$ —功率因数;  $U_d$ —母线电压;  $R$ —负载电阻。

超声波电源基频电压的有功功率  $P_1$  与移相角  $\varphi$  有关,并随着  $\varphi$  的变化呈连续的变化。

### 3.4 超声波电源的频率跟踪方法

在超声加工中,希望超声波发生器和超声波换能器工作在谐振状态,以得到最大振幅。由于磨损、温度以及负载变化等原因,换能器会产生谐振频率漂移,使其不能工作在最佳状态,甚至停振。如果超声波电源系统能及时跟踪换能器的谐振频率,就可使情况改观,因此,超声波电源的频率跟踪也是一个非常令人关注的问题<sup>[23-24]</sup>。

频率跟踪实质上是利用反馈技术,实时自动调节功率逆变器的工作频率,以锁相环法频率跟踪最为常用。数字锁相环可以重复利用微处理器的功能,取消了模拟电路,不仅减少了元器件的数目,而且通过修改软件结构就可以实现多种控制方案。

数字锁相环的结构如图 8 所示。

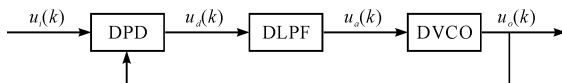


图 8 数字锁相环构成图

数字锁相环中的信号为离散的数字信号,当输入信号  $u_i(k)$  与输出信号  $u_o(k)$  之间存在相位差时,数字鉴相器 DPD 输出  $u_d(k)$  的大小和相位差的大小成比例关系,经过数字滤波器 DLPF 滤波后产生的  $u_a(k)$  作用于数字压控振荡器 DVCO,直至二者相位差为零。

本研究中的超声波电源是基于微处理器控制的数字化电源。单相全桥电路需要 4 路控制,可以利用 4 个 PWM 口实现,每个口输出周期、占空比相同,“相位”不同的信号,考虑到死区保护占空比要小于 50%。

微处理器内部捕获比较单元(CCU)的框图如图 9 所示。

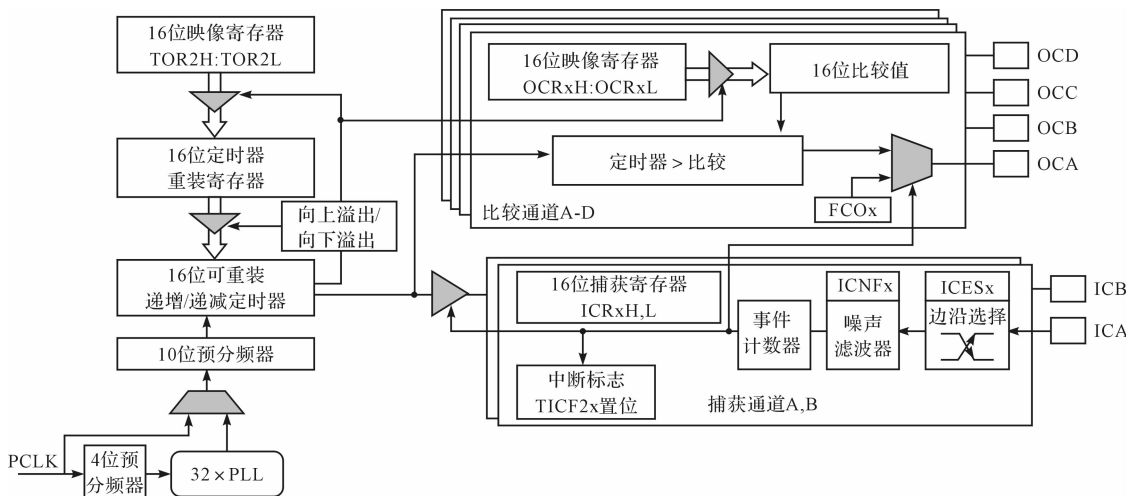


图 9 捕获比较单元(CCU)框图

PCLK 是系统晶振信号,经过合理的分频以后通过 16 位映像寄存器设定在一个超声周期附近,比如 20 kHz 的超声波就在 50  $\mu$ s 左右。在每一个周期内,输出引脚 OCA、OCB、OCC、OCD 可以输出各自的 PWM 信号。超声频率的变化可以通过周期的改变实现,比如增加 16 位映像寄存器的值,频率就减小。

软件使用了两级中断,其最高优先级用来处理 IGBT 过流短路的紧急情况,程序需要在 1  $\mu$ s 的时间内作出反应,关断短路的 IGBT,实时性要求极高,本来这是最难处理的环节,但由于有智能功率模块的保护功能,软件只需做些善后处理即可,若在一定时间多次出现过流问题,可以关闭输出,并在液晶屏上提示使用者。

次级中断用来处理频率追踪和功率调节的问题,用预先设置好的算法,在一个超声周期内得到结果,将数据送入相关寄存器,在下一个超声周期里改变占空

比和周期时间起改变频率和功率的作用。

主程序进行初始化和循环显示工作,出现模块过热等问题会切换到异常状态显示,主要提供了超声频率、输出电压占母线电压的百分比、连续发波时间、间隔停波时间、系统工作正常等 5 个方面的信息。

### 3.5 实验结果与分析

由于使用了智能功率模块,最后制作完成的超声波电源器件很少。需要指出的是 IGBT 只适用于低频超声波应用,一般在 40 kHz 以下。

实际使用发现,本研究介绍的利用智能功率模块制作的超声发生器,在低频流体超声空化试验中,各方面性能都达到预先设计的要求,在超声磨粒流抛光过程中,得到了成功的运用。本研究通过测量换能器上的电压、电流、功率因数和变幅杆的发波面积,计算得抛光时超声强度为 92 w/cm<sup>2</sup>。

## 4 结束语

笔者使用以 FNA41560 为其代表之一的智能功率模块设计制作超声波电源,不仅减小了体积以及开发时间,结合微处理器更能得到强大的功能。

本研究介绍的这种基于新器件的磨粒流抛光专用超声发生装置,已在实际运用中取得了良好的效果。因此,基于 IPM 器件用微处理器实现控制的超声电源,在低频超声发生器的设计制作中是最佳的选择。

### 参考文献 (References):

[1] 计时鸣,邱毅,蔡姚杰,等.软性磨粒流超声强化机理及试验研究[J].机械工程学报,2014,50(7):84-93.

[2] LI Chen, JI Shi-ming, TAN Da-peng. Softness abrasive flow method oriented to tiny scale mold structural surface [J]. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2012, 61(9-12): 975-987.

[3] KUO K L. Experimental investigation of brittle material milling using rotary ultrasonic machining [J]. *National Taipei University of Technology*, 2005, 18(8): 178-190.

[4] 吴晓霞,张华余,马空军.超声空化泡运动特性的研究进展[J].应用声学,2012,31(6):416-422.

[5] 崔方玲,纪威.超声空化气泡动力学仿真及其影响因素分析[J].农业工程学报,2013,29(17):24-29.

[6] 林书玉.超声换能器的原理及设计[M].北京:科学出版社,2004.

[7] 叶会英,马秀兰,刘国栋,等.低 $Q_m$ 压电振子机电耦合系数的标准计算方法的原理误差分析[J].计量学报,2000,21(1):5-10.

[8] 王秋婧.压电陶瓷驱动器力学模型理论与试验研究[D].沈阳:沈阳建筑大学土木工程学院,2011.

[9] 林书玉.压电陶瓷薄圆环振子径向振动的机电等效电路及其分析[J].应用声学,2005,24(3):140-146.

[10] CHANG S H, ROGACHEVA N N, CHOU C C. Analysis of methods for determining electromechanical coupling coefficients of piezoelectric elements [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectric and Frequency Control*, 1995, 42(4): 630-640.

[11] 东栋.超声电源换能振动系统的阻抗匹配研究[J].电气应用,2006,25(9):125-128.

[12] COATS R, MATHAMS R F. Design of matching networks for acoustic transducers [J]. *Ultrasonic*, 1988, 23(3): 59-64.

[13] 徐晓伟.压电超声换能器的阻抗匹配分析[J].压电与声光,2014(5):745-747.

[14] 林仲茂.超声变幅杆的原理和设计[M].北京:科学出版社,1987.

[15] 梁召峰,林书玉.余弦形过渡段阶梯形变幅杆的研究[J].陕西师范大学学报,2003,31(6):38-39.

[16] 顾鼎超.超声变幅杆优化设计仿真及负载效应实验研究[D].南京:南京农业大学工学院,2009.

[17] 姚俊,陈骥,张旭茹,等.压电式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):51-59.

[18] 李夏林,朱武.基于DDS技术的超声电源系统的设计[J].上海电力学院学报,2017,33(1):81-85.

[19] 白生娟,张小凤.大功率超声电源的改进[J].现代电子技术,2014,37(19):147-149.

[20] FNA41560 Smart Power Module datasheet [EB/OL]. <http://www.fairchildsemi.com>

[21] 张继东.一种超声波塑料焊接电源的设计[J].电力电子技术,2009,43(11):61-63.

[22] 廖平,刘纯亮.全桥移相铸轧超声波电源调功系统设计[J].电源学报,2014,9(5):81-86.

[23] 陈捷.功率超声电源谐振频率自动跟踪技术[J].机电技术,2010,(2):89-94.

[24] 武剑,董慧娟,张广玉.压电换能器锁相环频率跟踪的失效分析与解决[J].华南理工大学学报:自然科学版,2010,38(3):123-128.

[编辑:李辉]

### 本文引用格式:

计时鸣,陈凯,谭大鹏,等. FNA41560 智能功率模块在超声波发生器中的应用[J]. 机电工程, 2017, 34(12): 1369 - 1375.

JI Shi-ming, CHEN Kai, TAN Da-peng, et al. Application of IPM FNA41560 in ultrasonic generator [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2017, 34(12): 1369 - 1375.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>