

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2025.203

引用格式:李康康,汪御飞,张海彬,等. 1 mm 柱状压电超声波电动机的驱动电路设计与实现[J]. 重庆大学学报, 2026,49(5): 30-42.



# 1 mm 柱状压电超声波电动机的驱动电路设计与实现

李康康<sup>a,b</sup>,汪御飞<sup>a,b</sup>,张海彬<sup>a,b</sup>,陈渊博<sup>a,b</sup>,王光庆<sup>a,b</sup>

(浙江工商大学 a. 信息与电子工程学院; b. 萨塞克斯人工智能学院, 杭州 310018)

**摘要:**驱动电路性能对微型压电超声波电机的稳定和高精度运行至关重要。针对 1 mm 微型柱状压电超声波电机的低压驱动和高速运转要求,设计了一款基于数字信号处理器(digital signal processor, DSP)28335 芯片的逆变升压-推挽式驱动电路,该电路以 DSP 28335 芯片为核心产生 4 路脉冲宽度调制(pulse width modulation, PWM)波,并驱动 4 个 MOSFET 开关管两两交替导通,通过变压器进行逆变升压和功率放大,再经过 LC 匹配电路后得到两相幅值相同、相位相差 90° 的正弦波,以驱动 1 mm 超声波电动机旋转。针对驱动电路的硬件和软件设计流程进行了详细分析和参数设计,仿真和实验结果表明,该驱动电路输出电压可调范围为 0~100 V,频率可调范围为 15~50 kHz。压电超声波电机空载转速随电压的增大呈线性增大关系,在驱动频率和电压分别为 22 kHz 和 50 V 的作用下,转速达到 480 r/min,满足 1 mm 柱状压电超声波电机的驱动要求。

**关键词:**微型超声波电动机;压电陶瓷;驱动电路;高频低压;DSP

中图分类号:TM133

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2026)05-030-13

## Design and implementation of the driving circuit for a 1 mm cylindrical piezoelectric ultrasonic motor

LI Kangkang<sup>a,b</sup>, WANG Yufei<sup>a,b</sup>, ZHANG Haibin<sup>a,b</sup>, CHEN Yuanbo<sup>a,b</sup>, WANG Guangqing<sup>a,b</sup>

(a. School of Information and Electronic Engineering; b. Sussex Artificial Intelligence Institute, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou 310018, P. R. China)

**Abstract:** The performance of the driving circuit is critical for the stable and high-precision operation of micro piezoelectric ultrasonic motors. To meet the low-voltage drive and high-speed operation requirements of a 1 mm micro cylindrical piezoelectric ultrasonic motor, a transformer-inverter booster push-pull driving circuit based on the digital signal processing (DSP) 28335 chip is proposed. The DSP 28335 generates four pulse-width modulation (PWM) signals, which alternately drive four MOSFET switches. The inverter boosts and amplifies the voltage through a transformer, and an LC matching circuit filters the output to produce sinusoidal waves with equal amplitude and 90° phase difference, driving the motor. Detailed hardware and software design analyses are presented. Simulation and experiment results show that the output voltage is adjustable from 0 V to 100 V and the frequency from 15 kHz to 50 kHz. The no-load speed of the motor increases linearly with excitation voltage,

收稿日期:2025-01-20 网络出版日期:2025-02-24

基金项目:浙江省教育厅一般科研项目资助(Y202352692)。

Supported by Scientific Research Fund of Zhejiang Provincial Education Department (Y202352692).

作者简介:李康康(1998—),男,硕士研究生,从事超声波电机的驱动电路方面的研究,(E-mail)1374543670@qq.com。

通信作者:王光庆,男,教授,(E-mail)kele76@163.com。

reaching 480 r/min at 22 kHz and 50 V, satisfying the driving requirements of the 1mm cylindrical piezoelectric ultrasonic motor.

**Keywords:** micro ultrasonic motor; piezoelectric ceramics; driving circuit; high frequency and low voltage; DSP

超声波电动机(ultrasonic motor, USM)是一种基于逆压电效应设计的新型原理电动机,其结构一般是由表面贴有压电陶瓷的定子、转子和传递动力的输出轴组成的<sup>[1-2]</sup>。压电定子是由表面贴有压电陶瓷的弹性金属材料制成,转子由金属和摩擦材料制成,输出轴由弹性金属材料制成<sup>[3-4]</sup>。超声波电动机通过对压电陶瓷施加高频交变电压,压电陶瓷利用自身存在的逆压电效应随着电压幅值的变化进行膨胀或收缩,从而驱使定子发生高频振动,这种振动又通过定子和转子之间的摩擦耦合来驱动转子旋转<sup>[5-7]</sup>。与一般电磁式电机相比较,超声波电动机具有低速高转矩、重量轻、反馈灵敏、不受电磁干扰、构造简单、形式多样等特性<sup>[8-12]</sup>,已经普遍应用于航空航天、智能机器人、医疗等领域<sup>[13-16]</sup>。

随着微电子技术和微机电技术的发展,微型压电超声波电机越来越受到广泛的关注,例如微型无人机、微型机器人和光学相干断层扫描技术(optical coherence tomography, OCT)等<sup>[17-21]</sup>。超声波电动机的驱动频率一般在40 kHz左右,驱动电压一般在100 V以上<sup>[22-23]</sup>,驱动电机所需的电源信号是一种高频高压信号,因此需要专门设计以满足特定的要求<sup>[24-27]</sup>。然而,1 mm微型超声波电动机的驱动频率需要高于20 kHz,且由于压电陶瓷片比较薄。因此,其驱动电压不宜过大,否则容易击穿压电陶瓷片,导致电机损坏,一般驱动电压不超过50 V。为了驱动1 mm柱状压电超声波电动机,文中设计了一种基于DSP 28335芯片的超声波电动机驱动电路,具备调压、调频和调相等多种功能,实现对1 mm超声波电动机的驱动<sup>[28-29]</sup>。

## 1 超声波电动机驱动电路的整体设计方案

超声波电动机驱动电路的整体方案如图1所示,包括芯片DSP 28335、光耦隔离放大模块、逆变驱动模块、匹配电路、超声波电动机(USM)、激光位移传感器、动态信号分析仪、个人计算机(personal computer, PC)等。其中,DSP 28335芯片及其外围电路组成了主控电路,逆变驱动模块包括自举驱动电路和功放电路。

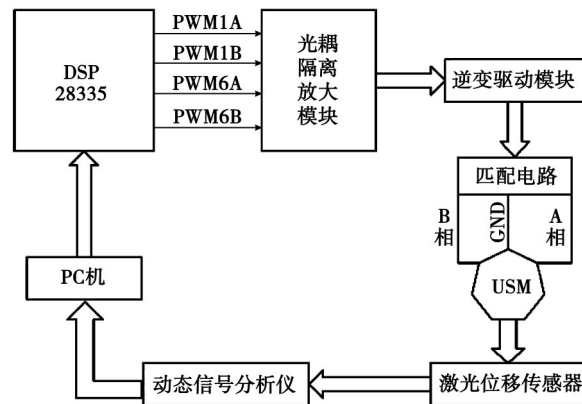


图1 驱动电路的整体方案

Fig. 1 Overall scheme of driving circuit

图1所示方案设计中,首先在PC机中使用CCS12.0软件程序设置好PWM波的参数,如频率、相位、占空比等,然后DSP 28335芯片会根据设置的参数输出4路PWM波,再经过光耦隔离电路进行信号隔离和电平转换,随后又经过驱动芯片,驱动芯片用于放大PWM波来驱动4个MOSFET开关管,MOSFET开关管将直流电逆变转换为交流电,通过变压器进行升压,电感与超声波电动机进行匹配等一系列的步骤,实现对1 mm超声波电动机的驱动。

激光位移传感器的作用是在电机运行的过程中可以采集到它的速度信息,并将这些信息反馈给动态信号分析仪,并在PC机上实时显示出动态信号分析仪中信号的变化。频率、相位差的调节通过主控芯片DSP

28335内部的按键模块来控制,通过按键可以使主控芯片DSP 28335输出的PWM波的频率和相位差增大或减小。

## 2 电路设计及仿真分析

### 2.1 PWM波生成

DSP 28335芯片内部集成了6组电子脉冲宽度调制(ePWM)模块,这些模块功能完全独立。本电路中只使用其中2组4路PWM,通过调整芯片中的时基模块,改变2组PWM波的相位差,通过改变PWM波的占空比,改变比较模块中的程序。DSP 28335芯片具备3种不同的计数器工作模式:递增模式、递减模式和双向计数模式。这些模式允许计数器根据特定的应用需求进行灵活配置。其中,递增模式和递减模式的PWM频率和 $T_{PRD}$ 的关系为

$$F_{PWM} = \frac{T_{CLK}}{T_{PRD} + 1} \quad (1)$$

双向计数模式下PWM频率和 $T_{PRD}$ 的关系为

$$F_{PWM} = \frac{T_{CLK}}{2 \times T_{PRD}} \quad (2)$$

式中: $F_{PWM}$ 为所需要的4路PWM波的频率大小; $T_{CLK}$ 为时钟频率,值为75 MHz; $T_{PRD}$ 为周期寄存器。

触发ePWMx SYNCI信号后,计数器 $T_{CTR}$ 的计数值会立即更新为 $T_{PHS}$ 寄存器中的值。通过调整 $T_{PHS}$ 寄存器的数值,可以改变2个相位之间的时间差。即

$$\mu = 2\pi \left( 1 - \frac{T_{PHS}}{T_{PRD}} \right) \quad (3)$$

式中: $T_{PHS}$ 为相位寄存器,用来调整4路PWM波的相位差; $\mu$ 为相位差,根据电动机所需要的两相驱动信号,式中 $\mu = \pi/2$ 。

文中所使用的计数模式为递增计数模式,不使用相位同步功能,计数器计数频率为系统时钟频率,计数器初值为0。DSP 28335芯片通过增计数模式输出的无死区PWM波形如图2(a)所示。

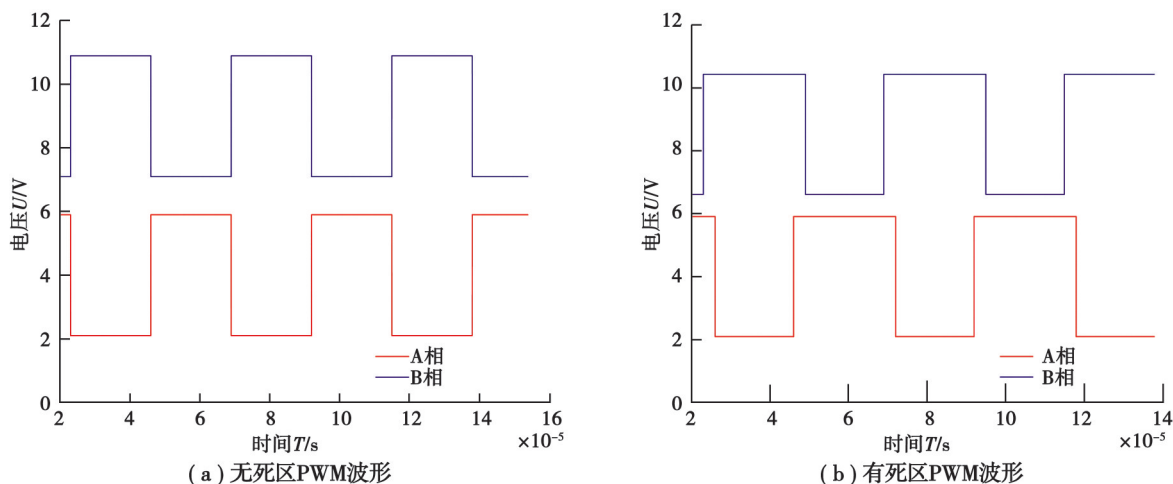


图2 DSP芯片输出的PWM波形

Fig. 2 DSP chip output PWM waveform

还可以通过死区控制模块中的 $D_{RED}$ 和 $D_{FED}$ 寄存器来实现,这2个寄存器都是10位有效,单位为 $\mu\text{s}$ ,计算公式为

$$T_{rd} = D_{RED} \times T_{CLK} \quad (4)$$

$$T_{rd} = D_{FED} \times T_{CLK} \quad (5)$$

式中: $T_{rd}$ 为死区时间,取1~2  $\mu\text{s}$ ; $D_{RED}$ 是一个死区寄存器,用于设置PWM信号的上升沿(即从高电平变为低电

平时的死区时间); $D_{\text{FED}}$ 也是一个死区寄存器,用于设置PWM信号的下降沿(即从低电平变为高电平时的死区时间)。

调整程序来设置输出后的PWM波的死区时间效果如图2(b)所示。

## 2.2 光耦隔离电路设计

为更好地对超声波电动机进行驱动,需要对前后级电路进行隔离,加入了光耦隔离电路。光耦隔离电路设计在主控芯片和开关管之间,目的是减少外部干扰、保证输入端和输出端的电气隔离和对输入的信号进行整形。光耦6N136具有高速、高电压隔离、低功耗和稳定可靠等优点,文中所使用的光耦器件是6N136。光耦6N136的工作原理基于光电效应:当在输入端施加电压时,发光二极管中就会有电流流过,产生光信号,光信号经过光耦合介质传播到光敏三极管,激发出光敏三极管中的电流。通过光电效应,将光信号转化为电信号。图3和图4为一路光耦隔离电路图和实测波形图。

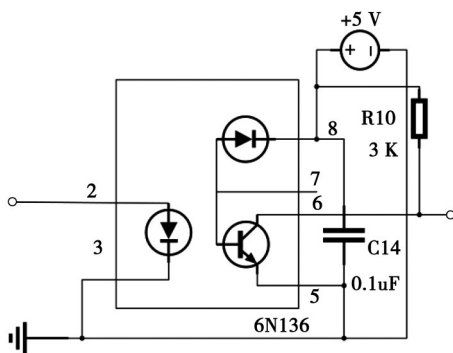


图3 一路光耦隔离电路图

Fig. 3 One optocoupler isolation circuit

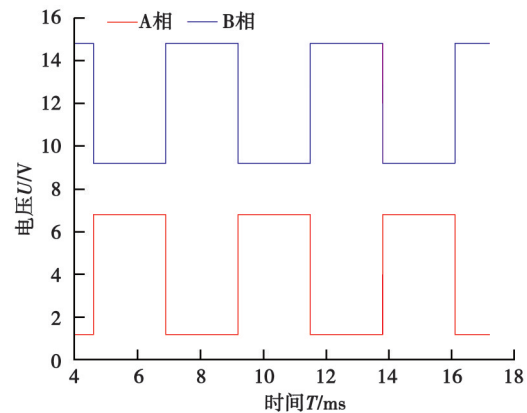


图4 一路光耦隔离波形图

Fig. 4 One optocoupler isolation waveform

## 2.3 自举电路设计

为驱动超声波电动机,需要驱动芯片来对PWM波进行放大处理。自举电路是由IR公司生产的大功率MOSFET和IGBT专用集成驱动电路——芯片IR2112实现的。该芯片具有一个高端通道和一个低端通道,它们互相独立,工作电压范围为10~20V,其中高端通道可以使用自举式电路。为了确保芯片正常运行,需要使用自举电路为高侧输出供电。图5为其中一相驱动芯片的自举电路图,图中自举电路由自举二极管D3和自举电容C4构成,C3为电源电压的滤波电容。

芯片的自举原理是芯片接上电压开始工作后,LO端输出高电平,MOS管Q2导通,半桥输出为0V,电源电压 $V_{\text{cc}}$ 通过自举二极管D3向自举电容C4充电,由于LO和HO为互补输出波形,HO端经过死区时间后输出为低电平,上管Q1断开,此时 $V_{\text{cc}}$ 、D3、C4和Q2构成充电回路。

当自举电容C4端的电压大于电源电压时,使得LO端输出为低电平,下管Q2断开,HO端经过死区时间后变为高电平,C4上的电容电压通过电阻R3使上管Q1导通,半桥输出为高电平5V,此时C4、R3、Q1构成放电回路。当HO变为低电平时,LO经过死区时间后变为高电平,下管Q2导通, $V_{\text{cc}}$ 、D3、C4和Q2再次构成充电回路,如此循环往复就构成了自举电路。

正确的自举电容选择能够确保电路在启动和运行期间的稳定性和可靠性,因此自举电容的选取对于电路的正常工作至关重要,不恰当的电容值可能导致自举过程失败。自举电容C4的电压大小应超过功率开关器件在完全导通状态下所需的驱动电压,通常这个电压值约为10V。如果充电路径中存在1.5V的压降,影响C4的充电效率,则自举电容 $C_4$ 可按式(6)来选取,

$$C_4 \geq \frac{Q_s}{V_{\text{cc}} - 10 - 1.5}, \quad (6)$$

式中： $Q_g$ 为MOS管的门极电荷； $V_{cc}$ 为电源电压，经过计算自举电容的取值为 $0.1\ \mu\text{F}$ 。

图6为自举电路波形图，A相为HO端输出波形，B相为LO端输出波形。

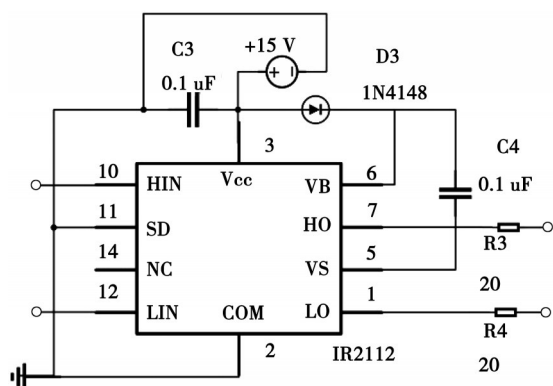


图5 一相驱动芯片的自举电路

Fig. 5 Bootstrap circuit of one phase driver chip

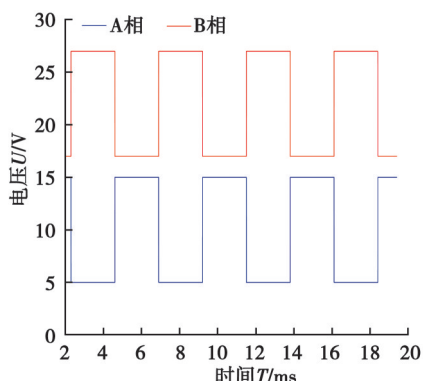


图6 自举电路波形

Fig. 6 Bootstrap circuit waveform

### 2.4 逆变放大电路设计

在电路的设计过程中，驱动文中所使用的超声波电动机，需要2组不同的高频高压信号，一相是正弦波形，另一相是余弦波形。为实现这一需求，设计一个逆变电路，该电路能够将输入的低压直流电信号转换为所需的高压交流电信号。文中设计的其中一相逆变放大电路图如图7所示，电路驱动方式为推挽式驱动，此电路主要由4个MOSFET开关管和2个高频变压器组成。开关管Q1和Q3、Q2和Q4在两相4路PWM波信号的驱动作用下交替导通和截止，实现从直流电到交流电的变换，转换后的交流电再经过高频升压变压器进一步升压，得到适合驱动超声波电动机所需的幅值较高的方波电压来保证它的旋转。

### 2.5 高频变压器设计

根据电路的输出功率及电路的应用场合，选用EI28型铁氧体磁芯作为变压器的磁芯。功率变压器根据拓扑结构可分为3大类：正激型变压器、反激型变压器和推挽输出型变压器。磁芯结构适合的拓扑结构形式如表1所示。

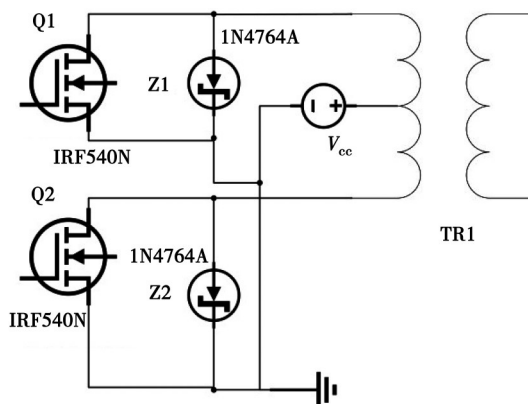


图7 一相逆变放大电路

Fig. 7 One-phase inverter amplifier circuit

表1 磁芯结构适合的拓扑结构形式

Table 1 Topological structure suitable for the core structure

磁芯结构	变换器电路类型			磁芯结构	变换器电路类型		
	正激式	反激式	推挽式		正激式	反激式	推挽式
E	+	+	#	U	#	+	#
Planar E	+	-	#	RM	+	#	#
EFD	+	-	+	EP	+	-	#
ETD	+	#	+	Ring	+	-	+
ER	+	#	+				

注：“+”代表适合，“-”代表一般，“#”代表不适合。

磁芯的尺寸由有效横截面积 $A_c$ 和有效窗口面积 $A_w$ 所决定,它们的乘积被称为面积乘积 $A_p$ ,它的值可以反映磁芯的传输功率,其关系可以表示为<sup>[30]</sup>:

$$A_p = A_c A_w = \frac{P_0 \left(1 + \frac{1}{\eta}\right)}{K_u K_c f \Delta B j}, \quad (7)$$

式中: $P_0$ 为输入功率; $\eta$ 为电源效率; $K_c$ 为窗口利用系数,一般取0.3~0.4; $K_u$ 为铁心的叠片系数,计算公式为 $1/D_{\max}$ , $D_{\max}$ 为最大占空比,这里取0.9; $\Delta B$ 为磁芯的工作磁感强度,一般取0.2 T; $j$ 为电流密度,取 $(3\sim 5)\times 10^6$  A/m<sup>2</sup>; $f$ 为开关频率;经查表 $A_c$ 为86.9 mm<sup>2</sup>, $A_w$ 为98.1 mm<sup>2</sup>。

令原边绕组的电压有效值为 $U_1$ ,原边绕组的匝数为 $N_p$ ,则原边绕组的匝数计算公式为

$$N_p = \frac{U_1 \times D_{\max}}{f A_c \Delta B}. \quad (8)$$

同理,设副边绕组的电压有效值为 $U_2$ ,副边绕组匝数为 $N_s$ ,可得:

$$N_s = \frac{U_2 \times D_{\max}}{f A_c \Delta B}. \quad (9)$$

再根据电流的有效值来确定导线的线径,导线截面积 $S_d$ 为

$$S_d = I/j, \quad (10)$$

式中, $I$ 为流经导线的电流。

本电路所选用的推挽式变压器,磁芯结构选用EI型,设计的变压器的变压比为2:5,设计参数为原边匝数20,线径0.65 mm,副边匝数50,线径0.44 mm。

## 2.6 匹配电路

压电马达是一种面内弯纵复合模态的超声波电动机,其工作的最佳效率一般是在谐振频率附近,可以用图8的等效电路来代替,其中 $C_d$ 是压电陶瓷介电性能引起的夹持电容, $L_m$ 是电机的等效电感, $C_m$ 是电机的等效电容, $R_m$ 是电机的等效电阻。在不改变外特性的前提下,可以将压电电动机的等效电路简化为一个由电阻和电容并联组成的电路模型,这种简化有助于更清晰地理解和设计其电气特性。

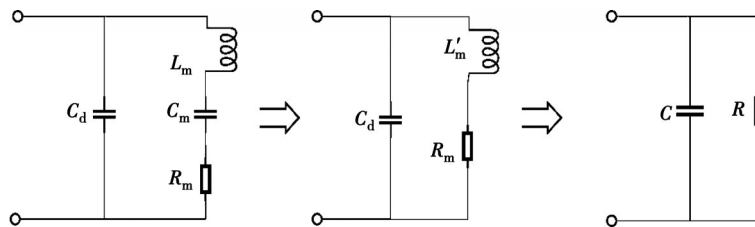


图8 超声波电动机等效电路

Fig. 8 Ultrasonic motor equivalent circuit

其中,

$$\begin{cases} L'_m = L_m - \frac{1}{\omega^2 C_m}, \\ C = C_d - \frac{L'_m}{R_m^2 + (\omega L'_m)^2}, \\ R = R_m - \frac{(\omega L'_m)^2}{R_m}. \end{cases} \quad (11)$$

从压电马达的等效电路中可以看出超声波电动机对外呈现容性,一般输入到超声波电机上的电压信号都会含有高次谐波,这些高次谐波会产生无损功率,会对超声波电动机的稳定运行产生一定的影响。为减小或消除这些影响,使超声波电动机呈现低感性或阻性,需在超声波电动机前加入阻抗匹配电路,阻抗匹配电

路可以有效地滤除杂波,从而保证超声波电动机获得所需要的信号。

驱动电路中所使用的匹配电路是串联电感匹配,超声波电动机和匹配电路组成的电路阻抗关系为

$$Z = \frac{R_m}{1 + (\omega_m C_d R_m)^2} + j \left[ \omega_m L - \frac{\omega_m C_d R_m^2}{1 + (\omega_m C_d R_m)^2} \right], \quad (12)$$

式中,  $\omega_m$  为超声波电动机的谐振频率。

为使系统阻抗  $Z$  呈现纯阻抗,则有:

$$\omega_m L = \frac{\omega_m C_d R_m^2}{1 + (\omega_m C_d R_m)^2}. \quad (13)$$

串联电感  $L$  为

$$L = \frac{C_d R_m^2}{1 + (\omega_m C_d R_m)^2}. \quad (14)$$

### 2.7 电路仿真

为进一步证实所设计的驱动电路的正确性,使用 Proteus 软件对电路进行仿真分析。图 9 为 DSP 28335 芯片的最小系统,包括晶振、复位模块、BOOT 引脚选择和由 DSP 28335 芯片产生的两相 4 路 PWM 方波,其中 A 相和 B 相相差  $90^\circ$ 。图 10 为整体驱动电路图,由 DSP 28335 芯片产生两相 4 路 PWM 方波,其中 A 相和 B 相相差  $90^\circ$ ,A 相中的 2 路 PWM 方波互补,B 相也是如此,所以这 4 路 PWM 方波都具有一定的相位差。U11-U14 是 4 个光电耦合器,用于减少外部干扰、保证了输入端和输出端的电气隔离,并且对输入的信号进行整形。2 个驱动芯片 IR2112 用于提高电路的电压水平,以便能够为后面电路中 4 个 MOSFET 开关管的导通提供足够的电压。Q1~Q4 是 4 个 MOSFET 开关管,通过和变压器相连构成推挽电路,进行逆变升压和功率放大。最后再经过 LC 匹配电路进行滤波后得到两相幅值相同、相位相差  $90^\circ$  的正弦波信号。

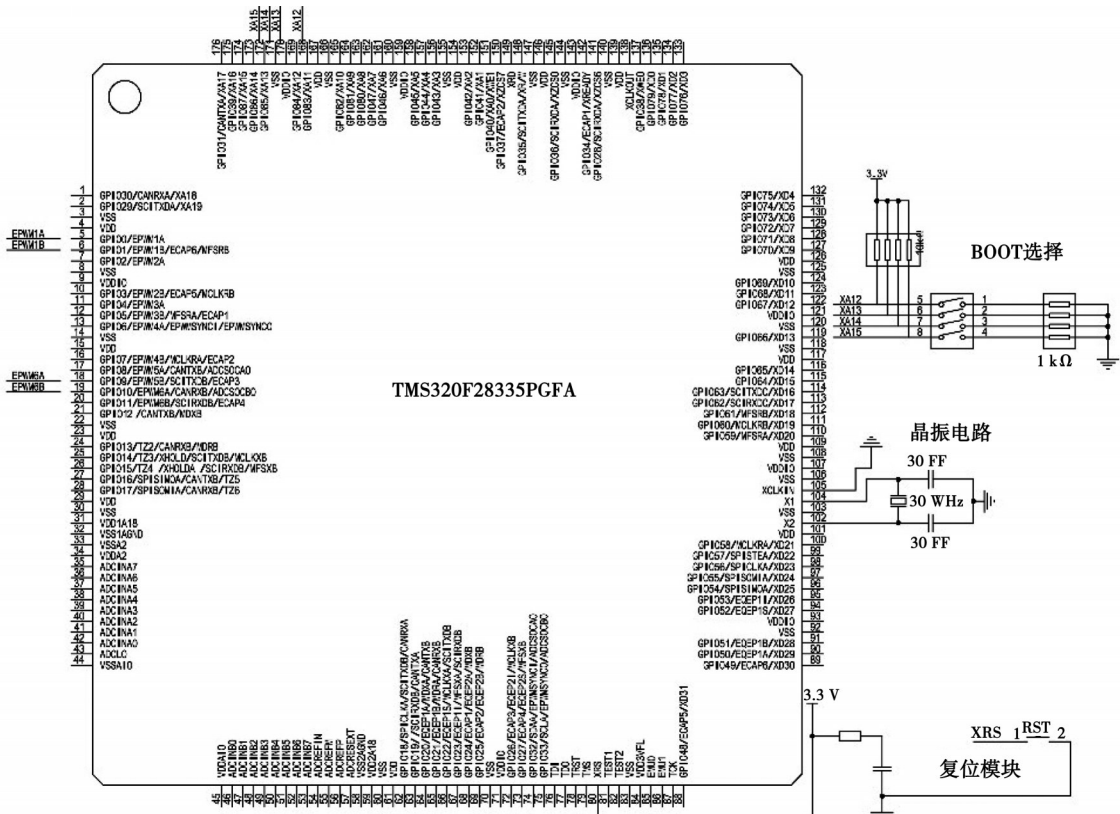


图 9 TMS 28335 最小系统原理

Fig.9 Schematic diagram of TMS 28335 minimum system

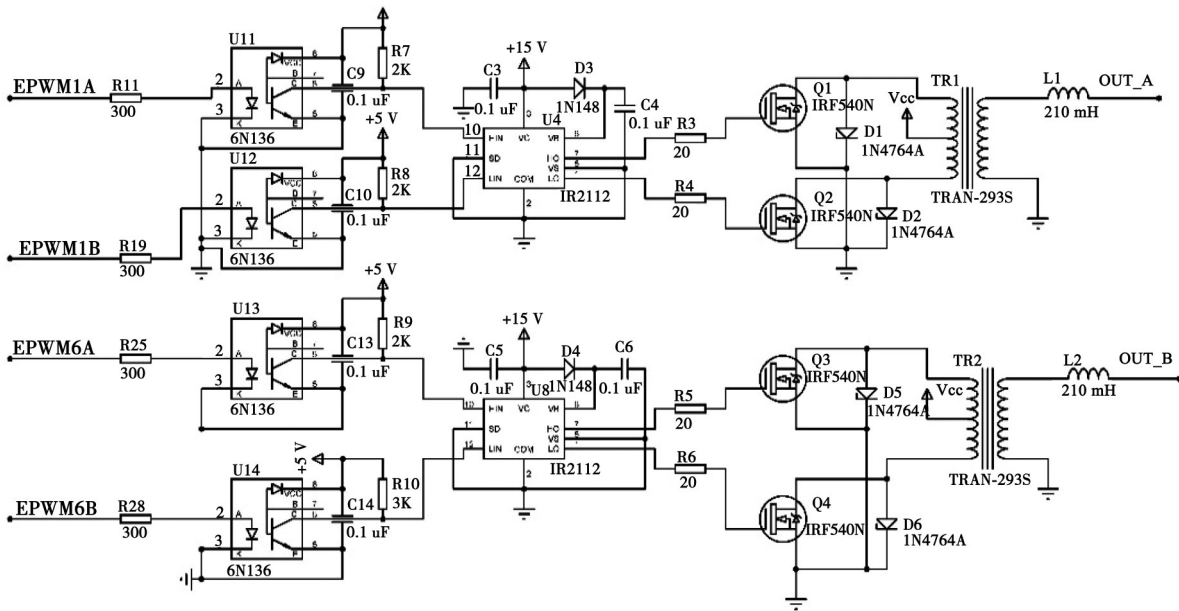


图 10 整体驱动电路

Fig.10 Overall driving circuit

图 11 为仿真最终输出的正弦信号波形。

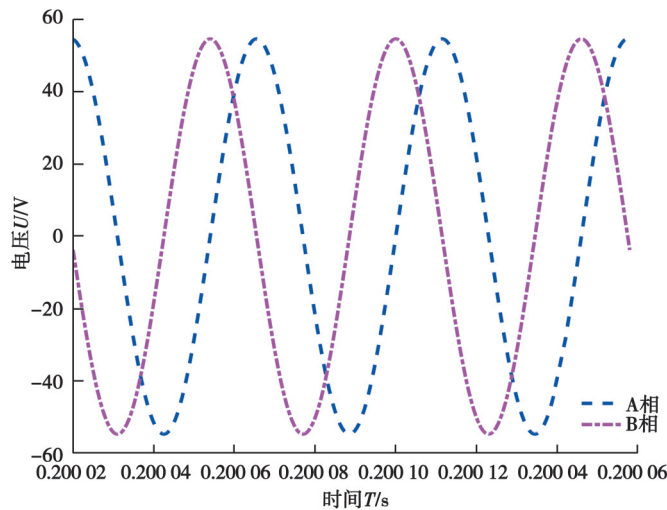


图 11 两相正弦波形仿真结果

Fig. 11 Simulation results of two-phase sinusoidal waveform

### 3 软件设计

DSP 28335 芯片是一款 TI 公司生产的高性能 TMS320C28x 系列 32 位浮点 DSP 处理器,具有 150 MHz 的高速处理能力。DSP 28335 中有 6 个 ePWM 模块,本次使用的是 ePWM1 和 ePWM6 这 2 个模块,下面具体介绍产生 PWM 波的过程。

1) 开启时钟。在开启 ePWM 寄存器之前先关闭时基模块的时钟,配置好之后再开启,就可以保证同步。

开启 GPIO 时钟及初始化配置:

```
EALLOW;
```

```
SysCtrlRegs.PCLKCR0.bit.TBCLKSYNC=0;
```

```
SysCtrlRegs.PCLKCR1.bit.EPWM1ENCLK = 1;
```

EDIS;

InitEPwm1Gpio());

2)初始化时基模块,即配置TB相关寄存器值。通过配置时基模块,可以确定计数器的计数方式、周期频率、是否同步等。

计数模块配置:确定好计数时间基准后,还需要确定计数模式和计数周期数才能决定输出PWM频率的大小。

时基模块初始化:

EPwm1Regs.TBCTL.bit.SYNCOSEL=1;

000EPwm1Regs.TBCTL.bit.PHSEN=TB\_DISABLE;

EPwm1Regs.TBPHS.half.TBPHS=0; EPwm1Regs.TBCTR=0x0000;

EPwm1Regs.TBPRD=tbprd;

EPwm1Regs.TBCTL.bit.CTRMODE=TB\_COUNT\_UP;

EPwm1Regs.TBCTL.bit.HSPCLKDIV=1;

EPwm1Regs.TBCTL.bit.CLKDIV=0;

3)设置占空比。

EPwm1Regs.CMPA.half.CMPA=EPwm1Regs.TBPRD\*0.5;

EPwm1Regs.CMPB=EPwm1Regs.TBPRD\*0.5;

4)设置死区时间。根据死区时间要求配DBRED和DBFED寄存器。

EPwm1Regs.DBRED=2\*75;

EPwm1Regs.DBFED=2\*75;

通过以上步骤的设置,芯片可以输出4路PWM波,ePWM6模块的配置与ePWM1模块类似。DSP 28335芯片产生PWM波的流程图如图12所示,开启PWM外设时钟,对PWM模块进行配置,配置完成后即可输出PWM波,也可以通过按键对输出的PWM波的参数进行调整。DSP软件流程图如图13所示,首先对DSP芯片进行初始化,再配置PWM模块,接着对按键模块进行检测,如果没有按键按下,可以直接计算PWM参数并输出,若有按键按下,则更新PWM寄存器的值,再输出PWM。

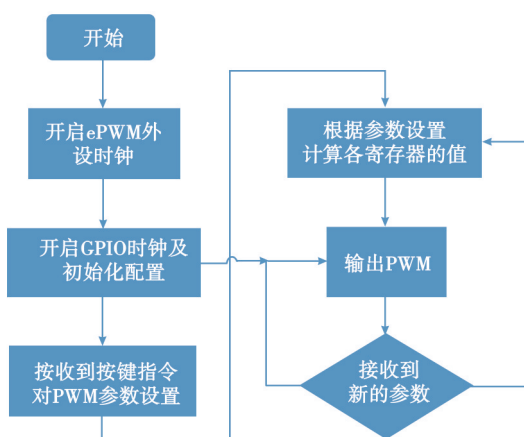


图12 DSP产生PWM波流程图

Fig. 12 Flowchart of PWM wave generated by DSP sinusoidal waveform

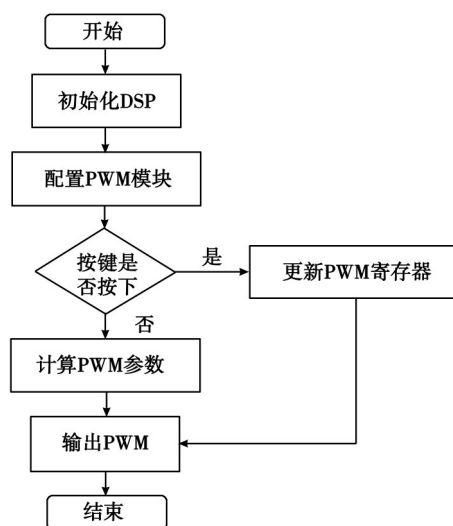


图13 软件设计流程图

Fig. 13 Software design flowchart

### 4 实验分析

设计并制作了总长度为 7 mm 的压电马达样机,其中包括 2 片压电片,1 个长为 5 mm、直径为 1 mm 的金属圆柱体,1 个转子和 1 个金属底座。为验证驱动电路的正确性,设计了一套超声波电动机驱动实验系统,如图 14 所示。实验系统主要由超声波电动机、直流稳压电源、示波器、DSP 28335 开发板、PC 机、驱动电路和激光位移传感器等组成。直流电源输出直流电压,经过驱动电路的光耦隔离、逆变放大和电感匹配模块后输出驱动超声波电动机转动所需要的两相相位相差 90°、幅值相同的正弦波。

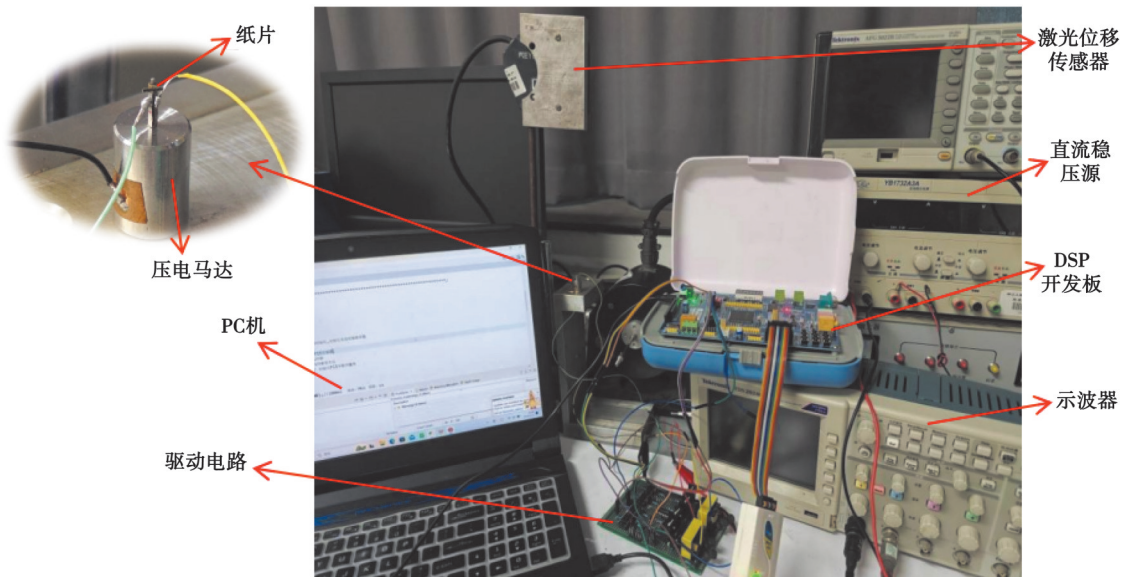


图 14 1 mm 超声波电动机实验系统

Fig. 14 1 mm ultrasonic motor experimental system

4 路 PWM 波经过电感匹配模块后会输出驱动超声波电动机转动所需要的两相相差 90°、幅值相同的正弦波。图 15 为实验测得驱动电路的 A、B 两相相位相差 90°的正弦信号。

在研究 1 mm 超声波电动机的特性之前,使用仿真软件 COMSOL 对 1 mm 超声波电动机的谐振频率进行分析,得到了如图 16 所示的结果,结果显示 1 mm 超声波电动机的一阶谐振频率为 21.7 kHz。

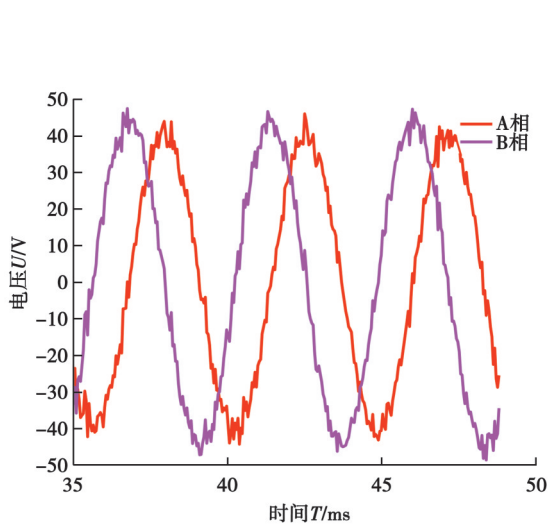


图 15 实验测得正弦波

Fig. 15 Sinusoidal wave measured by experiment

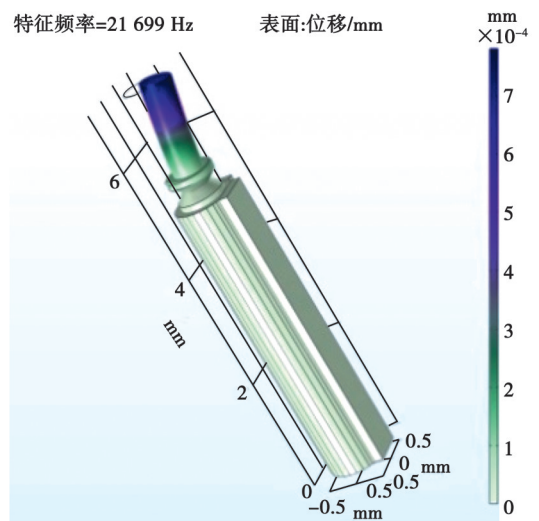


图 16 1 mm 超声波电动机阻抗仿真

Fig. 16 Impedance simulation of 1mm ultrasonic motor

使用阻抗分析仪 PV70A 测量它的等效参数和谐振频率。图 17 为测得的 1 mm 超声波电动机的一阶谐振频率, 为 22.1 kHz。与软件仿真所测得的结果 21.7 kHz 接近, 表明所制作的 1 mm 超声波电动机符合要求。由于 1 mm 的超声波电动机尺寸相对较小, 转速相对较快, 无法直接用人眼观测, 因此需要测量仪器进行测量。

实验设计了一种测量电动机转速的方法: 使用激光位移传感器, 其型号为 KEYENCE LK-G80, 最小精度为 2 ms, 满足 1 mm 超声波电动机测速要求。测量其速度的方法为: 将电脑与动态信号分析仪相连, 动态信号分析仪与激光位移传感器相连。激光位移传感器发出光信号, 光信号遇到障碍物后会反射回激光位移传感器, 激光位移传感器再将反射回来的信号传输给动态信号分析仪, 信号的变化就会显示在 PC 机上。在测量电动机的转速之前, 先在电动机的转子上黏贴一个小纸片, 转子每旋转一周, 转子上面的小纸条就会经过一次激光位移传感器。在转动过程中, 小纸片会遮挡由激光位移传感器发射出的光信号, 这时上位机所监测到的位移数据就会发生改变, 通过这种方法来统计一分钟内激光位移传感器位移变化的次数, 就可以测得电动机的转速。

通过改变输入变压器的直流电压, 可以改变驱动电路输出的交流电压幅值。图 18 是电动机在 22 kHz 且无预压力状态下的电压值和转速之间的变化关系, 在无预压力的状态下且施加的电压在压电陶瓷片可承受范围内, 电动机的转速随着驱动电压的幅值的增加而加快, 当电压到达一定幅值时, 电动机的转速趋于一个稳定值。主要原因是随着电压的增大, 电动机逐渐开始发热, 效率也会变低, 这验证了超声波电机驱动电路的正确性。

超声波电动机的转速和频率也有着很大的联系, 通过 DSP 28335 芯片内部的按键模块来改变驱动电路的输出频率, 在不同的驱动电压条件下, 得到了图 19 所示频率、电压对转速的影响。由图可知, 当频率一定时, 超声波电动机的转速随着电压的升高而加快。当电压一定时, 随着频率的增加, 超声波电动机的转速先增大后减小, 电动机在其谐振频率点附近转速最快, 达到了 480 r/min。

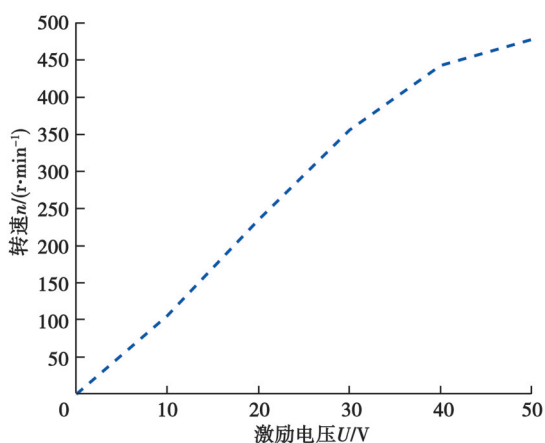


图 18 空载状态下电压和转速的关系

Fig. 18 Relation between voltage and speed under no-load condition motor

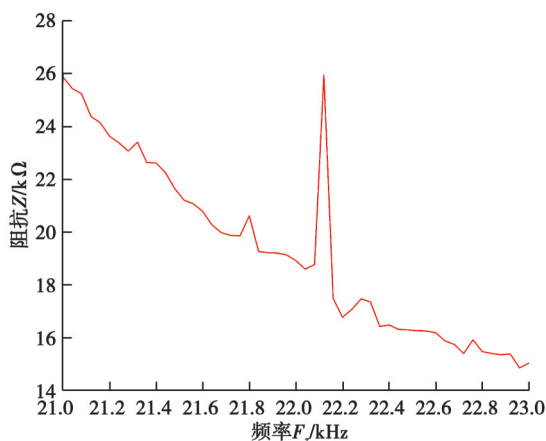


图 17 1 mm 超声波电动机阻抗测试

Fig. 17 Impedance test of 1 mm ultrasonic motor

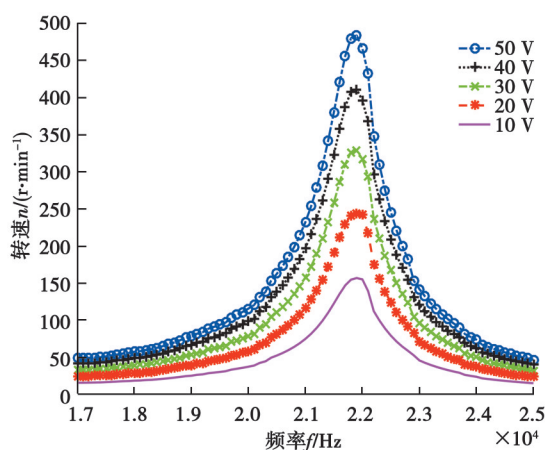


图 19 频率、电压对于转速的影响

Fig. 19 Influence of frequency and voltage on speed motor

## 5 结 论

文中设计了一种以 DSP 28335 芯片为核心的超声波电动机驱动电路,驱动电路采用推挽式电路进行功率放大,通过串联匹配电路产生两相幅值相同、相位相差  $90^\circ$  的正弦波来驱动电机。使用 Proteus 软件对驱动电路进行仿真分析,通过调节匹配电路中电感和电容的取值使电机达到最佳驱动状态。使用 COMSOL 软件对 1 mm 超声波电动机谐振频率进行仿真,使用阻抗分析仪进行测试,仿真和测试得到的结果接近,验证了所制作的压电马达样机的正确性。

实验结果表明,在压电陶瓷片的可承受电压范围内,加在超声波电动机两端的激励电压越大,其转速也会越大,并给出了转速测量方法;综合考虑频率、电压影响因素可得:当频率一定时,电动机的转速随着电压的升高而加快。当电压一定时,随着频率的增加,电动机的转速先增大后减小。所制作的驱动电路能够满足驱动 1 mm 超声波电动机的要求,具有调压、调频和调相等功能,具有一定的参考价值。

逆变升压器的体积问题导致所设计驱动电路的体积较大,难以应用到小型化的工作场景中,下一步工作将会对驱动电路进行优化设计,以适应更多的应用场景。

## 参考文献

- [ 1 ] 史敬灼. 超声波电机运动控制理论与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2011.  
Shi J Z. Theory and technology of ultrasonic motor motion control[M]. Beijing: Science Press, 2011. (in Chinese)
- [ 2 ] 潘序之, 胡敏强, 金龙, 等. 一种小型柱体超声波电机驱动控制电路研究[J]. 微电机, 2008, 41(4): 59-61.  
Pan X Z, Hu M Q, Jin L, et al. Study on driving-controlling system of miniature cylindrical ultrasonic motor[J]. Micromotors, 2008, 41(4): 59-61. (in Chinese)
- [ 3 ] 刘泽浪, 罗萍, 黄龙. 一种用于超声电机驱动的半桥集成电路的设计[J]. 压电与声光, 2018, 40(6): 843-846, 850.  
Liu Z L, Luo P, Huang L. Design of a half-bridge integrated-circuit driver for ultrasonic motor[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2018, 40(6): 843-846, 850. (in Chinese)
- [ 4 ] 裴高科, 高军礼, 陶地状, 等. 基于 DSP 的超声波电机驱动器设计[J]. 广东工业大学学报, 2015, 32(3): 97-101.  
Pei G K, Gao J L, Tao D Z, et al. Design of ultrasonic motor driver based on DSP[J]. Journal of Guangdong University of Technology, 2015, 32(3): 97-101. (in Chinese)
- [ 5 ] Ryndzionek R, Sienkiewicz Ł. A review of recent advances in the single- and multi-degree-of-freedom ultrasonic piezoelectric motors[J]. Ultrasonics, 2021, 116: 106471.
- [ 6 ] Puoja J C, Sakthivelsamy R. Ultrasonic motors structural design and tribological performance-a review[J]. Tribology Online, 2021, 16(4): 286-298.
- [ 7 ] Mashimo T, Izuhara S. Review: recent advances in micromotors[J]. IEEE Access, 2020, 8: 213489-213501.
- [ 8 ] 孟照魁, 耿晓珂, 李慧鹏. 基于 DSP 的压电马达驱动电路设计[J]. 导航与控制, 2018, 17(4): 46-50.  
Meng Z K, Geng X K, Li H P. Design of piezoelectric motor drive circuit based on DSP[J]. Navigation and Control, 2018, 17(4): 46-50. (in Chinese)
- [ 9 ] 王文浩, 王光庆, 郭吉丰. 行波型超声波电动机的 PWM 控制驱动电源[J]. 微特电机, 2007, 35(2): 32-34.  
Wang W H, Wang G Q, Guo J F. A design of PWM driving circuit for ultrasonic motor[J]. Small & Special Electrical Machines, 2007, 35(2): 32-34. (in Chinese)
- [ 10 ] 徐文潭. 超声波电机的驱动控制策略与实验研究[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2018.  
Xu W T. Driving control strategy and experimental research of ultrasonic motor[D]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University, 2018. (in Chinese)
- [ 11 ] Xiao Y, Yang Y, Liu C H, et al. Design and analysis of a wireless ultrasonic motor drive system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(10): 12309-12314.
- [ 12 ] Jian Y, Liu Z, He J F, et al. Development of a plate linear ultrasonic motor using the power flow method[J]. Micromachines, 2024, 15(8): 1016.
- [ 13 ] Pan Q S, Wang Y, Wan A D, et al. Development of a novel single-mode miniature standing wave ultrasonic motor[J]. Smart Materials and Structures, 2023, 32(12): 125015.
- [ 14 ] Jūrēnas V, Kazokaitis G, Mažeika D. 3DOF ultrasonic motor with two piezoelectric rings[J]. Sensors, 2020, 20(3): 834.

- [15] 严浪涛, 刘斌, 张剑锋, 等. 基于相移PWM的两相行波超声波电机转速控制[J]. 微电机, 2022, 55(9): 56-63.  
Yan L T, Liu B, Zhang J F, et al. Speed control of two-phase traveling wave ultrasonic motor based on phase-shift PWM[J]. Micromotors, 2022, 55(9): 56-63. (in Chinese)
- [16] Wen Z Y, Li X N, Cao T, et al. A low-voltage cylindrical traveling wave ultrasonic motor incorporating multilayered piezoelectric ceramics[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2022, 69(6): 2129-2136.
- [17] 刘周龙, 周铄, 朱强国, 等. OCT内窥镜驱动控制用微型压电马达的机电耦合动力学特性研究[J]. 振动与冲击, 2023, 42(21): 254-262.  
Liu Z L, Zhou S, Zhu Q G, et al. Electro-mechanical coupled dynamic characteristics of micro piezoelectric motors for driving control of OCT endoscope[J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(21): 254-262. (in Chinese)
- [18] 张森. 柱体超声波电机的性能优化及驱动控制研究[D]. 南京: 东南大学, 2020.  
Zhang M. Research on performance optimization and drive control of cylinder ultrasonic motor[D]. Nanjing: Southeast University, 2020. (in Chinese)
- [19] Zhou J T, Suzuki M, Takahashi R, et al. Development of a  $\Delta$ -type mobile robot driven by three standing-wave-type piezoelectric ultrasonic motors[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2020, 5(4): 6717-6723.
- [20] Li X N, Huang T L, Zhao N, et al. A design method of traveling wave rotary ultrasonic motors driving circuit under high voltage using single-sided hertzian contact forced oscillator model[J]. Micromachines, 2023, 14(1): 64.
- [21] 梁莉, 甘展宇, 张铁民. 用于超声电机的新型驱动电源设计[J]. 电源学报, 2021, 19(3): 142-146.  
Liang L, Gan Z Y, Zhang T M. Novel design of driving power supply for ultrasonic motor[J]. Journal of Power Supply, 2021, 19(3): 142-146. (in Chinese)
- [22] 焦西凯, 陈宁, 陈凌宇, 等. 超声电机多参数驱动器设计[J]. 振动·测试与诊断, 2021, 41(5): 897-903, 1032.  
Jiao X K, Chen N, Chen L Y, et al. Design of multi-parameter driver for ultrasonic motor[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2021, 41(5): 897-903, 1032. (in Chinese)
- [23] 石明辉, 陈书杰, 张绍林, 等. 盘型声流超声电机驱动机理分析及实验研究[J]. 西安交通大学学报, 2024, 58(6): 193-202.  
Shi M H, Chen S J, Zhang S L, et al. Analysis and experimental study on the driving mechanism of disk type acoustic streaming ultrasonic motor[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2024, 58(6): 193-202. (in Chinese)
- [24] 黎梦婷, 李华峰. 基于DDS的SPWM波的驱动电路设计[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(6): 1-5.  
Li M T, Li H F. Design of SPWM wave drive circuit based on DDS[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2020, 39(6): 1-5. (in Chinese)
- [25] Chen L, Liu H, Qi H, et al. High-electromechanical performance for high-power piezoelectric applications: Fundamental, progress, and perspective[J]. Progress in Materials Science, 2022, 127: 100944.
- [26] Liu Z, Fu Q W, Yang P, et al. Design and performance evaluation of a miniature I-shaped linear ultrasonic motor with two vibrators[J]. Ultrasonics, 2023, 131: 106965.
- [27] 万志坚, 张俊峰. 一种超声波电动机的两相驱动电路研究[J]. 微特电机, 2019, 47(6): 68-72, 77.  
Wan Z J, Zhang J F. Research on two phase driving circuit of ultrasonic motor[J]. Small & Special Electrical Machines, 2019, 47(6): 68-72, 77. (in Chinese)
- [28] 张卿杰. 手把手教你学DSP: 基于TMS320F28335[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2015.  
Zhang Q J. Teach you to learn DSP by hand: based on TMS320F28335[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics & Astronautics Press, 2015. (in Chinese)
- [29] Zhang K, Gao G F, Zhao C Y, et al. Review of the design of power ultrasonic generator for piezoelectric transducer[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2023, 96: 106438.
- [30] 宋祎波, 李曜炜. 基于面积乘积法的开关电源高频变压器设计[J]. 电力与能源, 2019, 40(5): 543-547.  
Song Y B, Li Y W. Design of high frequency transformer for switching power supply based on AP method[J]. Power & Energy, 2019, 40(5): 543-547. (in Chinese)