

文章编号 1004-924X(2013)09-2279-08

单振子二自由度超声电机驱动电源

孙业明, 曾平*, 程光明, 郭抗

(吉林大学机械科学与工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要: 设计了用于平板形单振子二自由度超声电机的驱动电源, 并针对驱动电源电流负荷较大, 输出功率利用率不高的问题, 提出了优化驱动性能的措施。该电源利用压控振荡器产生正弦小信号, 经高压及功率放大后得到较高的驱动电压及较大的驱动电流实现电机驱动。根据压电振子等效电路模型及工作特性, 采取与超声电机并联电感的方法优化了电源驱动性能。制作了驱动电源样机, 并对输出性能及优化效果进行了测试。测试结果表明: 设计的电源驱动电压及频率可独立连续调节, 可输出理想的正弦信号波形; 在 49.127 kHz、49.756 kHz 两种频率下, 接超声电机负载时, 最大输出电压分别为 176.0 V 及 171.2 V; 超声电机并联 1.442 mH 电感后, 电源驱动电流可减少至原来的 7.27% 和 7.41%, 功率因数可提高至 0.968 和 0.9550。得到的结果显示, 设计的电源满足超声电机驱动要求, 采取的优化措施在减小电源电流负荷及提高电源输出功率利用率方面效果明显。

关键词: 超声电机; 压电振子; 二自由度; 驱动电源

中图分类号: TM35 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132109.2279

Driving power supply for two-degree-of-freedom ultrasonic motor with single vibrator

SUN Ye-ming, ZENG Ping*, CHENG Guang-ming, GUO Kang

(College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China)

* Corresponding author, E-mail: zengping321@163.com

Abstract: A driving power supply was designed for the two-degree-of-freedom (2-DOF) ultrasonic motor with a single plate-shaped vibrator. According to the heavy current burden and low power utilization of the driving power supply, a method for optimizing the driving performance was proposed. The power supply used a voltage-controlled oscillator to generate a small sine signal, and applied a high-voltage and power amplifier to produce a higher driving voltage and a larger driving current. According to equivalent circuit and operating characteristics of piezoelectric vibrator, the ultrasonic motor was connected with an appropriate inductor in parallel to optimize the driving performance of the driving power supply. A prototype of driving power supply was made and its output performance and optimization effect were tested in an experiment. Experimental results show that the control variables of ultrasonic motor in power supply-driving voltage and frequency can be adjusted independently and continuously, and an ideal waveform of sine signal is obtained. When the power supply is loaded by the 2-

收稿日期: 2013-03-14; 修订日期: 2013-05-06.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51175478); 教育部高等学校科技创新工程重大项目培育基金资助项目 (No. 708028)

DOF ultrasonic motor in frequencies of 49.127 kHz and 49.756 kHz, the maximum output voltages are 176.0 V and 171.2 V. When the ultrasonic motor is connected with a 1.442 mH inductor in parallel, driving current can be reduced to 7.27% and 7.41%, and the power factor can reach 0.968 and 0.955 0, respectively. The power supply designed meets the driving requirements of the ultrasonic motor, and optimization method on reducing current burden and improving power utilization has good results.

Key words: ultrasonic motor; piezoelectric vibrator; two-degree-of-freedom; driving power supply

1 引言

随着科学技术的发展,多自由度执行器的应用越来越广泛,目前已涉及到宇宙飞船、火星探测器等航天航空和军事领域以及医疗、生物工程、机器人关节、镜头自动对焦等民用领域^[1-4]。

传统执行器中每个自由度需要一个独立的电机控制,整个系统结构复杂,难以实现小型化,尤其在空间受限的环境中问题更加突出。多自由超声波电机结构紧凑,可以很好地满足上述应用要求,并且具有响应快,低速时输出转矩大等优点^[5]。

许多学者相继提出了多种结构的多自由超声波电机,并对电机关键技术开展了研究。上海大学张建滔提出了一种圆环驻波超声电机^[6],该电机由一个球形转子和圆环形定子构成,圆环定子侧面均布粘贴 6 片压电陶瓷片,可以实现 3 个方向的旋转运动。浙江大学胡锡幸提出了一种基于 3 个行波定子的 2 自由度球电机^[7]。南京航空航天大学时运来利用非统一截面梁在正交方向上的 2 个 6 阶弯曲振动模态作为工作模态,设计了一种新型直线超声电机,并用于 2 自由度精密定位平台中^[8]。以上多自由度超声电机整体结构较为小巧、紧凑,但由于采用多片压电陶瓷,电机结构仍然比较复杂。

另外,多自由超声电机在应用中遇到的一个重要的问题是需要复杂的驱动信号^[9]。超声电机驱动通常采用通用信号发生器与功率放大器组合的方式,在重量、体积上远超超声电机本身,成本也较为昂贵,抵消了超声电机的某些优点。有学者对超声电机驱动电源进行了研究,南京航空航天大学的潘松设计了一种微型超声电机驱动电源,将直流电升压到 60 V 后,用微控制器

MC9S08QD4 控制 MOSFET 管的开关产生两列相位差 90°的波形来驱动电机^[10]。颜佳佳设计了一种超声电机电源,利用半桥电路作为超声电机的驱动电路,并采取优化变压器原边以改善电路工作情况^[11]。哈尔滨工业大学张明辉设计了一种超声电机驱动电路,用 DDS 产生 4 路独立正弦电压信号,经高压放大,驱动 2.2 nF 负载,带宽可达 80 kHz^[12]。以上驱动电源均是针对具体超声电机的结构专门进行设计的,不同超声电机的驱动电源不通用。这些驱动电源也存在着不足之处:文献^[10]设计的超声电机驱动器输出的是非正弦的周期信号,可能会带来高频振动噪声;文献^[12]设计的超声电机驱动电路采用了 4 片高压运放 PA90,该芯片价格昂贵,整个电机驱动电路成本较高。

作者所在课题组研制了一种平板形单振子二自由度超声电机^[13],相对于上述电机,其优点是只用一个压电单元就可实现 2 个相互垂直的自由度,结构更加简单、紧凑。本文以该超声电机为驱动对象,研制驱动电源。首先利用压控振荡器产生正弦小信号,再经高压及功率放大,实现电机驱动。电源中,电机控制量(驱动电压及频率)可以独立、连续调节,提高了电机的可控性、灵活性,并且电源成本低廉,电源构成模块化,调试较为容易。根据压电振子等效电路及工作特性,进一步提出采取与超声电机并联合适电感的方法优化电源驱动性能。

2 超声电机结构及工作机理

2.1 电机结构

该单振子二自由度超声电机结构如图 1 所示,电机由转子及定子构成,转子为不锈钢球,定子(压电振子)由压电陶瓷片、金属基板、凸起组

成。压电陶瓷极化方向为厚度方向,粘贴在金属基板的底部。4个凸起结构,用于输出压电陶瓷的振动,并支承电机转子。电机转子尺寸为 $\Phi 20$ mm,定子尺寸为 $30\text{ mm} \times 28\text{ mm}$ 。

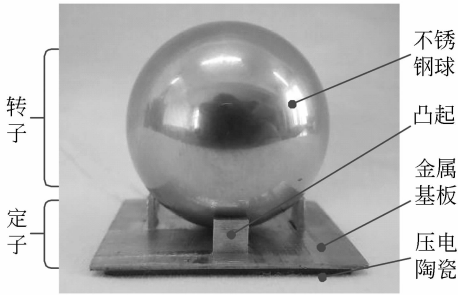


图1 超声电机结构

Fig.1 Structure of ultrasonic motor

2.2 工作机理

压电陶瓷上施加正弦交流信号,在金属基板上产生驻波,调节信号频率,可以形成多种振动模式。设压电振子长度方向为 x 轴,宽度方向为 y 轴,厚度方向为 z 轴。频率为 49.127 kHz 时,压电振子 x 方向上出现3条节线(节线在 z 方向的位移始终为0), y 方向出现2条节线,称为 B_{32} 振动模式(如图2所示);而在 49.756 kHz 时,压电振子 x 方向有2条节线, y 方向有3条节线,称为 B_{23} 振动模式。超声电机利用压电振子 B_{32} 、 B_{23} 振动模式使凸起与转子接触点产生 z 轴方向及水平(x 轴或 y 轴)方向的振动合成椭圆运动来驱动球转子转动。由于 B_{32} 、 B_{23} 振动模式频率相近,且节线分布情况相差 90° ,很适合用来产生两个相互垂直的转动,从而实现二自由度运动。

B_{32} 振动模式下各凸起振动方向如图2中 I、II 视图所示,1、3号凸起顶端具有 x 及 z 两个方向的振动,2、4号凸起顶端具有 x 及 y 两个方向的振动。2、4号凸起形成的椭圆运动与1、3号凸起形成的椭圆运动相比, z 方向上的位移要小得多。因此在4个凸起上放置球体时,2、4号凸起变形很小,球体的驱动主要由1、3号凸起完成,此时可看作2、4号凸起作为支撑足支撑球体,1、3号凸起作为驱动足驱动球体。随着压电振子振动,凸起一次次拨动球体,球体在1、3号凸起沿椭圆轨迹的方向拨动下绕 y 轴转动。

同理,在 B_{23} 模式下,1、3号凸起作为支撑足,2、4号凸起作为驱动足拨动球体绕 x 轴转动。

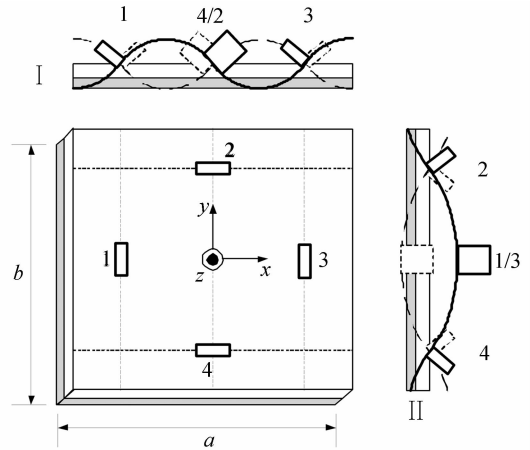


图2 B_{32} 模式下压电振子的振动

Fig.2 Vibration of piezoelectric vibrator in B_{32} mode

3 电源系统构成

3.1 总体方案

结合上述分析可知,平板形单振子二自由度超声电机要求其驱动电源满足:输出波形为正弦波;输出信号具有较高的频率($45\sim 55\text{ kHz}$)及较高的电压($60\sim 170\text{ V}$),并且频率、电压能够独立连续调节。设计的超声电机驱动电源系统如图3所示。

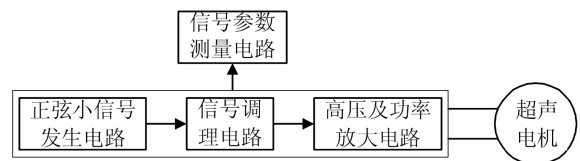


图3 电源系统框图

Fig.3 Block diagram of power supply

3.2 正弦小信号发生电路

正弦小信号发生电路如图4所示,用于产生频率可调、幅值较小(10 V 以下)的正弦信号。电路中 ICL8038 为高精度压控振荡器芯片,只需外接少量元件,就可产生高精度的正弦波。产生的正弦信号(sig_1)由 ICL8038 的引脚2输出,频率由电容 C_{11} 和 ICL8038 第8引脚上的电压共同决定。根据本文超声电机的工作频率,选用 1.5 nF 的瓷片电容。 C_{11} 确定后,信号的频率就只由 ICL8038 引脚8上的电压控制,输出频率随该电压增大而减小,两者具有良好线性关系。调节电

位器 R_{18} 可改变该控制电压, 从而改变驱动电源的输出频率。

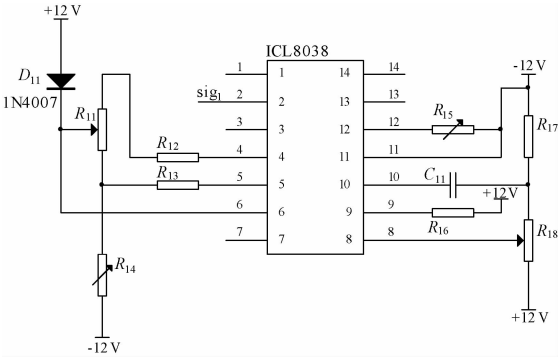


图 4 正弦小信号发生电路

Fig. 4 Generating circuit of small sinusoidal signal

3.3 信号调理电路

图 4 电路输出的正弦信号 sig_1 中含有高频杂波, 并含有直流分量, 不利于电机的驱动。信号调理电路的作用是滤除正弦信号中的高频杂波及直流分量, 同时实现幅值的调节。信号调理电路如图 5 所示, 左边的 LM324 与 C_{21} 、 R_{21} 、 L_{21} 、 R_{22} 、 R_{23} 构成了一个有源滤波电路, 电容 C_{21} 起到隔离直流的作用, 电感 L_{21} 用于滤除信号中高频杂波; 右边的 LM324 与 R_{24} 、 R_{25} 、 R_{26} 构成反相放大电路, 调节电位器 R_{26} 可使其放大倍数在 0 到最大值之间任意改变, 从而改变驱动电源的输出电压。

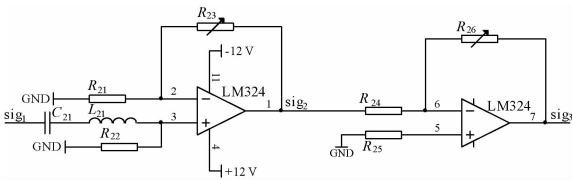


图 5 信号调理电路

Fig. 5 Signal conditioning circuit

3.4 高压及功率放大电路

高压及功率放大电路如图 6 所示, 用于对图 5 电路处理后的正弦信号进行高压及功率放大, 产生较高的驱动电压及较大的驱动电流, 使电源具有足够驱动能力。

高压放大由低成本的低功耗高压放大芯片 OPA454 实现。单个 OPA454 最大输出电压为 100 V, 尚不能满足电机驱动要求。为进一步提高输出电压, 采用 2 个 OPA454 桥式连接, 其中 OPA454(1) 为同相输入方式, OPA454(2) 为反相

输入方式, 两 OPA454 的输出极性相反。

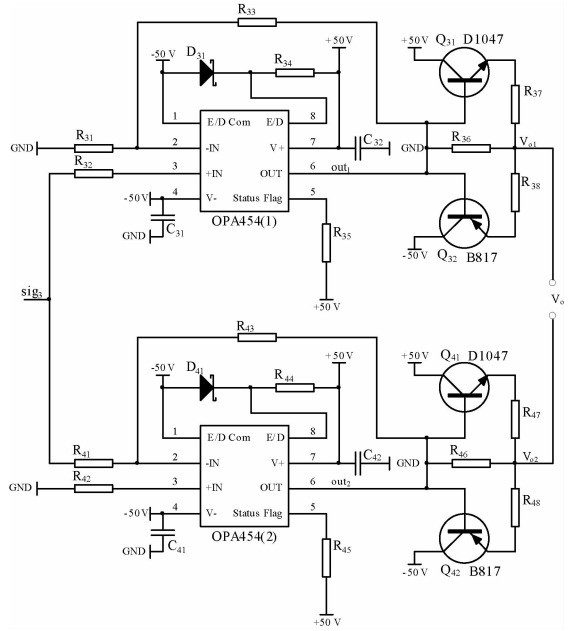


图 6 高压及功率放大电路

Fig. 6 Circuit of high-voltage and power amplifier

工作中, 当 OPA454(1) 的输出 V_{o1} 为正向最大时, OPA454(2) 的输出 V_{o2} 为反向最大, 此时压电振子上得到最大正向电压; 同理, 当 V_{o1} 为反向最大时, 压电振子上可得到最大反向电压。桥式电路输出 V_0 与 V_{o1} 、 V_{o2} 有关系: $|V_0| = |V_{o1}| + |V_{o2}| = 2|V_{o1}|$, 因此桥式电路的最大电压输出能力是单个 OPA454 最大电压输出能力的 2 倍, 近 200 V, 满足电机对驱动电压的要求。

OPA454 容许输出电流为 50 mA。桥式电路中, 负载流过的电流与每个 OPA454 的输出电流相等, 工作时电流最大值会超过 50 mA, OPA454 发热严重甚至会烧毁。为了不超过 OPA454 的容许电流, OPA454 输出经功率放大后再接电机负载。功率放大电路是由 NPN、PNP 型晶体管 D1047、B817 及电阻 R_{36} 、 R_{37} 、 R_{38} 、 R_{46} 、 R_{47} 、 R_{48} 构成的互补对称放大电路。OPA454(1) 的输出电流 i_1 与功率放大器的输出电流 i_2 的关系为:

$$i_1 \cdot R_{36} = 0.7 + i_2 \cdot R_{37}, \quad (1)$$

当 $i_1 = 50 \text{ mA}$, $R_{36} = 20 \Omega$, $R_{37} = 0.5 \Omega$ 时, i_2 可达 600 mA, 满足电机对驱动电流的要求。

3.5 信号参数测量电路

压电振子 B_{32} 振动模态频率为 49.127 kHz, B_{23} 振动模态频率为 49.756 kHz。受环境温度、

负载变化等影响,振动模态频率有所漂移。为便于调节电源参数,使超声电机处于最佳工作状态,设计了如图 7 所示的信号参数测量电路,测量电压、频率参数。该电路由主控芯片 89S51、整流电路、AD1674、波形变换电路、液晶显示电路构成。AD1674 是高精度模数转换器,最小分辨率为 1/4096,可测量出驱动电源输出电压 0.1 V 的变动。电压及频率参数测量结果由液晶显示器 LCM128645ZK 显示。

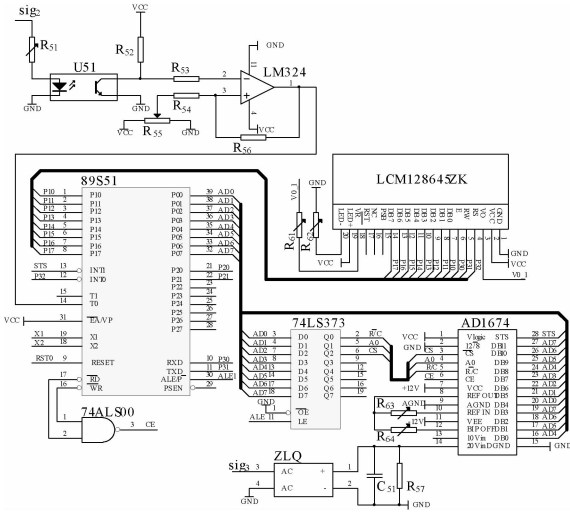


图 7 信号参数测量电路

Fig. 7 Signal parameter measurement circuit

4 电源驱动性能优化

4.1 压电振子等效电路模型及工作特性

图 8 为 IEEE 推荐的压电振子等效电路模型。模型中 C_0 为静态电容, R_1 机械振动阻尼电阻, L_1 、 C_1 为等效电路动态串联电感、电容。

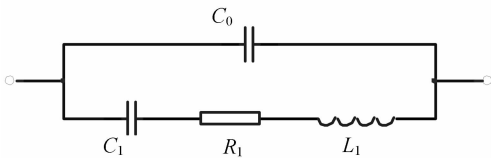


图 8 压电振子等效电路

Fig. 8 Equivalent circuit for piezoelectric vibrator

对于本超声电机,静态电容 C_0 电容值为 nF 级; C_1 值为 pF 级,等效电感为数百 mH,在工作频率附近, L_1 、 R_1 、 C_1 支路通过的电流较 C_0 通过的电流小得多,对电源的影响可忽略,因此压电振子

模型可简化为电容 C_0 。

压电振子作为容性负载及超声电机的驱动元件,具有如下特点:

(1)工作电流随频率成比例增加。频率为 49.127 kHz,电压为 170 V 时,电机工作电流可达 0.41 A,电源电流负担很大,电路发热严重。

(2)信号一个周期内,时而电源向压电陶瓷电极充电,时而压电陶瓷电极向电源放电,两者交替进行,大部分电能可在电源及压电陶瓷电极间转换,只有少量电能变成电机机械能,电源输出功率利用不充分。

(3)压电振子 B_{32} 、 B_{23} 两振动模态的频率非常接近。

针对压电振子上述问题及工作特点,在电源满足超声电机驱动要求的基础上,根据压电振子的工作特性,进一步采取与超声电机并联合适电感的方法对电源驱动性能进行优化。

4.2 并联电感对驱动影响分析

4.2.1 负载阻抗分析

受正弦交流信号激励,超声电机并联电感后,电源负载阻抗为:

$$Z = \frac{Z_{L_x} \cdot Z_{C_0}}{Z_{L_x} + Z_{C_0}} = \frac{(R_x + j2\pi fL_x) \cdot \frac{1}{j2\pi fC_0}}{R_x + j2\pi fL_x + \frac{1}{j2\pi fC_0}} \quad (2)$$

式中: Z_{C_0} 为压电振子等效阻抗, Z_{L_x} 为并联电感阻抗; R_x 为电感的附加阻值, $R_x \ll 2\pi fC_0$ 。式(2)进一步整理得:

$$Z = \frac{L_x}{C_0} \cdot \frac{1}{R_x + j\left(2\pi fL_x - \frac{1}{2\pi fC_0}\right)} \quad (3)$$

阻抗模为:

$$|Z| = \frac{L_x}{C_0} \cdot \frac{1}{\sqrt{R_x^2 + \left(2\pi fL_x - \frac{1}{2\pi fC_0}\right)^2}} \quad (4)$$

电压与电流相位差为:

$$\varphi = \arctan \left[\frac{2\pi fL_x - \frac{1}{2\pi fC_0}}{R_x} \right] \quad (5)$$

4.2.2 并联电感对驱动电流的影响

根据式(4)得,当 $2\pi fL_x - \frac{1}{2\pi fC_0} = 0$ 时,即:

$$L_x = \frac{1}{4\pi^2 f^2 C_0} \quad (6)$$

阻抗模 $|Z|$ 最大,电流接近 0。此时,驱动电源只需很小的电流就可使超声电机正常工作,电源的电流负担很小。

4.2.3 并联电感对电源功率利用率的影响

电源输出功率利用效率可用视在功率、有功功率、无功功率之间关系来反映。视在功率一定的情况下,有功功率越大,无功功率越小,输出功率利用效率就越高。

视在功率:

$$S = UI, \quad (7)$$

有功功率:

$$P = UI \cos \varphi, \quad (8)$$

其中: $\cos \varphi$ 为功率因数。

无功功率:

$$Q = UI \sin \varphi. \quad (9)$$

由式(7)、(8)、(9)知,当 $\varphi = 0$,功率因数 $\cos \varphi = 1$ 时,驱动电源输出功率利用效率最高。

此时,由式(5)得 $L_x = \frac{1}{4\pi^2 f^2 C_0}$ 。

综上所述,超声电机并联参数为 $L_x = \frac{1}{4\pi^2 f^2 C_0}$ 的电感,既可明显减小电源电流负担,又可明显提高电源输出功率利用效率。

5 实验结果

为验证驱动电源输出性能及并联电感的驱动优化效果,对电源进行实验研究。电机的静态电容为 7.818 nF。实验中信号测试仪器为 UTD2052CEL 型示波器,具有 2 个输入通道及参数自动测量功能,测量带宽为 50 MHz。

制作的单振子二自由度超声电机驱动电源样机如图 9 所示。

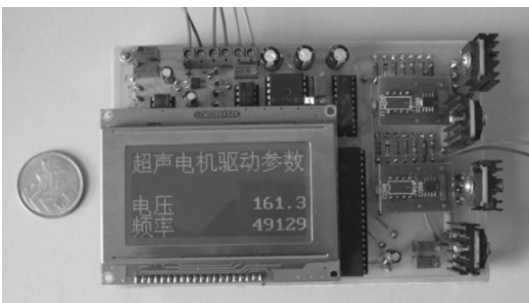


图 9 驱动电源样机

Fig. 9 Prototype of the driving power supply

调节电位器 R_{18} (见图 4)可改变驱动电源输出频率;调节电位器 R_{26} (见图 5)可改变驱动电源输出电压。驱动电源的输出频率及电压可独立、连续调节,超声电机的控制驱动灵活、方便。

图 10 是驱动电源在频率为 49.127 kHz 及 49.756 kHz 时的电压波形,输出的正弦波波形较为理想。

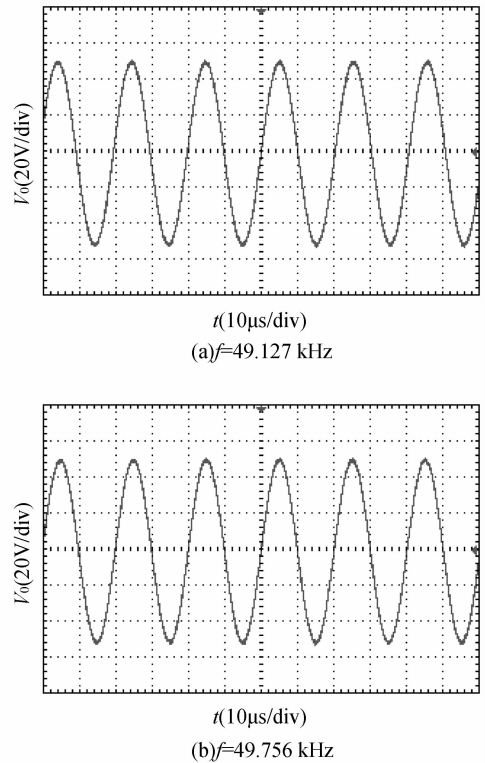


图 10 电压波形

Fig. 10 Waveform of voltage

电源接超声电机负载,频率为 49.127 kHz 时最大输出电压为 176.0 V,频率为 49.756 kHz 时最大输出电压为 171.2 V,输出电压满足超声电机驱动要求。

在电源满足驱动要求基础上,进一步验证与超声电机并联电感的驱动优化效果,根据式(6)选取电感,为使 B_{32} 、 B_{23} 模态频率下工作电流近似均衡相等,设定工作电流的最小值出现在 B_{23} 、 B_{32} 模态的中心点 49.442 kHz 处,计算得电感值为 1.323 mH。感值大小通过若干固定电感与可调电感串联的方法获得。实验发现超声电机并联 1.323 mH 电感时,电流最小频率点为 51.627 kHz,与期望值 49.442 kHz 略有差异,这是由于忽略了模型中的 R_1 、 L_1 、 C_1 引起。调节可调电感,

使电流的最小值位于 49.442 kHz 频率点处,此时感值为 1.442 mH,该值即为与超声电机并联的合适电感参数。

图 11 为在 49.127 kHz、49.756 kHz 频率下,并联 1.442 mH 电感与未并联电感情况下,驱动电源输出电压-电流的关系曲线。通过对比可知,并联合适电感时电源输出电流明显减小,减小为原来的 7.27% 和 7.41%。

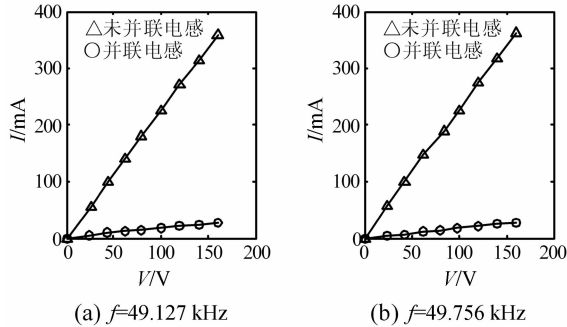


图 11 电压-电流关系曲线

Fig. 11 Curves of voltage versus current

实验中,未并联电感时两 OPA454 芯片及功放对管 D1047、B817 很热,并联电感后,即使长时间工作,元件温度也几乎与室温相同。

电源输出功率利用率方面,未并联电感时,

B_{32} 、 B_{23} 模态频率处电压与电流的相位差分别为 84.3° 及 83.1° ,功率因数为 0.099 和 0.120;并联电感后,两频率处电压和电流的相位差分别为 14.48° 及 17.26° ,功率因数提高至 0.968 和 0.955,电源输出功率利用率明显提高。

6 结论

以平板形单振子二自由度超声电机为驱动对象研制了驱动电源,电源利用压控振荡器产生正弦小信号,经高压及功率放大,得到较高驱动电压及较大的驱动电流实现电机驱动。电源中超声电机控制量-驱动电压及频率可以独立、连续调节。接上 7.818 nF 的超声电机负载,在 B_{32} 、 B_{23} 振动模态频率点,正弦波波波形较为理想,输出电压可达 176.0 V,满足超声电机的驱动要求,并且电源成本低廉,电源构成模块化,调试容易。

根据压电振子等效电路及工作特性,采取与超声电机并联电感的措施优化电源驱动性能。在 B_{32} 、 B_{23} 振动模态频率下,可使电源输出电流减小至原来的 7.27%、7.41%;功率因数可由原来的 0.099、0.120 提高至 0.968、0.955。在减小电源电流负担及提高电源输出功率利用率方面效果明显。

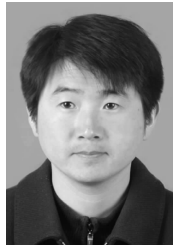
参考文献:

- [1] 荣誉,金振林.五自由度并联机械腿静力学性能评价与优化设计[J].光学精密工程,2012,20(6):1233-1242.
RONG Y, JIN ZH L. Static performance evaluation and optimal design of 5-DOF parallel mechanical leg [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(6): 1233-1242. (in Chinese)
- [2] 贺新升,高春.太阳自动跟踪机构的设计和位姿分析[J].光学精密工程,2012,20(5):1048-1054.
HE X SH, GAO CH. Design and positional posture analysis of parallel sun auto-tracking mechanism [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(5): 1048-1054. (in Chinese)
- [3] 荣誉,金振林,曲梦可.六足步行机器人的并联机械腿设计[J].光学精密工程,2012,20(7):1532-1541.
RONG Y, JIN ZH L, QU M K. Design and posi-

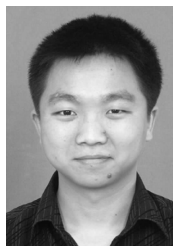
- tional posture analysis of parallel sun auto-tracking mechanism [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(7): 1532-1541. (in Chinese)
- [4] 何景峰,靳军,李保平,等.火控系统测试用 6 自由度运动模拟器研制[J].哈尔滨工业大学学报,2010,42(7):1066-1070.
HE J F, JIN J, LI B P, et al.. Development of 6-DOF motion simulator for firing control system testing [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2010, 42(7): 1066-1070. (in Chinese)
- [5] ZHANG X F, ZHANG G B, et al. A robot finger joint driven by hybrid multi-DOF piezoelectric ultrasonic motor [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2011, 169: 206-210.
- [6] 张健滔,全家楮,赵淳生.新型多自由度圆环形驻波超声电机[J].振动与冲击,2011,30(12):223-225.
ZHANG J T, JIN J M, ZHAO CH SH. Novel multi-DOF ring-shaped standing-wave type of ultrasonic motor [J]. *Journal of vibration and shock*,

- 2011, 30(12): 223-225. (in Chinese)
- [7] 胡锡幸, 郭吉丰. 3 个行波定子的 2 自由度球形超声波电机[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(9): 62-67. HU X X, GUO J F. Two degree of freedom spherical ultrasonic motor with three traveling-wave stators [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2010, 30(9): 62-67. (in Chinese)
- [8] 时运来, 赵淳生, 黄卫清. 一种轮式直线超声电机[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(9): 68-73. SHI Y L, ZHAO CH SH, HUANG W Q. A wheel type linear ultrasonic motor [J]. *Proceeding of the CSEE*, 2010, 30(9): 68-73. (in Chinese)
- [9] 赵淳生. 超声电机技术与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2007. ZHAO CH SH. *Ultrasonic Motors Technologies and Applications* [M]. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese)
- [10] 潘松, 李华峰, 黄卫清. 微型超声电机驱动及其优化研究[J]. 电机与控制学报, 2011, 15(3): 65-73. PAN S, LI H F, HUANG W Q. Research on micro-driver and its optimization for minitype USM [J]. *Electric machines and control*, 2011, 15(3): 65-73. (in Chinese)
- [11] 颜佳佳, 阮新波, 李华峰, 等. 超声电机的软开关驱动电路[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(3): 109-114. YAN J J, RUAN X B, LI H F, *et al.*. Soft switching driving circuit for ultrasonic motor [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2009, 29(3): 109-114. (in Chinese)
- [12] 张明辉, 李满天, 孙立宁. 基于压电陶瓷平面内应变的多自由度超声波电机驱动电路研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(33): 30-35. ZHANG M H, LI M T, SUN L N. Driving circuit for multi-degree of freedom ultrasonic motor using in-plane deformation of PZT elements [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2007, 27(33): 30-35. (in Chinese)
- [13] 程光明, 郭抗, 孙业明, 等. 单振子二自由度球面马达的运动机理[J]. 纳米技术与精密工程, 2011, 9(4): 291-297. CHENG G M, GUO K, SUN Y M, *et al.*. Motion mechanism of two-degree-of-freedom spherical motor using single PZT vibrator [J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2011, 9(4): 291-297. (in Chinese)

作者简介:



孙业明(1978—),男,吉林珲春人,2001年、2003年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士学位,主要从事压电执行器机构设计及驱动控制技术方面的研究。E-mail: 790005813@qq.com



郭抗(1984—),男,湖北天门人,助理研究员,2006年、2008年、2011年于吉林大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事压电驱动与控制技术的基础和应用研究。E-mail: guokang08@mails.jlu.edu.cn



程光明(1957—),男,吉林长春人,博士,教授,博士生导师,1982年、1985年、1996年于吉林工业大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事压电驱动与控制技术及微小型机电液系统等方面的研究。E-mail: cgm123@163.com

导师简介:



曾平(1957—),女,辽宁盖州人,博士,教授,博士生导师,1982年、1993年、2006年于吉林大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事机械设计及理论、压电驱动技术的研究。E-mail: zengping321@163.com