

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

张明辉, 李满天, 孙立宁

(哈尔滨工业大学机器人研究所, 黑龙江省 哈尔滨市 150080)

Driving Circuit for Multi-degree of Freedom Ultrasonic Motor Using in-plane Deformation of PZT Elements

ZHANG Ming-hui, LI Man-tian, SUN Li-ning

(Robotics Institute, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, Heilongjiang Province, China)

ABSTRACT: A new multi-degree of freedom ultrasonic motor (MDOF USM) using in-plane deformation of lead zirconate titanate (PZT) elements was introduced. The rotation around Z axis was generated by combining both in-plane bending vibration modes; whereas the rotation around X or Y axis was generated by combining the longitudinal vibration mode and one of the above bending vibration modes. A driving circuit based on direct digital synthesizer (DDS) theory was designed. The DDS array synthesized in field-programmable gate array (FPGA) part was employed to generate four routes sinusoidal actuating signals and high voltage power operational amplifiers were applied to amplify them. The amplitude and frequency of each output signal, and the phase between two of output signals can be adjusted independently. The driving circuit was tested by experiments on the prototype motor and results show the circuit is feasible.

KEY WORDS: ultrasonic motor; multi-degree of freedom; in-plane deformation; driving circuit

摘要: 介绍了一种新型基于压电陶瓷平面内应变特性的多自由度超声波电机, 该电机通过两个平面内的弯曲振动模式的叠加实现转子绕 Z 轴的转动; 并利用伸缩振动模式分别与上述弯曲振动模式叠加实现转子绕 X 轴和绕 Y 轴的转动。设计了一种基于直接数字频率合成器(DDS)原理的电机驱动电路, 该电路利用在 FPGA 元件实现的 DDS 阵列产生四路正弦激励信号, 并采用高压运算放大器进行功率放大。该驱动电路的特点是各路驱动信号幅值和频率及驱动信号之间的相位差均可以独立调整。电机样机的机械特性实验以及调

节特性实验结果表明该驱动电路满足驱动基于压电陶瓷平面内应变的多自由度超声波电机的要求。

关键词: 超声波电机; 多自由; 平面内应变; 驱动电路

0 引言

随着科技的发展, 工业、医疗、军事等各种领域都迫切需要能够完成复杂多自由度运动的致动器。利用这些致动器在仿生学中可以实现对人类的颈、肩、髋等关节动作的模拟, 在医疗方面可以在体内向任意方向旋转的内窥镜和操作器, 在工业和军事领域中更加能够制造出灵活的机器人末端执行器等。传统上这些任务必须通过一系列电机加上复杂的机构才能够实现, 设备中的电机数量必须大于等于需要完成运动的自由度数。这种方法通常会导致设备体积庞大、重量增加, 不适合应用在工作空间狭小或者对执行器重量有要求的领域。采用能够实现多自由度运动的致动器完成上述任务时可以有效的减小设备的尺寸、减轻设备的重量。在当前已见报道的各种多自由度致动器中, 多自由度超声波电机除了具有结构紧凑、体积小、重量轻的特点外, 还具有低速时输出转矩大、静态保持力矩大, 无电磁干扰等特点, 因此, 在小功率、小体积的多自由度致动器的各种实现方法中, 超声波电机与其它形式致动器相比具有明显的优势^[1-4]。

从 20 世纪 90 年代开始, 多自由度超声波电机研究成从为超声波电机研究中的一个新方向, 最早提出该概念的是日本东京农业技术学院的 Toyama

基金项目: 国家自然科学基金项目(50575056)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50575056).

Shigeki等学者^[5],他们设计出一种多振子超声波电机,该电机每个轴的转动需要一个独立的振子驱动。此外,同期的法国学者Antoine Ferreira等也提出了出了一种类似的能够实现两个自由度运动的超声波电机方案^[6]。1998年,日本东京工业大学的Sadayuki Ueha等设计了一种单振子实现多自由度的超声波电机,他们在单振子中实现了3个固有频率接近、方向互相垂直的振动,通过其中任意2个振动的叠加产生一个方向的运动,采用这种方法设计的电机体积可以大大减小^[7]。日本庆应义塾大学的Takashi Maeno等学者在2000年同样利用单振子振动叠加原理设计出了一种新型多自由度超声波电机,所不同的是在电机的设计中他们将用来在2个方向上产生弯曲振动的压电陶瓷放置在同一位置上^[8],2004年又给出了一种基于分立多定子式的电机,该电机可以驱动体积比定子本身大的转子,但在3个转动方向上的运动性能并不一致^[9]。国内,吉林大学的杨志刚教授等对单振子多自由度超声波电机进行了研究,并进行了样机实验^[10]。南京航空航天大学的赵淳生教授等对圆柱-球体多自由度超声波电机也开展了大量研究,他们分析、优化设计了电机的定子并改善了电机的控制方法^[11]。

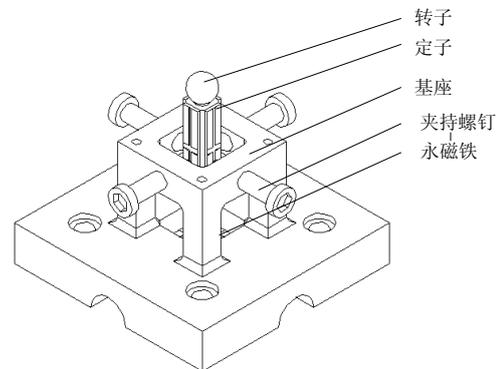
在多自由度超声波电机驱动研究方面,2003年日本庆应义塾大学的Takashi Maeno等学者为他们设计的平板型的多自由度超声波电机设计了一种自激驱动电路,该电路由晶振、运算放大器、电阻、电容组成,实验表明在上述电路的驱动下这种电机可以实现最高70 r/min的转动^[12]。国内东南大学的金龙等学者设计了3种用于驱动3自由度球转子超声波电机的驱动电路^[13-14],利用压控振荡器产生驱动信号的基频,采用开关电路实现功率放大。基于压电陶瓷平面内应变的多自由度超声波电机的运动机理与上述多自由度超声波电机并不相同,其定子的振动不是由压电陶瓷沿电轴方向上的应变产生,而是依靠压电陶瓷在垂直电轴平面内的应变产生,在驱动上它需要4路独立的驱动激励信号。为了驱动该电机,本文设计了一种基于DDS(直接数字频率合成器)原理的驱动电路,其驱动信号由FPGA实现的DDS阵列产生,由高压运算放大器进行功率放大。该驱动电路可以同时输出4路正弦驱动电压信号,并且可以独立调节每路信号的频率和幅值及任意2路信号间的相位差。

1 基于压电陶瓷平面内应变的多自由度超声波电机

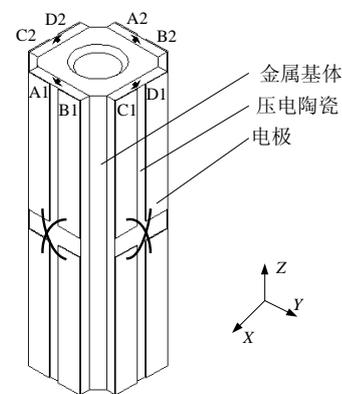
1.1 定子结构分析

基于压电陶瓷平面内应变的多自由度超声波电机是一种多模态型超声波电动机,它由转子、定子、夹持基座构成,如图1(a)所示。定子通过夹持螺钉夹持在基座上,夹持点位定子振动模态的节点。夹持基座的下面装有永磁铁,给转子施加预紧力。

电机的定子即电机的振子,它的结构如图1(b)所示,中间为中空柱状金属基体,4片扁平压电陶瓷块粘贴在基体表面。压电陶瓷沿厚度方向极化,上层电极采用4分形式,下层采用整体电极。压电陶瓷上层对角的电极连接在一起作为一个输入电极。当在压电陶瓷上施加直流电压信号时,在逆压电效应 d_{31} (应力)的作用下使压电陶瓷仅在平面内产生变形^[15],从而带动它所粘贴的金属基体在相同的平面内产生变形。当以交流激励信号代替直流激励信号施加在压电陶瓷上,如果振子中存在合适的振动模态,在激励信号的作用下振子末端的质点将产生椭圆运动,满足超声波电机运动机理。



(a) 电机装配图



(b) 定子结构图

图 1 多自由度超声波电机装配图及其定子结构
Fig. 1 Assembly diagram of MDOF USM and drawings of its stator

为了降低谐振频率，选择金属基体的材料为黄铜。压电陶瓷的材料选择为PZT4。采用有限元分析软件ANSYS对其进行建模、分析和优化设计，计算得出超声波电机的定子高30 mm，内孔直径6 mm，压电陶瓷厚1 mm，宽8 mm。定子的模态分析的结果如图2所示，其中图2(a)为定子在Y-Z平面内的2阶弯曲(B2)振动模态，图2(b)为定子沿Z轴方向的1阶伸缩(L1)振动模态，定子在X-Z平面内的2阶弯曲振动模态与图2(a)所示相同。各振动模态的固有频率如表1所示，其结果表明在电机的定子中同时存在3个振动方向互相垂直的振动模态并且其固有频率十分接近，满足了超声波电动机产生多自由度运动的条件。

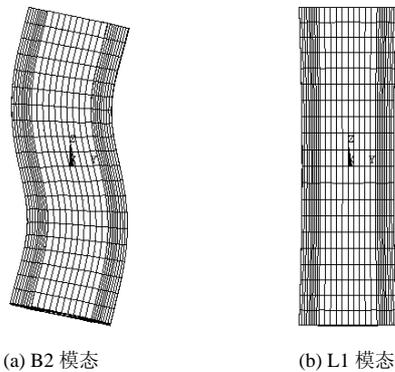


图 2 定子振动模态
Fig. 2 Vibrating modes of stator

表 1 振子的固有频率

Tab. 1 Natural frequencies of the vibrator

振动模态	固有频率/kHz
Z 方向 1 阶伸缩振动模态(L1)	56.7
X-Z 平面内 2 阶弯曲振动模态(B2)	56.6
Y-Z 平面内 2 阶弯曲振动模态(B2)	56.6

1.2 运行、驱动机理分析

基于平面内应变的多自由度超声波电机是一种多模态激励型超声波电机^[16]，即通过定子内 3 个固有频率接近、振动方向互相垂直的 3 个振动模态中的任意 2 个叠加实现绕 3 个轴的转动，如图 2 所示。其中绕 Z 轴的转动由在 X-Z 平面内的弯曲振动和 Y-Z 平面内的弯曲振动叠加产生，如图 3(a)所示，当以 90°的相位差同时激励这 2 个振动模态时，这 2 个振动的合成导致定子的末端的质点产生绕 Z 轴的椭圆运动，该椭圆运动以摩擦力的方式推动与定子接触的球转子绕 Z 轴转动。绕 X 轴的转动由沿 Z 轴的伸缩振动和 Y-Z 平面内的弯曲振动叠加产生，如图 3(b)所示，当以 90°的相位差同时激励这 2 个振动模态时，这 2 个振动的合成导致定子的末端的质点产生绕 X 轴的椭圆运动，在摩擦力的作用下转子绕 X 轴转

动。转子绕 Y 轴旋转的运动原理与绕 X 轴相似，由沿 Z 轴的伸缩振动和 X-Z 平面内的弯曲振动以 90°的相位差叠加产生。

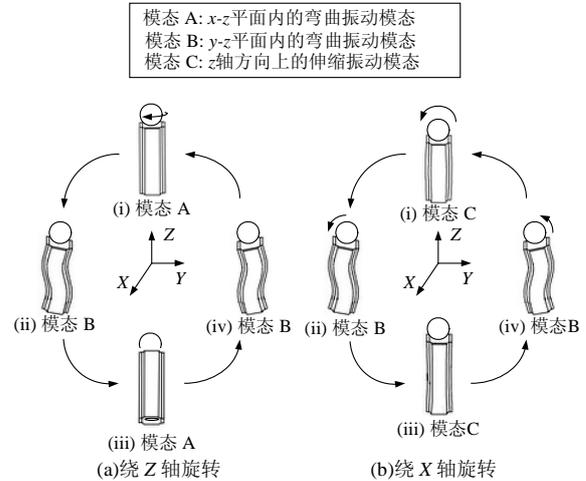


图 3 多自由度超声波电机驱动机理
Fig. 3 Driving principle of MDOF USM

当在电极 A1 和电极 A2 上施加激励信号时，可以同时激励出沿 Z 轴的伸缩振动和 Y-Z 平面内的弯曲振动，实现绕 X 轴逆时针旋转(右手定则)，而当激励电极 B1 和电极 B2 时，转子绕 X 轴顺时针旋转；同理可知，激励电极 C1 和电极 C2，转子绕 Y 轴逆时针旋转，激励电极 D1 和电极 D2，转子绕 Y 轴顺时针旋转；而以 90°的相位差的两路激励信号同时激励 A1 和 C1 电极，转子绕 Z 轴逆时针转动，同理以 90°的相位差的 2 路激励信号同时激励 B1 和 D1 电极，转子绕 Z 轴顺时针转动。

从上述分析中可以看出，基于压电陶瓷平面内应变的多自由度超声波电机要求其驱动电路必须能够输出 4 路独立的正弦电压信号，并且要求这 4 路驱动信号频率、幅值及任意 2 路间的相位差可调。另外由于压电陶瓷为容性负载，因此要求驱动电路有较强的带容性负载能力。为此，本文设计了一种基于直接数字频率合成器(DDS)原理的驱动电路，驱动电路采用 DSP、FPGA 与高压运算放大器相结合的方案，DSP 实现运动控制，FPGA 产生正弦信号，高压运算放大器完成功率放大。

2 驱动电路设计

2.1 总体设计方案

根据上述对基于压电陶瓷平面内应变的多自由度超声波电机的运行、驱动机理分析，本文设计了基于直接数字频率合成器(DDS)原理的驱动、调速控制电路，其方案如图 4 所示。

该驱动电路由 DSP、FPGA、D/A 转换模块、滤波、信号调理和功率放大几个部分组成。DSP 通过 UART 或者模拟电压等方式接受外部控制信号，对其进行处理并发送给 FPGA 和数字电位器，此外 DSP 还接收测试系统的编码器反馈等信号监测电机的运行状态。DSP 和 FPGA 之间通过双口 RAM 进行通信，DSP 将各路信号的频率和相位信息写入双口 RAM 中，FPGA 从双口 RAM 中读取上述信息并传递给 4 个基于 DDS 原理的正弦波信号产生模块，驱动压电陶瓷的 4 路独立的正弦电压信号就是由这个 4 个模块分别产生。DDS 输出的信号在此阶段只是正弦波的编码信号必须通过 D/A 模块转化为阶梯正弦波信号，然后进一步由低通滤波电路滤除其中包含的谐波信号，得到平滑的超声正弦波信号。功率放大部分由高压运算放大器实现，输出最高 300 V (Vpp) 的驱动激励信号。

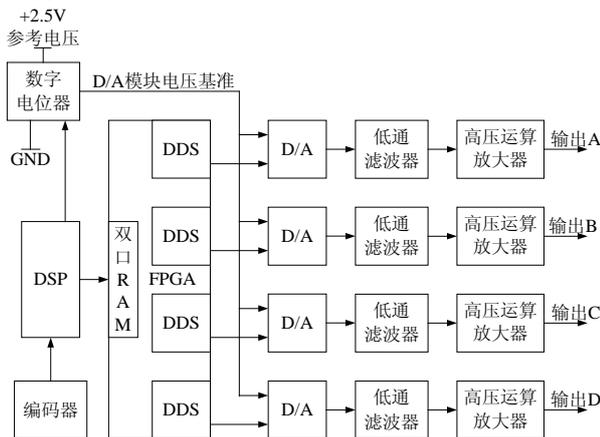


图 4 驱动电路原理框图
Fig. 4 Diagram of diving circuit

2.2 信号调节原理

输出激励信号的幅值通过调节 D/A 模块的基准电压实现，D/A 模块输出信号的幅值与其基准电压输入成正比，改变 D/A 模块基准电压即可以改变输出的阶梯正弦波幅值，从而达到实现调整输出激励信号的目的。DSP 将各通道输出幅值大小通过 SPI 总线传递给各数字电位器，以统一的片选信号同时改变 4 路信号输出的幅值大小。

正弦波信号由在 FPGA 中实现的 DDS 阵列产生，因此采用调节 DDS 单元的频率控制字和相位控制字的方法控制输出信号的频率和相位。根据 DDS 原理^[17-20]，其输出的正弦波信号的频率为

$$f_{\text{out}} = f_c K / 2^N$$

式中： f_{out} 为输出信号的频率； f_c 为输入时钟的频率； N 为 DDS 的位数； K 为频率控制字。当 K 取 1 时，DDS

输出最低频率，即 DDS 的步进分辨率 Δf ，为 $f_c / 2^N$ 。根据 Nyquist 采样定理，DDS 输出最高频率为 $f_c / 2$ ，此时 K 为 2^{N-1} 。但是为保证输出精度，每个周期保证最少采样 4 点，取 K_{max} 为 2^{N-2} ，即输出最高频率为 $f_c / 4$ 。在 DDS 实现过程中，在每个时钟的上升沿相位控制字与频率累加器输出结果进行相加，其结果在输出幅度编码上产生 $P / 2^N$ 地址偏移。这样则可以通过改变相位控制字 P 改变输出信号的相位，DDS 相位控制的最小分辨率为 $2\pi / 2^N$ 。在本系统的设计中，输入时钟的频率为 491.52 kHz，考虑到 FPGA 的可编程 RAM 的容量 DDS 的位数取 10 位，因此频率控制分辨率为 480 Hz，最大输出频率 122.88 kHz，相位控制分辨率为 $\pi / 512$ ，完全满足驱动超声波电动机的需要。

2.3 功率放大电路设计

由于本文设计的驱动电路输出的频率范围较宽，为了使输出频率范围内的各频率信号都能够实现功率放大，所以本文采用 Apex 公司的高压运算放大器设计功率放大电路。高压运算放大器具有如下特点，电源电压高，输出电流大，压摆率 (slew rate) 高，静态电流低，电路设计简单，因此十分适用于压电元件驱动。在综合考虑放大电路输出电流能力和闭环稳定性 (容性负载) 的基础上，本文采用高压运放的型号为 PA90。功率放大电路的技术指标如下：闭环放大倍数 30；输出信号最大 300 V (Vpp)；最高频率为 80 kHz (2.2 nF 负载)。

3 驱动电路输出性能

实验表明在上述驱动电路在驱动 2.2 nF 的容性负载 (电机实际负载小于 1.7 nF) 时，其输出频率可以达到 80 kHz，完全满足驱动基于压电陶瓷平面内应变的多自由度超声波电机的需要。图 5(a) 所示为电机绕 X 和 Y 轴转动时驱动电路输出的波形而图 5(b) 电机绕 Z 轴转动时驱动电路输出的波形，在驱动电路的负载为 2.2 nF 的条件下，电路输出信号幅值可以达到 300 V (Vpp)，频率达到 80 kHz，并实现两路输出信号之间的相位差为 90°。

应用上述驱动电路进行电机样机机械特性测定实验，在电路输出 54.8 kHz 峰峰值 200 V 的激励信号时，可以得到如图 6 所示电机机械特性。其中，绕 X 轴转动时可输出 162 r/min 的最高转速以及 3.2 mNm 的最大输出转矩；绕 Y 轴转动时可输出 158 r/min 的最高转速以及 4.0 mNm 的最大输出转

矩；而绕 Z 轴转动时可输出 98 r/min 的最高转速以及 0.24 mNm 的最大输出转矩。

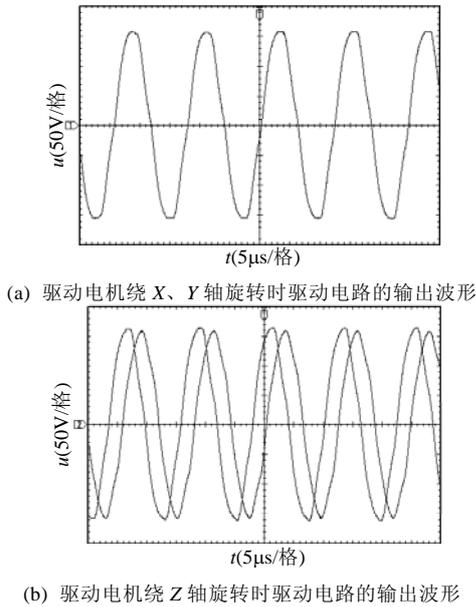


图 5 驱动电路的输出波形

Fig. 5 Output waveforms of driving circuit

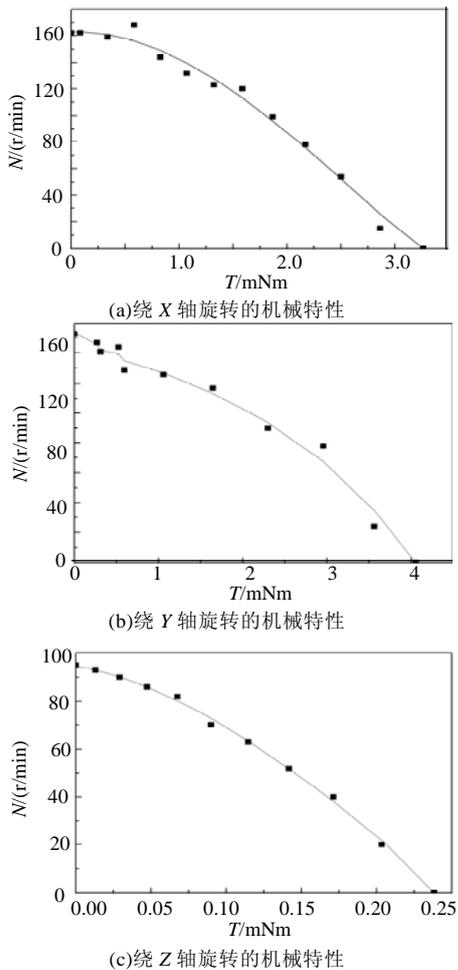


图 6 电机样机的机械特性

Fig. 6 Load characteristic of the multi-DOF USM

电机采用调整激励信号幅值的方法实现对电机的调速，应用本文提出的驱动电路进行电机调节特性测定实验可以得出如图 7 所示的电机转速-电压特性。输入激励信号峰值在 90~200 V 之间时，电机绕 X、Y 和 Z 轴的转速与激励信号幅值保持近似线性关系。

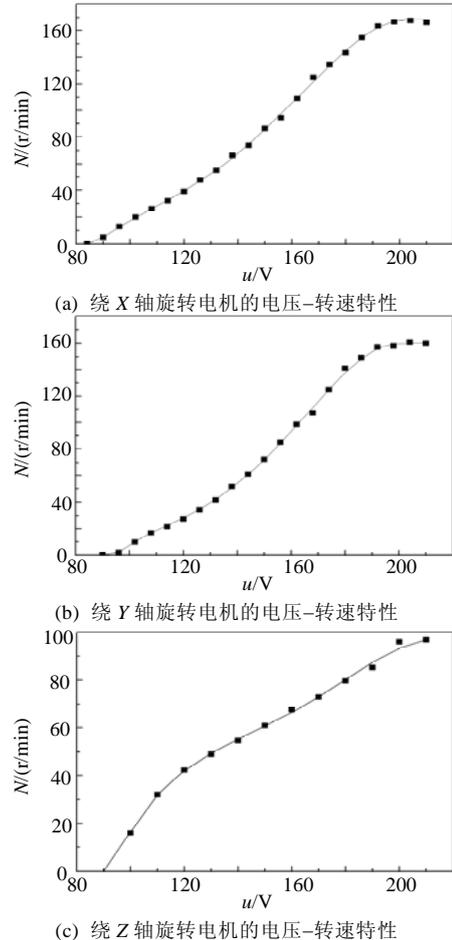


图 7 电机的电压-转速特性

Fig. 7 Revolution speed against voltage

4 结论

本文分析了基于压电陶瓷平面内应变的多自由度超声波电机的运行机理及其对驱动控制电路的需求，设计了一种基于 DDS 原理的驱动电路，其中由 FPGA 实现的 DDS 阵列产生驱动电机的 4 路正弦电压信号，采用高压运算放大器设计的功率放大电路具有在 80 kHz 范围内驱动 2.2 nF 容性负载的能力，DSP 控制电路能够独立调整每路信号的频率、幅值及任意 2 路之间的相位差。应用该驱动电路对电机样机进行了机械性能实验以及调节特性实验，实验结果表明该驱动电路完全能够满足驱动、控制基于压电陶瓷平面内应变的多自由度超声波电机的

需要。

参考文献

- [1] Kenjiro Takemura, Takashi Maeno. Design and control of an ultrasonic motor capable of generating multi-DOF motion[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2001, 6(4): 499-506.
- [2] 刘俊标, 黄卫清, 赵淳生. 多自由度球形超声电机的发展和应用[J]. 振动、测试与诊断, 2001, 21(2): 85-89.
Liu Junbiao, Huang Weiqing, Zhao Chunsheng. Development and application of spherical ultrasonic motor with multi-degree of freedom[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2001, 21(2): 85-89(in Chinese).
- [3] 李志荣, 黄卫清, 赵淳生. 多自由度超声电机研究的一些新进展[J]. 振动、测试与诊断, 2003, 23(3): 161-164.
Li Zhirong, Huang Weiqing, Zhao Chunsheng. Recent advances in the research of ultrasonic motors with multi-degree of freedom[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2003, 23(3): 161-164 (in Chinese).
- [4] 郭吉丰, 傅平. 多自由度球形超声波电机的研究进展[J]. 电工电能新技术, 2005, 24(2): 65-68.
Guo Jifeng, Fu Ping. Research progress of multi-degree of freedom ultrasonic motor [J]. Advantage Technology of Electrical Engineering and Energy, 2005, 24(2): 65-68(in Chinese).
- [5] Toyama Shigeki, Sugitani Shigeru, Zhang Guoqiang. Multi-degree of freedom spherical ultrasonic motor[C]. IEEE International Conference on Robotics and Automation, Minneapolis, USA, 1995.
- [6] Antoine F, Patrice M, Le Modal P. New multi-degree of freedom piezoelectric micro motors for micromanipulator applications [C]. 1995 IEEE Ultrasonic Symposium, Seattle, USA, 1995.
- [7] Takafumi Amano, Takaakiishii, Kentaro Nakamura, et al. An ultrasonic actuator with multi-degree of freedom using bending and longitudinal vibration of a single stator[C]. IEEE Ultrasonics Symposium, Toronto, Canada, 1997.
- [8] Kenjiro Takemura, Takashi Maeno. Characteristics of an ultrasonic motor capable of generating a multi-degree of freedom motion[C]. IEEE International Conference on Robotics and Automation, San Francisco, USA, 2000.
- [9] Kayo Otokawa, Takashi Maeno. Development of an arrayed-type multi-degree-of-freedom ultrasonic motor based on a selection of reciprocating vibration modes[C]. IEEE International Ultrasonics, Ferroeletrics, and Frequency Control Joint 50th Anniversary Conference, Montreal, Canada, 2004.
- [10] 程光明, 曾平, 杨志刚, 等. 二自由度压电电机的振动分析[J]. 压电与声光, 2000, 22(2): 131-133.
Cheng Guangming, Zeng Ping, Yang Zhigang, et al. Vibration analysis of two-freedom piezoelectric motors vibrator[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2000, 22(2): 131-133(in Chinese).
- [11] 李志荣, 黄卫清, 赵淳生. 圆柱-球体三自由度超声电机的研究[J]. 压电与声光, 2005, 27(5): 486-489.
Li Zhirong, Huang Weiqing, Zhao Chunsheng. Research on a cylinder-sphere ultrasonic motor with three-DOF Testing[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2005, 27(5): 486-489(in Chinese).
- [12] Kenjiro Takemura, Yuji Ohno, Takashi Maeno. Design of a plate type multi-DOF ultrasonic motor and its driving characteristics[C]. IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, Kobe, Japan, 2003.
- [13] 金龙, 胡敏强, 顾菊平, 等. 一种新型圆柱定子 3 自由度球形压电超声电机[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2002, 32(4): 620-623.
Jin Long, Hu Minqiang, Gu Juping, et al. New type of three-degree of freedom spherical piezoelectric ultrasonic motor with cylinder stator [J]. Journal of Southeast University(Natural Science Edition), 2002, 32(4): 620-623(in Chinese).
- [14] 金龙, 顾菊平, 胡敏强, 等. 圆柱定子 3 自由度球转子超声波电动机驱动控制技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(9): 163-166.
Jin Long, Gu Juping, Hu Minqiang, et al. Driving and control for three-degree freedom of spherical piezoelectric ultrasonic motor with cylinder stator[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(9): 163-166(in Chinese).
- [15] Friend J, Nakamura K, Ueha S. A piezoelectric micromotor using in-plane shearing of PZT elements[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2004, 9(3): 467-473.
- [16] Koc B, Cagatay S, Uchino K. A piezoelectric motor using two orthogonal bending modes of a hollow cylinder[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 2002, 49(6): 495-500.
- [17] 董国伟, 李秋明, 赵强, 等. 基于 FPGA 的直接数字频率合成器的设计[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(6): 877-879.
Dong Guowei, Li Qiuming, Zhao Qiang, et al. Design of direct digital frequency synthesizer based on FPGA[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(6): 877-879(in Chinese).
- [18] 李华峰, 赵淳生. 基于复杂可编程逻辑器件的小型超声电源[J]. 中国电机工程学报, 2005, 27(5): 115-118.
Li Huaifeng, Zhao Chunsheng. Micro-driver for ultrasonic motor with CPLD[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 27(5): 115-118 (in Chinese).
- [19] 贾玉臣, 吴嗣亮. 正弦信号源直接数字合成的实现[J]. 北京理工大学学报, 2005, 25(9): 815-818.
Jia Yuchen, Wu Siliang. Realization of the sinusoidal signal source with DDS[J]. Transaction of Beijing Institute of Technology, 2005, 25(9): 815-818(in Chinese).
- [20] 刘燕飞, 赫建国, 郑燕. 一种基于 DDS 技术的信号源及其 CPLD 的实现[J]. 西安邮电学院学报, 2005, 10(1): 49-52.
Liu Yanfei, He Jianguo, Zheng Yan. A signal generator based on DDS and its implementation on CPLD[J]. Journal of Xi'an University of Post and Telecommunications, 2005, 10(1): 49-52(in Chinese).

收稿日期: 2007-05-30.

作者简介:

张明辉(1980—), 博士研究生, 微小型机器人及超声波电机研究, peterzmh@163.com;

李满天(1974—), 博士, 讲师, 微小型机器人及仿生机器人研究;

孙立宁(1964—), 博士, 教授, 机器人、微驱动、微操作及新型致动器研究。

(实习编辑 刘浩芳)