

纵弯复合多自由度超声电机的研究

赵学涛¹, 陈维山², 郝铭²

(1. 山东理工大学机械学院, 255049, 山东淄博; 2. 哈尔滨工业大学机电学院, 150001, 哈尔滨)

摘要: 提出了一种新型单振子多自由度超声电机结构, 由单一驱动足产生多自由度驱动轨迹, 驱动转子多自由度运动, 其输出端驱动质点运动轨迹的大小和方向可以通过两正交换能器的复合激励进行矢量控制, 可以产生3种改变运动方向的正交椭圆轨迹. 对十字交叉换能器做了模态分析, 对纵振和弯振做了模态简并, 建立了驱动足的运动轨迹方程, 并分析了典型驱动方式下驱动足的运动轨迹. 研制了一种基于单振子纵弯换能器驱动的多自由度球形超声电机, 该电机具有结构紧凑、绝对输出力矩大、驱动简单等优点, 从根本上解决了多振子驱动形式带来的各驱动振子之间的相互干扰和阻碍问题. 实验测试样机绕X、Y轴旋转时, 输出转矩为0.97 N·m, 最高转速为11 r/min, 绕Z轴旋转时, 输出转矩为0.27 N·m, 最高转速为66 r/min.

关键词: 超声电机; 纵弯换能器; 多自由度; 驱动轨迹分析

中图分类号: TM356 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2009)08-0107-05

Ultrasonic Motor with Longitudinal-Bending Hybrid Vibration Modal

ZHAO Xuetao¹, CHEN Weishan², HAO Ming²

(1. School of Mechanical Engineering, Shandong University of Technology, Zibo, Shandong 255049, China;

2. School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: A novel single-oscillator type multi-DOF ultrasonic motor with the longitudinal and bending hybrid modal with a cross orthogonal structure is proposed. The rotator can realize multi-DOF motion by the trajectories of the single driving foot. The amplitude, shape and rotation direction of the driving foot trajectory can be controlled by the vector mode of the composite drive by two orthogonal transducers, which cause three orthogonal elliptical trajectories respectively. Modal analysis is carried out for the orthogonal transducers, and longitudinal and bending resonant frequencies are degenerated. A prototype is fabricated with compact structure, large torque output and simple drive, and the interference and obstruction one another from multi-oscillator drivers of multi-DOF ultrasonic motor are avoided. The torque output is 0.97 N·m and the highest speed is 11 r/min while the motor rotates around X or Y axis. The torque output is 0.27 N·m and the highest speed is 66 r/min while the motor rotates around Z axis.

Keywords: ultrasonic motor; longitudinal-bending transducer; multi-degree of freedom; driving trajectory analysis

超声电机是一种新型驱动器, 具有低速大转矩、运行无噪声、断电自锁、响应速度快、定位精度高、不受电磁干扰等优于电磁电机的特点^[1-3].

球型超声电机是近几年发展起来的一种新型的多自由度超声电机, 可应用在全方位仿生运动的球

形关节、高性能机器人的柔性关节和机器人眼球等领域^[4-6]. 多自由度球型超声电机与单自由度超声电机相比, 在结构和测控上都更为复杂. 目前, 国内外多自由度压电球形超声电机研究尚属初级阶段^[2], 在电机本体构形设计时, 大多采用多个分立的驱动

振子对球形动子进行驱动,难以保证各驱动振子性能一致,各驱动振子间存在干扰,电机的可控性较差^[7].

本文提出一种单振子纵弯复合型单驱动足多自由度超声电机结构,其输出端驱动质点运动轨迹的大小和方向可以通过对两正交换能器的复合激励进行矢量控制,可以产生3种可改变运动方向的正交椭圆轨迹,电机结构紧凑,输出转矩大.

1 纵弯复合型多自由度超声电机结构

1.1 纵弯复合型多自由度超声电机总体结构

纵弯复合型多自由度超声电机结构如图1所示,定子为十字正交型,单一驱动足为圆柱形,球形动子由预压力机构安装在定子上,驱动足与球形动子接触面为与球相同弧度的凹面.

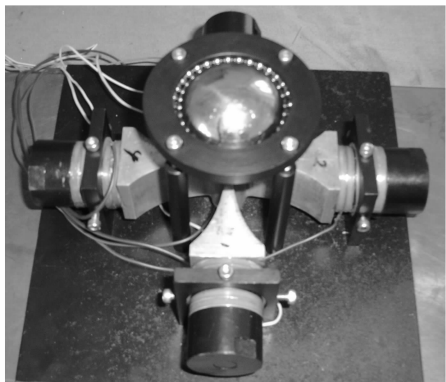


图1 超声电机实物图

1.2 十字正交聚能器结构

要得到驱动足驱动质点三维可控运动轨迹,至少需要两组纵向振动陶瓷激励和一组弯曲振动陶瓷激励才能实现.为实现驱动器整体式驱动要求,需将空间不同位置压电陶瓷激励出的振动经过放大在驱动足上叠加,得到需要的驱动轨迹.

依照上述要求以及对加载对称性的考虑,纵弯复合型驱动器由4个空间位置平面正交的换能器组成,4个变幅杆组成结构一体的十字正交聚能器,结构如图2所示.

1.3 正交纵弯复合振动模态驱动器结构

纵弯复合型多自由度超声驱动器结构是基于十字正交聚能器得到的,其形状为十字正交聚能器的延伸,即在十字正交聚能器后端连接了纵振压电陶瓷组、法兰盘、弯振压电陶瓷组和后端盖,各组件之间采用紧固螺栓连接.聚能器后端连接部件选用圆形截面,整体结构如图3所示.

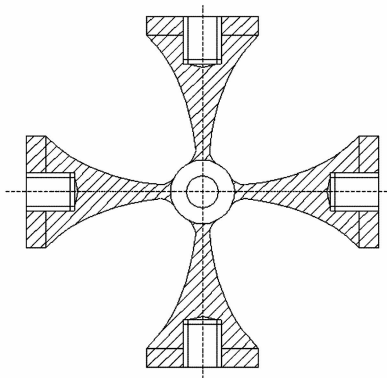
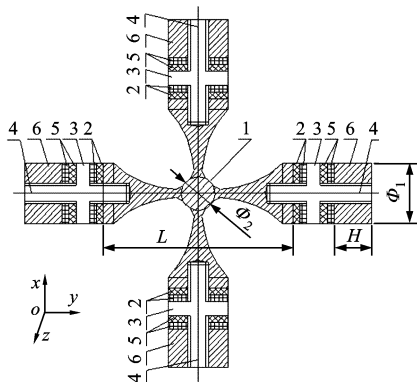


图2 正交聚能器结构



1 为十字正交聚能器;2 为纵振压电陶瓷组;3 为法兰盘;
4 为紧固螺栓;5 为弯振压电陶瓷组;6 为后端盖

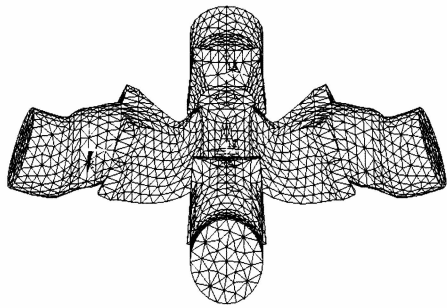
图3 驱动器结构

2 纵弯复合驱动器的频率简并

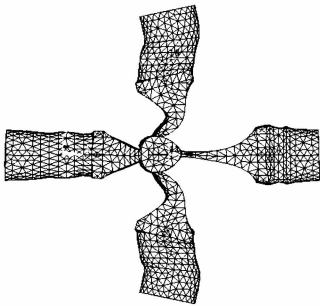
模态简并的过程就是不断调整尺寸参数,使驱动器纵向振动与弯曲振动特征频率逐渐接近,简并为同一特征频率.对所建立的驱动器有限元模型进行模态分析,在20~50 kHz频率范围寻找所期望的纵向振动振形和弯曲振动振形,目标振形如图4所示.在频率简并过程中,应保证纵振陶瓷组位于纵振节点处,该陶瓷组位于弯振的波腹处,聚能器驱动足处于纵振和弯振的波腹处,法兰位于振动节面,目标模态附近没有其他振形存在.

通过调整换能器的几何尺寸,使纵弯目标模态的特征频率逐渐接近,最后得到一组参数:正交聚能器轴线方向长度 $L=110$ mm,后端盖长度 $H=20$ mm,后端盖截面直径 $\Phi_1=35$ mm,驱动足截面直径 $\Phi_2=20$ mm,陶瓷片每片厚度为5 mm,法兰盘厚度为8 mm.

此时两路纵振特征频率 $f_1=36\ 434$ Hz、 $f_2=36\ 447$ Hz,弯振特征频率 $f_1=36\ 470$ Hz,纵弯模态



(a)三阶弯振变形



(b)二阶纵振变形

图 4 模态分析变形示意图

的特征频率最大差值为 36 Hz,其余条件也满足期望要求,模态简并结果令人满意.简并后的特征频率取中间值 $f=36\ 460\ \text{Hz}$.

3 驱动足运动轨迹分析

3.1 驱动足轨迹方程的建立

纵弯复合振动模态压电超声驱动器的基本工作原理就是利用十字正交弹性体内出现的两个纵向振动模态和弯曲振动模态的不同组合,使驱动器弹性体的输出端面(驱动足)质点叠加出各种椭圆轨迹.因此,研究驱动器驱动机理就是要研究驱动端面质点椭圆轨迹.

驱动足在驱动器纵振陶瓷的作用下将分别产生 X 、 Y 轴方向简谐振动,在弯振陶瓷的作用下将产生 Z 轴方向简谐振动.驱动足上驱动质点 M 在三个坐标轴方向的振动位移 x 、 y 、 z 为

$$\left. \begin{aligned} x &= W_1 \cos(\omega t + \alpha) \\ y &= W_2 \cos(\omega t + \beta) \\ z &= W_3 \cos(\omega t + \gamma) \end{aligned} \right\} \quad W_1, W_2, W_3 \geq 0 \quad (1)$$

式中: W_1 、 W_2 、 W_3 分别为 X 、 Y 、 Z 三个方向振动幅值(m); α 、 β 、 γ 分别为 X 、 Y 、 Z 三个方向振动初始相位($^\circ$); ω 为驱动足谐振频率(Hz).

式(1)为驱动质点 M 振动位移轨迹的参数形式

为 $W_1 > 0$ 、 $W_2 > 0$ 、 $W_3 > 0$ 时,对其三角变换,得一般形式为

$$\begin{aligned} &\left(\frac{x}{W_1}\right)^2 + \left(\frac{y}{W_2}\right)^2 + \left(\frac{z}{W_3}\right)^2 - \frac{\cos(\beta - \alpha)}{W_1 W_2} xy - \\ &\frac{\cos(\gamma - \beta)}{W_2 W_3} yz - \frac{\cos(\alpha - \gamma)}{W_3 W_1} zx = \\ &\frac{1}{2} [\sin^2(\beta - \alpha) + \sin^2(\gamma - \beta) + \sin^2(\alpha - \gamma)] \end{aligned} \quad (2)$$

式(2)为一空间椭圆曲线,轨迹如图 5 中的以原点 O 为中心的实线椭圆所示.点 O 为质点 M 在未受到驱动器激励时的初始位置.该椭圆轨迹在平面 XOY 、 XOZ 、 YOZ 上的投影分别为图 6 中以点 O_1 、 O_2 、 O_3 为中心的虚线椭圆,表达式分别为

$$\left(\frac{x}{W_1}\right)^2 + \left(\frac{y}{W_2}\right)^2 - \frac{2\cos(\beta - \alpha)}{W_1 W_2} xy = \sin^2(\beta - \alpha) \quad (3)$$

$$\left(\frac{x}{W_1}\right)^2 + \left(\frac{z}{W_3}\right)^2 - \frac{2\cos(\alpha - \gamma)}{W_1 W_3} xz = \sin^2(\alpha - \gamma) \quad (4)$$

$$\left(\frac{y}{W_2}\right)^2 + \left(\frac{z}{W_3}\right)^2 - \frac{2\cos(\gamma - \beta)}{W_2 W_3} yz = \sin^2(\gamma - \beta) \quad (5)$$

对质点 M 运动轨迹式(2)进行空间解析几何分析可知,运动轨迹的空间椭圆在一平面 π 内,该平面过原点 O ,平面表达式为

$$\begin{aligned} &W_2 W_3 \sin(\gamma - \beta)x + W_3 W_1 \sin(\alpha - \gamma)y + \\ &W_1 W_2 \sin(\beta - \alpha)z = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

平面 π 的法向量

$$\begin{aligned} \mathbf{n} &= (W_2 W_3 \sin(\gamma - \beta), W_3 W_1 \sin(\alpha - \gamma), \\ &W_1 W_2 \sin(\beta - \alpha)) \end{aligned} \quad (7)$$

球型转子转动轴与质点 M 运动轨迹所在平面的法向量 $\mathbf{n}$ 平行.

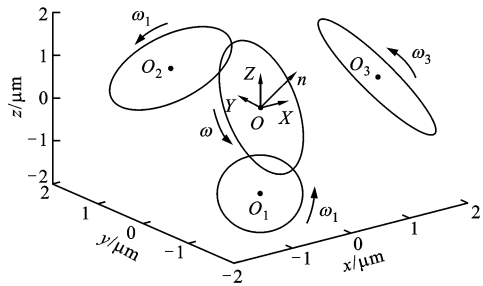


图 5 驱动质点三维运动轨迹

3.2 单方向振动幅值为 0 时驱动足轨迹

根据超声电机驱动原理,要使驱动质点 M 做椭

圆运动,至少要由两个方向的简谐振动合成. 因此,在 X 、 Y 、 Z 三个方向振动幅值 W_1 、 W_2 、 W_3 中,最多只能有一个等于 0. 三个方向振动幅值 W_1 、 W_2 、 W_3 分别为 0 的情况类似,以 $W_1=0$ 、 $W_2>0$ 、 $W_3>0$ 为例进行分析,此时质点 M 运动轨迹为

$$\left(\frac{y}{W_2}\right)^2 + \left(\frac{z}{W_3}\right)^2 - \frac{2\cos(\gamma-\beta)}{W_2W_3}yz = \sin^2(\gamma-\beta) \quad (8)$$

该式与空间椭圆曲线(式(2))在平面 YOZ 上的投影表达式(5)相同. 运动轨迹所在平面 $\pi(x=0)$,即为平面 YOZ .

令 Y 、 Z 两个方向振动相位差 $\phi_1=(\gamma-\beta)$,质点 M 在不同相位差 ϕ_1 情况下的运动轨迹曲线如图 6 所示. 相位差 $\phi_1 \neq n\pi$ 时,驱动足驱动球型转子的转动轴为 X 轴;当相位差 ϕ_1 为 $n\pi+\pi/2$ 时,质点 M 的椭圆轨迹长、短轴与坐标轴重合,各方向位移最大,此时驱动能力最强. 相位差 ϕ_1 在区间 $[0, \pi]$ 或 $[\pi, 2\pi]$ 时,质点 M 的运动方向相反,因此通过调整输入振动相位差,可以控制驱动足的驱动方向. 相位差 ϕ_1 为 $2n\pi+\pi/2$ 或 $2n\pi-\pi/2$ 时,法向量相同,驱动方向相反,转子实现反向旋转.

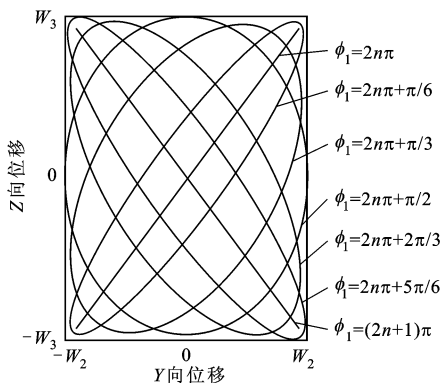


图6 质点 M 在不同相位差 ϕ_1 情况下的轨迹

3.3 两相相位差为 $n\pi$ 的情况

由以上分析及图 6 可知,要使驱动质点作椭圆运动, X 、 Y 、 Z 三个方向振动初始相位 α 、 β 、 γ 的相位差 $\beta-\alpha$ 、 $\gamma-\beta$ 、 $\alpha-\gamma$ 中,最多只能有一个为 π 的整数倍,否则驱动质点运动轨迹为一空间直线,无法驱动转子. 相位差 $\beta-\alpha$ 、 $\gamma-\beta$ 、 $\alpha-\gamma$ 分别为 0 的情况类似,不妨以 $\beta-\alpha=n\pi$ 、 $\gamma-\beta \neq n\pi$ 、 $\alpha-\gamma \neq n\pi$,即 $\gamma \neq \beta = n\pi + \alpha$ 为例进行分析,此时质点 M 运动轨迹为

$$\left(\frac{x}{W_1}\right)^2 + \left(\frac{y}{W_2}\right)^2 + \left(\frac{z}{W_3}\right)^2 \pm \frac{1}{W_1W_2}xy - \frac{\cos(\gamma-\beta)}{W_2W_3}yz - \frac{\cos(\alpha-\gamma)}{W_3W_1}zx =$$

$$\frac{1}{2}[\sin^2(\gamma-\beta) + \sin^2(\alpha-\gamma)]$$

$$\left(\frac{x}{W_1}\right)^2 + \left(\frac{y}{W_2}\right)^2 + \left(\frac{z}{W_3}\right)^2 \pm \frac{1}{W_1W_2}xy - \frac{\cos(\gamma-\alpha)}{W_3}z\left(\frac{x}{W_1} \pm \frac{y}{W_2}\right) = \sin^2(\gamma-\alpha) \quad (9)$$

运动轨迹所在平面 π 为

$$W_2W_3\sin(\gamma-\beta)x + W_3W_1\sin(\alpha-\gamma)y = 0$$

$$x \pm \frac{W_1}{W_2}y = 0 \quad (10)$$

该平面法向量

$$\mathbf{n} = (W_2W_3\sin(\gamma-\beta), W_3W_1\sin(\alpha-\gamma), 0) = \left(1, \pm \frac{W_1}{W_2}, 0\right) \quad (11)$$

由式(10)、式(11)可知,质点 M 运动轨迹所在平面 π 垂直于平面 XOY ,其法向量 $\mathbf{n}$ 位于平面 XOY 内,如图 7 所示,图中虚线直线与椭圆为运动轨迹曲线在平面 XOY 、 XOZ 、 YOZ 上的投影.

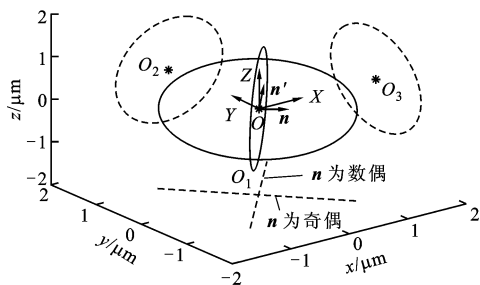


图7 转轴在平面 XOY 内不同 n 值情况的驱动质点轨迹

在平面 XOY 中,向量 $\mathbf{n}$ 与 X 轴的夹角 θ 为

$$\tan\theta = \pm \frac{W_1}{W_2} \quad (12)$$

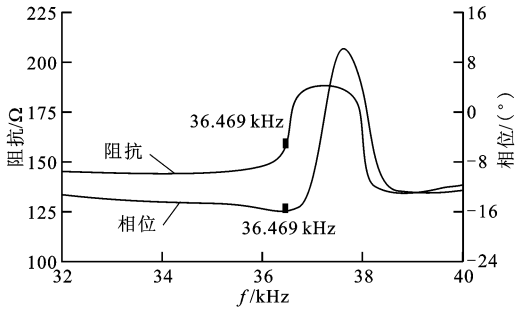
n 为奇数时,式(12)取“+”,球型转子转动轴在平面 XOY 的第一、三象限内. n 为偶数时,式(12)取“-”,球型转子转动轴在平面 XOY 的第二、四象限内.

4 实验

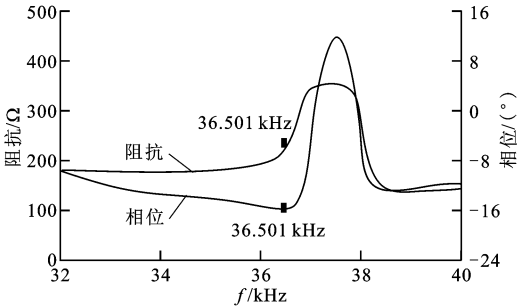
4.1 换能器阻抗特性测试

经分析设计研制了如图 1 所示的超声电机样机. 使用阻抗分析仪(Agient 4249A Precision Impedance Analyzer)对换能器的纵振、弯振陶瓷阻抗特性进行检测,扫描起始频率为 32 kHz,截至 40 kHz. 图 8 所示为其中 2 组纵振陶瓷阻抗特性测试曲线,图 9 所示为其中 2 组弯振陶瓷阻抗特性测试曲线. 测得的各组曲线走向比较接近,各组陶瓷激励

的阻抗特性一致性较好,在 100 Ω 附近各换能器纵振、弯振谐振频率最高为 36.509 kHz,最低频率为 36.388 kHz,相差 121 Hz,频率误差小于 0.33%。

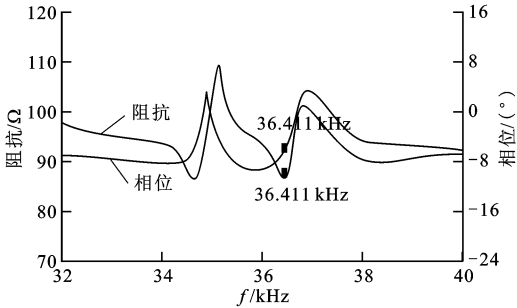


(a)纵振陶瓷 a 阻抗特性曲线

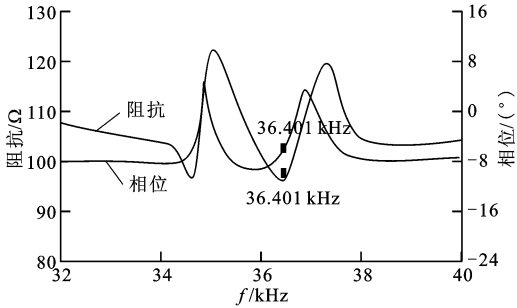


(b)纵振陶瓷 b 阻抗特性曲线

图 8 纵振阻抗特性曲线



(a)弯振陶瓷 a 阻抗特性曲线



(b)弯振陶瓷 b 阻抗特性曲线

图 9 弯振阻抗特性曲线

4.2 电机性能测试

为了验证纵弯复合型多自由度超声电机理论与

设计的正确性,对电机转子绕 X、Y、Z 轴旋转情况进行了实验.测试中电机激励频率为 36~37 kHz,电机稳定运转的谐振频率在 36.10~36.80 kHz 区域,工作频率范围为 700 Hz。

对弯振陶瓷和 Y 轴纵振陶瓷同时输入相位相差 90°交流电压时,转子绕 X 轴旋转,两路激励电压相位相为-90°时,转子反向旋转。

对弯振陶瓷和 X 轴纵振陶瓷同时输入相位相差 90°交流电压时,观察到转子绕 Y 轴旋转,两路激励电压相位相为-90°时,电机实现反转。

X 轴纵振陶瓷和 Y 轴纵振陶瓷同时输入相位相差 90°交流电压时,转子绕 Z 轴旋转,两路激励电压相位相为-90°时,转子反向旋转。

电机输出性能指标为:绕 X、Y 轴旋转时,输出转矩为 0.97 N·m,最高转速可达 11 r/min;绕 Z 轴旋转时,输出转矩为 0.27 N·m,最高转速可达 66 r/min。

弯振陶瓷输入 140 V 交流电压,X 轴纵振陶瓷和 Y 轴纵振陶瓷输入的电压从 0~200 V 逐渐加大电压进行激励,三路电压初始相位分别为 0°、90°和 90°,转子轴平行于平面 XOY,与 X 轴夹角为-45°,此时转子转速低于绕三个坐标轴旋转时的转速,最高为 8.1 r/min。

5 结 论

本文研制了一种新型结构的多自由度超声电机,定子为十字正交型夹心式换能器,由单一驱动足实现多自由度驱动,克服了通常由多个独立换能器驱动的多自由度超声电机,各个驱动足之间相互干涉的缺点.利用模态分析,通过调整换能器尺寸,简并了纵振弯振频率,建立了驱动足轨迹方程并分析了典型驱动状态下,驱动足的运动轨迹,实验验证了轨迹分析的正确性。

参考文献:

[1] MORITA T. Review miniature piezoelectric motors [J]. Sensors and Actuators,2003,103(3):291-300.
[2] 李有光,陈在礼,陈维山,等. 柱面驱动新型行波超声电机的研究[J]. 西安交通大学学报,2008,42(11): 1391-1394.
LI Youguang, CHEN Zaili, CHEN Weishan, et al. Novel traveling wave ultrasonic motor[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008,42(11):1391-1394.
[3] 陈维山,赵学涛,刘军考,等. 压电超声电机发展现状及研究方向[J]. 电机与控制学报,2006,10(5): 498-

- 502.
- CHEN Weishan, ZHAO Xuetao, LIU Junkao, et al. A survey and current research of ultrasonic motor[J]. *Electric Machines and Control*, 2006, 10(5): 498-502.
- [4] LI Youguang, CHEN Zaili. Phase shifted ZVT-PWM high-frequency full-bridge inverter with auxiliary resonant nets for driving ultrasonic motor[C] // *Proceedings of the 8th International Conference on Electrical Machines and Systems*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2005: 1847-1850.
- [5] HU M, DU H, LING S F. A piezoelectric spherical motor with two degree-of-freedom[J]. *Sensors and Actuators: A*, 2001, 94(1/2): 113-116.
- [6] TAKEMURA K, OHNO Y, MAENO T. Design of a plate type multi-DOF ultrasonic motor and its self-oscillation driving circuit[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2004, 9(3): 474-480.
- [7] 赵学涛. 纵弯复合振动模态球型超声电机的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学机械工程学院, 2007.

(编辑 杜秀杰)