

二自由度行波型超声波电机的研制

傅 平¹, 沈润杰², 帅光举³, 郭吉丰²

(1. 闽江学院物理学与电子信息工程系, 福州 350108; 2. 浙江大学电气工程学院, 杭州 310027;

3. 浙江万马集团电子有限公司, 杭州 311300)

摘 要: 二自由度行波型超声波电机是一种新型多自由度超声波电机,其电机结构较复杂和实现相对困难,但其又具有独特的优点。从二自由度行波型超声波电机的驱动机理和基本结构出发,阐述此类电机所需要解决的一些基本问题,并就电机的结构实现、驱动球转子的最佳定子结构以及调谐问题进行了分析和介绍,具体提出了对心对中调节机构、外缘大倾角内缘线接触的行波定子、以及微调定子外缘倾角的调谐方法。研制样机的球转子直径为45mm,定子直径为30mm,实现的堵转力矩为119mNm,空转转速12r/min,且各方向运转平稳,输出性能比较一致,为多自由度行波型超声波电机的优化设计、性能提高和控制等奠定了一定基础。

关键词: 行波型超声波电机; 二自由度; 球电机; 运行机理; 结构设计

中图分类号: V242.44 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1328(2009)01-0367-06

DOI: 10.3873/j.issn.1000-1328.2009.00.066

0 引言

多自由度电机又称球电机,由于采用电磁原理的电多自由度电机因结构复杂和出力小等因素,使得多自由度电机的研究受阻,尽管其研究开始较早,但进展不大,而超声波电机既可以实现多自由度驱动,而且还保留了单自由度超声波电机时的低速大力矩和结构简单等优点,从90年代中期开始,国内外已有许多研究单位对多自由度电机的研究自然而然地转向采用超声波电机实现驱动^[1]。

经近十年的研究,已研制成若干种多自由度超声波电机,我们提出了一种多自由度超声波电机的分类方法^[1],即按定转子的接触方式和电机定子形状的特征,把多自由度超声波电机分为行波型^[2-4]、驻波型^[5,6]、板状^[7]和柱状^[8-10]四种。这四种球电机各有其优缺点,从力矩性能来看,行波型、驻波型和柱状的超声波电机输出力矩较大,而板状的相对较小,但其制作工艺相对简单;从寿命和可靠性角度分析,除行波型的局部面接触外,其他三种电机以点或线接触为主,寿命相对较短。而多自由度行波型超声波电机就目前的应用前景而言,最为看好,这主要是由于行波型超声波电机的制造技术比较成熟,而

且其结构简单(形状类似球形)、夹持力大和低速大力矩(其转速一般在每分钟几十转以下,许多场合可直接驱动)等特点,可用于各种仪器、天线、机器人(肩腕关节,如喷漆柔性手腕等,或球形机器人)、CCD云台等驱动,特别是可结合空间技术的需求,开发空间机器人、月球车等各种空间探测器需要的多自由度驱动机构。

本文首先分析了二自由度行波型超声波电机的工作原理和基本结构,然后提出需要解决的一些基本问题,其次,介绍了定子对心对中机构和电机结构实现,再次提出并分析二种定子结构以及调谐方法,最后介绍了研制样机的性能和特点。

1 基本机理、结构和基本问题

单自由度超声波电机的转子是圆环状的,若采用球形转子,用二个行波定子相对驱动球形转子,如图1所示的定子1和3,球转子就能绕X轴旋转。同样原理,与这对行波定子相垂直的方向也安装一对定子,使得球转子绕Y轴旋转。这样,通过两对定子的复合作用,可使球转子全方位转动,即具有二个自由度。

但实际情况远不是如此简单,由于两对行波定

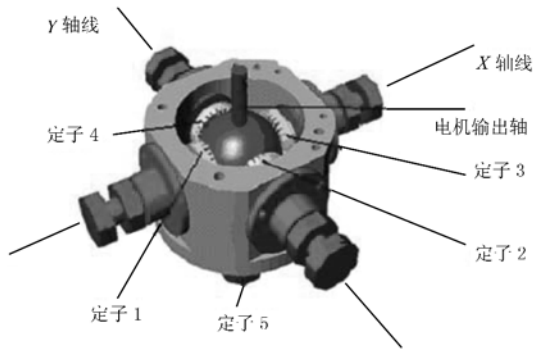


图 1 二自由度行波型超声波电机驱动原理和基本结构

Fig.1 Driving principle and structure of 2DOF USM

子的压紧力是相同的,可设球转子半径为 R , 二对行波定子大小一致,半径为 r ,可设定子与球转子的接触圆周半径为 r 。若考虑一对定子工作,另一对定子不工作,由于行波产生行波驱动转子时的摩擦系数 μ_d ,比定子(不动)时的定转子间的摩擦系数小,在转子静止时相当于静摩擦系数 μ_s 。这样,因为二对定子对转子的压紧力是相同的(或基本接近),设压紧力为 F ,电机通电驱动瞬间,驱动那对定子产生的驱动力矩是 $F r \mu_d$,而另对定子则产生阻力矩为 $F R \mu_s$,显然有

$$F r \mu_d < F R \mu_s \quad (1)$$

表明,此时的转子是无法驱动的,为实现球转子旋转,其办法是,使另一对“不动”的定子“动”,即施加相位差零度的电信号,使定子产生驻波振动,这时,这对驻波振动的定子与球转子间的摩擦系数会变得很小,设为 μ_v ,相当于“振动减摩”,无法阻碍另一对定子的驱动,即实现

$$F r \mu_d > F R \mu_v \quad (2)$$

反过来,要实现另一对方向的转动也一样。由上式可见,对行波定子的半径也有一定制约,即定子半径不能太小。

根据上述分析,这种二自由度行波型超声波电机的二自由度转动的关键是实施“相位差”控制。如果两对定子同时工作,则转子的转动方向是两个定子驱动的合成,通过改变各对定子的相位差调整定子的转速大小和方向,也使得合成的转子转动具有全方位。

针对上述结构的电机,二自由度行波型超声波电机的基本问题是:

(1) 四个定子与球转子如何对心,每对定子的轴线如何对中,以及球转子的重力如何克服等问题,

即电机结构的实现问题;

(2) 与圆环状的单转子电机不同,对于球转子最佳驱动的行波定子结构问题,以及如何实现四个定子的谐振频率一致的调谐问题;

本文主要针对以上问题作一些叙述。

2 对心对中调节机构

因为一个行波定子就确定了球转子位置,这时既要保证其他三个定子也与球转子很好地接触,也要保证对心,保证定子与球转子在接触圆周上压紧力的一致性和每对定子对球转子压紧力的一致性,又要保证定子轴线对中,以及相互垂直相交。因为电机性能对这些误差很敏感,否则电机很难出力,这也是这种电机研制的困难之处。

如图 2 所示,二自由度超声波球电机主要由四个定子、球转子和电机框架机体等组成。首先,为保证四个定子的对心和对中精度,电机框架机体必须一次成型,保证有足够的精度,电机框架机体是整个电机的机壳,电机的其它部分如定子、转子、姿态测量机构等都可安装在上面。

其次,为了使球转子运转时比较平稳,就必须有对心调整机构,国外的电机安装时,采用滑块结构调心,实验发现其效果不是很理想。这是由于滑块垂直相交,而调整量又十分小,很难调整。现在采用的对心调整机构,其调整过程如下:首先把装好的 5 个定子(这里还有一个处于底座的定子 5,其结构与其他四个电机完全一样)安装在框架机体上,然后用紧定螺钉把它们固定连在一起(定子轴向仍可移动,但不能转动),随后在压紧螺栓和定子间放入有橡胶弹性体,这橡胶弹性体有一定的自适应能力,可使定子很好适应球转子。其次,并把球转子装入放入定子 5 中,通过调节定子的压紧螺栓调整其高度,使球转子能正好位于四个定子的中心。随后,根据运转情况,一对对地调节定子,使每对定子最佳地驱动球转子,最后,必须用锁紧螺母锁紧各个定子。

电机底座也安装一环状定子,但其作用承担球转子自重,并使球转子定心(保证几何中心),保证其余四个定子安装方便,球转子中心高度可通过压紧螺栓调节。电机工作时给这定子施加同相位的交流电,使此定子产生驻波,这样是使球转子产生一定的悬浮力,并使球转子转动时摩擦阻力最小化。

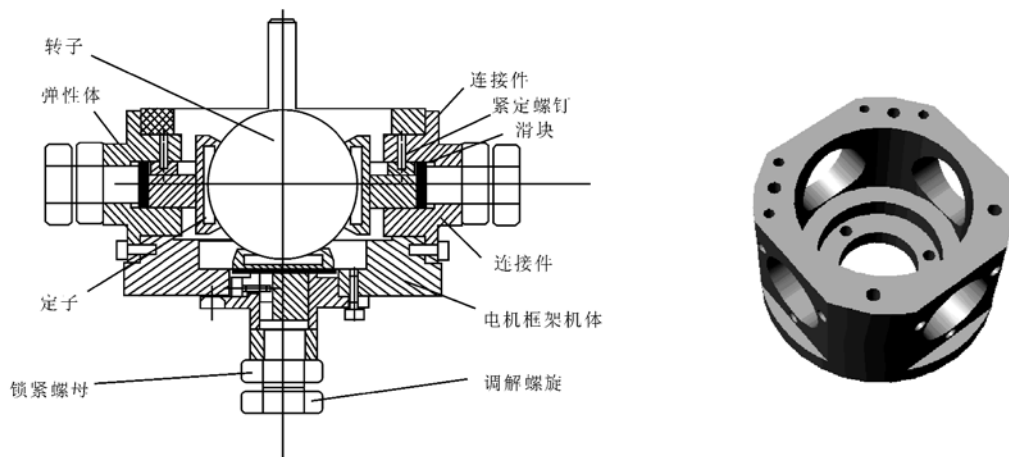


图 2 二自由度球形超声波电机结构图与电机框架机体结构
 Fig.2 Structure diagram of 2DOF USM and Frame structure diagram of USM

3 定子设计

单自由度行波超声波电机的定子与转子是平面接触的,由于球转子是球形的,其接触面的力传递方式等有明显区别,所以定子的设计是关键。为此,我们采用线接触的定子,接触区轴截面是一很小的接触区域,约 1mm 左右,接触区是在定子内缘,外缘采用大倾角(如图 3(a))。研制的样机表明:对于采用线接触的定子,球转子受力比较均匀,球面受力均匀,转速快而且平稳。其有限元分析如图 3(b)所示,从图中可见,定子的最大振幅在内缘。

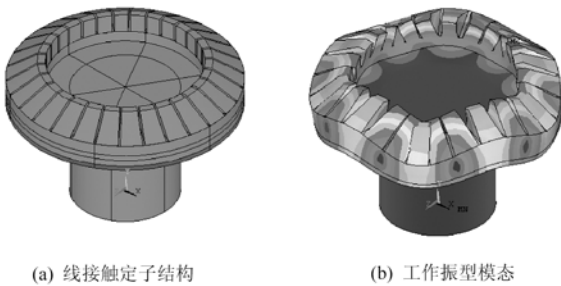


图 3 定子的结构示意图和有限元模型

Fig.3 Structure and Finite element model of stator

从性能上看,采用线接触的定子时,由于外缘大倾角使齿高降低,模态频率升高,同时,大倾角使电机振动能量传向定子内缘,促进定转子之间的能量传递,同时很好承受球转子对定子的压紧力,而且内缘的接触区较小,噪声很小,这时电机性能较稳定。另外,有限元分析表明,定子工作频率临近的模态频率相差较大,模态十分清晰,不容易出现模态混迭,

也就不易出现噪声。

此外,由于球转子采用钢球,在球转子表明粘涂摩擦材料有一定难度,我们通过粘涂法把摩擦材料粘涂在定子接触面上,其效果不错。

研制的定子性能较好,其单定子驱动球转子情况下调频调相的特性如图 4 所示,电机定子外径为 30mm,内径为 20mm,球转子的转速可达到 650 r/min,定子工作频率的带宽有 600Hz 左右。另外从相位差特性上分析,电机基本无“死区”,只有在 0~10°范围内电机处于停转状态,这点较之传统单自由度电机约有 20 度的“死区”相比,有很大的提高。

4 调谐

二自由度行波型超声波电机是由 5 个相同定子构成,由同一工作频率的驱动电源驱动,为了保证球转子可以运行平稳,必须使 5 个定子的谐振频率基本一致,即调谐问题,而一般行波定子的工作频率带宽较窄,一般为几百 Hz,而且在制作和安装等工艺过程存在较大的分散性,无法使 5 个定子的谐振频率一致。

针对前述定子,可以通过改变定子外缘倾角角度,使各个定子的谐振频率接近一致,即在电机定子加工完成和测试谐振频率后再车削倾角度(微调),直至谐振频率达到要求为止。

经过实验微调,4 个定子的谐振频率基本接近,大约为 51.5kHz,分别为 51.1、51.4、51.3 和 51.3kHz。



图 4 单定子的球转子转速与频率、相位差的特性曲线

Fig.4 Frequency and phase-difference Characteristics of stator

5 电机样机和性能

为 22.5 mm, 定子半径为 15 mm, 激励电压幅值为 320V, 工作频率为 51.5kHz。

研制的样机如图 5 所示, 其参数为: 球转子半径

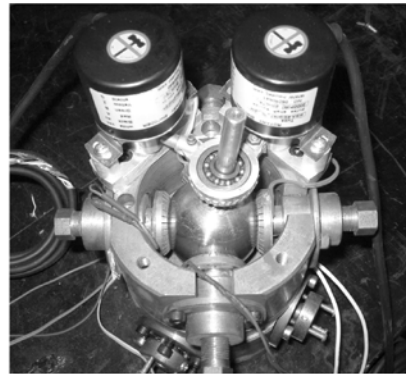
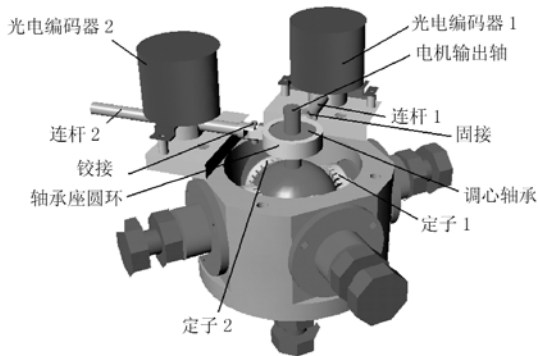


图 5 两自由度球面超声波电机与运动姿态测量机构

Fig.5 Connecting mechanism of 2DOF USM

当二对定子一起工作时(即耦合时), 如图 6 所示(图中曲线 1 和 2 分别表示 X 轴和 Y 的力矩), 实现的堵转力矩分别是绕 X 轴的 119mNm 和绕 Y 轴

的 80mNm, 空转转速分别为 X 轴的 12r/min, 和 Y 轴的 8r/min。

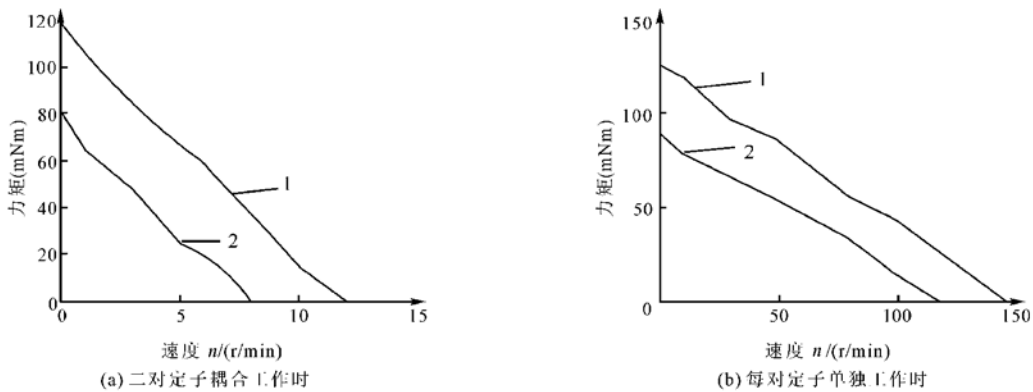


图 6 电机的机械特性

Fig.6 Characteristics of USM

分别为绕 X 轴的 115mNm 和 Y 轴的 83mNm, 空转转

速分别为绕 X 轴的 150r/min 和 Y 轴的 120r/min。样机表明实现的力矩尚可, 两对定子的驱动不

是很一致,各对定子的驱动机械特性有一定的差距。两对定子耦合状态下的堵转力矩与分别工作时的十分接近,而耦合状态下的空转转速大幅下降,这与前面描述的机理完全一致,表明阻力矩与定转子相对速度成正比,当堵转时,其阻力矩为零,当相对速度增大时,阻力矩增大。

6 二自由度超声波电机的运动位姿控制

要想实现球转子二自由度运转,就必须要求二相激励电压的相位差可以调节。对于每个定子来说,其二相激励电压的相位差为 90° 。这样,通过改变定子行波表面运动的速度,就可以实现改变输出力矩和速度,从而实现球转子的位置控制。

根据二自由度超声波电机的控制思想,其控制框图如图 7 所示。系统中采用基于 DSP 超声波电机控制器。由 DSP 控制器产生可以驱动四个定子的二相相同频率、相位差可变的高频驱动信号,然后通过 DSP 控制使四路驱动信号中的任意二路相位差为 90° 。

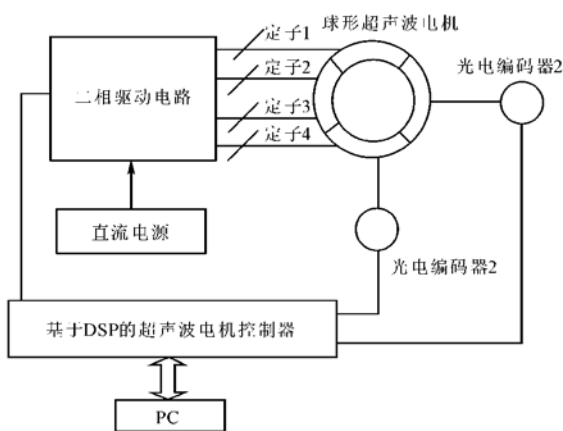


图 7 电机驱动控制系统的原理图

Fig.7 Control and drive system schematic diagram for USM

根据二相输入电压相位差的不同组合,可以实现定子表面行波的不同速度,从而改变球转子的位置。由光电编码器检测输出的信号,经过 DSP 控制器处理后可以得到球转子在平面上转过的角度,再经由相应的控制算法,就可以实现 DSP 控制器对二自由度超声波电机进行控制。

为检测球转子的运动姿态,采用了调心轴承和连杆的测量结构(已申请了专利),结构原理示意和实际结构分别如图 5 所示。在球转子上安装输出轴

(其轴线通过球心),输出轴上装有能两自由度回转的调心轴承,在调心轴承的轴承座圆环上与各自光电编码器相联的连杆连接,两连杆与调心轴承在同一平面内,球转子转动时,调心轴承也随之向外移动并且两自由度转动,其轴承中心仍在两连杆组成的平面内。采用了上述运动姿态测量机构,可把球转子姿态转化为两个光电编码器的转角,也把球转子的运动姿态转化为测量机构平面内调心轴承中心的位置及其相应运动轨迹。

通过 PI 控制算法改变加到二对定子上电压的相位差,从而改变二对定子的速度和运动方向,就可以控制输出轴的运动轨迹,系统中采用了逐点插补法完成对转子输出轴的运动姿态控制。在实验中,要求电机分别从原点沿直线运动到目标位置 $(180, 180)$, $(-190, 180)$, $(-190, -180)$, $(180, -180)$, 单位为一个光电编码器的脉冲,每个脉冲对应的角度为 0.045° 。最后得到的结果如图 8(a)所示,电机到达实际位置时坐标分别为 $(182, 183)$, $(-193, 182)$, $(-194, -183)$, $(183, -183)$, 与目标位置的最大相对误差是 2.1%。

另外,要求电机分别沿四边形运动,四边形的位置为 $(180, 0)$, $(0, 180)$, $(-335, 0)$, $(-180, 0)$, 实际电机运动轨迹如图 8(b)所示,电机到达实际位置时坐标分别为 $(182, 3)$, $(2, 183)$, $(-338, 2)$, $(-184, 2)$ 。

7 结论

通过研制表明二自由度行波超声波电机具有性能稳定、结构紧凑等优点,本文所提结构和实现方法为下一步多自由度行波型电机的结构优化、性能提高和控制提供了基础。

二自由度行波型超声波电机的结构实现较困难,必须保证五个定子能一致地对心和保证每对电机的轴线对中一致,否则对电机性能影响很大,使用本文所提结构较好地解决了些问题。

文中提出的外缘大倾角和内缘线接触定子不但很好地驱动了球转子,而且方便地实现了调谐。

另外,由图 2 所示,电机底部承重的定子实际也可作为驱动定子,可充分利用球转子的自重和其他定子产生的压紧力,驱动球转子产生另一个方向的转动,实现这一电机的三自由度回转,其实现方式和驱动控制以及电机的性能提高等这些问题有待深化。

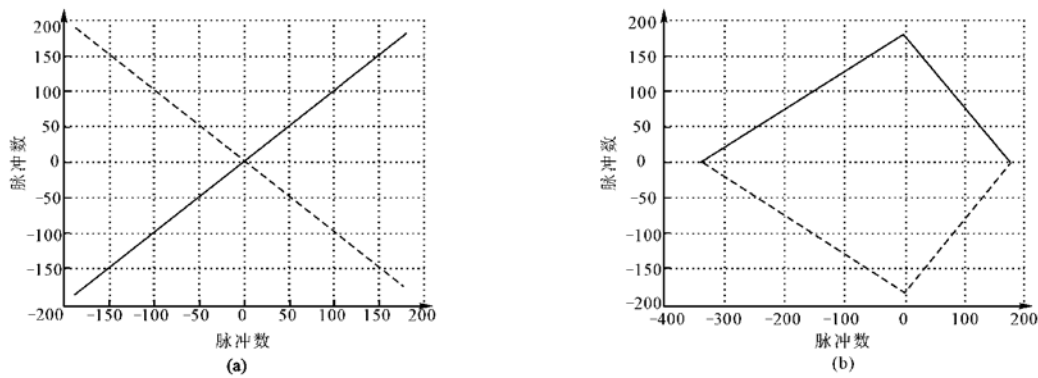


图 8 电机运动轨迹图

Fig. 8 Trajectory of motion by USM

参考文献:

- [1] 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 Ji-feng, FU Ping. The research progress of multi-degree of freedom ultrasonic motor[J]. Adv. Tech. of Elec. Eng. & Energy, 2005, 24(2): 65-68(in Chinese).]
- [2] Shigeki T, Zhang Guoqiang, Osamu M. Development of new generation spherical ultrasonic motor[C]//Proceedings of the 1996 IEEE Inter. Conf. on Robotics and Automation. Minneapolis, Minnesota, April 1996: 2871-2876.
- [3] Toyama S. Development of an actuator for a robotic manipulator with ultrasonic motor-2nd development of prototypal spherical ultrasonic motor[J]. 日本ロボット学会志, 1995, 13(2): 235-241.
- [4] Purwanto E, Shigeki Toyama. Development of an ultrasonic motor as a fine-orienting stage[J]. IEEE transactions on Robotics and Automation, 2001, 17(4): 464-471.
- [5] 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): 1-4. [JIN Long, HU Min-qiang, GU Ju-ping, 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): 1-4(in Chinese).]
- [6] 刘俊标, 黄卫清, 赵淳生. 圆柱-球体三自由度超声电机运动机理研究[J]. 机械科学与技术, 2002, 21(4): 609-611. [LIU Jun-biao, HUANG Wei-qing, ZHAO Chun-sheng. Study on the motion mechanism of a cylinder-sphere ultrasonic motor with three-degree of freedom[J]. Mechanical Science and Technology, 2002, 21(4): 609-611(in Chinese).]
- [7] Takemura K, Maeno T. Design and control of an ultrasonic motor capable of generating multi-DOF motion[J]. IEEE/ASME Trans. on Mechatronics, 2001, 6(4): 499-506.
- [8] 顾菊平, 金龙, 胡敏强, 等. 圆柱定子三自由度球转子超声波电机的轨迹运动方程[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(10): 154-158. [GU Ju-ping, JIN Long, HU Min-qiang, et al. Kinetic equation locus for three-degree of freedom spherical ultrasonic motor with cylinder stator[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(10): 154-158(in Chinese).]
- [9] 金龙, 顾菊平, 胡敏强, 等. 圆柱定子三自由度球转子超声波电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 Ju-ping, HU Min-qiang, et al. Driving and control for three-degree of freedom spherical ultrasonic motor with cylinder stator[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(9): 163-166(in Chinese).]
- [10] 莫岳平, 胡敏强, 金龙, 等. 双转子柱体超声波电机运行机理与实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(1): 84-87. [MO Yue-ping, HU Min-qiang, JIN Long, et al. Operation mechanics and experimental research of cylindrical ultrasonic motor with double rotors[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(1): 84-87(in Chinese).]
- [11] 莫岳平, 金龙, 胡敏强, 等. 短柱型超声波电机两相振动频率的简并[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(8): 115-118. [MO Yue-ping, JIN Long, HU Min-qiang, et al. Two phase vibration frequency degeneration of short cylindrical type ultrasonic motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(8): 115-118(in Chinese).]
- [12] 金龙, 褚国伟. 超声波电机速度与定位控制系统[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(1): 131-136. [JIN Long, CHU Guo-wei. The speed and position control system of ultrasonic motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(1): 131-136(in Chinese).]
- [13] Purwanto E, Shigeki Toyama. Control method of a spherical ultrasonic motor[C]// Proceedings of the 2003 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics(AIM), 2003: 1321-1326.

作者简介: 傅平(1974-), 男, 博士, 从事行波型超声波电机及其控制方面的研究。

通信地址: 闽江学院物理学与电子信息工程系(350108)

电话: (0591)22678350

E-mail: shirkl@163.com

(下转第 377 页)