

空间用二自由度球形行波型超声波电机

郭吉丰¹, 胡锡幸¹, 傅 平²

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

摘 要: 介绍了一种超声振动驱动的二自由度行波型超声波球电机的结构和机理, 给出了其研制过程中若干关键问题的解决方案, 阐述了实现其运动位姿控制采用的结构及控制方式, 最后探讨了此类电机在空间机构的若干应用及所需解决的一些问题。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 120 mNm, 空转转速 12 r/min, 且各方向运转平稳, 输出性能比较一致。该电机可用于各类空间机构。

关键词: 二自由度电机; 行波型超声波电机; 相位差控制; 运动姿态控制

中图分类号: V242.44 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1328(2009)01-0362-05

DOI: 10.3873/j.issn.1000-1328.2009.00.065

0 引言

球电机一直是电机研究者的梦想, 自然界中许多现象是多自由度驱动的, 如人的肩、腕和髌关节, 眼球也是二自由度转动的。随着科技的发展, 一些精密装置对运动的要求越来越高, 单自由度驱动已经无法满足要求。若每个自由度的运动都由一台单自由度电机来完成, 这必然造成运动部件机构复杂、体积庞大、笨重和动态性能差。

球形超声波电机具有结构简单、低速大力矩、响应快、精度高和适用于空间环境等特点, 得到了迅速发展^[1-4]。现已成功地应用于腹腔手术、假肢上的肩腕和膝关节、二自由度的 CCD 云台驱动和机器人的眼球驱动^[5,6]。

本文提出了一种多自由度行波型超声波电机的结构, 并实现了二自由度行波型超声波电机及其运动位姿控制, 最后探讨了其在空间机构的若干应用及所需解决的一些问题。

1 行波型超声波球电机的原理和结构实现

1.1 驱动原理

单自由度超声波电机的转子是圆环状的, 若采用球形转子, 用空间上相对的一对行波定子驱动球形转子, 如图 1 所示的定子 1 和 3, 球转子就能绕 X 轴旋转。同理, 与这对行波定子相垂直的方向也安装一对定子, 如图中的定子 2 和 4, 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。这种多自由度行波型超声波电机的驱动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表面行波速度, 来使得合成的转子转动具有全方位。

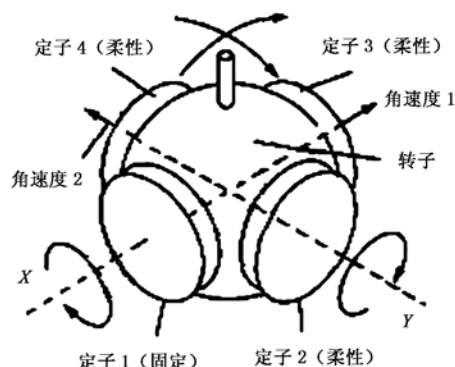


图 1 二自由度球形行波型超声波电机的驱动机理

Fig. 1 Driving mechanism of 2DOF USM

1.2 自由度行波型超声波电机的结构实现

对于上述原理驱动的二自由度行波型超声波电机, 其结构实现上要考虑几个问题: (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; (2) 与圆环状的单转子超声波电机不同, 对于球转子最佳驱动的行波定子结构; (3) 定转子结构和几何尺寸的确定, 即电机结构参数的优化设计; (4) 如何实现四个定子的谐

振频率一致的调谐问题。

自适应对心调整机构。行波定子的振动振幅一般只有几个微米,显然定转子要通过这种振动产生驱动力对电机加工的精度有很高要求。电机性能对机构的误差很敏感,否则电机很难出力。另外,从理论分析,因为一个行波定子就确定了球转子位置,这时又要保证其他三个定子也与球转子很好地接触,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。这也是这种电机研制的困难之处,单纯提高加工精度根本无法保证驱动要求。保证四个定子与球形转子之间的压紧力都能通过球转子的球心,这是关键之一。为此,我们提出了一种行波定子能自适应地与球形转子对心的调整机构,如图 2 所示,通过螺栓压紧弹簧调整定子与转子的压紧力,调整好后用紧定螺母固定,其压紧力方向始终经过钢珠球心,这样保证了预压力的均匀。而定子可绕钢球球心任意转动, O 形圈保证足够小的转动范围,其绕自身轴线的转动通过定位销约束,这样电机在运行过程中,定子能自适应地调整姿态以使内缘紧贴球转子表面,使每个定子自动对心(对球转子的球心)和每个定子的接触圆周均匀地接触球转子。此机构可使定子绕钢珠转动 3-5 度左右。

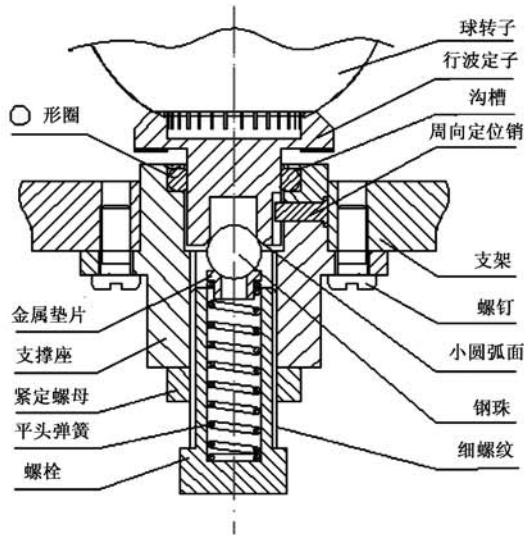


图 2 适应调心调整机构
Fig.2 Structure of adjusting center

定子结构。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,其接触面的力传递方式与单自由度电机有明显区别,所以定子结构是关键。为此,进行了多方案比较,这里给出较

好的一种外缘大倾角内缘接触的定子,如图 3(a)所示,定子的有限元分析结果如图 3(b)所示,定子的最大振幅在内缘,通过研制的样机表明,这种定子有以下几个优势:

从加工和安装角度看,定子加工和安装都相对容易,另外,球转子受力可以比较均匀,而且方便实现粘涂摩擦材料在定子上表面的内圈;

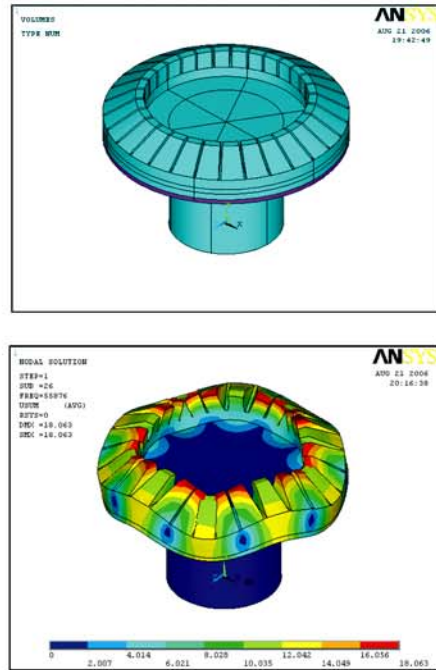


图 3 适合球面驱动的行波定子
Fig.3 Traveling-wave stator fitting spherical driving

从振动能量传递和转换效率上看,由于外缘大倾角使齿高降低,便模态频率提高和工作模态清晰。同时,外缘大倾角使电机振动能量传向定子内缘,提高内缘振动振幅,促进定转子之间的能量传递和电机换能效率。另外,外缘大倾角也较好承受球转子对定子的压紧力(这时的压紧力通过球转子的法线),容易提高电机的能量转换效率。而且内缘的接触区较小,无噪声。转速快而且平稳,采用单定子球驱动时,接触内径为 20mm,接触区(线)宽度约 0.4mm,球转子的空转转速可达 650 r/min,力矩为 0.7Nm,较之传统的一般定子的转速大得多,定子工作频率的带宽有 600Hz 左右(也较一般单自由度超声波电机宽)。另外从相位差特性上分析,只有在 0~10°范围电机处于停转状态,这点较之传统单自由度电机约有 20 度的死区相比,减小了电机死区范围。

定子调谐。电机工作时,要求四个驱动定子的的工作频率是一致的,所以必须使四个定子的谐振频

率也基本一致,即调谐问题。而一般行波定子工作频率带宽较窄,为 500Hz 左右,在制造过程中因加工、压电材料粘接等原因,工作频率存在较大的离散性,无法一次性使四个定子的谐振频率一致。通过适当改变定子的外缘倾角角度,可以使各个定子的谐振频率接近一致,即对制作完成后的定子经谐振频率测试,对谐振频率小的定子车削倾角角度(微调),直至谐振频率达到一致要求为止。实际研制的定子谐振频率之差可控制在 100Hz 以内。

电机优化结果及性能分析。研制的电机样机如图 4 所示,球转子可以用钢球,亦可采用密度较小的如氮化硅和氧化铝等材料制成的高精度陶瓷球。研制的样机的球转子半径为 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。图 5 为样机机械特性,图中曲线 1 和 2 分别表示绕 X 轴和绕 Y 轴的机械特性曲线。X 轴和 Y 轴的堵转力矩分别为 120mNm 和 80mNm, X 轴和 Y 轴的空转转速分别为 12 r/min 和 8 r/min。

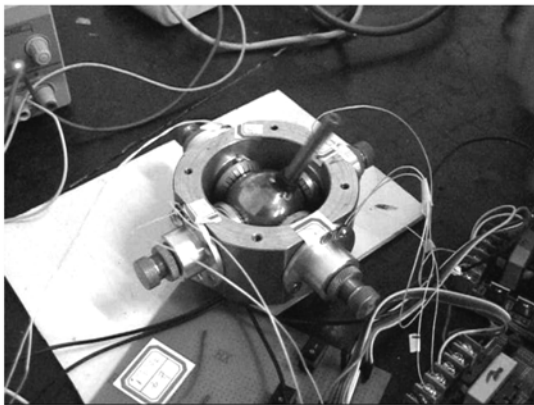


图 4 研制的 2 自由度超声波电机
Fig.4 Developed of 2DOF USM

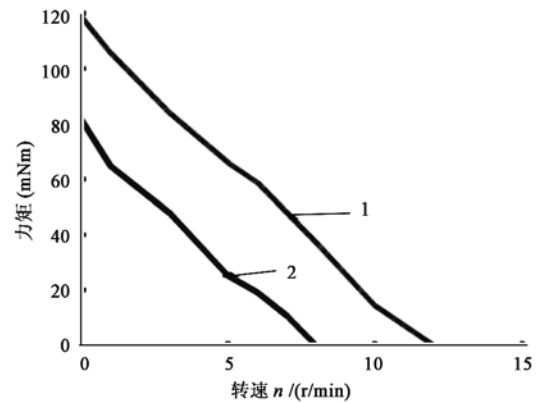


图 5 二自由度行波型超声波电机机械特性
Fig.5 Mechanical characteristics of 2DOF USM

6 所示。由 DSP 控制器产生可以驱动每个定子的两相频率相同、相位差可变的高频驱动信号。驱动信号经过驱动电路和电感匹配,输入到二自由度超声波电机的四个定子。根据两相输入电压相位差的不同组合,可以改变四个定子表面行波速度的大小和方向,从而改变球转子的速度。由光电编码器输出的信号,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。

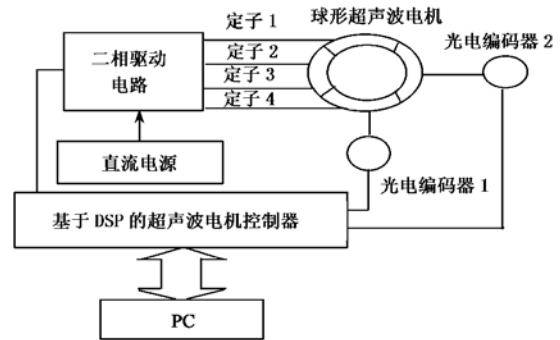


图 6 电机驱动控制系统的原理图
Fig.6 Principle of driving control system

2 二自由度超声波电机的运动位姿控制

二自由度球电机的驱动控制电源。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。这样,通过改变定子表面行波的速度,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。由上面的分析可以知道,二自由度超声波电机驱动和控制系统应该满足下面要求:① 每相驱动信号的电压幅值、频率、相位差可调;② 系统驱动频率在 20-70kHz 之间可调;③ 与超声波电机的容性负载匹配;④ 具有速度、位置反馈控制功能。

基于 DSP 的二自由度超声波电机控制框图如图

运动位姿检测机构和方法。球转子的二自由度运动姿态可由二对行波定子驱动决定,通过控制各对定子表面行波速度的大小和方向,可使球形转子在各个方向转动,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,其结构原理如图 7 所示。在球转子上安装输出轴(其轴线通过球心),输出轴上装有能二自由度回转的调心轴承,在轴承座圆环上与两个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(这一平面与四个行波定子组成平面平行),当输出轴在中心位置时(即输出轴轴线垂直于四

个行波定子组成的平面时),两连杆是互相垂直的,即各连杆中心线与调心轴承中心相交,球转子转动时,调心轴承也随之向外移动并且二自由度转动,其轴承中心仍在两连杆组成的平面内。另外,各连杆与各光电编码器轴线垂直相交,连杆可在与光电编码器轴的相交点滑动,并带动光电编码轴回转。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,即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点的位置及其相应运动轨迹。对于球转子运动位姿可以用上述平面的运动位置描述,即控制目标由球转子的运动姿态角转化为调心轴承中心点的运动轨迹。

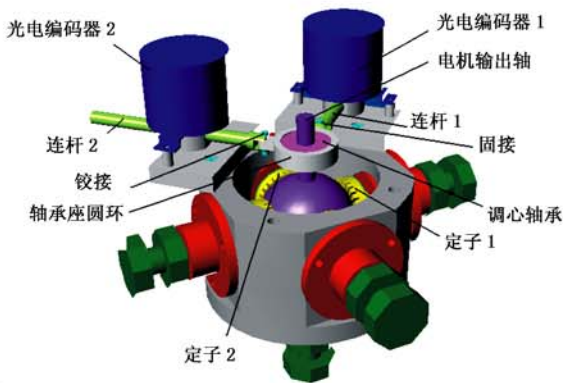


图 7 二自由度球形超声波电机球转子运动姿态测量机构

Fig. 7 Measure structure of spherical rotor in 2DOF USM

运动轨迹控制和结果。通过 PI 控制算法改变加到二对定子上电压的相位差,改变两对定子表面行波速度的大小和方向,从而控制调心轴承中心点运动轨迹,并采用了逐点插补法完成对转子输出轴的运动姿态控制。由于直线运动较为简单,任何复杂曲线都可以通过直线插补的方法来得到。实验采用了 2000 线光电编码器、DSP 数据采集器、PC 和直流稳压电源组成。在实验中,要求电机分别从中心点(0,0)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),与目标位置的相对误差分别为(1.1%,1.66%),(1.7%,1.3%),(2.1%,1.7%),(1.6%,1.7%)。其最大相对误差是 2.1%。

另外,要求电机分别沿四边形运动,四边形的位

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)。

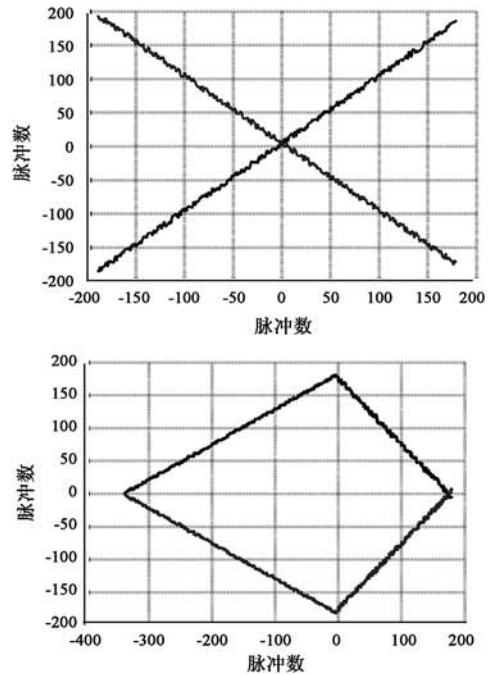


图 8 电机运动轨迹图

Fig.8 Motion trajectory of motor

3 球电机在空间机构的研究和应用展望

多自由度行波型超声波球电机在空间多自由度驱动机构有着广阔地应用前景。由于其主要是面向航空航天和特殊环境场合,为实现实用须要解决的问题是:

(1) 系统的轻量化、高可靠性和高性能。电机结构的轻量化,电机本体和驱动电路在极限环境下的可靠性和性能。利用高端的电力电子器件和先进的集成电路制造工艺使驱动电路小型化等^[7-9]。

(2) 研究球电机应用技术。如机器人手腕的技术;探讨多自由度行波型超声波电机的动力特性,姿控能力和不影响电机工作范围的位姿检测方法和高精度的位姿伺服控制策略和技术^[10-13]。

球电机用于空间机构可分二方面:

一是多自由度驱动。如空间机器人的腕关节、CCD、力矩陀螺和空间天线等的驱动。特别是腕关节的驱动,不仅重量减轻,结构减小,另外,更重要的是增加了灵活性,在某些运动上有一些独特的优势,要实现拧螺纹、钻孔等作业不需要任何外部装置,可直接作业,一次完成。又如登月工程中要钻探采集月球岩石标本,采用这种手腕也十分有利。CCD 的

全方位驱动,可替代用多轴电机驱动(结构复杂而大,且定位精度不高),可用于各种武器装备、军事卫星、登月车等。空间天线的驱动,可用于卫星和登月车的天线驱动。

二是利用其动力特性,用于小惯量航天器的姿态控制器,或者采用三自由度行波型超声波电机的球形机器人,作用登月车等用于星球的探测。

参考文献:

- [1] Purwanto E, Shigeki T. Development of an ultrasonic motor as a fine-orienting stage[J]. IEEE Trans on Robotics and Automation, 2001, 17(4): 464-471.
- [2] Shigeki T, Sugitani S, Guoqiang Zhang. Multi degree of freedom spherical ultrasonic motor[C]. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1995: 2935-2940.
- [3] Purwanto E, Shigeki T. Control method of a spherical ultrasonic motor[C]// Proceedings of 2003 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, 2003: 1321-1326.
- [4] 前野隆司, 竹村研治郎. 纵振动と横振動の縮退に基づく多自由度超音波モータの开关[J]. 日本ロボット学会誌, 1998, 16(8): 1115-1122.
- [5] Fukawa N, Wada H, Kikuchi Y, Toyama S. An artificial arm using an ultrasonic motor[J]. Lifesupport (In Japanese), 2000, 12(4): 131-136.
- [6] 远山, 深谷. 三自由度球面超音波モータを用いた人工假手の开发. 第 15 回日本ロボット学会学术講演会預稿集, 1997: 689-690.
- [7] 周斌, 李志钧, 赵淳生. 基于 DDS 的超声电机驱动技术[J]. 压电与声光, 2002, 24(3): 202-204. [ZHOU Bin, LI Zhi-jun. ZHAO Chun-sheng. A driving power of ultrasonic motor base on DDS [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2002, 24(3): 202-204.]
- [8] 李华峰, 赵淳生. 基于 LC 谐振的超声电机驱动器的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(23): 144-148. [LI Hua-feng, ZHAO Chun-sheng. Research on the ultrasonic motor driven based on LC resonant[J]. Proceedings of CSEE, 2005, 25(23): 144-148.]
- [9] LI H, ZHAO C. Mini-driver based on CPLD for ultrasonic motor [C]// Proceedings of the 2005 IEEE International Ultrasonic, Ferroelectric, and Frequency Control 51th Anniversary Joint Conference, Rotterdam, 2005: 1542-1545.
- [10] Lin F J, Wai R J, Huang P K. Two-axis motion control system using wavelet neural network for ultrasonic motor drives[J]. IEEE Trans on Power Electron, 2004, 15(5): 613-621.
- [11] Takemura K, Maeno T. Method for controlling multi-dof ultrasonic motor using neural network[J]. Journal of Robotics and Mechnics, 2003, 15(2): 534-540.
- [12] Antoine Ferreira. Optimized friction drive controller for a multi-DOF ultrasonic nanopositioner[J]. IEEE Trans on Mechronics, 2004, 9(3): 484-490.
- [13] Tomoaki M, Kosuke Awaga, Shigeki T. Development of a spherical ultrasonic motor with an attitude sensing system using optical fibers [C]. IEEE International Conference on Robotics and Automation, Roma, 2007: 4466-4471.

作者简介:郭吉丰(1964-),男,教授,博士生导师,浙江大学航天电气与微特电机研究所所长,现从事空间结构及其控制、先进驱动器、振动控制、机器人和纺织装备自动化等研究。
通讯地址:浙江省杭州市浙大路 38 号浙江大学电气电气工程学院(310027)
电话:(0571)87953211
E-mail:gjf@zju.edu.cn

2DOF Spherical Traveling-wave Type Ultrasonic Motor for Space Structure

GUO Ji-feng¹, HU Xi-xing¹, FU Ping²

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Huangzhou 310027, China;

2. Physics and Telecommunication Engineering, Minjiang University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: The principle, basic structure of 2DOF ultrasonic motor driven by ultrasonic vibration are presented in this paper. Means for some key issues of 2DOF motor in the process of development are introduced. The structure and the method for controlling the location and stance of 2DOF motor are expatiated. Then the applications of the motor and some issue to be resolved are discussed. We have successfully developed this kind of motor; it has $\phi 45\text{mm}$ rotor, $\phi 30\text{mm}$ stator; the maximum output torque reaches 120 mNm; the maximum speed is 12 r/min. The motor works smoothly, and the output is consistent, can be applied to various space structures.

Key words: 2DOF motor; Traveling-wave ultrasonic motor; Phase difference control; Stance of motion control