

行波型旋转超声电机速度稳定性研究

王金鹏, 金家楣, 赵淳生

(南京航空航天大学精密驱动研究所, 江苏省 南京市 210016)

Velocity Stability Research of Traveling Wave Type Rotary Ultrasonic Motor

WANG Jinpeng, JIN Jiamei, ZHAO Chunsheng

(Precision Driving Laboratory of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, Jiangsu Province, China)

ABSTRACT: Aim at improving the velocity fluctuation ratio of traveling wave type rotary ultrasonic motor (TRUM), this paper analyzes the impact of matching or assembly error in the present case of duplex bearing structure. The results show that one of the main reasons for velocity fluctuation of TRUM is pressure imbalance along the circumference. A scheme to realize pressure auto-balance with single bearing and self-aligning structure was proposed. Theoretical and experimental analysis shows that the approach makes the contact interface more uniform pressure distribution, and speed stability better. Comparing with the original structure, the main key performance indicators, such as output torque and velocity range, are basically the same, and the experimental result indicates that the no-load velocity fluctuation ratio decreased 40.0%, and velocity fluctuation range reaches within $\pm 2.0\%$.

KEY WORDS: ultrasonic motor (USM); contact interface; velocity fluctuation ratio; self-aligning structure

摘要: 为了提高行波型旋转超声电机速度稳定性, 分析现有双轴承支撑情况下, 加工和装配误差对速度稳定性的影响, 认为沿圆周压力不均衡是造成速度波动的主要原因之一。提出了单轴承支撑附加调心结构的方案, 使接触界面实现压力自平衡。理论和实验分析表明, 这种方案使接触界面的压力分布更加均匀, 速度稳定性更好。实验结果表明, 与原结构对比, 在超声电机输出力矩、速度范围等主要性能指标基本一致的情况下, 超声电机的空载速度波动率降低了约40.0%, 波动范围达到 $\pm 2.0\%$ 以内。

关键词: 超声电机; 接触界面; 速度波动率; 调心结构

基金项目: 国家自然科学基金-广东联合基金(U0934004); 国家自然科学基金项目(10874090)。

The Key Program of National Natural Science Foundation of China and Guangdong Joint Fund (U0934004); Project Supported by National Natural Science Foundation of China (10874090).

0 引言

超声电机具有优良的特性, 作为控制系统的执行器有着广泛的应用前景, 已经被应用于精密定位等领域。随着高新技术的发展, 应用系统对运动过程的控制精度提出了更高的要求, 提高速度稳定性是超声电机广泛用于精密控制系统的必要条件。

行波型旋转超声电机(traveling wave type rotary ultrasonic motor, TRUM), 以下简称为超声电机, 利用压电材料的逆压电效应激发定子的振动, 通过定、转子的摩擦作用, 将定子的微幅振动转换成转子的旋转运动, 对外做功^[1]。

行波型超声电机速度稳定性与定、转子间的接触界面密切相关。1992年 T. Maeno 对环形超声电机的接触界面问题进行了有限元分析^[2], E. G. Norddin^[3]由分析力学方法导出了接触界面对定子的模态力, 并分析了其对超声电机性能的影响。J. L. Pons^[4]以能量法探讨了接触界面上的广义力, 在假设仅存在相对滑动且符合库仑摩擦定律的前提下, 建立了行波型超声电机的接触模型, 但该方法过于复杂, 不便于应用。J. Wallaschek^[5], 赵向东^[6-7], 夏长亮^[8]等定性论述了定、转子接触界面上可能存在粘滑(Stick-Slip)现象, 分析了切向变形的影响。H. Storck^[9]也对接触界面上切向的弹性对超声电机性能的影响进行了研究。曲建俊^[10]等对考虑接触层粘弹性时的超声电机接触模型进行了较为深入的研究。南京航空航天大学陈超^[11]分析了超声电机三维接触模型, 研究了接触界面上的径向滑移造成的能量损失, 并仿真了超声电机的负载特性和输出效率, 对基于柔性转子的动力学模型也进行了深入的研究^[12]。W. H. Duan^[13]等建立了完整的超声电机的

压电陶瓷与定子的耦合及定子与转子接触界面的三维模型。周盛强利用有限元软件建立了用于分析超声电机接触问题的简化有限元模型^[14]，并模拟了预压力、定子振幅等对超声电机输出性能的影响^[15]。B. Radi, A. El. Hami^[16]等用变分原理对超声电机定子转子接触界面的动态接触模型问题进行了研究，并将其用于探索超声电机失效模型。夏长亮对液体媒质的超声电机转子稳定性、速度稳定性进行了深入研究^[17-18]。

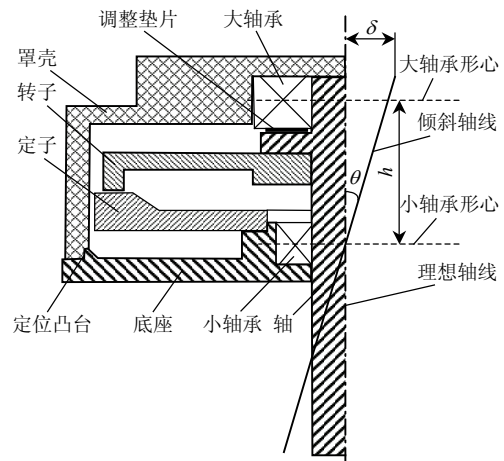
以上文献均以假设定子、转子及其它零件的加工装配是理想的情况为前提，由此得出超声电机性能的仿真结果，以及电机性能与一些关键参数的关系。对于超声电机的速度稳定性的研究非常少，也缺乏对如何提高超声电机速度稳定性的相关研究。

TRUM-60型超声电机是行波型旋转超声电机的一种，由于采用的是双端支撑，往往因机械加工和装配偏差等原因，导致定子与转子的接触界面压力分布不均，进而导致超声电机空载速度波动率上升、输出性能下降、寿命下降等不利后果。为此，本文提出从结构上对现有的TRUM-60超声电机进行改进，设计使转子相对于定子自动对中的调心结构，对部分零件进行重新设计，并进行了相关实验。实验结果表明，经过改进之后的超声电机空载速度波动率明显降低，其它主要性能指标如力矩、速度等与改进前基本一致。改进后，超声电机结构更加简单，减小了体积，减轻了重量，降低了成本，提高了可控性，为超声电机的推广应用提供参考。

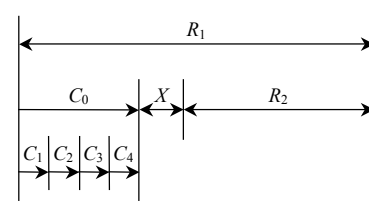
1 原超声电机结构及装配精度问题

1.1 双端支撑装配误差

为了求出超声电机轴在安装过程中绕其支撑小轴承形心可能产生的偏离理想轴线的最大偏离角度，假设理想轴线是穿过定子、转子轴线且垂直于定子、转子接触面的轴线。首先借助尺寸链分析方法分析安装完成后大轴承中心的偏移。TRUM-60超声电机示意图如图1(a)所示，电机轴由大小2个轴承支撑。电机底座与罩壳之间通过定位凸台定位。在设计上，轴和轴承之间、轴承和其安装孔之间、定位凸台等配合处都有公差配合，由于小轴承安装时其外圈与安装孔之间是紧配合，所以不考虑小轴承外圈与安装孔之间的偏心及小轴承的径向游隙，这里仅考虑影响较大的几个尺寸及其公差，



(a) TRUM-60 超声电机装配及装配误差示意图



(b) 超声电机装配尺寸链

图1 装配误差分析

Fig. 1 Assembly error analysis

超声电机装配尺寸链^[19]示意图如图1(b)所示，各组成环的名称及数值见表1。图中： X 、 R_1 、 R_2 、 C_0 组成一个标量尺寸环， C_0 、 X 为封闭环， R_1 、 R_2 符合正态分布，相对不对称系数 $e_i=0$ ，相对分布系数 $k_i=1$ ； $C_1\sim C_4$ 组成一个矢量尺寸环，是封闭环， $C_1\sim C_4$ 为偏心或径向跳动，服从瑞利分布， $e_i=-0.28$ ， $k_i=1.14$ 。由表1可得出尺寸公差和中间偏差，由封闭环与组成环基本尺寸间的关系式 $L_0 = \sum_{i=1}^m \varepsilon_i L_i$ ，可得封闭环 C_0 、 X 基本尺寸为0^[20]。

表1 TRUM-60 超声电机尺寸链各组成环名称及数值

Tab. 1 Component link's name & size of the TRUM-60 USM's dimensional chain

环	名称	传递系数	基本尺寸/mm	偏差/mm
R_1	罩壳定位凸台半径	1	31.5	+0.015 0
R_2	底座定位凸台半径	-1	31.5	-0.005 -0.015
C_1	小轴承孔对底座定位凸台偏心	1	0	0~0.020
C_2	大轴承孔对罩壳定位凸台偏心	1	0	0~0.025
C_3	大轴承外圈对其安装孔偏心	1	0	0~0.030
C_4	大轴承跳动引起的偏心	1	0	0~0.015

封闭环的中间偏差、最小公差及最大公差计算公式分别为

$$\Delta_0 = \sum_{i=1}^m \varepsilon_i (\Delta_i + e_i T_i / 2) \quad (1)$$

$$T_{0\min} = \frac{1}{k_0} \sqrt{\sum_{i=1}^m \varepsilon_i^2 k_i^2 T_i^2} \quad (2)$$

$$T_{0\max} = \sum_{i=1}^m |\varepsilon_i| T_i \quad (3)$$

式中： m 为组成环的个数； ε_i 为组成环传递系数； Δ_i 为第 i 个组成环的中间偏差； e_i 为第 i 个组成环相对不对称系数； T_i 为第 i 个组成环公差； k_i 为第 i 个组成环相对分布系数。

对于封闭环 C_0 ，其组成环 $C_1 \sim C_4$ 的中间偏差 Δ_i 、公差 T_i 可由表 1 算出，由式(1)得 C_0 的中间偏差 $\Delta_0^c = 0.033$ ，因 $m < 5$ ，且 $C_1 \sim C_4$ 不按正态分布，取 $e_0^c = 0$ ， $k_0^c = 1.1$ 。由式(2)得 C_0 公差 $T_0^c = T_{0\min}^c = 0.048$ 。

封闭环的上偏差可计算为

$$ES_0 = \Delta_0 + T_0 / 2 \quad (4)$$

封闭环的下偏差可计算为

$$EI_0 = \Delta_0 - T_0 / 2 \quad (5)$$

由式(4)、(5)可分别求出 C_0 封闭环上下偏差，可得 $C_0 = 0_{+0.009}^{+0.057}$ 。

对于封闭环 X ，由式(1)、(3)可得 $\Delta_0^X = 0.036$ ， $T_0^X = T_{0\min}^X = 0.073$ ，由式(4)、(5)可得 $X_0 = 0_{-0.001}^{+0.073}$ ；若考虑大轴承内部径向游隙，则需加上 0.013 mm 的偏差^[21]，即 $\delta_{\max} = 0.086$ mm。由于超声电机轴两个支撑点轴向距离 $h = 16.650$ mm，则由于装配误差所引起的超声电机轴偏离理想轴线最大偏角为 $\theta_{\max} = 0.3^\circ$ ，如图 1(a)所示。这样的偏角将导致超声电机定子与转子接触界面压力不均匀。

转子内圈圆形凸台和内孔以及轴的轴肩的加工误差也会导致超声电机定子齿表面与转子摩擦材料表面在未接触前处于不平行状态，进而导致装配之后，接触界面上的压力不均匀，这对于定子只有微米级振动的超声电机性能影响很大^[22-23]。

1.2 接触界面压力分析

为分析双支撑有安装误差的情况下的接触界面压力情况，用通过轴线的平面将转子剖开，如图 2(b)所示，与图 2(a)所示的单支撑理想安装状态相比较。图 2(b)中左右两端分别为接触压力最小和最大的点。实际生产中，转子腹板在预压力的作用下会产生变形。在超声电机存在安装误差的情况

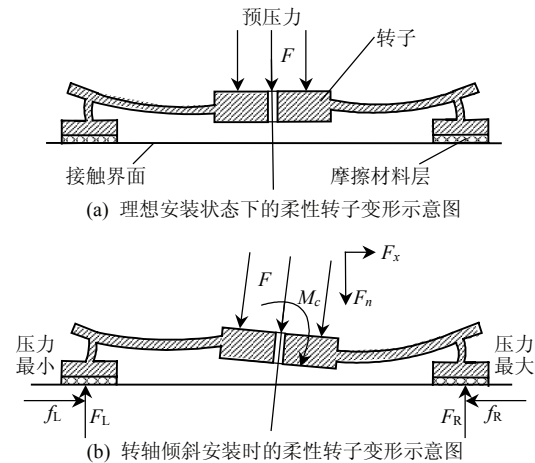


图 2 柔性转子变形示意图

Fig. 2 Schematic of flexible rotor deformation

下，超声电机轴的轴肩会强迫转子的内圈产生一个倾斜，除了预压力 F 外，相当于又施加了一个力矩 M_c 。此时预压力沿水平和竖直方向分为两个力，其水平方向分力与接触界面上摩擦力的合力是一对平衡力，其竖直方向分力 F_n 以及转子受到的力矩 M_c 与接触界面上压力的合力、合力矩相互平衡。

行波超声电机摩擦界面的纯滑动模型如图 3 所示，图中： x 为定子表面波形中轴线沿切线方向的展开； w 为定子表面质点距定子表面波形中轴线 x

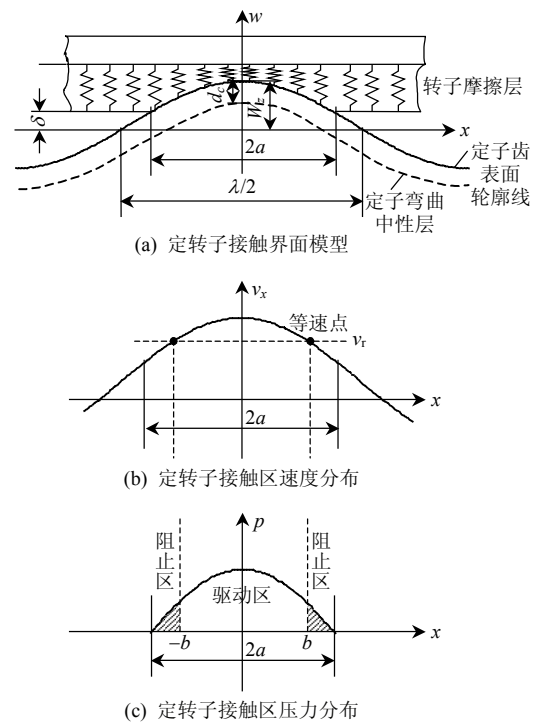


图 3 行波超声电机摩擦界面的纯滑动模型示意图

Fig. 3 Schematic of the gliding model of traveling wave USM's frictional interface

的距离； v_x 为定子表面各质点切向瞬时速度。根据文献[6]的分析，参照图3，可得到接触界面上压力分布为

$$p(x) = k_m W_z (\cos kx - \delta) \quad (6)$$

式中： k_m 为摩擦材料的等效弹簧刚度，是一种线性分布式弹簧刚度系数； W_z 为定子垂直方向上的振幅； $k = 2\pi/\lambda$ ， λ 为行波的波长； δ 为摩擦材料自由表面(下表面)未发生变形时距定子表面波形中轴线 x 的距离。

左右两边接触面压力合力分别为

$$F_L = n \int_0^a p_L(x) dx = nk_m W_{zL} \left(\frac{1}{k} \sin ka - a \cos ka \right) \quad (7)$$

$$F_R = n \int_0^a p_R(x) dx = nk_m W_{zR} \left(\frac{1}{k} \sin ka - a \cos ka \right) \quad (8)$$

式中： n 为行波数； $2a$ 为定转子在一个行波波长内的接触范围； W_{zL} 、 W_{zR} 分别为超声电机工作时左右两边的定子振幅。

由力的平衡可得

$$F_n = F_L + F_R = nk_m (W_{zL} + W_{zR}) \left(\frac{1}{k} \sin ka - a \cos ka \right) \quad (9)$$

$$M_c = (F_R - F_L) R(x) = \Delta F \cdot R(x) \quad (10)$$

式中 $R(x)$ 为左右半边的等效力臂。

由式(9)、(10)可知， ΔF 的存在将直接导致左右两边接触界面上压力分布不均匀，也可以说在图2(b)所示的情况下，左边的预压力变小，而右边的预压力变大。

理论仿真及实验均表明，超声电机在工作时，接触界面上的压力大小是影响定子振幅的重要因素，压力越大，定子振幅越小，反之压力越小，定子振幅越大。由式(7)、(8)可以求得间距 δ 和接触范围 $2a$ 。如图3所示，式(7)与式(8)所得到的值不相等，这表明预压力大的一边， a 越大，接触范围越宽，而另一边则刚好相反。对于靠摩擦传递动力的超声电机来说，接触范围的大小将直接影响到速度、输出力矩的大小和超声电机效率的高低。

在分析超声电机接触界面相关问题时，通常假定只有粘贴在转子表面的摩擦材料产生变形，定子齿和转子则相对呈刚性，不因定子的微小振幅而产生形变，即在定转子接触界面上，摩擦层的变形与定子表面的轮廓线一致，定子表面行波方程为

$$w(x,t) = W_z \cos(\omega_n t - kx) \quad (11)$$

式中 $\omega_n = 2\pi f_n$ ， f_n 为工作模式的固有频率。

一般认为定转子接触区域的形状、定转子间的相对运动情况及相互作用力不随时间变化，则 $t=0$ 时刻的定子表面各质点切向瞬时速度为

$$v_x(x) = kd_c 2\pi f_n w(x) = kd_c 2\pi f_n W_z \cos(kx) \quad (12)$$

式中 d_c 为定子表面到定子弯曲中性层的距离。

由式(12)可知定子表面各质点的速度与其所处位置的定子振幅成正比，与振动频率成正比。所以，在接触界面上，定子振幅大的地方，转子的局部速度快，反之定子振幅小的地方，转子速度慢。超声电机转子作为一个整体某一时刻只能有一个速度，假定为 v_r ，则有：

$$v_x(b) = kd_c 2\pi f_n W_z \cos(kb) = v_r \quad (13)$$

由式(13)可以求出等速点 b ，参照图3(c)可以看出，在定转子的整个接触区域，只有定子表面质点的切向速度大于转子速度的区域，定子对转子才产生所期望的驱动作用，而在阴影区域，定子对转子起阻碍转动的作用。

综上所述，在转轴相对于理想轴线存在倾角时，在接触界面上存在接触压力分布不均匀的情况，超声电机在工作状态下，接触压力大的一侧接触范围宽，阻止区扩大，定子振幅变小，所以速度较小；而接触压力小的一侧接触范围窄，驱动区相对较大，定子振幅较大，速度较高。正是由于速度的不一致，将会产生超声电机在转动一圈的范围内，速度发生波动，同时由于局部滑移严重，摩擦损失大幅增加，超声电机的效率和寿命会降低。

2 超声电机结构改进方案

2.1 问题分析

为了解决由于安装偏差导致的超声电机轴偏离理想轴线的问题，最好是去掉大轴承，只用单个轴承支撑。为进一步改善超声电机定子、转子之间接触压力的均匀的问题，可以设计能自动寻找中心的结构。基于以上分析，提出一种单支撑附加调心结构的改进方案，电机装配示意图如图4所示。

将超声电机支撑方式由两端支撑改成单端支撑。设计球面调心端盖以及转子内孔上部的锥形面，锥度设计为与水平面夹角 53° ，球面和锥孔配合，允许二者之间有较小的相对倾斜，以保证定子、转子紧密贴合。使转子连同转轴相对于定子可以自

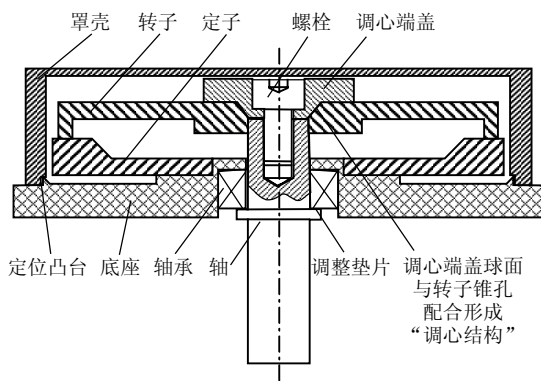


图 4 改进型超声电机装配示意图

Fig. 4 Assembling schematic of improved USM

动找中心，因此可以从根本上克服双端支撑超声电机中的两个轴承不同心的问题，从而可以最大限度地保证定转子接触界面上压力的均匀分布，进而保证超声电机的输出转速的稳定性及输出力矩、超声电机效率等性能指标。调心端盖和超声电机轴用内六角螺栓连接，轴承安装在底座的背面，轴肩与轴承之间的调整垫片可以调整预压力。尺寸设计保证在不加垫片时，靠螺栓恰好可以使调心端盖与轴紧密贴合，且转子上施加的预压力为 0。改进之后的超声电机的罩壳不再承受预压力，因此罩壳可以设计得更薄，罩壳与底座之间的连接可以更简单。

超声电机进行上述改进之后，变成单端支撑，转轴可能会出现所谓的“摇头”现象，这是由于存在加工误差、标准件固有的间隙、支撑方式以及结构不对称造成振幅不均匀等。考虑到超声电机定转子接触界面直径约 60 mm，而接触界面到小轴承的上表面只有 4 mm，相对很小。另外，选择厚度为 6 mm 的 W638/8-2Z 轴承比 688Z 的厚度增加了 2 mm，相当于增大了支撑刚度，降低了超声电机轴摆动的程度，使其达到一个可接受的范围。不可否认的是，超声电机改成单端支撑之后，超声电机轴承受径向力的能力会略微降低。

基于以上分析，改进之后的超声电机定转子接触界面沿圆周方向上的压力分布可以达到均匀一致，提高了超声电机的速度稳定性，同时可以减小体积，减轻重量，降低成本。改进后的超声电机的速度、力矩与改进前基本一致。

2.2 改进设计

根据上文的分析，本文设计了一种调心端盖，并在原有基础上改进了底座轴承孔的设计、转子和超声电机轴的设计，如图 5 所示。图 5(a)所示的调

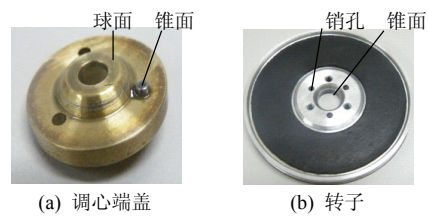


图 5 改进后的超声电机零部件照片

Fig. 5 Parts' photograph of the improved USM

心端盖球面上有明显的一个灰色“圈”，是球面调心端盖与转子锥孔的配合面摩擦痕迹，说明端盖与转子之间存在着相对运动，调心端盖与转子锥孔的配合起到了调整转子摩擦面适应定子齿表面的作用，从而保证了定转子接触界面上的接触压力的一致性。

改进之后的超声电机如图 6，图 6 所示是打开罩壳时的情形。

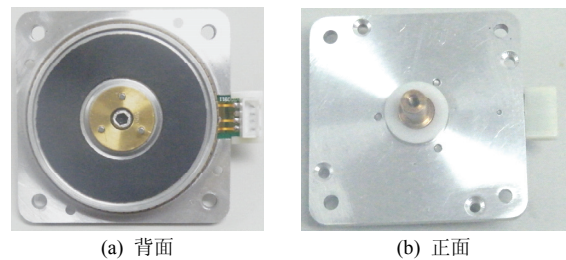


图 6 改进后的超声电机

Fig. 6 Prototype of the improved USM

改进之后的超声电机与原超声电机用的是同一个定子，同一个转子，同样厚度的垫片，所以可以认为装配预压力与原超声电机相当，只是底座上的轴承用的是较厚的型号。这样，改进前后超声电机的核心部件未变，尽可能地保证了改进前后的超声电机的可比性。

3 实验结果分析

3.1 力矩速度实验

从 2 个批次里抽出 2 台超声电机做实验，其编号分别为 No.09815 和 No.10436。采用本文方法对这两台超声电机进行改进，改进后的编号为 No.09815G 和 No.10436G。

用本研究所的 CZC-2 型转矩测量仪测试两台超声电机的速度和堵转力矩。测试时，驱动器采用本研究所研制的 UMD-1 型驱动器，且改进前后的超声电机用的是同一个驱动器，同样大小的电感，电感采用精密可调电感，电感值为 1.5 mH。直流稳压电源型号为 DH1718G-4。测得参数见表 2。

表2 改进前后超声电机性能对比

Tab. 2 Comparison of the USM's performance

编号	最大电流/A	堵转力矩/(N·m)	空载速度/(r/min)
09815	1.300	0.800	25~125
09815G	1.260	0.780	25~130
10436	1.000	0.830	30~135
10436G	0.870	0.820	30~130

由表2可以看出,改成单端支撑以后,超声电机的电流、力矩及转速范围没有发生太大变化。改进之后由于电机去掉了一个轴承,罩壳变得更薄。

3.2 速度波动实验

用本研究所开发的基于NI PXI-1031测量仪,NI PXI-2705数字信号采集卡的超声电机速度特性测试系统测试两台超声电机改进前后的速度波动情况,整套实验装置如图7所示。图中编码器采用南京中科天文仪器有限公司生产的5000线旋转编码器。测试系统采用脉冲触发方式,所以电机每转动一圈可以测得5000个速度数据。

两台超声电机速度波动试验的结果分别如图8、9和表3、4所示。

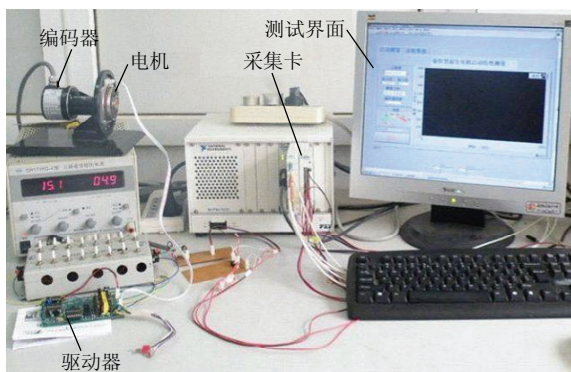


图7 实验测试系统图

Fig. 7 Picture of the measure system

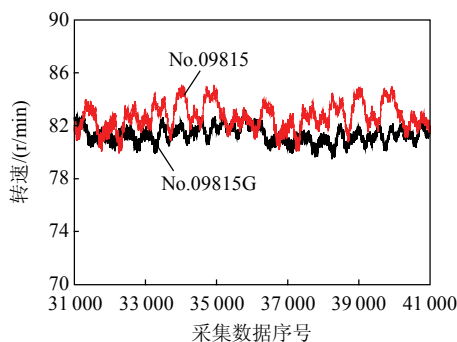


图8 No.09815与No.09815G超声电机速度波动对比
Fig. 8 Comparison of the USM's velocity fluctuation between No.09815 and No.09815G

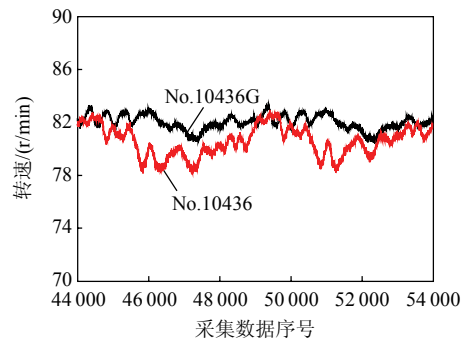


图9 No.10436与No.10436G超声电机速度波动对比
Fig. 9 Comparison of the USM's velocity fluctuation between No.10436 and No.10436G

表3 No.09815与No.09815G速度波动对比

Tab. 3 Comparison of the USM's velocity fluctuation between No.09815 and No.09815G

编号	均值/(r/min)	标准差	P25	P75	波动范围/(r/min)	方差
09815G	81.624	0.600	80.903	81.757	3.264	0.360
09815	82.694	0.987	82.027	83.349	5.139	0.975

表4 No.10436与No.10436G超声电机速度波动对比
Tab. 4 Comparison of the USM's velocity fluctuation between No.10436 and No.10436G

编号	均值/(r/min)	标准差	P25	P75	波动范围/(r/min)	方差
10436G	82.017	0.560	81.704	82.477	3.014	0.314
10436	80.597	1.103	79.792	81.401	4.832	1.216

图8、9中,横坐标是测得的速度数据序号,即从测得的一串数据当中选取超声电机转动两圈的数据量,对应的旋转角度为0°~720°,以此来判断超声电机单圈速度波动的情况,并保证可以得到一个完整的波动周期。两个实验均选择转速约为80r/min来测试,因为此速度对TRUM-60型超声电机来说具有代表性,是输出力矩、转速及超声电机效率较优的状态。

图8所示曲线显示, No.09815与No.09815G测试时平均速度相差约1r/min,这是由于两次测试中,超声电机的速度无法调得完全相等。由图8可看出,与No.09815曲线相比, No.09815G的速度波动较小,曲线变得更加平坦,且周期性不太明显。借助Origin7.5软件对所选择的数据进行了数值统计分析,分析结果见表3,根据表3中的标准差数据,由式(14)可得,改进之后的超声电机空载速度波动率降低了39.2%,速度波动范围由5.139降到3.264,降低了36.5%,由式(15)得到相对速度波动范围为4.0%。

$$\Delta v_f = (s_1 - s_2) / s_1 \quad (14)$$

式中: Δv_f 为空载速度波动变化; s_1 、 s_2 分别为超声电机改进前后的速度波动标准差。

$$R_x = R_f / v_m \quad (15)$$

式中: R_x 为相对波动范围; R_f 为速度波动范围; v_m 为超声电机平均速度。

表 3 中 P75 栏表示在所选择的数据里, 有 75% 的数据小于或等于给出的值。P25 栏表示在所选择的数据里, 有 25% 的数据小于或等于给出的值。以 No.09815G 为例, P25 与 P75 的值表明有一半的数据在 80.903~81.757 范围内。

图 9 为 No.10436 与 No.10436G 测试结果的对。由图 9 可以看出, 与 No.10436 曲线相比, No.10436G 曲线明显变得非常平坦, 改进前后的电机测试时平均速度相差约 1.5 r/min。表 4 是 Origin7.5 软件的分析结果。参照式(14)、(15), 由速度波动数据标准差可得, 改进之后的超声电机空载速度波动率降低了 49.2%, 绝对波动范围由 4.832 降至 3.014, 降低了 37.6%, 相对速度波动范围降至 3.67%。

4 结论

针对目前行波型旋转超声电机存在的速度稳定性差的问题, 提出了一种单轴承支撑附加调心结构的改进方案, 进行了理论分析和实验验证, 得出如下结论:

1) 采该改进方案可以改善超声电机接触界面上沿圆周方向的压力不均衡性;

2) 改进后电机空载速度波动率降低了 40.0%, 相对速度波动范围小于 $\pm 2.0\%$, 验证了这种方案的有效性;

3) 与原结构相比, 改进后的超声电机的输出力矩和速度与改进前基本一致, 且采用改进方案能减小电机体积和质量, 降低了成本。

参考文献

- [1] 赵淳生. 超声电机技术与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 1-200.
Zhao Chunsheng. Ultrasonic motors technologies and applications [M]. Beijing: Science Press, 2007: 1-200(in Chinese).
- [2] Maeno T, Tsukimoto T, Miyake A. Finite-element analysis of the rotor/stator contact in a ring-type ultrasonic motor [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and

- Frequency Control, 1992, 39(6): 668-674.
- [3] Norddin E G. Hybrid modeling of a traveling wave piezoelectric motor[D]. Denmark: Aalborg University, 2000.
- [4] Pons J L, Rodriguez H, Fernandez J F, et al. Parametrical optimisation of ultrasonic motors[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2003, 107(2): 169-182.
- [5] Wallaschek J. Contact mechanics of piezoelectric ultrasonic motors [J]. Smart Materials & Structures, 1998, 7(5): 369-381.
- [6] 赵向东. 旋转型行波超声电机动力学模型及性能仿真的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2000.
Zhao Xiangdong. Study on the dynamic modeling and simulation of the traveling wave type ultrasonic motor[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2000(in Chinese).
- [7] 赵向东, 陈波, 赵淳生. 旋转行波超声电机非线性摩擦界面模型[J]. 南京航空航天大学学报, 2003, 35(6): 629-633.
Zhao Xiangdong, Chen Bo, Zhao Chunsheng. Nonlinearly frictional interface model of rotated traveling wave type ultrasonic motor[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2003, 35(6): 629-633(in Chinese).
- [8] 夏长亮, 郑尧, 史婷娜, 等. 行波接触型超声波电机定子振动有限元分析[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(2): 25-28.
Xia Changliang, Zheng Yao, Shi Tingna, et al. FEM analysis on stator vibration of traveling wave type contact ultrasonic motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 21(2): 25-28(in Chinese).
- [9] Storck H, Wallaschek J. The effect of tangential elasticity of the contact layer between stator and rotor in travelling wave ultrasonic motors[J]. International Journal of Non-Linear Mechanics, 2003, 38(2): 143-159.
- [10] 曲建俊, 孙凤艳, 田秀. 粘弹性接触层在定子表面的行波电动机接触模型[J]. 机械工程学报, 2006, 42(12): 175-179.
Qu Jianjun, Sun Fengyan, Tian Xiu. Contact model of traveling wave ultrasonic motor with visco-elastic contact layer on stator surface[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(12): 175-179(in Chinese).
- [11] 陈超. 旋转型行波超声电机理论模型的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2005.
Chen Chao. Study on the theoretical model of travelling wave type rotary ultrasonic motor[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2005(in Chinese).

- [12] 陈超, 赵淳生. 旋转型行波超声电机中三维接触机理的研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(21): 149-155.
Chen Chao, Zhao Chunsheng. Study on the three dimensional contact mechanism of traveling wave type rotary ultrasonic motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(21): 149-155(in Chinese).
- [13] Duan W H, Quek S T, Lim S P. Finite element solution for intermittent-contact problem with piezoelectric actuation in ring type USM[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2007, 43(3): 193-205.
- [14] 周盛强, 赵淳生. 超声电机接触界面的两种简化有限元模型[J]. 振动、测试与诊断, 2009, 29(3): 251-255.
Zhou Shengqiang, Zhao Chunsheng. Two simplified finite element models for contact analysis of ultrasonic motor[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2009, 29(3): 251-255(in Chinese).
- [15] 周盛强, 赵淳生, 黄卫清. 旋转型行波超声电机接触界面的空间域分析[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(12): 63-68.
Zhou Shengqiang, Zhao Chunsheng, Huang Weiqing. Contact analysis of traveling wave type rotary ultrasonic motor in space domain[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(12): 63-68(in Chinese).
- [16] Radi B, Hami A EI. The study of the dynamic contact in ultrasonic motor[J]. Applied Mathematical Modelling, 2010, 34(12): 3767-3777.
- [17] 夏长亮, 王香存, 史婷娜, 等. 液体媒质超声波电机转速特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(10): 131-136.
Xia Changliang, Wang Xiangcun, Shi Tingna, et al. Research of rotating speed characteristic on ultrasonic motor driving fluid directly [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(10): 131-136(in Chinese).
- [18] 夏长亮, 李斌, 俞卫, 等. 液体媒质超声波电机转子稳定性理论和实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(15): 113-117.
Xia Changliang, Li Bin, Yu Wei, et al. Theoretical and experimental study on rotor stability of ultrasonic motor driving fluid directly[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(15): 113-117(in Chinese).
- [19] 于建国, 赵志刚, 夏元地. 电动机气隙尺寸链的分析计算[J]. 防爆电机, 1999(1): 41-42.
Yu Jianguo, Zhao Zhigang, Xia Yuandi. The analysis and calculation of dimension chain for air gap of motor[J]. Explosion-Proof Electric Machine, 1999(1): 41-42(in Chinese).
- [20] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 5847-2004 尺寸链计算方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
Standardization Administration of China. GB/T 5847-2004 Dimensional chain-Methods of calculation[S]. Beijing: Standards Press of China, 2005(in Chinese).
- [21] 卜炎. 实用轴承技术手册. 北京: 机械工业出版社[M]. 2003: 7-32.
Piao Yan. Practical technical manual of bearing[M]. Beijing: China Machine Press, 2003: 7-32(in Chinese).
- [22] 王光庆, 沈润杰, 郭吉丰. 预压力对超声波电机特性的影响研究[J]. 浙江大学学报, 2007, 41(3): 436-440.
Wang Guangqing, Shen Runjie, Guo Jifeng. Researches on effects to ultrasonic motor's performance of preload[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2007, 41(3): 436-440(in Chinese).
- [23] 张志忠, 漆亚梅, 李建春. 无刷直流电动机转子偏心引起的波动力矩[J]. 微特电机, 1998(2): 8-9.
Zhang Zhizhong, Qi Yamei, Li Jianchun. Ripple torque of the BLDC motor owing to rotor eccentricity[J]. Small & Special Machines, 1998(2): 8-9(in Chinese).



王金鹏

收稿日期: 2011-03-15。

作者简介:

王金鹏(1979), 男, 博士研究生, 研究方向为超声电机及其驱动和控制, mejpw@yahoo.cn;

金家楣(1965), 男, 副研究员, 主要从事超声电机的研究;

赵淳生(1938), 男, 教授, 中国科学院院士, 博士生导师, 超声电机及其控制技术和应用研究。

(责任编辑 李婧妍)