

行波型旋转超声电机定转子设计及有限元分析^{*}

苏国兵^{1,2}, 韩建超¹, 齐鑫哲¹, 蔡毅²

(1. 中国空间技术研究院, 北京 100039;

2. 北华航天工业学院 机电工程学院, 河北 廊坊 065000)

摘要: 研究了行波型旋转超声电机定转子接触动力传递机理, 完成了超声电机关键部件定子、锥柔性转子设计, 建立了考虑定转子径向滑移的三维接触模型以及有限元模型, 分析了超声电机定子表面质点幅频特性、谐振速度以及径向位移量与齿高之间的关系。通过比较锥柔性、柔性转子与定子接触面质点径向相对位移, 阐释了锥柔性转子通过自身弹性变形能更好地贴合在定子齿表面, 减少定转子间相对滑移量并能提高超声电机的输出效率。最后通过合成一个行波周期内定子表面质点的位移轨迹, 验证了定子驱动转子旋转运动的方式为椭圆运动。仿真结果对行波型旋转超声电机的设计具有指导意义。

关键词: 超声电机; 定转子; 径向滑移; 有限元

中图分类号: TM 302 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2017)12-0100-06

Traveling Wave Rotary Ultrasonic Motor Rotor-Stator Design and Finite Element Analysis^{*}

SU Guobing^{1,2}, HAN Jianchao¹, QI Xinzhe¹, CAI Yi²

(1. Chinese Academy of Space Technology, Beijing 100039, China;

2. Mechanical Engineering Department, North China Institute of Aerospace Engineering, Langfang 065000, China)

Abstract: Dynamic transfer mechanism of the traveling wave rotary ultrasonic motor rotor-stator's contact surface was studied and the key parts stator and cone flexible rotor of ultrasonic motor were designed. Three-dimensional contact model and finite element model considering the radial sliding between the rotor and the stator were established. The relation between stator surface particle that amplitude frequency characteristics, resonance speed, radial displacement of ultrasonic motor and tooth height were analyzed. Mass point radial relative displacement of contact surface between the cone flexible rotor, flexible rotor and the stator were contrasted. The cone flexible rotor was better placed on the surface of the stator tooth through its elastic deformation was interpreted. The cone flexible rotor reduces radial slip between the stator and the output efficiency of ultrasonic motor was improved. The displacement trajectory of the stator surface was synthesized in a row wave cycle. The method of the stator mass point elliptical motion drives the rotor rotation was verified. The simulation results were great significantly to the design of rotary ultrasonic motor.

Key words: ultrasonic motor; rotor-stator; radial slip; the finite element

0 引言

行波型旋转超声电机是一种新型微特电机, 具有结构简单、低速大转矩、响应速度快、不受电磁场干扰等优点, 目前在工业控制、医疗器械、计

算机、智能机器人和航空航天领域有着广泛的应用。其工作原理是利用压电陶瓷的逆压电效应使定子表面质点产生高频微幅(微米级)振动, 再通过定转子间的摩擦作用, 驱动转子定向转动, 实现电能到机械能的转换。超声电机工作时存在两个

^{*} 基金项目: 河北省研究生创新资助项目(CXZZSS20171771)

作者简介: 苏国兵(1989—), 男, 硕士, 研究方向为现代机械设计理论。

能量转换过程: (1) 通过压电陶瓷的逆压变效应将电能转换为定子的振动机械能; (2) 通过摩擦作用将定子的微幅振动转化为转子的定向转动。这两个能量转化过程均存在能量损耗, 特别是第 2 个过程^[1-2]。定转子摩擦接触传递力矩的特点决定了电机输出效率不高、能量损失严重等缺点, 特别是定转子接触面间的径向滑动造成很大的能量损耗, 故分析定转子的接触机理, 研究接触面的质点位移轨迹, 对超声电机性能的提高具有实际意义。

1 机理研究

行波旋转型超声电机主要由压电陶瓷片、定子、转子、摩擦衬垫、底座、壳体和轴系组成; 运行机理为在压电陶瓷片上施加两相相位差为 90° 的同频等幅交变电压, 通过压电陶瓷的逆压电效应在定子中激发出两相幅值相等、在时间和空间相位差为 90° 的驻波, 两相驻波叠加形成定子体中沿一定方向传播的行波, 定子行波表面质点的切向速度使得转子转动, 且转子的转动方向与行波的传动方向相反^[3]。超声电机采用摩擦界面完成振动到机械能的传递过程, 摩擦界面的利用使得超声电机结构紧凑, 具有断电自锁能力, 可把摩擦材料层简化为分布式线弹簧, 如图 1 所示。

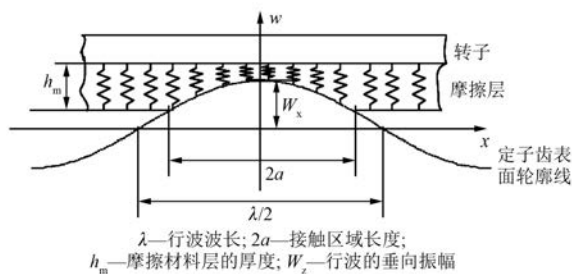


图1 超声电机定转子接触理论模型

定子表面的行波方程可写为

$$w(x, t) = W_z \cos\left(\omega_n t - \frac{2\pi}{\lambda} x\right) \quad (1)$$

定子表面质点的切向速度为

$$v_x(x, t) = \frac{4\pi^2}{\lambda} d_c f_n W_z \cos\left(\omega_n t - \frac{2\pi}{\lambda} x\right) \quad (2)$$

式中: f_n ——工作模态的固有频率, $f_n = \omega_n / 2\pi$;
 d_c ——定子表面到定子弯曲中性层的距离。

假设超声电机定转子间接触区域的形状、相对运动情况以及相互作用力不随时间变化, 设 $t = 0$, 则定转子接触面的轮廓方程为

$$w(x) = W_z \cos \frac{2\pi}{\lambda} x \quad (3)$$

此刻, 定子表面各质点的切向瞬时速度为

$$v_x(x) = \frac{4\pi^2}{\lambda} d_c f_n w(x) \quad (4)$$

定子振动时表面质点空间运动, 位移及速度在柱坐标系 3 个方向上均有分量, 如果把沿轴向和周向的位移分量合成, 可形成质点的椭圆运动轨迹。椭圆运动是驱动转子旋转的有效运动, 可实现定子从微幅振动到转子旋转运动的动力传递。同时定子质点径向位移分量同样不可忽略, 径向位移分量造成定转子之间相对滑移。实践证明, 径向滑移能量损耗大, 若能减少这种滑移, 超声电机性能会有较大改善^[4]。

2 定转子设计

2.1 定子设计

(1) 内外直径。行波型旋转超声电机定子外径尺寸的确定要综合考虑极限转速、输出扭矩以及输出功率之间的关系。超声电机定子外径的平方与极限转速成反比, 与输出扭矩和输出功率成正比。定子的内径尺寸要适中; 如果定子的内径过小, 会使更多的能量传递到定子的内支撑板上消耗; 若内径过大, 定子基体环比较窄, 压电陶瓷环的宽度就比较小, 超声电机的输出功率就较小, 同时定子的固定也会较困难^[5]。

(2) 基体厚度。定子基体厚度直接影响定子模态频率和振动幅值的大小。基体的厚度越大, 定子的刚度增加, 相同阶次的模态频率增高, 工作频率也越高, 但在相同的激励条件下振幅会变小, 基体不宜过厚。

(3) 定子齿。行波型旋转超声电机定子齿数和齿宽相互关联, 齿数又取决于定子工作模态节径数, 一般定子齿数是定子工作模态节径数的倍数。在一定范围内增高定子齿可放大定子表面质点的轴向振幅, 从而提高转速。但齿太高, 定转子接触区域内定子表面质点沿周向速度变化更大, 会降低超声电机的输出效率, 并且定子齿太高, 定子振动的非线性特性会增强, 超声电机容易出现

堵死现象^[6-7]。根据以上设计原则,定子弹性体结构参数如表 1 所示,压电陶瓷片结构参数如表 2 所示。

表 1 定子弹性体结构参数

外径/mm	内径/mm	基体厚度/mm	齿数/个	齿距/mm
60	18	4.5	72	0.5

表 2 压电陶瓷片结构参数

外径/mm	内径/mm	厚度/mm	分区/个
60	44	0.5	9

2.2 锥柔性转子设计

行波型旋转超声电机转子振动时,阻尼作用使得转子的响应滞后,从而定转子间行波在空间上存在一定的相位差。若能合理设计转子,使得转子和定子振型相似,模态频率相近,从而使定转子的波形反相,可减少定转子间的径向滑移量,提高超声电机的输出扭矩和效率^[8]。为使超声电机转子产生较大的弹性变形,以增大定转子间的接触面积,减小定转子间径向应力,同时减少定转子间的径向滑移,转子的腹板一般设计得很薄。转子边缘因为结构与力学要求,往往比转子腹板厚很多,造成转子腹板和转子边缘的结构刚度差较大,定转子的工作频率虽进行了很好的匹配,定转子间共振时并不能形成很好的接触,径向滑移量仍很大。综合以上因素,设计了一种锥柔性转子,转子结构如图 2 所示,结构参数如表 3 所示。

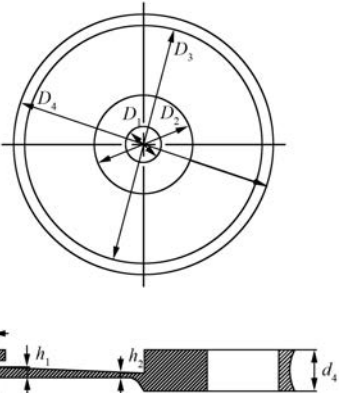


图 2 锥柔性转子结构图

表 3 锥柔性转子结构参数

结构参数	尺寸/mm	结构参数	尺寸/mm
D_1	8	d_2	0.5
D_2	22	d_3	4.6
D_3	53	d_4	4.1
D_4	58	h_1	1.4
d_1	11.2	h_2	0.5

3 有限元分析

3.1 有限元模型

行波型旋转超声电机定转子结构复杂,目前还不能建立单纯的数学解析模型。有限元法能求解有复杂形状和各种边界条件的问题,且有较高的求解精度^[9]。定子由弹性体和压电陶瓷片粘结而成,弹性体采用锡青铜材料(该材料耐磨、导热性好、热膨胀系数小、质量轻并且具有较好的工艺性);压电陶瓷片采用 PZT-4, PZT 基压电陶瓷压电性能好、使用温度范围宽、抗疲劳强度高并且铁电性优良,定转子材料参数如表 4 所示。

表 4 定转子材料参数

部件	材料	密度 g/cm^3	弹性模量/Pa	泊松比	热膨胀系数/ $(\text{m}\cdot\text{k}^{-1})$
压电陶瓷片	PZT-4	7 500	7.65×10^{10}	0.32	2.1×10^{-5}
弹性体	锡青铜	8 400	1.13×10^{11}	0.3	1.8×10^{-5}
锥柔性转子	硬铝合金	2 770	7.1×10^{10}	0.33	2.3×10^{-5}

对超声电机定转子建立有限元接触模型,压电陶瓷片、定子弹性体以及锥柔性转子均采用三角形和四边形单元进行网格划分,控制单元划分的大小,使单元在定子齿处划分更为细腻,如图 3 所示,共 97 211 个节点、47 741 个单元。

3.2 边界条件

行波型旋转超声电机利用接触摩擦界面将定子的振动转换成转子的旋转运动,因此,定转子间接触面的动力传递模型决定超声电机最后的输出特性。对定转子接触模型施加边界约束应尽量反

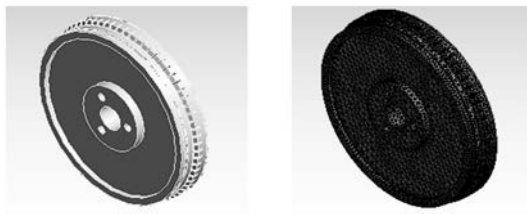


图3 定转子有限元接触模型

映超声电机实际工作情况^[10]。边界约束条件如下:采用面面接触单元分析定转子接触模型,压电陶瓷片与定子弹性体采用绑定处理,定转子接触面定义为摩擦面,摩擦因数取 0.15,并消除初始渗透。对定子 3 个螺纹孔采用全方位约束,防止定子作平移运动或者转动。对转子腹板施加径向位移约束,轴向保持自由,使转子不作平面运动。转子基体施加 200 N 轴向均布预压力。

3.3 结果与分析

3.3.1 定子齿分析

行波型旋转超声电机定子齿对压电陶瓷的逆压电激励效应有放大效果。对定子有限元模型进行振动学分析,得到定子齿表面质点谐振频率、谐振振幅、谐振速度以及径向偏移量与齿高的关系,如图 4~图 7 所示。

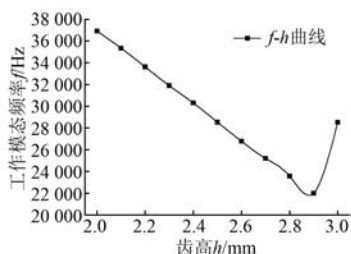


图4 谐振频率与齿高关系

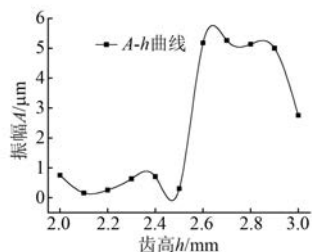


图5 谐振振幅与齿高关系

由图 4~图 7 可得定子质点的谐振频率、谐振幅值、谐振速度以及径向偏移量与齿高的关系。

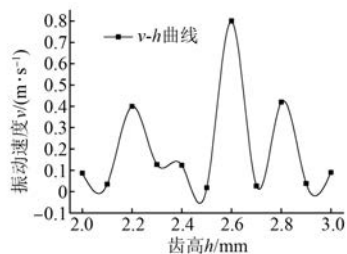


图6 谐振速度与齿高关系

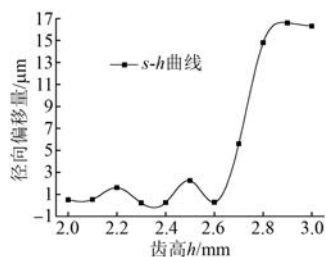


图7 径向偏移量与齿高关系

定子谐振频率随开齿深度的增加逐渐降低。定子开齿深度为 2~2.5 mm 时,定子表面质点振幅值为 0.16~0.75 μm ;开齿深度为 2.6~3.0 mm 时,定子表面质点谐振幅值为 2.7~5.2 μm ,增高了一个数量级。定子表面质点振动速度在 0.02~0.9 m/s 范围内波动,开齿深度为 2.6 时谐振速度最高,为 0.872 m/s。定子开齿深度为 2~2.6 mm 时,定子表面质点径向偏移量为 0.2~1.6 μm ,开齿深度为 2.7~3 mm 时,定子表面质点径向位移量为 10~16 μm ,增高了一个数量级。

3.3.2 径向滑移分析

传统行波型旋转超声电机工作时,定子与转子的接触面并不是平面,定子振动时,定转子接触面径向滑动量很大。研究表明:定转子接触界面的径向滑动造成纯粹的能量损失,可占整个界面总损耗的 60%。因此,减少定转子的径向滑动以改善电机的效率,对于依靠摩擦传动而效率本身不高的超声电机具有重要意义^[11-13]。为了验证锥柔性转子较柔性转子对提高超声电机效率的优势,分别对锥柔性转子和柔性转子进行瞬态分析,柔性转子与锥柔性转子具有相同的厚度以及接触半径,求解时间为 30 μs ,60 个子步,使每个子步定转子变化量尽量小,并记录每个子步结果。结果如图 8~图 13 所示。

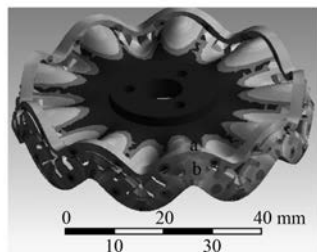


图8 柔性转子与定子接触模型激振图

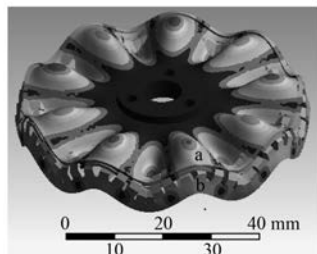


图9 锥柔性转子与定子接触模型激振图

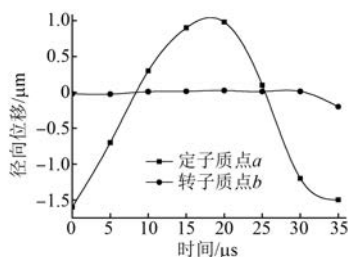


图10 柔性转子与定子质点径向位移

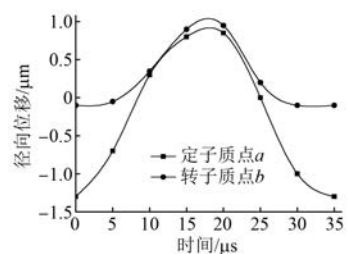


图11 锥柔性转子与定子质点径向位移

由图8~图9可得,行波型旋转超声电机采用两种转子时,定转子均被激发出相似的振型,但锥柔性转子能更好地贴合在定子齿表面,增大了定转子的接触面积,有利于减少定转子相对质点沿径向的位移差量,可减少接触界面上的径向滑动,对改善界面接触特性以及提高超声电机的输出性能具有重要意义。由图10~图12可得,定子压

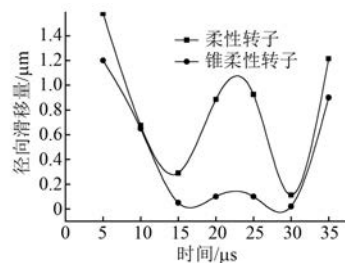


图12 柔性、锥柔性转子径向滑移量对比

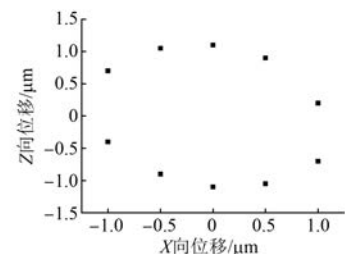


图13 定子表面质点周期运动轨迹

电陶瓷逆压电效应激励下存在伸缩和弯曲变形,定子质点在一个行波周期内径向位移量逐渐变化,虽然柔性转子也能被激发出与定子相似振型,但由于柔性转子边缘很厚,与腹板的刚度差较大,边缘变形不明显,与定子质点 b 相接触的转子质点 a 径向位移量不明显,而锥柔性转子腹板为锥形结构,转子结构无突变,锥柔性转子同样被激发出与定子相似振型,转子质点 a 与定子质点 b 的运动方向一致,能有效地减小定转子接触面的径向滑移。一个行波周期内锥柔性转子与定子相对质点的径向位移较柔性转子更小,定转子接触面质点位移方向一致,相对径向滑移量也就更小,超声电机启停时两种转子径向滑移量均较大。图13是经仿真得到的定子表面质点在一个周期内 X 向和 Z 向位移的合成图,由该轨迹图可见一个周期内定子表面质点运动轨迹的变化过程,轨迹合成后为椭圆,验证了定子表面质点驱动转子旋转的有效运动是椭圆运动。

3.4 小结

行波型旋转超声电机定子齿的高度会影响定子表面质点的幅频特性,对质点谐振速度的影响较小,定子表面质点确实存在径向位移,且定子齿的高度对质点径向位移有一定的影响。超声电机工作时,转子也被激发出与定子相似的振型,采用

锥柔性转子的超声电机定转子相对质点的径向滑移量更小。超声电机起停时定转子间径向滑移量较其他时刻较大。仿真结果为行波型旋转超声电机设计、优化、制造提供理论依据,对提高超声电机的输出性能具有指导意义。

4 结 语

以行波型旋转超声电机为研究对象,针对定转子接触面间径向滑移量大的问题,提出了改进转子结构的方案,完成了关键部件定子、锥柔性转子设计,分析了定子齿高对表面质点幅频特性、谐振速度以及径向位移量的影响,定子齿高为 2.6 mm 时,定子齿对压电陶瓷逆压电效应的放大效果更好,超声电机的输出性能更高。

建立了定转子有限元接触模型,通过有限元求解比较锥柔性、柔性转子质点相对定子的径向位移量。仿真结果表明定转子接触面间确实存在径向滑移,径向滑移是造成超声电机效率不高的重要因素之一。锥柔性转子具有更好的接触范围,接触面积更大,且质点运动方向与定子质点运动方向始终一致,能有效减少定转子接触面间径向滑移量,提高超声电机输出功率与效率。

完成了一个行波周期内定子质点的椭圆运动轨迹仿真,椭圆运动能有效的驱动转子定向转动。仿真结果为行波型旋转超声电机设计与分析提供了理论依据。

【参考文献】

- [1] 赵孟强,任一峰,汲德明,等.超声电机中一种非线性现象的试验研究[J].电机与控制应用,2016,43(7): 92-94.
- [2] 张海军,刘卫东,吴文才,等.基于 OPTIMUS 的盘状摇头型超声电机定子参数优化设计[J].机械科学与技术,2015,34(8): 1248-1253.
- [3] 李霞,张宁,高琳,等.超声谐波电动机的设计与分析[J].微特电机,2015,43(5): 9-13.
- [4] 陈超,任金华,石明友.旋转行波超声电机的冲击动力学模拟及实验[J].振动、测试与诊断,2014,34(1): 8-14.
- [5] 徐从裕,孙雅琼,方文琼,等.超声电机微纳驱动参数调节机构设计[J].中国机械工程,2013,24(7): 886-889.
- [6] 周景亮,陈超,王均山,等.旋转型行波超声电机瞬态响应能力的试验研究[J].中国机械工程,2014,25(10): 1369-1380.
- [7] 王涛,纪跃波.双定子旋转型超声电机径向滑移现象的仿真分析[J].四川大学学报,2015,52(5): 1057-1062.
- [8] 蒋春容,胡敏强,金龙,等.中空环形行波超声电机有限元接触模型[J].东南大学学报,2014,44(1): 99-103.
- [9] 纪跃波,王涛.双定子单转子旋转型行波超声电动机转子的优化设计[J].微特电机,2015,43(6): 33-36.
- [10] 刘婵娟,纪跃波.压电陶瓷对超声波电动机定子特性的影响[J].机械工程学学报,2010,46(4): 203-207.
- [11] 芦小龙,赵淳生.超声电机定子热机电耦合特性[J].振动工程学报,2011,24(5): 522-528.
- [12] 陈超,曾劲松,朱华,等.微型行波超声电机定子的参数优化设计[J].中国机械工程,2009,20(5): 568-572.
- [13] 周盛强,赵淳生.超声电机定子振动分析的模态选择[J].光学精密工程,2009,17(12): 3009-3015.

收稿日期: 2017 -06 -01

【读者群】

《电机与控制应用》杂志的读者包括电机与控制领域内从事科研、设计、生产的工程技术人员,全国各大高等院校师生,企业经营、管理、营销、采购人员,各类产品代理分销渠道人员以及最终用户等,遍及电力、石油、冶金、钢铁、交通、航

天、工控、医疗、机械、纺织、矿山等多个行业。

杂志读者群专业、稳定、层次高,无论是交流前沿技术、实践经验,还是传递行业信息,开展企业及产品的广告宣传都能达到事半功倍的效果。

欢迎投稿 欢迎订阅 欢迎刊登广告