

盘型声流超声电机驱动机理分析及实验研究

石明辉, 陈书杰, 张绍林, 马鑫峰, 刘甫澄

(郑州大学机械与动力工程学院, 450001, 郑州)

摘要: 针对传统超声电机定子与转子表面存在严重摩擦磨损导致系统性能降低的问题,提出了一种新型非接触悬浮式声流超声电机。该电机结构紧凑,能够利用声悬浮原理实现定子和转子的非接触驱动,消除传统超声电机存在的严重摩擦磨损。基于连续性方程,建立了悬浮间隙介质流体分析模型,并采用有限元法进行求解。搭建实验台进行转动特性测试实验,分析了新型电机的工作机理,研究了不同槽型及运转状态下的声流分布。研究表明:转子表面刻槽导致间隙内圆周方向产生了压力梯度,进而形成了驱动转子的转矩;随着驱动电压升高,定子盘的振动幅值及转子转速均增大,当驱动电压为 1 430 V 时,定子盘振动幅值为 9.8 μm ,转子转速达到 74 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$;相较于光滑转子,刻槽型转子在槽域附近的声流场发生了明显改变。此研究可为非接触超声电机的研究提供参考,也能进一步扩展超声电机的应用领域。

关键词: 超声电机;声流;非接触悬浮;声悬浮

中图分类号: TB532 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202406018 **文章编号:** 0253-987X(2024)06-0193-10

Analysis and Experimental Study on the Driving Mechanism of Disk Type Acoustic Streaming Ultrasonic Motor

SHI Minghui, CHEN Shujie, ZHANG Shaolin, MA Xinfeng, LIU Fucheng

(School of Mechanical and Power Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Aiming at the problem of severe friction and wear between the stator and rotor surfaces of traditional ultrasonic motor causing system performance degradation, a new non-contact levitation acoustic streaming ultrasonic motor is proposed. The proposed motor has a compact structure and uses the acoustic levitation principle to realize non-contact driving of stator and rotor, thus eliminating the friction and serious wear existing in the traditional ultrasonic motor. Based on the continuity equation, the fluid analysis model of levitated interstitial medium is established and solved by finite element method. The rotation characteristic test experiment was carried out on the established test bench. The working mechanism of the new motor was analyzed, and the acoustic streaming distribution under different grooves and operating conditions was studied. The results show that the grooves on the surface of the rotor cause a pressure gradient in the circumferential direction of the gap, which in turn form the torque that drives the rotor. With the increase of the driving voltage, the amplitude of stator disk vibration and rotor speed both increase. When the driving voltage is 1 430 V, the vibration amplitude of the stator is

$9.8\ \mu\text{m}$, and the rotor speed reaches $74\ \text{r} \cdot \text{min}^{-1}$. Compared to smooth rotors, grooved rotors exhibit significant changes in the acoustic streaming field near the groove region. This research can provide reference for the research of non-contact ultrasonic motor, and also can further expand the application field of ultrasonic motor.

Keywords: ultrasonic motor; acoustic streaming; non-contact levitation; acoustic levitation

基于压电陶瓷的逆压电效应,超声电机能在高频电场作用下将电能转化为定子振动的机械能,通过定子与转子接触面间的摩擦作用力产生驱动转矩^[1-3]。根据振动形式的不同,研究者提出了不同类型的超声电机。其中一种是纵振型超声电机^[4-6],或称为驻波超声电机,此类超声电机通常采用换能器作为定子激励源,将纵向振动转变为旋转运动。另一种是利用纵向振动和扭转振动耦合的纵扭型超声电机^[7-8],对于此类电机,可以通过调整定子与转子的结构参数,实现不同振动模式的工作频率。与纵扭型电机相似,一种基于纵弯振动模式的超声电机被众多研究者提出^[9-13]。相比于电磁电机^[14-16],以上超声电机均具有低速转矩大、精度高、响应快、能量密度高及断电自锁等优点,在航空航天、精密仪器、仿生机器人、医疗器械领域表现出了优越的应用前景。然而,由于工作原理的固有缺陷,定子和转子的直接接触会产生严重的摩擦磨损,且摩擦生热也会影响系统稳定性。为解决此问题,研究者试图在其表面添加涂层^[17-18],以改善表面特性,但这并不能从根本上解决问题。

声悬浮技术是一种新型的非接触悬浮技术,相比于气悬浮、磁悬浮和静电悬浮等其它非接触悬浮,具有结构紧凑、精度高和稳定性强的特点。研究者已将其应用于超声马达,成功实现了定子和转子间的非接触悬浮。Hirose 等基于声流原理提出了一种压电陶瓷驱动的圆板型超声电机^[19]。Hu 等将 Langevin 换能器作为激励源,间隔 $3/4$ 波长布置于圆筒形定子上,设计了一种非接触行波超声电机^[20]。Shi 等研究了一种带有 4 个柔性瓦块的盘型非接触超声电机,并基于流体润滑理论建立了分析模型^[21]。Stepanenko 等对结构非对称的超声电机开展了实验研究^[22]。季叶等提出了一种圆盘型声流超声电机^[23],该电机实验测试转速可达到 $6\ 031\ \text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 。Hu 等研究了一种驻波直线型非接触超声电机,实验结果表明该电机的传输速度可达到 $10\ \text{cm/s}$ ^[24]。陈超等设计了一种径向与周向可同时产生声辐射力的非接触超声电机^[25]。Yang 等研究了一种圆盘型非接触超声电机,该电机转子采用 SU-8 胶制作,通过

分析获得了转子的最优转速^[26]。夏长亮等通过理论分析和实验研究指出,电机内部流场的驱动力由雷诺切应力提供^[27-28]。然而,目前非接触超声电机并未在实际中得到具体应用,一方面是由于前期结构设计复杂,且需要复杂的相位控制系统,因而难以在实际中实现;另一方面是非接触超声电机驱动机理较为复杂,为电-固-流多场耦合系统,缺少对其机理的深入认知。因此,有必要对非接触超声电机驱动机理开展进一步的深入研究。

为进一步揭示非接触超声电机的驱动机理,促进其向工程化应用,本文设计了一种结构简单紧凑的圆盘型非接触超声电机。该电机主要由定子盘和转子组成,其中驱动定子盘的激励源可直接采用商用换能器,增强了定子的可替换性。为了揭示其驱动机理,建立马达悬浮间隙流体分析模型,采用有限元进行求解,分析了间隙内的声流场分布,同时搭建实验台进行了非接触超声电机的悬浮特性测试。

1 新型声流超声电机结构设计

1.1 新型电机结构

新型声流超声电机的三维结构如图 1 所示,主要由换能器振子、定子盘、定子结构固定架、转子和支撑底座组成。换能器振子由前后盖板、预紧螺栓和压电陶瓷片构成,压电陶瓷片沿厚度方向极化,且极化方向相同。换能器振子与定子盘一起构成声流电机的定子系统,整体固定在支撑架上。进行电机

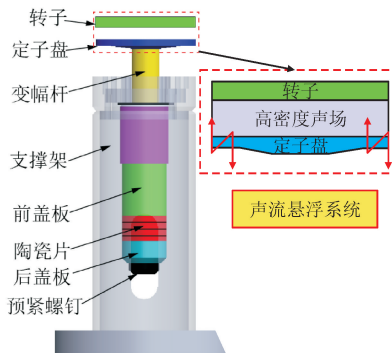


图 1 声流超声电机结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of acoustic streaming ultrasonic motor

定子设计时,采用的大功率超声波换能器振子为典型的郎之万振子类型,其振动模式为纵向振动。定子盘采用悬浮效果较好的梯形结构,转子与定子具有相同的半径尺寸。为实现转子的非接触转动,在其表面圆周方向刻有人工槽。

1.2 电机定子振型分析

作为新型超声电机的激振源,电机定子在高频振动下会形成复杂的振型,增强电机的悬浮承载特性需要选择纵向振动较好的振型。因此,需要对电机定子进行设计分析。图 2(a)给出了定子的尺寸,其中定子盘半径为 56 mm,厚度为 6.8 mm,材料为 7075-T6 铝合金,变幅杆材料为 40Cr,陶瓷片采用 PZT-8,其他部分采用 45 号钢。采用自由四面体网格对模型进行网格划分,考虑到计算精度,设置网格尺寸远小于波长的 1/6,划分网格后的定子模型如图 2(b)所示。变幅杆与前盖板的连接处设计成节点位置,即振动位移为 0,以便固定电机定子。设计过程中通过不断调整结构尺寸,使定子振型和频率达到较好的结果。电机定子的求解结果如图 2(c)所示,得到的共振频率为 21.7 kHz,定子盘截面呈现典型的 W 振型分布。

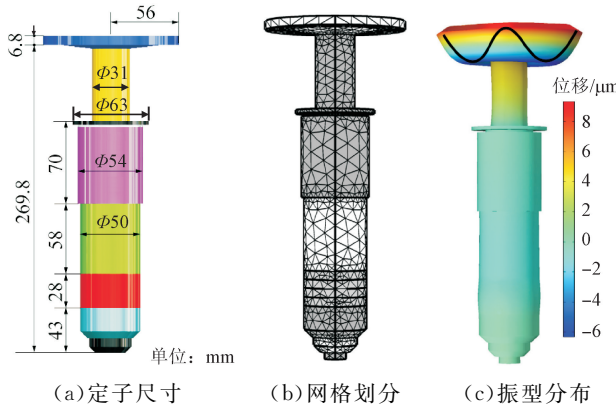


图 2 定子尺寸及有限元分析

Fig. 2 Stator size and finite element analysis

1.3 声流电机驱动机理

电机定子盘在换能器振子的带动下产生高频振动,挤压定子盘和转子间隙内的气体。高频的挤压作用在间隙内形成高密度的声场,此时间隙内的周期平均声压大于环境气压,进而产生作用于转子的声辐射力。当声辐射力大于转子重力时,转子就能稳定悬浮。为使悬浮后的转子能够沿圆周方向转动,在转子底面刻有深度沿圆周方向变化的人工槽,本文选取两种槽型作为研究对象,如图 3(a)和 3(b)所示,槽型圆周角为 45°,人工槽深度从 0 增加到 0.3 mm, $R_{\max}$ 、 $R_{\min}$

分别为槽沿径向的最大和最小半径。人工槽的引入使得间隙内的声压沿圆周方向存在一定的变化梯度,由于 4 个槽梯度变化方向相同,因此在圆周方向形成了声辐射驱动转矩,转子同时受到垂直方向的声辐射力和圆周方向的声辐射转矩,如图 3(c)所示。非接触式的悬浮驱动方式,消除了定子与转子间存在的摩擦磨损,可实现更高的工作效率。

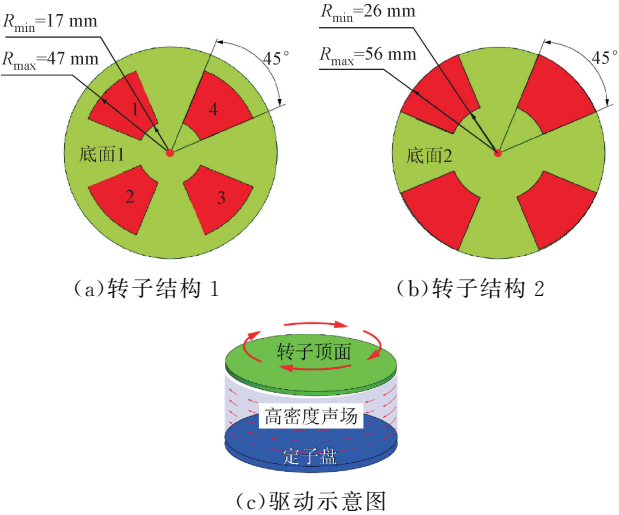


图 3 转子底面结构及驱动机理示意图

Fig. 3 Schematic diagram of rotor bottom structure and driving mechanism

2 模型的建立

2.1 声流场控制方程

为分析声流超声电机的驱动机理,本文基于流体连续性方程和 N-S 方程,建立了声流超声电机分析模型。假设转子稳定悬浮后间隙内的流体具有各项同性和可压缩性,则流体连续性方程和 N-S 方程^[29]为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \tag{1}$$

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} \right) =$$

$$-\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \left(\mu_b + \frac{1}{3} \mu \right) \nabla (\nabla \cdot \mathbf{u}) \tag{2}$$

式中: ρ 为流体密度; t 为时间; $\mathbf{u}$ 为流体速度矢量; p 为声压; μ_b 为流体的动态黏度系数; μ 为流体的体积黏度系数。

采用微扰理论,流体的密度、声压和速度矢量可表示为

$$\begin{cases} \rho = \rho_0 + \rho_1 + \rho_2 + \cdots \\ p = p_0 + p_1 + p_2 + \cdots \\ \mathbf{u} = \mathbf{u}_1 + \mathbf{u}_2 + \cdots \end{cases} \tag{3}$$

式中:下标 1 和 2 表示一阶和二阶,0 表示流体处于

静止状态。

忽略高阶项,将式(3)带入式(1)和式(2),仅保留二阶项对流体影响,流体速度矢量^[30]可表示为

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_2 + \frac{\langle \rho_1 \mathbf{u}_1 \rangle}{\rho_0} \quad (4)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho_0 (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\frac{\nabla p_2}{\rho_0} + \frac{\mu \nabla^2 \mathbf{u}}{\rho_0} + \mathbf{F} \quad (5)$$

式中: $\langle \rangle$ 表示时间平均值; $\mathbf{F}$ 为平均驱动力,可写为

$$\mathbf{F} = -\langle (\mathbf{u}_1 \cdot \nabla) \mathbf{u}_1 \rangle - \langle \mathbf{u}_1 \nabla \cdot \mathbf{u}_1 \rangle \quad (6)$$

考虑流体驱动力的组成及求解的有效性,有效驱动力可表示为

$$\mathbf{F}_e = \mathbf{F} - \frac{\nabla \tilde{p}_2}{\rho_0} \quad (7)$$

式中: $\tilde{p}_2$ 为静态压力二阶近似值,可表示为

$$\tilde{p}_2 = \langle e_p \rangle - \langle e_k \rangle = \frac{\langle p_1^2 \rangle}{2\rho_0 c^2} - \frac{\rho_0 \langle \mathbf{u}_1^2 \rangle}{2} \quad (8)$$

其中 e_k 为声波势能, e_p 为声波动能, c 为声速。

式(5)的 N-S 方程最终可表示为

$$\rho_0 (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} - \frac{\mu}{\rho_0} \nabla^2 \mathbf{u} = -\frac{\nabla (p_2 - \tilde{p}_2)}{\rho_0} + \mathbf{F}_e \quad (9)$$

转子悬浮过程中不仅受到垂直方向的声辐射力和圆周方向的驱动转矩,还受到空气黏滞性作用于转子表面的平衡转矩,其受力分析模型如图 4 所示。转子的平衡方程可写为

$$F_t - G = m\ddot{h}_z \quad (10)$$

$$M_r - M_d = J\ddot{\Phi} \quad (11)$$

式中: F_t 为转子所受悬浮力; G 为转子重力; m 为转子质量; $\ddot{h}_z$ 为转子竖直方向的加速度,当转子稳定悬浮时,平均竖直加速度为 0; M_r 为转子声辐射转矩; M_d 为转子空气阻抗转矩; J 为转子的转动惯量; $\ddot{\Phi}$ 为转子角加速度,稳定悬浮时角加速度为 0。

对悬浮间隙内的声场压力进行积分,可得到由声辐射力提供的作用于转子的悬浮力,表示如下

$$F_t = 2\pi \int_0^R r \langle p \rangle dr \quad (12)$$

式中: R 为转子半径; r 为径向距离。

进一步,声辐射转矩和阻抗转矩^[31]可表示为

$$M_r = - \int_{S_0} \mathbf{r} \times (\tilde{p}_2 \mathbf{n}) dS_0 \quad (13)$$

$$M_d = \int_0^R \frac{1}{2} C_{d\theta} \rho_r (\dot{\theta} r)^2 2\pi r^2 dr = -\frac{1}{5} \pi C_{d\theta} \rho_r \dot{\theta}^2 r^5 \quad (14)$$

式中: $\mathbf{r}$ 为矢量径向距离; $\mathbf{n}$ 为表面法向量; S_0 为转子悬浮表面积; ρ_r 为空气介质密度; $\dot{\theta}$ 为转子角速度; $C_{d\theta}$ 为气体拖拽系数^[21],可表示为

$$C_{d\theta} = \frac{1}{2} \int_0^R 1.328\pi \sqrt{\nu_a} (\dot{\varphi} r)^{-0.5} dr = 0.885 \sqrt{\nu_a} \left(\frac{4r^2 \dot{\varphi}}{9} \right)^{-0.5} \quad (15)$$

其中 ν_a 为气体运动黏度系数, $\dot{\varphi}$ 为悬浮物体的角速度。

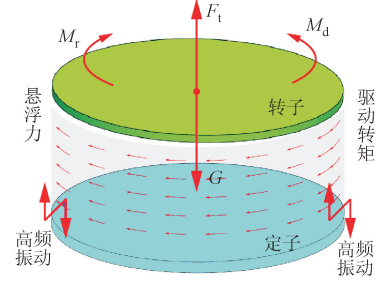
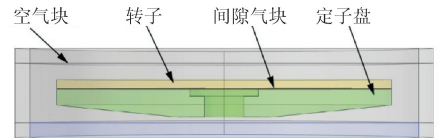


图 4 转子受力分析模型

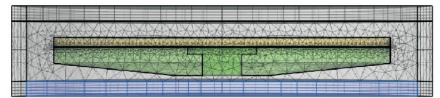
Fig. 4 Force analysis model of rotor

2.2 有限元模型的建立

声流电机的驱动机理问题是电-固-流多场耦合问题,本文采用多物理场分析软件 COMSOL 求解。为降低求解复杂度和计算量,将计算模型简化为定子盘和转子相互作用的模型,如图 5(a)所示。定子盘与转子之间为悬浮间隙气块,其余为空气域;定子盘底面作用有激励位移;固体与气体接触边界为硬声场边界;空气域边界设置为完美匹配层。划分网格后的计算模型如图 5(b)所示。间隙内声流的求解分两步进行,首先在热黏性声学频域模块求解,获得间隙内的声场压力分布,同时获得有效驱动力 $\mathbf{F}_e$;然后进一步在层流模块求解间隙内声流场分布,将 $\mathbf{F}_e$ 添加为体积力,并添加弱贡献提高收敛性。



(a) 计算模型



(b) 网格划分

图 5 声流电机的有限元分析模型

Fig. 5 Finite element analysis model of acoustic streaming motor

3 实验研究及结果分析

3.1 振动特性测试

根据理论设计分析优化的结果,加工声流超声电机原型样机,得到定子盘与转子实物图如图 6 所示。

为了深入分析非接触电机的驱动机理,加工了槽型 1 与槽型 2 两种转子,尺寸对比如表 1 所示。

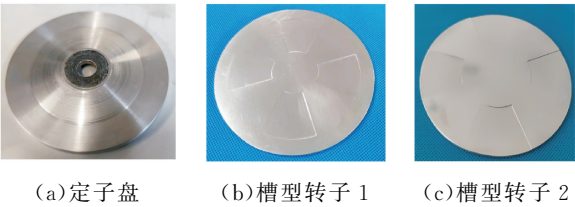


图 6 定子盘与转子实物

Fig. 6 Photograph of stator disk and rotor

表 1 电机转子的尺寸

Table 1 Dimensions of motor rotor

参数	槽型 1	槽型 2
转子厚度/mm	3	3
转子半径/mm	56	56
槽内径/mm	17	26
槽外径/mm	47	56
驱动角度/(°)	45	45
最大槽深/mm	0.3	0.3
质量/g	76.2	70.7

对电机定子的振动特性进行测试,并与有限元分析结果进行对比。首先在定子盘表面撒上一层细沙,然后给压电陶瓷输入激励信号,测试工作频率为定子的共振频率,驱动电压为 990 V。定子盘表面上的细沙经过一段时间振动后会形成一定的图案,即克拉尼图案,该图案能够表征定子盘的振型分布。定子盘端面振型分布有限元与实验的对比结果如图 7 所示。由图可见,定子盘表面形成两个典型的节圆,振型分布及节圆位置的有限元分析结果与实验结果表现出较好的一致性,验证了分析模型的合理性。

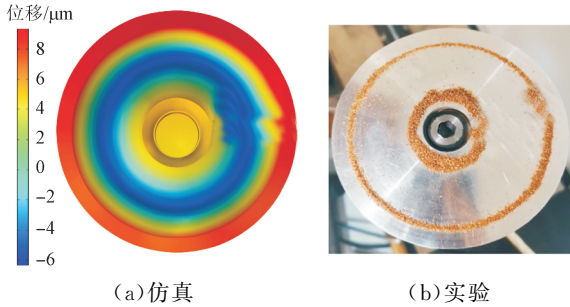


图 7 定子盘振型的仿真和实验结果

Fig. 7 Simulation and experimental results of stator disk vibration mode

对定子的振动特性进行数据采集,并进行傅里叶变换,可获得定子盘表面的振动频率和振动幅值。选

取 3 种不同的驱动电压进行分析,如图 8 所示。由图可知,电机定子的共振频率为 19.5 kHz,驱动电压较大时,定子盘表面可以获得较大的振动幅值。如当驱动电压为 990 V 时,振动幅值仅为 6.4 μm ;而当驱动电压为 1 430 V 时,振动位移可达到 9.8 μm 。定子的振动幅值在谐振频率附近获得最佳值,这与传统超声电机驱动频率在谐振频率附近相一致,因此可以通过改变驱动电压来改善声流超声电机的运转特性。

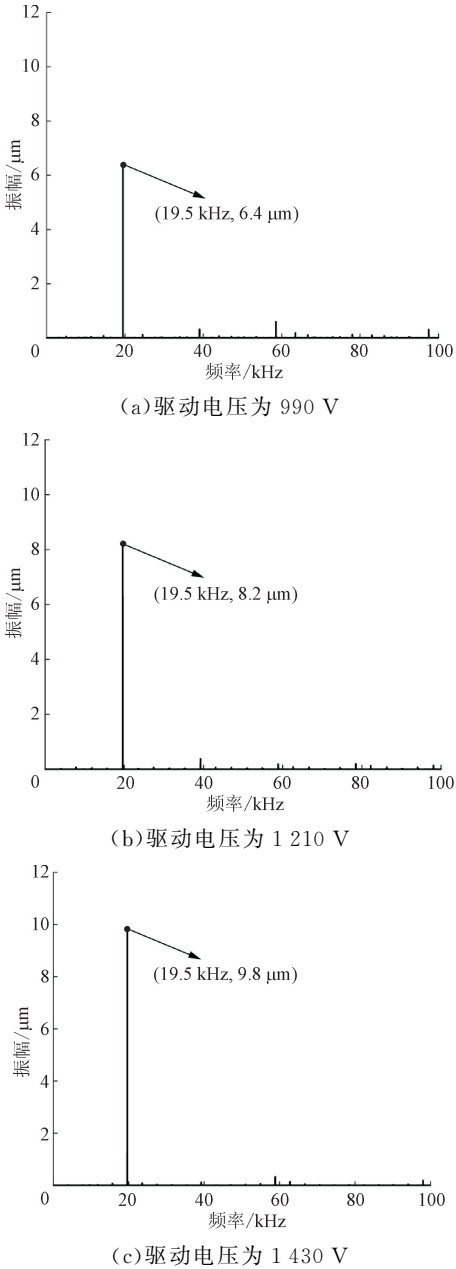


图 8 不同驱动电压下定子振动幅值随频率的变化曲线
Fig. 8 The variation curve of stator vibration amplitude with frequency under different driving voltages

3.2 转动特性测试

为了评估声流超声电机的转动特性,搭建转动

特性测试平台如图 9 所示。实验台主要包括激光位移传感器(基恩士,LK-H020)、控制器、计算机、压电控制器(上海娇成,2SG-SPS9600)、三坐标移动平台和隔震台等。为检验声流超声电机的悬浮特性,开展转子悬浮高度的悬浮过程测试实验,结果如图 10 所示。由图可知,未输入信号时,转子与定子接触;当给压电陶瓷输入激励信号后,转子在很短时间内迅速悬浮,然后稳定悬浮在一定高度,驱动电压越大,悬浮高度越高。转子最终的平均悬浮高度分别为 130、200 μm ,表明转子与定子之间已经完全处于一种非接触的状态。此外,由于定子盘的高频周期性振动,转子的悬浮高度会在平均值附近波动。

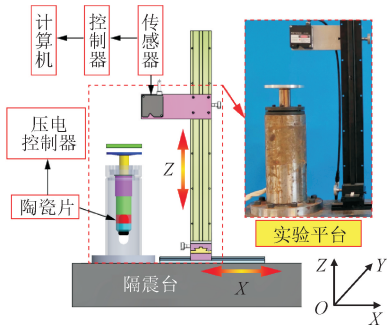


图 9 转动特性测试实验台

Fig. 9 Test platform of rotational characteristics

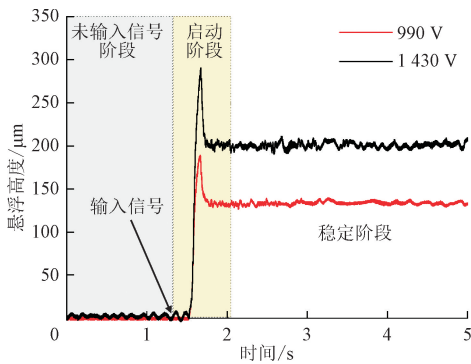


图 10 不同驱动电压下转子悬浮过程

Fig. 10 Levitation process of rotor under different driving voltages

在声辐射转矩的作用下,悬浮后的转子发生旋转,最终达到稳定转速。转速随驱动电压的变化关系曲线如图 11 所示。由图可见,转速随驱动电压的增大而增加,这主要是因为驱动电压增加,定子盘的振动幅值增加,进而导致间隙内的声辐射压力增加,驱动转矩也随之增加,因此可获得较大的转速。对比图 11 中结果可知,相同驱动电压下槽型转子 2 的转速大于槽型转子 1 的。理论计算结果与实验结果具有较好的一致性,但仍存在一定的误差,可能是由

于理论分析是在理想状态下进行的,而实际加工存在一定的误差,且电机定子在运转过程中会产生一定的温度从而影响测试结果,这些因素在理论分析中并未考虑。

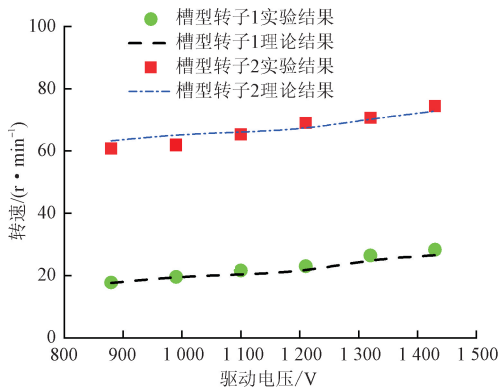


图 11 不同槽型转子转速随驱动电压的变化曲线

Fig. 11 The variation curve of rotation speed with driving voltage of different groove type rotors

3.3 驱动机理分析

为了揭示声流超声马达的驱动机理,将转子底面为光滑表面和刻槽表面的情况进行对比,如图 12 所示。由图可知,当转子底面光滑时,声压值沿圆周方向相同;当转子表面刻槽后,声压发生了明显变化,槽型转子 2 呈现出比槽型转子 1 更大的压力分布,圆周方向整体上表现出 4 个明显的压力峰值,分别对应转子表面上的 4 个槽,圆周方向声压分布的变化将引起间隙内部流体的流动。

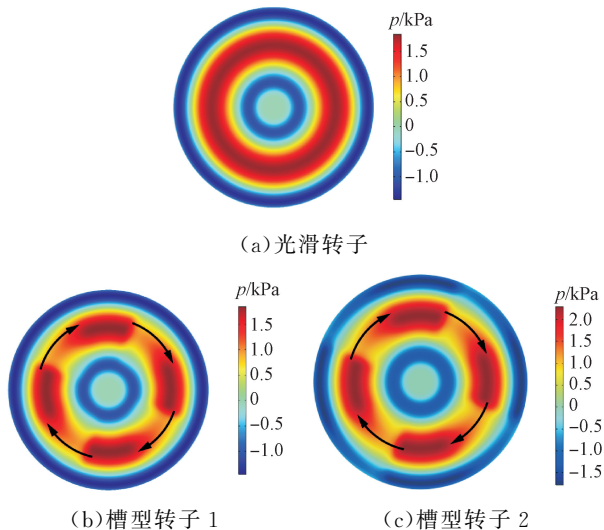


图 12 不同槽型转子的间隙声压分布

Fig. 12 Pressure distribution in the gap of different groove type rotors

图 13 所示为光滑表面和和刻槽表面间隙内的声

流分布,圆周角度为 $0\sim 90^\circ$,包含 1 个刻槽域(图 13 中两条虚线之间的区域),槽位置的起始角为 22.5° ,终止角为 67.5° 。由图可知,光滑表面圆周方向的声流分布为恒定值,且几乎接近 0;而在转子表面刻槽后,声流的分布明显增大且变化剧烈,槽型转子 2 在刻槽域声流速度变化的剧烈程度明显大于槽型转子 1,这与间隙内圆周方向的声压分布有关。光滑表面声压分布恒定,压力变化梯度为 0,故很难在圆周方向形成流体的流动;而刻槽表面圆周方向声压变化剧烈且变化梯度较为一致,易在圆周方向形成流体的流动,因此声流分布变化明显。

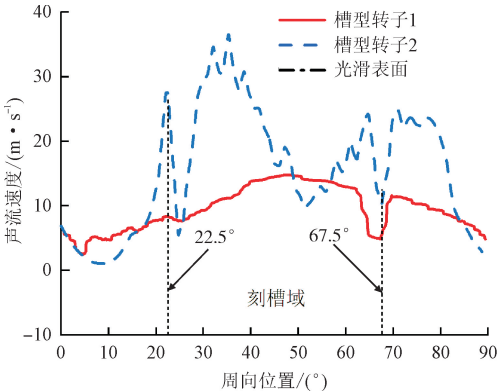
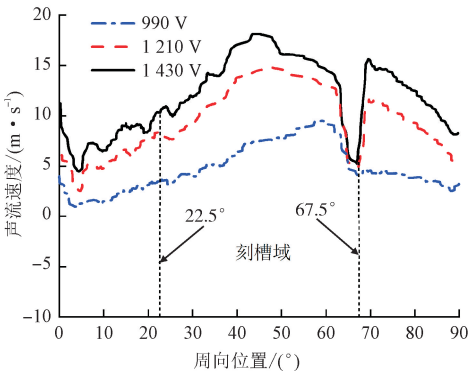


图 13 不同槽型转子的间隙声流分布

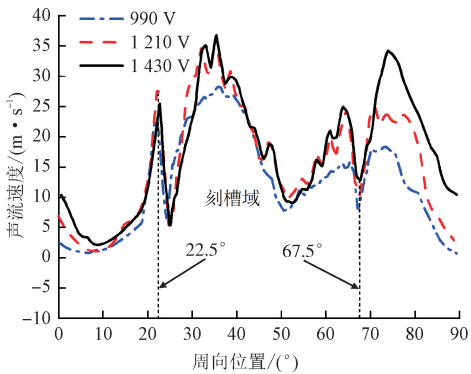
Fig. 13 Acoustic streaming distribution in the gap of different groove type rotors

3.4 声流速度分析

为了进一步深入理解声流超声电机的驱动机理,开展了不同驱动状态下槽型转子 1 和转子 2 的声流速度分析。图 14 给出了不同驱动电压下的声流速度分布,圆周角为 $0\sim 90^\circ$,包含 1 个刻槽域。对比图 14 结果可知,由于槽域位置流体膜厚的变化,声流速度分布发生了一定的突变,且驱动电压较大时声流速度较大,突变越明显。槽型转子 2 声流变化峰值大于槽型转子 1,这是由于间隙内压力分布梯度造成的。



(a)槽型转子 1

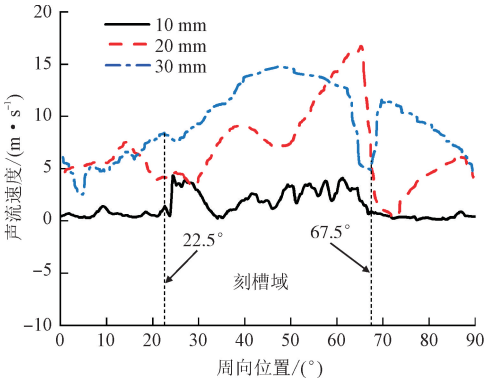


(b)槽型转子 2

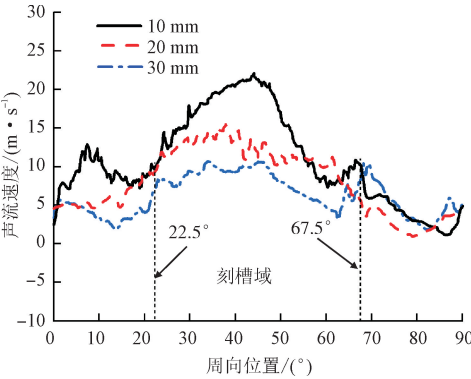
图 14 不同驱动电压下的声流速度分布

Fig. 14 Distributions of acoustic streaming speed under different driving voltages

图 15 给出了不同径向槽宽下的声流速度分布,其中径向槽宽分别为 10、20、30 mm。从整体上看,随着径向槽宽的增加,声流速度可以获得较大值,这可能是由于槽宽增加改变了槽域的面积,有助于圆周方向声压梯度的变化,进而增强了声流速度分布。此外,由图还可以看出,槽宽变小,槽域内的声流速度分布随着周向角度的变化呈现波动剧烈的趋势,且两种槽型转子表现出相似的变化趋势。



(a)槽型转子 1

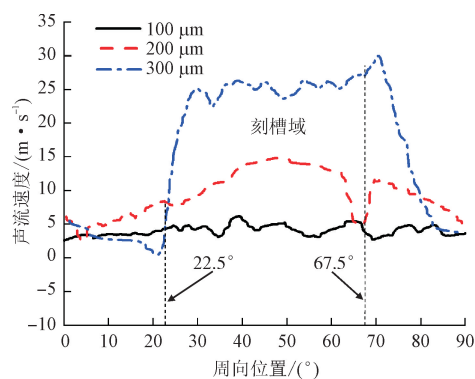


(b)槽型转子 2

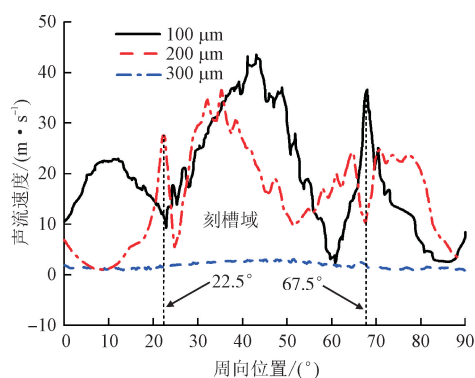
图 15 不同槽宽下的声流速度分布

Fig. 15 Distributions of acoustic streaming speed under different groove widths

图16给出了不同槽深下的声流速度分布。由图可知,当槽深增加时,声流速度在槽域位置处的声压峰值增大,两种槽型转子的声流分布变化相似,这是因为当驱动电压及槽圆周角相同时,随着槽深增加,间隙内气膜的变化率增大,导致声辐射压的变化梯度增加,声流速度随之增加,因此在较大槽深下可以获得较好的射流速度和转速,但并不是越大越好,因为槽深较大不利于间隙内声辐射压力的形成,一定程度上会降低声压幅值,影响转子的悬浮效果。



(a) 槽型转子 1



(b) 槽型转子 2

图16 不同槽深下的声流速度分布

Fig. 16 Distributions of acoustic streaming speed under different groove depths

4 结 论

为解决传统超声电机定子与转子表面存在严重摩擦磨损导致系统性能降低的问题,本文基于声流原理,提出了一种新的非接触声流超声电机,并对声流超声电机进行了系统的理论分析与实验研究,得到的主要结论如下。

(1)提出了一种基于声流的新型非接触超声电机,通过转子底面的人工槽使圆周方向形成变化的压力梯度,进而在间隙内形成了声辐射力和声辐射转矩,成功实现了转子的悬浮和转动。

(2)建立了悬浮间隙介质流体分析模型,并采用有限元法进行求解,分析了声流电机的运转特性,揭示了声流超声电机的驱动机理。

(3)开展了声流超声电机振动和转动特性实验,结果表明:定子盘截面振型呈现明显的W型;转速随驱动电压的增加而增加;改变槽深和槽宽能够改变声流速度,增强转动特性。

后续研究中,将对声流电机结构尺寸参数进行优化并进行控制研究,从而进一步提升电机性能。

参考文献:

- [1] ZHAO Chunsheng. Ultrasonic motors: technologies and applications [M]. Berlin, Germany: Springer, 2011.
- [2] WANG Le, WANG Liang, LIN Yuyang, et al. Transfer matrix model and experimental validation for a radial-torsional ultrasonic motor [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 160: 107897.
- [3] 张百亮, 姚志远, 刘振, 等. 一种L形大推力板结构直线超声电机 [J]. 西安交通大学学报, 2018, 52(9): 37-44.
- [4] ZHANG Bailiang, YAO Zhiyuan, LIU Zhen, et al. An L-shaped plate type linear ultrasonic motor with large thrusts [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2018, 52(9): 37-44.
- [5] 刘英想, 姚郁, 陈维山, 等. 纵振复合双足直线超声电机 [J]. 西安交通大学学报, 2012, 46(8): 111-115.
- [6] LIU Yingxiang, YAO Yu, CHEN Weishan, et al. double-foot linear ultrasonic motor with longitudinal transducers [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2012, 46(8): 111-115.
- [7] LIU Yingxiang, LIU Junkao, CHEN Weishan, et al. A U-shaped linear ultrasonic motor using longitudinal vibration transducers with double feet [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2012, 59(5): 981-989.
- [8] YU Hongpeng, QUAN Qiquan, TIAN Xinqi, et al. Optimization and analysis of a U-shaped linear piezoelectric ultrasonic motor using longitudinal transducers [J]. Sensors, 2018, 18(3): 809.
- [9] TIAN Xinqi, LIU Yingxiang, DENG Jie, et al. A review on piezoelectric ultrasonic motors for the past decade: classification, operating principle, performance, and future work perspectives [J]. Sensors and Actuators: A Physical, 2020, 306: 111971.
- [10] YANG Lin, REN Weihao, MA Chengcheng, et al. Mechanical simulation and contact analysis of the hybrid longitudinal-torsional ultrasonic motor [J].

- Ultrasonics, 2020, 100: 105982.
- [9] 石胜君,姚郁,陈维山,等. 具有模态解耦构型的纵弯直线超声电机[J]. 西安交通大学学报, 2010, 44(8): 101-105.
- SHI Shengjun, YAO Yu, CHEN Weishan, et al. Longitudinal and bending hybrid linear ultrasonic motor with modal decoupling structure[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2010, 44(8): 101-105.
- [10] RYNDZIOŃEK R, SIENKIEWICZ Ł. A review of recent advances in the single-and multi-degree-of-freedom ultrasonic piezoelectric motors[J]. Ultrasonics, 2021, 116: 106471.
- [11] LIU Yingxiang, YAN Jipeng, WANG Liang, et al. A two-DOF ultrasonic motor using a longitudinal-bending hybrid sandwich transducer[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(4): 3041-3050.
- [12] YAO K, KOC B, UCHINO K. Longitudinal-bending mode micromotor using multilayer piezoelectric actuator[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2001, 48(4): 1066-1071.
- [13] QU Huajie, LIU Chendong, ZHANG Lei, et al. A longitudinal-bending hybrid linear ultrasonic motor and its driving characteristic[J]. Shock and Vibration, 2022, 2022: 5701014.
- [14] 梁得亮,褚帅君,贾少锋,等. 高温高速永磁电机关键技术研究综述[J]. 西安交通大学学报, 2022, 56(10): 31-48.
- LIANG Deliang, CHU Shuaijun, JIA Shaofeng, et al. Overview of research on key technology of high-temperature and high-speed permanent magnet machine[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2022, 56(10): 31-48.
- [15] 范佩樟,刘凌,靳东松,等. 永磁同步电机的无差拍电流预测控制优化算法[J]. 西安交通大学学报, 2023, 57(4): 29-38.
- FAN Peizhang, LIU Ling, JIN Dongsong, et al. Optimization algorithm of deadbeat current predictive control for permanent magnet synchronous motor[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2023, 57(4): 29-38.
- [16] 王波,耿海鹏,杜廷琛. 磁悬浮永磁同步电机转子系统的参数辨识与控制[J]. 西安交通大学学报, 2023, 57(3): 106-116.
- WANG Bo, GENG Haipeng, DU Tingchen. Parameter identification and control of rotor system of maglev permanent magnet synchronous motor[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2023, 57(3): 106-116.
- [17] DING Qingjun, ZHANG Yudan, ZHAO Gai, et al. Properties of POB reinforced PTFE-based friction material for ultrasonic motors[J]. Journal of Polymer Engineering, 2017, 37(7): 681-687.
- [18] LI Song, ZHANG Nan, YANG Zenghui, et al. Tailoring friction interface with surface texture for high-performance ultrasonic motor friction materials[J]. Tribology International, 2019, 136: 412-420.
- [19] HIROSE S, YAMAYOSHI Y, ONO H. A small non-contact ultrasonic motor[C]//1993 Proceedings IEEE Ultrasonics Symposium. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1993: 453-456.
- [20] HU Junhui, NAKAMURA K, UEHA S. An analysis of a noncontact ultrasonic motor with an ultrasonically levitated rotor[J]. Ultrasonics, 1997, 35(6): 459-467.
- [21] SHI Minghui, LIU Xuejiang, FENG Kai, et al. Experimental and numerical investigation of a self-adapting non-contact ultrasonic motor[J]. Tribology International, 2021, 153: 106624.
- [22] STEPANENKO D A, MINCHENYA V T. Development and study of novel non-contact ultrasonic motor based on principle of structural asymmetry[J]. Ultrasonics, 2012, 52(7): 866-872.
- [23] 季叶,赵淳生. 一种具有高转速的新型非接触式超声电机[J]. 压电与声光, 2006, 28(5): 527-529, 533.
- JI Ye, ZHAO Chunsheng. A new type non-contact ultrasonic motor with higher revolution speed[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2006, 28(5): 527-529, 533.
- [24] HU Junhui, LI Guorong, CHAN H L W, et al. A standing wave-type noncontact linear ultrasonic motor[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control, 2001, 48(3): 699-708.
- [25] 陈超,李繁,严小军,等. 非接触式球形转子压电作动器的研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(6): 163-169.
- CHEN Chao, LI Fan, YAN Xiaojun, et al. Study on non-contact piezoelectric actuators with spherical rotors[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(6): 163-169.
- [26] YANG Bin, LIU Jingquan, CHEN Di, et al. Theoretical and experimental research on a disk-type non-contact ultrasonic motor[J]. Ultrasonics, 2006, 44(3): 238-243.
- [27] 夏长亮,史婷娜,胡俊辉,等. 基于液体媒质的非接触型超声波电机理论与实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(8): 64-67.
- XIA Changliang, SHI Tingna, HU Junhui, et al. Study on theory and experiment of non-contact type

- ultrasonic motor with fluid medium [J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(8): 64-67.
- [28] 夏长亮, 俞卫, 李斌, 等. 基于有限元法的液体媒质超声波电机内部声流场分析及饱和流速研究 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(18): 143-147.
- XIA Changliang, YU Wei, LI Bin, et al. FEM analyses on acoustic streaming field and saturated flow velocity of ultrasonic motor driving fluid directly [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(18): 143-147.
- [29] BRUUS H. Acoustofluidics 2: perturbation theory and ultrasound resonance modes [J]. Lab on a Chip, 2012, 12(1): 20-28.
- [30] WADA Y, KOYAMA D, NAKAMURA K. Finite-element analysis of acoustic streaming generated between a bending transducer and a reflector through second-order approximated forces [J]. Acoustical Science and Technology, 2013, 34(5): 322-331.
- [31] SCHWARZ T, HAHN P, PETIT-PIERRE G, et al. Rotation of fibers and other non-spherical particles by the acoustic radiation torque [J]. Microfluidics and Nanofluidics, 2015, 18(1): 65-79.
- (编辑 李慧敏 刘杨)