

DOI: 10.3901/JME.2022.15.233

利用偏心转子实现转速与驱动频率一致的高速压电马达研究^{*}

潘巧生^{1,2} 赵明飞^{1,2} 李 晨^{1,2} 黄梓良^{1,2} 陈立蔚^{1,2} 王 雅^{1,2}

(1. 合肥工业大学仪器科学与光电工程学院 合肥 230009;
2. 测量理论与精密仪器安徽省重点实验室 合肥 230009)

摘要: 现有的压电马达主要利用摩擦耦合实现运动输出,通过累计小角度(位移)实现连续旋转(直线)运动,难以应用于高速需求场合。设计了一种转速与频率一致的压电马达,利用轴承将定子强迫振动的能量馈入偏心转子,定子振动一个周期,转子旋转一周,从而实现压电马达高速输出。建立压电马达的动力学模型,理论分析该驱动机制下压电马达系统振动传递规律以及损耗与输入能量的关系。提出将转子的部分质量转移到定子中以进一步提升转速,建立质量转移后系统振动力学模型,分析质量转移后偏心转子转速以及轴承的能量损耗。搭建有质量转移和无质量转移两种压电马达样机,实验测试两种样机的速度特性,结果表明,质量转移后马达的最大输出速度获得进一步提升,最高输出速度达到 11 460 r/min,相比质量转移前速度提升了 25.7%,该原理高速压电马达有望用于飞轮储能、离心分离等需要高速运动的应用场合。

关键词: 压电马达; 受迫振动; 高速; 质量转移; 相位调节

中图分类号: TH703

Research on High Speed Piezoelectric Motor with Eccentric Rotor Which Speed Is Equal to the Driving Frequency

PAN Qiaosheng^{1,2} ZHAO Mingfei^{1,2} LI Chen^{1,2} HUANG Ziliang^{1,2}
CHEN Liwei^{1,2} WANG Ya^{1,2}

(1. School of Instrument Science and Optoelectronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009;
2. Anhui Province Key Laboratory of Measuring Theory and Precision Instrument, Hefei 230009)

Abstract: The existing piezoelectric motors mainly use frictional coupling to achieve motion output and continuous rotational (linear) motion by accumulating small angles (displacements), which is difficult to apply to high speed demand situations. A piezoelectric motor with the same speed and frequency is proposed, using bearings to feed the energy from the forced stator vibration into the eccentric rotor, while the stator vibrates for one cycle and the rotor rotates for one week, thus realizing the high speed output of the piezoelectric motor. Proposes to transfer part of the mass of the rotor into the stator to increase the speed. The dynamics of the piezoelectric motor before and after mass transfer is established, and the vibration transfer law and energy relations are analyzed. Two piezoelectric motor prototypes are built with or without mass transfer, and the speed characteristics of both prototypes are tested experimentally. The results show that the maximum output speed of the motor is further increased after mass transfer, with a maximum output speed of 11 460 r/min, which is 25.7% higher than the speed before mass transfer. The motor is expected to be used in flywheel energy storage system, high-speed centrifugal filtration system and other applications requiring high speed motion.

Key words: piezoelectric motor; forced vibration; high speed; quality transfer; phase adjustment

^{*} 国家自然科学基金(51705124, 52175533), 安徽省重点研发计划(202104h04020025)以及高校基本科研业务费(PA2021KCPY0049)资助项目。20210807 收到初稿, 20220321 收到修改稿

0 前言

压电马达是利用压电材料的逆压电效应实现电能向机械能转换的一种能量转化装置^[1-3]。与传统的电磁马达相比,压电马达具有结构紧凑、输出功率高、响应速度快、无电磁干扰等优点,目前主要应用于航空航天、精密定位、智能机器人等领域^[4-6]。然而现有的压电马达主要利用摩擦耦合,通过累积小角度(位移)实现连续旋转(直线)运动,存在速度低,损耗大和效率低等缺点,只能在一些低速和低功率场合中应用。而在高速应用如飞轮储能,离心分离等场合,压电驱动技术依然是空白,因此提升压电马达的输出速度和输出功率研究一直是学界的一个重要方向。

根据工作频率不同,压电马达可分为超声马达、准静态马达和谐振与准静态结合马达^[7-9]。超声马达工作在较高的频率下,具有响应速度快、输出功率大等优点^[10],刘英想团队基于夹心换能器设计的超声马达工作速度高达 110 r/min^[11]。AOYAGI 等提出了一种多模组合式超声电机,转速达到 9 000 r/min^[12],但超声马达的接触面容易磨损和发热,高速下工作寿命较低。

准静态马达的工作效率和工作寿命相对于超声马达较高但是速度低^[13],许多学者为提高准静态马达的速度做了大量工作,例如程光明团队在非对称夹持的基础上提出一种具有偏置结构的非对称压电旋转驱动器,在 23 Hz 驱动频率下最大角速度为 5.39 rad/s^[14],曲建俊团队在蠕动式直线驱动器的基础上引入三角放大结构,设计的压电驱动器在 70 Hz 驱动频率下速度为 0.43 mm/s^[15],刘向锋团队采用压电双晶片设计的新型压电驱动器,在 200 Hz 驱动频率下最高转速为 99.67 r/min^[16]。然而上述马达较低的工作频率和摩擦耦合驱动的特性还是极大地限制了输出速度。近年来出现了几种结合谐振和准静态压电马达优点的新型压电马达^[17-19],这些设计在一定程度上提高了压电马达的输出性能,然而没有从根本上解决压电马达速度低、磨损大等问题。部分学者为了降低压电马达定子和转子之间的摩擦界面磨损,提出并研究了利用电磁场^[20]、电流变流体^[21]等作为摩擦介质的新型压电电机,避免了定子和转子之间的摩擦力并提高了压电马达的输出速度,但是这类压电马达普遍结构复杂,工作稳定性较差。

为了摆脱压电马达对摩擦力的依赖,本团队提出基于偏心转子受迫振动的压电马达^[22-24],从原理上实现高速压电马达。在前期研究的基础上,本文

拟深入探索压电马达中定子与偏心转子的运动机理以及能量关系,建立其工作过程中的动力学模型,根据质量转移思想设计了两套偏心转子压电马达样机,并通过实验对其性能进行对比研究。本文还进一步研究了转子旋转频率与压电振子驱动信号之间的相位关系,并设计相应的相位调节装置,在马达启动后通过调节驱动信号的相位研究其对压电马达输出速度的影响。

1 工作原理

本研究提出的高速压电马达主要由一对定子和偏心转子组成,其中每个定子均由两个相互垂直的压电振子通过柔性铰链与轴承座以及轴承连接组成,压电振子由自制压电叠堆和位移放大机构组成,偏心转子一端与直流电机连接,另一端粘贴有两枚磁铁,左侧正交固定一对霍尔传感器,如图 1 所示。

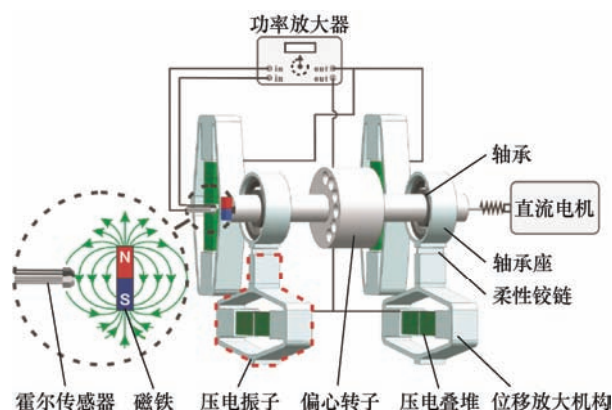


图 1 压电马达结构图

当偏心转子开始旋转时,磁铁产生变化的磁场,两个霍尔传感器在磁场的作用下可产生相位差 90° 的两路频率与转子旋转频率一致正弦波信号,经放大后分别传输到两个压电振子上作为压电叠堆的驱动信号。在压电振子作用下,偏心转子逆时针旋转运动时四个典型时刻最佳受力示意图如图 2 所示,两路相位差为 90° 的正弦驱动信号,两个压电振子在正弦驱动信号作用下高频振动提供圆周力,通过轴承驱动转子旋转运动,具体工作过程如下:

在 $t_0 < t < t_1$ 时,在正弦驱动信号的作用下侧面压电振子的驱动电压为负,位移放大机构舒张向右推动转子,此时偏心转子的质心位置沿逆时针方向由底部向右旋转。

在 $t_1 < t < t_2$ 时,底面压电振子的驱动电压为负,位移放大机构舒张向上推动转子,此时偏心转子的质心位置沿逆时针方向由右部向上旋转。

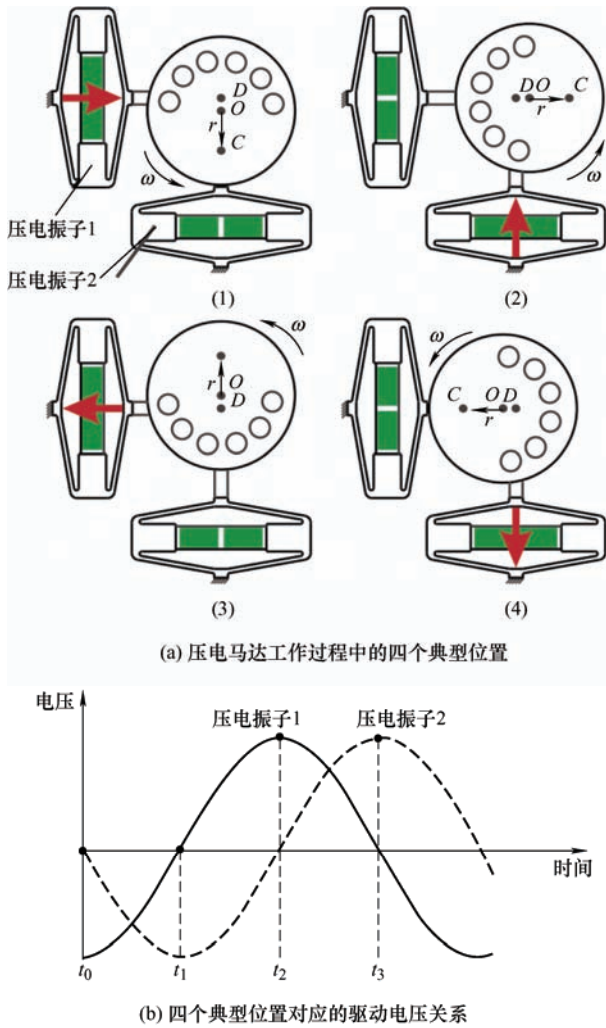


图2 压电马达工作过程示意图

在 $t_2 < t < t_3$ 时, 侧面压电振子的驱动电压为正, 位移放大机构收缩向左拉动转子, 此时偏心转子的质心位置沿逆时针方向由上部向左旋转。

在 $t_3 < t < t_4$ 时, 底面压电振子的驱动电压为正, 位移放大机构收缩向下拉动转子, 此时偏心转子的质心位置沿逆时针方向由左部向下旋转, 直至 $t = t_4$, 压电振子完成了一个周期的作动。

由此可以看出, 当压电马达在 $t_0 - t_4$ 的一个周期内, 压电振子振动一个周期, 偏心转子也旋转一周, 因此该压电马达的转速与压电振子的振动频率完全一致。

在 $t_3 < t < t_4$ 时, 底面压电振子的驱动电压为正, 位移放大机构收缩向下拉动转子, 此时偏心转子的质心位置沿逆时针方向由左部向下旋转, 直至 $t = t_4$, 压电振子完成了一个周期的作动。

由此可以看出, 当压电马达在 $t_0 - t_4$ 的一个周期内, 压电振子振动一个周期, 偏心转子也旋转一周, 因此该压电马达的转速与压电振子的振动频率完全一致。由于在低频时压电叠堆输出能量不足以

实现偏心转子的连续旋转, 所以需要外接一个直流电机作为启动电机, 偏心转子在直流电机的拖动下启动, 并且转速提高至一定转速后, 压电叠堆馈入转子的能量足以替代直流电机时, 即可完成马达的启动。

2 压电马达建模与仿真

建立偏心转子压电马达系统的一阶振动力学模型如图3所示, 将马达定子简化为弹簧-阻尼系统, 将偏心转子简化为质量为 m_0 , 偏心距为 r , 偏心质量为 m_r 的偏心转盘, 固定于刚性轴中间做旋转运动, F_{in} 为定子通过轴承输入到转子的作用力, f 为转子转动时轴承所产生的摩擦力。偏心转子的质心为点 C 处, 形心为点 D 处。当偏心转子静止时, D 点与旋转中心 O 点重合。

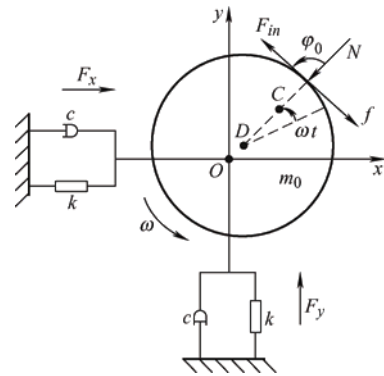


图3 压电马达一阶振动力学模型

2.1 系统能量分析

压电马达工作时, 压电叠堆需要不断向系统馈入能量以抵消轴承等摩擦损耗, 并维持转子匀速旋转输出。当直流电机拖动偏心转子旋转速度为 ω 时, 以压电定子 x 方向上振动为例, 根据质心定理, 建立定子振动微分方程

$$m_0 \ddot{x} + c \dot{x} + kx = m_0 \omega^2 r \cos(\omega t) - F_{in} \cos(\omega t + \varphi_0) \quad (1)$$

式中, φ_0 为驱动电压初始相位, 与霍尔传感器的位置有关, 在确定了转动方向后, φ_0 的变化范围为: $0^\circ \leq \varphi_0 \leq 180^\circ$ 。基于式(1)得到偏心转子形心的运动轨迹响应

$$x = \frac{m_0 \omega^2 r}{k} \beta \cos(\omega t - \varphi) - \frac{K_P U}{k} \beta \cos(\omega t + \varphi_0 - \varphi) \quad (2)$$

$$\text{式中 } \omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad \lambda = \frac{\omega}{\omega_n}, \quad \zeta = \frac{c}{2m\omega_n},$$

$$\beta = \frac{1}{\sqrt{(1 - \lambda^2)^2 + (2\zeta\lambda)^2}}, \quad \varphi = \arctan\left(\frac{2\zeta\lambda}{1 - \lambda^2}\right), \text{ 其中 } \omega_n$$

为转子做横向自由振动时系统的固有频率。

结合式(1)和式(2)可求得一个周期内压电振子输出力对压电马达系统做的功

$$W_{in} = 2 \frac{m_0 \omega^2 r}{k} \beta \pi K_p U \sin(\varphi_0 + \varphi) - 2(K_p U)^2 \frac{\beta \pi}{k} \sin \varphi \quad (3)$$

压电马达在工作中损耗包括压电叠堆阻尼、轴承中的阻尼、位移放大机构阻尼以及直流电机作为负载时的阻尼等等,本文计算中认为阻尼力与系统的振动速度成正比,且 x 和 y 方向振动的阻尼系数相等均为 c ,计算阻尼在一个周期内总损耗 W_c 如下

$$W_c = 2\pi c \omega \beta^2 \left[\left(\frac{m_0 \omega^2 r}{k} \right)^2 - 2 \frac{m_0 \omega^2 r \cdot K_p U}{k^2} \cos \varphi_0 + \left(\frac{K_p U}{k} \right)^2 \right] \quad (4)$$

由式(4)可以看出 W_c 与阻尼系数 c 成正比,还与压电振子振动频率即偏心转子旋转速度 ω 以及电压 U 成正相关。当电压增大,马达的速度升高的同时阻尼损耗也增大,因此高频旋转时阻尼损耗会相比低频旋转时大大提高。对式(4)进行求导分析可得当 $\varphi_0 = \pi/2$ 时定子向转子提供的能量最大,此时根据式(3)和式(4)可以得到压电振子输入功率和阻尼损耗功率分别为

$$P_{in} = f W_{in} = \omega \frac{m_0 \omega^2 r}{k} \beta K_p U \quad (5)$$

$$P_c = f W_c = c \omega^2 \beta^2 \left[\left(\frac{m_0 \omega^2 r}{k} \right)^2 + \left(\frac{K_p U}{k} \right)^2 \right] \quad (6)$$

在 $\varphi_0 = \pi/2$ 的初始相位条件下得到压电马达系统输入功率 P_{in} 与阻尼损耗功率 P_c 在不同工作电压下随激励频率变化的归一化规律曲线如图 4 所示。图中可以看出在 0~200 Hz 激励频率下,压电马达系统输入功率与阻尼损耗功率均随着工作频率的提高而提高,且增长速率越来越大。

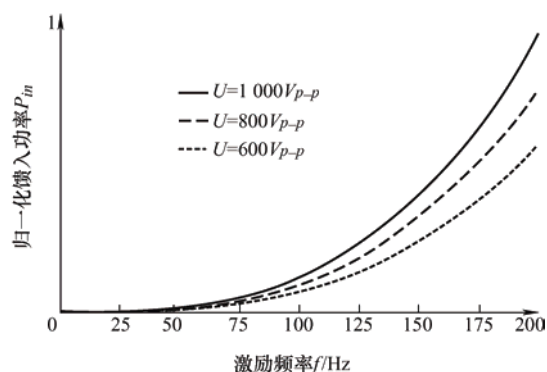
压电马达启动时转子在直流电机的带动下工作频率逐渐提升,压电振子的输入功率随转子的工作频率一起提升直至与系统阻尼的损耗功率达到平衡,令此时压电振子的输入功率为最低启动功率 P_{min} 。系统阻尼损耗以轴承损耗为主,单个滚动轴承内圈损耗计算如下

$$P = 0.5 \mu F D \omega \quad (7)$$

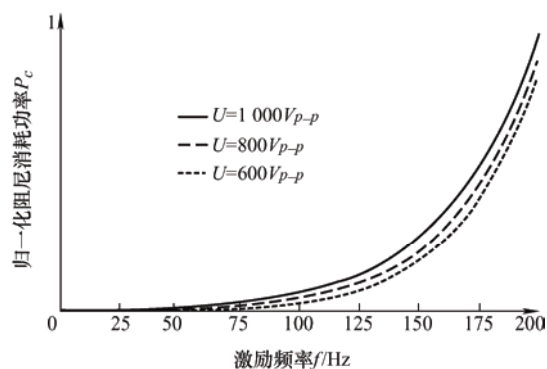
$$F = m \omega^2 r \quad (8)$$

式中, μ 为摩擦系数; F 为轴承所受偏心力; D 为滚珠所在位置的直径; ω 为轴承转动频率。为了简化

研究,假定最低启动功率 P_{min} 时轴承的损耗功率为 10 W,根据式(7)可得在偏心转子在压电振子最低启动功率下的启动工作频率 f_s 。本文设计的压电马达定子结构可承受最大偏心力 F_{max} 约为 680 N,根据式(8)得到压电马达的最高工作频率 f_{max} 。图 5 为本文设计的压电马达转子的工作区域,其中虚线表征压电马达工作频率与偏心力 F 之间关系,其与最低启动功率 P_{min} 曲线以及最大偏心力围成的灰色区域为本文设计的压电马达转子的可工作区域,根据图 5 还可以看出该偏心转子的工作频率范围为 86.9~176.2 Hz。



(a) 不同驱动电压下输入功率 P_{in} 与激励频率 f 关系



(b) 不同驱动电压下阻尼损耗功率 P_c 与激励频率 f 关系

图 4 压电马达系统功率分析

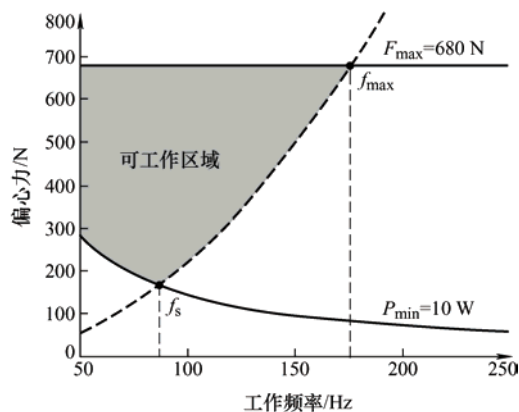
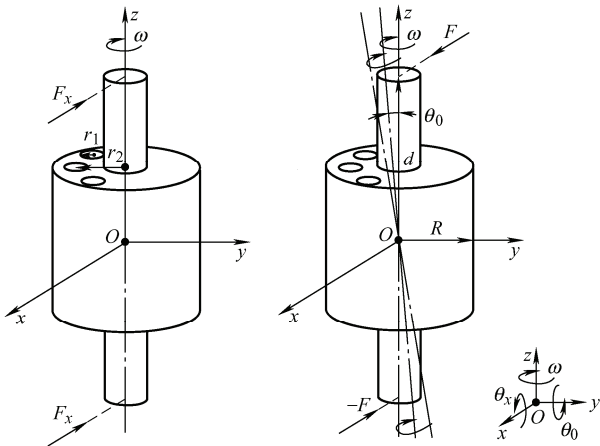


图 5 压电马达工作频率范围示意图

2.2 偏心转子稳定性分析

围绕偏心转子建立 $Sxyz$ 坐标系如图 6 所示, 其中坐标原点在转子的几何中心 O 点, z 轴在两径向轴承中心连线上。转子的质量为 m_0 , 空心部分挖去的质量为 m_r , 转动角速度为 ω , 转子转动正方向分别为 θ_x 、 θ_y 和 ω 。偏心转子在正常工作时会受到定子输出力 F_x 的作用, 如图 6a 所示, 此时可以得到转子动量 P 在短时间内改变量 $\Delta P = \int F_x dt$, 根据牛顿定律转子将从初始位置开始以 $\Delta P/m$ 的速度沿着作用力的方向运动, 此时转子各旋转自由度之间不会发生耦合。然而实际的偏心转子转动过程中, 偏心转子的制造与安装误差等现象不可避免, 这些因素会引起转动过程产生不平衡力矩, 如图 6b 所示。为分析该不平衡力矩对转子的影响, 假定该不平衡力矩沿 y 轴的正方向, 该力矩 M 由一对力偶 $(F, -F)$ 产生。



(a) 定子作用下偏心转子的运动 (b) 不平衡力矩下偏心转子的运动

图 6 偏心转子运动分析

当转子以角速度 ω 绕转子主轴 z 转动时, 偏心转子的转动惯量以及初始动量矩为

$$\begin{cases} J_z = \frac{1}{2}(m_0 + m_r)R^2 - m_r(r_1^2 + \frac{1}{2}r_2^2) \\ L_0 = \frac{1}{2}\omega(m_0 + m_r)R^2 - \omega m_r(r_1^2 + \frac{1}{2}r_2^2) \end{cases} \quad (9)$$

开始时, 转子绕 z 轴做定轴转动, 在不平衡力矩的作用下转子会沿力矩方向绕 y 轴转动 θ_0 角度并引起初始动量矩 L_0 变化为冲击后的动量矩 L_1 并使动量矩的方向发生了一定程度的改变, 动量矩的改变量 $\Delta L = \int M dt$, 由动量矩守恒定律可知, 转子会受到一个大小与 ΔL 相同, 方向相反的惯性力矩的作

用, 这个惯性力矩被称为陀螺力矩, 由转子动力学推导可知陀螺力矩为

$$M = -\frac{1}{2}\omega\dot{\theta}_0(m_0 + m_r)R^2 + \omega\dot{\theta}_0 m_r(r_1^2 + \frac{1}{2}r_2^2) \quad (10)$$

由上面分析可以看出, 压电振子输出力只会使转子沿垂直于转轴的方向平移, 旋转自由度不会发生耦合; 不平衡力矩干扰则会使转子产生陀螺力矩, 使得转子两个转动自由度 θ_x 和 θ_y 相互耦合, 增大轴承的损耗。

2.3 质量转移理论

为了进一步提升压电马达输出速度的因素, 分析定子各部分质量对压电马达输出特性的影响, 对上文中建立的一阶振动力学模型优化建模, 将定子细分后建立压电振子和轴承座的二阶振动力学模型如图 7 所示。

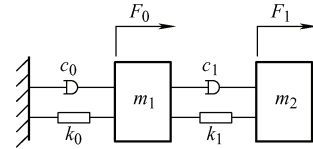


图 7 压电振子二阶振动力学模型

模型图中 m_1 和 m_2 分别为压电振子和轴承座的质量, 假设位移放大机构的刚度远小于叠堆的刚度, k_0 为压电振子中位移放大机构的纵向刚度, k_1 为轴承座的拉伸刚度, c_0 和 c_1 分别为位移放大器 and 轴承座的等效阻尼系数。定子的轴承座和压电振子在 x 方向上的位移分别为 x_0 和 x_1 , F_0 和 F_1 是轴承座和压电振子所受力在 x 方向上的分量

$$F_0 = -F_p \sin(\omega t + \varphi_0) \quad (11)$$

$$F_1 = -m_0 \omega^2 e \sin(\omega t) + F_{in} \sin(\omega t + \varphi_0) \quad (12)$$

压电定子的机械模型矩阵方程为

$$\begin{pmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{x}_0 \\ \ddot{x}_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} c_0 + c_1 & -c_1 \\ -c_1 & c_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{x}_0 \\ \dot{x}_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} k_1 + k_0 & -k_1 \\ -k_1 & k_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_0 \\ x_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_0 \\ F_1 \end{pmatrix} \quad (13)$$

根据前文可知, 当定子馈入转子的力与转子质心的转速方向一致时 ($\varphi_0 = \pi/2$), 定子向转子提供能量的功率最大, 根据式(11)~式(13)可以得到在 x 方向上压电振子的位移 x_0 和轴承座 x_1 位移分别为

$$x_0 = \frac{[(F_p U \cos(\omega t))(k_1 - \omega^2 m^2) + (-m_0 \omega^2 e \sin(\omega t) - F_{in} \cos(\omega t))k_1]}{(k_1 + k_0 - \omega^2 m_1)(k_1 - \omega^2 m_2) - k_1^2} \quad (14)$$

$$x_1 = \frac{[(F_p U \cos(\omega t))(k_1) + (-\omega^2 m_0 e \sin(\omega t) - F_{in} \cos(\omega t))(k_1 + k_0 - \omega^2 m_0)]}{(k_1 + k_0 - \omega^2 m_1)(k_1 - \omega^2 m_2) - k_1^2} \quad (15)$$

定子到转子一个周期的总输入功率为

$$P_{in} = \frac{(k_1 + k_0 - \omega^2 m_1)m_0 \omega^3 e F_{in}}{[(k_1 + k_0 - \omega^2 m_1)(k_1 - \omega^2 m_2) - k_1^2]} \quad (16)$$

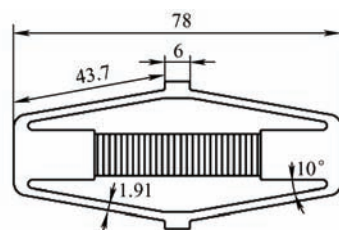
为了保证压电马达的正常启动,压电振子的输入功率 P_{in} 需要克服系统阻尼损耗功率,即满足最低启动功率 P_{min} 。由式(14)可以看出,当偏心转子质量 m_0 减小时会提高偏心转子的工作频率;增加轴承座质量 m_2 则会增大压电振子的输入功率 P_{in} , 进一步提升偏心转子的旋转频率。系统阻尼的损耗以轴承损耗为主,根据式(7)和式(8)可知,轴承的磨损与转子的质量 m_0 以及旋转频率 ω 成正比,质量转移后偏心转子的质量减小,在相同旋转频率下轴承所受偏心力减小,轴承的损耗也相对减小。随着偏心转子旋转频率的提升,系统阻尼损耗不断增加直至与定子的输入功率达到新的平衡,最终偏心转子在新的旋转频率下稳定工作。

3 结构设计

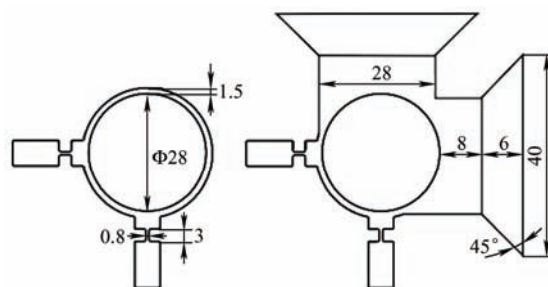
设计了质量转移前后的两套高速压电马达样机,样机的组成部件包括定子,偏心转子,反馈信号处理电路及调相装置。

3.1 定子和转子的构型设计

定子作为马达的供能部件,其刚度和质量均影响转子的输入功率大小,在一定电压驱动下输出的位移由轴承传递至偏心转子中。本研究所设计的定子主要包括压电叠堆,位移放大机构,轴承座以及滚动轴承。压电叠堆由多层 PZT 自制而成,位移放大机构材料为弹簧钢 65Mn,轴承座材料为钛合金(TC4),根据是否包含质量转移结构设计了两套轴承座。位移放大机构和轴承座的尺寸如图 8 所示。



(a) 位移放大机构尺寸(mm)



(b) 轴承座模型及尺寸(mm)

图 8 定子模型及尺寸

3.2 转子设计

六孔偏心转子的材料为 304 不锈钢,根据是否包含质量转移结构设计了两套转子,偏心转子的尺寸如图 9 所示。

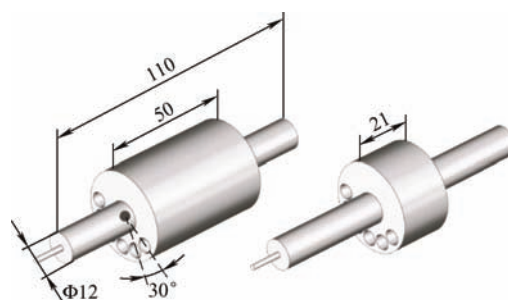


图 9 转子模型及尺寸(mm)

利用有限元分析软件 ANSYS 对偏心转子进行的模仿仿真分析结果,分析结果如图 10 所示,偏心转子的一阶弯曲振动频率为 7 548.1 Hz,远高压电马达工作频率范围 86.9~176.2 Hz,因此偏心转子在高速旋转过程中依然保持刚性。

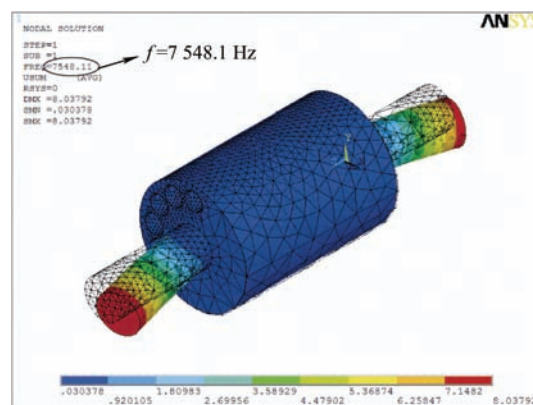


图 10 转子模态分析

3.3 反馈信号处理电路及调相装置

霍尔传感器的输出信号经过功率放大器放大后作为压电振子的驱动信号, 在该过程中, 霍尔传感器与磁铁间的相对位置的偏差会导致输出信号的幅值发生变化, 本研究设计了霍尔传感器输出信号的处理电路, 如图 11 所示。

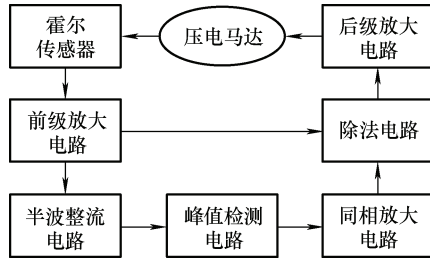


图 11 反馈信号处理电路

反馈信号处理电路主要由前级放大电路、幅值稳定电路和后级放大电路组成, 其中幅值稳定电路主要包括半波整流电路、峰值检测电路、同相放大电路和除法电路, 可以在一定范围内消除霍尔传感器输出信号幅值的异常波动, 使输出信号接入功率放大器时幅值保持恒定。

随着偏心转子的旋转频率接近定子的谐振频率, 压电马达产生谐振, 此时定子的驱动信号与转子旋转频率之间的相位差发生变化, 限制偏心转子转速的提升。为了调节接近谐振状态时定子驱动信号与转子转速的相位差, 本文设计了相位调节装置如图 12 所示, 对定子驱动信号的初始相位进行调节以补偿偏心转子旋转频率上升带来的相位差。相位调节装置中两组霍尔传感器相互垂直固定在霍尔传感器支架与支撑架上, 压电马达启动后旋动旋转台可以调节霍尔传感器和偏心转子上磁铁的相对位置, 实现相位调整, 确保压电马达工作时定子驱动信号与转子旋转频率始终处于最佳相位。

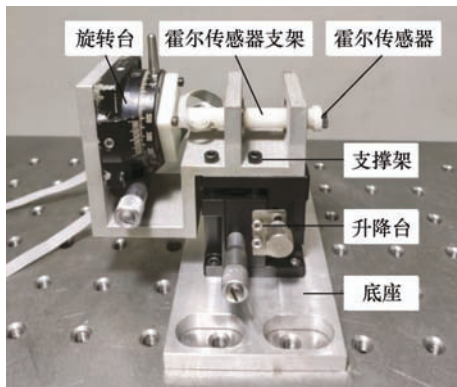


图 12 相位调整装置

4 实验与结果

4.1 实验装置

偏心转子压电马达模型及样机如图 13a 所示, 偏心转子压电马达包括定子, 转子, 底座及相位调节装置, 无质量转移结构的马达样机和有质量转移结构的马达样机如图 13b 和图 13c 所示, 主要区别在于前者偏心转子质量为 361 g, 后者偏心转子质量为 150 g, 将转子减小的质量以质量块的方式固定在轴承座上。压电马达通过螺栓固定在 L 型底座上, 偏心转子右侧通过柔性弹簧与直流电机连接, 左侧粘有磁铁, 霍尔传感器固定在相位调节装置上。

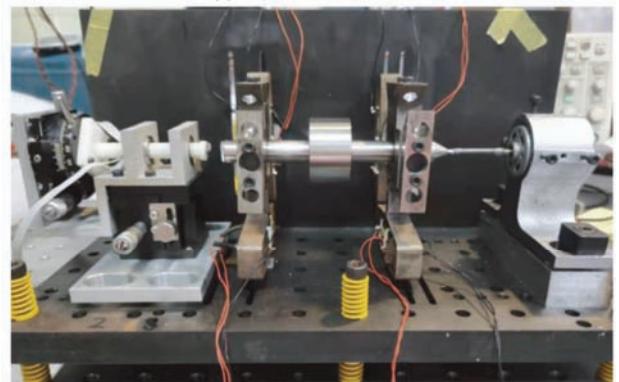
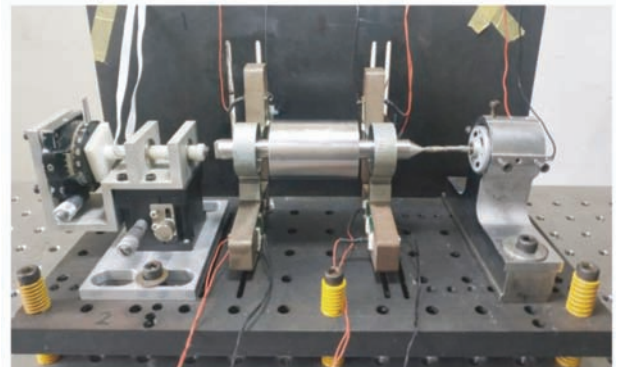
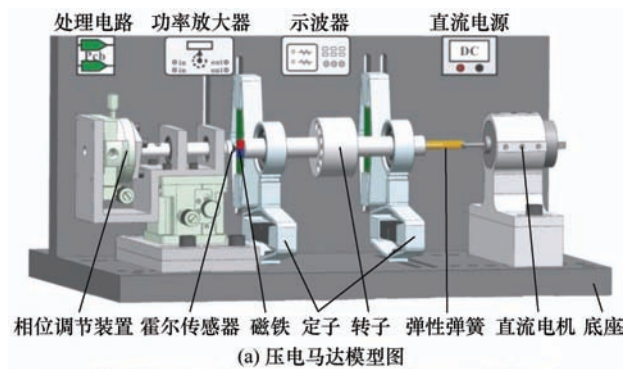


图 13 压电马达模型及样机

偏心转子压电马达的工作时的损耗以轴承损耗为主, 在实验测试前为了减小偏心转子装配误差带

来的陀螺力矩对轴承损耗的影响,利用直流电机拖动偏心转子旋转运动并通过监测不同转速下直流电机的输入功率来观察压电马达的损耗功率,并进行结构装配调整。将测得压电马达的损耗功率与基于式(7)所得的压电马达理论损耗功率进行对比,如图 14 所示,当压电马达实际损耗功率与理论损耗功率接近时,装配误差产生的轴承损耗较小,可以正常测试偏心转子压电马达的输出特性。旋转相位调节装置调节两定子驱动信号的初始相位启动直流电机带着偏心转子加速,随着转子速度增加,定子向系统馈入能量的功率越来越大直到完全代替直流电机的输入,关闭直流电源,并在不同电压幅值和驱动相位下测试实验样机偏心转子的旋转频率。偏心转子旋转时,霍尔传感器在磁场的作用下可产生频率与转子旋转频率一致的正弦波信号,利用示波器对霍尔传感器输出信号进行检测和采集,经数据处理后即即为压电马达转子的旋转频率。

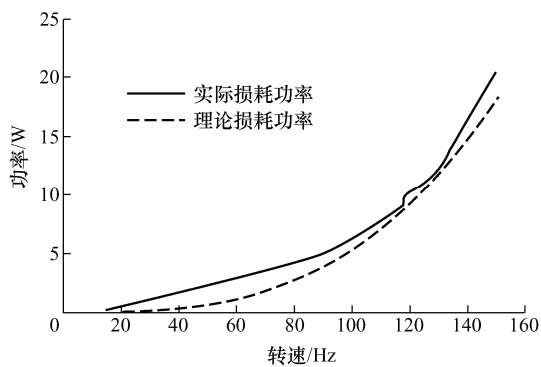


图 14 压电马达的损耗功率

4.2 压电马达的速度特性实验

对两种压电马达样机进行速度性能测试,结果如表 1 和表 2 所示。两种马达的输出速度都随着电压的增加而增加,但质量转移后的压电马达速度增加更快;无质量转移压电马达的最高转速为 640 V_{p-p} 电压时的 9 120 r/min,而质量转移后的压电马达最高转速为 855 V_{p-p} 电压时的 11 460 r/min,后者的速度相较于前者提升 25.7%。

表 1 无质量转移结构的压电马达转速

数组	电压/ V_{p-p}	速度/(r/min)
1	568	5 820
2	584	7 380
3	608	8 460
4	624	8 880
5	640	9 120

表 2 有质量转移结构的压电马达转速

数组	电压/ V_{p-p}	速度/(r/min)
1	508.8	7 920
2	559.68	9 204
3	627.52	10 080
4	695.36	10 638
5	797.14	11 004
6	855	11 460

4.3 压电马达的相位匹配实验

保持定子驱动信号电压一定,以定子处于准静态时的初始相位为零点,通过相位调整装置调整输入驱动信号的初始相位,测试压电马达在不同驱动信号相位下的输出速度,测试结果如表 3 所示,当相位调整趋于 90° 时,定子驱动信号与转子旋转频率处于最佳相位,压电马达速度显著提高。

表 3 样机马达在不同相位下的转速特性

数组	相位/ $^\circ$	频率/Hz
1	0	119.7
2	10	152
3	30	163.97
4	45	177.33
5	60	179.05
6	75	174.33
7	80	159.52
8	85	119.07

5 结论

提出了一种基于偏心转子的高速压电马达,介绍了该压电马达的工作原理、能量传递机理和结构设计,并通过实验验证了该压电马达的可行性。该压电马达利用偏心力和轴承将定子中压电叠堆振动的能量直接馈入偏心转子中,并通过定子与偏心转子间质量转移的方式进一步提高偏心转子的转速,具有结构简单、输出速度高等特点。

(1) 理论分析与实验研究表明,基于偏心转子的压电马达稳定工作后定子的驱动信号频率与偏心转子的旋转频率基本一致,偏心转子的转速区间为 5 820~9 120 r/min,这也与理论分析中的偏心转子工作频率范围基本一致。

(2) 基于本文提出的质量转移理论改进了样机,将偏心转子的部分质量以质量块的方式转移到定子后进行测试,结果表明质量转移后压电马达的

工作频率明显提高, 最大转速达到 11 460 r/min, 相较于质量转移前转速提升 25.7%。

参 考 文 献

- [1] 赵淳生, 超声电机技术与应用[M]. 北京: 科学技术出版社, 2007.
ZHAO Chunsheng. Ultrasonic motors technologies and applications[M]. Beijing Science and Technology Publishing, 2007.
- [2] 吴博达, 鄂世举, 杨志刚, 等. 压电驱动与控制技术的发展与应用[J]. 机械工程学报, 2003, 39(10): 79-85.
WU Boda, E Shiju, YANG Zhigang, et al. Development and application of piezoelectric drive and control technology[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(10): 79-85.
- [3] SPANNER K, KOC B. Piezoelectric motors, an overview[J]. Actuators, 2016, 5(1): 6.
- [4] LIU Yingxiang, WANG Liang, GU Zhizheng, et al. Development of a two-dimensional linear piezoelectric stepping platform using longitudinal-bending hybrid actuators[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(4): 3030-3040.
- [5] CHEN Chao, SHI Yunlai, ZHANG Jun, et al. Novel linear piezoelectric motor for precision position stage[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2016, 29(2): 164-171.
- [6] TAKATO M, TATANI M, OKU H, et al. A millimetre-sized robot realized by a piezoelectric impact-type rotary actuator and a hardware neuron model[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2014, 11(7): 99.
- [7] PENG Yuxin, PENG, Yulong, GU Xiaoyi, et al. A review of long range piezoelectric motors using frequency leveraged method[J]. Sensors and Actuators, A. Physical, 2015, 235: 240-255.
- [8] WANG Liang, CHEN Weishan, LIU Junkao, et al. A review of recent studies on non-resonant piezoelectric actuators[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 133: 106254.
- [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] MA Yuting, CHOI M, UCHINO K. Single-phase driven ultrasonic motor using two orthogonal bending modes of sandwiching piezo-ceramic plates[J]. Review of Scientific Instruments, 2016, 87(11): 629-634.
- [11] 刘英想, 刘军考, 陈维山, 等. 纵振夹心换能器式圆筒型行波超声电机[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(18): 83-88.
LIU Yingxiang, LIU Junkao, CHEN Weishan, et al. Longitudinal vibration sandwich transducer type cylindrical traveling wave ultrasonic motor[J]. Proceedings of The Chinese Society for Electrical Engineering, 2009, 29(18): 83-88.
- [12] AOYAGI M, SUZUKI F, et al. High-speed thin ultrasonic spindle motor and its application[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2004, 43(5S): 2873.
- [13] 赵美蓉, 温丽梅, 林玉池, 等. 大行程纳米级步距压电电动机[J]. 机械工程学报, 2004, 40(8): 119-122.
ZHAO Meirong, WEN Limei, LIN Yuchi, et al. Large stroke nano-step piezoelectric motor[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2004, 40(8): 119-122.
- [14] 程光明, 陈康, 温建明, 等. 具有偏置结构的非对称惯性压电旋转驱动器[J]. 光学精密工程, 2016, 24(9): 2208-2216.
CHENG Guangming, CHEN Kang, WEN Jianming, et al. Asymmetric inertial piezoelectric rotary actuator with offset structure[J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(9): 2208-2216.
- [15] 曲建俊, 郭文峰, 胡志勇, 等. 被动箝位蠕动直线压电驱动器数学模型及仿真[J]. 机械工程学报, 2015, 51(18): 13-19.
QU Jianjun, GUO Wenfeng, HU Zhiyong, et al. Mathematical model and simulation of passively clamped peristaltic linear piezoelectric actuator[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(18): 13-19.
- [16] 刘向锋, 刘大伟, 高志, 等. 新型压电旋转驱动器的设计与试验研究[J]. 机械工程学报, 2010, 46(1): 169-174.
LIU Xiangfeng, LIU Dawei, GAO Zhi, et al. Design and experimental study of a new type piezoelectric rotary actuator[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(1): 169-174.
- [17] NISHIMURA T, HOSAKA H, MORITA T. Resonant-type smooth impact drive mechanism (SIDM) actuator using a bolt-clamped langevin transducer[J]. Ultrasonics, 2012, 52(1): 75-80.
- [18] MORITA T, NISHIMURA T, YOSHIDA R, et al. Resonant-type smooth impact drive mechanism actuator operating at lower input voltages[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2013, 52(7S): 07HE05.

- [19] PAN Qiaosheng, HE Liangguo, PAN Chengliang, et al. Resonant-type inertia linear motor based on the harmonic vibration synthesis of piezoelectric bending actuator[J]. *Sensors and Actuators A Physical*, 2014, 209: 169-174.
- [20] XING Jichun, CAO Chenyang, QIN Yong, et al. Tests of a noncontact piezoelectric motor modulated by an electromagnetic field[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2019, 67(1): 124-130.
- [21] QIU Wei, HONG Yaying, MIZUNO Y, et al. Non-contact piezoelectric rotary motor modulated by giant electrorheological fluid[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2014, 217: 124-128.
- [22] 潘巧生, 冯志华. 基于偏心轮受迫振动的压电马达研究[J]. *机械工程学报*, 2018, 54(3): 35.
- PAN Qiaosheng, FENG Zhihua. Research of piezoelectric motor based on forced vibration of eccentric rotor[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 54(3): 35.
- [23] PAN Qiaosheng, FENG Zhihua, CHEN Jian, et al. High-speed, low-friction piezoelectric motors based on centrifugal force[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, 64(3): 1-1.
- [24] PAN Qiaosheng, HUANG Ziliang, WANG Quan, et al. Mass transfer from the rotor to the stator for improving the speed of the piezoelectric motor based on centrifugal force[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2021, 92(5): 055008.
-
- 作者简介: 潘巧生, 男, 1990 年出生, 博士, 副教授, 硕士研究生导师, 第七届上银优秀机械博士论文获奖者。主要研究方向为压电驱动器, 超声换能器。
- E-mail: panqs@hfut.edu.cn

(上接第 232 页)

- [20] FENG K, KANEKO S. A thermohydrodynamic sparse mesh model of bump-type foil bearings[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2013, 135(2): 022501.
- [21] QIN K, LI D, LUO K, et al. Comparison of modelling approaches for bump-type foil thrust bearings operating with CO₂[C]// ASME Turbo Expo, June 11-15, 2018, Oslo, Norway, 2018.
- [22] XU F C, KIM D J, YAZDI B Z. Theoretical study of top foil sagging effect on the performance of air thrust foil bearing[C]// ASME Turbo Expo, June 13-17, 2016, Seoul, South Korea, 2016.
-
- 作者简介: 邱烁现, 男, 1999 年出生。研究方向为气体箔片轴承。
E-mail: qsx2018@mail.dlut.edu.cn
- 徐方程(通信作者), 男, 1985 年出生, 副教授。主要研究方向为气体箔片轴承、箔片密封、挤压油膜阻尼器、转子动力学。
E-mail: fcxu@dlut.edu.cn