

文章编号 1004-924X(2026)01-0112-12

跨尺度驱动纵切模态压电电机设计与实验

曾思哲, 冯耀辉, 王浩然, 王 雅, 李瑞君, 潘巧生*
(合肥工业大学 仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要:为突破现有压电电机难以兼顾高速运动与高分辨率定位的局限,设计了一种跨尺度纵切模态压电电机,通过准静态和谐振态双模式工作满足精密驱动领域对速度与精度的双重需求。该电机采用纵振换能器(基于压电陶瓷 d_{33} 效应)和夹心式剪切换能器(基于压电陶瓷 d_{15} 效应)复合的定子结构,利用同频正交振动合成驱动足椭圆运动轨迹。通过有限元仿真优化关键参数:针对准静态模式,将第一级铰链刚度设计为 $16.66\text{ N}/\mu\text{m}$,以提升位移输出效率;针对谐振态模式,调整结构参数实现纵振($7\,829.6\text{ Hz}$)与弯振($7\,860.7\text{ Hz}$)模态频率简并。实验结果表明:在准静态激励下(频率 800 Hz 、预压力 0.38 N),电机最小位移分辨率达 39 nm ,最大速度为 0.95 mm/s ;在谐振态激励下(频率 $6\,780\text{ Hz}$ 、相位差 30°),最大空载速度达 125.33 mm/s ,最高负载为 0.45 N 。该电机在速度(125.33 mm/s)和分辨率(39 nm)上均显著优于传统单一模式电机,解决了高速与高精度难以兼容的难题,为跨尺度精密定位驱动提供了有效技术方案。

关键词:压电电机;纵切模态;跨尺度驱动;压电陶瓷;准静态

中图分类号:TP359.9 **文献标识码:**A

doi:10.37188/OPE.20263401.0112

CSTR:32169.14.OPE.20263401.0112

Design and experiment on longitudinal-shearing mode piezoelectric motor driven by cross-scale forces

ZENG Sizhe, FENG Yaohui, WANG Haoran, WANG Ya, LI Ruijun, PAN Qiaosheng*

(School of Instrument Science and Optoelectronic Engineering, Hefei University of Technology,
Hefei 230009, China)

* Corresponding author, E-mail: panqs@hfut.edu.cn

Abstract: To overcome the limitation of existing piezoelectric motors in simultaneously achieving high-speed motion and high-resolution positioning, a cross-scale longitudinal-shearing hybrid vibration piezoelectric motor was designed. Dual-mode operation in quasi-static and resonant states was implemented to satisfy the combined requirements of speed and precision in precision-drive applications. The stator integrates a longitudinal vibration transducer driven by the piezoelectric d_{33} effect and a sandwiched shear transducer driven by the d_{15} effect. Elliptical motion at the driving foot is generated by orthogonal vibrations at identical frequencies. Key parameters were optimized via finite-element simulation (COMSOL). For quasi-static operation, the primary hinge stiffness was set to $16.66\text{ N}/\mu\text{m}$ to improve displacement output effi-

收稿日期:2025-07-28;修订日期:2025-08-18.

基金项目:国家自然科学基金面上资助项目(No. 52175533);安徽省科技攻坚重点资助项目(No. 202423i08050021);合肥市自然科学基金资助项目(No. HZR2439);中央高校基本科研业务资助项目(No. JZ2025HGJG0273);中央高校基本科研业务资助项目(No. PA202511SL0102)

ciency; for resonant operation, structural parameters were tuned to achieve modal degeneration of the longitudinal (7 829.6 Hz) and bending (7 860.7 Hz) vibrations. The experiments showed that under quasi-static excitation (800 Hz, preload 0.38 N), a minimum displacement resolution of 39 nm and a maximum speed of 0.95 mm/s were achieved. Under resonant excitation (6 780 Hz, 30° phase difference), a maximum no-load speed of 125.33 mm/s and a peak load capacity of 0.45 N were obtained. The proposed motor outperforms conventional single-mode piezoelectric motors in both speed (125.33 mm/s) and resolution (39 nm), effectively mitigating the intrinsic trade-off between high speed and high precision and providing a practical solution for cross-scale precision positioning drives.

Key words: piezoelectric motor; longitudinal-shearing mode; cross-scale driving; piezoelectric ceramics; quasi-static

1 引言

随着半导体制造、精密测量和生物医疗等领域的迅速发展,对精密驱动系统的性能要求逐渐提高。微驱动器作为精密驱动系统的核心部件,广泛应用于基因芯片承载台^[1]、STM/AFM显微系统定位台^[2]和晶圆光刻掩膜台^[3]等仪器中,其速度、分辨率和行程等特性对仪器的整体性能有着显著影响。高速和高分辨率的跨尺度定位驱动技术研究,对提升精密仪器的精度和效率具有重要意义。目前,实现跨尺度的方案主要有宏微混合驱动和压电驱动。其中,宏微混合驱动因集成多种驱动原理,体积较大,控制复杂,且无法满足抗电磁干扰需求。压电驱动利用压电材料的逆压电效应产生微变形,实现电能到机械能的转化,进而实现精密驱动^[4-6],具有结构紧凑、响应速度快、位移分辨率高及低速大转矩等优势^[6-8]。

根据工作状态的不同,压电电机可分为准静态电机和谐振态电机^[9-12]。其中,准静态压电电机的工作频率远低于谐振频率,一般直接利用压电材料的变形或者使用放大元件放大压电材料的变形来实现驱动。准静态压电电机按驱动方式可分为尺蠖式电机、冲击式电机、粘滑式电机和直接驱动型电机。Li等提出了一种基于横向运动的压电直线驱动器^[13],最大速度约为14.25 mm/s,位移分辨率为0.04 μm ,输出力可达3.43 N。Ma等利用对称杠杆位移放大机构设计的尺蠖式压电电机^[14],速度为1.259 mm/s,位移分辨率为0.06 μm ,行程可达50 mm。Zhou等提出了一种基于粘滑原理的线性压电电

机^[15],其最大运动速度约为3.27 mm/s,最小位移分辨率为0.29 μm 。Sangchao等提出了一种尺蠖式直线压电电机^[16],最高速度为1.075 mm/s,位移分辨率为0.081 μm 。Huang等采用L型柔性铰链设计了一种粘滑压电电机^[17],电机具有16.67 mm/s的最大运动速度,最小分辨率为0.11 μm 。准静态电机通常具有较高的位移分辨率,可实现高精度定位,但由于工作频率不高,其速度相对较低,难以满足跨尺度定位驱动的高速要求。

谐振态压电电机以超声压电电机居多,不同于准静态压电电机的工作原理,超声压电电机利用压电材料的微变形激发弹性体在超声频段的微幅振动,在定子驱动区域的质点形成驱动轨迹(一般为椭圆运动轨迹),并通过定子与滑台之间的摩擦耦合转换成滑台的旋转(直线)运动^[18]。根据椭圆运动的合成方式,超声压电电机可分为弯弯复合模态、纵振模态、纵弯复合模态、纵扭复合模态以及其他振动模态类型。超声电机工作在谐振状态下,具有高速和大推力的优点^[19-20]。Wang等提出的一种基于非对称结构的新型单模线性压电超声电机^[21],最大空载速度达到201.52 mm/s,分辨率为500 nm,最高输出力为2.8 N。Kazumi等提出一种带有嵌入式预压装置的超声电机^[22],电机的最大速度为62.5 mm/s,最大推力为0.12 N。Yin等研制了一种单模线性超声马达^[23],最大速度达到200 mm/s,最高输出力为10 N。Xin等提出了一种小型环形线性压电超声电机^[24],无负载速度为56.1 mm/s,输出力为2.7 N。Li等设计了基于轴向-径向弯曲耦合振动模式的三齿环形线性压电电机^[25],电机最大

速度可达 60.46 mm/s, 位移分辨率为 0.5 μm 。不过, 因为工作在谐振状态下, 谐振态电机定子振幅大, 分辨率普遍较低, 不适用于对定位精度要求高的场合, 难以满足跨尺度定位驱动的高分辨率要求。综上所述, 准静态压电电机具有相对较高的分辨率, 谐振态压电电机具有速度较高的优势。然而, 在准静态或谐振态单一频段的激励下, 电机均难以兼顾高速和高分辨率的输出。

近年来, 国内研究人员在跨尺度压电驱动领域也开展了多项重要研究。Zhang 等采用多目标拓扑优化方法设计了刚柔兼顾的柔顺机构, 并针对系统非线性与扰动问题, 提出了数据驱动的无模型自适应控制和基于双层级联扩张状态观测器的自抗扰控制算法, 提升了驱动器的精度和抗干扰能力^[26]。Huang 等基于惯性粘滑驱动原理, 采用正弦半波驱动信号, 在 7 kHz 驱动频率下实现了 22.7 mm/s 的最大运动速度; 在 1 Hz 低频驱动条件下, 通过信号处理辨识出驱动分辨率约为 50 nm, 为跨尺度驱动中兼顾速度与精度的研究提供了重要参考^[27]。

针对现有压电电机难以兼顾高速和高分辨率输出的问题, 本文提出一种可以工作在准静态和谐振态下的跨尺度驱动纵切模态压电电机。该电机定子由一个纵振换能器和一个夹心式剪切换能器组成, 利用有限元仿真对定子结构进行优化设计, 可满足在谐振态下和准静态下分别工作。研制电机样机并搭建实验系统, 测试电机在准静态下和谐振态下的输出特性, 证明该电机具有高速和高分辨率特性。

2 结构与原理

2.1 定子结构

为实现跨尺度驱动功能, 设计的定子结构如图 1 所示。该定子由一个纵振换能器和一个夹心式剪切换能器组成, 其顶端作为驱动足粘贴有耐磨材料氧化铝陶瓷。

纵振换能器由纵振压电叠堆、二级纵向柔性铰链和纵向预紧螺栓组成。其中, 第一级铰链为压电叠堆的安装提供纵向预紧力, 第二级铰链在纵振压电叠堆的 d_{33} 逆压电效应激励下处于纵向振动模态, 实现竖直方向的振幅放大。剪切换能

器由剪切压电陶瓷、剪切柔性铰链和剪切预紧螺栓组成, 剪切柔性铰链在剪切压电陶瓷的 d_{15} 逆压电效应激励下处于弯曲振动模态, 实现水平方向的振幅放大。剪切压电陶瓷通过剪切预紧螺栓实现预紧, 提升了压电陶瓷承受剪切力的能力, 可提高电机的输出能力。

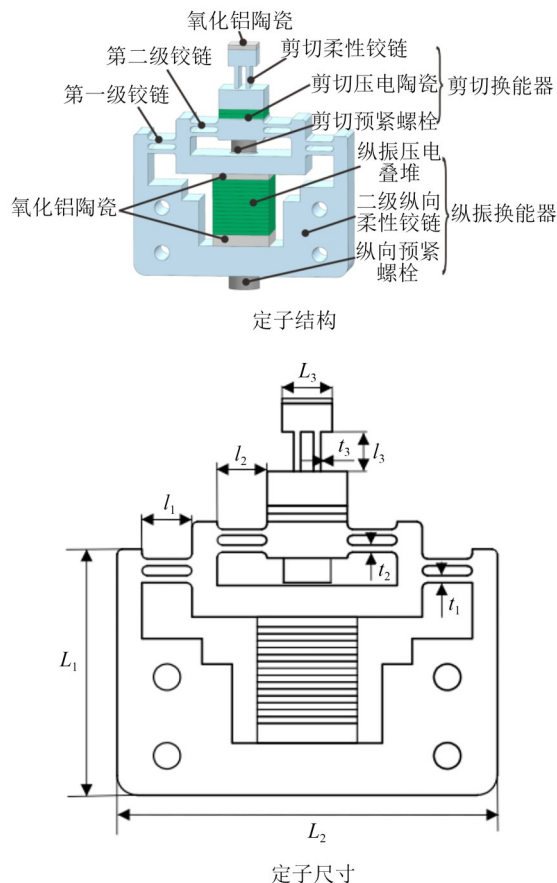


图 1 定子结构及尺寸

Fig. 1 Structure and dimensions of stator

2.2 驱动原理

基于上述结构, 定子驱动原理如图 2 所示。在正弦交流电压激励下, 利用压电陶瓷 d_{15} 逆压电效应激发剪切换能器的切向振动, 利用压电陶瓷 d_{33} 逆压电效应激发纵振换能器的纵向振动, 通过两个同频正交振动的复合实现定子驱动足的椭圆运动。

定子连续作动模式下, 对两组压电陶瓷分别施加频率相同且相位不同的正弦电压信号, 设剪切换能器切向振幅为 a , 纵振换能器纵向振幅为 b , 则驱动足表面质点在 x 方向和 y 方向的位移响

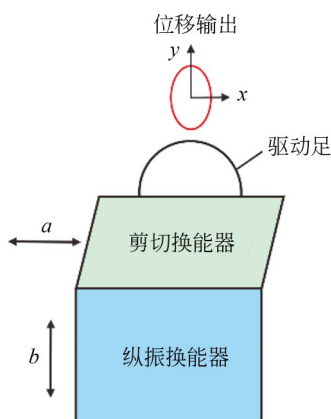


图2 定子驱动示意图

Fig. 2 Schematic diagram of stator drive

应函数分别为:

$$x = a \sin(\omega t + \alpha), \quad (1)$$

$$y = b \sin(\omega t + \beta), \quad (2)$$

其中: ω 为正弦电压信号的角频率, α, β 分别为剪切换能器与纵振换能器所激发的机械振动响应的初始相位, t 为时间。

联立式(1)和式(2),消去时间参数 t ,可得:

$$\frac{x^2}{a^2} - \frac{2xy}{ab} \cos(\beta - \alpha) + \frac{y^2}{b^2} = \sin^2(\beta - \alpha). \quad (3)$$

从式(3)可以看出,驱动足轨迹的形状由两个振动模态的振幅(a, b)及其机械振动响应的相位差 $\beta - \alpha$ 共同决定,当 $\beta - \alpha = \frac{\pi}{2}$ 时,式(3)退化为标准椭圆方程:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1. \quad (4)$$

即当两组机械振动相位差为 90° 时,通过两个换能器元件同频正交振动的复合在驱动足表面质点产生正椭圆轨迹的振动,进而通过驱动足和滑台之间的摩擦耦合实现滑台的运动输出。

3 设计与仿真

采用有限元软件 Comsol 对定子进行参数设计和仿真分析。定子的各部分材料选择如下:纵向和剪切柔性铰链材料为 65Mn,压电陶瓷材料为 PZT-4 系列,预紧螺栓材料为 TC4 钛合金,氧化铝陶瓷材料为 Al_2O_3 ,材料参数如表 1 所示。

表 1 定子材料参数

Tab. 1 Stator material parameters

材料	弹性模量/GPa	泊松比	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
65Mn	210	0.28	7 800
PZT-4	76.5	0.32	7 500
TC4	110	0.34	4 510
Al_2O_3	350	0.24	3 800

3.1 刚度设计

定子工作在准静态时,其铰链刚度对压电叠堆的输出性能具有重要影响。压电叠堆由多层压电片堆叠而成,最大变形量约为其尺寸的 0.1%。空载时,压电叠堆在电压 U 的激励下产生的位移 ΔL 可计算如下:

$$\Delta L = nd_{33}U, \quad (5)$$

其中: n 为压电陶瓷片数, d_{33} 为压电材料的压电常数。

压电叠堆带负载工作时,因其受压刚度大,承受拉力和剪切力的能力有限,抗扭和抗弯能力也有限,需要施加一定预紧力,设计中利用第一级柔性铰链装配时的变形应力作为压电叠堆的工作预紧力。刚度为 k_0 的柔性铰链预压在叠堆上产生预紧力 F_0 ,铰链形变为 Δ_x ,该力同时使压电叠堆产生初始压缩变形 ΔL_0 ,因此,有如下关系:

$$F_0 = k_0 \cdot \Delta x = k_a \cdot \Delta L_0, \quad (6)$$

其中 k_a 为压电叠堆的刚度。

由式(5)和式(6)可知,当压电叠堆受电压 U 激励时,随着输出位移的增大,其负载力也因铰链结构进一步受压变形而增大。压电叠堆相对于自由状态下的振动位移损失量为^[28]:

$$\Delta D = \frac{F_a}{k_a} - \frac{F_a}{k_a + k_0} = \frac{k_0 F_a}{k_a(k_a + k_0)} = \frac{k_0}{k_a + k_0} \Delta L. \quad (7)$$

要满足定子能够在准静态下良好工作,须给子柔性铰链设计合适的刚度,避免其刚度过大导致压电叠堆振动位移损失过多,刚度过小使结构的输出力较小。优化 l_1 和 t_1 的尺寸,并利用 Comsol 有限元软件对第一级铰链进行稳态仿真和应力分析,最终设计第一级铰链刚度为 $16.66 \text{ N}/\mu\text{m}$,远小于压电叠堆的刚度。

第一级铰链的刚度是影响准静态模式下位移输出效率与输出力的关键,其关键尺寸参

数为铰链长度 l_1 与铰链厚度 t_1 。基于准静态输出性能要求,根据式(6)与式(7),以最小化位移损失 ΔD 和确保足够输出力为目标,推导出铰链理想刚度 k_0 的理论范围。在此基础上,基于有限元软件 COMSOL 建立了参数化模型,以 l_1 和 t_1 为设计变量,以目标刚度值 k_0 和最大工作应力(需远低于材料屈服极限)为优化目标进行稳态仿真与应力分析。通过多次迭代计算,最终确定:当 $l_1=5\text{ mm}$, $t_1=0.7\text{ mm}$ 时,第一级铰链刚度 $k_0=16.66\text{ N}/\mu\text{m}$,远小于压电叠堆的刚度,且最大工作应力处于安全范围内,从而在保证结构可靠性的前提下,最优地满足了准静态工作的性能需求。

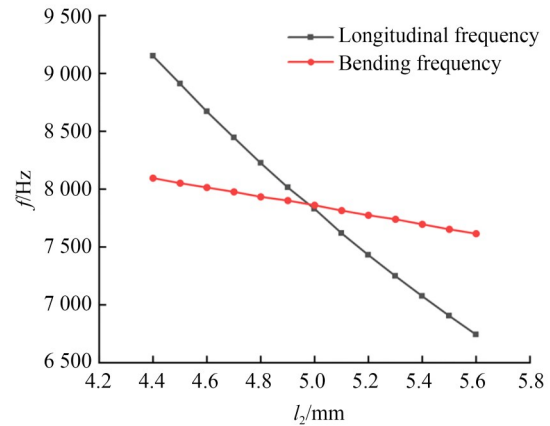
3.2 模态简并

定子工作在谐振态时,要求纵振模态和弯振模态的特征频率一致,因此在设计过程中需要进行两个模态特征频率的简并。建立定子的有限元模型,利用 Comsol 软件进行模态仿真,得到定子纵振模态和弯振模态的特征频率。根据模态仿真结果,对定子结构参数进行设计和调整,使两个模态特征频率一致,从而实现模态简并。模态简并过程中为避免其他振动模态对定子振动产生的影响,要求激励两种工作模态的频率附近没有其他振动模态的干扰。

以 l_2 和 l_3 主要调整结构参数进行模态简并,通过模态仿真分别获得参数 l_2 和参数 l_3 对定子纵振模态和弯振模态特征频率的影响,如图 3 所示。根据仿真结果调整定子的结构参数,实现定子两个模态特征频率的简并。最终得到定子的基本尺寸如表 2 所列,定子纵振模态和剪切模态的振型如图 4 所示,两个振动模态的特征频率分别为 $7\,829.6\text{ Hz}$ 和 $7\,860.7\text{ Hz}$ 。

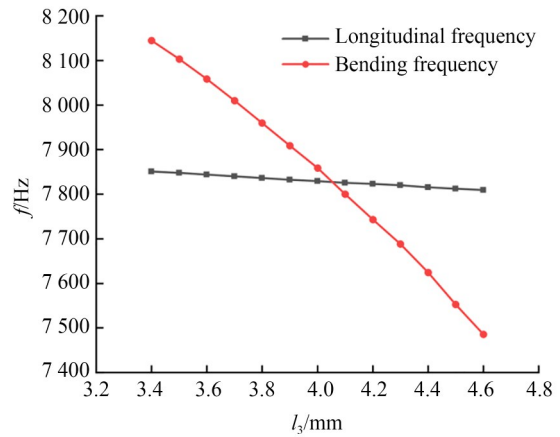
对纵振压电叠堆和剪切压电陶瓷施加频率相等、相位差为 90° 的两相正弦交流电压信号(纵振电压 $U_{\text{longitudinal}}$,剪切电压 U_{shear})进行一个周期的瞬态分析,定子振动状态及其与驱动电压的相位关系如图 5 所示。定子一个周期内的运动过程可分解为四个阶段:

(1) $t_1 \sim t_2$ 时段(驱动阶段),此时 $U_{\text{longitudinal}}$ 处于正半周峰值附近,纵振换能器伸长; U_{shear} 从零向正半周变化,剪切换能器向右弯曲。两者复合作用使驱动足沿椭圆轨迹上半周运动,通过与滑台



(a) 参数 l_2 对特征频率的影响

(a) Influence of parameter l_2 on characteristic frequency

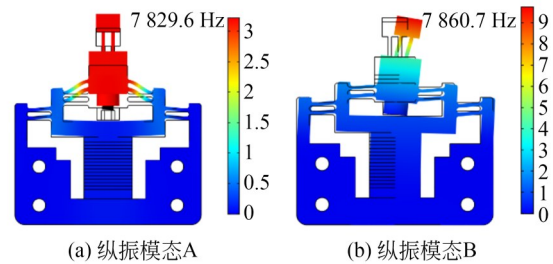


(b) 参数 l_3 对特征频率的影响

(b) Influence of parameter l_3 on characteristic frequency

图 3 结构参数 l_2 和 l_3 对特征频率的影响

Fig. 3 Influence of structural parameters l_2 and l_3 on characteristic frequency



(a) 纵振模式A

(b) 纵振模式B

(a) Longitudinal vibration mode A (b) Longitudinal vibration mode B

图 4 定子振动模态

Fig. 4 Stator vibration modes

接触产生的摩擦力,可靠地驱动滑台向右运动。

(2) $t_2 \sim t_3$ 段(脱离阶段), $U_{\text{longitudinal}}$ 过零并向负半周变化,纵振换能器迅速收缩,导致驱动足脱离滑台表面;与此同时, U_{shear} 达到正峰值,剪切换

能器向右弯曲至最大程度。此阶段驱动足与滑台无接触,为回程做准备,避免了反向拖动滑台。

表 2 定子基本尺寸

Tab. 2 Stator basic dimensions

参数	数值/mm
L_1	25
L_2	38
L_3	5
l_1	5
l_2	5
l_3	4
t_1	0.7
t_2	0.7
t_3	0.7

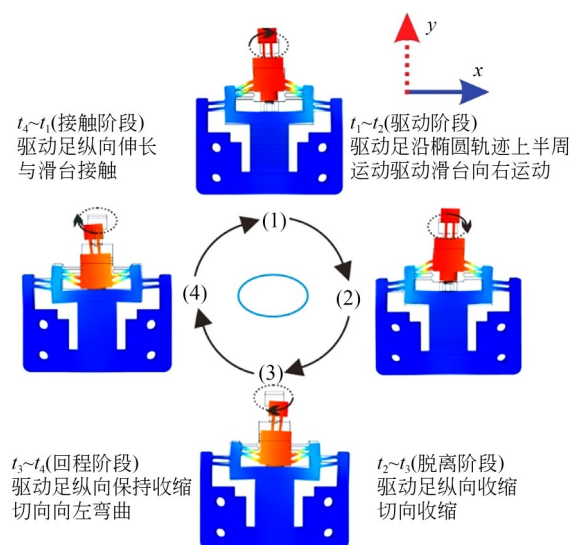
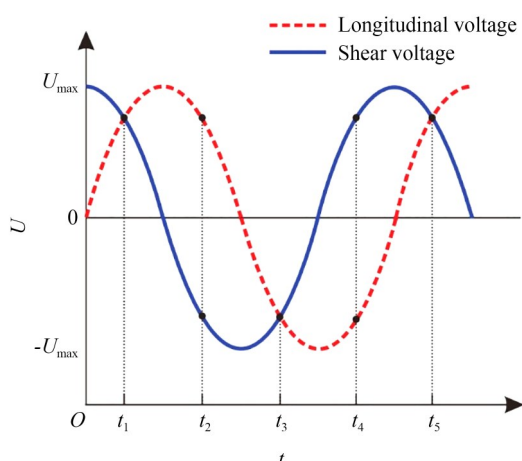


图 5 两相驱动电压信号时序与一个周期内定子振动变化
Fig. 5 Timing sequence of two-phase driving voltage signals and variation of stator vibration within a cycle

(3) $t_3 \sim t_4$ 段(回程阶段), $U_{\text{longitudinal}}$ 处于负半周,纵振换能器保持收缩状态; U_{shear} 从零向负半周变化,剪切换能器向左反向弯曲。两者复合使驱动足沿椭圆轨迹下半周运动,因其已脱离滑台,故此阶段为无效的空回程,不会影响滑台的运动方向。

(4) $t_4 \sim t_1$ 段(接触阶段), $U_{\text{longitudinal}}$ 过零并向正半周变化,纵振换能器伸长,驱动足与滑台接触,进入椭圆运动上半周,开始下一激励周期的循环。在交流信号激励下,驱动足不断地与滑台接触-脱离,实现对滑台的连续驱动。通过改变两相激励电压的相位差,可以使驱动足振动轨迹由顺时针转化为逆时针方向,实现反向运动输出。

4 样机制造与实验

4.1 样机制造与频率测试

跨尺度纵切复合压电电机 3D 模型及样机如图 6 所示,该电机主要由定子、滑台和预紧机构组成。定子固定在定子座上,滑台通过转接板固定

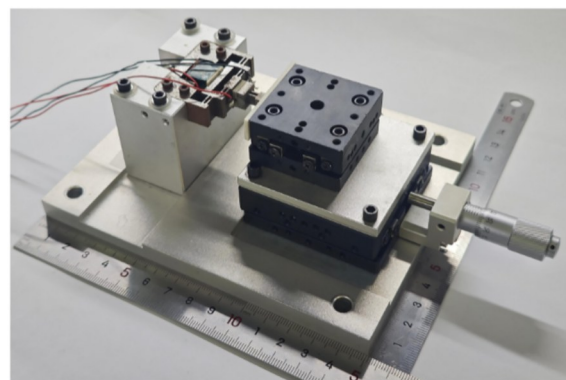
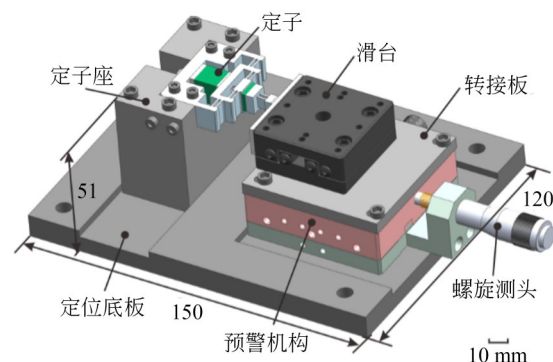


图 6 电机模型及样机

Fig. 6 Motor model and prototype

在预紧机构上,定子座和预紧机构通过螺栓组装在定位底板上,预紧机构在与定子垂直方向上具有 0.01 mm 的调节精度,可以通过调节其螺旋测头来调节电机的预压力。定子外形尺寸为 38 mm×40.3 mm×10 mm,采用 10 mm×10 mm×9.8 mm 的纵振压电叠堆和两片 8 mm×8 mm×0.8 mm 的剪切压电陶瓷进行驱动,纵振压电叠堆和剪切压电陶瓷均采用螺栓预紧方式安装,氧化铝陶瓷片和剪切柔性铰链通过环氧树脂胶进行粘接。

利用阻抗仪(LCR-8101)对样品纵向振动模态和弯曲振动模态的共振频率进行了测试,测试的导纳-频率响应曲线如图 7 所示。测试结果显示,纵振模态和弯振模态的共振频率分别为 6 808 Hz 和 6 750 Hz,两个模态的共振频率偏差仅 58 Hz,这有利于定子两模态振动的简并。实验测试频率与有限元计算频率有一定偏差,其主要原因是有限元分析中材料参数和实际材料参数的偏差、结构加工误差以及装配误差。

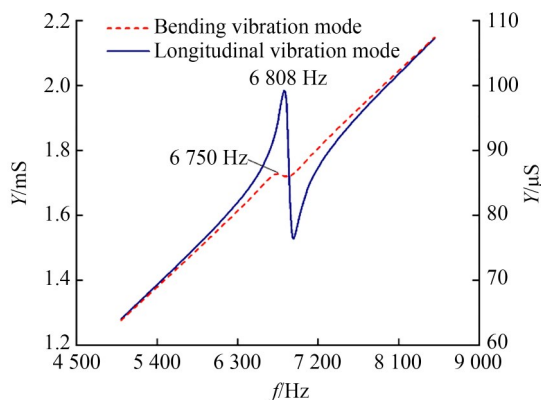


图 7 导纳的频率响应曲线

Fig. 7 Frequency response curve of admittance

4.2 实验装置搭建

搭建测试电机输出性能的实验装置如图 8 所示。信号发生器(DG1022U)产生两组同频正弦波信号,两路信号通过功率放大器(LYF800 AS)对压电陶瓷进行激励,并用数字示波器(TBS1102B)监测激励电压信号,采用光学位移传感器(OPTO NCDT1401-25)测量电机的输出速度。

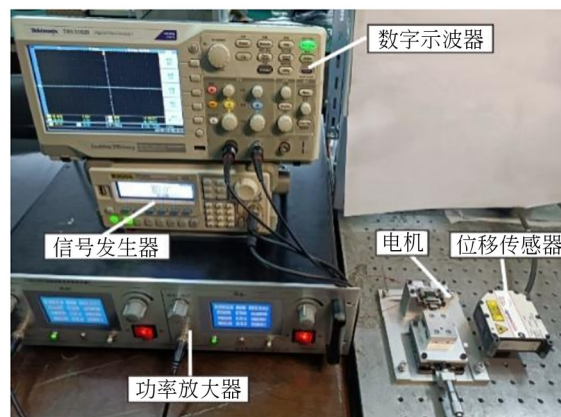


图 8 电机测试实验装置

Fig. 8 Experimental facility for motor test

4.3 准静态激励下电机输出特性

当纵振压电叠堆激励电压 U_1 为 200 V_{p-p}, 剪切压电陶瓷激励电压 U_2 为 300 V_{p-p}, 且两路信号相位差 90° 时, 实验获得电机的空载速度随电压激励频率的变化关系, 如图 9 所示。电机速度随激励频率的增加先增加后减小, 在激励频率为 800 Hz 时取得最大速度 0.396 mm/s。

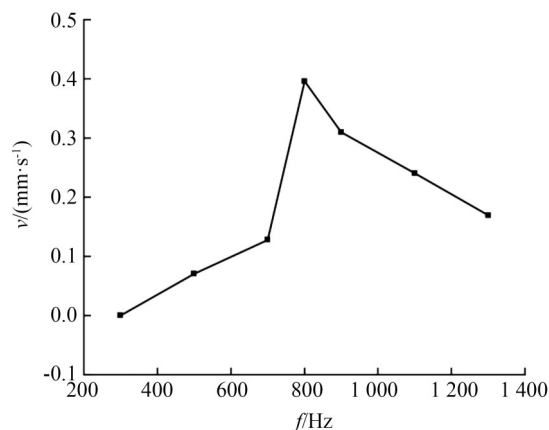


图 9 电机速度随频率变化关系

Fig. 9 Relationship between motor speed and frequency

在频率为 800 Hz、相位差为 90° 的两路正弦电压信号激励下, 调节电机的预压力, 实验得到 3 组不同大小电压下, 电机的空载速度与预压力的关系, 如图 10 所示。图中, 不同电压下电机速度均随预压力的增大先增加后减小, 在预压力为 0.38 N 时取得最大速度 0.95 mm/s。

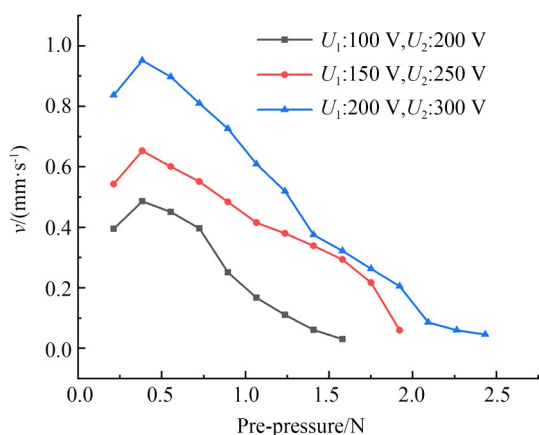


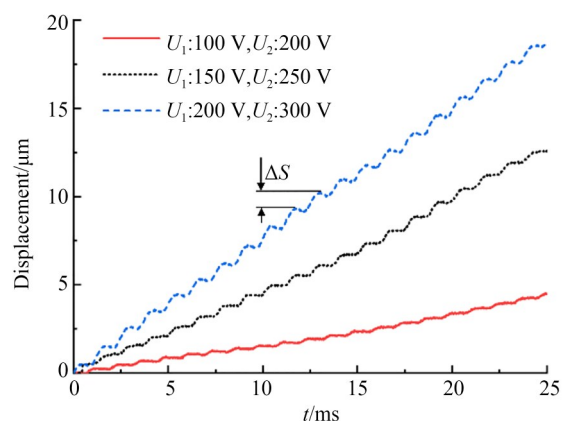
图10 电机速度随预压力变化关系

Fig. 10 Relationship between motor speed and pre-pressure changes

该现象是粘滑驱动机制的典型特征。速度随预压力的变化关系主要受两方面因素影响:一方面,预压力增大了驱动足与滑台之间的接触摩擦力,从而增强了驱动过程中的粘性推力,使速度提升;另一方面,过大的预压力会显著增加导向机构的摩擦损耗,并抑制柔性铰链的变形幅度,导致驱动效率下降。因此,存在一个最佳预压力值 0.38 N,使得上述两种效应达到平衡,此时电机输出速度最大,后续分辨率与速度测试均在此最佳预压力下进行。

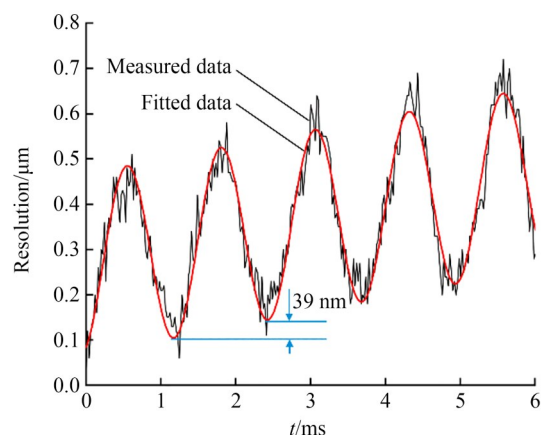
在准静态激励下对电机的位移分辨率进行了测试。激励信号频率为 800 Hz 时,测试不同电压下电机的步进位移曲线,如图 11 所示。步距随电压的降低而减小,在 U_1 幅值 80 V_{p-p}, U_2 幅值 170 V_{p-p} 时测得最小位移分辨率为 39 nm。

设置激励信号频率为 800 Hz,预压力为 0.38 N,保持纵振电压叠堆或剪切压电陶瓷激励电压不变,不断增加另一路电压,测试电机的速度变化情况,实验结果如图 12 所示。图中,电机速度与激励电压近似呈线性关系,纵振电压保持 200 V 不变,剪切电压增加至 400 V 时,最大速度为 1.32 mm/s;剪切电压保持 300 V 不变,纵振电压增加至 400 V 时,最大速度为 1.22 mm/s。



(a) 不同电压下步进位移

(a) Stepping displacement at different voltages



(b) 位移分辨率

(b) Displacement resolution

图11 电机步进位移及分辨率

Fig. 11 Displacement and resolution of motor step

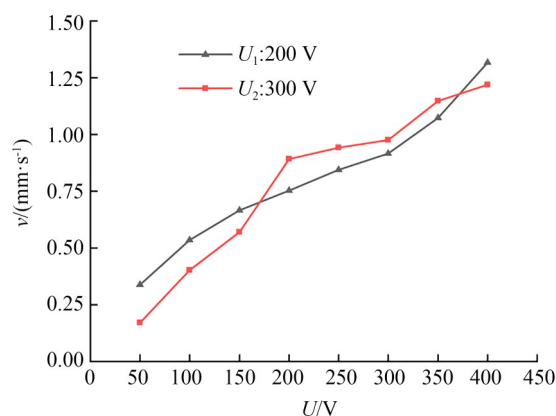


图12 电机速度随电压的变化关系

Fig. 12 Relationship between motor speed and voltage

4.4 谐振态激励下电机输出特性

在频率 6 780 Hz、纵振压电叠堆电压幅值 200 V_{p-p} 和剪切压电陶瓷电压幅值 300 V_{p-p} 的激励下,测试了电机在谐振态时的输出性能。由于电机纵振与弯振两个工作模式的阻尼特性不同,其机械振动响应相对于电激励信号的相位滞后量也不同。因此,两路电激励信号之间的相位差并不等于两机械振动响应之间的相位差。图 13 测试了两路信号不同相位差下电机空载速度,结果表明,当两路驱动信号的相位差为 30° 时,电机速度达到最大值 125.33 mm/s。这说明在此条件下,两个模式的机械振动响应相位差最接近 90°,从而合成了最理想的椭圆运动轨迹,获得了最佳驱动性能。由于电机两个工作模式的特征频率之间的差值为 58 Hz,两个振动模式不能同时得到最有效的激励,在机电转化中,机械振动和电学激励与理想的相位有一定的差值。

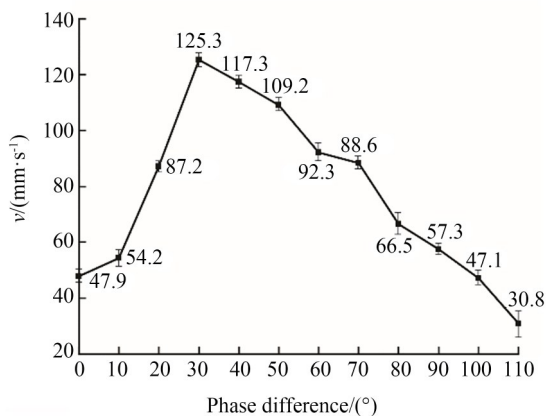


图 13 电机速度随相位差变化关系

Fig. 13 Relationship between motor speed and phase difference

设置两路信号相位差为 30°,测试不同负载下电机的速度如图 14 所示。随着负载的增加,电机的速度从 125.33 mm/s 减小到 3.41 mm/s,电机在谐振激励下的最大负载为 0.45 N。超声电机的速度-负载特性曲线呈现近似线性下降的趋势,这是其固有特性。速度下降主要由两方面原

因造成:一是负载增大导致定子振动系统的谐振频率发生漂移,使工作点偏离最佳谐振状态,效率降低;二是负载增大直接导致作用于驱动足上的摩擦阻力增大,削弱了其驱动滑台的能力。电机的最大负载能力为 0.45 N,最终由定子与滑台间摩擦副的最大静摩擦力以及定子本身的结构强度所决定。

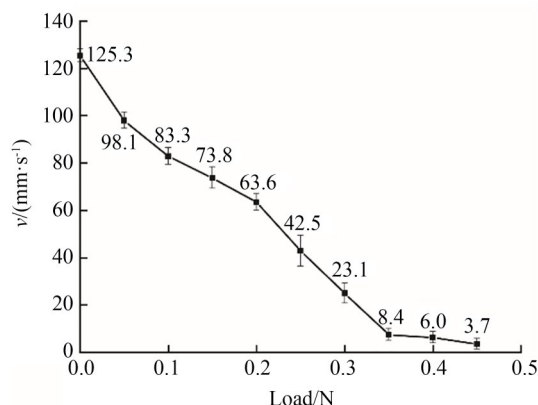


图 14 电机速度随负载变化关系

Fig. 14 Relationship between motor speed and load difference

为评估实验结果的可靠性与重复性,对谐振态下的速度-相位差及速度-负载特性进行了多次重复测量(每组条件重复 5 次),图 14 中误差棒表示 ± 1 标准差。误差主要来源于频率漂移、预压力波动、相位调节精度、传感器测量噪声以及环境振动等。尽管如此,电机在谐振态下仍表现出良好的速度一致性与负载稳定性,验证了其工作可靠性。

4.5 压电电机性能对比分析

设计高速和高分辨率的压电电机对精密驱动和定位系统具有重要意义,表 3 列举了一些不同类型的压电电机,并将所提出的压电电机与这些电机进行了性能对比。可以看出,本文提出的压电电机工作在准静态时具有较高的位移分辨率,工作在谐振态时输出速度较高,具备良好的综合特性。

表 3 不同类型电机的性能对比
Tab. 3 Performance comparison of different motors

电机类型	类型	工作频率/Hz	最大速度/(mm·s ⁻¹)	分辨率/μm	负载/N
Ref. [13]	准静态	2 000	14. 25	0. 04	3. 43
Ref. [14]	准静态	70	1. 259	0. 06	11
Ref. [15]	准静态	510	3. 27	0. 29	—
Ref. [16]	准静态	150	1. 075	0. 081	—
Ref. [17]	准静态	800	16. 67	0. 11	3
Ref. [29]	谐振型	44 300	40. 376	—	0. 21
Ref. [30]	谐振型	2 827	21. 5	—	0. 12
Ref. [22]	谐振型	23 800/43 600	62. 5	—	0. 12
Ref. [24]	谐振型	79 900	56. 1	0. 1	2. 7
Ref. [25]	谐振型	19 950	60. 46	0. 5	0. 8
本文	准静态/谐振型	800/6 780	125. 33	0. 039	0. 45

5 结 论

针对现有压电电机难以兼顾高速和高分辨率输出的问题,本文设计了一种可以工作在准静态下和谐振态下的跨尺度驱动纵切模态压电电机。分析了电机的驱动原理,建立定子的有限元模型,利用有限元仿真对定子进行刚度设计和模态简并,确定了定子的结构参数。对电机样机进行性能测试,实验结果表明,在准静态激励下(800 Hz, 0. 38 N),电机的最小位移分辨率达 39 nm;在谐振态激励下(6 780 Hz, 相位差 30°),最大空载速度达 125. 33 mm/s,最大负载为 0. 45 N。该电机实现了高速与高精度的兼容,为跨尺度精密驱动提供了一种有效的解决方案。

本研究不仅验证了样机的性能,更为同类电机的设计提供了一套可推广的方法论。其核心设计准则可归纳为:(1)结构复合化:采用纵振(d_{33})与剪切(d_{15})压电效应复合的定子结构,是生成同频正交振动、合成椭圆运动轨迹的基础;(2)设计分步化:采用分步优化策略,先根据准静态输出性能(位移损失、输出力)优化决定刚度的关键参数(如 l_1, t_1),再针对谐振态性能优化实现模

态频率简并的参数(如 l_2, l_3),以兼顾双模式工作特性;(3)驱动精细化:需充分考虑因振动模态阻尼差异导致的机电相位差,最佳电激励相位差需通过实验确定,以使机械振动相位差逼近 90°,从而获得最佳驱动性能。基于上述方法研制的电机展现出了良好的综合性能,在半导体封装、精密光学调整和生物显微操作等要求高速大行程且需高精度定位的场合具有广阔的应用前景。

作者贡献声明:

- 曾思哲:实验方法提出,论文构思与撰写,样机制作与实验验证;
冯耀辉:实验方案设计,实验数据采集、整理及初步分析;
王浩然:实验数据验证,论文内容审核、语言润色及逻辑优化;
王雅:实验数据分析,结果可视化;
李瑞君:实验资源支持,数据分析方法指导,研究方案论证;
潘巧生:研究总体规划,实验过程与数据分析,论文指导与学术规范审核,项目资源协调。

参考文献:

[1] 付云博,郭同健. 基因测序仪运动平台的高精度定位控制[J]. 光学精密工程, 2018, 26(10): 2455-2462.

FU Y B, GUO T J. High-precision position control of a gene sequencer motion stage[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(10): 2455-2462. (in Chinese)

[2] BAZAEI A, YONG Y K, REZA MOHEIMANI S O, et al. Tracking of triangular references using sig-

- nal transformation for control of a novel AFM scanner stage [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2012, 20(2): 453-464.
- [3] BUTLER H. Position control in lithographic equipment [J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2011, 31(5): 28-47.
- [4] 于月民, 冷劲松. 新型压电旋转驱动器的设计与性能测试 [J]. *机械工程学报*, 2015, 51(8): 185-190.
YU Y M, LENG J S. Design and performance testing of a new type piezoelectric rotary actuator [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 51(8): 185-190. (in Chinese)
- [5] SPANNER K, KOC B. Piezoelectric motors, an overview [J]. *Actuators*, 2016, 5(1): 6.
- [6] DENG J, CHEN W S, WANG Y, *et al.* Modeling and experimental evaluations of a four-legged stepper rotary precision piezoelectric stage [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, 132: 153-167.
- [7] 程光明, 张海滨, 温建明, 等. 非对称夹持惯性压电旋转驱动器 [J]. *机械工程学报*, 2015, 51(17): 83-89.
CHENG G M, ZHANG H B, WEN J M, *et al.* Impact drive rotary actuator by piezoelectric bimorphs with asymmetrical gripper [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 51(17): 83-89. (in Chinese)
- [8] KANG D, LEE M G, GWEON D. Development of compact high precision linear piezoelectric stepping positioner with nanometer accuracy and large travel range [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2007, 78(7): 075112.
- [9] WANG L, CHEN W S, LIU J K, *et al.* A review of recent studies on non-resonant piezoelectric actuators [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, 133: 106254.
- [10] ZHANG S J, LIU J K, DENG J, *et al.* Development of a novel two-DOF pointing mechanism using a bending-bending hybrid piezoelectric actuator [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, 66(10): 7861-7872.
- [11] LIU Y X, WANG L, GU Z Z, *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.
- [12] PENG Y X, PENG Y L, GU X Y, *et al.* A review of long range piezoelectric motors using frequency leveraged method [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2015, 235: 240-255.
- [13] LI J P, ZHOU X Q, ZHAO H W, *et al.* Design and experimental performances of a piezoelectric linear actuator by means of lateral motion [J]. *Smart Materials and Structures*, 2015, 24(6): 065007.
- [14] MA L, XIAO J T, ZHOU S S, *et al.* A piezoelectric inchworm actuator of linear type using symmetrical lever amplification [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part N: Journal of Nanoengineering and Nanosystems*, 2015, 229(4): 172-179.
- [15] ZHOU M X, FAN Z Q, MA Z C, *et al.* Design and experimental research of a novel stick-slip type piezoelectric actuator [J]. *Micromachines*, 2017, 8(5): 150.
- [16] SANGCHAP M, TAHMASEBPOUR M, TAHMASEBPOUR Y. A linear inchworm piezomotor with a new configuration: design considerations, fabrication and characterization [J]. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering*, 2022, 46(1): 149-160.
- [17] HUANG H, XU Z, WANG J R, *et al.* A low frequency operation high speed stick-slip piezoelectric actuator achieved by using a L-shape flexure hinge [J]. *Smart Material Structures*, 2020, 29(6): 065007.
- [18] 赵淳生, 朱华. 超声电机技术的发展和应 [J]. *机械制造与自动化*, 2008, 37(3): 1-9.
ZHAO CH SH, ZHU H. Development and application of ultrasonic motors technologies [J]. *Machine Building & Automation*, 2008, 37(3): 1-9. (in Chinese)
- [19] LIU Y X, CHEN W S, LIU J K, *et al.* A high-power linear ultrasonic motor using longitudinal vibration transducers with single foot [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2010, 57(8): 1860-1867.
- [20] LIU Y X, YANG X H, CHEN W S, *et al.* A bonded-type piezoelectric actuator using the first and second bending vibration modes [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, 63(3): 1676-1683.
- [21] WANG L, LIU J K, LIU Y X, *et al.* A novel sin-

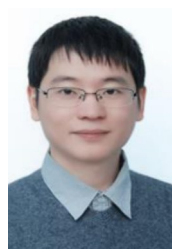
- gle-mode linear piezoelectric ultrasonic motor based on asymmetric structure [J]. *Ultrasonics*, 2018, 89: 137-142.
- [22] KAZUMI T, KURASHINA Y, TAKEMURA K. Ultrasonic motor with embedded preload mechanism [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2019, 289: 44-49.
- [23] YIN Z, DAI C W, CAO Z Y, *et al.* Modal analysis and moving performance of a single-mode linear ultrasonic motor [J]. *Ultrasonics*, 2020, 108: 106216.
- [24] XIN X D, GAO X Y, WU J G, *et al.* A ring-shaped, linear piezoelectric ultrasonic motor operating in E01 mode [J]. *Applied Physics Letters*, 2020, 116(15): 152902.
- [25] LI J, DENG J, LIU Y X, *et al.* A linear piezoelectric actuator based on working principle of three-petal mouth of a rabbit [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2021, 69 (5): 5091-5099.
- [26] 张振国. 跨尺度压电粘滑驱动器设计及其运动控制策略研究[D]. 长春: 长春工业大学, 2025.
ZHANG ZH G. *Research on the Design of a Cross-scale Piezoelectric Stick-slip Actuator and Motion Control Strategy* [D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2025. (in Chinese)
- [27] 黄开明, 孙承峰, 衡扬, 等. 跨尺度精密运动压电平台和快速驱动方法研究[J]. *压电与声光*, 2021, 43(2): 187-191.
HUANG K M, SUN CH F, HENG Y, *et al.* Research on trans-scale precision motion piezoelectric platform and fast-driving method [J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2021, 43(2): 187-191. (in Chinese)
- [28] 潘巧生. 基于偏心轮受迫振动的压电马达研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2016.
PAN Q SH. *Research of Piezoelectric Motor Based on Forced Vibration of Eccentric Rotor* [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2016. (in Chinese)
- [29] MAZEIKA D, VASILJEV P, BORODINAS S, *et al.* Small size piezoelectric impact drive actuator with rectangular bimorphs [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2018, 280: 76-84.
- [30] PAN Q S, WANG K L, MIAO E M, *et al.* Resonant-type piezoelectric inertial linear motor based on the optimization of a dual stage tuning fork transducer [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2018, 89(7): 075002.

作者简介:



曾思哲(2002—),男,江西抚州人,硕士研究生,2023年于合肥工业大学获得学士学位,主要从事压电精密驱动方面的研究。E-mail: 15077922259@163.com

通讯作者:



潘巧生(1990—),男,安徽六安人,博士,教授,博士生导师,2016年于中国科学技术大学获得博士学位,主要研究方向为压电精密驱动技术。E-mail: panqs@hfut.edu.cn