

# 贴片式圆盘定子多自由度超声电机的设计与实验

潘志泳 王亮\* 金家楣 邱建敏 冯浩人

南京航空航天大学航空航天结构力学及控制全国重点实验室,南京,210016

**摘要:**为解决多自由度超声电机普遍存在的定位精度低、结构尺寸大和预压力难以施加等问题,设计了一种新型贴片式圆盘定子多自由度超声电机。首先使用有限元方法验证了圆盘定子的工作原理并确定其几何尺寸;然后制作了圆盘定子并测试其阻抗特性和振动特性;最后组装了原理样机并对其机械输出特性进行了实验评估。实验结果表明,原理样机的启/停响应时间均在 20 ms 以内,角位移分辨率均小于 30  $\mu\text{rad}$ ,具有响应迅速和定位精度高的优点。

**关键词:**超声电机;多自由度;圆盘定子;预压力结构;模态耦合

**中图分类号:** TM35

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2025.01.004

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Design and Experiments of Bonded-type Disc Stator M-DOF Ultrasonic Motors

PAN Zhiyong WANG Liang\* JIN Jiamei QIU Jianmin FENG Haoren

State Key Laboratory of Mechanics and Control for Aerospace Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 210016

**Abstract:** In order to solve the problems such as low positioning accuracy, large structural dimensions, and difficulty in applying pre-pressure, which were commonly found in M-DOF ultrasonic motors, a novel bonded-type disc stator M-DOF ultrasonic motor was proposed. Firstly, finite element simulations were carried out to verify the working principles of the disc stator and determine the geometry. Then, the disk stator was fabricated and tested for the impedance characteristics and vibration characteristics. Finally, the prototype of the M-DOF ultrasonic motor was assembled, and the mechanics performance characteristics were evaluated experimentally. The experimental results show that both of the start/stop response time of the prototype are less than 20 ms, and the angular displacement resolutions are less than 30  $\mu\text{rad}$  respectively. The prototype has the advantages such as rapid response and high positioning accuracy.

**Key words:** ultrasonic motor; multi-degrees-of-freedom(M-DOF); disc stator; preload structure; modal coupling

### 0 引言

随着精密定位平台<sup>[1-2]</sup>、机器人技术<sup>[3-5]</sup>和医学检测<sup>[6-7]</sup>的快速发展,精密驱动系统对执行机构的要求不断提高。现有的多自由度运动主要由多个单自由度旋转电机组合及复杂的传动机构实现,导致电机结构复杂、误差失控,影响系统的定位精度和工作稳定性<sup>[8-9]</sup>。基于逆压电效应和摩擦驱动原理的多自由度超声电机具有响应迅速、机械集成度高、定位精度高等优势<sup>[10-19]</sup>,在空间光学载荷驱动系统中的应用前景广阔。

贴片式多自由度超声电机通过改变压电陶瓷片的位置来激发定子的多种振动模式<sup>[20-24]</sup>,结构设计更为灵活。薄横梁振子的三自由度超声电

机<sup>[22]</sup>利用横梁振子的面外弯曲振动模式和 2 个正交的面内弯曲振动模式,在驱动面上耦合出 3 个方向的椭圆运动,实现转子的三自由度旋转。未采用纵向振动模式下,环形定子多自由度超声电机<sup>[23]</sup>激励出环形定子的轴向弯曲振动模式和径向弯曲振动模式时,定子上的 4 个驱动足将同时驱动球形转子。由于该环形定子没有采用纵向振动模式,因此大幅减小了电机的纵向尺寸,有利于电机的微小型化。大多数电机的预压力结构及其工作原理尚不完善,这制约了电机的发展和实际应用。

为解决单定子多自由度超声电机施加预压力时出现的不稳定性问题,JÜRÉNAS 等<sup>[25]</sup>设计了一种双压电陶瓷环的多自由度超声电机。该电机将 2 个压电陶瓷环作为定子,利用法兰和螺栓将球形转子压在压电陶瓷环之间,实现双定子同时

收稿日期:2024-02-20

基金项目:国家重点研发计划(2022YFB4702800);国家自然科学基金(U2037603,52175015,52275022);江苏省自然科学基金(BK20222011,BK20230093)

驱动转子。LENG 等<sup>[26]</sup>设计的两自由度超声电机利用 4 个行波型定子夹住 1 个球形转子,通过相对布置的 2 个定子共同驱动球形转子旋转,实现了预紧力的施加及输出扭矩的叠加。虽然多定子结构可提高转矩性能、调整预压力<sup>[27-29]</sup>,但多个定子之间的模态频率一致性问题会影响电机的驱动性能。此外,确保多个定子同时实现驱动而不发生互相阻碍也是一个挑战。

针对上述问题,笔者设计出一种预压力可调的贴片式圆盘定子多自由度超声电机。该电机由圆盘定子、球形转子和预压力结构组成。定子采用阶梯圆盘结构,保证了结构刚度的连续性,提高了激励效率,有利于实现微小型化。预压力结构在均匀施加预压力时,不会对球形转子产生额外的切向阻力,有利于电机稳定工作。该电机利用 2 片压电陶瓷片激励圆盘定子产生一种轴向对称的面外弯曲模态和两种正交的轴向弯曲模态,通过三种模态的两两耦合,在驱动足上产生椭圆运动,驱动球形转子分别绕 X、Y、Z 轴旋转,这种设计方案具有响应迅速和定位精度高等优点。

### 1 结构设计和工作原理

多自由度超声电机的主要技术参数:①整机质量不超过 100 g,并具有 3 个转动自由度,转动范围均为 $\pm 360^\circ$ ;②任意自由度的启/停响应时间小于 20 ms;③任意自由度的定位精度小于 30  $\mu\text{rad}$ 。

#### 1.1 结构设计

贴片式圆盘定子多自由度超声电机包括圆盘定子、球形转子和预压力结构,如图 1 所示。预压力结构由球头柱塞、螺母、端盖和底座组成。定子采用阶梯圆盘结构,分为上圆柱、圆盘、下圆柱。四分区和单分区的压电陶瓷分别粘贴在圆盘定子的上下表面,如图 2 所示。端盖有 4 个均匀布置的螺纹孔和 1 个圆形通孔,每个螺纹孔的轴线指向球形转子的球心,通过控制球头柱塞的旋进量

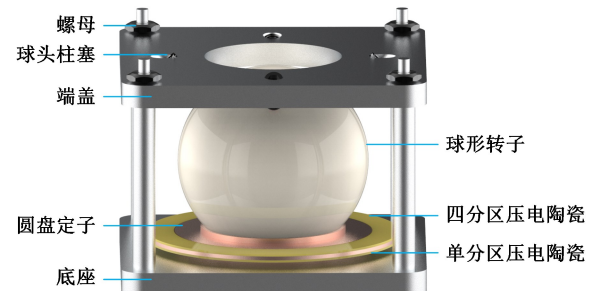


图 1 圆盘定子多自由度超声电机的结构示意图

Fig.1 Schematic structure of a disc stator multi-degree-of-freedom ultrasonic motor

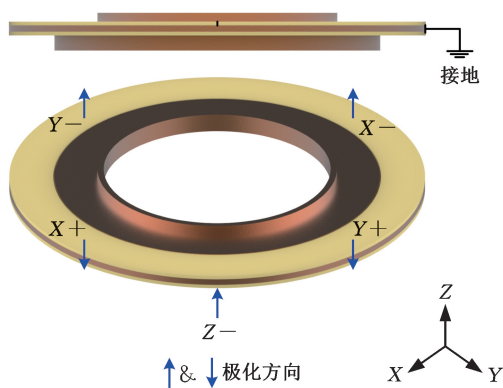


图 2 圆盘定子的结构与压电陶瓷极化分区

Fig.2 Structure of disc stator with piezoelectric ceramic polarization partitioning

来调整预压力。底座上端设有 1 个圆形通孔、1 个圆环槽和 4 根均匀分布的圆杆。底座的圆形通孔通过环氧树脂胶牢固连接到圆盘定子的下圆柱。每个圆杆的顶端设有螺纹,通过螺纹连接将端盖与底座紧密结合。

如图 2 所示,四分区和单分区的压电陶瓷沿厚度方向极化,四分区的压电陶瓷上表面电极均匀分为 4 等份,分别对应电极区域 X +、X -、Y +、Y -,单分区的压电陶瓷下表面对应电极区域 Z -,符号“+”和“-”表示极化方向。此外,压电陶瓷的极化分割线与 X 轴或 Y 轴的夹角为 45°。这种结构设计通过对预压力的微调实现更灵活的控制,进而可提高电机的整体性能。

#### 1.2 工作原理

圆盘定子采用模态耦合的工作原理驱动球形转子在 3 个正交轴上的转动。采用的 3 个定子振动模态分别为轴向对称的面外弯曲模态  $B_{10}$  和正交的轴向弯曲模态  $B_{11}$ 、 $B'_{11}$ ,如图 3 所示,其中,下标的第 1 个数字、第 2 个数字分别为模态的节圆数和节径数。模态  $B'_{11}$ 、 $B_{11}$ 、 $B_{10}$  分别提供驱动面在 X 向、Y 向和 Z 向的移动。通过 3 种振动模态的耦合,驱动足能在 3 个正交轴上产生椭圆运动,从而实现转子的全方位旋转。圆盘定子同时激发  $B_{11}$  模态和  $B_{10}$  模态时,驱动足合成垂直于 X 轴的椭圆运动,驱动转子绕 X 轴旋转,如图 4a 所示。圆盘定子关于 X 轴、Y 轴对称,圆盘定子同时激发出  $B'_{11}$  模态和  $B_{10}$  模态时,驱动足合成垂直于 Y 轴的椭圆运动,驱动转子绕 Y 轴旋转,如图 4b 所示。同时激发出  $B_{11}$  模态和  $B'_{11}$  模态时,驱动足合成垂直于 Z 轴的椭圆运动,驱动转子绕 Z 轴旋转,如图 4c 所示。电机 3 种工作模式的激励方法如表 1 所示,其中, sin 表示正弦信号, cos 表示余弦信号,“空白”表示无信号。

表 1 3 种工作模式的激励方式

Tab.1 Excitation modes for 3 operating modes

X+	X-	Y+	Y-	Z-	模式	旋转轴
		sin	sin	cos	$B_{10}, B_{11}$	X 轴
sin	sin			cos	$B_{10}, B'_{11}$	Y 轴
sin	sin	cos	cos		$B_{11}, B'_{11}$	Z 轴

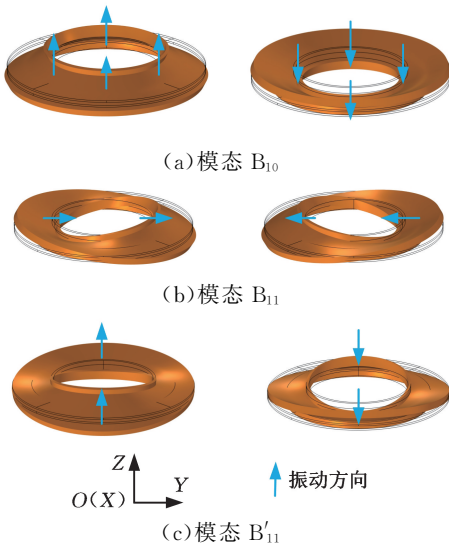


图 3 圆盘定子的 3 个振动模式

Fig.3 Three vibration modes of the disc stator

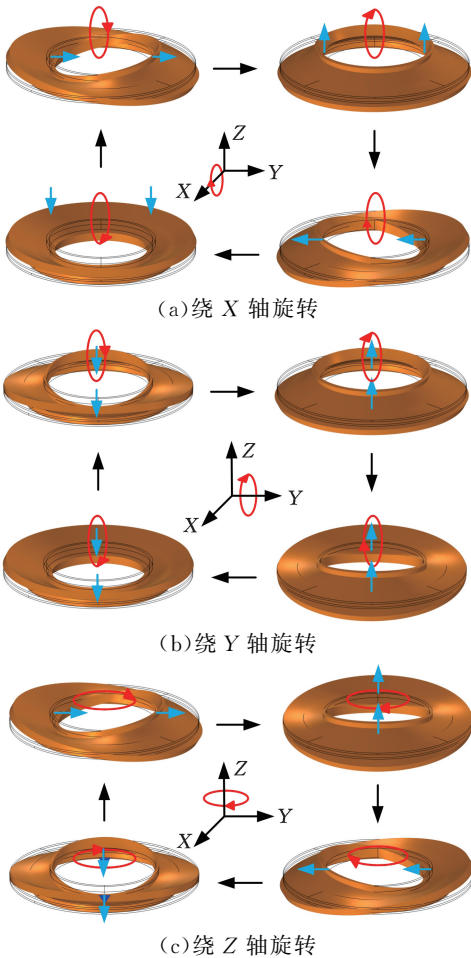


图 4 振动模式在驱动足处耦合形成的椭圆轨迹

Fig.4 Elliptical trajectories formed by coupling vibration modes at the driving foot

## 2 有限元分析

### 2.1 模态分析

为确定圆盘定子的 3 个工作模式,采用有限

元软件 COMSOL Multiphysics 5.6 进行分析,建立的定子有限元模型如图 5 所示,将圆盘定子的下圆柱底面设为机械固定。3 个振动模式的圆盘部分存在重合的节圆,为最大程度地减小夹持对振动幅值的影响,在节圆处布置用于夹持的下圆柱。图 6 所示为定子的主要结构参数。压电陶瓷选用 PZT-8,其尺寸为  $23 \text{ mm} \times 14 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ ,定子材料为磷青铜,详细的材料参数见表 2。

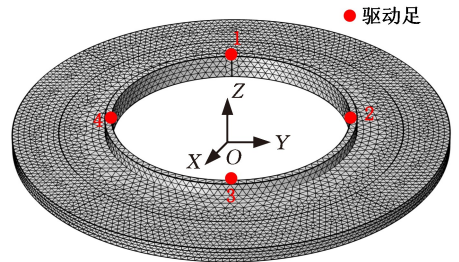


图 5 圆盘定子的仿真模型

Fig.5 Simulation model of disc stator

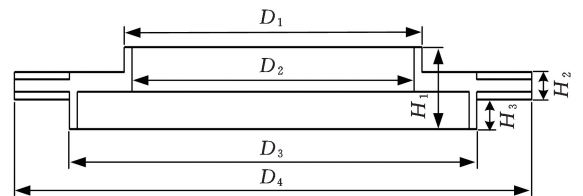


图 6 圆盘定子的剖视图

Fig.6 Sectional view of disc stator

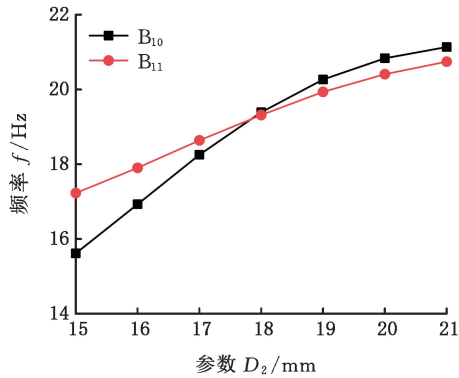
表 2 材料参数

Tab.2 Material parameters

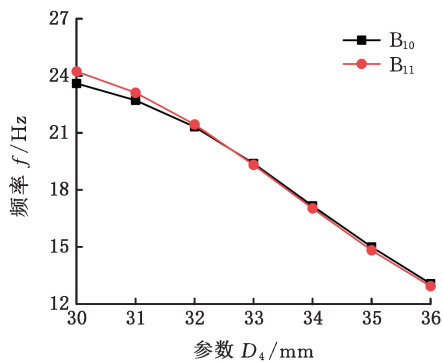
材料	磷青铜	PZT-8					
弹性模量/ GPa	111	120.6	53.5	51.5	0	0	0
		53.5	120.6	51.5	0	0	0
		51.5	51.5	104.5	0	0	0
		0	0	0	31.3	0	0
		0	0	0	0	31.3	0
		0	0	0	0	0	34.6
压电常数/ ( $\text{C} \cdot \text{m}^{-2}$ )		0	0	-4.1	0	0	0
		0	0	-4.1	0	0	0
		0	0	14.1	0	0	0
		0	10.3	0	0	0	0
		10.3	0	0	0	0	0
		0	0	0	0	0	0
泊松比	0.34	0.30					
密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	8780	7650					

$B_{11}, B'_{11}$  模式是同频正交的 2 个模式,因此只需调整模式  $B_{10}, B_{11}$  的频率差。考虑到圆盘定子的谐振频率对内外径和厚度的敏感性,通过调整

定子的参数  $D_2$ 、 $D_4$  使模态  $B_{10}$ 、 $B_{11}$  的谐振频率一致,如图 7 所示。表 3 列出了频率优化后的定子尺寸,此时,模态  $B_{10}$ 、 $B_{11}$ 、 $B'_{11}$  的谐振频率分别为 19.389 kHz、19.315 kHz 和 19.335 kHz,如图 8 所示。扫频分析结果表明电机在工作频率附近没有产生干扰模态(图 9),验证了电机设计的可行性和有效性。



(a) 参数  $D_2$  的频率变化曲线



(b) 参数  $D_4$  的频率变化曲线

图 7 不同尺寸参数下工作模式频率变化曲线

Fig.7 Frequency variation curves of operating modes with different size parameters

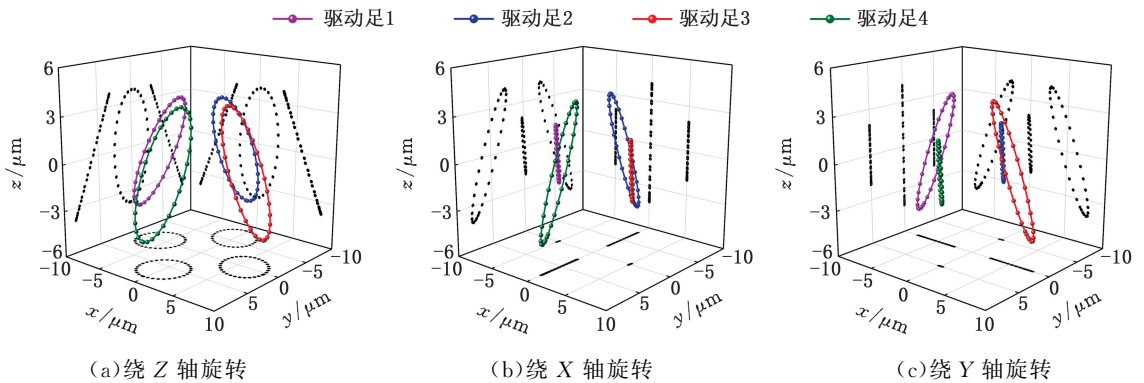


图 10 定子驱动足的运动轨迹

Fig.10 Motion trajectories of stator driving feet

值得注意的是,转子绕 X 轴旋转时,驱动足 2、4 的运动轨迹呈椭圆形,对转子起驱动作用;转子绕 Y 轴旋转时,驱动足 1、3 的运动轨迹呈椭圆形,对转子起驱动作用;转子绕 Z 轴旋转时,4 个

表 3 圆盘定子的尺寸参数

Tab.3 Dimensional parameters of disc stator mm

$D_1$	$D_2$	$D_3$	$D_4$	$H_1$	$H_2$	$H_3$
19	18	26	33	3.3	1.1	1.2

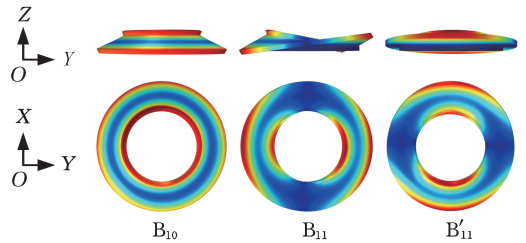


图 8 最终尺寸参数下的三个模式结果

Fig.8 Three modal results for the final size parameters

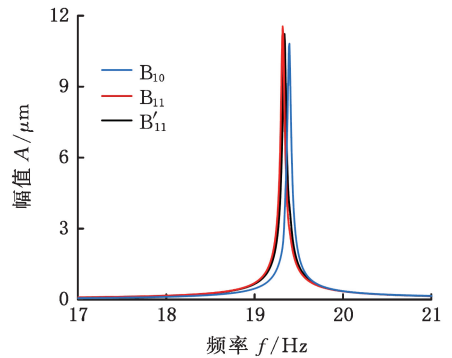


图 9 振动模式的幅频曲线

Fig.9 Amplitude-frequency curves of vibration modes

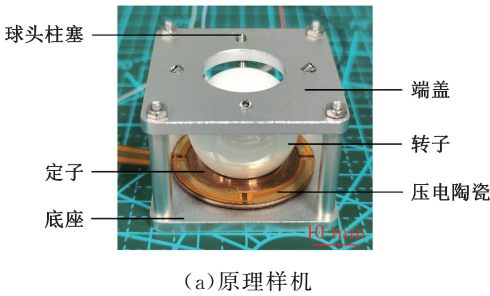
## 2.2 谐响应分析

为验证电机工作原理和激励方案的可行性,在阻尼系数 0.3%、电压(峰峰值)200V 的条件下,分别进行激励频率 19.360 kHz、19.360 kHz 和 19.325 kHz 的谐响应分析,获得 4 个驱动足在 3 个旋转方向中的运动轨迹。在 4 个驱动足上选取 1 个表面质点并计算其在一个工作周期内的运动轨迹,如图 10 所示。

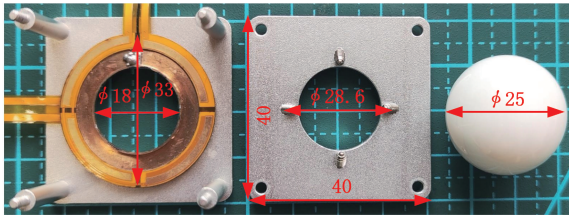
驱动足的运动轨迹均呈现出椭圆形,共同驱动转子。这四个椭圆轨迹的形状和大小相同,有助于提高电机的工作稳定性。

### 3 实验研究

根据仿真计算结果,制作并组装了圆盘定子多自由度超声电机的原理样机,其外形尺寸为 40 mm×40 mm×31 mm,质量为 81 g,如图 11 所示。转子采用具有出色耐磨性和高加工精度的氧化锆陶瓷球(直径 25 mm,质量 50 g)。端盖、底座选用硬度高且质轻的铝合金。转子在 3 个轴的工作角度范围均为±360°。此外,将柔性电路板作为导线向压电陶瓷输入电信号,避免金属导线焊点对压电陶瓷片性能产生不利影响。



(a)原理样机



(b)电机关键零部件及其尺寸

图 11 圆盘定子多自由度超声电机原理样机

Fig.11 The prototype of circular disc stator multi-degree-of-freedom ultrasonic motor

#### 3.1 阻抗分析实验

为深入研究定子原理样机的阻抗特性,利用阻抗分析仪(安捷伦 4294A)对其进行相应的试验。阻抗分析仪只配备单通道信号发生器,无法同时施加存在相位差的多个正弦信号,因此在测量定子 3 个模式的阻抗特性时,分别对压电陶瓷片的不同电极区域进行激励。激励电压(峰峰值)500 mV、频率 19~22 kHz 下,阻抗特性的实验结果如图 12 所示。对电极区域 Z-施加电信号时,测得模式  $B_{10}$  的谐振频率为 18.764 kHz;对电极区域 Y+和 Y-施加电信号时,测得模式  $B_{11}$  的谐振频率为 19.547 kHz;对电极区域 X+和 X-施加电信号时,测得模式  $B'_{11}$  的谐振频率为 19.593 kHz。实验结果表示,阻抗特性与仿真计算结果在误差允许范围内基本一致,产生差异的原因是仿真中的材料性能参数不准确、忽略环氧树脂层,以及未考虑加工和装配等因素。

#### 3.2 激光测振实验

搭建了基于激光多普勒测振仪(Polytec

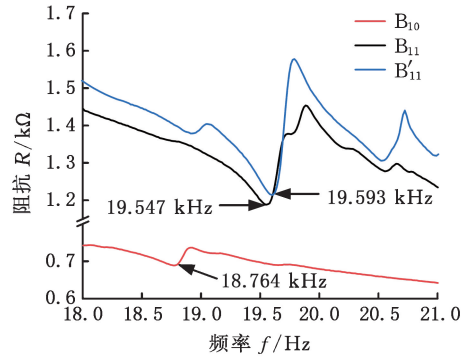


图 12 定子的阻抗特性曲线

Fig.12 Impedance characteristic curves of stator

PSV-500-3D-M)的实验平台来测试定子样机的振动特性,如图 13 所示。在激励电压(峰峰值)40 V、频率 17~21 kHz 下,将圆盘定子的上表面作为测试区域,获得定子 3 个振动模式的幅频特性曲线和振型,如图 14 所示。图 14 展示相位差为 180°的 3 个振动模式的振型。实验结果表明,模式  $B_{10}$ 、 $B_{11}$ 、 $B'_{11}$  的谐振频率分别为 18.343 kHz、19.549 kHz 和 19.523 kHz,谐振频率的仿真计算结果与实验结果的最大相对误差为 5.4%,最小相对误差为 1.1%。误差主要源于仿真计算的材料参数、边界条件与实际的差异,以及加工、组装和测试中产生的误差。此外,对定子进行定频测振试验,获得驱动足 4 在一个工作周期内的运动轨

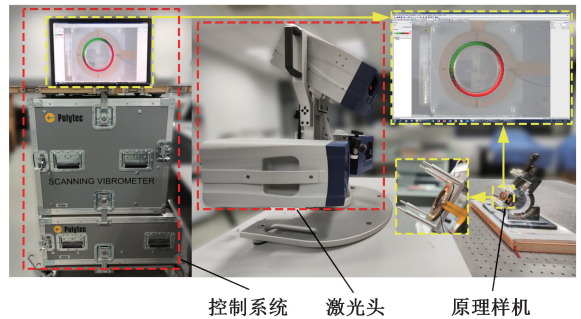


图 13 振动特性的测量平台

Fig.13 Measurement platform for stator vibration characteristics

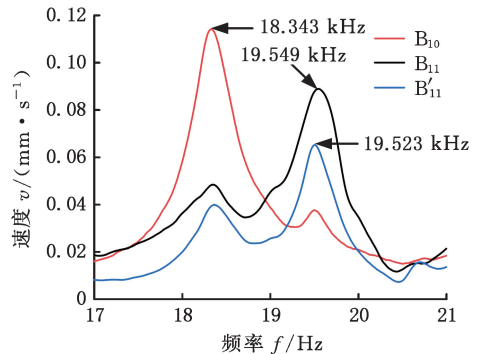


图 14 定子的幅频特性曲线及其振型

Fig.14 Amplitude-frequency characteristic curves of the stator and its vibration pattern

迹,如图 15 所示。驱动足 4 的运动轨迹与图 10 中的仿真计算轨迹基本一致,进一步验证了圆盘型定子设计方案和工作原理的正确性与有效性。

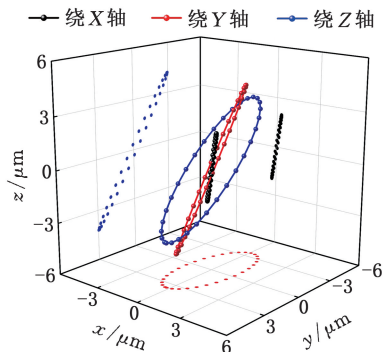


图 15 定频测振下驱动足 4 的运动轨迹

Fig.15 Motion trajectories of driving foot 4 under constant frequency vibration measurement

### 3.3 机械性能实验

为评估原理样机的转速、启停特性和角位移分辨率,建立一个非接触式光学实验测量平台,如图 16 所示。该实验测量平台包括 1 个信号发生器(泰克 AFG3022C)、2 个功率放大器(NF HSA4052)、1 个示波器(泰克 DPO2014)、1 个激光位移传感器(基恩士 LK-H050)、1 个激光转速表(蒙那多 PLT200)、1 个加载滑轮、1 台计算机。实验时,在转子上粘贴白色的反光片,激光测速表通过接收反光片反射回来的激光信号即可测得电机绕 Z 轴的转速。旋转角度较小时,利用  $v = \frac{1}{t} \cdot$

$\arctan \frac{s}{d}$  将激光位移传感器测得的直线位移转化为转子绕 X 和 Y 轴的平均转速,其中,  $t$  为测量时长,  $s$  为激光位移传感器所测的直线位移,  $d$  为测量点的转动半径。

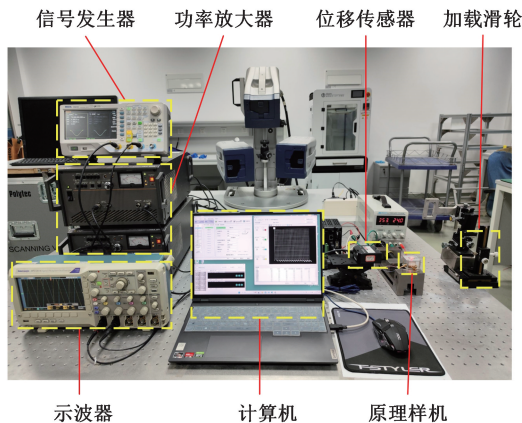
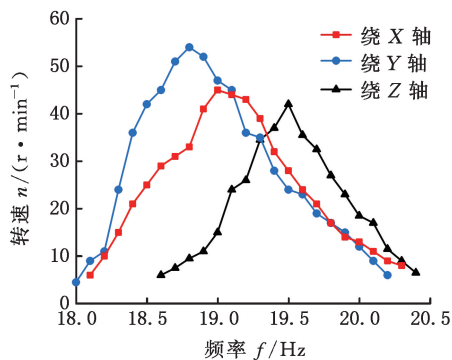


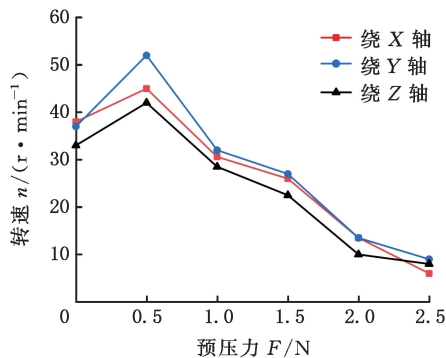
图 16 机械性能测量平台

Fig.16 Mechanical performance measurement platform

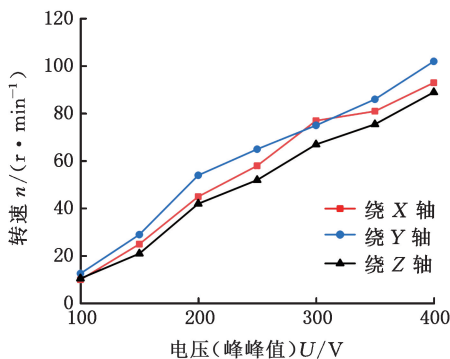
实验通过 2 个正弦信号驱动转子绕 3 个轴旋转,原理样机在不同条件下的速度输出特性测试结果如图 17 所示。



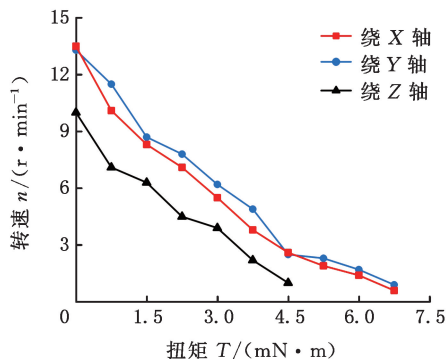
(a) 频率-转速关系曲线



(b) 预压力-转速关系曲线



(c) 电压-转速关系曲线



(d) 扭矩-转速关系曲线

图 17 原理样机的速度输出性能结果

Fig.17 Velocity output performance results of the prototype

激励电压(峰峰值)200 V、预压力 0.5 N、激励频率 18.0~20.4 kHz、频率步长 0.1 kHz 的条件下,原理样机的频率-转速曲线如图 17a 所示。实验结果表明,电机绕 X 轴、Y 轴、Z 轴旋转的最

佳驱动频率分别为 19.0 kHz、18.8 kHz 和 19.5 kHz,最大空载转速分别为 45 r/min、54 r/min 和 42 r/min。值得注意的是,绕 X 轴旋转的最佳激励频率出现在模态  $B_{10}$ 、 $B_{11}$  的谐振频率之间,绕 Y 轴旋转的最佳激励频率出现在模态  $B_{10}$ 、 $B'_{11}$  的谐振频率之间,绕 Z 轴旋转的最佳激励频率出现在模态  $B_{11}$ 、 $B'_{11}$  的谐振频率之间,这一现象与所采用的模态耦合工作原理相吻合。

最佳激励频率、激励电压(峰峰值)200 V 下,测试了电机在不同预压力下的转速,结果如图 17b 所示。随着预压力的增大,电机的转速先增后减,并在预压力 0.5 N 处达到最大值。产生这一现象的原因在于,预压力不足时,定转子之间的接触范围较小,接触区域全是驱动区,增大预压力会扩大定转子之间的接触区域和驱动区,从而逐渐提高电机的转速;预压力增大到一定值时,随着接触区域的增大,接触区域内出现阻碍转子运动的阻碍区,此时,额外增大的接触区域是阻碍区,导致电机转速逐渐下降。

对不同激励电压下的原理样机运动特性进行实验研究,如图 17c 所示,电机的转速随激励电压的增大而线性增大。激励电压(峰峰值)为 400 V 时,电机绕 X 轴、Y 轴、Z 轴的最大空载转速分别为 128 r/min、123 r/min 和 160 r/min。将带有尼龙绳的圆杆粘贴在球形转子上,在尼龙绳的另一端连接砝码,利用滑轮组和砝码自重来测量电机的输出转矩。激励电压(峰峰值)为 200 V、预载荷为 0.5 N 时,电机的负载特性曲线如图 17d 所示。电机的转速都随输出转矩的增大而减小,其中,电机绕 X 轴、Y 轴的负载特性曲线基本一致,堵转转矩为  $6.7 \text{ mN} \cdot \text{m}$ ,绕 Z 轴的堵转转矩为  $4.5 \text{ mN} \cdot \text{m}$ 。这是因为驱动绕 Z 轴旋转的椭圆运动轨迹的切向振幅较小,而切向振幅与扭矩成比例,导致负载能力较小。

电机的响应特性极大影响电机的控制精度,优异的响应特性有助于提升整个控制系统的精确性和实时性,启停时间的缩短表明响应速度更高,响应特性更为出色。在激励电压(峰峰值)为 200 V,激励频率为 19.0 kHz、18.8 kHz 和 19.5 kHz,预载荷为 0.5 N,激励时长为  $1000T$  ( $T$  分别为  $1/19\,000 \text{ s}$ 、 $1/18\,800 \text{ s}$  和  $1/19\,500 \text{ s}$ )的条件下,对原理样机绕 X 轴、Y 轴、Z 轴转动的启停响应特性进行实验研究,结果如图 18 所示。电机绕 X 轴、Y 轴、Z 轴旋转的启/停响应时间分别为 11.4 ms/14.2 ms、12.7 ms/8.5 ms、16.6 ms/12.1 ms,均在 20ms 内,表现出优异的响应特性。

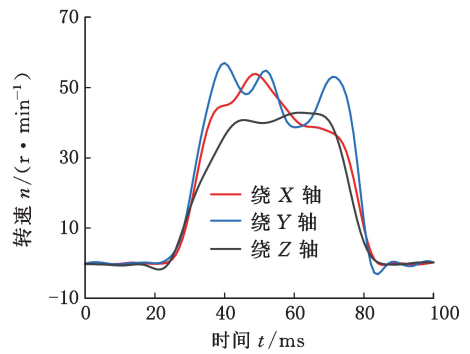


图 18 原理样机的启停特性曲线

Fig.18 Start-stop characteristic curves of the prototype

步进特性直接决定原理样机的定位精度,在脉冲激励的条件下开展步进特性实验。图 19 所示为施加在压电陶瓷片上的脉冲信号。激励电压(峰峰值)为 200 V 时,在保证电机稳定转动的前提下,通过逐渐缩短激励信号的激励周期测得电机在 X 轴、Y 轴、Z 轴稳定工作的最小激励周期为 5。如图 20 所示,电机绕 X 轴、Y 轴、Z 轴的角位移分辨率分别为  $14 \mu\text{rad}$ 、 $15 \mu\text{rad}$  和  $25 \mu\text{rad}$ ,实现了  $\mu\text{rad}$  级的角位移分辨率。这一特性证明该电机具有高精度的定位特性,适用于激光指向等精密定位应用。造成 X 轴、Y 轴的角位移分辨率差异的主要原因是加工和装配误差破坏了结构的对称性,导致驱动足在 2 个方向上的性能表现不同。绕 Z 轴旋转的工作原理与其他两个轴不同,因此 Z 轴的角位移分辨率与 X 轴、Y 轴的角

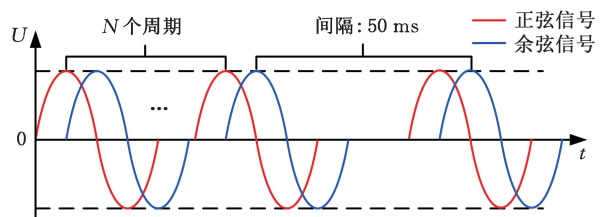


图 19 脉冲驱动信号示意图

Fig.19 Schematic diagram of pulse drive signals

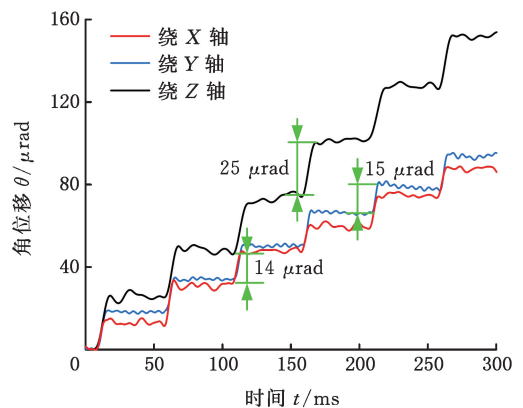


图 20 原理样机的角位移分辨率曲线

Fig.20 Angular displacement resolution curves of the prototype

位移分辨率差异较大。

### 3.4 比较和分析

从电机的尺寸、激励电压、最大转速、启/停时间和最小角位移分辨率对所设计的电机与现有电机进行对比,如表4所示。首先,所设计的电机体积小,适用于狭小的空间环境。其次,在相对较低的激励电压下,电机有较高的转速。此外,电机3个自由度的启/停时间均在20 ms内呈现出优异的响应特性。最后,电机角位移分辨率高,满足精密定位系统对作动器的高要求。

表4 几种多自由度超声电机的比较

Tab.4 Comparison of several types of multi-degree-of-freedom ultrasonic motors

参数	文献[26]电机	文献[8]电机	文献[30]电机
尺寸/mm	107×107×130	108×108×130	65×65×155
峰峰值电压/V	400	200	550
最大转速/ ( $r \cdot \text{min}^{-1}$ )	69.4	29	49
启/停时间/ms	—	—	13/10.6
角分辨率/ $\mu\text{rad}$	—	—	—
参数	文献[31]电机	文献[24]电机	本文电机
尺寸/mm	25×25×125	30×30×27	40×40×31
峰峰值电压/V	450	60	200
最大转速/ ( $r \cdot \text{min}^{-1}$ )	34		54
启/停时间/ms			12.7/8.5
角分辨率/ $\mu\text{rad}$	610	30	14

注:“—”代表文献中未发现此项实验结果

## 4 结论

1)围绕空间光学载荷多自由度伺服驱动的需求,开展了新型圆盘定子多自由度超声电机的研究。利用圆盘定子的1种轴向对称的面外弯曲模态和2种正交的轴向弯曲模态的相互耦合,实现了转子三自由度旋转运动。

2)提出了一种不对球形转子产生切向阻力的预压力结构,实现了对转子均匀施加预压力,保证了多自由度超声电机的稳定运行。

3)激励电压(峰峰值)200 V,预压力为0.5 N,激励频率分别为19.0 kHz、18.8 kHz、19.5 kHz时,原理样机在X、Y、Z方向上的机械性能如下:空载转速分别为45 r/min、54 r/min和42 r/min;堵转扭矩分别为6.7 mN·m、6.7 mN·m和4.5 mN·m;启动/停止响应时间分别为11.4 ms/14.2 ms、12.7 ms/8.5 ms和16.6 ms/12.1 ms;角位移分辨率分别为14  $\mu\text{rad}$ 、15  $\mu\text{rad}$ 和25  $\mu\text{rad}$ 。

4)设计的圆盘定子电机体积小、预压力可调,易于微型化,且电机3个自由度的启/停时间

均在20 ms以内,角位移分辨率均小于30  $\mu\text{rad}$ ,满足空间光学载荷对多自由度伺服驱动的高精度、快响应要求。

### 参考文献:

- [1] 李冲,童玉健,梁康,等. 压电驱动微型精密夹持机构设计与实验研究[J]. 中国机械工程, 2022, 33(11):1302-1308.
- LI Chong, TONG Yujian, LIANG Kang, et al. Design and Experimental Study of Piezoelectric Actuated Micro Precision Clamping Mechanisms[J]. China Mechanical Engineering, 2022, 33(11):1302-1308.
- [2] YANG Zhixin, ZHOU Xiaoqin, HUANG Hu, et al. On the Suppression of the Backward Motion of a Piezo-driven Precision Positioning Platform Designed by the Parasitic Motion Principle[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(5):3870-3878.
- [3] ZHU Pancheng, PENG Hanmin, LU Xiaolong, et al. A Steerable Miniature Legged Robot Based on Piezoelectric Bending Actuators[J]. Smart Material Structures, 2020, 29(4):045009.
- [4] ZHANG Shijing, LIU Yingxiang, DENG Jie, et al. Piezo Robotic Hand for Motion Manipulation from Micro to Macro[J]. Nature Communications, 2023, 14(1):500.
- [5] LEE H S, GO G, CHOI E, et al. Medical Micro-robot - Wireless Manipulation of a Drug Delivery Carrier through an External Ultrasonic Actuation: Preliminary Results[J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2020, 18(1):175-185.
- [6] LU Xiaolong, MARTIN A, SOTO F, et al. Parallel Label-free Isolation of Cancer Cells Using Arrays of Acoustic Microstreaming Traps[J]. Advanced Materials Technologies, 2019, 4(2):1800374.
- [7] ZHU Pancheng, PENG Hanmin, MAO Linli, et al. Piezoelectric Single Crystal Ultrasonic Transducer for Endoscopic Drug Release in Gastric Mucosa[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2021, 68(4):952-960.
- [8] LI Zheng, WANG Zhe, GUO Peng, et al. A Ball-type Multi-DOF Ultrasonic Motor with Three Embedded Traveling Wave Stators[J]. Sensors and Actuators A:Physical, 2020, 313:112161.
- [9] HUANG Zhibo, SHI Shengjun, CHEN Weishan, et al. Development of a Novel Spherical Stator Multi-DOF Ultrasonic Motor Using In-plane Non-axisymmetric Mode[J]. Mechanical Systems and

- Signal Processing, 2020, 140:106658.
- [10] 赵淳生. 超声电机技术与应用[M]. 北京:科学出版社, 2007.  
ZHAO Chunsheng. Ultrasonic Motors Technologies and Applications[M]. Beijing: Science Press, 2007.
- [11] 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.
- [12] 王均山, 陈超, 石明友, 等. 悬浮式球转子压电作动器的设计及实验研究[J]. 中国机械工程, 2020, 31(17):2064-2070.  
WANG Junshan, CHEN Chao, SHI Mingyou, et al. Experimental Study and Design of Piezoelectric Actuators with Suspension Spherical Rotor [J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(17): 2064-2070.
- [13] 曹腾, 李晓牛, 王柏权, 等. 单相压电电机驱动的高精度孔径光阑设计[J]. 中国机械工程, 2022, 33(20):2414-2419.  
CAO Teng, LI Xiaoniu, WANG Boquan, et al. Design of High Precision Apertures Driven by a Single Phase Piezoelectric Motor[J]. China Mechanical Engineering, 2022, 33(20):2414-2419.
- [14] LI Zheng, GUO Zhanyu, HAN Haitao, et al. Design and Characteristic Analysis of Multi-degree-of-freedom Ultrasonic Motor Based on Spherical Stator[J]. The Review of Scientific Instruments, 2022, 93(2):025004.
- [15] ZHANG Shijing, LIU Yingxiang, GAO Xiang, et al. Development of a Cross-scale 2-DOF Piezoelectric Rotary Platform Based on Active Friction Switching[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2022, 220:107165.
- [16] WANG Zhenyu, LI Jun, LIU Wanbing, et al. Model and Property Analysis for a Ball-hinged Three-degree-of-freedom Piezoelectric Spherical Motor[J]. Sensors, 2024, 24(5):1470.
- [17] YAN Jipeng, LIU Yingxiang, SHI Shengjun, et al. A Three-DOF Ultrasonic Motor Using Four Piezoelectric Ceramic Plates in Bonded-type Structure [J]. Journal of Vibroengineering, 2018, 20(1): 358-367.
- [18] WU Jiang, WANG Lipeng, DU Fuxin, et al. A Two-DOF Linear Ultrasonic Motor Utilizing the Actuating Approach of Longitudinal-traveling-wave/Bending-standing-wave Hybrid Excitation [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2023, 248:108223.
- [19] CHANG Qingbing, DENG Jie, LIU Yingxiang, et al. Research on a Locking Device for Power-off Locking and 2-DOF Backward Motion Suppression of a Piezoelectric Platform[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2024, 71(2):1790-1800.
- [20] WANG Yingzhi, DENG Jie, LI He, et al. A Resonant-type Thin Plate Piezoelectric Actuator Inspired by Koala's Locomotion[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(8):8235-8243.
- [21] SHI Shengjun, HUANG Zhibo, YANG Junyi, et al. Development of a Compact Ring Type MDOF Piezoelectric Ultrasonic Motor for Humanoid Eye-ball Orientation System[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2018, 272:1-10.
- [22] PAN Zhiyong, WANG Liang, YANG Ying, et al. A Novel Bonded-type 3-degree-of-freedom Ultrasonic Motor: Design, Simulation, and Experimental Investigation[J]. Smart Materials and Structures, 2023, 32(6):065010.
- [23] WANG Liang, QUAN Qiquan, XUE Kailei, et al. Development of a Three-DOF Piezoelectric Actuator Using a Thin Cross-beam Vibrator[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2018, 149: 54-61.
- [24] SHI Shengjun, XIONG Huaiyin, LIU Yingxiang, et al. A Ring-type Multi-DOF Ultrasonic Motor with Four Feet Driving Consistently[J]. Ultrasonics, 2017, 76:234-244.
- [25] JÜRÉNÁS V, KAZOKAITIS G, MAŽEIKĀ D. 3DOF Ultrasonic Motor with Two Piezoelectric Rings[J]. Sensors, 2020, 20(3):834.
- [26] LENG Jingwen, JIN Long, DONG Xiaoxiao, et al. A Multi-degree-of-freedom Clamping Type Traveling-wave Ultrasonic Motor[J]. Ultrasonics, 2022, 119:106621.
- [27] LI Zheng, ZHAO Liang, WANG Zhe, et al. Traveling Wave Type Multi-degree-of-freedom Spherical Ultrasonic Motor with Built-in Stators [J]. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2020, 15(4):1723-1733.
- [28] LI Zheng, WANG Kaiwen, WANG Haibo, et al. Development and Analysis of Multi-degree-of-freedom Piezoelectric Actuator Based on Elephant Trunk Structure[J]. Sensors, 2023, 23(14):6264.
- [29] NING Chao, DI Longhao, XING Jichun, et al. A Three-degree-of-freedom Piezoelectric Actuator with Sandwich Structure: Design, Modeling, and Experiment[J]. Precision Engineering, 2024, 88: 341-353.

- Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2017, 231(19):3601-3613.
- [25] WU Jianxu, YAO Yanan, LI Yibin, et al. Design and Analysis of a Sixteen-legged Vehicle with Reconfigurable Close-chain Leg Mechanisms [J]. Journal of Mechanisms and Robotics, 2019, 11(5):055001.
- [26] KANG Xi, DAI J S. Relevance and Transferability for Parallel Mechanisms with Reconfigurable Platforms[J]. Journal of Mechanisms and Robotics, 2019, 11(3):031012.
- [27] KANG Xi, ZHANG Xinsheng, DAI J S. First- and Second-order Kinematics-based Constraint System Analysis and Reconfiguration Identification for the Queer-square Mechanism [J]. Journal of Mechanisms and Robotics, 2019, 11(1):011004.
- [28] LÓPEZ-CUSTODIO P C, MÜLLER A, KANG X, et al. Tangential Intersection of Branches of Motion [J]. Mechanism and Machine Theory, 2020, 147:103730.
- [29] 甄伟鲲, 康熙, 张新生, 等. 一种新型四足变胞爬行机器人的步态规划研究[J]. 机械工程学报, 2016, 52(11):26-33.  
ZHEN Weikun, KANG Xi, ZHANG Xinsheng, et al. Gait Planning of a Novel Metamorphic Quadruped Robot[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(11):26-33.
- [30] TANG Zhao, QI Peng, DAI J. Mechanism Design of a Biomimetic Quadruped Robot[J]. Ind. Robot, 2017, 44:512-520.
- [31] KUO C H, DAI J S, YAN Hong Sen. Reconfiguration Principles and Strategies for Reconfigurable Mechanisms[C]//Proceedings of the 2009 ASME/IFToMM International Conference on Reconfigurable Mechanisms and Robots. London, 2009:1-7.
- [32] BAI Shaoping, LOW K H, GUO Weimiao. Kinematographic Experiments on Leg Movements and Body Trajectories of Cockroach Walking on Different Terrain[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. San Francisco, 2000:2605-2610.
- [33] LIU C H, LIN M H, HUANG Y C, et al. The Development of a Multi-legged Robot Using Eight-bar Linkages as Leg Mechanisms with Switchable Modes for Walking and Stair Climbing[C]//2017 3rd International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR). Nagoya, 2017:103-108.
- [34] HIROSE S, KUNIEDA O. Generalized Standard Foot Trajectory for a Quadruped Walking Vehicle [J]. The International Journal of Robotics Research, 1991, 10(1):3-12.

(编辑 张 洋)

作者简介:赵顺卿,男,1990年生,博士研究生。研究方向为机器人机构学。E-mail:22110401@bjtu.edu.cn。武建响\*(通信作者),男,1989年生,副教授、博士研究生导师。研究方向为机器人机构学。发表论文 25 篇。E-mail:wujx@bjtu.edu.cn。

**本文引用格式:**

赵顺卿,翁铭泽,武建响,等.一体化重构闭链腿机构的设计与越障性能分析[J].中国机械工程,2025,36(1):47-58.

ZHAO Shunqing, WENG Mingze, WU Jianxu, et al. Design and Obstacle-surmounting Performance Analysis of an Integrated Reconfigurable Closed-chain Leg Mechanism[J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(1):47-58.

(上接第 46 页)

- [30] LIU Rui, WANG Liang, JIN Jiamei, et al. A Novel 3-DOF Piezoelectric Robotic Pectoral Fin: Design, Simulation, and Experimental Investigation [J]. Smart Material Structures, 2022, 31(6):065003.
- [31] ZHANG Anti, WANG Liang, JIN Jiamei, et al. A Novel Piezoelectric Actuated 2-DOF Joint for Underwater Manipulator: Design, Simulation, and Experimental Investigation [J]. Smart Material Structures, 2021, 30(10):105032.

(编辑 张 洋)

作者简介:潘志泳,男,1995年生,博士研究生。研究方向为压电精密驱动及其理论。E-mail:pzy1271987483@nuaa.edu.cn。王亮\*(通信作者),男,1990年生,教授、博士研究生导师。研究方向为精密驱动与振动利用、超声电机技术。发表论文 60 余篇。E-mail:lwang@nuaa.edu.cn。

**本文引用格式:**

潘志泳,王亮,金家楣,等.贴片式圆盘定子多自由度超声电机的设计与实验[J].中国机械工程,2025,36(1):38-46.

PAN Zhiyong, WANG Liang, JIN Jiamei, et al. Design and Experiments of Bonded-type Disc Stator Multi-degree-of-freedom Ultrasonic Motor[J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(1):38-46.