

文章编号 1004-924X(2024)11-1713-11

多足式微型直线超声电机定子的设计与仿真

王大志^{1,2,3}, 杨明洛^{1*}, 王奉书¹, 李泽飞¹, 段宇¹, 梁世文³, 孔令杰³,

蔡宜如¹, 杨欣龙¹, 张泽田¹, 唐彬⁴

(1. 大连理工大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116024;

2. 高性能精密制造全国重点实验室, 辽宁 大连 116024;

3. 大连理工大学 宁波研究院, 浙江 宁波 315000;

4. 中国工程物理研究院 电子工程研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要:针对小空间、低电压、大驱动力的应用需求,提出了一种基于单弯曲振动模态的多足直线式微型超声电机。根据超声电机的驱动原理对定子结构进行设计,利用有限元软件 ANSYS Workbench 建立定子的动力学仿真模型,对定子进行结构优化及动力学分析,确定定子最终尺寸为 8 mm×1 mm×0.6 mm,定子实测 B3、B4 模态谐振频率与仿真相比误差分别为 6.99% 和 5.46%。最后,建立电机定、转子之间的非线性仿真接触模型,验证了超声电机双向驱动的可行性。搭建微型直线超声电机驱动性能测试装置。实测结果表明:当驱动电压为 60 V_{pp} 时,最大空载速度为 53.3 mm/s、最大负载为 43.3 mN,推重比达 280。该微型超声电机原理可行、结构简单紧凑,具有良好的输出性能,在光学系统、精密定位系统和移动终端等精密驱动领域有着广阔的应用前景。

关键词:微型超声电机;驻波;动力学仿真;振动特性

中图分类号: TM382; TM359.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20243211.1713

Design and simulation of stator for multi legged miniature linear ultrasonic motor

WANG Dazhi^{1,2,3}, YANG Mingluo^{1*}, WANG Fengshu¹, LI Zefei¹, DUAN Yu¹, LIANG Shiwen³,

KONG Lingjie³, CAI Yiru¹, YANG Xinlong¹, ZHANG Zetian¹, TANG Bin⁴

(1. School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. State Key Laboratory of High Performance Precision Manufacturing, Dalian 116024, China;

3. Ningbo Institute of Dalian University of Technology, Ningbo 315000, China;

4. Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics,

Mianyang 621900, China)

* Corresponding author, E-mail: mingluoyang@126.com

Abstract: To meet the application requirements of narrow spaces, low voltage, and high driving force, a multi-legged linear miniature ultrasonic motor based on a single bending vibration mode was proposed.

收稿日期: 2024-02-05; **修订日期:** 2024-04-09.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 62074138); 宁波市自然科学基金资助项目 (No. 2022J008); 中央高校基本科研业务费 (No. DUT22LAB405, No. UT22QN227); 大连理工大学宁波研究院资助项目

Firstly, the stator structure was designed according to the driving principle of the ultrasonic motor. Using the finite element software ANSYS Workbench, a dynamic simulation model of the stator was established, followed by structural optimization and dynamic analysis. The final dimensions of the stator were determined to be $8\text{ mm} \times 1\text{ mm} \times 0.6\text{ mm}$, with measured resonant frequency errors of 6.99% and 5.46%, respectively. Finally, a nonlinear simulation contact model between the stator and mover of the motor was created to verify the feasibility of the bidirectional drive of the ultrasonic motor. A driving performance test device for the micro linear ultrasonic motor was constructed. The measured results indicated that with a driving voltage of 60 Vpp, the maximum no-load speed was 53.3 mm/s, the maximum load was 43.3 mN, and the thrust-to-weight ratio was 280. Experimental results demonstrate that the micro ultrasonic motor has a viable principle, a simple and compact structure, and good output performance, suggesting broad application prospects in precision drive fields such as optical systems, precision positioning systems, and mobile terminals.

Key words: micro ultrasonic motor; standing wave; dynamic simulation; vibration characteristics

1 引言

超声电机是一门融合了超声、振动、材料科学、摩擦学、电子学和控制科学等多个领域的综合性学科。近年来,由于其结构简单紧凑、响应速度快、低速大驱动力、断电自锁、电磁兼容性强等优点,超声电机受到了研究人员的广泛关注^[1-6]。目前,超声电机广泛应用于航空航天、光学系统、精密定位系统、微型机器人、小型驱动系统和微机电系统等先进技术领域^[7-9]。在民用方面,超声电机也有很大的市场需求,如相机、手机镜头模组和精密手表等^[10-14]。随着微电子技术的快速发展,许多行业中亟需微型化的执行器。然而,以电磁电机为例,当其直径小于 8 mm 时,由于线圈线径很小,会产生过多的焦耳热,导致其效率、精度和可靠性急剧下降,且其结构相对复杂,难以小型化^[15-16]。相比之下,超声电机在小型化方面具有很强的竞争优势。

直线式超声电机按波形传播方式可分为行波式直线超声电机和驻波式直线超声电机^[17]两种。Liu^[18]等设计了基于两个定子一阶弯曲振动的直线超声电机,电机尺寸为 $39.8\text{ mm} \times 17.6\text{ mm} \times 6\text{ mm}$,在 150 Vpp 驱动电压下,电机的最大推力为 4.9 N,最大速度为 364 mm/s。Xu^[19]等设计的基于三种弯曲耦合模态的 U 型直线超声电机尺寸为 $52\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 5\text{ mm}$,在 180 V 激励电压下,电机空载速度为 89.03 mm/s。上述的两种直线超声电机的尺寸均处于厘米级别,并且

驱动电压较高,不适合在狭小空间、低电压条件下使用。Mashimo^[20]等设计了带孔方形薄板式电机,其尺寸为 $0.9\text{ mm} \times 4.5\text{ mm} \times 4.5\text{ mm}$,在 100 Vpp 驱动电压下的最大驱动力 12.9 mN,该超声电机尺寸较小,能够很好地满足空间要求,但驱动电压稍高,驱动力较小。目前对于尺寸处于毫米级别,驱动力在 30 mN 以上、低压驱动的微型直线超声电机研究较少。

针对以上问题,本文设计了一种驻波式多足微型直线超声电机。通过驱动原理和定子驱动足表面质点运动学分析选取了定子的工作模态并完成定子的结构设计;利用有限元软件 ANSYS Workbench 建立微型直线超声电机定子的有限元模型,通过仿真对定子进行尺寸优化及动力学分析;建立微型直线超声电机接触仿真模型,验证了超声电机定子结构设计的可行性。最后,对样机的振动特性和机械特性进行实验测试分析。

2 原理

2.1 定子驱动原理

本文设计的微型直线超声电机主要由定子、摩擦层和滑轨组成。其中,定子部分主要由弹性体、PZT、上下电极、绝缘层以及连通线组成,电机结构如图 1 所示。

微型直线超声电机采用单相驻波振动模态驱动原理,单模态直线超声电机结构简单,结构

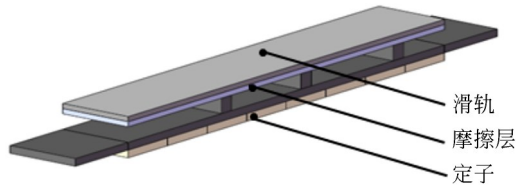


图1 电机结构

Fig.1 Motor structure

尺寸设计较为灵活,易于实现微型化。通过施加两种不同激励的交流电压到压电陶瓷片上时,由于压电陶瓷的逆压电效应,定子会产生两种不同的驻波弯曲振动模态,从而使驱动足产生右或左对角线运动。此时,给定子施加预压力,驱动足将驱动滑轨向右或向左进行直线运动^[21],如图2所示。

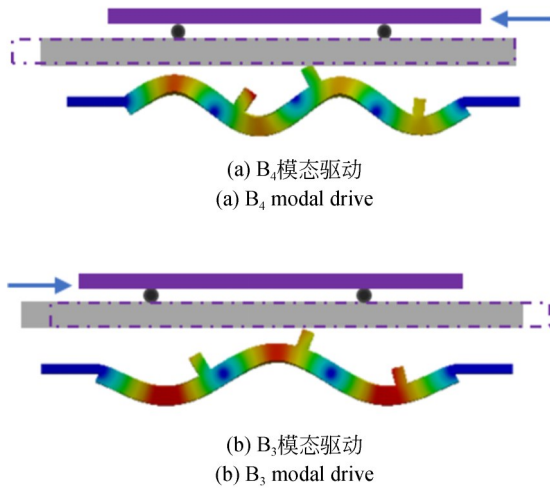


图2 不同模态下定子驱动形态

Fig.2 Stator drive morphology under different modes

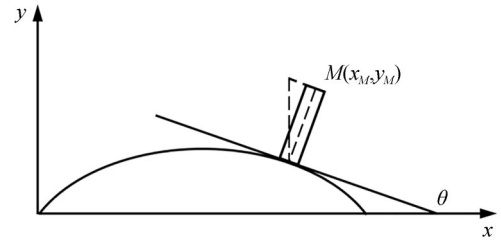
2.2 定子驱动足表面质点运动学分析

根据电极分区和极化方式,在定子表面电极上施加合适的激励电压后,定子会产生驻波振动,驱动足表面质点随波形运动,如图3所示。这里主要分析位于驻波波峰的右端(图3(a)中M点)和左端(图3(b)中M'点)时的质点运动。

驻波可表示为:

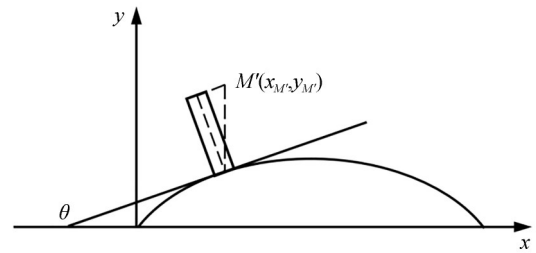
$$y = A \sin\left(\frac{x}{\lambda} 2\pi\right) \sin(\omega t), \quad (1)$$

其中 A, λ, ω 分别代表定子振幅、波长以及定子驻波运动的角速度。经公式推导可得点 M 沿 x 轴



(a) 位于波峰右侧

(a) Located on the right side of the wave peak



(b) 位于波峰左侧

(b) Located on the left side of the wave peak

图3 驱动足运动分析

Fig.3 Driving foot movement analysis

和 y 轴的位移公式^[22]:

$$\begin{cases} \Delta x_M = -LA \frac{2\pi}{\lambda} \cos\left(\frac{x_M}{\lambda} 2\pi\right) \sin(\omega t) \\ \Delta y_M = A \sin\left(\frac{x_M}{\lambda} 2\pi\right) \sin(\omega t) \end{cases}, \quad (2)$$

式中 L 为驱动足高度。对于点 M , 有:

$$\begin{cases} -LA \frac{2\pi}{\lambda} \cos\left(\frac{x_M}{\lambda} 2\pi\right) > 0 \\ A \sin\left(\frac{x_M}{\lambda} 2\pi\right) > 0 \end{cases}. \quad (3)$$

由此可知,当驱动足位于波峰右侧时,驱动足表面质点可以推动与其接触的动子向右运动,如点 M 。同理,当驱动足位于波峰左侧,驱动足表面可以推动与其接触的动子向左运动,点 M' , M' 点沿 x 轴和 y 轴的位移如下:

$$\begin{cases} \Delta x_{M'} = -LA \frac{2\pi}{\lambda} \cos\left(\frac{x_{M'}}{\lambda} 2\pi\right) \sin(\omega t) \\ \Delta y_{M'} = A \sin\left(\frac{x_{M'}}{\lambda} 2\pi\right) \sin(\omega t) \end{cases}. \quad (4)$$

2.3 定子结构设计

本文的定子尺寸在毫米级,谐振频率相对较

高。根据模态仿真结果,选取定子的驱动模态频率为 100~300 kHz,最终确定三阶(B_3)、四阶(B_4)弯曲振动模态作为定子的驱动模态,并根据模态进行定子结构设计。(模态仿真在 3.1 节中进行详细分析)。定子结构设计中,驱动足位置的选择和电极的合理布置是两个关键的问题。

多足驻波型超声电机共有 3 个驱动足。该直线超声电机基于单相驻波原理,即 B_3 驻波振动模态实现右向驱动, B_4 驻波振动模态实现左向驱动。驱动足的位置设计需要满足在 B_3 、 B_4 两种工作模态下,驱动足位于定子驻波波峰的不同侧。在 B_3 振动模态时,驱动足全部位于驻波波峰的右侧,谐振时驱动足质点形成一致向右的斜线运动轨迹,在预压力作用下产生向右的驱动力,驱动滑轨向右做直线运动;在 B_4 模态振动时全部位于波峰的左侧,谐振时驱动足质点形成一致向左的斜线运动轨迹,在预压力作用下产生向左的驱动力,驱动滑轨向左做直线运动。根据 B_3 、 B_4 驻波振动模态的特点,可以得出共有 3 个满足要求的驱动足放置位置,如图 4 所示,驱动足可以布置在 A 区间或者 B 区间。本文中的定子将驱动足布置在 A 区间,即采用 B_3 模态下驱动足均在波峰右侧, B_4 模态下驱动足均在波峰左侧的布置方式。

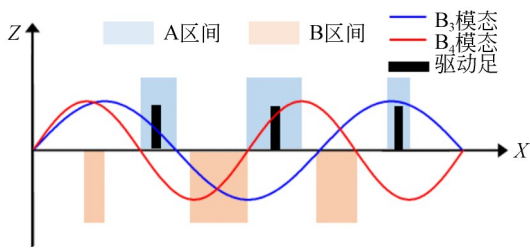


图 4 B_3 和 B_4 模态下驱动足的分布
Fig. 4 Distribution of drive feet in B_3 and B_4 modes

合理的电极分区是定子工作模态能够被激发的关键。本文设计的超声电机定子采用整片 PZT 压电陶瓷多分区的方式,电极分区的选择与定子激振产生的驻波波数 n 有关。 n 越大,谐振频率也会相应增加。考虑到加工难度并兼顾 B_3 、 B_4 两种驻波模式,最终选择八电极分区^[23]。图 5 为定子结构。

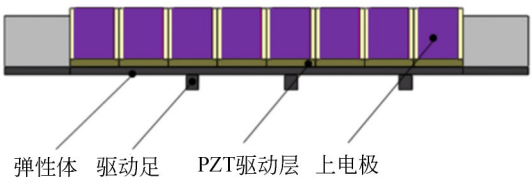


图 5 定子结构
Fig. 5 Stator structure

3 仿真分析

动力学仿真分析采用的运动方程如下:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = F(t), \tag{5}$$

其中: M 、 C 和 K 分别为结构的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵, u 为位移向量, $F(t)$ 为载荷力向量。不同的动力学分析类型对应不同的方程形式。在模态分析时, $F(t)=0$, 一般忽略不计; 谐响应分析时, $F(t)$ 和 $u(t)$ 都假设为谐函数, 如 $A\sin(\omega t)$, A 为振幅, ω 为频率。

3.1 定子模态分析

本文基于 Ansys Workbench 建立了该定子的参数化有限元仿真模型, 该模型由 PZT 驱动层和弹性体组成。通过定子模态分析, 求解定子工作模态的特征频率。分析时, 采用两端固定的约束方式, 并忽略预压力的影响。弹性体材料选用 TC4, 其密度为 $4\,500\text{ kg/m}^3$, 弹性模量为 $1.1 \times 10^{10}\text{ N/m}^2$, 泊松比为 0.34。PZT 驱动层的材料参数见表 1。

表 1 PZT 材料仿真参数

Tab. 1 Simulation parameters of PZT material

参 数	变 量	数 值
密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	—	7 500
	E_1	1.27×10^{11}
弹性模量/($\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$)	E_2	1.17×10^{11}
	E_3	1.17×10^{11}
压电耦合系数/($\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$)	e_{13}	-6.62
	e_{23}	23.24
	e_{33}	23.24
相对介电常数	κ_{11}	1 704.4
	κ_{22}	1 433.6
	κ_{33}	1 433.6
居里温度/ $^{\circ}\text{C}$	—	300

选取的分析频率为 20~500 kHz, 计算前六阶弯曲振动特征频率, 其模态振型及相应的特征频率如图 6 所示。定子工作模态的选择一般需要考虑以下因素: (1) B_n 模态中, n 越大, 共振时的波峰越多, 可以布置更多的驱动足, 有助于提高驱动时的接触稳定性, 从而提升定子的驱动性能; (2) B_n 模态中, n 越大, 模态阶数越高, 定子的特征频率偏高, 共振时的幅值偏小, 不利于驱动;

(3) B_n 模态的选择需要匹配合适的 PZT 驱动层上电极分区, 以保证在上电极表面施加电信号后, PZT 驱动层能够激发出预想的定子 B_n 模态振型。

综合考虑驱动足数量、模态频率及电极分区等因素, 本文最终选择三阶(B_3)和四阶(B_4)弯曲振动模态作为定子的的工作模态, 匹配 3 个驱动足、8 分区电极布置。

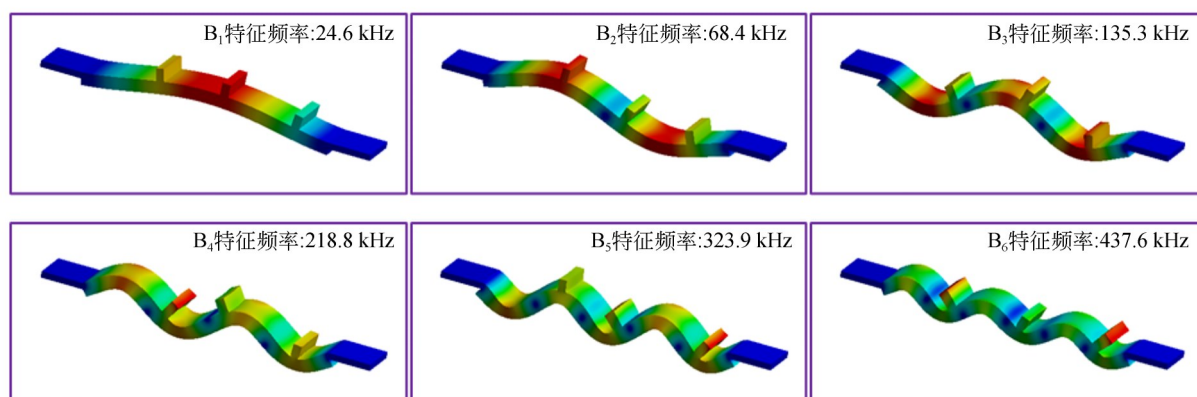


图 6 定子 B1 至 B6 模态振型及特征频率

Fig. 6 Mode shapes and characteristic frequencies of stator B1 to B6

3.2 定子弹性体结构优化

定子的弹性体厚度和齿高直接影响定子的特征频率, 较低的特征频率可以激发较高的振幅, 从而提高定子的驱动性能。因此, 基于 Ansys Workbench 有限元仿真软件, 选择在 B_3 、 B_4 模态下对定子弹性体厚度和齿高进行优化。考虑加工及测试难度后, 弹性体厚度 H_2 的优化范围为 110~250 μm , 取值间隔为 20 μm ; 驱动足高度 H_3 的优化范围为 200~340 μm , 取值间隔为 20 μm 。定子尺寸标注如图 7 所示。

弹性体厚度 H_2 与特征频率的关系如图 8(a) 所示, 随着弹性体厚度的增大, B_3 、 B_4 两种模态下的特征频率都会急剧上升。降低弹性体厚度虽然可以降低特征频率, 但会减小定子的抗弯强度, 同时增加加工难度。因此, 综合考虑弹性体厚度 H_2 取 0.15 mm。驱动足高度 H_3 与特征频率的关系如图 8(b) 所示。

随着齿高的增大, B_3 、 B_4 两种模态下的特征频率轻微降低, 这表明驱动足高度 H_3 对特征频率

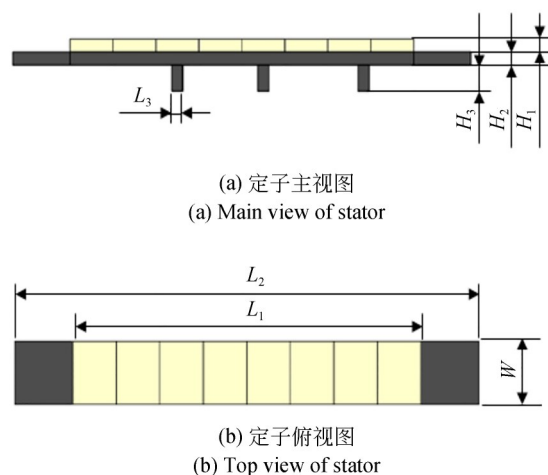
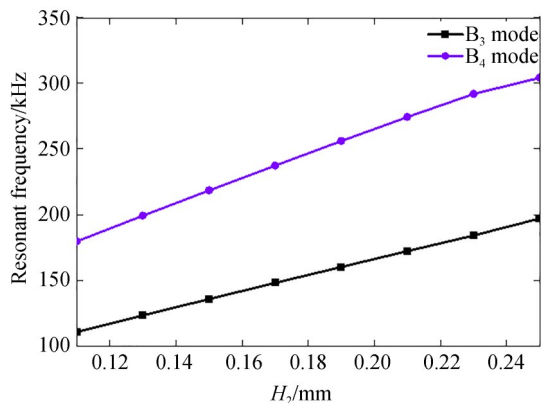


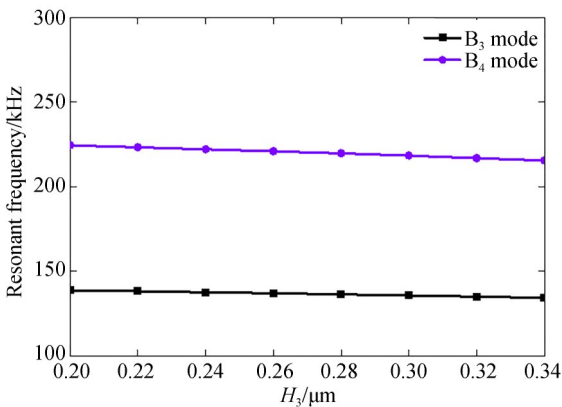
图 7 定子尺寸标注图

Fig. 7 Stator structure and dimension annotation

的敏感度低。增大齿高可以降低特征频率, 但齿高过大不便于齿形加工。因此, 综合考虑齿高取 0.3 mm。结构优化后定子的最终尺寸见表 2, 此时, 通过模态分析得到 B_3 、 B_4 两种模态的特征频率分别为 135.3, 218.8 kHz。



(a) 特征频率- H_2 特性曲线
(a) Characteristic frequency- H_2 characteristic curves



(b) 特征频率- H_3 特性曲线
(b) Characteristic frequency- H_3 characteristic curves

图 8 特征频率随优化参数的变化曲线
Fig. 8 Variation of characteristic frequency with optimization parameters

表 2 定子最终尺寸参数

Tab. 2 Final dimension parameters of stator (mm)

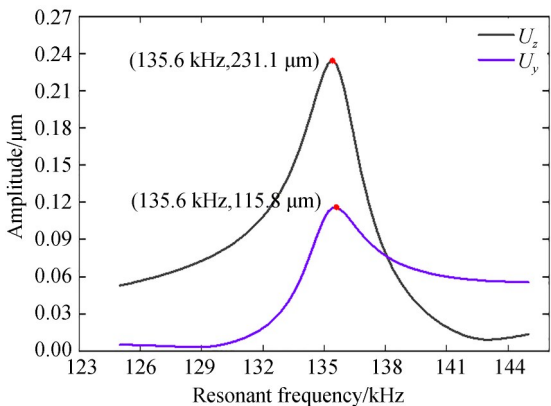
参数	数值	参数	数值
W	1	H_1	0.15
L_1	6	H_2	0.15
L_2	8	H_3	0.3
L_3	0.2		

3.3 定子谐波响应分析

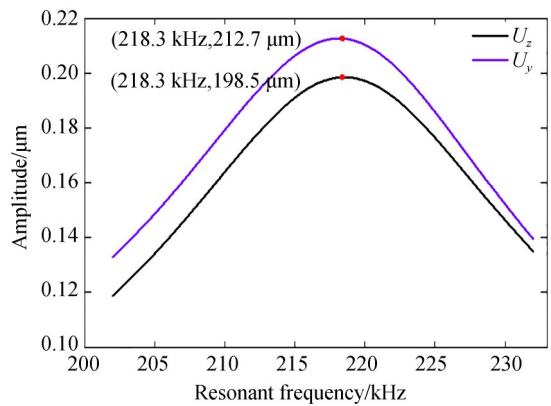
通过模态分析可以得到定子的谐振频率区间,但是只是物理参量的相对值。谐波响应分析能够得到定子的实际振动状态(谐振频率、位移等)。分析时,对压电定子上电极处施加相应相位差的交流电压信号,幅值为 30 V。对于 B_3 模态,扫频范围为 125~245 kHz,步长为 1 kHz;对

于 B_4 模态,扫频范围为 202~332 kHz,步长为 1 kHz。求解定子驱动足表面质点的 Z , Y 方向稳态振幅,结果如图 9 所示。

由图可知, B_3 模态下驱动足表面稳态振幅 Z 向最大值为 231.1 nm, Y 向最大值为 115.8 nm, 该点的谐振频率为 135.6 kHz; B_4 模态下驱动足表面稳态振幅 Z 向最大值为 198.5 nm, Y 向最大值为 212.7 nm, 该点的谐振频率为 218.3 kHz。



(a) B_3 模态谐波响应分析
(a) B_3 modal harmonic response analysis



(b) B_4 模态谐波响应分析
(b) B_4 modal harmonic response analysis

图 9 定子驱动足表面质点振幅动态响应曲线
Fig. 9 Dynamic response curves of particle amplitude on stator driven foot surface

3.4 定子瞬态分析

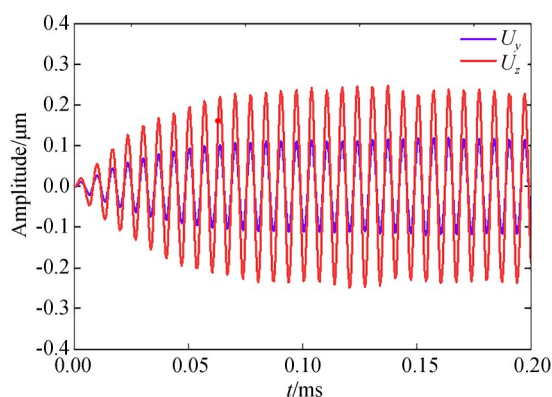
瞬态分析能够得出电机定子结构特性在载荷作用下随着时间的变化情况。为了得到质点振幅随时间的变化规律并验证电机定子表面质点的运动轨迹,本文对压电定子进行了瞬态分

析。仿真中,电压载荷频率须与谐振频率一致,根据上文的谐响应分析结果可知, B_3 模态的谐振频率为 135.6 kHz, B_4 模态的谐振频率为 218.3 kHz。PZT 上电极共有 8 个分区,从左到右标记 1,3,5,7 分区为一组(A组),2,4,6,8 分区为一组(B组)。 B_3 模态下,A组电极施加电压载荷 $v=30 \cdot \sin(2\pi \cdot 218\,800t)$,B组电极施加电压载荷 $v=-30 \cdot \sin(2\pi \cdot 218\,800t)$; B_4 模态下,A,B两组电极均施加电压载荷 $v=30 \cdot \sin(2\pi \cdot 135\,600t)$ 。在瞬态分析的求解控制中设置 30 个周期,每个周期设置 10 个子步。

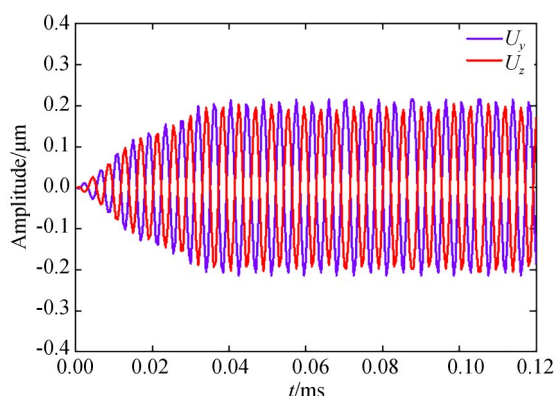
该电机定子驱动足共 3 个,且三足的振动形式基本一致,由于篇幅限制,本文主要分析中间位置的齿的振动特性。由图 10 可以看出,两种驱动模态下, $t=0$ 时刻, Y 和 Z 方向的位移都为 0,

在前几个周期的激振中, Y 和 Z 方向的位移呈现周期性变大的趋势,当 $t=12T$ (T 为定子谐振周期)时, Y 和 Z 方向位移值均达到最大。 B_3 模态下,驱动足表面振幅 Z 向稳定在 235 nm, Y 向稳定在 113 nm; B_4 模态下,驱动足表面振幅 Z 向稳定在 204 nm, Y 向稳定在 214 nm,此后定子振动达到平衡。

如图 11 所示,验证了超声电机定子分别在 B_3 , B_4 工作模态下驱动足质点的斜线运动轨迹的形成。从运动轨迹可以看出,定子在激振开始时,斜线轨迹并不一致,随着 Y 和 Z 方向上位移的逐渐增大,斜线轨迹趋于一致。当两个方向的位移同时达到最大值时,在 B_3 驱动模态下,定子驱动足质点形成一致向右的斜线运动轨迹;在 B_4 驱动模态下,定子驱动足质点形成一致向左的斜



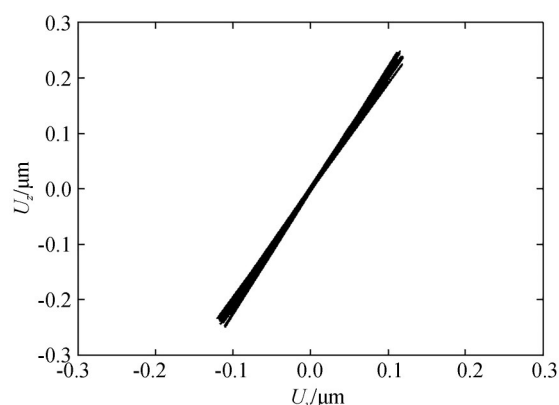
(a) B_3 模态驱动足质点
(a) B_3 mode driven foot particle



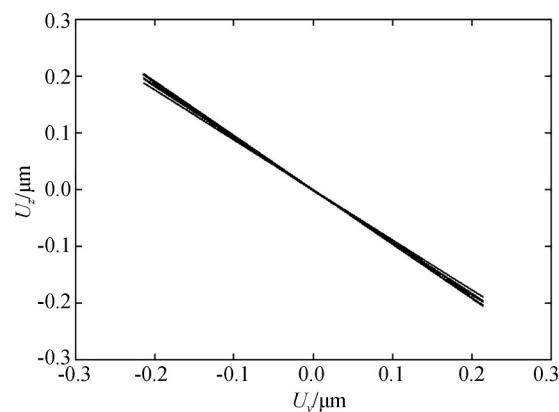
(b) B_4 模态驱动足质点
(b) B_4 mode driven foot particle

图 10 驱动足质点 Y , Z 方向的振幅响应

Fig. 10 Y and Z direction amplitude response of drive foot particle



(a) B_3 模态驱动足质点
(a) B_3 modal driving foot particle



(b) B_4 模态驱动足质点
(b) B_4 modal driving foot particle

图 11 驱动足质点的运动轨迹

Fig. 11 Motion trajectory of drive foot particle

线运动轨迹。此时,定子达到振动平衡,超声电机实现稳定运行。

4 仿真及实验分析

4.1 接触仿真分析

前文通过瞬态动力学分析得到了压电定子驱动足质点轨迹。为了进一步分析电机定子驱动动子做直线运动的情况,本文建立了电机定、动子之间的非线性接触仿真模型,如图 12 所示。

在接触分析中,边界条件设置尽可能符合定、动子之间的实际接触驱动。设置动子为刚形体,划分较粗的单元网格,单元尺寸为 $50\text{ }\mu\text{m}$;定子为柔性体,划分较细的单元网格,单元尺寸为 $20\text{ }\mu\text{m}$ 。在定、动子接触面上设置 3 个接触对,选择驱动足上表面为接触面,动子接触表面为目标面,并设置合理的摩擦系数。施加上文中提到的约束方式和激励条件,同时子施加 Y, Z 两个方向的位移约束(零位移)。求解 5 个周期共 50 个子步。

图 13 为 B_3, B_4 两种驱动模式下的接触分析结

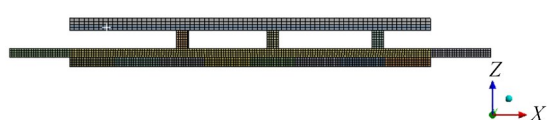


图 12 接触仿真模型

Fig. 12 Contact simulation model

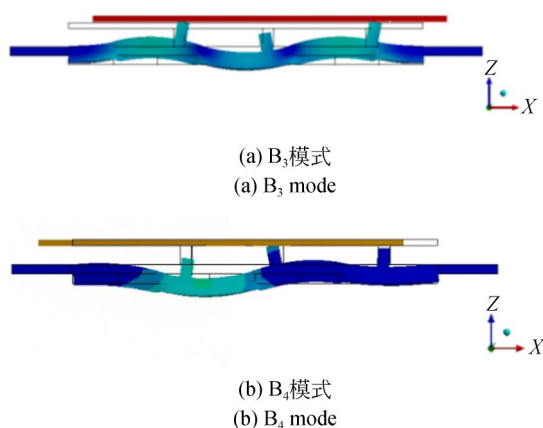


图 13 两种驱动模式下接触仿真结果

Fig. 13 Contact simulation results under two driving modes

果,实线部分为电机静止时的状态。从图中可以看出,定子产生了 B_3, B_4 两种驱动模式,分别驱动动子沿 X 轴正向或反向进行直线运动。由此表明,该微型超声电机可以实现双向驱动,验证了超声电机定子结构设计的可行性。

4.2 定子谐振频率测试

为验证定子的实际驱动性能,采用微铣削与 MEMS 微加工相结合的制备工艺制备多足微型直线超声电机定子,如图 14 所示。其中,定子质量为 0.015 g ,尺寸为 $8\text{ mm} \times 1\text{ mm} \times 0.6\text{ mm}$ 。

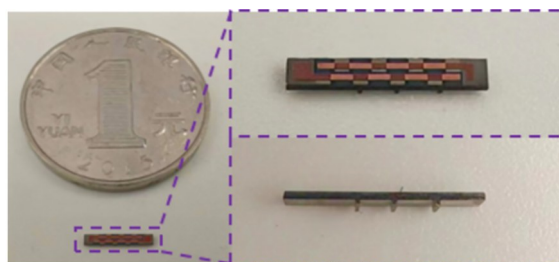


图 14 定子实物

Fig. 14 Physical map of stator

通过测量压电器件的阻抗可以得到器件的谐振频率。当压电器件处于谐振时,其阻抗在局部最高点;当压电器件处于反谐振时,阻抗在局部最低点^[24]。本文使用阻抗分析仪(WK6500B, WayneKerr, 英国)对定子进行阻抗测试,结果如图 15 所示。由该曲线可知,定子的 B_3 模式谐振频率为 145.78 kHz , B_4 模式谐振频率为 206.99 kHz 。与仿真数据对比, B_3 和 B_4 谐振频率的相对误差分别为 6.99% 和 5.46% ,测试数据与有限元仿真结果相近。

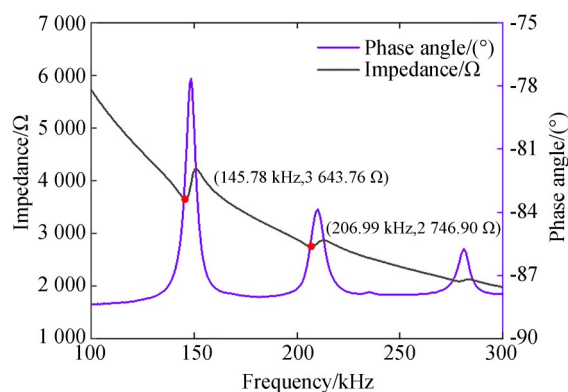


图 15 定子的阻抗特性曲线

Fig. 15 Impedance characteristic curves of stator

4.3 输出性能测试与分析

根据测试需求,采用函数发生器(SDG1020,鼎阳,中国)、功率放大器(LYC-300B,隆仪,中国)、示波器及测试组件等搭建了微型直线超声电机定子驱动性能测试装置,如图 16 所示。其中,测试组件又包括固定位移台、滑块、磁栅尺及压力传感器等。测试时,函数发生器输出的激励电压经过功率放大器放大后输入定子,通过调节电压幅值、固定位移台高度、负载质量等变量,配合磁栅尺、压力传感器级即可测得定子的预压力、驱动速度以及驱动力。

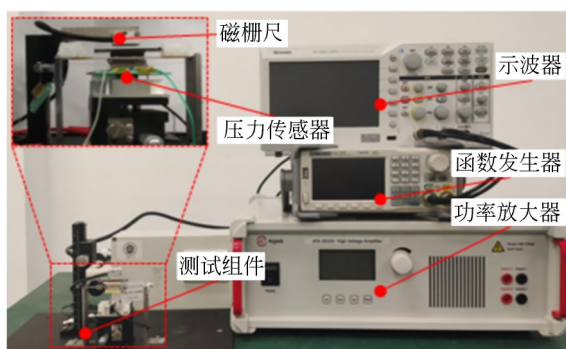


图 16 驱动性能测试装置

Fig. 16 Testing device of drive performance

为了分析定、动子间预压力对超声电机驱动性能的影响,调节测试装置固定位移台的高度,通过改变不同的预压力,测试定子在不同预压力下的空载速度。设置驱动电压为 60 V_{pp},B₃模态的驱动频率为 145.8 kHz,B₄模态的驱动频率为 206.9 kHz。测试结果如图 17 所示,在两种驱动

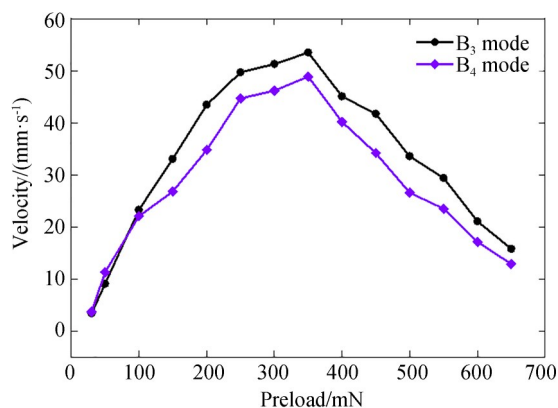


图 17 预压力-空载速度曲线

Fig. 17 Preload and no-load velocity curves

模态下,空载速度均随着预压力先增大后减小。当预压力为 35 mN 时,B₃模态下空载速度达到最大值 53.5 mm/s;B₄模态下空载速度达到最大值 48.9 mm/s。

根据定、动子的弹性接触模型可知,该现象是因为在不改变驱动频率和电压的情况下,预压力决定了定、动子间的摩擦力以及定子和导轨的接触区域面积。较小的预压力不能使定子产生理想的效果,不利于超声电机的摩擦驱动;预压力继续增大超过某个节点后,定子的驱动速度小于导轨的速度,定子对导轨产生阻碍作用^[25],不利于超声电机的摩擦驱动。

图 18 为负载与输出速度特性曲线。实验设置与空载速度测试相同,预压力选择 35 mN。从曲线可知,随着负载的增加,输出速度随之减小,B₃模态下最大负载为 43.3 mN,B₄模态下最大负载为 43.0 mN,最大推重比约为 280。当负载为 30 mN 时,该微型直线超声电机双向均能保持 25 mm/s 左右的驱动速度。

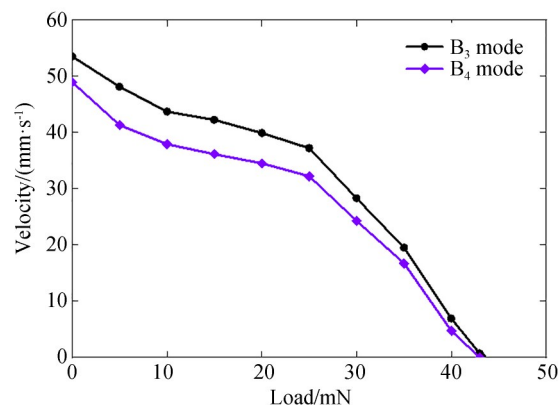


图 18 负载-输出速度曲线

Fig. 18 Load-output speed curves

5 结 论

本文设计了一款多足式微型直线超声电机,分析了超声电机定子的驱动原理,完成定子的结构设计。使用有限元软件 ANSYS Workbench 对定子进行模态、谐响应和瞬态等动力学仿真分析及结构尺寸优化,确定了定子的最终尺寸 8 mm×1 mm×0.6 mm,同时探究了定子的振动特性,得到了其振动模态、谐振频率、振幅及齿上

质点斜线轨迹的形成过程。建立电机定、转子之间的非线性仿真接触模型,验证了超声电机双向驱动的可行性。搭建了微型直线超声电机驱动性能测试装置,对电机的预压力-空载速度特性以及负载-输出速度特性进行了测试。测试结果

显示,在驱动电压为 60 V_{pp} 时,最大空载速度为 53.3 mm/s、最大负载为 43.3 mN。该电机定子结构简单、整体尺寸小,可实现狭小空间内的双向、低电压、大驱动力驱动,在微小空间、低电压驱动领域有着广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] LIU Y X, YAN J P, WANG L, *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.
- [2] MASHIMO T. Miniature preload mechanisms for a micro ultrasonic motor [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2017, 257: 106-112.
- [3] IZUHARA S, MASHIMO T. Linear piezoelectric motor using a hollow rectangular stator[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2020, 309: 112002.
- [4] 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*, 2016, 63(3): 1676-1683.
- [5] KAZUMI T, KURASHINA Y, TAKEMURA K. Ultrasonic motor with embedded preload mechanism [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2019, 289: 44-49.
- [6] ZHANG J J, LU S W, LIAO X X, *et al.* Construction of an intravascular ultrasound catheter with a micropiezoelectric motor internally installed [J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2021, 92(1): 015005.
- [7] ZHANG X F, ZHANG G B, NAKAMURA K, *et al.* A robot finger joint driven by hybrid multi-DOF piezoelectric ultrasonic motor[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2011, 169(1): 206-210.
- [8] CHANG S D, MURDOCK E, MAO Y X, *et al.* Stationary-fiber rotary probe with unobstructed 360° view for optical coherence tomography [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(22): 4392-4394.
- [9] WANG T S, LANCÉE C, BEURSKENS R, *et al.* Development of a high-speed synchronous micro motor and its application in intravascular imaging [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2014, 218: 60-68.
- [10] UCHINO K. Piezoelectric motors for camera modules [C]. *Actuator 2008 Conf. Proc. Bremen*, 2008, 157-160.
- [11] KO H P, JEONG H, KOC B. Piezoelectric actuator for mobile auto focus camera applications [J]. *Journal of Electroceramics*, 2008, 23(2): 530-535.
- [12] HENDERSON D A. Simple ceramic motor. Inspiring smaller products [C]. *Actuator 2006, 10th International Conference on New Actuators, Bremen, Germany*, 2006.
- [13] PAIK D S, YOO K H, KANG C Y, *et al.* Multi-layer piezoelectric linear ultrasonic motor for camera module [J]. *Journal of Electroceramics*, 2009, 22(1): 346-351.
- [14] YABUKI A, AOYAGI M, TOMIKAWA Y, *et al.* Piezoelectric linear motors for driving head element of CD-ROM [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1994, 33(9S): 5365-5369.
- [15] UCHINO K. Piezoelectric actuators 2006 [J]. *Journal of Electroceramics*, 2008, 20(3): 301-311.
- [16] LIU D K C, FRIEND J, YEO L. A brief review of actuation at the micro-scale using electrostatics, electromagnetics and piezoelectric ultrasonics [J]. *Acoustical Science and Technology*, 2010, 31(2): 115-123.
- [17] 赵淳生. 超声电机技术与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2007: 7-9.
- ZHAO CH SH. *Ultrasonic Motors Technologies and Applications* [M]. Beijing: Science Press, 2007: 7-9. (in Chinese)
- [18] LIU Z, FU Q W, YANG P, *et al.* Design and performance evaluation of a miniature I-shaped linear ultrasonic motor with two vibrators [J]. *Ultrasonics*, 2023, 131: 106965.
- [19] XU D M, YANG W Z, ZHANG X H, *et al.* A U-shaped and alternately driven ultrasonic motor using three bending coupled modes [J]. *Smart Material Structures*, 2023, 32(3): 035017.
- [20] IZUHARA S, MASHIMO T. Design and charac-

- terization of a thin linear ultrasonic motor for miniature focus systems[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2021, 329: 112797.
- [21] QIAN X H, SHEN M H. A new standing-wave linear moving ultrasonic motor based on two bending modes[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2011, 101/102: 140-143.
- [22] HE S, CHEN W, TAO X, *et al.* Standing wave bi-directional linearly moving ultrasonic motor[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 1998, 45(5): 1133-1139.
- [23] 林书玉. 超声换能器的原理及设计[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 13-14.
- LIN SH Y. *Principle and Design of Ultrasonic Transducer* [M]. Beijing: Science Press, 2004: 13-14. (in Chinese)
- [24] 鲍善惠, 王艳东. 压电换能器在并联谐振频率附近特性的研究[J]. *声学技术*, 2006, 25(2): 165-168.
- BAO SH H, WANG Y D. Behavior of piezoelectric transducer at frequencies near parallel resonance [J]. *Technical Acoustics*, 2006, 25(2): 165-168. (in Chinese)
- [25] WALLASCHEK J. Contact mechanics of piezoelectric ultrasonic motors [J]. *Smart Material Structures*, 1998, 7(3): 369-381.

作者简介:



王大志(1978—),男,黑龙江伊春人,博士,教授,博士生导师,2003年、2006年于英国伦敦大学玛丽女王学院分别获得硕士和博士学位,主要研究方向为微纳喷印制造技术与装备、高性能压电传感器与执行器、复杂工况传感技术与系统。E-mail: d. wang@dlut.edu.cn

通讯作者:



杨明洛(1997—),男,河南洛阳人,硕士研究生,主要研究方向为高性能压电传感器与执行器。E-mail: mingluoyang@126. Com