

新型行波直线超声电机的结构与有限元分析*

杨 淋¹, 陈 亮^{1,2}, 任韦豪¹, 张蕉蕉^{1,3}, 唐思宇⁴

(1. 南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室 南京, 210016)

(2. 中国科学院微小卫星创新研究院 上海, 201210)

(3. 陆军工程大学野战工程学院 南京, 210007)

(4. 南京航达超控科技有限公司 南京, 211100)

摘要 提出了一种新型行波直线超声电机结构, 该电机利用 2 个固有频率接近的面内弯曲模态叠加形成沿周向传播的行波, 从而驱动定子做直线运动。首先, 基于有限元法建立了考虑定、转子三维接触的整机动力学模型, 对定子结构尺寸进行设计; 其次, 通过该模型分析了定、转子之间的接触力传递过程、电机的驱动机理、电机稳定运行时驱动足的椭圆运行轨迹、电机的启停特性以及不同输入参数下电机的输出性能等动力学特性; 最后, 试制原理样机, 搭建实验平台对电机性能进行测试。研究表明: 该电机工作原理可行, 机械输出性能良好; 所建立的有限元模型合理, 使用该模型能预测电机的性能, 并进一步指导电机的设计及优化。

关键词 行波; 直线超声电机; 有限元法; 动力学模型

中图分类号 TH111; TH122; TH113

引 言

随着 20 世纪 40 年代压电陶瓷材料的发现, 一系列基于压电陶瓷逆压电效应的压电作动器应运而生^[1-3]。超声电机作为一种新型作动器, 具有结构紧凑、断电自锁、响应速度快和定位精度高等优点, 在航空航天、光学仪器和精密定位系统中具有广阔的应用前景^[4-5]。

直线超声电机(linear ultrasonic motors, 简称为 LUSM)作为超声电机的重要分支, 近年来得到了迅速发展。按照驱动足上椭圆运动轨迹的形成方式, LUSM 可分为单模态 LUSM^[6]和复合模态 LUSM^[7-9]。其中, 复合模态 LUSM 是目前研究最多、应用最成功的一类电机, 需要使用 2 种频率相同的振动模态组合来叠加形成驱动足上的椭圆运动。然而, 该类电机的定子结构为非规则的对称结构, 能否激励出频率接近的两相模态依赖于高质量的机械加工和装配, 微小的加工误差都会对模态频率一致性有较大的影响, 从而影响电机整体性能。同时, 在定子固定安装时为了不影响电机的工作模态, 在设计阶段需要考虑将两相模态振型的振动节面设计重

合, 利用这个重合的节面进行定子的夹持, 这增加了定子设计的复杂性。

对于定子结构为规则的圆环、杆或者板的超声电机, 通过解析法建立其动力学模型相对容易实现, 并且已有很多学者做了相应的研究^[10-11]。对于伴有开槽或者挖孔等相对复杂结构的定子来说, 想要建立其整机的动力学解析模型, 往往需要做一些假设与简化, 这将导致所建立的模型与实际情况不符, 甚至存在很大误差, 因此只能作为理论上的定性分析。基于有限元的数值解析法能够解决大多数结构复杂的工程问题, 且解法具有很强的通用性。直线超声电机这种利用定、转子之间的摩擦耦合输出动力的结构具有强接触非线性动力学特性, 利用有限元法分析其动力学特性具有巨大的优越性^[12-14]。

为此, 笔者提出了一种新型行波直线超声电机的结构, 该结构具有良好的频率一致性和定子安装与固定方式简单的优点。利用有限元软件 ADINA 建立了该电机的整机三维动力学模型, 预测了电机的输出性能, 分析了定子和转子接触力的传递过程, 得到驱动足上的运动轨迹。通过试制原理样机并搭建实验平台, 进行了样机的原理验证与性能测试。

* 国家自然科学基金资助项目(51905262, U2037603); 江苏省自然科学基金资助项目(BK20190398)

收稿日期: 2020-10-24; 修回日期: 2020-12-02

1 电机结构和工作原理

1.1 电机结构

行波直线超声电机结构如图 1 所示。该电机主要由底座、外壳、运动平台、定子组件和预压力施加装置组成。定子通过螺栓固定在固定件上,底座上开有滑槽,定子只能在滑槽内上下移动,因此定子只有一个方向的自由度。固定件呈 U 形,底部通过线切割加工成一块柔性板结构,在外壳底部开设有螺纹孔,通过调节预压力螺钉来施加预压力。定子组件由定子、压电陶瓷片 (piezoelectric materials lead zirconate titanate, 简称为 PZT) 和摩擦材料组成。定子是一个对称的空心圆柱结构,其结构简单,可有效保证 2 个模态的共振频率一致。由图 1(b) 可知,定子侧面均匀分布 30 个齿,每个齿呈“凹”字形,且在定子的两端分别加工了柔性腹板和金属配重块。柔性腹板可以隔绝定子侧面以及 2 个端面的振动,使金属配重块上几乎没有振动,通过金属配重块上的螺孔固定定子,这样既不会影响定子的工作模式,也不会降低其振动幅值。

压电陶瓷片的布置与极化方式如图 2 所示。在定子的端面对称粘贴了 2 片相同的压电陶瓷环,用来激发电机的工作模式,该粘贴方式利用了压电陶瓷的 d_{31} 效应。从图 2 可以看出,压电陶瓷环被划分成了一系列扇形区域,且均沿厚度方向极化,但在极化区域之间有 $\lambda/4$ 的区域未极化。将极化的压电陶瓷片分为 4 组 (A, B, C, D), 其中: A 组和 D 组位置相对, B 组和 C 组位置相对。2 片压电陶瓷环的表面分别粘贴了导电膜,用来给定子施加电信号并对定子做接地处理。

图 3 为定子与压电材料的剖面图。其中: L_1 , H_1 , R_1 , R_2 的值分别为 5, 0.5, 30 和 20 mm, 由压电陶瓷片的大小决定。定子作为超声电机的核心驱动部件,其振动特性决定了电机的输出性能。振动特性包括两相模态频率的一致性和定子驱动足的振幅。

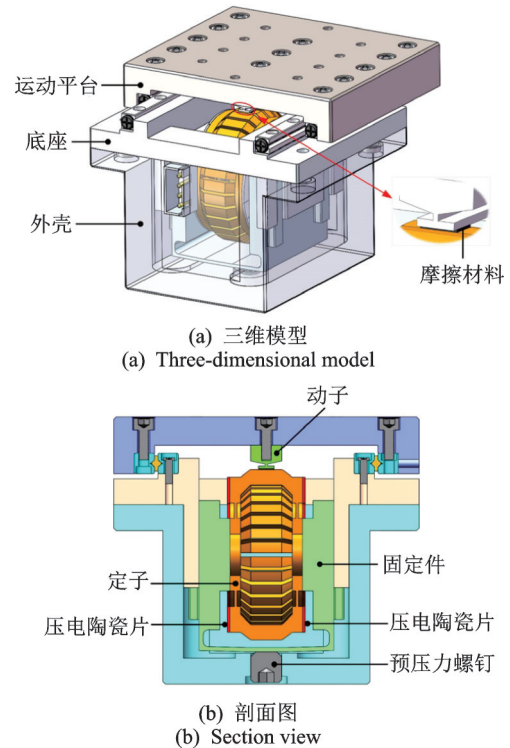


图 1 行波直线超声电机结构

Fig.1 Structure of the traveling wave LUSM

为了获得定子结构的较优尺寸,笔者使用有限元软件 ANSYS/Workbench18.0 对定子结构进行模态分析以及谐响应分析,获得定子结构的最终尺寸参数,如表 1 所示。

1.2 电机的工作原理

该电机利用定子侧面的面内行波驱动动子作直线运动。根据驻波叠加原理可知,2 个相同频率、相同振幅,且在时间和空间上均相差 $\pi/2$ 的模态振型叠加可以形成行波。笔者通过施加相位差为 $\pi/2$ 的同频、等幅交变电信号可以保证两模态在时间上相差 $\pi/2$,且通过未极化的 $\lambda/4$ 区域可以保证两模态在空间上相差 $\pi/2$ 。由于定子结构具有高度的对称性,所以定子的频率一致性也得到很好保证。

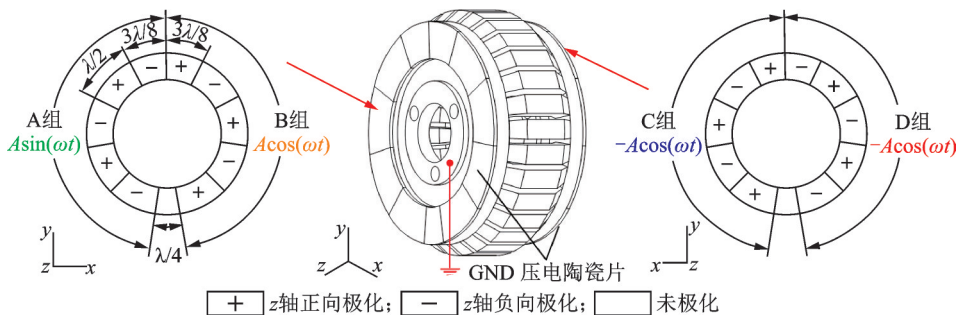


图 2 压电陶瓷片的布置与极化方式

Fig.2 Polarization pattern and distribution of PZT rings

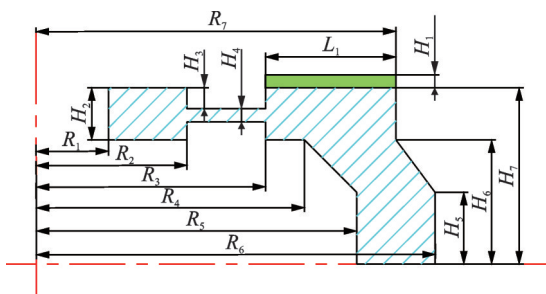


图3 定子与压电材料的剖面图
Fig.3 Section view of stator and PZT

表1 定子结构的最终尺寸参数

Tab.1 Final dimension parameters of stator mm

参数	数值	参数	数值
R_1	4.0	H_3	0.8
R_2	7.0	H_4	0.5
R_3	10.0	H_5	3.0
R_4	11.5	H_6	5.0
R_5	13.5	H_7	7.0
R_6	16.5	L_1	5.0
R_7	15.0	齿数	30
H_1	0.5	齿槽宽	0.8
H_2	2.0		

由振动理论可知,有限长度的圆柱壳具有面内 B_{mn} 弯曲振动模式,其中: m 为轴向节圆的数量; n 为周向波的数量^[4]。笔者选择面内 B_{05} 模式作为电机的工作模式,即工作模式在轴向没有节圆,在周向存在5个波峰。利用有限元仿真软件ADINA对定子进行模式分析,图4为定子的模式。其中,共振频率分别为52 241 Hz和52 247 Hz。两共振频率差仅为6 Hz,表明该定子具有良好的频率一致性。

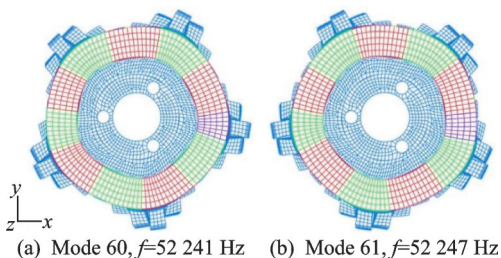


图4 定子的模式

Fig.4 The working modal of stator

利用上述2个正交模式叠加就能在定子侧面形成沿周向传播的行波。笔者提出的电机结构只利用定子上的某一个齿作为驱动足,在一定的预压力下,通过定子和动子之间的摩擦作用,驱动动子做直线运动。图5为电机的驱动原理,展示了一个周期内定子齿驱动动子运动的过程。此时,定子侧面的行

波沿逆时针传播,驱动足 P 的运动轨迹为逆时针方向的椭圆,在预压力的作用下动子沿 x 轴做负方向运动。由于当改变施加电信号的相位后,行波可以沿顺时针传播,此时动子沿 x 轴做正方向运动,所以该电机能够实现动子的双向运动。

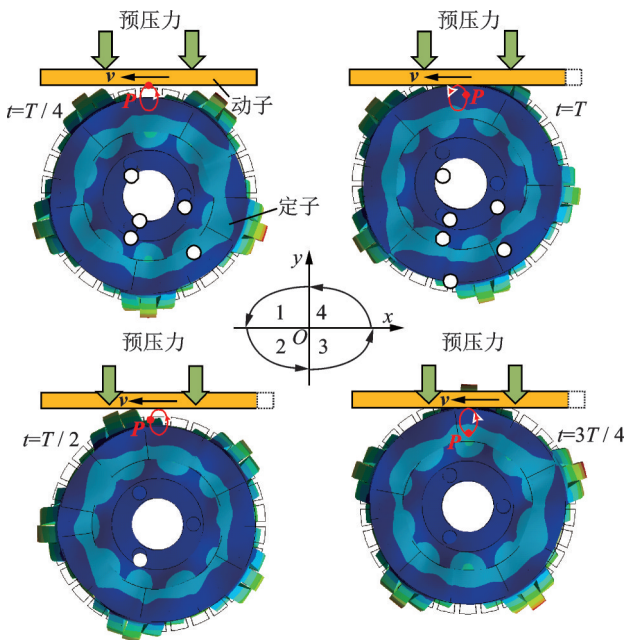


图5 电机的驱动原理

Fig.5 The operating mechanism of motor

2 电机三维动力学有限元分析

2.1 三维动力学有限元模型

笔者利用ADINA软件建立新型行波直线超声电机的三维动力学模型,并进行仿真分析。在不影响电机实际运行状况的前提下,为了减少计算时间,降低计算成本,对图1所示的电机结构进行简化。简化后的电机三维有限元网格模型如图6所示,忽略了电机的外壳、底座、运动平台以及直线导轨,保留了定子、摩擦材料、压电陶瓷片、动子和柔性固定件等。该有限元模型由一阶六面体网格单元组成,其中:定子包括33 990个单元、摩擦材料包括48个单元、压电陶瓷片包括1 200个单元、动子包括1 080个单元以及固定件包括14 070个单元。定子选用磷青铜材料,动子和柔性固定件选用铝材料,摩擦材料选用聚四氟乙烯(poly tetra fluoroethylene,简称为PTFE)、压电陶瓷片选用PZT-8H。常用材料参数和压电陶瓷材料参数如表2,3所示^[15-16]。

ADINA软件中提供了2种阻尼模型,分别为瑞利(Rayleigh)阻尼模型和振型阻尼模型。瑞利阻尼是通过瑞利阻尼系数 α 和 β 来定义,其数学表达式

表 2 常用材料参数

Tab.2 Constants of the common materials

材料	密度/(kg·m ⁻³)	泊松比	弹性模量/(N·m ⁻²)
磷青铜	8 780	0.33	1.15×10 ¹¹
硬铝	2 780	0.33	7.1×10 ¹⁰
PTFE	2 100	0.30	1.2×10 ⁹

表 3 压电陶瓷材料参数

Tab.3 Electro-mechanical properties of the piezo-electric material

参数名称	变量	数值
密度/(kg·m ⁻³)	—	7 500
泊松比	ν_{12}	0.35
	ν_{13}, ν_{23}	0.38
弹性模量/(N·m ⁻²)	E_1, E_2	6.1×10 ¹⁰
	E_3	5.32×10 ¹⁰
	G_{12}	2.26×10 ¹⁰
剪切模量/(N·m ⁻²)	G_{13}, G_{23}	2.11×10 ¹⁰
	e_{13}, e_{23}	-7.209
压电耦合系数/(C·m ⁻¹)	e_{33}	15.118
	e_{51}, e_{62}	12.332
介电常数/(C·(Vm) ⁻¹)	$\epsilon_{11}, \epsilon_{22}$	1.53×10 ⁻⁸
	ϵ_{33}	1.5×10 ⁻⁸

为 $c = \alpha M + \beta K$, 是一种正交阻尼模型。在结构的瞬态动力学计算时, 使用 α, β 来定义相应的瑞利阻尼。通过实验获取瑞利阻尼系数耗时耗力, 甚至有些情况无法获得, 此时可通过振型阻尼比 ξ_i 和计算模型的固有频率来获得瑞利阻尼系数。其关系式为

$$\alpha = 2w_{i1}w_{i2}\xi_i/w_{i1} + w_{i2} \quad (1)$$

$$\beta = 2\xi_i/w_{i1} + w_{i2} \quad (2)$$

其中: ξ_i 为某振型 i 的振型阻尼比; w_{i1}, w_{i2} 分别为包含模态固有频率的频率范围的上限和下限。

按照电机实际边界条件对该模型做简化。导轨的 a 面被完全约束, 来模拟实际的直线导轨。同时, 将固定件 b 面和 c 面的其他自由度约束只释放沿 y 轴方向的自由度, 模拟实际滑槽的效果。在柔性固定件的下表面施加位移载荷模拟预压力, 同时分别在压电陶瓷片的 4 个表面施加如图 6 所示的电信号。仿真计算中通用的参数取值如表 4 所示。

2.2 有限元分析

通过三维动力学模型分析得到电机机械输出特性仿真曲线如图 7 所示。电机在启动阶段, 速度呈明显上升趋势, 大约 1.5 ms 后, 电机速度达到稳定状态。当电机的工作频率设定为 52.2 kHz、负载

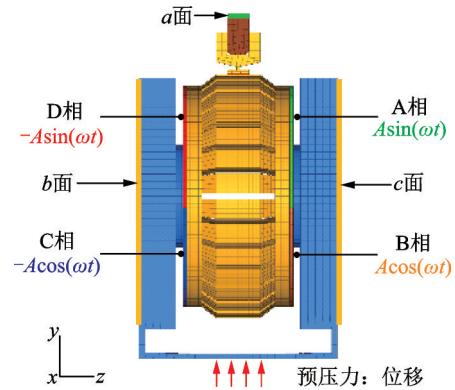


图 6 直线超声电机三维有限元网格模型

Fig.6 3D finite element model of the traveling wave LUSM

表 4 仿真计算中通用的参数取值

Tab.4 Common parameter values in simulation calculation

参数	数值
驱动电压峰值 U_{pp}/V	500
振型阻尼比 ξ	0.008
定、转子接触面摩擦因数 μ_a	0.3
直线导轨摩擦因数 μ_b	0.001
瑞利阻尼系数 α	2 636.78
瑞利阻尼系数 β	2.42×10 ⁻⁸
计算时间步长	1/40 f_i

M 为 0 N 时, 电机在不同预压力下的速度性能曲线如图 7(a) 所示。仿真结果表明, 电机速度随着预压力 F 的增加而降低, 当预压力为 30 N 时, 电机的速度最大, 大约为 510 mm/s。当电机的预压力设定为 30 N、负载为 0 N 时, 电机在不同工作频率下的速度性能曲线如图 7(b) 所示。仿真结果显示, 在 52.2 kHz 时电机的速度最大, 且随着频率增加, 速度降低, 当频率为 53.2 kHz 时, 速度降到 99 mm/s。图 7(c) 为电机加载后的速度曲线, 在预压力为 30 N、工作频率为 52.2 kHz 时, 分别施加不同负载, 当负载加至 8 N 时, 电机速度保持在 36 mm/s。上述分析验证了电机原理可行, 且具有一定的机械输出性能。

该电机通过激励定子侧面的行波来驱动转子运动。与传统的行波旋转超声电机不同, 该电机只利用定子上的某一个齿作为驱动足, 所以要分析定子和转子之间的接触力传递过程, 从而了解该电机的驱动机理。图 8 为定子与转子之间的接触力传递过程, 展示了电机在启动后瞬态和稳态阶段某一时段内定子和转子之间的接触力传递过程与转子运动速度情况, 图中 $t_1 \sim t_4$ 和 $t_1 \sim t_5$ 均为电机一个完整的驱动

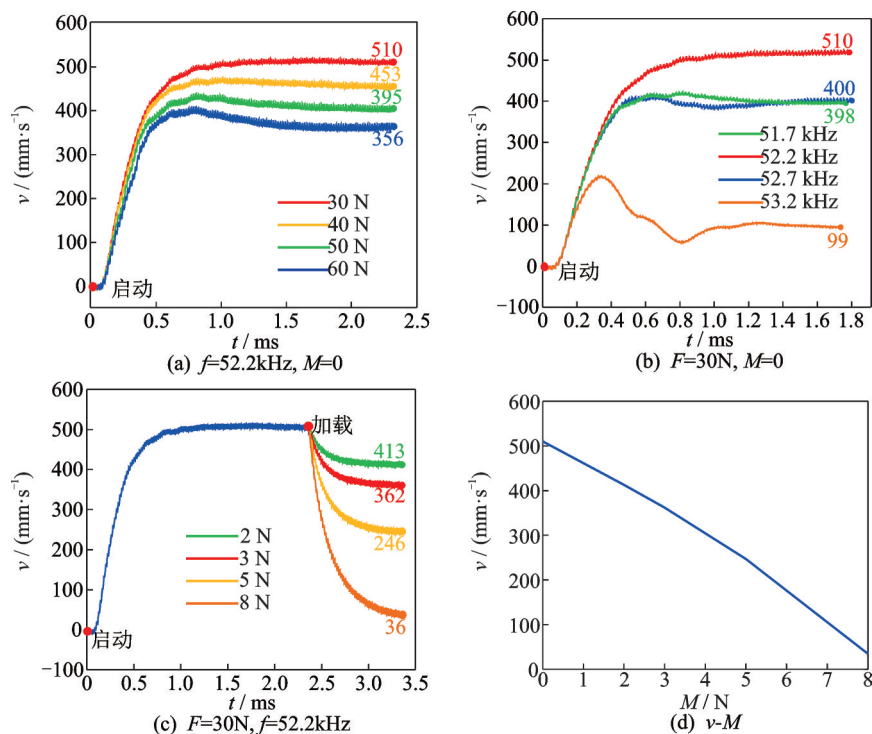


图 7 电机机械输出特性仿真曲线

Fig.7 Simulation results of the mechanical output characteristics of the motor

周期。电机在瞬态的一个驱动周期内,法向接触力为正,说明此时定子与动子一直处于接触状态。在 $t_1 \sim t_2$ 和 $t_3 \sim t_4$ 阶段,切向接触力均为负,此时驱动足对动子起阻碍作用,动子速度降低。在 $t_2 \sim t_3$ 阶段,

切向接触力为正,此时驱动足对动子起驱动作用,动子速度上升,且驱动效果大于阻碍效果,验证了在启动初期电机速度呈上升趋势。当电机在稳态运行的 $t_1 \sim t_4$ 阶段时,驱动足的驱动与阻碍效果与瞬态时类似,即阻碍-驱动-阻碍。在 $t_4 \sim t_3$ 阶段,动子与定子存在脱离现象,此时接触力均为 0,动子在导轨的摩擦作用下缓慢减速。因此电机达到稳态运行时,动子速度并非是一个固定值,而是在一个范围内波动。

上述瞬态和稳态的一个周期内定子驱动足的运动轨迹如图 9 所示。在驱动初期,定子驱动足运动轨迹呈细长的斜椭圆,且振幅比较小。当电机运行达到稳态后,驱动足的各向振幅与相位均发生变化,导致运动轨迹近似为正椭圆,此时法向振幅约为 $2 \mu\text{m}$,切向振幅约为 $3.5 \mu\text{m}$ 。

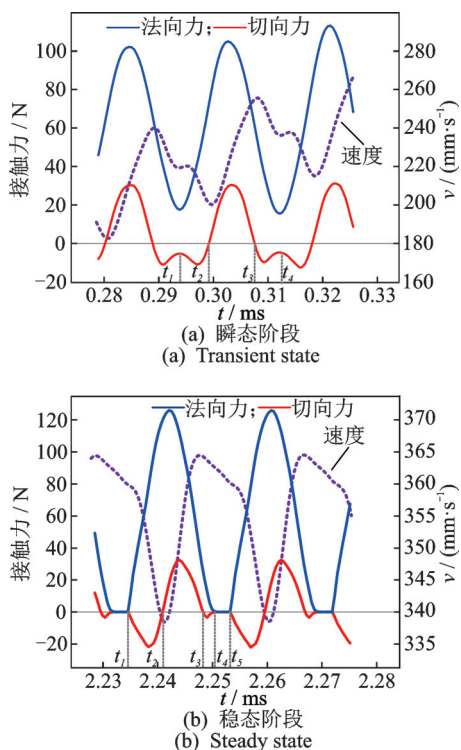
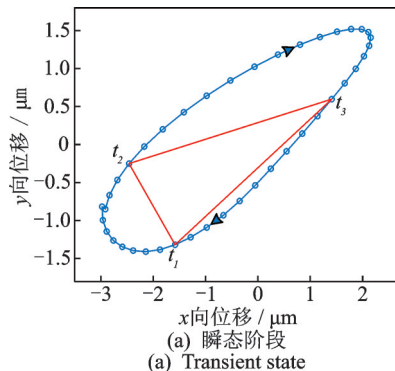


图 8 定子与动子之间的接触力传递过程

Fig.8 The time-domain response of the contact force



(a) Transient state

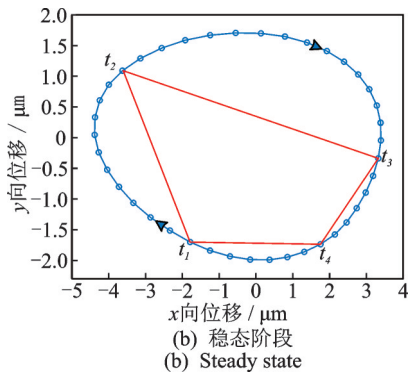


图 9 一个周期内驱动足运动轨迹

Fig.9 The elliptical motion trajectory

3 实验

为了进一步验证电机工作原理的可行性和验证所建模型的合理性,试制了如图 10 所示的行波直线超声电机原理样机。图 10(a)中,定子组件的质量为 40 g,直径为 33 mm,高度为 15 mm。装配完成后的电机如图 10(b)所示。

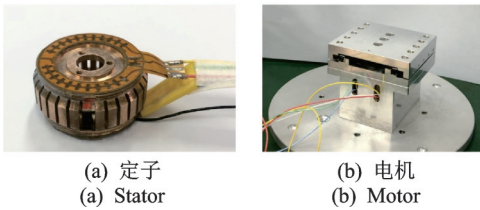
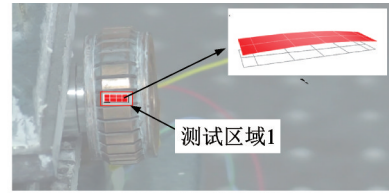


图 10 行波直线超声电机原理样机

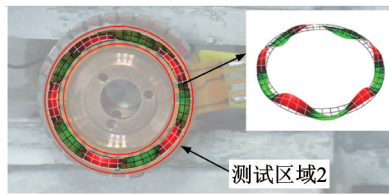
Fig.10 A prototype of the proposed LUSM

利用德国 Polytec 公司生产的 PSV-300F-B 型多普勒激光测振仪对定子进行振动测试实验。为了清晰地描述定子的工作模态,分别取定子端面和定子上某一个齿面作为测试面。图 11 为振动测试实验结果。在图 2 所示的压电陶瓷环的 A 组施加峰峰值为 100 V 的电信号,测得的模态振型如图 11(a), (b)所示。从图可知,在定子端面上形成了拥有 5 个波峰的面外驻波,在定子齿面上出现了一个沿径向弯曲振动的振型。由于这 2 个振型同时出现,所以可以认定此时在定子的侧面同样形成了拥有 5 个波峰的

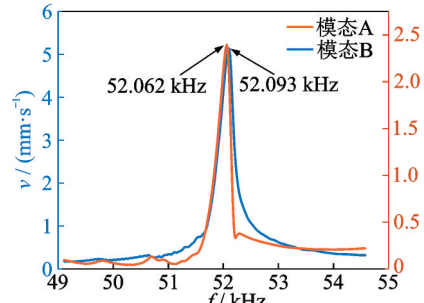
面内驻波,该振型与有限元分析结果一致。在速度幅频特性曲线中,两相模态频率为 52.062 kHz 和 52.093 kHz,与有限元分析结果接近。



(a) 齿面的振型
(a) Vibration shape of one tooth surface



(b) 端面的振型
(b) Vibration shape of the stator end surface



(c) 速度幅频特性曲线
(c) Measured vibration velocity response spectrum

图 11 振动测试实验结果

Fig.11 Vibration scanning results of the stator

图 12 为电机性能测试平台。信号发生器(AFG 3022B)产生相位分别为 $\pi/2$ 和 0 的两相正弦信号,经过信号转换模块将其转换成相位分别为 0, $\pi/2$, π 和 $3\pi/2$ 的四相正弦信号,经过 4 个功率放大器(HFVA 153)放大后,分别施加到压电陶瓷环的 A, B, C, D 来驱动电机运动,电机的运动速度由光栅编码器(Veratus™ VI)测得。

对试制的原理样机进行性能初步测试,实际测得电机空载的最大速度约为 100 mm/s,最大负载约为 1.5 N,进一步验证了该电机工作原理的可行性。实验

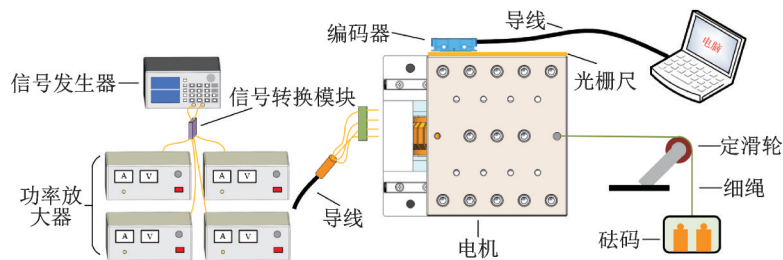


图 12 电机性能测试平台

Fig.12 The experimental platform

结果与有限元分析结果相比偏小,这可能与定子的加工误差和用来粘接定子的胶层厚度有关。因为过厚的胶层会吸收压电陶瓷所产生的应变能,从而导致定子的振幅减小,而在有限元分析中忽略了胶层的影响。尽管如此,实验结果与仿真结果在变化趋势上是一致的,可验证所建立的三维动力学模型基本合理,利用该模型可预测电机的性能,并为电机设计提供理论指导。

4 结束语

提出了一种利用行波驱动的新型直线超声电机结构,给出了定子组件的安装固定和预紧力施加方案,分析了定子结构尺寸参数的确定以及电机的工作原理。使用有限元软件ADINA建立了考虑定、动子三维接触的整机动力学模型,通过该模型计算了电机启动与加载时的速度特性曲线,利用定子与动子之间的接触力传递过程分析了电机的驱动机理,得到电机稳定运行时驱动足的椭圆运动轨迹。实验结果表明:单个定子两相固有频率接近,频率一致性容易实现;所建立的动力学模型可用来预测电机的性能和分析其非线性接触动力学特性等。此研究作为直线超声电机结构设计提供了新的思路,同时为电机动力学模型的建立提供了一种行之有效的方法。需要指出的是,该模型仍存在一些缺陷,今后会继续优化其参数设置,提高模型计算结果的准确性。

参 考 文 献

- [1] HUANG J, ZOU L, TIAN P, et al. Development of a valveless piezoelectric pump with vortex diodes [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2019, 29:125006-125010.
- [2] HUANG J, ZOU L, TIAN P, et al. A valveless piezoelectric micropump based on projection micro litho stereo exposure technology[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 77340-77347.
- [3] ZHANG Q, ZHAO J G, SHEN X, et al. Design, modeling, and testing of a novel xy piezo-actuated compliant micro-positioning stage [J]. *Micromachines*, 2019(10):581.
- [4] 赵淳生. 超声电机技术及应用[M]. 北京:科学出版社, 2007:1-22.
- [5] 卢倩, 陈西府, 黄卫清. 菱形压电电机在并联精密定位平台中的应用[J]. *振动、测试与诊断*, 2020, 40: 680-688.
LU Qian, CHEN Xifu, HUANG Weiqing. Application of rhombic piezoelectric actuator in parallel positioning platform[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2020, 40: 680-688. (in Chinese)
- [6] LIU Z, YAO Z Y, JIAN Y, et al. A novel plate type linear piezoelectric actuator using dual-frequency drive [J]. *Smart Materials and Structures*, 2017, 26 (9) : 095016.
- [7] KUROSAWA M K, KODAIRA O, TSUCHITOI Y, et al. Transducer for high speed and large thrust ultrasonic linear motor using two sandwich-type vibrators [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 1998, 45: 1188-1195.
- [8] LIU Y, SHI S, Li C, et al. A novel standing wave linear piezoelectric actuator using the longitudinal-bending coupling mode [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2016, 251: 119-125.
- [9] ZHANG Q, CHEN H, LIU Y, et al. A bending hybrid linear piezoelectric actuator using sectional excitation [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2018, 271: 96-103.
- [10] HE Y, YAO Z Y, DAI S C, et al. Hybrid simulation for dynamic responses and performance estimation of linear ultrasonic motors [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2019(153/154): 219-229.
- [11] LI X, YAO Z Y, ZHOU S L, et al. Dynamic modeling and characteristics analysis of a modal-independent linear ultrasonic motor[J]. *Ultrasonics*, 2016, 72: 117-127.
- [12] 荆鹏飞. 行波型旋转超声电机三维动力学建模及性能优化[D]. 南京:南京航空航天大学, 2017.
- [13] 张焦焦, 杨淋, 陈亮. 过载下超声电机设计及预压力分析 [J]. *振动、测试与诊断*, 2020, 40: 807-811.
ZHANG Jiaojiao, YANG Lin, CHEN Liang. Design and pre-pressure analysis under overload for ultrasonic motor[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2020, 40: 807-811. (in Chinese)
- [14] YANG L, REN W H, MA C C, et al. Mechanical simulation and contact analysis of the hybrid longitudinal-torsional ultrasonic motor[J]. *Ultrasonics*, 2020(100): 105982.
- [15] BATHE K. ADINA user interface command reference manual[M]. Watertown, NY, USA: ADINA R & D, Inc., 2017: 63-64.
- [16] REN W H, YANG L, MA C C, et al. Output performance simulation and contact analysis of traveling wave rotary ultrasonic motor based on ADINA [J]. *Computers & Structures*, 2019(216): 15-25.



第一作者简介:杨淋,男,1981年9月生,博士、副教授、硕士生导师。主要研究方向为各种类型超声电机及其系统的研发和产业化推广。
E-mail:yanglin@nuaa.edu.cn