

单模态驱动的非对称定子结构塔形超声电机*

陈乾伟, 鞠全勇, 高素美, 杨传森

(金陵科技学院机电工程学院 南京, 211169)

摘要 现有单模态驱动超声电机或者只能单向运动, 或者存在严重磨损。针对此问题, 提出了一种单模态驱动双向运动的塔形超声电机。塔形电机由非对称结构塔形定子和动子构成。塔形定子采用非对称的兰杰文振子结构, 设计有低阶和高阶非对称工作模式以及相应的压电陶瓷片极化布置方案, 通过模式切换就可以实现电机的单模态驱动和正反向运动。分析了电机的工作原理, 制作了原理样机, 并对样机进行了模式实验和机械特性实验。结果表明, 当 A 相单相激励, 电机工作在高阶工作模式, 动子正向运行, 最大速度为 112 mm/s, 最大输出力为 2N; 当 B 相单相激励, 电机工作在低阶工作模式, 动子反向运行, 最大速度为 94 mm/s, 最大输出力为 3 N。

关键词 单模态; 非对称; 超声电机; 压电

中图分类号 TM356

引言

直线超声电机 (linear ultrasonic motor, 简称 LUSM) 是在超声频段利用压电陶瓷的逆压电效应进行工作的直线作动器。它具有低速大输出力、断电自锁、无电磁干扰、定位和速度控制精度高等优点, 在精密驱动等领域有着广泛的应用^[1-10]。

直线超声电机分为双模态驱动和单模态驱动两类^[1-5]。和双模态超声电机相比, 单模态直线超声电机对工作模式频率一致性要求宽松, 有利于电机结构的简单化^[7-10]。

Sashida 等^[7]提出了一种单模态驱动的倾斜动子结构的振动片形超声电机, 该电机的工作模式只有 1 阶纵振模式, 因此只能单向运动, 且由于采用倾斜动子结构, 导致电机运行时磨损严重。He 等^[8]提出了一种单模态驱动的矩形板式直线超声电机, 解决了文献^[7]电机存在的问题, 但由于矩形板式结构的局限, 使得该电机能量利用率不高。Peter 等^[9]提出了一种单模态驱动的倾斜动子超声电机, 其借鉴了文献^[8]电机的方法来实现电机的正反向运动, 并采用杆式定子结构和柔性夹持提高能量利用率; 但由于采用了倾斜动子结构, 导致电机运行时磨损严重。此外采用叠层压电陶瓷作为驱动元件, 成本

较高。陈乾伟等^[10]提出了一种单模态驱动的倾斜动子塔形超声电机, 在借鉴文献^[9]电机的基础上, 通过采用塔形定子结构和与之相适应的两个工作模式, 实现电机的正反向运动。由于该电机采用普通的 PZT 压电陶瓷片作为驱动元件, 解决了电机成本较高的问题; 但同样由于采用倾斜动子结构, 导致电机运行时磨损严重。

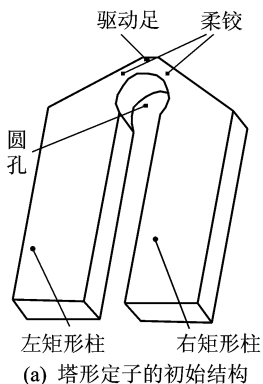
上述单模态超声电机存在以下缺点: 能量利用率不高, 只能单向运动, 成本较高, 磨损严重。这些问题限制了上述电机的实际使用。针对此, 笔者提出了一种含非对称塔形定子的单模态驱动双向运动的直线超声电机^[11]。

1 非对称塔形定子与塔形超声电机

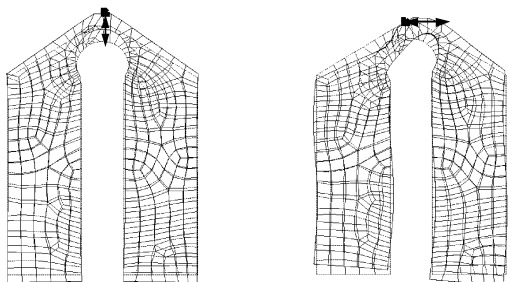
1.1 非对称结构的模式转换

电机定子采用图 1(a) 所示的“塔形”结构作为其初始结构, 此结构由驱动足、圆孔、左矩形柱、右矩形柱和 2 个对称的柔性铰链等 5 个子结构组成, 其中柔性铰链是矩形柱向上与驱动足相连接的最薄处。采用这种结构的超声电机, 一般采用共面的对称纵振和反对称纵振模式作为电机的两个正交工作模式, 如图 1(b), (c) 所示。

* 江苏省自然科学基金资助项目 (BK20161102); 超声电机国家地方联合工程实验室开放课题资助项目 (NJ20160003)
收稿日期: 2016-07-12; 修回日期: 2016-09-10



(a) Initial structure of the tower-shaped stator



(b) Symmetric working mode (c) Antisymmetric working mode

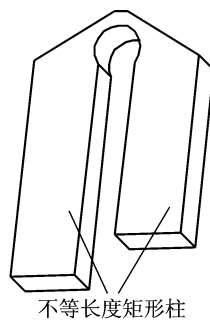
图 1 塔形定子的初始结构及其工作模式

Fig. 1 Initial structure and working modes of the tower-shaped stator

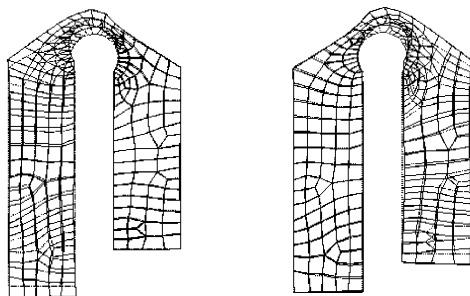
经研究发现,当塔形定子由对称结构变为非对称结构,尤其当塔形定子的左、右矩形柱长度不同时(见图 2(a)),定子将产生明显的模态转换现象,即原来对称结构两个正交的对称纵振和反对称纵振模态转换为非对称结构的两个非对称纵振模态(见图 2(b),(c)),且两个模态的频率差变大了。左、右矩形柱长度差异越大,两个振动模态的非对称振动性越明显,且模态频率差异越大。其中:低阶非对称振动模态的纵振主要发生在长矩形柱上,而短矩形柱振动很小或几乎不振动,因此在驱动足端面上可能形成斜直线运动轨迹;高阶非对称振动模态的纵振主要发生在短矩形柱上,而长矩形柱振动很小或几乎不振动,因此在驱动足端面上可能形成反向的斜直线运动轨迹。

1.2 驱动机理及定子设计

在非对称塔形定子的 5 个子结构中,柔性铰链除了能够放大驱动足端面的振幅,还能将塔形定子隔离成长振子、短振子和驱动足这 3 个相对独立的振动子系统。在自由边界条件及上述非对称振动模态下,假设定子的弯曲变形集中发生在 2 个柔性铰链处,而驱动足的内部不发生变形,则非对称塔形定子可以简化为由长振子、短振子和驱动足 3 个子系



(a) Asymmetric structure of the tower-shaped stator



(b) Low-order asymmetric vibration mode (c) Higher-order asymmetric vibration mode

图 2 塔形定子的非对称结构及其非对称振动模态

Fig. 2 Asymmetric structure and asymmetric vibration modes of the tower-shaped stator

统组成的简化模型,如图 3 所示。其中 2 个柔性铰链和驱动足端面可以简化为 3 个点,驱动足可以简化为由上述 3 个点围成的等腰三角形质量块。等腰三角形质量块的顶点为驱动足端面,驱动足端面的静止位置与坐标系 xyz 的原点 O 重合,等腰三角形质量块的底角为 θ 。

由于长、短矩形柱的 1 阶纵振频率不同,导致对称结构塔形定子的对称纵振和反对称纵振模态转化为非对称结构塔形定子的两个非对称纵振模态,而

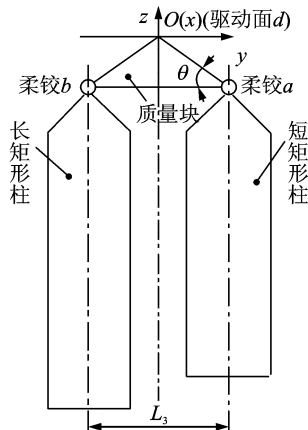


图 3 非对称结构塔形定子系统的简化模型

Fig. 3 Simplified model of the asymmetric tower-shaped stator

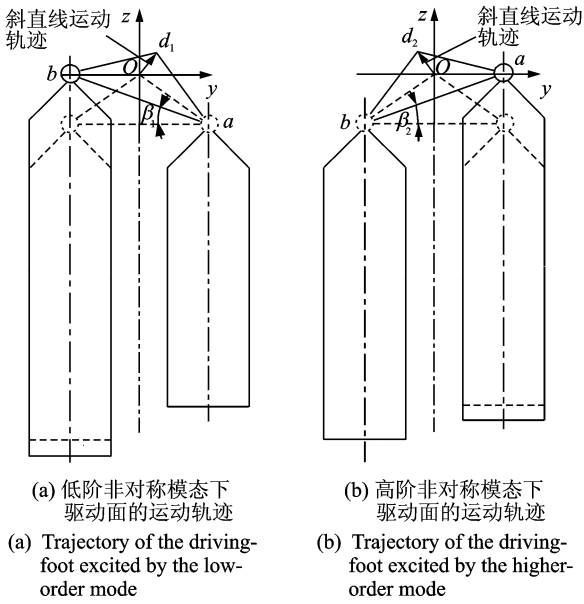


图 4 在非对称工作模式下定子驱动足端面的运动轨迹
Fig. 4 Trajectory of the stator's driving-foot excited by the asymmetric working modes

且这两个模式都是坐标平面 yOz 的面内振动。

当低阶非对称模式工作时,长矩形柱纵振且短矩形柱不振动,设 U_b 为低阶振动模式下柔铰 b 的振幅,则柔铰 b 的运动 u_b 在坐标系 xyz 可表示为

$$\begin{cases} u_{bx} = 0 \\ u_{by} = 0 \\ u_{bz} = U_b \sin \omega_c t \end{cases} \quad (1)$$

带动驱动足绕柔铰 a 的转动角为

$$\beta_1 = \arctan \frac{U_b}{L_3} \quad (2)$$

驱动足转动 β_1 后,驱动面 d_1 的坐标为

$$\begin{cases} x_{d_1} = 0 \\ y_{d_1} = \frac{L_3 \left[\cos \theta - \cos \left(\theta + \arctan \frac{U_b}{L_3} \right) \right]}{2 \cos \theta} \\ z_{d_1} = \frac{L_3 \left[\sin \left(\theta + \arctan \frac{U_b}{L_3} \right) - \sin \theta \right]}{2 \cos \theta} \end{cases} \quad (3)$$

如图 4(a)所示, $\vec{\alpha}_{d_1}$ 即为低阶非对称模式下长振子由平衡位置纵振伸长时驱动面的斜直线运动轨迹。

当高阶非对称振动模式工作时,短振子纵振并且长振子不振动,设 U_a 为定动子未接触时高阶非对称振动模式下柔铰 a 的振幅,则柔铰 a 的运动 u_a 在坐标系 xyz 可表示为

$$\begin{cases} u_{ax} = 0 \\ u_{ay} = 0 \\ u_{az} = U_a \sin \omega_d t \end{cases} \quad (4)$$

带动驱动足绕柔铰 b 的转动角为

$$\beta_2 = \arctan \frac{U_a}{L_3} \quad (5)$$

驱动足转动 β_2 后,驱动面 d_2 的坐标为

$$\begin{cases} x_{d_2} = 0 \\ y_{d_2} = -\frac{L_3 \left[\cos \theta - \cos \left(\theta + \arctan \frac{U_a}{L_3} \right) \right]}{2 \cos \theta} \\ z_{d_2} = \frac{L_3 \left[\sin \left(\theta + \arctan \frac{U_a}{L_3} \right) - \sin \theta \right]}{2 \cos \theta} \end{cases} \quad (6)$$

如图 4(b)所示, $\vec{\alpha}_{d_2}$ 即为高阶非对称模式下短振子由平衡位置纵振伸长时驱动面的斜直线运动轨迹,并且 $\vec{\alpha}_{d_2}$ 与 $\vec{\alpha}_{d_1}$ 的倾斜方向相反。

由于非对称结构塔形定子的两个非对称振动模式可以在驱动足端面形成倾斜方向相反的斜直线运动轨迹,因此可以利用这种非对称塔形结构及其两个非对称振动模式来构成直线超声电机。

非对称结构塔形定子及塔形电机的设计方案如图 5 所示。塔形定子采用螺栓紧固式结构,包括一长一短两个压电振子。塔形定子共有 4 组 8 片压电陶瓷,位于前端盖和后端盖之间。压电陶瓷沿厚度方向极化,利用逆压电 d_{33} 效应激发定子的振动。其中:位于短压电振子的两组压电陶瓷构成定子的 A 相,用于激励定子的高阶非对称振动模式;位于长压电振子的两组压电陶瓷构成定子的 B 相,用于激励定子的低阶非对称振动模式。当定子以高阶非对称振动模式工作时,定子驱动足端面将产生斜直线运动轨迹,推动导轨正向运动;当定子以低阶非对称振动模式工作时,定子驱动足端面将产生倾斜方向相反的斜直线运动轨迹,推动导轨反向运动。

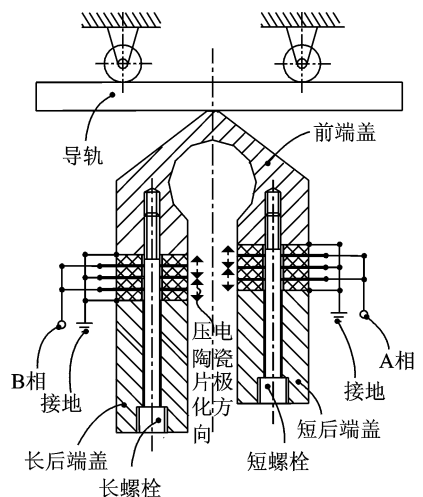


图 5 非对称塔形定子及塔形电机的设计方案
Fig. 5 Design scheme of the asymmetric tower-shaped stator and the tower-shaped USM

图6为制作的非对称结构塔形定子样机。定子尺寸为 $35\text{ mm}\times 8\text{ mm}\times 50\text{ mm}$,质量为 50 g 。

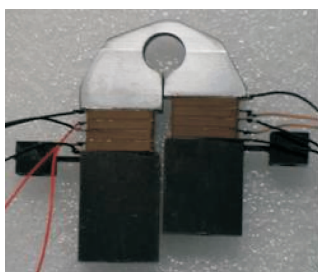


图6 非对称结构塔形定子样机

Fig. 6 Prototype of the asymmetric tower-shaped stator

1.3 电机整体设计

非对称塔形定子制作好之后,还需要进行以下电机的整体结构设计:设计并制作相应的动子,将定子与动子安装在共同的基座上,选择合适的预压力使定子与动子相互接触。整体结构设计的合理与否,将严重影响到电机的运行稳定性和定位精度。

由于一般采用购买的商品导轨或平台作为直线超声电机的动子,因此在电机整体结构设计中,主要考虑定子与动子的安装以及定、动子间预压力的施加。

在参考 Nanomotion 电机整体结构^[12]的基础上,设计了如图7所示的非对称塔形定子驱动的基于三滚子结构行程 30 mm 的一维运动平台。由于这种结构采用了三滚子以及侧向的螺栓和蝶簧,在消除定子安装侧隙的同时,使得定子安装夹持的切向位移刚度远大于法向位移刚度,非常有利于作动器的稳定运行和精密定位^[13]。

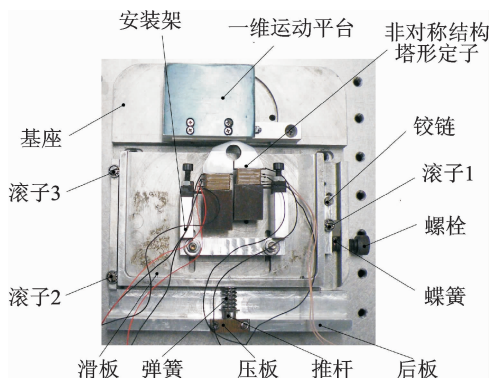


图7 非对称塔形定子驱动的一维运动平台

Fig. 7 The one-dimensional moving platform driven by the asymmetric tower-shaped stator

2 实验

2.1 模态实验

采用 PSV300F-B 型高频扫描激光测振系统对

非对称塔形定子进行模态实验,实验结果如图8和表1所示。

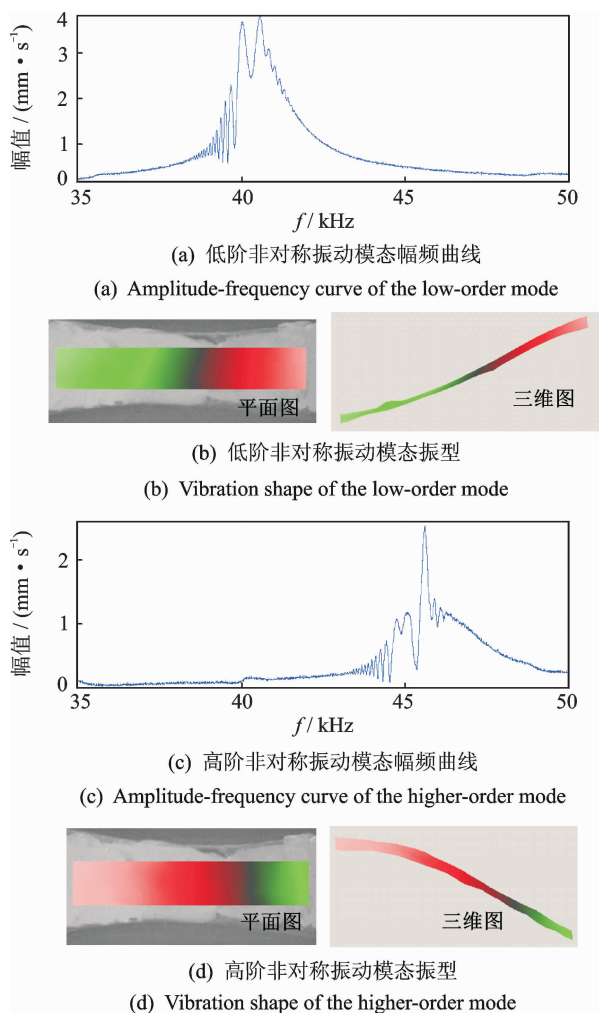


图8 非对称塔形定子工作模式的频率及振型

Fig. 8 Frequency and vibration shapes of the asymmetric working modes

表1 塔形定子模态实验结果及其与 ANSYS 计算结果对比
Tab. 1 Modal testing results of the asymmetric tower-shaped stator and comparison between the testing results and calculation results by ANSYS

对称塔形定子	实验模态频率/kHz	ANSYS 计算模态频率/kHz	误差率/%	实验模态振幅/ μm
低阶非对称振动模态	40.01	42.87	7.15	法向 0.80 切向 0.50
高阶非对称振动模态	45.91	48.17	4.92	法向 0.70 切向 0.40

从实验结果可知:

1) 在设计的工作频率附近,当 A 相(或 B 相)单相激励,定子将产生高阶(或低阶)非对称振动模态,且模态振幅足够大,能够驱动电机运行;

2) 低阶非对称振动模态(或高阶非对称振动模

态)的实验结果与理论计算值相差 7.15% (或 4.92%)。这主要是由于用 ANSYS 软件计算时将定子的金属弹性体和 PZT 作为一个整体进行计算,未考虑螺栓紧固力对定子一体化的影响,导致理论计算值偏高。

2.2 机械特性实验

非对称结构塔形超声电机驱动信号平台由 1 台信号发生器和 1 台功率放大器构成。实验时,信号发生器发出单相正弦波电压信号,经功率放大器放大后,输出驱动塔形作动器。

图 9 为非对称结构塔形超声电机测试系统,它主要由图 7 的一维运动平台和 Renishaw XL-80 激光干涉仪两部分构成,用来测试非对称结构塔形超声电机的性能指标。

图 10 为非对称结构塔形超声电机的机械特性曲线。由图可知:a. 在 39.5 kHz~58 kHz 频率范围

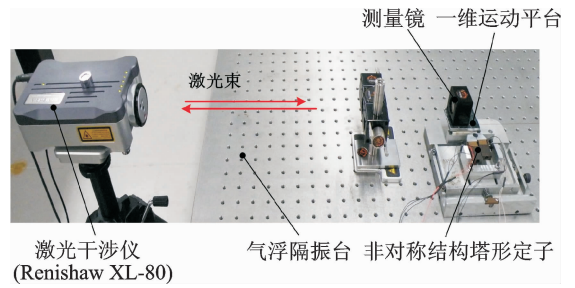


图 9 非对称结构塔形超声电机测试系统

Fig. 9 Testing system of the asymmetric tower-shaped USM

内,当 A 相施以单相正弦激励信号,电机工作在高阶非对称工作模式,定子正向运行,电机最佳工作频率为 47 kHz,最大速度为 112 mm/s,最大输出力为 2 N;b. 在 34 kHz~52 kHz 频率范围内,当 B 相施以单相正弦激励信号,电机工作在低阶非对称工作模式,定子反向运行,最佳工作频率为 39.5 kHz,最大速度为 94 mm/s,最大输出力为 3 N。

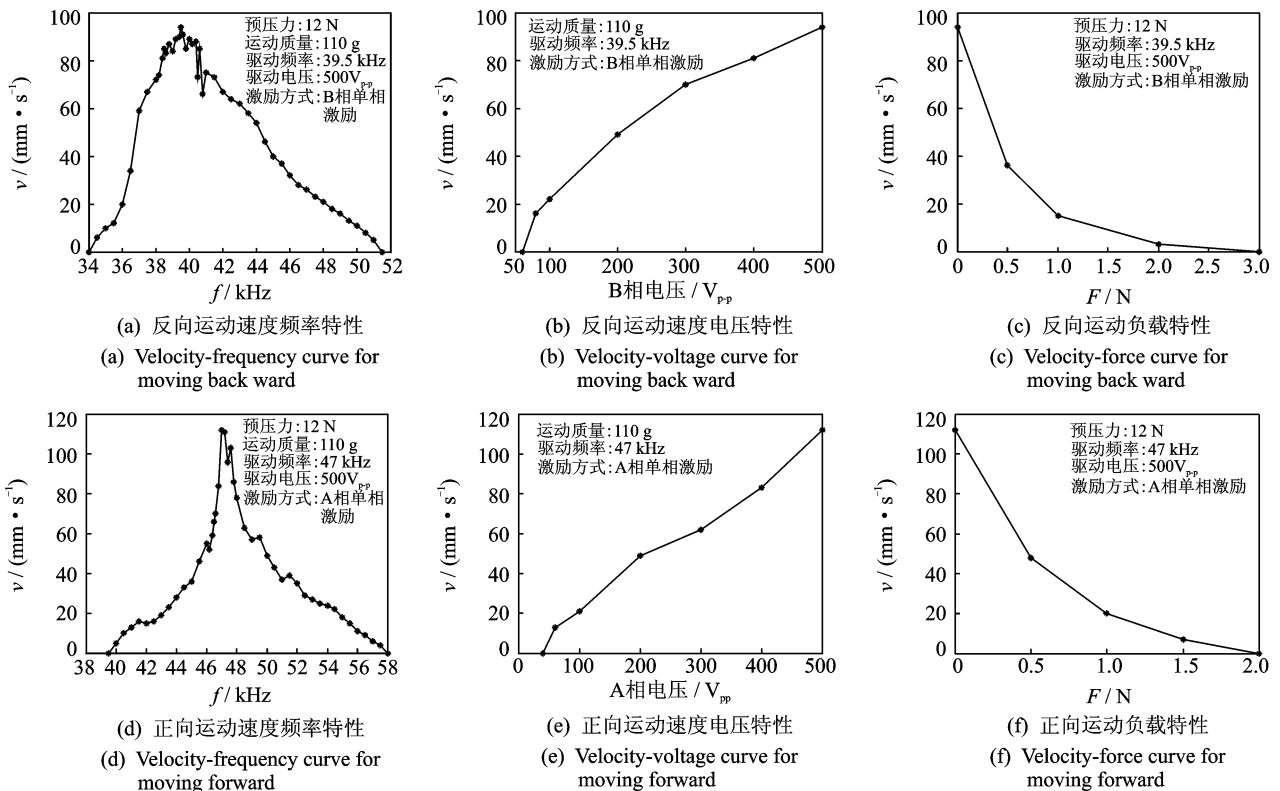


图 10 非对称结构塔形超声电机的机械特性曲线

Fig. 10 Mechanical characteristic curve of the asymmetric tower-shaped USM

3 结束语

提出了一种含非对称塔形定子的单模态驱动双向运动的直线超声电机,该电机由非对称结构塔形定子和一维运动平台构成。塔形定子是螺栓紧固结

构,它采用低阶和高阶非对称振动模式,通过模式切换实现了电机在单模态驱动下正反向运动。实验表明,当电机工作在高阶非对称工作模式时,定子正向运行,最大速度为 112 mm/s,最大输出力为 2 N;当电机工作在低阶非对称工作模式时,定子反向运行,最大速度为 94 mm/s,最大输出力为 3 N。

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: 1-9.
- [2] Ueha S, Tomikawa Y. Ultrasonic motors theory and applications [M]. Oxford: Oxford University Press, 1993: 1-30.
- [3] 陈乾伟. 新型多工作模式塔形直线超声电机的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
- [4] 陈乾伟, 鞠全勇, 黄卫清, 等. 工作模态控制解耦的塔形直线超声电机 [J]. 振动、测试与诊断, 2015, 35(1): 107-111.
Chen Qianwei, Ju Quanyong, Huang Weiqing, et al. A mode-control-decoupling linear ultrasonic motor (LUSM) with a tower-type stator [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2015, 35(1): 107-111. (in Chinese)
- [5] 陈乾伟, 时运来, 黄卫清. 单模态驱动双向运动的斜动子 V 形直线超声电机 [J]. 南京航空航天大学学报, 2015, 47(1): 139-144.
Chen Qianwei, Shi Yunlai, Huang Weiqing. Single-mode-drive-type bi-directional linearly moving ultrasonic motor with inclined slider and V-shaped stator [J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2015, 47(1): 139-144. (in Chinese)
- [6] 陈乾伟, 鞠全勇, 黄卫清, 等. 新型塔形压电式粘滑直线作动器[J]. 微特电机, 2015, 43(1): 28-30.
Chen Qianwei, Ju Quanyong, Huang Weiqing, et al. A new type of linear piezoelectric actuator with a tower-type stator based on stick-slip principle [J]. Small & Special Electrical Machines, 2015, 43(1): 28-30. (in Chinese)
- [7] Sashida T, Kenjo T. An introduction to ultrasonic motors [M]. London: Oxford Science Publications, 1993: 60-90.
- [8] He Siyuan, Chen Weishan, Tao Xie, et al. Standing wave bi-directional linearly moving ultrasonic motor [J]. IEEE Transaction on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 1998, 45(5): 1133-1139.
- [9] Peter C, Bjorn B, Dieter A. Piezoelectric motor control: US, 7187102B2[P]. 2007-03-06.
- [10] 陈乾伟, 黄卫清. 斜动子与塔形定子构成的单驱双向超声电机 [J]. 振动、测试与诊断, 2012, 32(1): 28-33.
Chen Qianwei, Huang Weiqing. A single-phase-drive bi-directional moving ultrasonic motor composed of an inclined slider and a tower-type stator [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2012, 32(1): 28-33. (in Chinese)
- [11] 黄卫清, 陈乾伟. 非对称结构近似塔形超声电机及非对称模态与电激励方式: 中国, ZL201110180280.5 [P]. 2011-06-29.
- [12] Wischnewskiy W, Waldbronn W. Piezoelectric drive, especially a holding frame, a friction element and a circuit configuration: US, 6979934B1[P]. 2005-12-27.
- [13] 于会民, 王寅, 陈乾伟, 等. 三滚子结构夹持的直线型超声电机 [J]. 机械科学与技术, 2012, 31(2): 250-254.
Yu Huimin, Wang Yin, Chen Qianwei, et al. A linear ultrasonic motor clamped with three-roller clamping scheme [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2012, 31(2): 250-254. (in Chinese)



第一作者简介: 陈乾伟, 男, 1972 年 5 月生, 博士, 副教授。主要研究方向为直线超声电机及其应用技术。曾发表《斜动子与塔形定子构成的单驱双向超声电机》(《振动、测试与诊断》2012 年第 32 卷第 1 期) 等论文。

E-mail: chenqw@jit.edu.cn