

文章编号 1004-924X(2015)05-1358-07

V 型直线超声电机梁式夹持的结构设计

简 月, 姚志远*, 杨模尖, 刘 振

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

摘要:探讨了直线超声电机夹持结构的设计方法。依据直线超声电机夹持结构的设计准则建立了在弹性夹持下的定子力学模型;研究了夹持结构的法向和切向弹簧刚度对定、转子在接触界面上的法向压力和切向摩擦力的影响规律,并通过有限元软件进行了仿真分析。最后,提出了一种切向刚度充分大的夹持方式,并设计了相应的梁式夹持 V 型直线超声电机。通过实验对比了设计的梁式夹持超声电机与柔性圆弧式夹持电机的输出特性。结果表明:相对原有的圆弧式夹持电机,新直线超声电机的输出力增大了 1.7 倍,速度增大了 4.6 倍,其最大输出力达到 37 N,最大速度达到 1.4 m/s。研究表明,提高切向弹簧刚度有利于提高电机的输出力和速度,设计的梁式夹持 V 型直线超声电机输出特性及稳定性良好。

关键词:直线超声电机,夹持方法,力学模型,结构设计

中图分类号:TM359.4;TB559 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152305.1358

Structure design of beam type clamp for V-shape ultrasonic motor

JIAN Yue, YAO Zhi-yuan*, YANG Mo-jian, LIU Zhen

(State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

* Corresponding author, E-mail: zyyao@nuaa.edu.cn

Abstract: This paper focuses on the structure design of liner ultrasonic motors. The mechanical model of stators with flexible clamping components was established according to the design criterion for clamps of liner ultrasonic motors. Then the influence rules of tangential and normal rigidities of the clamping components on the normal pressures and tangential friction forces of stators and actors on a contact interface were researched and analyzed by finite element software. Finally, a new type clamping method with enough tangential rigidity was put forward, and the corresponding V-shape ultrasonic motor with beam type clamp components was designed. The output performance of the designed V-shape ultrasonic motor was compared with the original V-shape liner ultrasonic motor with flexible cambered clamp components. And the results show that the maximum output force of the designed motor reaches 37 N, 1.7 times as high as that of the original motor, and the maximum no-load speed is 1.4 m/s, 4.6 times as fast as that of original one. The concludes indicate that enhancing tangential rigidity is conducive to increasing the output force and velocity of the motor. The V-shape liner ultrasonic motor with beam type clamp components has great output performance and stability.

Key words: linear ultrasonic motor; clamping method; mechanical model; structure design

收稿日期:2014-10-15;修订日期:2014-11-17.

基金项目:国家 973 重点基础研究发展计划资助项目(No. 2011CB707602);国家自然科学基金资助项目(No. 51275229);国家重大科学仪器设备开发专项资助项目(No. 2012YQ100225)

1 引言

直线超声电机利用压电材料的逆压电效应激发出弹性体的微幅振动,通过定、动子间的摩擦,将弹性体的振动转换成动子的直线或旋转运动,驱动负载和输出功率。它不仅具有结构简单、响应快、断电自锁等优点,更能直接输出直线运动,有效地避免传动装置的复杂结构,提高定位精度^[1-3],在航空航天和武器装备等领域得到了广泛应用。

最早的行波型直线超声电机是日本学者指田年生在1982年提出的^[4],分为直梁式和环梁式,其工作原理是利用激振器和吸振器在梁中产生行波来驱动滑块,由于工作时整根梁都处于振动状态而产生过大的功率损耗,故这种电机的效率较低。1998年,日本学者Kurosawa^[5-6]等人提出了驻波型直线超声电机。该电机利用2个互相垂直的兰杰文振子设计定子,并分别施加相位差为 90° 的激励信号激励定子,实现驱动足处的椭圆运动,推动动子运动。这种定子结构紧凑简单,驱动效率高,使电机获得了良好的输出性能。由于兰杰文振子具有明显的振动节点,可作为定子的夹持点,有效地解决电机的夹持问题,因此,驻波型直线超声电机结构受到广泛关注。

2008年,杨东、姚志远提出了双变幅杆V型直线超声电机^[7],该电机也采用2个兰杰文振子交叉形成定子,并设计了连续变截面代替突变截面,以提高振动波在定子中的传播效率^[8]。实验表明,其最大输出速度为300 mm/s,最大推力为21.4 N。利用弹簧作为夹持元件,在其定子结构的对称轴上施加预压力。这种夹持方式结构复杂,且构件间缝隙不易消除,限制了电机输出力的提高。由于定子只有2个支撑点,导致电机的结构不稳定。为消除这些不利因素,2011年,胡宁首先将带有柔性铰链(圆弧式)的夹持引入V型直线超声电机的结构设计之中^[9]。提出将夹持点从对称轴上移动到定子的两侧,并利用柔性圆弧代替弹簧施加预压力。由于定子的支撑点有3个,所以电机的结构更加稳定。实验证明,柔性圆弧夹持的法向和切向刚度在一个数量级上,其切向刚度小,限制了电机的输出力及速度的提高,另

外柔性机构的变形会导致电机产生移动漂移。

为进一步改善V型直线电机的输出性能,本文提出一种新型梁式夹持结构。建立了“柔性夹持元件的切向和法向刚度对电机输出力影响的力学模型”;通过理论模型分析了其切、法两向的刚度对定、动子在接触界面上的法向压力和切向摩擦力的影响规律。分析表明增大切向刚度有助于提高电机的输出力。另外,通过有限元软件对梁式与柔性圆弧式夹持结构的力学特性进行对比,证明梁式夹持结构在不提高法向刚度的基础上具有更大的切向刚度。在此基础上提出了梁式夹持结构,设计了相应直线超声电机。实验表明,相对柔性圆弧式夹持电机,梁式夹持电机具有更好的输出性能。

2 柔性夹持下定子的力学模型

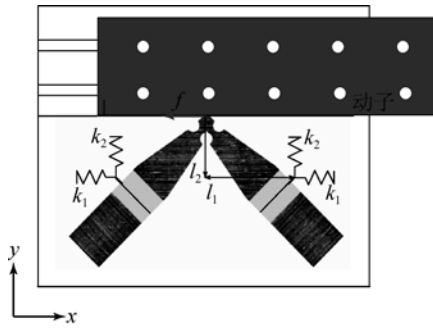
2.1 柔性夹持下定子的力学分析

夹持元件作为超声电机与外界连接的重要部件,其作用是支撑定子结构,使其与外界保持弹性接触状态,保证定子处于良好的振动状态。图1(a)所示为柔性圆弧式夹持V型超声电机,柔性圆弧式夹持用两侧的柔性圆弧代替弹簧,消除了传统夹持的间隙和摩擦,可提高电机结构的稳定性,并提高输出力。为了更容易地理解电机与夹持结构和夹持点间的力学关系,将其简化成如图1(b)所示的模型。该抽象模型以导轨为直线超声电机动子,定子的中部为纵向振动的节面,并作为支撑点,以减少夹持对定子振动的影响,其定子支撑点处的弹簧固定在底座上。将柔性圆弧简化为 x 方向(切向)和 y 方向(法向)上的2个弹簧,其刚度分别为 k_1 和 k_2 。



(a)电机实物图

(a) Prototype photo of motor



(b)等效力学图

(b)Equivalent mechanical figure

图 1 柔性圆弧式夹持 V 型电机

Fig. 1 V-shape ultrasonic motor with flexible arc clamp

实际直线超声电机运动中,定子的受力主要集中在 x, y 平面内。依据电机的运行机理,电机的定子有法向纵振和切向弯曲振动。纵向振动提供定/转子在接触界面上的正压力;弯曲振动提供定/转子在接触界面上的切向推力(摩擦力)。由于定/转子在一个接触周期呈现接触和脱离 2 个阶段,定/转子在接触面上存在相互力主要发生在接触阶段,假设定子(切向抽象)质量为 m 。由于弯曲振动,定/转子在切向产生相对运动,产生摩擦力 f 。由于摩擦力的作用,定子的切向速度会发生改变 Δv ,切向弹簧的压缩量会发生改变 Δx ,定子会绕质心转动,转动使驱动足在其 x 方向上的位移为 Δx_1 。设 $\Delta x + \Delta x_1 = \Delta x_0$, Δx_0 是定子弯曲振动在 x 方向上的上振动幅值。

取质心为参考点,考虑绕质心的矩平衡,有:

$$2k_2 \Delta y l_1 = f l_2, \quad (1)$$

得到:

$$\Delta y = f l_2 / 2k_2 l_1,$$

其中: Δy 为转动过程中在法向上产生的位移,根据几何关系可得到:

$$\Delta x_1 = \frac{l_1}{l_2} \Delta y,$$

$$\Delta x = \Delta x_0 - f / 2k_2. \quad (2)$$

假设接触时间为 Δt ,依据动量守恒定律有:

$$m \Delta v + 2k_1 \Delta x \Delta t = f \Delta t. \quad (3)$$

由式(1)得到摩擦力为:

$$f = m \Delta v / \Delta t + 2k_1 \Delta x. \quad (4)$$

将式(2)代入式(4)得到:

$$f = m \Delta v / \Delta t + 2k_1 \Delta x_0 - k_1 f / k_2. \quad (5)$$

即:

$$f = \left[m \frac{\Delta v}{\Delta t} + 2k_1 \Delta x_0 \right] \frac{k_2}{k_1 + k_2}. \quad (6)$$

将 f 对 k_1 进行求导:

$$f'_{k_1} = \frac{2\Delta x_0 k_2^2 - m \Delta v k_2 / \Delta t}{(k_1 + k_2)^2}. \quad (7)$$

从式(5)可知,摩擦力由 3 部分组成。一是由于定子驱动足处切向抽象质量动量的改变,二是切向弹簧提供的弹力,三是由于定/转子的作用,产生绕质心的转动导致摩擦力的减小。 y 方向为电机预压力的施加方向,由式(5)可知,提高法向刚度 k_2 有利于增加摩擦力;但是,当法向刚度 k_2 增加到一定程度,会抑制定子的振动,导致电机的推力减少。只有在适当的(法向)预压力范围之内,定子才能达到良好的振动效果,因此,在此方向上电机的法向刚度 k_2 不宜过大。由式(7)可知,当取: $k_2 > \frac{m \Delta v}{2 \Delta x_0 \Delta t}$ 时, $f'_{k_1} > 0$,即摩擦力随着 k_1 的增大而增大。

电机的切向刚度 k_1 足够大,也有利于电机的结构稳定性。电机在 x 方向上的运动只有驱动足处椭圆运动在 x 方向上的分量,而无其他干扰运动,故保证了电机的位移分辨率,提高了定位精度。

综上所述,夹持元件具有足够大的切向刚度和适宜的法向刚度时,有利于提高电机的输出特性。显然,柔性圆弧式夹持并不能满足这样的刚度要求。实验表明,柔性圆弧式夹持的切向刚度不足限制了电机输出性能的提高,当运行时间较长时,柔性圆弧处会产生一定变形,导致电机的输出特性及稳定性下降。为解决上述问题,提出了一种切向刚度足够大,而法向刚度适当的梁式夹持的力学模型。

2.2 梁式夹持元件的力学分析及结构设计

柔性圆弧式夹持的特征是利用柔性铰链代替弹簧施加预压力,而柔性铰链的结构形式是 3/4 圆形环结构。这个结构不能在不提高法向刚度的基础上提高切向刚度,因此,提出利用直梁代替圆环设计夹持结构,即梁式夹持元件。

将梁式夹持简化为 1 根两端固支的梁,其所受的外力为在中点位置的集中力 F ,在 F 的作用下梁产生的变形量为 Δu ,并在固支处产生为 T 的支反力,若梁的长度为 $2L$,形变后梁的长度变为 $2S$,且与梁初始位置产生 α 的夹角,如图 2 所示。

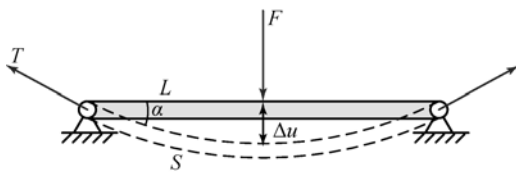


图 2 梁式夹持的力学分析图

Fig. 2 Mechanical analysis for beam type clamp

根据静力平衡原理,变形后有:

$$2T\sin \alpha = F.$$

设杆的切向刚度为 k_1 ,法向刚度为 k_2 ,则有:

$$T = k_1(S-L),$$

$$F = k_2\Delta u.$$

将 T, F 带入平衡方程,且当 α 很小时,有 $\sin \alpha \approx \tan \alpha$,可得到:

$$k_2 = \frac{2(S-L)}{L}k_1.$$

由于 $(S-L)$ 为无穷小量,因此 $k_1 \gg k_2$,即梁式夹持的切向刚度较大时,可有较小的法向刚度,这种夹持特性有利于提高电机的输出特性。

对于确定材料的杆结构,其刚度只与杆的长度及横截面积有关。为确定新型夹持的结构参数,在 ANSYS 中进行了分析,将长度及横截面积作为变量,探索了不同情况下新夹持的法向刚度,图 3 所示为新夹持电机在 ANSYS 中的建模。通过仿真发现,横截面积的改变对刚度的影响不大,而长度对其影响更为明显,综合考虑加工情况及电机体积,选定夹持结构长度为 12 mm,此时电机的法向刚度为 263 N/mm。

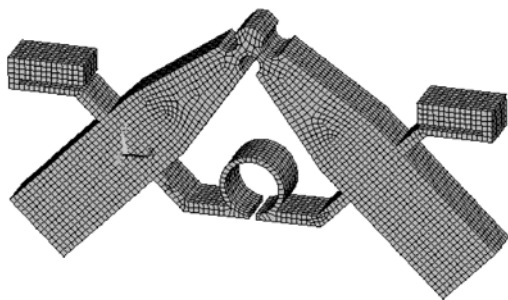


图 3 有限元建模及网格划分

Fig. 3 Modelling and meshing in ANSYS

根据以上分析,设计了如图 4 所示的 V 型电机用夹持,为了减小装配过程中的应力和变形,为电机提供一定的弹性支撑,在夹持的中部设计了

圆弧形的柔性铰链。

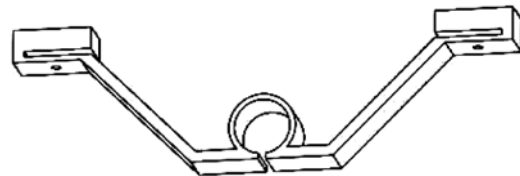


图 4 新型夹持结构图

Fig. 4 Structure of new clamp

将梁式夹持电机与柔性圆弧式夹持电机导入 ANSYS 软件中进行静力分析,比较二者的切、法两向刚度。

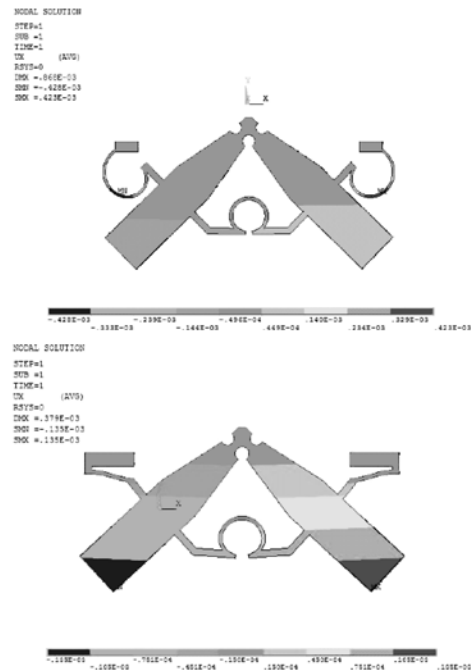


图 5 电机法向刚度静力分析图

Fig. 5 Static analysis of motors' normal rigidity

在法向上,如图 5 所示,当预压力为 100 N 时,柔性圆弧式夹持电机的刚度为 115 N/mm,而梁式夹持电机的刚度为 263 N/mm,均在比较合理的范围内。

在切向上,如图 6 所示,柔性圆弧式夹持电机的刚度仅为 130 N/mm,与其法向刚度相近。而梁式夹持电机的刚度达到 2 331 N/mm,约为原电机的 18 倍。以上仿真结果与理论分析结果相符,即梁式夹持的切向刚度很大,而法向刚度适当,有利于提高电机的输出性能。

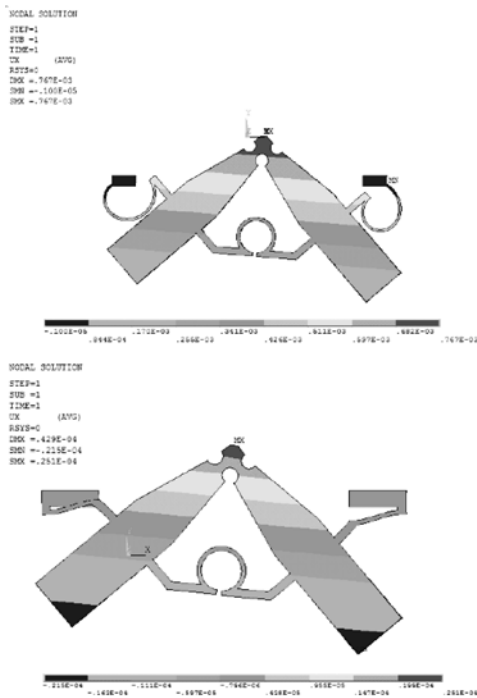


图 6 电机切向刚度静力分析图

Fig. 6 Static analysis of motors' tangential rigidity

3 新型夹持电机输出特性实验

根据上述设计,加工出夹持样件,并组装成新型梁式夹持 V 型电机,定子实物如图 7。

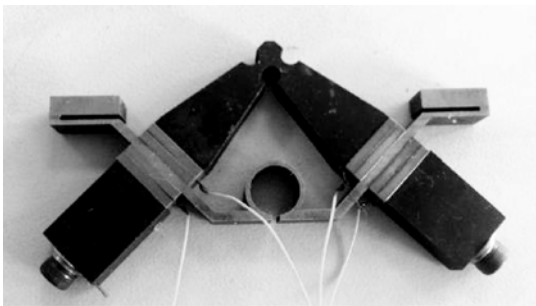


图 7 定子实物图

Fig. 7 Prototype photo of stator

3.1 定子扫频实验

组装好的定子应先进行扫频实验,以确定其工作频率周围是否有干扰模式出现。采用德国 Polytec 公司 PSV-300F-B 型高频扫描激光测振系统,扫频结果如图 8 所示。

可见,定子的固有频率为 38.75 kHz,且远离其它干扰模式。

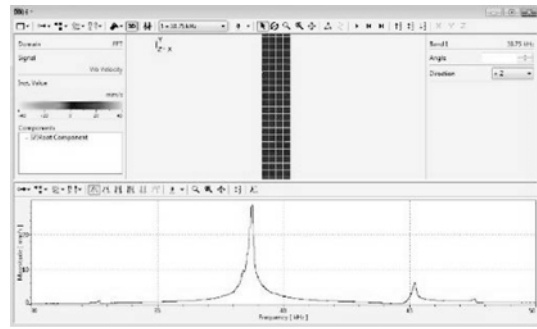


图 8 定子扫频结果

Fig. 8 Vibration measurement of stator

3.2 电机输出特性实验

为验证新型梁式夹持可提高电机的输出特性,首先进行其与柔性圆弧式夹持电机的对比实验。采用由南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室自主设计制作的基于虚拟仪器的直线超声电机输出特性测量与分析系统^[10]进行对比实验,它由超声电机运动模块、控制测试电路模块、数据采集模块等组成,可测试不同频率、不同预压力及不同负载下的电机性能,并绘制相应的速度-压力曲线。

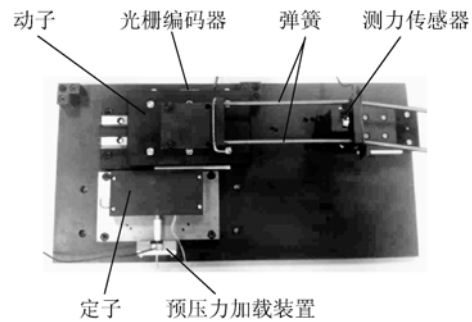


图 9 直线电机测试系统运动模块

Fig. 9 Motion module of measurement system for linear ultrasonic motor

如图 9 所示,电机的运动模块中有通过 2 根弹簧相连接的 2 个导轨,其中一个导轨作为电机运动的动子,另一个导轨抵住测力传感器探头。电机启动后,推动动子滑块运动,使弹簧的变形增大,电机的负载也随之增大,直至达到电机的最大输出力或滑块到达位移最大处,在此过程中电机输出力的变化被数据采集模块采集记录。同时,动子滑块一侧固定有光栅编码器,将动子的位移数据通过调理电路传递至上位机记录,经过计算可得出电机的输出速度和加速度,从而绘制出电机的速度-压力曲线。测量时将被测电机放置于

实验板上,后端的预压力加载装置中安放测力传感器探头,通过旋转螺栓对电机施加的预压力大小可通过测力仪读出,便于测试不同预压力下电机的输出特性。

将两种电机分别置于电机运动台,采用同样的负载,测试它们在不同预压力下的输出特性。在输入电压峰峰值为 350 V 时,得到的输出速度及输出力与预压力的关系曲线分别如图 10、11 所示。

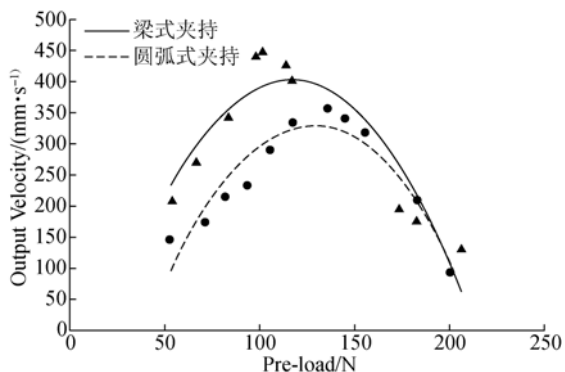


图 10 输出速度与预压力关系曲线

Fig. 10 Output velocity characters for various pre-loads

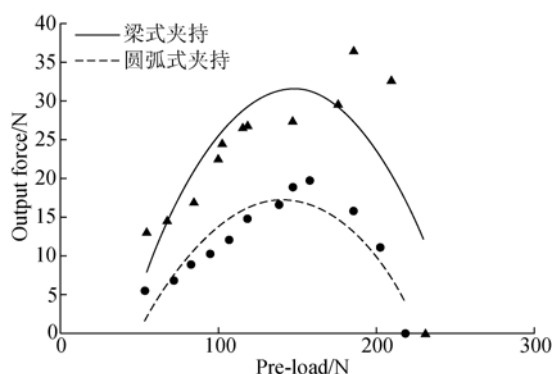


图 11 输出力与预压力关系曲线

Fig. 11 Output force characters for various pre-loads

可见,两电机在预压力为 100~150 N 之间输出功率较大,取预压力为 125 N,不包含运动过程中动子(尺寸为 165 mm×100 mm×45 mm)所消耗的能量,对比两电机功率及效率,结果如表 1。

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,2007:226.
ZHAO CH SH. *Theory and Applications of Ultrasonic Motors* [M]. Beijing: Science press, 2007: 226. (in Chinese)

表 1 输出功率及效率对比

Tab. 1 Comparison of output power and efficiency

型号	输入电流 峰峰值/A	输入 功率/W	输出 力/N	输出速度 /(mm·s ⁻¹)	输出 功率/W	效率 /%
圆弧式	0.3	52.5	25	450	11.61	22.11
梁式	0.2	35	15	335	5.025	14.36

综上所述,在相同负载的情况下,梁式夹持电机的输出力、输出速度都优于柔性圆弧式夹持电机。在实验中,由于连续运行时间较长,且预压力变化幅度很大,柔性圆弧式夹持产生变形,导致电机性能稳定性下降;而梁式夹持变形不大,电机可以保持连续的稳定运行。当预压力为 185 N 时,梁式电机达到最大输出力 37 N。

由于直线导轨位移有一定限制,电机运行到端点时,并未达到其稳定速度,为测量电机输出的最大速度,将电机置于以旋转轴为动子的平台上,利用手持式转速测量仪测出电机空载时的稳定转速为 467 r/min,转轴直径为 60 mm,计算得到电机的稳定输出速度为 1.4 m/s。

4 结 论

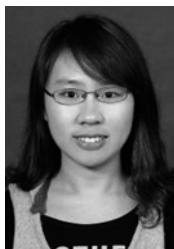
为提高现有 V 型直线超声电机的输出特性,提出了进一步对其进行优化的方案,即梁式夹持方案。通过建立其力学模型,从理论上证明其满足切向刚度无穷大、法向刚度适当的夹持设计要求,通过 ANSYS 仿真进行了验证。设计并制作了具有新型梁式夹持的 V 型直线超声电机,并通过实验对比其与传统柔性圆弧式夹持电机的输出性能。结果显示:梁式夹持 V 型直线超声电机的最大输出力为 37 N,最大输出速度为 1.4 m/s,即梁式夹持有效提高了电机的输出特性,且电机在较大的预压力范围和频率范围内均可保持连续稳定运动。

[2] 赵淳生. 世界超声电机技术的新进展[J]. 振动、测试与诊断,2004,24(1):1-5.
ZHAO CH SH. Recent progress in ultrasonic motor techniques [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2004, 24(1): 1-5. (in Chinese)

[3] 王金鹏, 金家楣, 赵淳生. 用于精密定位平台的直线超声电机的异步并联[J]. 光学精密工程, 2011, 19(11): 2693-2702.

- WANG J P, JIN J M, ZHAO CH SH. Asynchronous bundling of liner ultrasonic motor for precision positioning stage [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(11): 2693-2702. (in Chinese)
- [4] TOKIYA W, MINORU K K, TOSHIRO H T. For an ultrasonic linear motor with flexible driving part [J]. *IEEE Ultrasonic Symposium*, 1998.
- [5] UROSAWA 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(5): 1188-1195.
- [6] YUN C H, ISHII T, NAKAMURA K, et al.. A high power ultrasonic linear motor using a longitudinal and bending hybrid bolt-clamped langevin type transducer [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2001, 40(5B): 3773-3776. (in Japanese)
- [7] 杨东, 姚志远. 双变幅杆 V 形直线超声电机研究 [J]. *压电与声光*, 2009, 31(5): 685-687.
YANG D, YAO ZH Y. Research on V-shape linear ultrasonic motor based on amplitude amplifier pole [J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2009, 31(5): 685-687. (in Chinese)
- [8] 姚志远, 杨东, 赵淳生. 杆结构直线超声电机的结构设计和功率流分析 [J]. *中国电机工程学报*, 2009(24): 56-60.
YAO ZH Y, YANG D, ZHAO CH SH. Structure design and power flow analysis of bar-structure linear ultrasonic motors [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2009, 29(24): 56-60. (in Chinese)
- [9] 胡宁, 姚志远, 赵文涛. 直线超声电机柔性夹持元件的设计 [J]. *中国机械工程*, 2012, 23(9): 1089-1091.
HU N, YAO ZH Y, ZHAO W T. Design of clamping components for a liner ultrasonic motor [J]. *China Mechanical Engineering*, 2012, 23(9): 1089-1091. (in Chinese)
- [10] 曹会萍. 基于虚拟仪器的直线超声电机输出特性测量与分析系统 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
CHAO H P. *Test system design of the linear ultrasonic motor based on virtual instrument* [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013. (in Chinese)
- [11] 孙业明, 曾平, 程光明, 等. 单振子二自由度超声电机驱动电源 [J]. *光学精密工程*, 2013, 21(9): 2279-2286.
SHUN Y M, ZENG P, CHENG G M, et al.. Driving power supply for two-degree-of-freedom ultrasonic motor with single vibrator [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(9): 2279-2286. (in Chinese)
- [12] 王守印, 冷雪飞, 何锋赞, 等. 超声电机驱动的旋转变倍机构 [J]. *光学精密工程*, 2009, 17(11): 2814-2819.
WANG SH Y, LENG X F, HE F Y, et al.. Rotary varifocal mechanism driven by ultrasonic motor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(11): 2814-2819. (in Chinese)
- [13] YU H, CHEN Q, HUANG W. Linear ultrasonic motor clamped by flexible hinge [J]. *Micromotors*, 2011, 44(3): 1-4.
- [14] YAMAGUCHI D, KANDA T, SUZMORI K. A design of bolt-clamped langevin-type transducer for cryo ultrasonic motor [C]. *The 4th International Conference on Manufacturing, Machine Design and Tribology*, 2011(4): D1-10.
- [15] HUIMIN Y, YIN W, QIANWEI C, et al.. A linear ultrasonic motor clamped with three-roller clamping scheme [J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2012(2): 17.
- [16] 王钰锋, 郭咏新, 毛剑琴. 压电作动器的率相关迟滞建模与跟踪控制 [J]. *光学精密工程*, 2014, 22(3): 616-625.
WANG Y F, GUO Y X, MAO J Q. Rate-dependent modeling and tracking control of piezoelectric actuators [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(3): 616-625. (in Chinese)

作者简介:



简月(1989—),女,辽宁铁岭人,博士研究生,2012年于南京航空航天大学获得学士学位,主要从事超声电机技术研究。E-mail: jianyue@nuaa.edu.cn

导师简介:



姚志远(1961—),男,江苏镇江人,博士,教授,博士生导师,1983年、2004年于东南大学分别获得学士、博士学位,主要从事结构力学分析和超声电机技术等方面的研究。E-mail: zyyao@nuaa.edu.cn