

文章编号 1004-924X(2015)增-0335-08

指数型变幅杆螺旋驱动直线压电作动器

李加林^{1,2}, 华顺明^{2*}, 李志强¹, 孟玉明¹, 楼应侯²

- (1. 太原科技大学 机械工程学院, 山西 太原 030024;
2. 浙江大学 宁波理工学院, 浙江 宁波 315100)

摘要:为实现微小型机电系统中驱动单元的小型化,设计了一种采用指数型变幅杆放大定子振幅的螺杆式直线压电作动器。分析了作动器运行机理,设计了作动器定子基体内螺纹副和变幅杆。然后,利用有限元软件仿真分析了定子基体的振动模式。最后,确定了作动器尺寸并加工出样机;搭建实验平台,对作动器样机的机械性能进行了测试。测试结果显示,在电压有效值为 300 V,激励频率为 15.6 kHz,两相激励电压之间的相位差为 $\pi/2$ 时,作动器输出直线速度最大值达到 3.392 mm/s,最大输出力达到 15.02 N。得到的结果表明:作动器具有良好的输出性能,具备了作为微小型机电系统直接驱动单元的能力,可满足微小型设备微量进给的要求。

关键词:直线压电作动器;指数型变幅杆;螺旋驱动;弯曲振动

中图分类号: TM384 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152313.0335

Spiral-driving linear piezoelectric actuator based on exponential amplitude transformer

LI Jia-lin^{1,2}, HUA Shun-ming^{2*}, LI Zhi-qiang¹, MENG Yu-ming¹, LOU Ying-hou²

(1. College of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China;

2. Ningbo Institute of Technology, Zhejiang University, Ningbo 315100, China)

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

Abstract: To miniaturize the driving unit in a micro-electro-mechanical system, a spiral-driving linear piezoelectric actuator based on an exponential amplitude transformer was designed. the operation mechanism of the actuator was analyzed, and the screw pairs of stator and the exponential amplitude transformer were designed. Then, the stator vibration modes were analyzed by finite element software in simulation. At last, the dimension of actuator was determined, the prototype was made, an experimental platform was established and the actuator output performance was tested. Under the conditions of an effective voltage of 300 V, resonant frequency of 15.6 kHz, the phase difference between two driving voltages of $\pi/2$, the actuator reaches a maximum linear velocity of 3.392 mm/s, and the output force of 15.02 N. The test results indicate that the actuator has a good output performance, and it can be employed in MEMS driving unit to meet the demands of subminiature equipment for the

收稿日期:2015-05-15;修订日期:2015-06-10.

基金项目:国家自然科学基金(No. 51275467);浙江省自然科学基金(No. LY16E05009)

micro feed.

Key words: linear piezoelectric actuator; exponential amplitude transformer; spiral-driving; bending vibration

1 引言

微型机电系统可将电路与可动机械集成,组成具有独立完整功能的智能微型装置,成为近几十年来自然科学和工程技术的重要研究领域。微型机电系统特征尺寸在毫米数量级,驱动单元是系统构件中的重要环节,由于工作原理和结构上的限制,电磁电机难以应用在微型系统上,超声电机在小型化方面具有电磁电机无法比拟的优势,具有短小轻薄、结构紧凑、设计灵活、定位精度高、无需齿轮减速机构,可实现直接驱动等优点,能够满足微型化要求^[1-2]。

直线压电作动器作为超声电机的一种,国内外学者对直线压电作动器做了大量的理论和实验研究,直线压电作动器有多种类型^[3],分类方法有按照波动形式、相对运动的关系、振动位移方向等,以色列 Zafirani S 和 Peled G 设计了基于一纵二弯模态的板形直线压电作动器^[4],并申请了专利。美国 New Scale Technologies 公司研制了基于弯振模态的微型直线超声电机^[5],适用于可植入式医疗器械、微型液体泵、夜视系统、手机相机的自动对焦机械装置等。朱华等人研制了应用于干涉显微镜焦距调节的直线压电作动器,满足干涉显微镜细分干涉条纹所需要的直线位移分辨率的要求^[6]。张健滔等人提出一款三棱柱形直线超声电机,电机可实现单相电信号驱动,也可实现两相电信号驱动^[7]。马立等人设计了基于尺蠖运动原理的压电直线驱动器,用于解决光学领域中的精密定位问题^[8]。潘松等人设计了具有高定位精度、运动平稳的蝶形直线超声电机^[9]。

本文设计了一种采用指数型变幅杆的螺杆驱动直线压电作动器,对其运行机理进行了分析并对其结构进行了设计,利用有限元软件对定子基体的振动模态进行了仿真分析,搭建了作动器的测试平台,并对样机进行了性能测试。测试结果表明,作动器具有良好的输出性能,已经具备作为微机电系统直接驱动单元的能力,满足微型设备微量进给的要求。

2 作动器的结构与运行机理

2.1 作动器的结构

图 1 所示为作动器结构示意图,由定子基体、压电陶瓷片、精密螺杆等组成。定子基体采用中空结构,前段部分采用指数型变幅杆,利用环氧树脂胶将压电陶瓷片粘贴于中间部分的 4 个平面上,利用末段部分将作动器固定于基座上,定子基体的变幅杆内孔加工有与精密螺杆配合的螺纹。

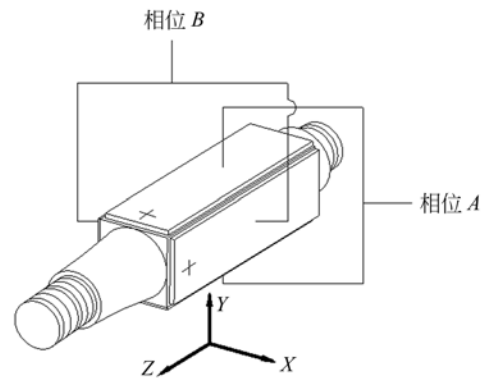


图 1 作动器的结构

Fig. 1 Structure of actuator

2.2 作动器的运行机理

如图 1 所示,该作动器利用梁的一阶弯曲振动模态工作,定子基体的两相工作模态是施加给压电陶瓷正弦交流电压激发出来的^[10]。压电陶瓷片沿厚度方向极化,上下两片为一组且极化方向相反,利用压电陶瓷片的 d_{31} 伸缩振动激励定子基体产生弯曲振动。

假设定子为非等截面梁并且一阶弯曲振动频率为 ω_1 ,当相位 A 以电压 $\sin \omega_1 t$ 单独激振时,定子将产生弯曲共振,非等截面梁弯曲振动的一般方程^[11]为:

$$\frac{\partial^2}{\partial z^2} \left[EI(z) \frac{\partial^2 y}{\partial z^2} \right] = f(z, t) - \rho A \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}, \quad (1)$$

其中: EI 为梁的弯曲刚度, ρ 为梁的质量密度, A 为梁的横截面积,如果没有外部激振力作用,则 $f(z, t) = 0$,可得等截面梁弯曲自由振动的运动方程为:

$$\frac{\partial^4}{\partial z^4} = -\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}, c = \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad (2)$$

如果同时相位 B 以电压 $\sin(\omega_1 t + \pi/2)$ 对定子进行激振时,两列弯曲振动驻波在空间具有 $\pi/2$ 的相位差,当两列驻波频率一致、振幅一致并且在时间上相位差也是 $\pi/2$ 时,两列驻波在定子基体内圆筒中产生弯曲行波,引起圆筒内质点做椭圆轨迹运动,最终通过螺纹副摩擦驱动螺杆输出直线位移^[12]。

3 作动器的设计

3.1 作动器定子基体内螺纹副设计

将作动器轴向设为 Z 轴,对位于定子基体变幅杆端部 XOY 平面内的第四象限质点 P 的运动轨迹进行分析,如图 2 所示,虚线表示变幅杆端面的平衡位置,质点 P 为端面上的任意一点, P_0 为质点 P 经过某时间 t 后的轨迹点,质点 P 的轨迹在平面 X_1PY_1 上并且为一椭圆^[3],椭圆方程为:

$$\frac{X_1^2}{W_{(D)}^2} + \frac{Y_1^2}{(R\beta_{(D)})^2 + W_{(D)}^2} = 1, \quad (3)$$

式中: R 为定子基体端面半径, $W_{(D)}$ 为质点 P 的横向位移函数, $\beta_{(D)}$ 为质点 P 的弯曲挠度函数。 γ 为质点 P 椭圆轨迹平面与定子端面的夹角,有:

$$\tan \gamma = \frac{R\beta_{(D)}}{W_{(D)}} \quad (4)$$

将质点 P 的椭圆轨迹沿 Z 向和径向分解,在 Z 向上分解是一个椭圆轨迹,该椭圆将使定子驱动端面接触部分的质点有相对转子的运动趋势,产生驱动转子的扭矩。但 P 点径向的运动会引起螺杆的径向滑动,消耗系统能量,降低系统

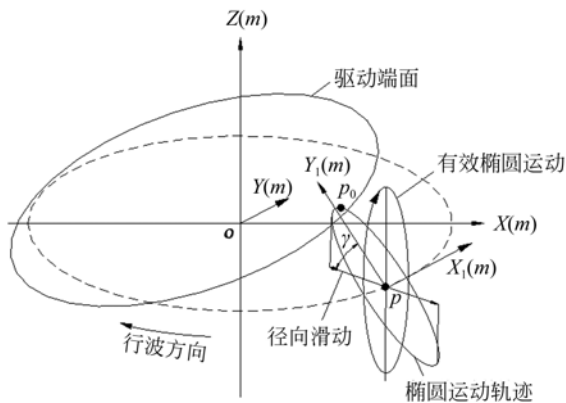


图 2 P 点的运动分解

Fig. 2 Kinematic decomposition of point P

效率。

该作动器的固定方式为悬臂梁式,一阶弯曲振型函数为^[11]:

$$W_{(D)} = D_1 \left[\cosh \left[1.875 \frac{z}{l} \right] - \cos \left[1.875 \frac{z}{l} \right] - 0.7341 \sinh \left[1.875 \frac{z}{l} \right] + 0.7341 \sin \left[1.875 \frac{z}{l} \right] \right] \quad (2)$$

$\beta_{(D)}$ 为:

$$D_1 \frac{1.875}{l} \left[\sinh \left[1.875 \frac{z}{l} \right] + \sin \left[1.875 \frac{z}{l} \right] - 0.7341 \cosh \left[1.875 \frac{z}{l} \right] + 0.7341 \cos \left[1.875 \frac{z}{l} \right] \right], \quad (6)$$

当 $z=l$ 时,代入(5)、(6)式,可得:

$$\tan \gamma = A \frac{R}{l}, \quad (7)$$

其中 A 为:

$$A = 1.875 \times \left[\frac{\sinh(1.875) + \sin(1.875) - 0.7341 \cosh(1.875) + 0.7341 \cos(1.875)}{\cosh(1.875) - \cos(1.875) - 0.7341 \sinh(1.875) + 0.7341 \sin(1.875)} \right] = 1.3766, \quad (8)$$

定子端面质点做椭圆轨迹运动,夹角 γ 与所攻螺纹副的牙型角 α 如图 3 所示,

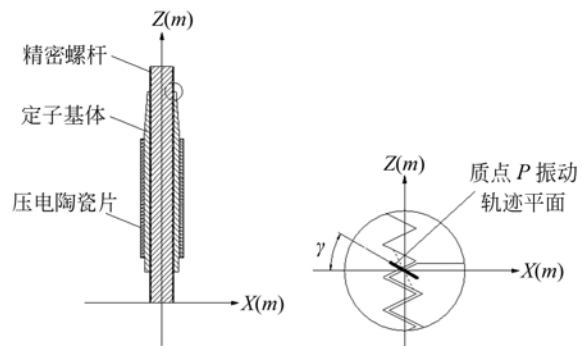


图 3 螺纹牙型角 α 与夹角 γ 关系

Fig. 3 Relationship between the screw thread angle α and the angle γ

为使作动器有良好的输出性能,应尽量减少质点 P 的径向滑动,因此质点 P 的振动轨迹平面应与配合螺纹驱动平面垂直,可得螺纹牙型角 α 与夹角 γ 之间的关系:

$$\alpha = \pi - 2\gamma. \quad (9)$$

由式(7)、(8)、(9)可得:

$$\alpha = \pi - 2\arctan \frac{1.3766R}{l} \quad (10)$$

将式(10)作为定子基体螺纹副牙型角 α 的目标函数,可使螺纹副驱动精密螺杆时的驱动效率提高。

3.2 变幅杆设计

在超声技术中,超声变幅杆有超声聚能的作用,利用超声变幅杆放大超声器件位移振动幅度,如图 4 所示,作动器变幅杆为圆截面指数型,变幅杆假设为实心结构,取变幅杆上的某一质点 z ,作用在小体积单元($z, z+dz$)上的张应力为 $\frac{\partial \sigma}{\partial z} dz$,根据牛顿定律得出动力学方程^[13]:

$$\frac{\partial(S\sigma)}{\partial z} dz = \rho S \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} dz, \quad (11)$$

其中: S 为变幅杆横截面的面积函数, $S = S_1 e^{-2\lambda z}$, $\lambda = \frac{1}{l} \ln \sqrt{\frac{A_1}{A_2}} = \frac{1}{l} \ln \frac{R_1}{R_2} = \frac{1}{l} \ln N$, N 为面积系数, $N = \frac{R_1}{R_2}$; ξ 为质点位移函数; σ 为应力函数,有:

$$\sigma = E \frac{\partial \xi}{\partial z} \quad (12)$$

在简谐振动的情况下,可得出变幅杆振动的波动方程为:

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial z^2} + \frac{1}{S} \frac{\partial S}{\partial z} \frac{\partial \xi}{\partial z} + K^2 \xi = 0, \quad (13)$$

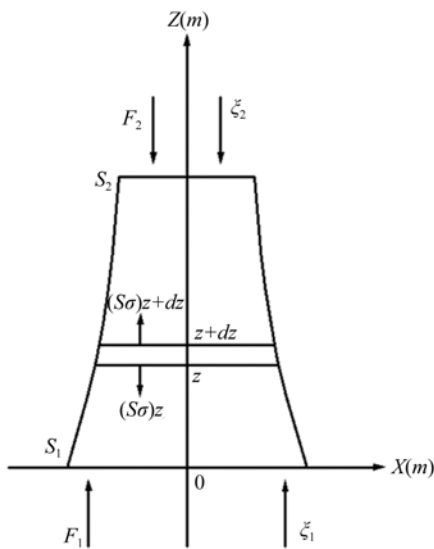


图 4 作动器指数型变幅杆示意图

Fig. 4 Exponential amplitude transformer of the actuator

其中: K 为圆波数, $K = \omega/c$; c 为纵波在细直杆中的传播速度, $c = \sqrt{E/\rho}$;大端半径为 R_1 ,其面积为 $S_1 = \pi R_1^2$,小端半径为 R_2 ,其面积为 $S_2 = \pi R_2^2$ 。由式(13)的解可得变幅杆的应变分布为:

$$\frac{\partial \xi}{\partial z} = \lambda e^{\lambda z} (a_1 \cos K'z + a_2 \sin K'z) + e^{\lambda z} (-a_1 K' \sin K'z + a_2 K' \cos K'z), \quad (14)$$

其中: $K' = \sqrt{K^2/\lambda^2}$ 由作动器的边界条件得出频率方程为:

$$\sin K'l = 0. \quad (15)$$

定子基体弯曲振动产生的能量经变幅杆的放大后传递到末端端部,变幅杆的材料选择硬铝合金,其弹性模量 $E = 70 \text{ Gpa}$,密度 $\rho = 2700 \text{ Kg/m}^3$,纵波在变幅杆中声速为 $c = 5100 \text{ m/s}$ 。通过理论计算和仿真分析,放大系数为 1.25,随着轴向距离的增大,振幅也随着变大,极大值点位于作动器变幅杆的末端端部,最大振幅为 $19.01 \mu\text{m}$ 。

4 作动器的有限元分析

利用 ANSYS14.5 对压电作动器进行有限元分析,为了减少质量、增加力矩密度,定子基体材料选用硬铝合金,通过单一变量原则,分析定子内径、压电陶瓷片厚度、压电陶瓷片长度等对定子基体的谐振频率与谐振振幅的影响,结合压电作动器定子基体内螺纹副和变幅杆的设计结果确定压电作动器尺寸。

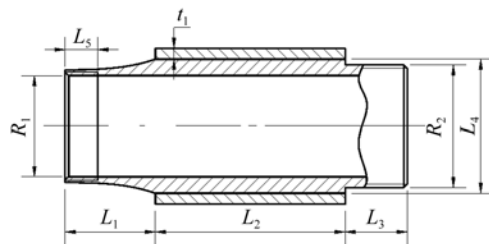


图 5 压电作动器尺寸

Fig. 5 Dimension of piezoelectric actuator

如图 5 所示, L_1 为作动器变幅杆长度; L_2 为压电陶瓷片长度; L_3 为固定端长度,直径为 R_2 ,用于固定; L_4 为定子基体中间长方体部分的高度,并且与压电陶瓷片的宽度相同; t_1 为压电陶瓷片的厚度;定子基体为 R_1 的通孔,在变幅杆端部内

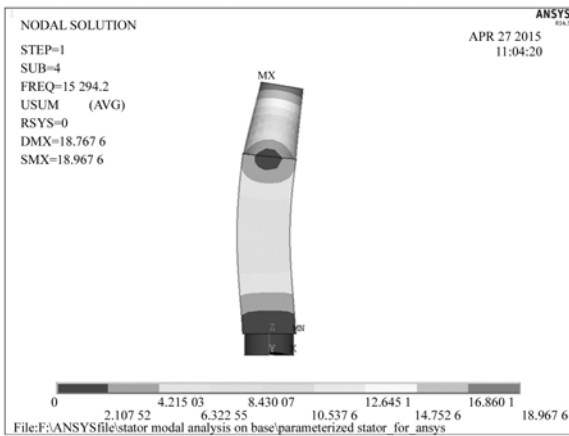
攻有长度为 L_5 的螺纹,与直径为 R_1 的精密螺杆配合。各尺寸的数值如表 1 所示。

表 1 压电作动器尺寸

Tab. 1 Dimension of piezoelectric actuator

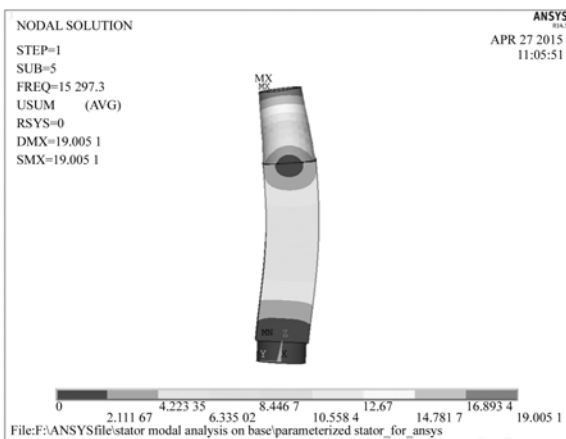
| 参数/mm | L_1 | L_2 | L_3 | L_4 | L_5 | R_1 | R_2 | t_1 |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 数值/ μm | 20 | 50 | 6 | 15 | 6 | 10 | 14 | 1.5 |

利用 ANSYS14.5 选择 Block Lanczos 法对作动器定子基体进行模态分析,提取 A 相和 B 相两个正交的一阶弯振模式,分别为 15.294 kHz 和 15.297 kHz,两相谐振频率一致性较好,两正交一阶弯振模式如图 6 所示。



(a) A 相一阶弯振模式

(a) First-order vibration mode of A phase



(b) B 相一阶弯振模式

(b) First-order vibration mode of B phase

图 6 定子基体的振动模式分析

Fig. 6 Vibration mode analysis of stator

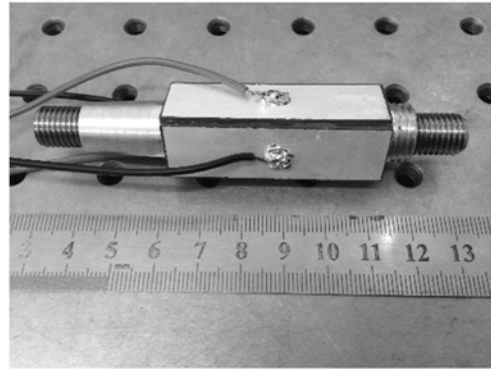


图 7 作动器样机

Fig. 7 Prototype of actuator

5 样机的制作与测试

图 7 所示为指数型变幅杆螺旋驱动直线压电作动器,螺杆选用日本 MISUMI 公司 FAB M10 \times 100 型精密螺杆,压电陶瓷为 PZT-4 型。为测试作动器输出性能,搭建了如图 8 所示的作动器输出性能实验平台。实验平台主要由气浮隔振台、RIGOL DG4102 信号发生器、Tabor 9200A 功率放大器、作动器样机、基恩士 LK-G5000 激光测距仪、数显测力计等构成。

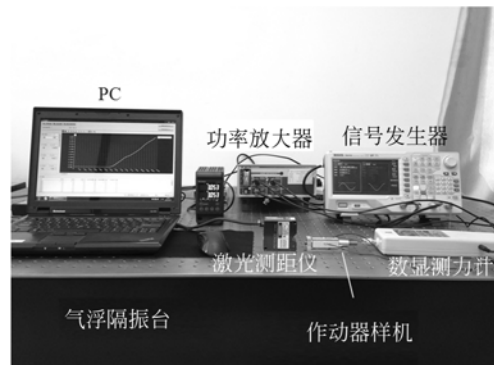


图 8 作动器输出性能实验平台

Fig. 8 Experimental platform of actuator output performance

设定有效电压值 $V_{\text{rms}} = 300 \text{ V}$,调节激励频率为 14~18 kHz,测得作动器输出直线速度与激励频率的特性关系曲线如图 9 所示,作动器输出速度在 15.6 kHz 出现最大值,作动器样机一阶弯振驱动频率结果与有限元仿真结果相差 1.9%,两者结果吻合。

图 10 所示为基恩士激光测距仪测出的作动

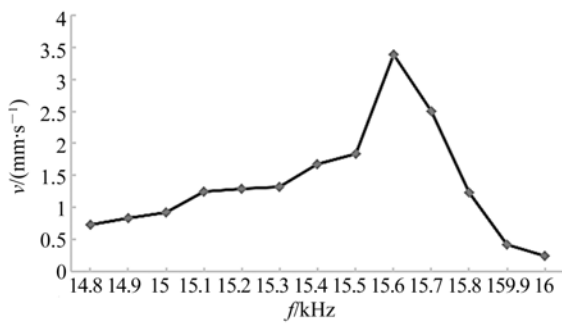


图 9 作动器直线速度与激励频率关系

Fig. 9 Relationship between excitation frequency and linear speed

器样机在 $V_{\text{rms}} = 300 \text{ V}$ ，激励频率在 15.6 kHz 时的位移-时间曲线和速度-时间曲线，两曲线数据纵向分屏显示，激光测距仪位移测量范围为 $\pm 3 \text{ mm}$ ，设定采样频率为 $20 \mu\text{s}$ (50 kHz)。通过对位移-时间曲线拟合，可得曲线斜率即作动器直线速度为 3.392 mm/s ；通过对速度-时间曲线分析可以看出，螺杆在输出直线速度时轴向发生窜动，主要由作动器定子基体与精密螺杆接触表面的不均匀性引起的，在启动时发生窜动比较大是由于作动器启动特性很快，精密螺杆与定子基体之间的弹性引起的。

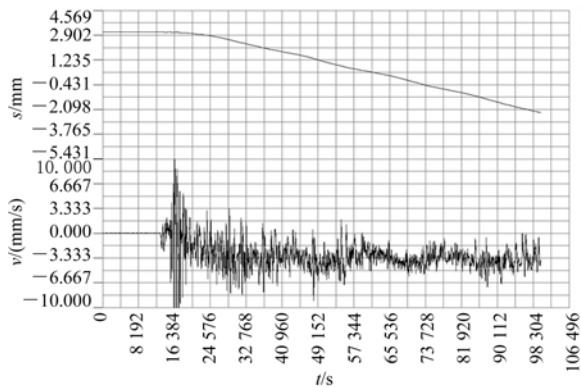


图 10 作动器位移-时间曲线和速度-时间曲线

Fig. 10 Displacement-time curve and velocity-time curve of actuator

图 11 所示为作动器在 15.6 kHz 激励频率下，调节有效电压自 $50 \sim 300 \text{ V}$ 时，测得的输出速度与驱动电压的特性关系曲线。作动器速度在 $V_{\text{rms}} = 300 \text{ V}$ 时达到最大值，输出速度随着电压的增大而增大，输出速度与驱动电压基本呈线性关系。

最后对作动器的机械特性进行测试，两相激

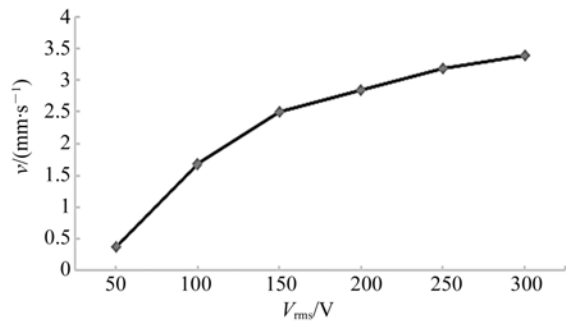


图 11 作动器直线速度与驱动电压关系

Fig. 11 Relationship between driving voltage and linear speed

励电压之间的相位差为 $\pi/2$ ，有效值电压 $V_{\text{rms}} = 300 \text{ V}$ ，激励频率为 15.6 kHz ，机械特性曲线如图 12 所示，输出速度随着负载力的增大而减小，具有较好的线性特性，测得最大输出力为 15.02 N 。

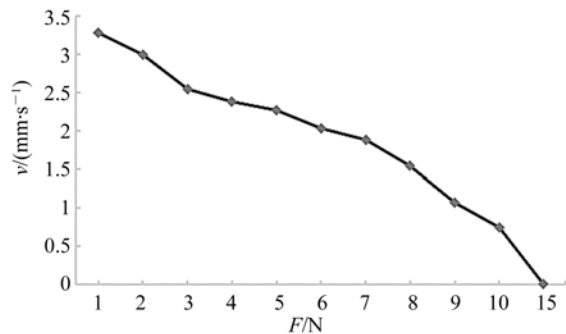


图 12 作动器机械特性曲线

Fig. 12 Mechanical characteristics curve of actuator

6 结 论

本文研制了采用指数型变幅杆的螺杆驱动直线压电作动器，分析了其工作原理。对作动器在结构上进行了设计，分别是作动器定子基体内螺纹副设计和作动器变幅杆设计。利用有限元软件对定子的振动模态进行仿真分析，确定了作动器尺寸并加工出样机。搭建实验平台，对作动器样机的机械性能进行了测试。在电压有效值 $V_{\text{rms}} = 300 \text{ V}$ ，激励频率为 15.6 kHz ，两相激励电压之间的相位差为 $\pi/2$ 时，作动器输出最大直线速度，其直线输出速度为 3.392 mm/s ，最大输出力为 15.02 N 。

作动器具有良好的输出性能，已经具备作为微小型机电系统直接驱动单元的能力，满足微小型设备微量进给的要求。

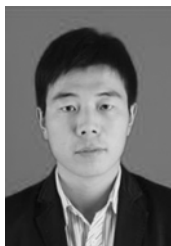
参考文献:

- [1] 赵淳生,朱华. 超声电机技术的发展和应[J]. 机械制造与自动化,2008,37(3):1-9.
ZHAO CH SH,ZHU H. Development and application of ultrasonic motors technologies[J]. *Machine Building Automation*, 2008, 37(3):1~9. (in Chinese)
- [2] 李晓牛,周盛强. 光阑用螺纹式超声电机[J]. 光学精密工程,2014,22(8):2081-2087.
LI X N,ZHOU SH Q. Ultrasonic motor connected by screw for aperture [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(8):2081~2087. (in Chinese)
- [3] ZHAO C S. *Ultrasonic motors Technologies and Applications*[M]. Beijing: Science press, 2011.
- [4] ZAIFRANI S, PELED G, ESHED G, et al.. Controllably coupled piezoelectric motors: US, 20090225388 A1[P]. 2009-9-10.
- [5] XU Q, HENDERSON D, PIAZZA D, et al.. Reduced-voltage linear motor systems and methods thereof;US, 20100039715 A1 [P]. 2010-2-18.
- [6] 朱华,曹如意,管磊. 应用于干涉显微镜的直线压电作动器[J]. 光学精密工程,2013,21(6):1524-1530.
ZHU H, CAO R Y, JIAN L. Linear piezoelectric actuator applied to interference microscope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(6):1524-1530. (in Chinese)
- [7] 张健滔,李朝东. 三棱柱形直线超声电机[J]. 中国电机工程学报,2014,34(36):6493-6498.
ZHANG J T, LI C D. A Triangular prism shaped linear ultrasonic motor [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(36):6493-6498. (in Chinese)
- [8] 马立,肖金涛,周莎莎,等. 杠杆式尺蠖压电直线驱动器[J]. 光学精密工程,2015,23(1):184-190.
MA L, XIAO J T, ZHOU SH SH, et al.. Linear lever-type piezoelectric inchworm actuator[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 23(1):184-190. (in

Chinese)

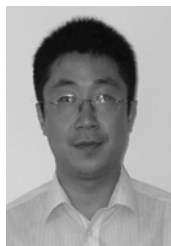
- [9] 潘松,张建辉,黄卫清,等. 蝶形直线电机的模糊 Takagi-Sugeno 鲁棒控制[J]. 光学精密工程,2014,22(10):2667-2673.
PAN S, ZHANG J H, HUANG W Q, et al.. Robust control of butterfly-shaped linear ultrasonic motor based on Takagi-Sugeno fuzzy systems[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 22(10):2667-2673. (in Chinese)
- [10] 曾劲松,郭长亮. 四足直线超声电机模态频率一致性调节[J]. 振动、测试与诊断,2013,33(5):770-774.
ZENG J S, GUO CH L. Coincidence adjustment of modal frequencies for four-legged linear ultrasonic motor [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2013, 33(5):770-774. (in Chinese)
- [11] 羊全钢,张凯,周铁英. 弯曲旋转超声电机接触界面锥形角的分析与实验[J]. 声学学报,2002,27(5):413-419.
YANG Q G, ZHANG K, ZHOU T Y. Analysis and experiment on the taper angle of contact surface of bend rotation ultrasonic micrometers [J]. *Acta Acustica*, 2002, 27(5):413-419. (in Chinese)
- [12] 董迎晖,顾雅春,汤开元,等. 采用弯曲振动模态的弹簧定子超声电机[J]. 振动、测试与诊断,2013,33(2):13-16.
DONG Y H, GU Y C, TANG K Y, et al.. Research on a new type ultrasonic motor with a helical stator using bending vibration modes [J]. *Journal of Vibration Measurement & Diagnosis*, 2013, 33(2):13-16. (in Chinese)
- [13] 张云电. 超声加工及其应用[M]. 北京:国防工业出版社,1995.
ZHANG Y D. *Ultrasonic machining and its application* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1995. (in Chinese)

作者简介:



李加林(1987-)男,山东泰安人,2012年于山东建筑大学获得学士学位,主要从事压电驱动,精密机械与微小机械方面的研究。Email:jack_sparrow888@163.com

通讯作者:



华顺明(1972-)男,吉林长春人,博士,教授,分别于1993年、2000年、2005年在吉林大学获得学士、硕士、博士学位,主要从事精密机械与微小机械方面的研究。Email:nithuasm@126.com