

V 型双振子螺杆式直线压电作动器研究

华顺明¹, 李志强^{1,2}, 孟玉明^{1,2}, 楼应侯¹, 李加林^{1,2}

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

摘 要:提出一种 V 型双振子螺杆式直线压电作动器, 该作动器由定子圆筒、精密螺母、螺杆及 2 个弹性体振子构成。利用 2 个弹性体振子弯曲振动产生的对称模态和反对称模态, 激励圆筒端面质点作椭圆轨迹运动, 通过螺母和螺杆间的摩擦耦合驱动螺杆作轴向直线运动。利用有限元分析, 设计制作了试验样机, 并对其主要输出性能进行了实验测试。在电压峰-峰值为 300 V 条件下, 样机稳定工作频率为 9.7 kHz, 无负载最大转速为 57.7 r/min, 最大输出力为 2.3 N。

关键词:压电作动器; 弯曲振动; 椭圆运动; 有限元分析; 直线驱动器

中图分类号:TM384 **文献标识码:**A

Study on V-shape Screw-type Linear Actuator with Double Piezoelectric Vibrators

HUA Shunming¹, LI Zhiqiang^{1,2}, MENG Yuming^{1,2}, LOU Yinghou¹, LI Jialin^{1,2}

(1. Ningbo Institute of Technology, Zhejiang University, Ningbo 315100, China,

2. College of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: A V-shape linear actuator with double piezoelectric vibrators was proposed, whose rotor was a screw rod. It was compact and consisted of a hollow cylinder, precise nut, screw rod, two elastic vibrators and so on. The precise screw rod was driven by frictional force came from points within spiral surface of the matching nut. These points made elliptic trajectory motion which was generated by symmetrical mode and anti-symmetrical mode of two elastic vibrators' bending vibration. Thus, the screw rod was forced to move along axial direction. The prototype actuator was designed and fabricated according to FEM analyzing results, and its main output performances were obtained through corresponding experimental device. The stable driving frequency of prototype is tested as 9.7 kHz, and the maximum no-load rotary speed as well as output force are 57.7 r/min and 2.3 N separately under peak-peak voltage of 300 V.

Key words: piezoelectric actuator; bending vibration; elliptic motion; FEM analysis; linear actuator

0 引言

随着微型机械、超精密加工和微装配等技术的迅速发展, 微机电系统(MEMS)对进给系统的定位精度及速度提出了越来越高的要求^[1]。传统直线精密定位技术主要采用“伺服电机+滚珠丝杠”方式, 但传统电磁式电机因结构复杂, 在微型化过程中已遇到瓶颈。直线型压电作动器无需运动转换机构, 可直接输出直线运动并驱动负载, 且具有结构简单, 易于微型化, 力矩密度大, 响应快, 断电自锁等优点, 广泛应用于机器人、精密仪器、医疗器械、航空航天等领域^[2]。

直线压电作动器结构设计灵活, 可采用多种多

样的形状。石胜君等^[3]研制了一种纵弯复合模态夹心式高速直线超声电机, 最大输出力达 50 N; 胡金云、鹿存跃等^[4]研制了一种双振子自走型直线超声电机, 最大空载速度为 704 mm/s, 堵转力为 2.1 N; 杨东等^[5]研制了一种双变幅杆 V 形直线超声电机, 最大空载速度 235 mm/s, 最大输出力 21.4 N。

螺纹杆式超声电机结构更紧凑, 有助于满足超声电机大应变、微型化的要求。目前, 该型电机大多采用压电陶瓷的 d_{31} 模式, 因其机电耦合系数 k_p 较低, 限制了输出转矩和效率。参考李玉宝等^[6]研制的双驱动足大推力直线型超声电机结构, 本文提出一种基于压电陶瓷 d_{33} 模式的 V 型双振子螺杆式直

收稿日期: 2014-12-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51275467)

作者简介: 华顺明(1972-), 男, 吉林大安人, 教授, 硕士生导师, 主要从事精密机械与微小机械、压电驱动与控制技术的研究。E-mail: nithuasm@126.com。

线压电作动器,利用定子环的“呼啦圈”振动驱动螺杆输出运动和动力。

1 作动器结构与定子工作模式

1.1 作动器结构

图 1 为螺杆式直线压电作动器结构。作动器定子由 2 个弹性体振子和 1 个圆筒构成,圆筒一侧端面固定有精密螺母,与螺杆型转子通过螺纹啮合,另一端面固定有圆环盖板,为转子导向。2 个弹性体振子呈 V 型布局,在空间上相互垂直,通过变幅杆与圆筒过盈相连。变幅杆与圆筒连接处截面较小,以起放大振动位移或速度振幅的作用^[7]。

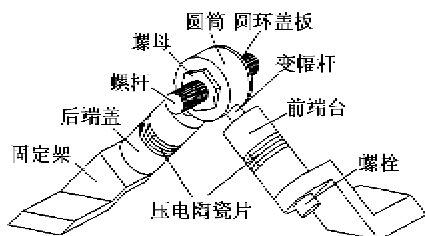


图 1 作动器结构

双弹性体均采用兰杰文振子结构,即通过螺栓将固定架、后端盖、压电陶瓷和前端台紧固在一起,可通过调整螺栓来调节对压电陶瓷的预压力。当弹性体振子在相同输入功率工作时,振子中的应力较小,此时若采用对称结构,因其输入阻抗较低,亦可降低介电损耗。因此,作动器 V 型定子部分采用左右对称结构,保证左右振子振动特性一致,使振子弯振模态频率匹配和调节更简单^[8]。

图 2 为弹性体振子中压电陶瓷的布局及引线方式。作动器双振子中压电陶瓷的布置及极化方式完全一致。每个振子中包含 4 片弯振压电陶瓷,弯振压电陶瓷布置在振子弯振振型的节面附近。每个振子中相邻 2 片压电陶瓷为 1 组,共 A、B、C、D 4 组,两组弯振压电陶瓷的切分线按正交形式布置。每片弯振压电陶瓷切分成 2 半,相邻 2 半片压电陶瓷极化方向相反。压电陶瓷沿厚度方向极化,采用压电陶瓷的纵向工作模态 d_{33} 模式。

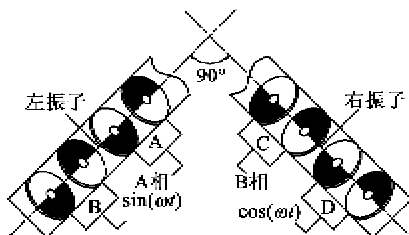


图 2 压电陶瓷布局及引线方式

1.2 定子工作模式

V 型双振子螺杆式直线压电作动器利用 2 个弹性体振子激励圆筒端面质点作椭圆轨迹运动,通过螺母和螺杆间的摩擦耦合,驱动螺杆转子实现轴向直线运动。对于 V 型压电作动器,圆筒驱动端面质点的椭圆运动由双振子同频的对称模态和反对称模态叠加而成^[9]。

当作动器左、右振子作同向弯曲振动时,定子作对称模态振动。此时,圆筒驱动端面上形成径向的振动,如图 3(a)所示;当作动器左、右振子作反向弯曲振动时,定子作反对称模态振动,圆筒驱动端面上形成切向的振动,如图 3(b)所示。对 2 个弹性体振子的 A、B 两相分别施加在时间上相差 90° 的 $\sin \omega t$ 和 $\cos \omega t$ 信号,在电场作用下同时激发出定子的对称模态和反对称模态,就可激励圆筒驱动端面质点作椭圆轨迹运动。径向振动提供螺母和螺杆间的预压力,切向振动通过螺母和螺杆间的摩擦耦合,驱动螺杆转子转动。

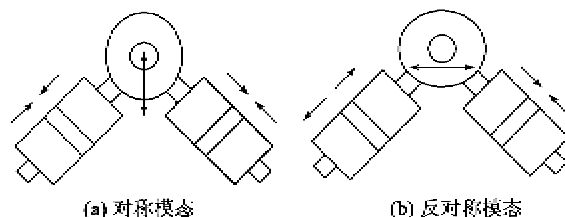


图 3 作动器定子的 2 个工作模式

2 圆筒端面质点的运动轨迹分析

V 型定子的工作模式中,圆筒端面质点的振动可用 2 个结构对称的弹性体振子相互协调的弯曲振动来表示。忽略定子其他模态的干扰及工作模态阻尼的影响,且假设左、右振子完全对称。建立如图 4 所示的定子运动坐标系,坐标原点 O 为圆筒圆心, θ 为左、右振子轴线间的夹角。

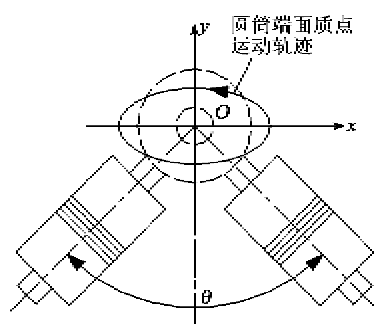


图 4 定子运动坐标系示意图

当仅对左振子 A 组施加 $\sin \omega t$ 激励信号时,在

O 点处产生的振动(见图 5(a))可表示为

$$u_A = U \sin \omega t \sin(\theta/2)i + U \sin \omega t \cos(\theta/2)j \quad (1)$$

式中: U 为单个振子施加单组激励信号在 O 点处的响应幅值; ω 为激励信号的角频率。

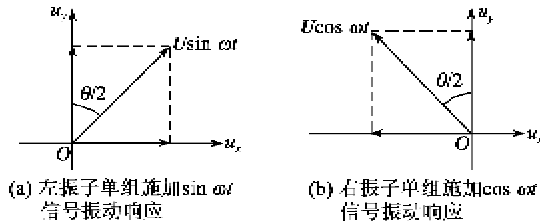


图 5 圆筒端面质点的位移响应

压电作动器左、右振子轴线间的夹角为 $\pi/2$, 则

$$u_A = U \sin \omega t \sin(\pi/4)i + U \sin \omega t \cos(\pi/4)j \quad (2)$$

同理, 当仅对左振子 B 组施加 $\sin \omega t$ 激励信号时, 在 O 点处产生的振动为

$$u_B = U \sin \omega t \sin(\pi/4)i + U \sin \omega t \cos(\pi/4)j \quad (3)$$

当仅对右振子 C 组施加 $\cos \omega t$ 激励信号时, 在 O 点处产生的振动(见图 5(b))可表示为

$$u_C = -U \sin \omega t \sin(\pi/4)i + U \cos \omega t \cos(\pi/4)j \quad (4)$$

同理, 当仅对右振子 D 组施加 $\cos \omega t$ 激励信号时, 在 O 点处产生的振动为

$$u_D = -U \cos \omega t \sin(\pi/4)i + U \cos \omega t \cos(\pi/4)j \quad (5)$$

当同时对 A、B 两组、C、D 两组压电陶瓷分别施加 $\sin \omega t$ 和 $\cos \omega t$ 激励信号时, 则在 O 点处产生的振动可表示为

$$\begin{aligned} u &= u_A + u_B + u_C + u_D = 2U \sin \omega t \sin[(\pi/4)i + \cos(\pi/4)j] + 2U \cos \omega t [-\sin[(\pi/4)i + \cos(\pi/4)j] \\ &= 2U [-\cos(\omega t + \pi/4)i + \sin(\omega t + \pi/4)j] \end{aligned} \quad (6)$$

由式(6)可知, O 点处的振动可视为两项振动的和, 前一项为反对称模态响应, 后一项为对称模态响应。

将在 O 点处产生的振动沿 x 、 y 方向分解可得

$$\begin{cases} u_x = -2U \cos(\omega t + \pi/4) \\ u_y = 2U \sin(\omega t + \pi/4) \end{cases} \quad (7)$$

由式(7)可得, 在 O 点处产生的 x 、 y 向振动满足

$$\frac{u_x^2}{4U^2} + \frac{u_y^2}{4U^2} = 1 \quad (8)$$

由于对称模态响应和反对称模态响应幅值相等, 因此圆筒端面质点在 xOy 平面内的运动轨迹为圆, 是一种特殊的椭圆。当圆筒上的螺母和螺杆接触时, 圆筒端面质点的椭圆运动通过螺母和螺杆之间的摩擦耦合对螺杆提供一个切向驱动力, 驱动螺杆转动, 从而实现螺杆 z 向的直线运动。如果在 2 个弹性体振子上切换电压信号, 这时定子圆筒端面质点的椭圆运动轨迹的旋转方向则会相应地反向, 从而表现为螺杆的反向转动。

3 定子结构有限元分析

由于 V 型定子的结构较复杂, 因此很难通过解析法得到精确解, 应用有限元法可对作动器定子的振动模态进行分析研究。采用 APDL 语言在 ANSYS 有限元软件中建立如图 6 所示的作动器定子结构有限元模型。建模时:

- 1) 忽略电极片厚度(0.05 mm)。
- 2) 边界条件为对 2 个弹性体振子的后端盖端面施加固定约束。
- 3) 在电极区域的节点设定耦合电势为 0。

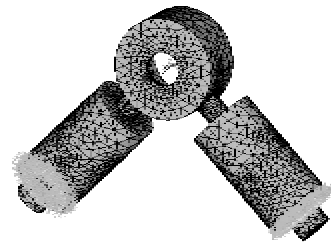


图 6 作动器定子结构有限元模型

采用 Block Lanczos 模态叠加法, 在 0~60 kHz 范围内对作动器定子结构进行模态分析和谐响应分析。提取作动器定子结构的对称模态和反对称模态, 如图 7 所示。由图可知, 作动器定子结构的对称模态和反对称模态频率分别为 10.589 kHz 和 10.823 kHz, 2 个模态频率基本一致。

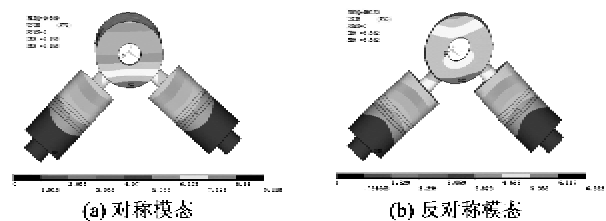


图 7 定子结构的对称模态和反对称模态

4 样机制作与实验研究

4.1 样机制作与实验

根据作动器定子结构和有限元分析结果, 设计

制作了作动器样机如图8所示。精密螺旋副分别为日本MISUMI公司FAB M10×100型精密螺杆和NTFL M10×40型螺母,材料SUS304。压电陶瓷为无锡惠丰电子有限公司的PZT-41压电陶瓷。电极片厚为0.05 mm的紫铜片。

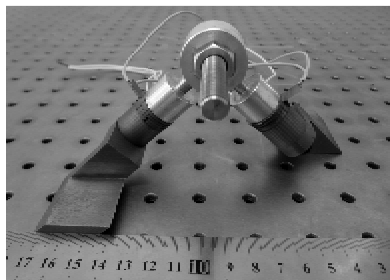


图8 作动器样机

图9为测试作动器机械性能的实验装置,主要由光正气浮隔振台、RIGOL DG4102信号发生器、Tabor 9200A功率放大器、作动器样机、数显测力计等构成。

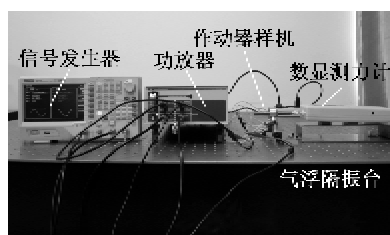


图9 作动器机械性能测试装置

在测试过程中发现,当频率为9.0~10.4 kHz时,作动器螺杆转动明显,此时测得的作动器输出转速与驱动频率的特性关系曲线,如图10所示。测试条件为:驱动电压峰-峰值 $V_{PE}=300$ V,A、B两相相差 90° 。由图可知,作动器最大空载转速为57.7 r/min,实际工作频率为9.7 kHz,低于理论分析频率(10.589 kHz)。

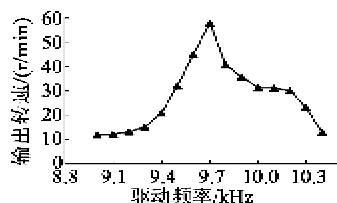


图10 作动器输出转速与驱动频率关系

在10~10.4 kHz频率段,作动器输出转速出现明显波动。这可能是由于高频导致压电陶瓷电荷泄漏,伴随产生热效应,使换能器温升过高,非线性特性更明显^[10],因此作动器转速出现波动。

图11为压电作动器在9.7 kHz工作频率下,调节驱动电压为50~300 V时,测得的输出力与驱动

电压的特性关系曲线。由图可知,在驱动电压为300 V时,作动器最大输出力为2.3 N。当驱动电压大于150 V时,二者基本呈线性关系,作动器输出力随驱动电压增大而增大。当驱动电压为50~150 V时,作动器输出力与驱动电压的线性关系不佳。误差可能来自两方面,一是水平测试时螺杆导向不足,造成螺旋副啮合区域接触不稳定,导致作动器在低电压驱动时运行不平稳;二是测力计与螺杆端部为接触测量,在低压条件下,作动器输出力较小,接触摩擦力造成测量结果波动较大。

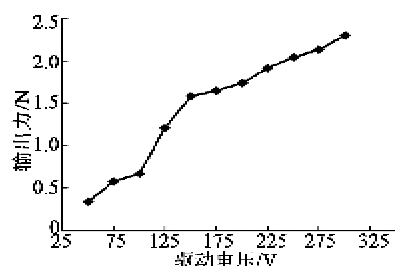


图11 作动器输出力与驱动电压关系

图12为作动器的输出机械特性,此时两路输入信号的相位差为 90° ,驱动电压 $V_{PE}=300$ V,频率9.7 kHz。作动器输出转速与输出力大体呈反比关系,随着负载的增加,作动器输出转速下降。

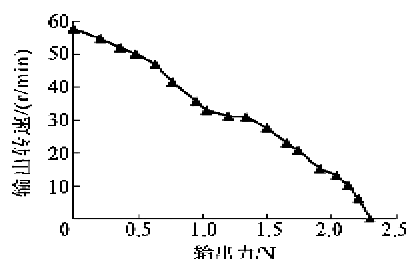


图12 作动器输出机械特性曲线

4.2 实验结果分析

作动器样机实测工作频率为9.7 kHz,略低于ANSYS模态分析结果(对称模态10.589 kHz,反对称模态10.823 kHz)。造成工作频率偏低的主要原因有:

- 1) 样机中,弹性体振子的压电片分组且以螺栓压紧,而在仿真分析时则视为整体。
- 2) 样机装配时,变幅杆前端与定子圆筒为过盈连接,ANSYS分析时将变幅杆与圆筒视为一体。
- 3) 材料的不均匀性和加工装配误差,也会导致2个弹性体振子的工作模态频率一致性不好。

在测试过程中还存在较大噪声,其原因是:

- 1) 驱动频率为9.7 kHz,处于超声频段外,易

产生噪声。

2) 螺杆只有单侧导向,使长螺杆在螺母盘旋驱动(呼啦圈运动)下,必然会在牙型高度方向产生摆动,使啮合区域出现径向附加滑移,产生噪声。

此外,样机最大输出力只有 2.3 N,结果偏小。结合实验过程观察到的现象和文献资料,为获得较大输出力,必需通过改进结构,增大螺旋啮合位置的径向尺寸。同时,为提高作动器的运行稳定性,减小噪声,还需改进导向机构,并对计入牙型角因素的定转子接触模型进行深入研究。

5 结束语

1) 设计了一种基于压电陶瓷 d_{33} 模式的 V 型双振子螺杆式直线作动器,利用合成弯振产生的对称模态和反对称模态,激励圆筒端面质点产生椭圆轨迹运动,驱动螺杆转动。

2) 利用 ANSYS 有限元软件对作动器定子结构进行模态分析和谐响应分析,获得了定子结构的对称模态和反对称模态频率分别为 10.589 kHz 和 10.823 kHz。

3) 制作了压电作动器样机,并对其主要机械性能进行了测试。在驱动电压 $V_{rp}=300$ V,两相相差 90° ,频率 9.7 kHz 下,其最大空载转速为 57.7 r/min,最大输出力为 2.3 N。

参考文献:

- [1] 许航. 直线超声电动机在精密工作台中的应用[J]. 微电机, 2008, 41(10): 68-69.
XU Hang. Application of linear ultrasonic motor for precise stage [J]. Micromotor, 2008, 41(10): 68-69.
- [2] 赵增辉, 王育平, 袁义坤, 等. 直线超声电机的研究与应用现状[J]. 电机与控制应用, 2008, 35(9): 1-5.
ZHAO Zenghui, WANG Yuping, YUAN Yikun, et al. Recent research and applications on linear ultrasonic motor [J]. Electric Machines & Control Application, 2008, 35(9): 1-5.
- [3] SHI Shengjun, CHEN Weishan, LIU Junkao. A high speed ultrasonic linear motor using longitudinal and bending multimode bolt-clamped langevin type transducer[C]//Luoyang: Luoyang Proceeding of the 2006 IEEE International Conference on Mechatronics and

Automation, 2006: 612-617.

- [4] 胡金云, 鹿存跃, 陈宇, 等. 双振子型直线超声电机[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2008, 48(8): 1236-1239.
HU Jinyun, LU Cunyue, CHEN Yu, et al. Double-vibrator linear piezoelectric ultrasonic motor[J]. J Tsinghua Univ: Sci & Tech, 2008, 48(8): 1236-1239.
- [5] 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): 685-690.
YANG Dong, YAO Zhiyuan. Research on V-shape linear ultrasonic motor based on amplitude amplifier pole [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2009, 31(5): 685-690.
- [6] 李玉宝, 时运来, 赵淳生. 新型大推力直线超声电机运动机理及实验研究[J]. 中国机械工程, 2008, 19(24): 2912-2916.
LI Yubao, SHI Yunlai, ZHAO Chunsheng. Mechanism analysis and experimental research on novel linear ultrasonic motor with large thrust[J]. China Mechanical Engineering, 2008, 19(24): 2912-2916.
- [7] 苏松飞, 姚志远, 王长茹, 等. 一种弯曲模态直线超声电机的研究[J]. 压电与声光, 2012, 34(3): 400-403.
SU Songfei, YAO Zhiyuan, WANG Changru, et al. Research on linear ultrasonic motor based on bending modal [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2012, 34(3): 400-403.
- [8] 胡百振, 李有光, 赵淳生, 等. 新型纵弯超声电机振子的设计与分析[J]. 压电与声光, 2014, 36(3): 354-355.
HU Baizhen, LI Youguang, ZHAO Chunsheng, et al. Design and analysis of a new ultrasonic motor vibrator with longitudinal and bending modes [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2014, 36(3): 354-355.
- [9] 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(5): 1188-1195.
- [10] 曾劲松, 姚志远, 赵淳生. 超声电机中的非线性现象研究[J]. 中国机械工程, 2006, 17(10): 1047-1051.
ZENG Jinsong, YAO Zhiyuan, ZHAO Chunsheng. Research on non-linear phenomena in ultrasonic motor [J]. China Mechanical Engineering, 2006, 17(10): 1047-1051.