

文章编号 1004-924X(2016)增-0438-08

带有变幅杆的直线电机及其驱动控制

华顺明^{1,3*}, 李加林^{1,2}, 楼应侯^{1,3}, 赵媛^{1,2}, 张学昌^{1,3}

(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;

3. 浙江省零件轧制成形技术研究重点实验室, 浙江 宁波 315100)

摘要:为实现小型装备驱动单元的微小化、集成化,设计制作了一种带有指数型变幅杆的直线螺纹电机。电机利用梁的一阶弯振模态工作,定子中部为四棱柱弹性体,由贴片式压电陶瓷激励产生空间摇摆运动,单端为指数型变幅杆,放大振动位移并协调匹配定转子尺寸。转子螺杆由变幅杆内螺纹驱动,输出直线位移。设计了专用驱动电路,并结合样机对主要性能进行了实测。结果表明,在电压有效值 200 V、频率 15.6 KHz 时,电机最高空载速度约为 3.3 mm/s,最大轴向力约 11 N。该电机结构简单,控制方便,机械特性较好,特别是轴向力较现有同类电机有显著提高。

关键词:指数型变幅杆;压电驱动;直线电机;电控单元

中图分类号: TM384 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162413.0438

A linear motor with solid horn and actuation

HUA Shun-ming^{1,3*}, LI Jia-lin^{1,2}, LOU Ying-hou^{1,3}, ZHAO Yuan^{1,2}, ZHANG Xue-chang^{1,3}

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

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

3. Part Rolling Key Laboratory of Zhejiang Province,
Zhejiang University, Ningbo, 315100)

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

Abstract: To achieve miniaturization and integration of drive units for small-size equipment, a linear screw motor with exponential type ultrasonic horn is designed and made. The motor works in first-order bending vibration mode of the girder, and middle part of the stator is a quadrangular elastomer; use the SMD piezoelectric ceramic stimulation to produce space rocking motion, with the single end as exponential type ultrasonic horn, then amplify the vibration displacement and coordinate/match the rotor/stator size. The rotor screw is driven by internal thread of the ultrasonic horn to output linear displacement. A special drive circuit is designed and combined with the model machine to carry out an actual measurement in the main performances. The results indicate that when the voltage effective value is 220 V and the frequency is 15.6 KHz, maximum no-load speed of the motor is 3.3mm/s and the maximum axial force is 11 N. The motor is simple in structure, convenient for control and good in me-

收稿日期:2016-05-10;修订日期:2016-06-17.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51275467);浙江省自然科学基金资助项目(No. LY16E050009)

chanical property, with a relatively higher axial force compared with motors of the same kind.

Key words: exponential type ultrasonic horn; piezoelectric drive; linear motor; electronic control unit

1 引言

超声电机利用压电陶瓷的逆压电效应将电能转化为微幅超声振动,通过摩擦将能量传递给转子来实现能量传递。其中,杆式/管式/柱状电机具有体积小、重量轻、输出直线位移、定位精度高等优点,在微型机电系统、航空航天、医疗等领域具有广泛的应用前景^[1-3]。哈尔滨工业大学石胜军制作了一种由相连的指数型变幅杆组成定子主体结构的双心式纵弯复合直线压电作动器,体积较大(35×35×201.7 mm),推力高达 45N^[4];上海大学张健滔研制了一款由三棱柱形定子和螺杆式转子构成的直线超声电机,可由单相/两相信号驱动,体积小、结构简单,最大推力为 0.192 N^[5];南京航空航天大学陈乾伟提出一种由塔型定子和导轨组成的塔形双模态直线超声电机,最大输出力为 1 N^[6];美国 New Scale Technologies 公司研制了系列微型直线超声电机,最大推力约为 5 N,并已在微流控系统、夜视系统等领域有实际应用^[7]。

上述直线电机在大推力/大推重比方面各有优势,其中螺杆式直线电机更在结构、体积、自锁等方面都有独到优势。但螺杆式电机轴向力普遍偏小,文献显示,目前该类电机的推力几乎都在 5 N 以下,绝大多数为 1~2 N。本文提出一种带有指数型变幅杆的压电贴片式直线电机方案,对其结构参数进行了优化设计,并通过专用驱动电路,实现了样机的运行控制,其轴向力最高可达 11 N,与现有文献资料中螺杆式电机相比,有明显提高。

2 运行机理与结构设计

2.1 工作原理简析

直线电机定子采用整体三段式结构,材料为航空硬铝 7075,如图 1 所示。定子中部为中空四棱柱体及两组压电陶瓷贴片(P81);一端为指数型变幅杆(末端有粗牙内螺纹),用以放大换能器端面振幅;另一端为外螺纹轴颈(用于固定整个电

机)。转子为 M10 精密螺杆,材料 S45C。电机通过变幅杆端部内螺纹与转子外螺纹啮合驱动。

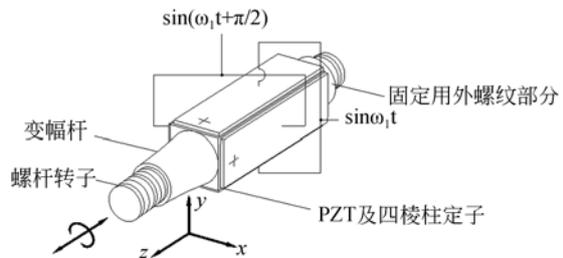


图 1 电机结构

Fig. 1 Structure of linear motor

与现有杆式电机一致,将电机单端固定后,视定子为悬臂梁,其一阶弯曲振型函数为^[8]:

$$W_{(z)} = D_1 \left[\cosh \left[1.875 \frac{z}{l} \right] - \cos \left[1.875 \frac{z}{l} \right] - 0.7341 \cdot \sinh \left[1.875 \frac{z}{l} \right] + 0.7341 \sin \left[1.875 \frac{z}{l} \right] \right] \quad (1)$$

通过施加给压电陶瓷正弦交流电压,使其产生伸缩振动,进而激发定子相应振动模态,使定子端面质点产生椭圆运动。

假设定子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,定子产生弯曲共振,如图 2 所示^[9-11]。设 P 点为定子端面上一点, P_0 为 P 点 t 时刻的轨迹点,作动器轴向设为 Z 轴,其在 X 方向的位移响应为 μ_x , $\mu_x = \mu_p \sin \omega_1 t$, μ_p 为 P 点横向位移的最大值。端面转动角位移响应 β , $\beta = \beta_p \sin \omega_1 t$, β_p 为转动角位移的最大值。Z 向位移响应为 μ_z , $\mu_z = -r \beta_p \cos \theta \cos \omega_1 t$, r 为定子等效半径。

同理,当相位 B 以电压 $\sin(\omega_1 t + \pi/2)$ 单独激振时,定子会产生相垂直的弯曲共振,如果相位 A、B 同时激振,两列弯曲振动驻波在空间具有 $\pi/2$ 的相位差,P 点在 Z 方向的叠加位移响应为 $\mu = -r \beta_p \cos(\omega_1 t - \theta)$ 。

可见激振产生行波,且切向位移与径向位移响应都服从行波方程。驱动端面任一质点 P 的轨迹为一个椭圆:

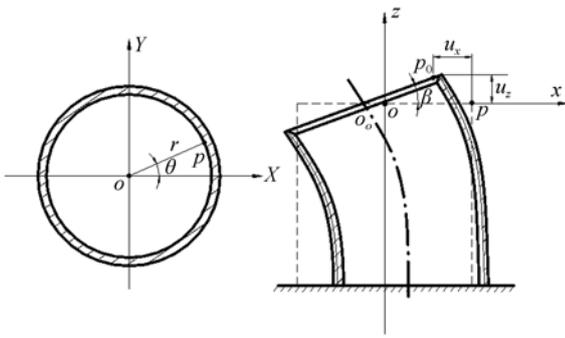


图 2 电机工作原理简图

Fig. 2 Working principle of motor

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

式中: R 为定子基体端面半径, W_{CD} 为质点 P 的横向位移函数, β_{CD} 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:

$$\tan \gamma = \frac{R\beta_{CD}}{W_{CD}}, \quad (3)$$

其中:

$$\begin{aligned} \beta_{CD} = & D_1 \frac{1.875}{l} \left[\sinh \left(1.875 \frac{z}{l} \right) + \right. \\ & \left. \sin \left(1.875 \frac{z}{l} \right) - 0.734 \right] + \\ & \left. \cosh \left(1.875 \frac{z}{l} \right) + 0.734 \cos \left(1.875 \frac{z}{l} \right) \right] \end{aligned} \quad (4)$$

由式(3)与式(4)可知, γ 与 l 无关, P 点轨迹平面与变幅杆端面平衡位置的夹角为常值。

2.2 变幅杆设计

为使定子将能量聚集在驱动端面, 在四棱柱定子端部增加变幅杆, 使振动能从变幅杆大端(输入端)传递到小端(输出端), 以放大质点振动位移幅值。传统变幅杆有圆锥型、悬链型、指数型、阶梯型等。圆锥型变幅杆的振幅放大倍数最小, 悬链型变幅杆加工难度较大, 阶梯型变幅杆的输入阻抗变化大, 且应力分布较集中, 工作安全稳定性差^[12-14], 因此采用指数型变幅杆。

增加变幅杆以后的定子结构如图 3 所示。为优化变幅杆结构参数, 不妨假设变幅杆为实心, 设其大端半径为 R_1 , 小端半径为 R_2 , 则面积分别为 $S_1 = \pi R_1^2$, $S_2 = \pi R_2^2$, 作用在变幅杆两侧的力和振动速度分别为 F_1 、 ξ_1 及 F_2 、 ξ_2 ^[15]。令 S 为变幅杆横截面的面积函数, $S = S_1 e^{-2\beta z}$, $\beta = \frac{1}{l} \ln$

$$\sqrt{\frac{A_1}{A_2}} = \frac{1}{l} \ln \frac{R_1}{R_2} = \frac{\ln N}{l}, \quad N \text{ 为面积系数, 且 } N = \frac{R_1}{R_2}.$$

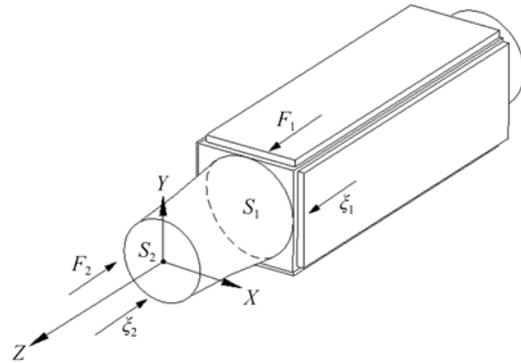


图 3 指数型变幅杆定子示意图

Fig. 3 Diagram of stator with exponential horn

变幅杆的应变分布为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \xi}{\partial z} = & \lambda e^{\beta z} (a_1 \cos K'z + a_2 \sin K'z) + e^{\beta z} \\ & (-a_1 K' \sin K'z + a_2 K' \cos K'z) \end{aligned} \quad (5)$$

其中: $K' = \sqrt{K^2/\beta^2}$ 。由定子边界条件得出频率为:

$$\sin K'l = 0. \quad (6)$$

在指数型变幅杆中纵波传播的速度为:

$$c' = \frac{c}{\sqrt{1 - \left(\frac{\beta c}{\omega}\right)^2}}, \quad (7)$$

式(7)中, 应满足:

$$\left(\frac{\beta c}{\omega}\right)^2 < 1 \text{ 或 } f > \frac{\beta c}{2\pi}. \quad (8)$$

声波才能在变幅杆中传播。

据此, 在合理范围内改变变幅杆的长度与大小端半径比, 借助有限元法分析作动器谐振频率和等效比例振幅的变化趋势, 就可以确定变幅杆的最优结构参数取值: 长度、大端半径和小端半径。

图 4 所示为变幅杆长度改变时, 定子谐振频率 f 与振幅 A 的变化情况。由图可知, 随着变幅杆长度 l 的增加, 谐振频率 f 逐渐减小, 并且趋势较明显; 而振幅 A 则随长度增加先变大后变小, 但变化幅度不大。综合考虑加工精度要求、与螺杆的尺寸配合和工作稳定性, 变幅杆长度取为 20 mm。

变幅杆大小端半径分别与四棱柱截面尺寸和

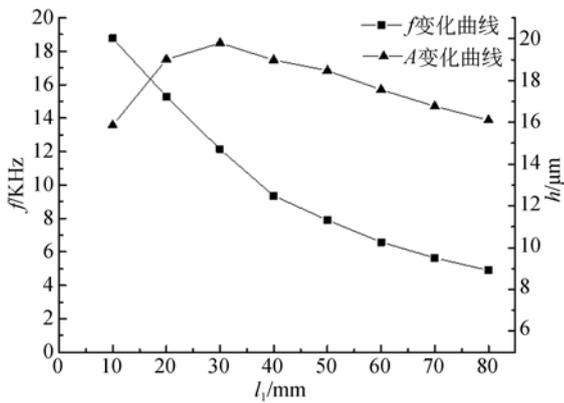


图 4 f 和 A 随变幅杆长度 l_1 变化规律
Fig. 4 Change rules about f & A versus l_1

螺杆直径相关。由于大端截面直径应小于 $\lambda/4$ ，以减小横向振动的影响，故取值 7.5 mm。转子采用 M10 螺杆，则小端半径 R_2 可在 6~7.25 mm 内取值。图 5 所示为当小端半径 R_2 变化时，定子谐振频率 f 和振幅 A 的有限元分析结果。

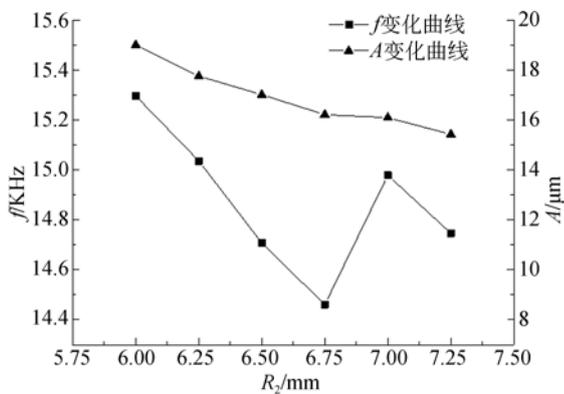


图 5 f 和 A 随小端半径 R_2 变化规律
Fig. 5 Change rules about f & A versus R_2

由图可知，小端半径 R_2 为 6 mm 时，变幅杆端部谐振振幅最大，最有利于定子能量的传输与聚集。

此时， $\beta = \frac{\ln N}{l} = 1.358 \times 10^{-3}$ ，由式(8)可知， $\frac{\beta c}{2\pi} = 1.103 \times 10^3 < f$ ，满足声能传递要求。纵波在变幅杆中声速为 $c=5\ 100$ m/s，理论计算可得放大系数为 1.33。

根据最终确定的结构参数，仿真分析提取定子 A 相与 B 相两个正交的一阶弯振模态，分别为

15.294 kHz 和 15.297 kHz，两相谐振频率一致性较好。

3 样机驱动与测试系统

加工制作了指数型变幅杆放大式直线压电电机实物，如图 6 所示。其中转子采用日本 MISUMI 公司 FAB M10×100 型精密螺杆，压电陶瓷为无锡惠丰电子公司生产的 P81 型长条片。

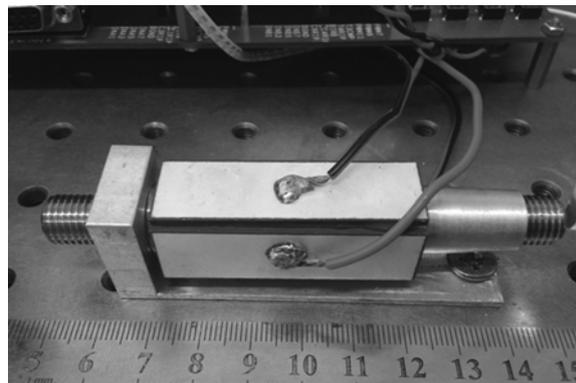


图 6 样机照片(已固定于隔振台上)
Fig. 6 Prototype of motor (fixed on isolation stage)

为便于测试样机性能，以及将来样机与电控单元的集成，设计制作了一套基于 FPGA(Field-Programmable Gate Array)的专用驱动单元^[15]，可输出正弦波或方波驱动信号，输出参数为：电压 0~200 V、频率 20~100 kHz、相位差 0~180°。

整体上，DSP 作为算法控制器将计算得到的控制波形数据传给 FPGA；然后 FPGA 作为驱动信号发生器产生相应的驱动信号；驱动信号再经过光耦隔离驱动，将控制信号施加到逆变驱动电路上，经过变压器变压后最终形成可调幅、调频、调相的压电作动器驱动信号，驱动直线电机运动。

平台核心为光耦隔离模块和逆变驱动模块。光耦隔离电路是 FPGA 和主电路的接口，采用 A4504 光耦芯片，该芯片通过外围电路的配合后可以通过 10 MHz 的驱动控制信号。逆变驱动模块为采用 MOSFET 功率开关管组成的半桥式逆变驱动电路，驱动信号经逆变升压后得到所需的电压和功率。图 7 所示为光耦隔离和逆变驱动电路原理图。

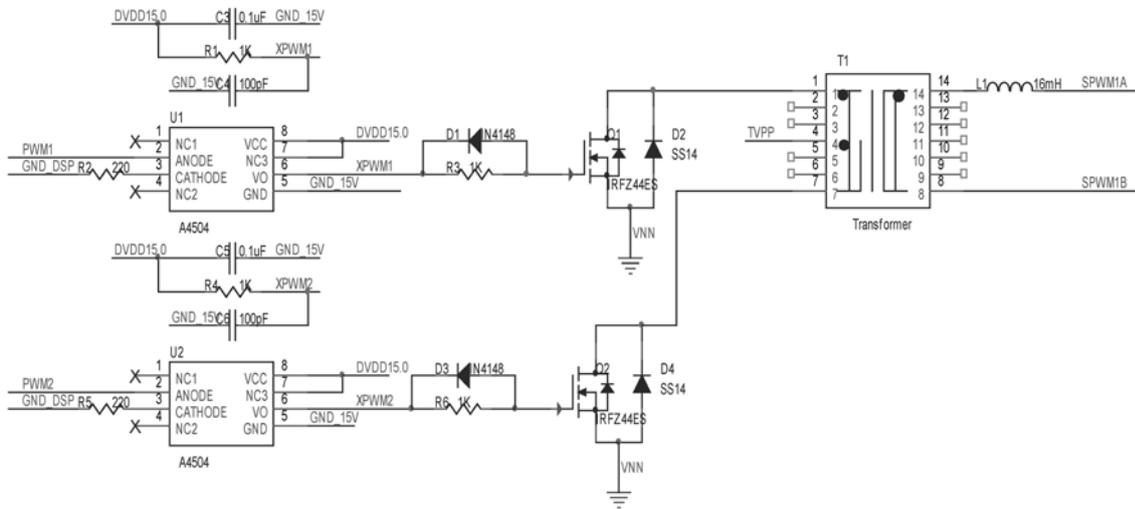


图 7 光耦隔离和逆变驱动电路图

Fig. 7 Circuit diagram of optoelectronic isolation and inverting driver

图 8 所示为电机性能测试系统照片,测量方式为以激光测微仪记录/折算电机空载或拖动不同质量砝码时的平均速度。主要由 PC 机、气浮隔振台、电机样机、Keyence LK-G5000 激光测微仪、专用驱动电路单元、线性直流电源、电机固定底座、砝码以及悬挂支架、滑轮等构成。

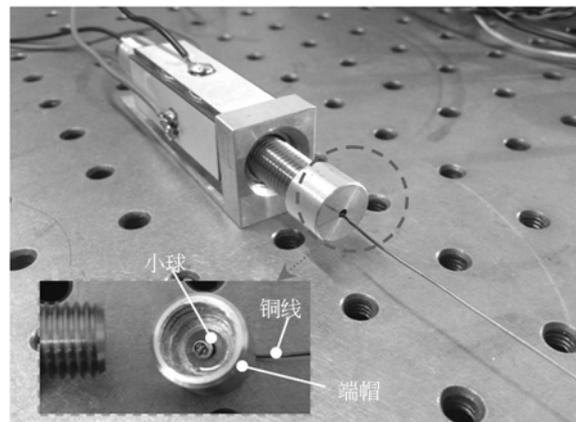


图 9 细铜线与螺杆连接方式

Fig. 9 Connection manner between copper thin wire and screw rod

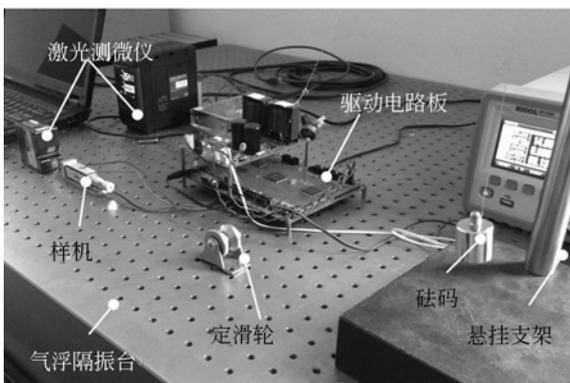


图 8 样机性能测试系统

Fig. 8 Experimental system of motor performance

在图 8 试验装置中,螺杆与砝码是以细铜线连接的,由于测试过程中螺杆必须连续旋转,为尽量减少连接铜线发生过度扭转而造成力矩损失,铜线通过小球和端帽与螺杆连接,结构如图 9 所示。

4 试验结果与分析

测试分为空载和带负载两种情况进行。空载时主要考察转子速度与驱动频率、相位差及电压的关系,以验证所设计的驱动电路是否有效;带负载测试用以初步确定电机的机械特性。首先测定样机空载条件下的运行情况。

速度-频率特性的试验结果如图 10 所示。由有限元分析,该结构样机在两正交方向上的一阶弯振频率分别为 15.294 kHz 和 15.297 kHz,因

此设定测量的频率为 14.8~16 kHz,驱动电压有效值取 150 V 和 200 V 两组作对比。由图 10 可知,不同电压下样机均在 15.6 kHz 时出现峰值,与有限元结果的误差约为 2%,表明分析结果可信。造成误差的原因应该是将定子材料假设为各向同性,以及有限元建模的简化。

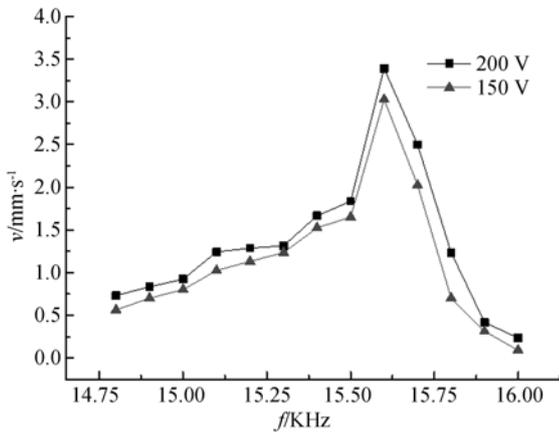


图 10 电机频率特性

Fig. 10 Frequency characteristics of motor

速度-相位差的测量结果如图 11 所示。激励频率范围设定为 ±180°,每 15° 测量一次。可观察到,随激励相差的变化,速度曲线近似为正弦曲线。最佳相位差出现在 ±85°附近,即当两信号之间相位差约为 90°左右时,作动器输出最大直线速度,且样机可实现正反转。

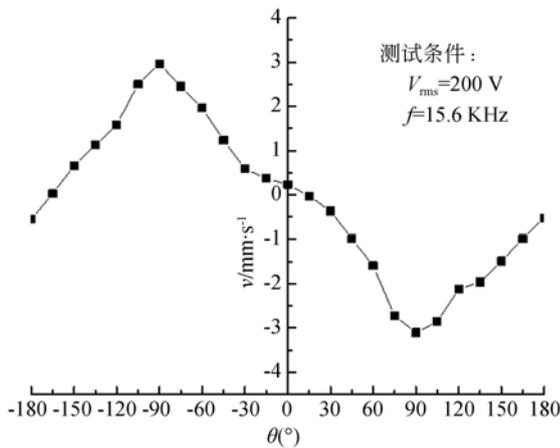


图 11 电机相位特性

Fig. 11 Phase characteristics of motor

速度-电压特性的测试结果如图 12 所示。显然,在 50~200 V 之间,电机速度随驱动电压同向变化,近似呈线性关系(电压低于 50 V 时电机运

行有明显断续现象,多次测量的结果差异较大,故图中未采用该电压区间数据)。测试过程中,电机输出速度从 0.4 mm/s 开始增加,最大约为 3.3 mm/s。试验分别测量了仿真谐振频率 15.3 kHz 和实际谐振频率 15.6 kHz 对应的情况,二者趋势一致。

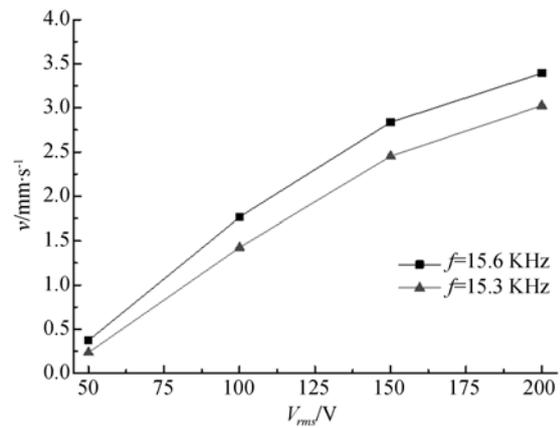


图 12 电机电压特性

Fig. 12 Voltage characteristics of motor

上述实验表明,专用驱动电路所输出的可调频、调相、调压的信号,能够驱动样机工作,运行基本稳定。

然后测量样机的带负载能力,实验条件及结果如图 13 所示。测量方式为通过支架上的两组滑轮起吊不同重量的砝码,利用激光测微仪记录不同静力负载下电机的位移,再折算为电机运行平均速度。实验测得堵转力约为 11 N,最大空载速度约为 3.3 mm/s,电机的机械特性近似为线性。

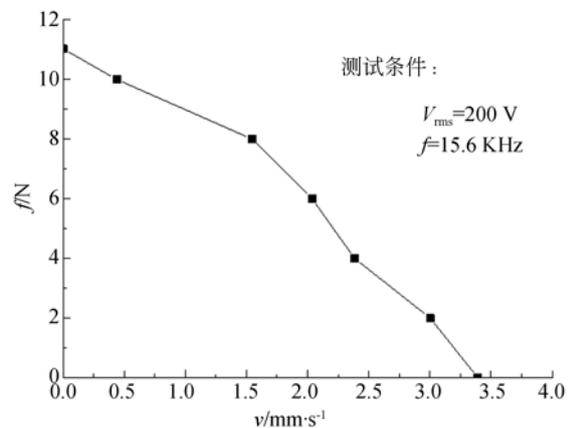


图 13 电机的机械特性曲线

Fig. 13 Mechanical characteristics of motor

5 结 论

为有效放大振动位移和提高电机输出推力,设计了一种采用指数型变幅杆的螺杆式直线电机,变幅杆的理论放大倍数为 1.33,并制作了样机。设计了基于 FPGA 的专用驱动单元,输出主要参数可调:电压 0~200 V,频率 20~100 KHz,相位差 0~180°,实验证明,可以有效地驱

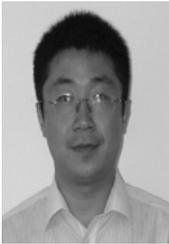
动样机运转。在电压有效值 200 V 和频率 15.6 kHz 条件下,电机最大空载速度约为 3.3 mm/s,最大输出堵转力约为 11 N。轴向力较现有文献资料中螺纹式电机增大至少 2 倍以上。测试结果表明,该电机结构简单,控制方便,机械特性较为理想。所设计的驱动控制电路有效,易于集成化。该结构电机及驱控单元有望用于微小加工、装配设备的直接驱动,有一定的实际应用前景。

参考文献:

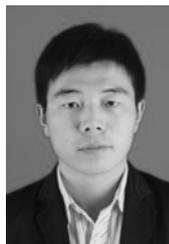
- [1] ZHAO C S. *Ultrasonic motors Technologies and Applications*[M]. Beijing: Science Press, 2011.
- [2] 朱华,曹如意,管磊. 应用于干涉显微镜的直线压电作动器[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(6): 1524-1530.
- ZHU H, CAO R Y, JIAN L. Linear piezoelectric actuator applied to interference microscope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(6): 1524-1530. (in Chinese)
- [3] NISHIMURA T, HOSAKA H, MORITA T. Resonant-type smooth impact drive mechanism (SIDM) actuator using a bolt-clamped Langevin transducer [J]. *Ultrasonics*, 2012, 52(1): 75-80.
- [4] 石胜军,陈维山,刘军考,等. 大推力推挽纵振弯纵复合直线超声电机[J]. *中国电机工程学报*, 2010, 30(9): 55-61.
- SHI SH J, CHEN W SH, LIU J K, et al.. A high power ultrasonic linear motor using push-pull longitudinal and bending multimode transducer [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2010, 30(9): 55-61. (in Chinese)
- [5] 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 CH D. A triangular prism shaped linear ultrasonic motor [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(36): 6493-6498. (in Chinese)
- [6] 陈乾伟,时运来,黄卫清. 新型塔形直线超声电机[J]. *中国电机工程学报*, 2010, 30(36): 27-32.
- CHEN Q W, SHI Y L, HUAGN W Q. A novel tower-shaped linear ultrasonic motor [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2010, 30(36): 27-32. (in Chinese)
- [7] QIN X, DAVID H, DANIELE P. Reduced-voltage, linear motor systems and methods thereof: US:008217553B2 [P]. 2012.
- [8] 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)
- [9] ZHANG J T, ZHU H, ZHAO C S. Contact analysis and modeling of a linear ultrasonic motor with a threaded output shaft [J]. *Journal of Electroceramics*, 2012, 29(4): 254-261.
- [10] 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)
- [11] 董迎晖,顾雅春,汤开元,等. 采用弯曲振动模式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 CH, 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)
- [12] 宋峥. 超声振动切削系统的建立及变幅杆性能的仿真研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2006.
- SONG ZH. *Building of ultrasonic vibration system and simulation study on performance of amplitude amplifier pole* [D]. Harbin Institute of Technology, 2006 (in Chinese)
- [13] 潘巧生,刘永斌,贺良国,等. 一种大振幅超声变幅杆设计[J]. *振动与冲击*, 2014, 33(9): 1-5.
- PAN Q SH, LIU Y B, HE L G, et al.. Design of

- an ultrasonic horn with high amplitude of longitudinal vibration [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2014, 33(9):1-5. (in Chinese)
- [14] 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)
- [15] 赵媛. 螺杆型直线压电作动器的驱动控制研究[D]. 太原:太原科技大学,2015.
ZHAO Y. *Actuation and Control for Screw Type Linear Piezoelectric Actuator* [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Science and Technology, 2015(in Chinese)

作者简介:



华顺明(1972—),男,吉林长春人,博士,教授,2000年、2005年于吉林大学分别获得硕士、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



李加林(1987—),男,山东泰安人,硕士研究生,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