

压电式旋转驱动器的设计与实验

田晓超^{1,2}, 杨志刚³, 王锐⁴, 杨树臣⁴, 李庆华¹, 于建群²

(1. 长春大学 机械与车辆工程学院, 吉林 长春 130022; 2. 吉林大学生物与农业工程学院, 吉林 长春 130025;

3. 吉林大学 机械科学与工程学院, 吉林 长春 130025; 4. 长春师范大学 工程学院, 吉林 长春 130032)

摘要:为了实现压电驱动器低频率、高效率的输出,设计了一种低频压电式旋转驱动器,这种旋转驱动器结构简单,由低频电源驱动。首先对旋转驱动器进行了结构设计与工作机理分析;然后建立了系统的动力学模型,得出系统输出位移和固有频率表达式;最后制作了实验样机进行实验测试,以微小物料为研究对象,测试驱动器的驱动能力。测试结果表明,当系统频率在 91.5 Hz 时,旋转驱动器性能最佳,输出振动位移大致为 45 μm ,物料移动最大速度为 0.15 cm/s。

关键词:压电驱动;旋转驱动器;动力学模型;共振;低频

中图分类号: TN384; TM31; TH237.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.11977/j.issn.1004-2474.2018.02.004

Design and Experiment on Piezoelectric Rotating Actuator

TIAN Xiaochao^{1,2}, YANG Zhigang³, WANG Rui⁴, YANG Shuchen⁴, LI Qinghua¹, YU Jianqun²

(1. Institute of Mechanical and Vehicle Engineering Changchun University, Changchun 130022, China; 2. College of Biology and Agricultural Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China; 3. College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China; 4. School of Mechanical Engineering, Changchun Normal University, Changchun 130032, China)

Abstract: In order to realize low frequency and high efficiency output of piezoelectric actuator, a low frequency piezoelectric rotating actuator is designed. The actuator is simple in structure and driven by low frequency power supplies. Firstly, the structure design and mechanism analysis of the rotating actuator are carried out. Then, the dynamic model of the system is established, and the output displacement and natural frequency expression of the system are obtained. Finally, an experimental prototype is fabricated and tested. The driving ability of the actuator is tested with tiny materials as the object of study. The test results show that when the system frequency is 91.5 Hz, the rotating actuator has the best performance, the output vibration displacement is about 45 μm , and the maximum speed of material movement is 0.15 cm/s.

Key words: piezoelectric drive; rotating actuator; dynamics model; resonance; low frequency

0 引言

压电驱动器是依靠定子与转子之间的摩擦力驱动转子运动的新型驱动器,与传统电磁驱动器相比,具有结构简单,响应快,控制精度高及不受电磁干扰等优点,在航空航天、微型机器人、电子器件等领域具有广阔的应用前景^[1]。

目前,压电驱动器研究最多的基本都是在超声范围内,超声波马达最受国内、外研究者的关注。1942年,Williamms 和 Brown 申请了压电马达专利开始,德国 Siemens 公司和 Matsushita 公司、美国 IBM 公司、日本的佳能公司等先后对压电超声马达进行了研制,并取得了很大进展^[2]。但是由于超声

波马达的振动频率一般大于 20 kHz,需要配备专用的高频电源进行驱动,而大多数情况下这种高频电源比超声波马达本体成本高,体积大。因此,超声波马达在应用中受到一定限制。

近年来,有很多国内、外学者开展了对低频压电驱动器的研究。国外学者研制出了振动行波马达和驻波马达,但其工作频率通常是几千赫兹^[3-6]。国内学者也对低频驱动器进行了相关研究^[7-15],在低频大功率输出的压电驱动器领域取得了很大进展。

本文提出了一种低频压电式旋转驱动器,用低频驱动电源进行驱动,系统构成简单,成本低,应是一种能在更大范围内应用的新型驱动器。

收稿日期:2017-06-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51705031,51607010);吉林省教育厅科学研究基金资助项目(JJKH20170489KJ)

作者简介:田晓超(1986-),男,黑龙江肇东人,讲师,博士,主要从事压电驱动与控制技术的研究。E-mail: tianxczb@163.com。通信作者:杨志刚(1956-),男,吉林长春人,教授,博士生导师,主要从事压电驱动与控制技术研究。E-mail: yzg@jlu.edu.cn。

1 结构设计与工作机理

本文设计的旋转驱动器结构(见图 1)主要由顶盘(定子)、驱动部件(压电双晶片振子)、底座、支撑弹簧片、减振橡胶、支架及部分螺栓、螺母等组成。压电振子采用侧立倾斜放置,3 组压电振子间隔 120° 均匀分布,压电振子连接在底座上,长度方向平行于水平面,宽度方向与水平面成 75° 夹角。支撑弹簧片一端连接压电振子,一端连接支架,支撑起顶盘(定子),主要作用是将压电振子的振动位移进行放大。采用 4 个橡胶底脚均匀分布在底座上。

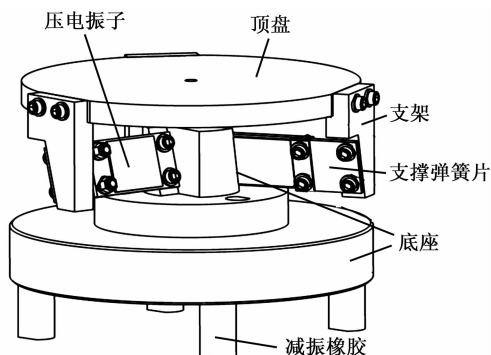


图 1 旋转驱动器结构示意图

旋转驱动器工作机理如图 2 所示。在前半个周期内,3 组压电振子在交变信号的作用下弯曲变形,通过支撑弹簧片带动顶盘顺时针旋转一个角度,同时,压电振子弯曲变形将使顶盘降低一个高度,会使与顶盘接触的转子在惯性作用下瞬间悬停在原来的位置与顶盘产生脱离。在后半个周期,3 组压电振子在电场作用下会朝相反的方向弯曲变形,并带动顶盘旋转一个角度,此时顶盘会突然上升,转子与顶盘接触。顶盘将对转子产生沿着圆周方向的摩擦力和垂直的支撑力,并将这两种力与本身重力进行合成,从而产生圆周方向的驱动力,当受到电源连续激励时,驱动器在每个周期内产生驱动力的迭加,从而驱动转子转动。

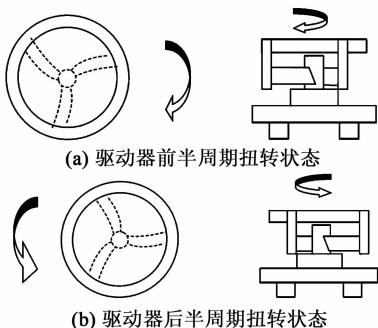


图 2 旋转驱动器工作机理

2 动力学分析

建立旋转驱动器动力学物理模型,如图 3 所示。图中, J_1 为驱动器的上端转动惯量,包括顶盘和 3 个连接支架以及连接装配用螺栓、螺母等顶盘绕中心轴的转动惯量; J_2 为驱动器下端转动惯量,包括底座和中间连接件的中心轴转动惯量; k_0 为支撑弹簧片的刚度; f_1 为转动体上端绝对阻力系数; f_2 为转动体下端绝对阻力系数; k_1 为压电振子的刚度; k_2 为减振橡胶的刚度; $M = M_0 \sin \omega t$ 为在双晶片上施加交变电压产生的交变弯矩; θ_1 为驱动器上端旋转角位移; θ_2 驱动器下端旋转角位移。

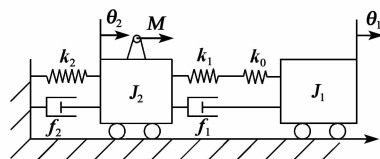


图 3 旋转驱动器物理模型

建立系统振动微分方程:

$$\begin{cases} -J_1 \ddot{\theta}_1 - f_1 \dot{\theta}_1 - f \dot{\theta} - k\theta = 0 \\ -J_2 \ddot{\theta}_2 - f_2 \dot{\theta}_2 + f \dot{\theta} + k\theta - k_2 \theta_2 + M_0 \sin \omega t = 0 \end{cases} \quad (1)$$

其中

$$k = \frac{k_0 k_1}{k_0 + k_1} \quad (2)$$

$$\theta = \theta_1 - \theta_2 \quad (3)$$

$$\dot{\theta} = \dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2 \quad (4)$$

$$\ddot{\theta} = \ddot{\theta}_1 - \ddot{\theta}_2 \quad (5)$$

将式(1)化简可得

$$\begin{cases} J_1 \ddot{\theta}_1 + f_1 \dot{\theta}_1 + f \dot{\theta} + k\theta = 0 \\ J_2 \ddot{\theta}_2 + f_2 \dot{\theta}_2 - f \dot{\theta} - k\theta + k_2 \theta_2 = M_0 \sin \omega t \end{cases} \quad (6)$$

驱动器在正常工作情况下,减振橡胶的弹性力矩 $-k_2 \theta_2$ 通常比惯性力矩 $-J_2 \ddot{\theta}_2$ 小,并且在简谐激励力矩作用下的线性振动系统中,弹性力矩可以表示为角加速度 $\ddot{\theta}$ 的函数,即

$$k_2 \theta_2 = -\frac{k_2}{\omega^2} \ddot{\theta}_2 \quad (7)$$

为了简化计算,将减振橡胶的弹性力矩归化到惯性力矩中,式(2)简化为以下形式:

$$\begin{cases} J_1 \ddot{\theta}_1 + f_1 \dot{\theta}_1 + f \dot{\theta} + k\theta = 0 \\ J'_2 \ddot{\theta}_2 + f_2 \dot{\theta}_2 - f \dot{\theta} - k\theta = M_0 \sin \omega t \end{cases} \quad (8)$$

式中 $J'_2 = J_2 - \frac{k_2}{\omega^2}$ 为下端转动体的转动惯量。

整理得以下振动方程:

$$J\ddot{\theta} + (f_j + f)\dot{\theta} + k\theta = M_j \sin \omega t \quad (9)$$

其中

$$f_j \approx \frac{J'_2 f_1}{J_1 + J'_2} \approx \frac{J_1 f_2}{J_1 + J'_2} \quad (10)$$

$$M_j = \frac{M_0 J_1}{J_1 + J'_2} \quad (11)$$

$$J = \frac{J_1 J'_2}{J_1 + J'_2} \quad (12)$$

式中: J 为诱导转动惯量; θ 为相对角位移; $\dot{\theta}$ 为相对角速度; $\ddot{\theta}$ 为相对角加速度; $k = \frac{k_0 k_1}{k_0 + k_1}$ 为诱导刚度。由式(9)可知,旋转驱动器的力学模型可近似看作单质体单自由度振动系统。

式(9)的特解为

$$\theta = \lambda \sin(\omega t - \alpha) \quad (13)$$

将式(13)代入式(9)可得固有频率为

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{J}} = \sqrt{\frac{k_0 k_1}{k_0 + k_1} \cdot \frac{J_1 + J'_2}{J_1 J'_2}} \quad (14)$$

由式(14)可得相对振幅为

$$\lambda = \frac{M_j}{\frac{k_0 k_1}{k_0 + k_1} \sqrt{(1 - z_0^2)^2 + 4b^2 z_0^2}} \quad (15)$$

相位差角为

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{f\omega}{\frac{k_0 k_1}{k_0 + k_1} - J\omega^2} = \tan^{-1} \frac{2bz_0}{1 - z_0^2} \quad (16)$$

式中: $z_0 = \omega/\omega_0$ 为频率比; $b = \frac{f}{2J\omega_0}$ 为相对阻尼比。

由式(8)、(9)可得

$$J_1 \ddot{\theta}_1 = -J'_2 \ddot{\theta}_2 \quad (17)$$

上端和下端的绝对角位移为

$$\begin{cases} \theta_1 = \lambda_1 \sin(\omega t - \alpha) \\ \theta_2 = \lambda_2 \sin(\omega t - \alpha) \end{cases} \quad (18)$$

将式(18)代入式(17),可得

$$J_1 \lambda_1 = -J'_2 \lambda_2 \quad (19)$$

即

$$\left| \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right| = \frac{J'_2}{J_1} \quad (20)$$

根据合比定理,可以求出质体 1、2 的绝对振幅 λ_1 和 λ_2 与相对振幅的关系:

$$\begin{cases} \lambda_1 = \frac{J'_2}{J_1 + J'_2} (\lambda_1 - \lambda_2) = \frac{J}{J_1} \lambda \\ \lambda_2 = \frac{-J_1}{J_1 + J'_2} (\lambda_1 - \lambda_2) = \frac{-J}{J'_2} \lambda \end{cases} \quad (21)$$

将相对振幅 λ 代入式(21),即得上、下端振幅计算表达式:

$$\begin{cases} \lambda_1 = \frac{J}{J_1} \frac{M_j \cos \alpha}{\frac{k_0 k_1}{k_0 + k_1} - J\omega^2} = \frac{J}{J_1} \frac{M_j \cos \alpha}{\frac{k_0 k_1}{k_0 + k_1} (1 - z_0^2)} \\ \lambda_2 = -\frac{J}{J'_2} \frac{M_j \cos \alpha}{\frac{k_0 k_1}{k_0 + k_1} - J\omega^2} = -\frac{J}{J'_2} \frac{M_j \cos \alpha}{\frac{k_0 k_1}{k_0 + k_1} (1 - z_0^2)} \end{cases} \quad (22)$$

由式(14)、(22)可知,系统固有频率随着 k_0 和 k_1 的增大而增大,系统振幅随着 k_0 和 k_1 的增大而减小。因此,在调节和选择结构参数时,可以调整 k_0 和 k_1 。

3 实验研究

3.1 样机制作与实验装置

实验样机实物图如图 4 所示。样机的结构主要为顶盘采用铝合金、支架采用 65 Mn 弹簧片,压电陶瓷采用 PZT4,金属基板采用弹簧钢,底座为铸铁,减振弹簧为橡胶,具体尺寸参数如表 1 所示。表中, a 为长度, b 为宽度, d 为直径, h 为厚度。

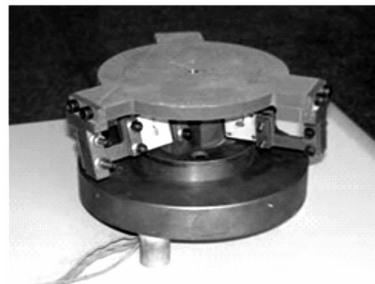


图 4 旋转驱动器样机

表 1 样机材料与尺寸参数表

名称	材料	尺寸参数/mm
金属基板	65 Mn	$a \times b \times h = 40 \times 24 \times 2$
压电陶瓷	PZT4	$a \times b \times h = 25 \times 22 \times 1$
底座	HT250	$d \times h = 150 \times 20$
主振弹簧	65 Mn	$a \times b \times h = 20 \times 12 \times 0.8$
顶盘	铝合金	$d \times h = 90 \times 10$
底脚	橡胶	$d \times h = 20 \times 8$

实验装置如图 5 所示。实验方法为:实验测试对象选用 M3 的金属小螺母,将金属小螺母放在料盘上,标记小螺母移动距离所用的时间。将此物料放置在料盘的圆周某个位置作为起始点。启动驱动器电源,同时启动时间继电器,当小螺母到达终点时,结束计时。此方法是通过小物料移动一定行程所经历的时间来测试驱动器驱动能力。然后取所需

时间的倒数。因为物料所走过的行程都是固定且相同的,用固定行程除以消耗时间来表征驱动器驱动物料移动的速度。



图5 实验装置

3.2 振幅的测试

旋转驱动器驱动时会产生上下位移,对系统性能有重要的影响。为了测量料盘边缘各个点振幅的差异性,选取料盘边缘均匀分布的3个点进行测试,选取点的位置如图6所示,测试结果如图7、8所示。

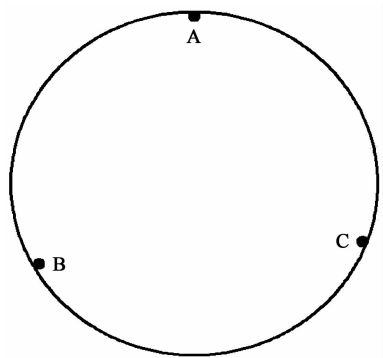


图6 选取点位置图

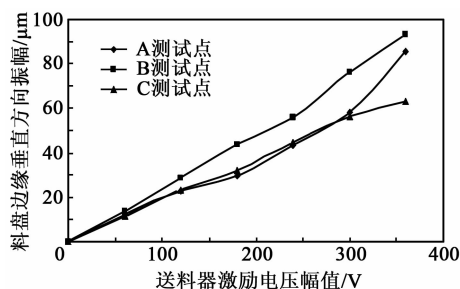


图7 振幅与电压关系曲线

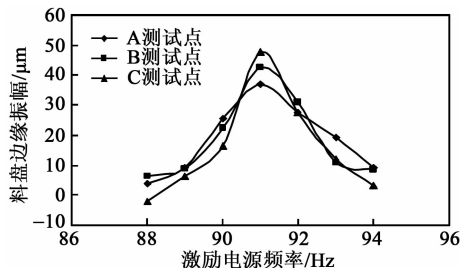


图8 振幅与驱动频率关系曲线

由图7可知,料盘边缘垂直方向的振幅与激励

电压呈现较好的线性关系。3个测试点振幅位移误差不是很大。

将驱动电压调制 200 V 保持不变,改变驱动频率进行测试。由图8可知,驱动频率为 91.5 Hz 时,驱动器振幅最大(达到 48 μm),说明系统共振频率为 91.5 Hz,远低于超声波马达所需驱动频率。

3个测试点产生误差的主要原因是受样机加工精度及装配精度的影响。但存在的误差不大,精度满足要求。

3.3 驱动速度测试

将驱动电压调制 200 V 保持不变,改变驱动频率,测得小螺母移动速度与驱动频率之间关系,测试曲线如图9所示。

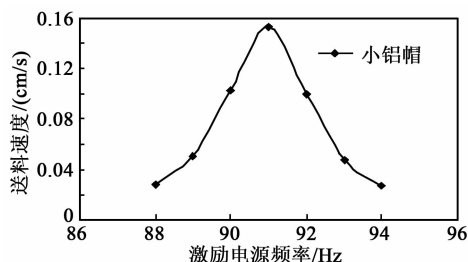


图9 驱动速度与驱动频率关系曲线

由图9可知,有效驱动物料的频宽为 88~94 Hz。在驱动频率为 91.5 Hz 时驱动速度达到最大值,该频率即为系统的共振频率。当驱动频率偏离系统共振频率时,小螺母移动速度逐渐降低,因此,在驱动器使用的过程中,最好是系统工作在共振状态下,这样才能使系统性能最优。

将系统调至共振状态下,即共振频率 91.5 Hz,改变驱动电压,电压从 0 开始,逐渐加大,每间隔 20 V 测定一次小螺母移动速度,直到电压加大到 360 V,得到曲线如图10所示。

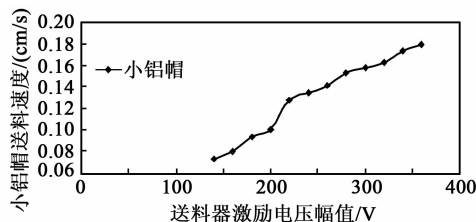


图10 激励电压与驱动速度关系曲线图

由图10可知,对小螺母速度的标定是从电压为 140 V 开始,电压大于 140 V 时,才具有稳定的驱动效果,而电压小于 140 V 时,无法形成有效驱动。

从图9、10可得出,旋转驱动器的性能可通过调整驱动电压和驱动频率来实现方便控制。结果证

明,设计的旋转驱动器机构是可行的,且能够实现有效的驱动。

4 结束语

本文设计了一种低频压电式旋转驱动器,对系统进行动力学分析可知,得出系统固有频率随压电振子的刚度 k_1 和主振弹簧的刚度 k_0 的增大而增大,系统振幅随 k_1 和 k_0 的增大而减小。制作的实验样机工作频率为 $88 \sim 94$ Hz,共振频率为 91.5 Hz,在共振状态下系统振幅最大,驱动速度最快,性能最佳。

参考文献:

- [1] 吴博达,鄂世举,杨志刚,等. 压电驱动与控制技术的发展与应用[J]. 机械工程学报,2003,39(10):79-85.
WU Boda, E Shiju, YANG Zhigang, et al. Development and application of piezoelectric actuation and control [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(10):79-85.
- [2] 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 Chunsheng, ZHU Hua. Development and application of ultrasonic motors technologies [J]. Machine Building & Automation, 2008, 37(3):1-9.
- [3] SUHEA, TOMIKAWA Y, KUROSAWA M, et al. Ultrasonic motor theory and application [M]. Oxford, England: Clarendon Press, 1993.
- [4] SUHEA. Present status of ultrasonic motors [C]//S. I. : Proc IEEE Ultrason Symp, 1989:749-753
- [5] MAENO T, TSUKIMOTO T, MIYAKE A. Finite element analysis of the rotor/stator contact in a ring type ultrasonic motor [J]. IEEE Trans Ultrason Ferroelect, 1992, 39(2):668-674.
- [6] 沈燕虎,苏江,杨志刚,等. 压电驱动式振动给料器的设计与试验[J]. 光学精密工程,2014,22(7):1828-1833.
SHEN Yanhu, SU Jiang, YANG Zhigang, et al. Design and experiment of piezoelectric-drive vibratory feeder [J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(7):1828-1833.
- [7] 郭抗,曾平,武迪,等. 平板形单振子多自由度压电马达[J]. 吉林大学学报(工学版),2011(增刊2):215-220.
GUO Kang, ZENG Ping, WU Di, et al. Multidegree-of-freedom piezoelectric motor using single plate type vibrator [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2011(suppl. 2):215-220.
- [8] 姜斌,刘晓论,杨志刚,等. 垂直驱动型超声波送料器的研究[J]. 光学精密工程,2008,16(6):1082-1086.
JIANG Bin, LIU Xiaolun, YANG Zhigang, et al. Study on vertical drive ultrasonic feeder [J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(6):1082-1086.
- [9] 张东华,陈在礼,刘军考. 新型大力矩压电马达的实验研究与分析 [J]. 组合机床与自动化加工技术,2005,25(9):40-42.
ZHANG Donghua, CHEN Zaili, LIU Junkao. Experimental research and analysis on a new high-torque piezoelectric motor [J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2005(9):40-42.
- [10] 张健滔,金家楣,赵淳生. 新型多自由度圆环形驻波超声电机[J]. 振动与冲击,2011,30(12):223-225.
ZHANG Jiantao, JIN Jiamei, ZHAO Chunsheng. Novel multi DOF ring shaped standing-wave type of ultrasonic motor [J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(12):223-225.
- [11] 鹿存跃,赵淳生. 一种采用离合器耦合驱动的压电电机设计[J]. 压电与声光,2005,27(1):24-26.
LU Cunyue, ZHAO Chunsheng. Design of a piezoelectric motor with clutch coupling mechanism [J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2005, 27(1):24-26.
- [12] OH C H, CHOI J H, NAM H J, et al. Ultracompact zero power magnetic latching piezoelectric inchworm motor with integrated position sensor [J]. Sensors and Actuators A Physical, 2010, 158(2):306-312.
- [13] ZHOU X Y, LIU J K, CHEN W S. Design and multi-point control of an bar-shaped multi-DOF ultrasonic actuator [C]//S. I. : 2014 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA), 2014:447-451.
- [14] LIU Y X, LIU J K, CHEN W S, et al. A U-shaped linear ultrasonic motor using longitudinal vibration transducers with double feet [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 2012, 59(5):981-989.
- [15] CI P H, CHEN Z J, LIU G X, et al. A square plate piezoelectric linear motor operating in two orthogonal and isomorphic face-diagonal-bending modes [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 2014, 61(1):159-165.