

低频压电马达的工作机理与动力学研究

王锐¹, 杨树臣¹, 焦晓阳², 李晓韬²

(1. 吉林工程技术师范学院 信息工程学院, 吉林 长春 130052; 2. 吉林大学 机械科学与工程学院, 吉林 长春 130021)

摘要:为了满足当前精密仪器对压电马达小尺寸, 大扭矩的要求, 设计了一种倾斜式压电低频马达, 这种马达不仅节约成本, 且能由低频电源驱动, 使用范围比高频压电马达广泛。该文研究了这种马达驱动能力形成的机理, 建立了驱动结构的动力学模型, 根据试验研究的需要制作了样机, 并对样机进行了实验测试, 完成了输入频率对输出转速和输出扭矩影响的实验研究。结果表明, 新型低频压电马达在输入频率为 290 Hz 时性能最优。

关键词:压电驱动; 低频马达; 椭圆振动; 动力学模型

中图分类号: TN384; TP394. 1; TH691. 9

文献标识码: A

Study on Kinetics and Mechanism of Low Frequency Piezoelectric-Motor

WANG Rui¹, YANG Shuchen¹, JIAO Xiaoyang², LI Xiaotao²

(1. College of Information Engineering, Jilin Teachers' Institute of Engineering Technology, Changchun 130052, China;

2. College of Mechanical Science and Technology, Jilin University, Changchun 130021, China)

Abstract: In order to meet the requirements of small size and high torque piezoelectric motor for precision instruments applications, a new type of low frequency piezoelectric-motor is designed in this paper. The proposed piezoelectric motor has the features of cost-effectiveness, low frequency power drive and wider application over high frequency piezoelectric-motor. The driven mechanism of the motor was studied and the dynamic model of the driving structure was established. A prototype was fabricated and tested. The effect of input frequency on output torque and speed were carried out. The tests showed that the new type of low frequency piezoelectric-motor has best operating performance at 290 Hz.

Key words: piezoelectric drive; low frequency-motor; ellipse vibration; dynamics model

0 引言

低频压电马达是相对于压电超声波马达提出的一种工作在较低频率的新型压电驱动马达, 其在驱动模式上与目前的接触型超声波马达相似, 都是利用马达的定子和转子间的摩擦力将压电振子的振动转化为驱动转子转动的驱动力, 但低频压电马达的驱动频率与接触型超声波压电马达相比明显降低, 解决了超声波压电马达必须配备高频驱动电源的问题。同时, 压电马达具有结构紧凑, 高精密传动和抗电磁干扰等优点, 因此, 近年来被广泛用于精密仪器仪表中。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研制出了压电马达。从上世纪 90 年代开始, 国内也开始了

压电马达的研究, 并取得了较大进展^[1-2]。在低频压电驱动技术研究领域, 近年来也有很多国外学者开展了以降低驱动频率为目标的压电振动马达的研究, 但其工作频率一般工作在几千赫兹之间^[3-5]。由于目前国内外研究的压电马达的振动频率一般都大于几千赫兹, 都需要配备高频电源来驱动, 使其成本较高, 体积较大, 使用也较复杂, 其实际应用受到限制。工作频率相对较低的准静态马达, 在输出力及效率方面较有优势^[6], 得到了较快发展。

本文提出一种低频驱动电源驱动的新型压电马达, 是利用 30~300 Hz 频域的振动代替超声波振动驱动, 与超声波压电马达相比, 其具有噪音小, 扭矩大, 能形成连续旋转运动, 可在常用电源(50 Hz)下工作等优点, 具有良好的实际应用前景。本文研究了这种低频压电马达的驱动能力和驱动机理, 建立

收稿日期: 2014-08-21

基金项目: 吉林省科技发展计划基金资助项目(201105063)

作者简介: 王锐(1976-), 女, 吉林德惠人, 副教授, 硕士, 主要从事检测技术与计算机仿真分析的研究。E-mail: wricat@126.com。

了驱动结构的动力学模型,制作了样机,并对其输入、输出性能进行了试验研究。

1 低频压电马达结构及其驱动机理

图1为低频压电马达结构示意图。由图可见,压电振子是低频压电马达的驱动源,其成 90° 沿底座圆周方向上均匀布置,上、下端面分别与定子和底座固定连接。由于压电材料的逆压电效应,当对压电振子施以适当的交流电压激励时,压电振子产生与电源频率相谐应的往复振动。压电振子与定子和底座的固定连接,迫使压电振子在产生弯曲振动的同时,产生了微小的扭转变形,从而实现压电振子的弯扭振动。

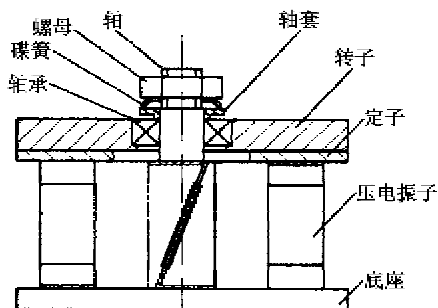


图1 低频压电马达结构示意图

压电振子的弯扭振动带动定子发生斜向往复直线运动。转子与底座通过轴承、弹簧、轴和螺母连接在一起,使转子旋转运动自由,而相对于底座的垂直位移受到限振子带动定子斜向上运动时,使得定子与转子间的压力 N ,摩擦力 I 超过了临界值 I_c 时,使转子受迫随之斜向上移动。通过调节螺母,给转子添加适当的预紧力 C 。当 C 逐渐增大,定子与转子间的 I 也逐渐增大,当摩擦电振子开始向下做弯扭运动时,压电振子带动定子向下扭转运动,但由于转子的惯性作用,转子会继续斜向上运动一定的位移量 δ ,从而使转子与定子分离, I 小于 I_c ,即不能带动转子随定子斜向下移动。这样,转子在压电振子弯扭振动的过程中(一般是一个振动周期)可形成一个微小的转动,如果压电振子连续振动下去,就可形成压电马达转子的连续转动。

2 动力学分析模型的建立

2.1 转子垂直方向受力的分析

当压电马达的定子与转子间存在接触力,即当底部的弹簧片支撑力与转子及中心轴的重力不相等时,定子与转子间就存在着压力,设定这个压力的大小为 C ,假设这个压力的方向为垂直向下。定子给

转子提供周期性的激励力 $F_{(t)}$ 在运动周期的前半周期,转子在定子的推动下一同运动;此时,该系统的振动模型如图2所示。碟簧作为转子的一部分,起到弹簧的作用,此时系统的阻尼一般都较小,可忽略不计。因此,该系统可看作是一个二阶线性无阻尼的弹簧质量系统。

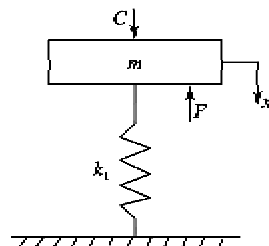


图2 低频压电马达的转子振动模型

该系统的微分方程可表示为

$$m\ddot{x} + k_x x + C = F_{(t)} = F_{(t)} \sin(\omega t) \quad (1)$$

式中 k_x 为底部弹簧片在 x 方向上的刚度。

强迫振动在单自由度的振动情况下,其微分方程的解由通解 x_1 和特解 x_2 两部分组成,即 $x = x_1 + x_2$ 。

x_1 一般在阻尼较小的情况下,即相对于自由振动的齐次方程解。因此, x_1 仅在系统运动的初始阶段才有实际意义。该系统的微分方程中,只有 x_2 ,即稳态解才具有实际意义。

由于 $F_{(t)}$ 为简谐振动,特设特解为

$$x_2 = x \sin(\omega t + \varphi) + C_1 \quad (2)$$

式中: x 为振幅; φ 为相位角; C_1 为常数。

将式(2)代入式(1)并进行求解整理得

$$x = \frac{F}{k_x [1 - (\omega/\omega_n)^2]} \quad (3)$$

$$C_1 = -C/k_x \quad (4)$$

$$\omega_n = \sqrt{k_x/m} \quad (5)$$

可得到特解为

$$x = x_2 = \frac{F}{k_x [1 - (\omega/\omega_n)^2]} \sin(\omega t) - \frac{C}{k_x} \quad (6)$$

由以上分析可得一般情况下,倾斜式的低频压电马达,其转子在简谐振动激励下的强迫振动属于简谐振动,其振动的频率与激励频率相同。如果转子连接的底部弹簧钢片刚度合适,等于定子的激励频率,即

$$\omega = \omega_n = \sqrt{k_x/m} \quad (7)$$

由式(1)~(7)可知,当压电振子激励频率与系统的谐振频率相同时,该系统才能正常工作,转子才

能正常的形成转动。

2.2 对转子的转动受力分析

压电振子在交流电的激励下被看作是作简谐振动,定子作简谐振动可用下式表示:

$$S = A \sin(\omega t) \quad (8)$$

式中: A 为振动振幅; ω 为振动频率; t 为振动时间。

当转子受到定子周期性的冲击力 $F = p \sin(\omega t)$ 及底部弹簧片的回复力作用时,微分方程为

$$m\ddot{y} + k_y y + f + mg - p \sin(\omega t) \sin \theta = 0 \quad (9)$$

式中: f 为底部弹簧片提供的拉力; k_y 为底部弹簧片在 y 方向上的刚度系数。

当式(9)中左边项小于 0 时,该系统中转子能被抛起;等于 0 时,转子将处在被抛起的临界状态;大于 0 时,转子不会被抛起。

当定子推动着转子运动的过程中,在 y 方向上的转子受力为

$$N = m\ddot{y} - k_y y + f + mg - p \sin(\omega t) \sin \theta \quad (10)$$

当转子在 x 方向的受力为

$$p \sin(\omega t) \cos \theta - \mu N > 0 \quad (11)$$

此时转子将正向转动。

3 试验分析

通过对制作的低频压电马达样机进行整机实验,分析低频压电马达的输入频率对输出转速和输出扭矩的影响及输入电压对输出转速和输出扭矩的影响。

3.1 频率与转速的关系

图 3 为低频压电马达在固定输入电压 180 V 时,输出转速随输入电压频率变化的关系曲线。调节输入电压频率,当频率达到 200 Hz 时,转子开始轻微转动,当频率增大到 250 Hz 时,转子转速达到 4.2 r/min 后每增加 10 Hz 测量一次转子转速,发现当输入电压频率达到 290 Hz 时,转速达到最大值 30.7 r/min,当测量频率超过 290 Hz 时,转子的转

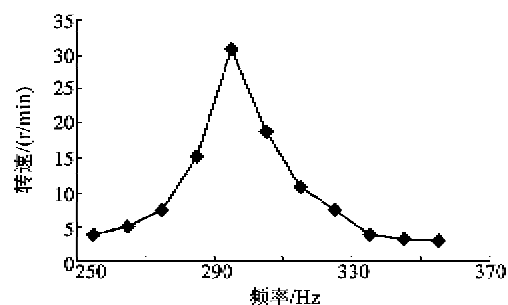


图3 低频压电马达转速随频率的变化关系

速快速下降。通过实验分析表明,低频压电马达的谐振频率为 290 Hz。

3.2 电压与转速的关系

图 4 为低频压电马达的输入电压频率固定在 290 Hz(谐振频率)时,输出转速随着输入电压的变化而变化的曲线图。当输入电压达到 60 V 时,转子开始慢慢转动。从 60~220 V 调节输入电压,每增加 10 V 测量一次转子输出转速,发现低频马达的输出转速随着输入电压的增大而增大。电压在 60~100 V 时,转子转速增幅较平缓;当电压增加到 100 V 以上时,转子运动速度将明显增大,在电压达到 220 V 工频电压时,转子的最高转速可达 41.6 r/min。

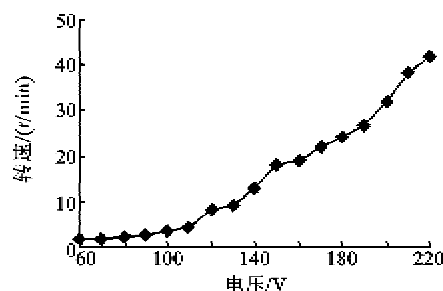


图4 低频压电马达转速随电压的变化关系

3.3 电压与输出扭矩的关系

图 5 为低频压电马达驱动电源的输入频率固定在 290 Hz(谐振频率)时,调节输入电压,测量得到的转子输出扭矩随输入电压的变化而变化的关系曲线。转子的输出扭矩随着输入电压的升高而增大。电压值小于 60 V 时产生的扭矩较小,电压值在 60~140 V 时,转子输出扭矩随输入电压的升高,增大速率较快;而当输入电压大于 140 V 后,输出扭矩增大的幅值较平缓。输入电压为 220 V 时,达到最大扭矩为 18.3 mN·m。

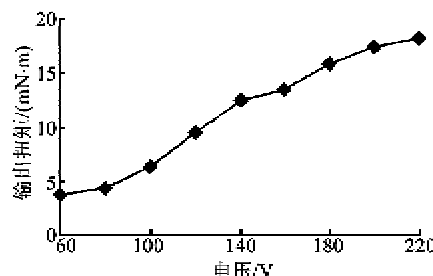


图5 低频压电马达输出扭矩随电压的变化关系

3.4 频率与输出扭矩关系

图 6 为低频压电马达输入电压固定在 180 V 时,转子的输出扭矩随输入频率变化而变化的关系曲线图。实验发现,当驱动电源的频率调节到

288.3 Hz时,转子达到最大输出扭矩 13.1 mN·m。由此可见,转子负载和空载时的谐振频率几乎一致。

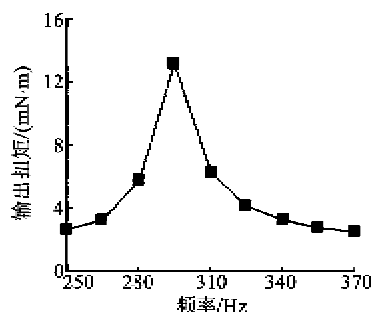


图6 低频压电马达输出扭矩随电压的变化关系

4 结论

通过以上实验研究与分析,得出以下结论:

1) 低频压电马达转子的振动形式在垂直方向上为简谐振动,振动的频率与施加到压电振子的激励频率相同。

2) 低频压电马达转子能否形成连续旋转受转子与定子间的预紧力 C 和压电振子驱动力的影响。 C 不能太大,压电振子的驱动力不能太小,否则定子都将不能带动转子进行连续的旋转。

3) 低频压电马达能在低频范围内使转子形成连续的转动,并且输出一定的扭矩。当其驱动电源的输入频率为谐振频率时能使转子获得最佳的输出转速和输出扭矩;当驱动电源的输入频率固定时,驱动电源的输入电压越大,低频压电马达的输出转速与输出扭矩也越大。

参考文献:

- [1] 鹿存跃,赵淳生.一种采用离合器耦合驱动的压电电机的设计[J].压电与声光,2005,27(1):24-26.

LIU Cunyue, ZHAO Chunsheng. Design of a piezoelectric motor with clutch coupling mechanism[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2005, 27(1): 24-26.

- [2] 刘景全,杨斌,周广华,等.非接触压电马达驱动机理分析[J].压电与声光,2005,27(5):562-565.

LIU Jingquan, YANG Bin, ZHOU Guanghua, et al. Driving mechanism analysis of non-contact ultrasonic motor[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2005, 27(5): 562-565.

- [3] 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(22):215-220.

GUO Kang, ZENG Ping, WU Di, et al. Multi-degree-of-freedom piezoelectric motor using single plate type vibrator[J]. Journal of Jilin University Engineering and Technology Edition, 2011(22): 215-220.

- [4] 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(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.

- [5] 张健滔,金家楣,赵淳生.新型多自由度圆环驻波超声电机[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.

- [6] OH C H, CHOI J H, NAM H J, et al. Ultra-compact zero-power magnetic latching piezoelectric inchworm motor with integrated position sensor[J]. Sensors and Actuators A-Physical, 2010, 158(2): 306-312.

(上接第422页)

参考文献:

- [1] 沈伟慈.高频电路[M].西安:西安电子科技大学出版社,2000.
- [2] LEESON D B. A simple model of feedback oscillator noise spectrum[J]. Proc IEEE, 1996, 54: 329-330.
- [3] 杨非,齐宁华,孙忠良.改进的相位噪声公式与低相位噪声振荡器设计[J].东南大学学报:自然科学版,2007,37(5):743-746.

YANG Fei, QI Ninghua, SUN Zhongliang. Modified Leeson formula and low phase noise oscillator design[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2007, 37(5): 743-746.

- [4] SAKAMOTO K, KUBO K, ONO K. Development of ultra low noise VHF OCXO with excellent temperature stability[J]. Proc IEEE, 2008: 565-568.

- [5] MCCLELLAND T, STONE C, BLOCH M. 100 MHz crystal oscillator with extremely low phase noise[J]. IEEE IFCS, 1999, 1: 331-334.