

文章编号 1004-924X(2004)03-0287-05

纳米精度压电马达的动力学模拟及试验

段智勇,王庆康,曾令刚,费继承

(上海交通大学 微米/纳米科学技术研究院,上海 200030)

摘要:设计并制作完成了一种基于压电陶瓷逆压电效应的纳米精度压电步进马达。根据其结构简化模型,推导出该压电纳米马达在脉冲电源作用下的运动特性表达式。编写软件,设定参数对压电马达的运动性能进行模拟,结果表明了马达的线性步进运动特点。设计光栅测试系统,对压电马达样机进行运动测试,试验结果证实了模拟结构的正确性。该类压电纳米马达具有可以实现连续步进位移,步进速度快,单步分辨率小,行程长和便于利用微机实现智能控制等特点。纳米马达的位移分辨率可以达到 10 nm,最快速度为 0.6 mm/s,最长行程为 5 cm。

关键词:纳米马达;压电陶瓷;执行器;光栅计量系统

中图分类号: TM38 **文献标识码:** A

Dynamic simulation and testing of a novel piezoelectric nanomotor

DUAN Zhi-yong, WANG Qing-kang, ZENG Ling-gang, FEI Ji-cheng

(*Institute of Micro/ Nano Science and Technology,
Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China*)

Abstract: A nanometer precision stepper piezoelectric motor has been designed and fabricated based on converse piezoelectric effect. From the simple model established from the motor's configuration, dynamic characteristic equations are deduced with pulses applied on the piezoelectric stack. The movement of the motor was simulated with some coefficients applied. The results of the simulation show that the motor is a linear stepper motor. A grating testing system was designed to test the piezoelectric motor. The experimental results prove that the simulations are true. This piezoelectric nanomotor can achieve serial step movement at higher speed with higher resolution in longer range, and it is easy to control by computer. The displacement resolution of the motor could be 10 nm at 0.6 mm/s in the range is 5 cm.

Key words: nanomotor; piezoelectric crystal; actuator; grating testing system

1 引言

纳米精度马达是纳米技术的动力部分,被人们称为纳米科技的“心脏”。目前国内外有很多科研

人员在进行纳米马达的研究,而压电陶瓷材料由于不易受环境条件影响,形变位移精度高,便于小型化,可以通过改变所施加电场特性而控制其运动性能等特点在纳米精度马达研究领域受到广泛利用。压电陶瓷马达一般分为 2 种:产生角位移

的旋转马达;产生线性步进位移的步进马达。实现连续步进位移的纳米位移是纳米加工、操纵、测量等领域的关键技术,在光通信、航海、航天、天文、光学等方面都有很重要的应用。目前国际上只有美国、日本和德国等国家能够制造高精度定位纳米马达^[1]。随着我国纳米科技的发展,纳米精度精密加工以及测量的设备和相关仪器已经成为该领域关键的研究工具。哈尔滨工业大学机器人研究所在压电陶瓷、柔性铰链微位移方面获得了很多成果^[2-5],清华大学新型陶瓷与精细工艺国家重点实验室利用电流变效应研制出了微尺螳型马达^[6],西安交通大学、上海交通大学、中科院上海硅酸盐所等在利用压电陶瓷驱动微位移方面也取得了不少成果。

本文利用压电陶瓷的逆压电效应,设计了一种纳米精度新型压电步进马达。对马达的运动原理进行了分析,模拟出它的动态性能,并通过试验对模拟结果进行了验证。采用压电陶瓷环与电极串连,并用金属固件将其紧密地固定在一起,采用弹簧跟进解决了压电陶瓷堆本身位移小而致使其驱动器行程短的问题。电源驱动是低频方波信号发生器,脉冲电压、脉冲频率连续可调,能够连续驱动压电陶瓷堆推动负载实现纳米级步距、厘米级行程位移。这种马达结构简单、行程大、分辨率较高、控制方便、对驱动脉冲没有特殊要求,克服了现有纳米精度压电陶瓷马达存在的结构及控制系统复杂、纳米定位行程小、载荷小、价格昂贵等缺点^[1,9]。

2 新型压电马达结构设计

图 1 为所设计纳米压电马达的结构图。压电陶瓷环和电极串连,由变幅杆驱动头和螺杆将其固定。后面连接导向螺杆,并通过轴承套筒固定到导轨上,螺杆上套有弹簧,作为驱动头的跟进部分,驱动头与负载滑块接触,但只有纵向驱动推力,无横向剪切力的作用,从而没有了负载滑块的切向振动位移,提高了定位位移精度。导轨与负载之间的接触面经过处理,一面是金属之间的接触,接触面经过仔细的研磨,并有弹性体夹在其间便于调节摩擦力的大小,接触面保持高度清洁,摩擦力大小的稳定程度直接影响到压电马达单步位移精度和行程,另一面贴有一层聚四氟乙烯板材

以减少摩擦力。这样,负载与导轨之间的摩擦力和弹簧推力保持恒定,使驱动器保持在一种临界静止状态。一旦驱动脉冲对压电晶体堆施加电场,其形变力即能够推动负载前移。压电晶体堆、变幅杆、导向杆、弹簧、螺杆等的重力作用体现在与固定轴承套筒之间的作用力,并转化为套筒与导向杆的摩擦力,一般较小,可以和负载与导轨之间的摩擦力作为整个驱动系统的阻力来考虑。电源插口上连接的是电压、频率都可以连续调节的低频方波信号发生器,由脉冲方波对压电晶体堆提供电场。

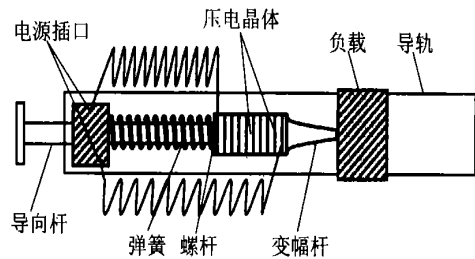


图 1 压电陶瓷马达结构

Fig. 1 Configuration of the piezoelectric motor

3 压电陶瓷马达动力学原理

如图 2,马达驱动头质量设为 m_d , $m_d = 2m_0 + m_1 + m_2$, m_2 是螺杆质量, m_1 是变幅杆质量, $2m_0$ 是压电陶瓷堆的质量,负载质量为 m 。初始状态下,驱动头 m_d 与负载 m 相互接触,摩擦阻力 f 大于弹簧工作力 F 。由压电振子模型根据压电方程^[7]、振动理论^[8]可以导出在 $F < f$ 时的频率因子 A_m :

$$\frac{1}{A_m^2} = \frac{2(m_0 + m_2)(m_0 + m_1 + m)(m_0 + m_1 + m_2 + m)}{(m_d + m)^2} \cdot \frac{E}{S_q} \cdot \frac{\delta_{33} l}{S_q} \quad (1)$$

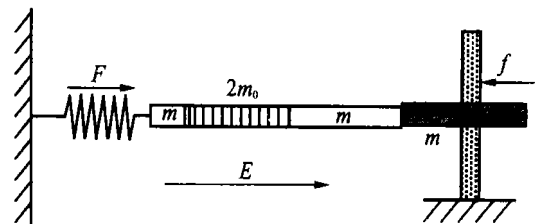


图 2 压电陶瓷马达动力学简化模型

Fig. 2 Simple model of the piezoelectric motor

振幅因子 B_m :

$$B_m = A_m^2 \left[d_{33} E_3 l - \frac{F s_{33}^E l}{S_q} \right], \quad (2)$$

其中: d_{33} 是压电常数; s_{33}^E 是弹性顺性常数; l 是压电堆长度; S_q 是压电堆横截面积。

对于其他各部分的运动特性,对应时间 t 设压电陶瓷堆质心的实际位移为 x_0 (以向左为正), 则负载 m 和变幅杆 m_1 的位移为 $x_3 - x_0$, 螺杆 m_2 的位移为 $x_3 + x_0$ 。同时认为除了压电陶瓷堆有形变,其他的部件都是刚性的。于是,利用牛顿运动定律可以解出在负载 m 和驱动头 m_d 的分离时刻 t_d 时的各部分的表达式:

$$\left. \begin{aligned} (x_3 - x_0) \Big|_{t=t_d} &= \frac{mF + m_d f}{A_m^2 (m + m_d)} - \frac{f - F}{m + m_d} \\ &\quad \left[t_d^2 - \frac{2B_m (m_0 + m_2)}{A_m^2 (f - F)} \right], \end{aligned} \right. \quad (3)$$

$$v_m = \left. \frac{d(x_3 - x_0)}{dt} \right|_{t=t_d} = \frac{2B_m (m_0 + m_2)}{A_m (m + m_d)},$$

$$\sin(A_m t_d) - \frac{f - F}{m + m_d} 2t_d, \quad (4)$$

$$v_d = \left. \frac{2m_0}{m_d} \frac{dx_0}{dt} \right|_{t=t_d} - \frac{m_1}{m_d} \left. \frac{d(x_3 - x_0)}{dt} \right|_{t=t_d} +$$

$$\left. \frac{m_2}{m_d} \frac{d(x_3 + x_0)}{dt} \right|_{t=t_d} =$$

$$-v_m + \frac{2B_m (m_0 + m_2)}{A_m m_d} \sin A_m t_d, \quad (5)$$

其中 v_m 为分离时负载 m 的速度; v_d 为分离时驱动头 m_d 的速度,而

$$t_d = \frac{1}{A_m} \arccos \left[- \frac{mF + m_d f}{2B_m m (m_0 + m_2)} \right], \quad (6)$$

一次碰撞完成之后,下次碰撞则存在两种情况:碰撞同时存在上一次压电晶体形变作用和上次形变作用全部结束。对于前者可以分解为:碰撞过程和形变过程 2 个部分。从而可以推导出:

$$\left. \begin{aligned} (x_3 - x_0) \Big|_{t=t_d} &= \frac{mF + m_d f}{A_m^2 (m + m_d)} - \\ &\quad \frac{f - F}{m + m_d} (t_{d1}^2 + bt_{d1} + p), \end{aligned} \right. \quad (7)$$

$$v_m = \frac{1}{A_m} \frac{2(m_0 + m_2)V}{m + m_d} (-C \sin(A_m t_{d1}) +$$

$$D \cos(A_m t_{d1})) - \frac{f - F}{m + m_d} (2t_{d1} + b), \quad (8)$$

$$v_d = -v_m + \frac{2(m_0 + m_2)}{m_d} \frac{E}{s_{33}^E} l (-A_m C \sin(A_m t_{d1}) +$$

$$A_m D \cos(A_m t_{d1})). \quad (9)$$

其中:

$$C = - \frac{d_{33} E_3}{2s_{33}^E} \cos A_{12} t_n + \frac{F}{S_q},$$

$$D = \frac{d_{33} E_3}{2s_{33}^E} A_{12} \sin A_{12} t_n.$$

v_m 为分离时负载 m 的速度; v_d 为分离时驱动头

m_d 的速度,以向左为正, $p = \frac{2m_0 CV}{A_2(f - F)}$

$$b = \left[\frac{2(m_0 + m_2)VD}{A_m} - m_d v_1 + 2m_0 s_{11}^E l A_m D \right] \frac{1}{f - F}$$

$$t_{d1} = \frac{1}{A_m} \left[\arcsin \frac{mF + m_d f}{2mV(m_0 + m_2)} \frac{1}{\sqrt{C^2 + D^2}} - \arctg \frac{C}{D} \right]$$

其中 t_{d1} 为负载 m 和驱动头 m_d 的分离时间,如果 $t_{d1} < 0$ 说明碰撞完就发生分离。

下一次碰撞过程中如果没有形变,可以设碰撞时驱动头 m_d 和负载 m 的速度分别为 v_d 和 v_m (方向向右),碰撞时的恢复系数为 e 。那么碰撞后的状态:

$$u_d = \frac{m_d v_d + m v_m}{m_d + m} - e \frac{m(v_d - v_m)}{m_d + m}, \quad (10)$$

$$u_m = \frac{m_d v_d + m v_m}{m_d + m} + e \frac{m_d(v_d - v_m)}{m_d + m}. \quad (11)$$

4 马达动态运动形式模拟

基于以上推导,编制软件对所研制纳米马达运动形态进行模拟,得到如图 3,图 4 的模拟结果。图 3 是将碰撞参数设为塑性时的结果,驱动头与负载之间的碰撞是塑性的。可以看出步进台阶有规律,一次驱动产生一个步进台阶,台阶的高度就是单步位移步距。图 4 是参数设定为弹性碰撞所获得的结果,一次驱动后驱动头多次与负载作用,产生大小不一的多个台阶,也就是驱动器单步步距不均匀,不是所期望的性能效果。作用周期增多后,这两种作用的线性度都较好,能够满足线性步进马达的要求。

实际上本文所设计的新型纳米精度压电马达运动时,由于有跟进弹簧的弹力作用,驱动头与负载滑块之间既不是完全塑性碰撞也不是完全弹性碰撞,而是一种近似条件下的塑性碰撞。运动次数较少时,步进位移特征比较明显,运动周期较多时,马达的运动曲线线性度良好。单步步进台阶

的最小幅度就是所研制纳米马达的位移分辨率。对压电晶体施加电场时晶体的形变量可以是很小的,与驱动压电振子位移的脉冲电压是线性关系。目前有报道的压电纳米马达单步位移精度已经可以达到 $0.25 \text{ nm}^{[9]}$ 。改进机械结构、特性,使负载滑块与导轨之间的摩擦力以及马达运动时的其他阻力比较恒定,可以使马达的单步位移精度有较大的提高。这也是压电纳米马达结构研究的重要方面。

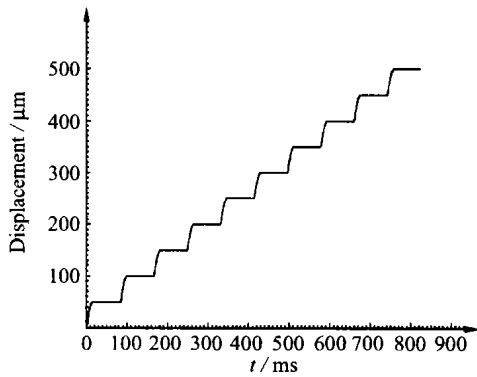


图 3 塑性碰撞时 10 个周期的模拟结果
Fig. 3 Results of 10 cycles in elastic collision

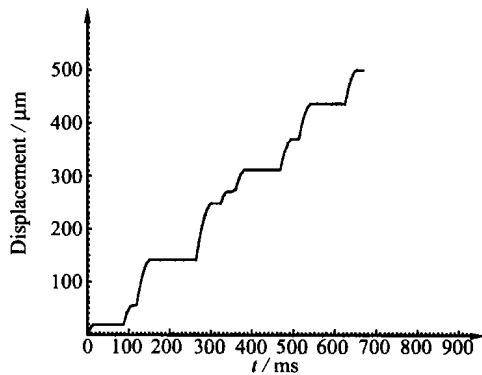


图 4 弹性碰撞时 10 个周期的模拟结果
Fig. 4 Results of 10 cycles in elastic collision

5 压电马达试验测试验证

利用光栅、步进驱动设备、计算机设计了一套光栅测试系统,测试精度达到 50 nm ,测试速度为单次 $6 \mu\text{s}$ 。对所研制的纳米精度压电马达进行测试,完成了大量的试验。

图 5 为 250 V 电压、周期为 100 ms 驱动脉冲电源时负载位移与时间的曲线。可以发现一个脉冲作用,马达就前进一步,一个台阶的持续时间刚

好是脉冲周期持续时间 100 ms ,而台阶的高度也就是马达前进单步步距与驱动电压有关。试验曲线与参数设为非弹性碰撞时的模拟结果一样,步进台阶均匀,线性度极好。证实了所设计压电马达驱动头与负载之间的作用是非弹性碰撞。改变电压,单步步距随着改变,电压越高步幅越大,当电压小于 50 V 时,形变力不能够推动负载产生位移。改变脉冲周期,单步步距持续时间发生变化,在周期小于 1 ms 以后,单步持续时间和步距高度都不再改变,保持在高度为 50 nm ,持续时间 1 ms ,这是因为随着周期的缩短,一次驱动还没有结束,下一次驱动已经开始对压电陶瓷堆产生作用,能量发生了叠加,驱动负载形成一种连续直线位移。所出现持续时间和步距高度不再改变的台阶是测试系统时间分辨率、空间位置分辨率影响的结果。

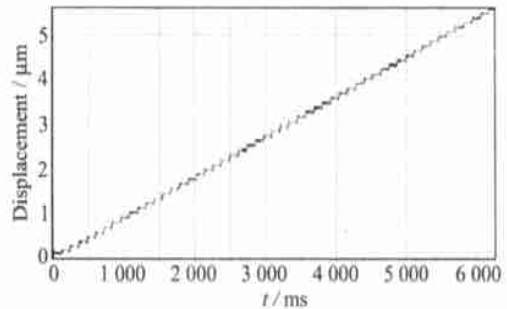


图 5 驱动电源电压为 250 V ,周期为 100 ms 时马达的位移-时间曲线

Fig. 5 Time-displacement curve of the piezoelectric motor as the voltage is 250 V and the cycle is 100 ms

图 6 是保持驱动脉冲周期为 10 ms ,当电压降

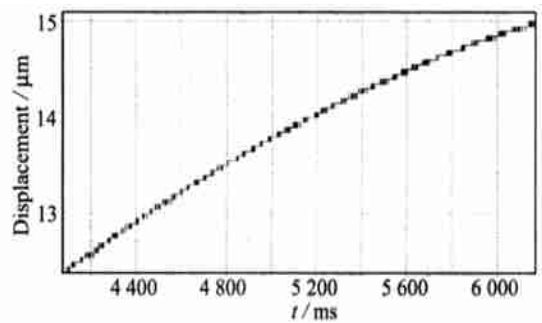


图 6 驱动电源电压为 60 V ,周期为 10 ms 时马达的位移-时间曲线

Fig. 6 Time-displacement curve of the piezoelectric motor as the voltage is 60 V and the cycle is 10 ms

到 60 V 时的曲线,可以发现负载每移动 1 μm ,产生了 20 个台阶,也就是单个台阶的高度已经是位移分辨率的极限 50 nm,但每一个台阶的持续时间不是脉冲周期的 10 ms,这就说明所能观察的单步步距是几个脉冲作用才使负载移动了 50 nm。从曲线后半段可以发现,这段时间内平均每一个台阶是 5 次脉冲驱动的位移结果,因此压电马达单步步距为 10 nm,是这种新型压电马达在所设计测试系统进行测试能够观察到的最小单步步距。

6 结 论

利用压电陶瓷的逆压电效应设计并制作完成

了一种新型压电陶瓷纳米马达,由其结构的简化动力学模型出发,对纳米马达在脉冲电源驱动下的运动特性从理论上进行了推导分析,并根据所推导出的表达式设定模拟参数,得出了产生位移运动过程中的位移-时间曲线。设计测试系统对制作成功的压电马达进行大量的测试,证实了理论推导以及模拟结果的正确性,测试出纳米马达的线性步进特征、脉冲电压和周期变化对马达运动的影响等。所设计的新型纳米马达具有可以实现连续步进位移、步进速度快、单步分辨率小、行程长和便于利用微机实现智能控制等特点。纳米马达的位移分辨率可以达到 10 nm,最快速度为 0.6 mm/s,最长行程可达到 5 cm。

参考文献:

- [1] 王庆康,万永中,戴永兵. 纳米马达及其应用[C]. 2002 年上海纳米科技发展研讨会论文集. 2002. 34-37.
WANG Q K, WAN Y ZH, DAI Y B. Nanomotor and its application[C]. *Proceeding of the 2002 'Nanotechnology Conference in Shanghai'*, 2002. 34-37.
- [2] 张涛,孙立宁,蔡鹤皋. 压电陶瓷基本特性研究[J]. 光学 精密工程, 1998, 6(5): 26-32.
ZHANG T, SUN L N, CAI H G. Study on the fundamental characteristics of piezoelectric element[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1998, 6(5): 26-32.
- [3] 孙立宁,荣伟彬,曲东升,等. 基于微操作的大行程高分辨率旋转微驱动器的研究[J]. 光学 精密工程, 2001, 9(6): 514-518.
SUN L N, RONG W B, QU D SH, *et al.* Research on a large travel and high resolution rotary micro-driver based on micro-manipulation[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2001, 9(6): 514-518.
- [4] 刘品宽,孙立宁,曲东升,等. 新型二维纳米级微动工作台的动力学分析[J]. 光学 精密工程, 2002, 10(2): 143-147.
LIU P K, SUN L N, QU D SH, *et al.* Dynamic analysis on a novel nanopositioning stage driven by PZT[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, 10(2): 143-147.
- [5] 赵宏伟,孙立宁,张涛,等. 压电陶瓷驱动器在机器人柔性臂应用中的研究[J]. 压电与声光, 2000, 22(3): 173-176.
ZHAO H W, SUN L N, ZHANG T, *et al.* The research of flexible manipulator driven by piezoelectric actuator[J]. *Piezoelectric and Acousto-optics*, 2000, 22(3): 173-176.
- [6] DONG S X, LIL T, GUI Z L, *et al.* A new type of linear piezoelectric stepper motor[J]. *IEEE Transaction on Components, Packaging, and Manufacturing Technology part A*, 1995, 18(2): 257-260.
- [7] SETTERINGION R E, 彭浩波, Van RANDERAAT J. 压电陶瓷[M]. 北京: 科学出版社, 1981.
SETTERINGION R E, PENG H B, Van RANDERAAT J. *Piezoceramics* [M]. Beijing: Science Press, 1981.
- [8] 李金镔,林家逖. 理论物理[M]. 天津: 天津大学出版社. 1992.
LI J E, LIN J T. *Theoretical physics* [M]. Tianjin: Tianjin University Publishing House, 1992.

作者简介:段智勇(1974-),男,四川人,上海交通大学微米/纳米科学技术研究院博士研究生,主要研究方向为压电陶瓷执行器、高精度定位控制系统、压电纳米马达。