

多足箝位式压电直线电机的研究

潘 雷 王 寅 黄卫清 张 胜

南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室,南京,210016

摘要:提出一种基于尺蠖式原理的多足箝位式压电直线电机。对电机的工作原理和机械结构进行介绍和分析,给出了该电机输出力的计算公式,并对电机进行了试验研究。该电机有效降低了该类驱动器的加工和装配的要求,增强了电机运行的稳定性。

关键词:压电直线电机;尺蠖式;叠层型压电陶瓷;箝位力

中图分类号: TM38

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2013.08.017

Study on Multi-foot Clamping Piezoelectric Linear Motor

Pan Lei Wang Yin Huang Weiqing Zhang Sheng

State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 210016

Abstract: A new multi-foot clamping piezoelectric linear motor was proposed. It was based on an inchworm-type piezoelectric linear motor. The operating principles of the motor were introduced, and mechanical structure of the motor was analyzed, the formula of output force was given. Experimental study of the motor has finished. This structure makes the motor run smoothly and reduces the requirements for machining precision and assembly.

Key words: piezoelectric linear motor; inchworm-type; piezoelectric stack; clamping force

0 引言

随着微纳米技术的迅猛发展,在光学工程、微电子制造、航空航天技术、超精密机械制造、微机器人操作、地震测量、生物医学及遗传工程等技术领域都迫切需要亚微米、微/纳米级超精密驱动机构^[1-4],传统的丝杠和电磁电机组成的机构已经不能满足这些领域的要求^[5-8]。

近年来,国际上开始了对压电精密驱动技术的研究,该精密驱动技术的压电材料在驱动时具有纳米级的定位精度,并且压电驱动器输出振幅和输入电压成正比,具有线性好、控制方便、分辨率高、响应快、不发热、无电磁干扰、无噪声等优点^[9],因此压电型精密驱动技术已成为国内外的重点研究方向^[10]。

目前,国内外对压电精密驱动器的研究已经取得了一定的进展,研发了各种各样的电机^[11]。其中,尺蠖式压电驱动器利用仿生的原理,采用“箝位—驱动—箝位”的运动形式,具有分辨率高、输出力大、输出刚度大、无电磁干扰等特点,已经得到了国内外的广泛研究。然而,在直线电机运行的过程中,动子和导轨之间的间隙需基本保持

不变,由于箝位单元的变形相对一般的机械加工公差值非常小,很难保持动子和导轨之间的间隙,因此加工和装配要求高。为了解决这一问题,本文对尺蠖式压电直线电机的运行原理进行了改进,在原有两个箝位单元的附近各增加了一个辅助箝位单元,并增加了移动导轨。

1 电机工作原理

本文提出的多足尺蠖式压电直线电机结构如图 1 所示,主要由箝位单元 1、箝位单元 2、驱动单元、箝位单元 3、箝位单元 4、随动弹簧、预压弹簧、固定导轨、移动导轨等组成。其中箝位单元和驱动单元都含有叠层型压电陶瓷(以下简称压电陶瓷)作为驱动元件。该电机的运动原理如图 2 所示。

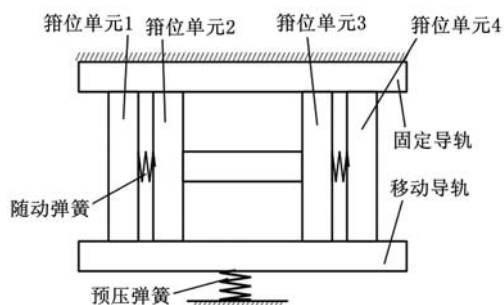


图 1 电机结构图

收稿日期:2011-11-08

基金项目:国家自然科学基金资助重点项目(50735002);长江学者和创新团队发展计划资助项目(IRT0968)

下面以直线动子在导轨内向右运动为例,介绍该驱动器的运动原理:初始时动子处于被移动导轨压紧状态,箝位单元 2 和箝位单元 4 伸长,推开移动导轨,同时箝位单元 1 和箝位单元 3 脱离接触导轨,如图 2a 所示;接着驱动单元推动箝位单元 3 向右移动一个微位移 dx ,随动弹簧被压缩,如图 2b 所示;

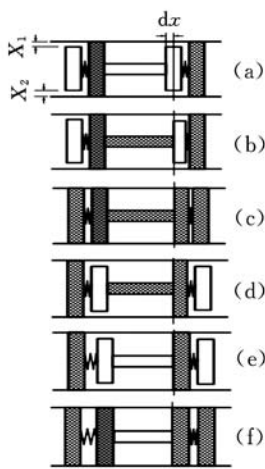


图 2 电机运动过程图

箝位单元 1 和箝位单元 3 伸长,如图 2c 所示;箝位单元 2 和箝位单元 4 回缩脱离导轨,箝位单元 4 在随动弹簧的作用下也向右移动,如图 2d 所示;驱动单元 3 回缩带动箝位单元 2 向右移动一个微位移 dx ,随动弹簧被拉长,如图 2e 所示;箝位单元 2 和箝位单元 4 伸长,如图 2f 所示;箝位单元 1 和箝位单元 3 回缩,箝位单元 1 在随动弹簧的作用下向右移动,如图 2a 所示……如此循环。这样每一个循环动子就向右移动一步(dx),往复循环动子就可以一步一步向右沿导轨行走。从电机的运行过程来看,始终有两个以上箝位单元接触导轨,在电机不通电时,四个箝位单元同时接触导轨,并都有一定的压力,所以电机具有自锁功能。由于预压弹簧可以调节预压力,而电机的输出力直接受到弹簧预压力和摩擦因数乘积的影响,所以电机的输出力可以调节。

由电机的运动原理可以看出,该电机的预压弹簧使移动导轨始终保持和动子接触,无需间隙配合,移动导轨可以实现平面内的微转动,也可以平行移动,自动调整导轨与左右侧箝位部分的接触状态。以此代替传统箝位式电机的间隙配合(传统箝位式电机配合精度要求较高,一般要达到几微米的间隙),无需保证导轨间距完全一致,导轨间距由箝位部分决定,这就大大降低了加工和装配的精度要求。

传统尺蠖式压电直线电机典型的结构是由箝位单元 2、驱动单元和箝位单元 3 组成动子。动子在导轨内行走,动子的箝位部分在导轨的任何位置都能实现间隙配合到过盈配合的转变,并且过盈量具有良好的一致性。箝位单元 2 和箝位单元 3 之间跨距相对较大,要保证在较大范围内导轨的间距一致,并具有较高的平行度,实际加工要

求是导轨任意位置间距误差小于一定值,对加工的要求还是非常高的。而本文提出的多足尺蠖式压电直线电机运行时,其箝位单元 2 的移动是靠箝位单元 1 伸长使两导轨间距增大,形成的箝位单元 2 与导轨之间的间隙。由于箝位单元 1 和箝位单元 2 之间距离较短,保证箝位单元 1 和箝位单元 2 之间距离较短,实际加工的要求是在这个较小的范围内导轨间距误差小于一定值,所以可以较大幅度地降低对电机加工精度的要求。

2 电机结构设计

2.1 电机输出力和电机参数之间的关系

电机输出力是电机性能的重要指标之一,从电机的原理介绍可以看出,电机的箝位单元和导轨之间的箝位力是输出力的关键因素^[12],由于动子上和导轨接触的驱动足并不是刚体,同时导轨也有一定的弹性,所以我们将驱动足和移动导轨之间的相互作用简化为两个弹簧之间的相互作用,如图 3a 所示。图 3b 显示了驱动足和移动导轨简化为刚度分别为 k_1 和 k_2 的两弹簧,在压电陶瓷作用下两弹簧产生的变形,此时的箝位力为 P 。

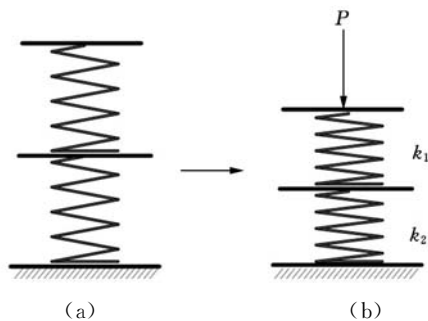


图 3 箝位单元和导轨简化成弹簧

箝位单元自由时,设箝位单元在压电陶瓷的作用下最大伸长为 L (图 4),当设导轨和驱动足在 0 位置相互接触时,接触力大小为 0,驱动足在压电陶瓷的作用下从位置 0 伸长到平衡位置,伸长量为 x ,即导轨在驱动足的作用下变形到平衡位置,变形量为 x ,也可以认为驱动足伸长 L 后在导轨的作用下移动距离 y 到平衡位置。由此可列方程为

$$\left. \begin{aligned} x + y &= L \\ k_1 y &= k_2 x \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\text{解得 } x = \frac{k_1}{k_1 + k_2} L \quad y = \frac{k_2}{k_1 + k_2} L$$

所以箝位力

$$P = k_2 x = \frac{k_2 k_1}{k_1 + k_2} L \quad (2)$$

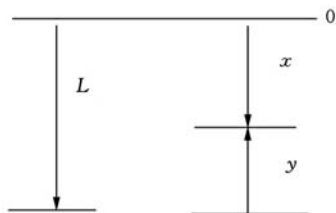


图 4 简化示意图

电机输出力 F 与箝位单元的压力和摩擦因数的乘积成正比^[13],同时电机输出力 F 小于驱动单元输出力(驱动单元输出力一般较大),电机的输出力 F 和驱动单元推动箝位单元克服的摩擦力及随动弹簧的阻力成反比。

设摩擦因数为 μ ,随动弹簧的刚度为 k_3 。取电机的运动时刻为箝位单元 2 和箝位单元 4 伸长,驱动单元推动箝位单元 3 向右运动的时刻。设箝位单元和导轨的摩擦力为 f ,驱动单元每次移动步长为 z 。得电机输出力

$$F = 2\mu P - zk_3 - f \quad (3)$$

把式(2)代入式(3)得

$$F = 2\mu \frac{k_2 k_1}{k_1 + k_2} L - k_3 z - f \quad (4)$$

由式(4)可以看出,增大摩擦因数有利于增加输出力, L 值的增大有利于增加电机输出力,如果通过增加对压电陶瓷变形的放大倍数来增大 L ,就需要增大放大臂抗弯系数,而且柔性铰链刚度也要加强,同时压电陶瓷刚度需较大,压电陶瓷的预紧力也要增大以削弱接触刚度对输出的影响。一般情况需选择输出变形较大,且刚度大的压电陶瓷。导轨刚度增加也有利于增大输出力,但是导轨刚度较大,就难以形成电机动子主动微调导轨间距运动模式,电机将行走困难,其次减小随动弹簧的刚度也有利于增加电机输出力,但辅助箝位单元的移动由随动弹簧的变形回复力驱动,如果随动弹簧刚度过低,辅助箝位单元将出现丢步的现象。

2.2 预紧机构的设计

压电陶瓷选用的是 PI 公司的 $5\text{mm} \times 5\text{mm} \times 2\text{mm}$ 规格的陶瓷,根据压电陶瓷的使用要求,需要施加一定的预紧力,预紧机构如图 5 所示。框架体使用柔性铰链结构,通过紧钉螺钉的旋紧使框架体的柔性铰链发生变形,柔性铰链的变形产生的回复力便形成了对压电陶瓷的预紧。调整块的作用是削弱放大臂旋转运动时产生的对压电陶瓷的弯曲载荷。

2.3 输出刚度的设计

电机箝位单元的输出刚度是电机性能的重要参数,箝位单元既要有效地放大压电陶瓷输出的

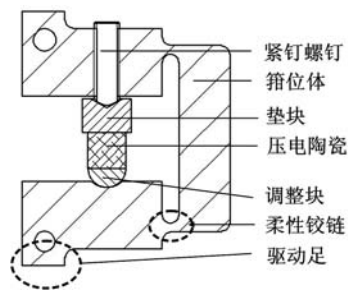


图 5 箝位部分

变形,又要有足够的刚度,所以放大臂的抗弯系数要尽可能地取较大值,同时柔性铰链要满足一些要求,只能让放大臂有转动自由度,不能有平移自由度。所以柔性铰链要尽可能短,以减小柔性铰链的剪切变形量。同时要提高接触表面的光洁度,增大预紧力以提高表面接触刚度。

2.4 随动弹簧的设计

随动弹簧是连接箝位单元的弹性元件,功能上既要实现不阻碍箝位单元之间的相对运动,也要实现对箝位单元的拖动,拖动的要求是电机每行走一步,随动弹簧就要带动箝位单元行走一步。同时这四个箝位单元实现电机行走的一个前提条件是箝位单元尺寸的一致,为了方便加工,简化结构,把电机动子做成一个整体,驱动足的接触面便可以一起加工,保证驱动足尺寸的一致性,图 6 中的环状半圆便是起到随动弹簧的作用。

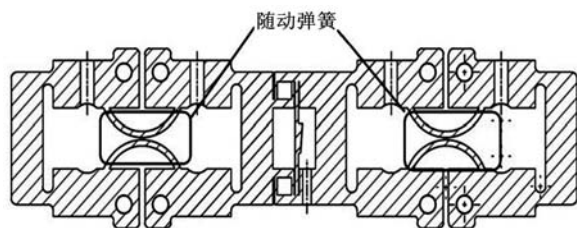


图 6 箝位体剖面图

3 电机所需要的驱动信号

根据电机的运动过程,推导电机五个部分的压电陶瓷所需要的电压信号如图 7 所示,可以看到上升沿和下降沿都有一个过渡,这是为了减小电机

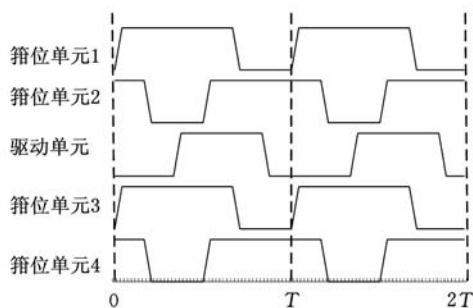


图 7 电压时序信号

在运行过程中的冲击。从图 7 可以看到,箱位单元 1 和箱位单元 3、箱位单元 2 和箱位单元 4 信号一致,所以信号产生电路只要产生三路信号即可。

4 电机试验研究

4.1 驱动足振幅的测试

电机驱动足的振幅大小及是否一致,将直接影响到电机是否能行走及其性能。本试验采用基恩士激光位移传感器测试驱动足的振动位移,用信号发生器产生方波信号(偏置信号),经容性功放放大至 100V,频率为 10Hz,动子的驱动足一端用螺钉固定,另一端自由,用激光位移传感器检测自由端驱动足的振动位移,采样周期为 200 μ m。激光位移传感器测得的数据见表 1。

表 1 激光位移传感器测得的数据

驱动足	振幅(μ m)
箱位单元 1	7.3
箱位单元 2	7.6
箱位单元 3	5.7
箱位单元 4	6.7
驱动单元	3.8

箱位单元均采用相同的结构,使用相同的压电陶瓷,根据测得数据可以看到驱动足振幅大小不完全一致,其原因可以分为以下几点:①压电陶瓷的输出不一致;②各个箱位单元的预紧力有差别,致使接触面的接触刚度不一致,所以接触面上变形不一致,对压电陶瓷输出位移的损耗也不一样;③测试点不一样,箱位机构对压电陶瓷的变形进行放大,不同的测试点对应的放大倍数不同;④测试的随机误差和系统误差。由于驱动单元并没有放大变形,和压电陶瓷的输出变形量相近,所以测试结果基本正常。

4.2 移动导轨振动的测试

电机的原理可行,驱动足的振幅基本达到要求,驱动足和导轨看似接触良好,但是电机不一定能动,原因在于箱位单元对尺寸一致性要求高,螺旋测微器等都不能很好地测量尺寸上的差别。所以设计了一个试验:在相同的条件下,测量每一个箱位单元振动时,传递到移动导轨上的振幅大小。通过试验反复地调节箱位单元的预紧螺钉,使得移动导轨上测得的振动幅值相差不大。测得箱位单元 1、2、3、4 引起刚度较低的移动导轨振动的幅值分别为 3.9 μ m、5 μ m、3.8 μ m、4.6 μ m。

4.3 电机性能测试

电机的样机如图 8 所示,测试点为驱动单元部分,测试方向与导轨平行,测量设备为基恩士 LK-G 系列 CCD 激光位移传感器,采样周期为 200 μ s,驱动器是自行设计的,由 PSoC 芯片生成信号,再经功放电路放大信号,功放电路中增加了

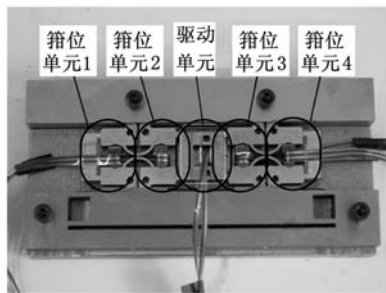


图 8 电机实物图

放电回路,具体试验平台如图 9 所示。测得的电机最大速度为 11.8 μ m/s,最大驱动力为 0.6N,保持力为 5.4N(电机在运行中与导轨摩擦力相对较大,所以输出力和保持力有一定差值)。当驱动器供给电机的信号为:峰峰值 96V,频率 20Hz,采集的数据如图 10 所示,从图 10 中的数据分析可得,电机平均步长为 0.4 μ m,速度为 8.4 μ m/s。电机所采集数据的理想波形为阶梯形,图中所示并不是阶梯形状,原因是电机的输出箱位力不足,电机出现滑动摩擦。



图 9 试验硬件平台

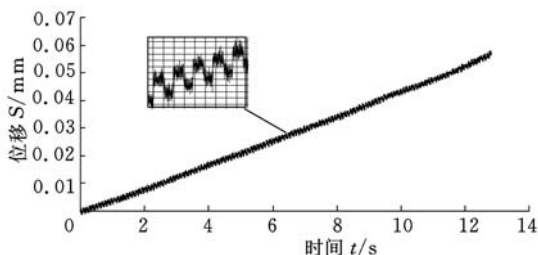


图 10 电机位移随时间关系图

4.4 电机速度和频率之间的关系

电机的运行速度主要取决于驱动频率和每一步步进的长度。图 11 所示为电机运行速度和频率之间的关系。从图中可以看出,在电机驱动单元的驱动电压峰峰值保持不变的情况下,随着电

机工作频率的增大,电机运行速度增大。试验中发现当频率大于 22Hz 时,平均步距变小,65.6Hz 时平均步距为 $0.2\mu\text{m}$ 左右,步距受噪声干扰较大,难以分辨出明显的步距,但从激光位移传感器测试的数据中可以看出电机累积的运动位移。随着频率的增大,运动行程会减少,到 113Hz 时,行走距离小于 1mm,其因为电机的结构响应频率不高。

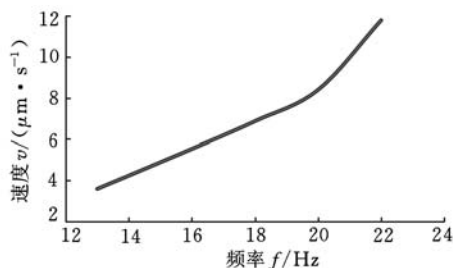


图 11 频率和速度关系

5 结语

设计并制作了一种基于尺蠖式原理的多足箱位式压电直线电机,分析了其运行机理,指出了其特点,并对电机的结构设计进行了介绍,给出了该电机的输出力和主要影响因素之间的关系等。该电机具有加工装配精度要求低、运行平稳、频率可调的优点,其最大保持力为 5.4N,测得的最大速度为 $11.8\mu\text{m}/\text{s}$ 。该电机可应用在需要精密驱动的场所,通过运动原理上的改进,可增强电机在非理想加工和装配条件下的运行性能。

参考文献:

- [1] 陈培洪,王寅,黄卫清.一种圆筒形压电直线电机的设计及实验研究[J].中国机械工程,2011,22(12):1484-1488.
Chen Peihong, Wang Yin, Huang Weiqing. Study on Design and Tests of a Piezoelectric Linear Motor Using Columnar Actuator[J]. China Mechanical Engineering, 2011, 22(12): 1484-1488.
- [2] Yeh R, Hollar S, Pister K S J. Single Mask, Large Force, and Large Displacement Electrostatic Linear Inchworm Motor[J]. Microelectromechanical Systems, 2002, 11(4): 330-336.
- [3] Ni Jun, Zhu Zhenqi. Design of a Linear Piezo-motor with Ultra-high Stiffness and Nanoprecision [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2000, 5(4): 441-443.
- [4] Frank J, Koopmann G H, Chen Weicheng, et al. Design and Performance of a High Force Piezoelectric Inchworm Motor[C]//Norman M. Conference on Smart Structures and Integrated Systems. Newport

Beach, CA, USA, 1999: 717-723.

- [5] Ro P I, Hubbel P I. Nonlinear Microdynamic Behavior of a Ballscrew Driven Precision Slide System [J]. Precision Engineering, 1992, 14(4): 229-236.
- [6] Steinmetz C R. Sub-micron Position Measurement and Control on Precision Machine Tools with Laser Interferometer [J]. Precision Engineering, 1990, 12(1): 12-24.
- [7] Takafuji K, Nakashima K. Stiffness of a Ball Screw with Consideration of Deformation of the Screw, Nut and Screw Thread (Preloaded Double Nut) [J]. JSME International Journal, 1990, 3: 620-626.
- [8] Otsuka J, Fukada S, Kawase Y. Ultraprecision Positioning by Leadscrew Drive (1st Report)——Fundamental Study Using a Sliding Screw or a Ball Screw [J]. Precision Engineering, 1992, 26(3): 231-236.
- [9] 黄卫清,孟益民.一种新型非共振压电直线电机的设计[J].中国机械工程,2009,20(14):1717-1721.
Huang Weiqing, Meng Yimin. Design of a New Type of Piezoelectric Linear Motor Based on Non-resonant Vibration[J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(14): 1717-1721.
- [10] 刘建芳,杨志刚,程光明,等.压电驱动精密直线步进电机研究[J].中国电机工程学报,2004(4):102-107.
Liu Jianfang, Yang Zhigang, Cheng Guangming, et al. A Study of Precision PZT Line Step Motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2004(4): 102-107.
- [11] 张兆成,胡泓.蠕虫式压电直线驱动器的发展及应用[J].微特电机,2009(3):56-59.
Zhang Zhaocheng, Hu Hong. Development and Application of Inchworm-type Piezoelectric Linear Actuator[J]. Small & Special Electrical Machines, 2009(3): 56-59.
- [12] Zhang Bi, Zhu Zhenqi. Development a Linear Piezomotor with Nanometer Resolution and High Stiffness[J]. IEEE/ASME Transaction on Mechatronics, 1997, 2(1): 22-29.
- [13] Moon C, Lee S, A New Fast Inch-worm Type Acuator with the Robust I/Q Heterodyne Interferometer Feedback [J]. Mechatronics, 2006, 16: 105-110.

(编辑 王艳丽)

作者简介:潘雷,男,1984年生。南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室硕士研究生。主要研究方向为尺蠖式压电直线电机。王寅,男,1986年生。南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室博士研究生。黄卫清,男,1965年生。南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室教授、博士研究生导师。张胜,男,1989年生。南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室硕士研究生。