

文章编号 1004-924X(2015)03-0738-07

箝位体刚度平衡对被动箝位压电驱动器性能的影响

郭文峰, 曲建俊*, 曲华杰, 汪骏雄

(哈尔滨工业大学 机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 基于前期研制的被动箝位直线压电驱动器, 研究了带有三角放大结构的箝位体的刚度平衡对其有效输出位移和驱动器性能的影响。实验和有限元仿真分析显示: 刚度不平衡时, 箝位体结构产生的偏转位移会导致三角放大结构水平输出位移降低, 箝位体对导轨放松程度较小, 驱动器性能较低。文中提出用增加刚度平衡板的方法使箝位压电叠堆两侧等效拉伸刚度相等, 并利用有限元仿真确定了刚度平衡板尺寸。实施上述方法后的实验结果表明: 增加刚度平衡板后, 箝位体水平运动位移增加, 从而提高了箝位体动态响应频率和箝位体对导轨的释放程度, 显著提高了驱动器性能。刚度平衡后, 驱动器动态响应频率为 450 Hz, 最大驱动力为 7 N, 最大空载运行速度为 1.49 mm/s。

关键词: 压电蠕虫驱动器; 刚度平衡; 箝拉体; 压电驱动; 三角放大

中图分类号: TN384; TH703 文献标识码: A doi: 10.3788/OPE.20152303.0738

Influences of balanced stiffness of clamping body on performance of inverse piezoelectric inchworm motor

GUO Wen-feng, QU Jian-jun, QU Hua-jie, WANG Jun-xiong

(School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

* Corresponding author, E-mail: qujianjun@hit.edu.cn

Abstract: Based on an inverse piezoelectric inchworm motor researched and manufactured before, the influence of balanced stiffness of a clamping body with triangulation amplification on its output displacement and the performance of motor was researched. The research results show that rotary displacement is resulted by non-balanced stiffness of the clamping body and the horizontal displacement is reduced also. Then because the rotary displacement and the performance of the inchworm motor are lower, the extent of releasing guide is reduced. For overcoming this problems, a method to balance the equivalent extent stiffness in two sides of a piezoelectric stack was proposed by adding a piece of metal board, and the dimension of the board was calculated by Finite Element Method (FEM). After adding a metal board, it demonstrates that the horizontal displacement and response frequency of the clamping body are increased and the guide is approximate to be fully released. The performance of the inchworm motor is advanced dramatically. After balancing the stiffness, the response frequency is 450 Hz, the highest driving force is 7 N and the highest velocity is 1.49 mm/s.

Key words: piezoelectric inchworm motor; stiffness balancing; clamping body; piezoelectric driving; triangulation amplification

收稿日期: 2014-06-29; 修订日期: 2014-08-26.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 50975057, No. 51175104)

1 引言

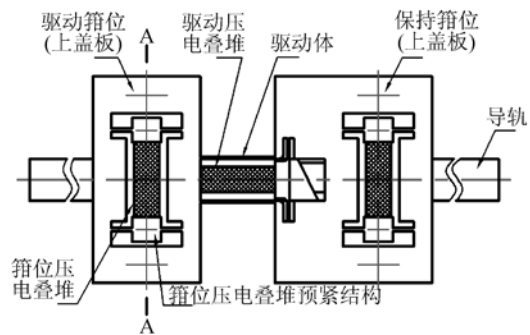
根据箝位体工作方式,蠕动式直线压电驱动器主要分为主动箝位压电驱动器和被动箝位压电驱动器^[1]。主动箝位直线压电驱动器通电时箝位体对导轨箝位,断电时对导轨放松^[2-6];被动箝位直线压电驱动器与之相反,断电时箝位体对导轨箝位锁紧,通电时对导轨放松,具有无源自锁的特点^[7-9],因此受到学者们的广泛关注。

被动箝位直线压电驱动器箝位力由箝位体与导轨间装配时施加的预紧力决定。理论上,预紧力越大,箝位体对导轨箝位力越大,驱动器驱动力越大。实际上,驱动力不仅取决于预紧力的大小,还受箝位体工作时对导轨的放松程度的制约。虽然箝位体与导轨间的预紧力较大,但箝位体在额定电压下不能对导轨完全放松或放松程度较小,各箝位体间的剩余箝位力相互干涉导致驱动器性能较低。目前,一些被动箝位直线压电驱动器为提高箝位体输出位移均增加了位移放大结构(如杠杆结构^[10]、椭圆结构^[11]和三角放大结构^[12-15]等)来提高箝位体对导轨的放松程度。这些具有位移放大结构的被动箝位驱动器多为内驱行走式结构,导轨位于驱动器外侧,箝位体为一体化加工的对称结构,可使箝位压电叠堆两侧满足刚度对称或平衡^[13-14],但这种结构在大行程时导轨占据的空间和质量较大,对加工精度和装配精度要求较高。相比之下,对于推动型被动箝位直线压电驱动器研究较少,这种结构导轨体积和质量较小^[12,15],但箝位体多为分体式结构,箝位压电叠堆两侧刚度不平衡,导致箝位体有效输出位移降低,对导轨放松程度较小,驱动器性能较低。

本文在研究组研制的一款箝位体具有三角放大结构的被动箝位直线压电驱动器基础上^[16],进一步研究箝位体结构中刚度平衡对驱动器性能的影响,探索了增加箝位体有效输出位移方法,提高了被动箝位驱动器对导轨的放松程度,改善了驱动器的性能。

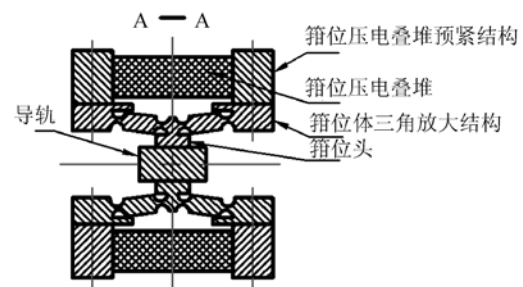
2 驱动器结构

前期研制的压电驱动器由4部分组成,分别为驱动箝位体、保持箝位体、驱动体和导轨,整体结构如图1(a)所示。驱动体为矩形截面薄板结构,压电叠堆通断电时,驱动体沿轴向伸缩变形。箝位体分为驱动箝位体和保持箝位体,两者结构相同,每组采用上下2个三角放大结构,其结构如图1(b)所示。装配时,箝位体对导轨预先施加预紧力。当压电叠堆通断电时,实现对导轨的放松和箝位。



(a)整体结构示意图(俯视)

(a) Vertical view of construction



(b)箝位体结构

(b) Construction of clamping body

图1 驱动器整体结构

Fig. 1 Whole structure of piezoelectric driver

3 箝位体偏转分析

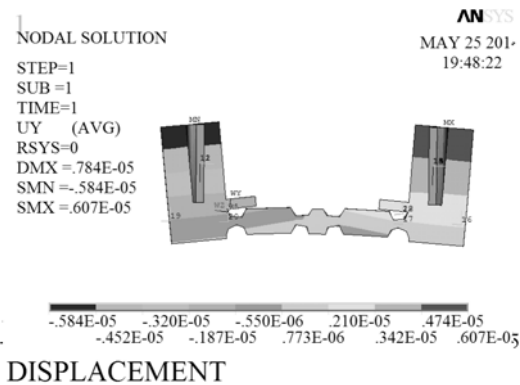
由图1(b)可见,由于箝位压电叠堆导轨一侧有三角放大结构,其两侧等效拉伸刚度不等,当箝位压电叠堆通电伸长时,驱动箝位体两端预紧结构产生偏转,水平位移减小。

3.1 实验条件

驱动器选用的压电叠堆为哈尔滨滨明天公司的 PSt 150/5×5/20,其结构尺寸为5 mm×5 mm×18 mm,额定电压为 150 V,标称位移为 20 μm,等效刚度为 60 N/μm。驱动器电源输出电压为 0~150 V 连续可调。箝位体输出位移的测量采用中原量仪公司 DGB-5B 型电感测微仪。其测量精度为 0.1 μm。

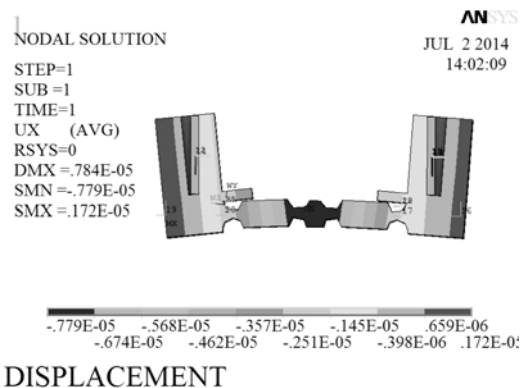
3.2 箝位体偏转仿真分析

根据图 1(b)箝位体结构,利用 ANSYS 有限元软件对箝位体结构进行建模和仿真,在箝位压电叠堆两端的预紧结构与压电叠堆接触面上施加相等的载荷,模拟压电叠堆对预紧结构的作用力,仿真结果如图 2 所示。在 400 N 载荷作用下,箝位体产生了偏转变形,其原因是箝位体压电叠堆两侧等效拉伸刚度不同。由图 2(b)可见,此时箝位头垂直位移为 7.8 μm。



(a)水平位移云图

(a)Cloud chart of horizontal shift



(b)垂直位移云图

(b)Cloud chart of vertical displacement

图 2 预紧结构偏转仿真结果

Fig. 2 FEM results of deflection in unequilibrium state

2.3 箝位体偏转实验

为验证仿真结果,测试了驱动器 4 个箝位体三角放大结构两端产生的偏转量。测试方法如图 3 所示。在额定箝位电压 150 V 作用下,分别测量三角放大结构两端的水平位移,每端分为上、下 2 个部分,实验结果如表 1 所示。

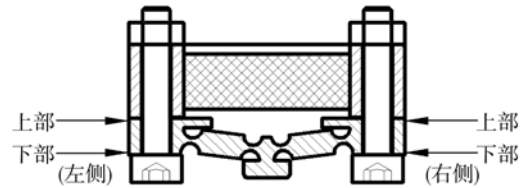


图 3 偏转实验测试方法

Fig. 3 Method of testing deflection

表 1 三角放大结构水平位移值

Tab.1 Horizontal displacement of triangulation amplification

箝位体	左侧位移/μm		右侧位移/μm		偏转率/%
	上部	下部	上部	下部	
1 号	3	1.4	1.2	-1.8	242
2 号	3.1	1.8	1	-1	135
3 号	4	2	1.6	-0.65	122
4 号	2.8	0	2.1	0.3	177

表 1 中数据符号定义方法如图 3 所示,当测量左侧时,三角放大结构向左运动为正,向右运动时为负;反之,当测量右侧时,三角放大结构向右运动时为正,向左运动时为负。

为定量表示箝位体偏转程度,定义了偏转率的概念,即三角放大结构左右两侧偏转量之和与左右两侧水平位移平均值之和的比值:

$$R = \frac{D_L + D_R}{S_L + S_R} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:R 为箝位体三角放大结构偏转率;D_L 为三角放大结构左侧偏转量;D_R 为右侧偏转量;S_L 为左侧水平位移平均值;S_R 为右侧水平位移平均值。

偏转量 D_L(或 D_R)分别为三角放大结构左侧(或右侧)上部和下部水平位移之差;位移平均值 S_L(或 S_R)为三角放大结构左侧(或右侧)上部和

下部水平位移的平均值。

由表 1 可见,各箝位体三角放大结构端部的偏转量为水平位移平均值的 1.2~2.4 倍,验证了箝位体结构在工作时产生了较大的偏转量。

4 箝位体刚度平衡

由于箝位压电叠堆预紧结构产生较大的偏转,导致水平位移减小,箝位头的垂直位移降低,箝位体对导轨的放松量较小,导致驱动器性能较低。因此,提出一种箝位体刚度平衡方案来提高箝位体水平运动位移。

4.1 刚度平衡方法

如图 4 所示,为减小箝位体的偏转,满足箝位体压电叠堆两侧拉伸刚度相等的要求,在箝位压电叠堆预紧结构的另一侧增加刚度平衡板,使压电叠堆两侧等效拉伸刚度相等。

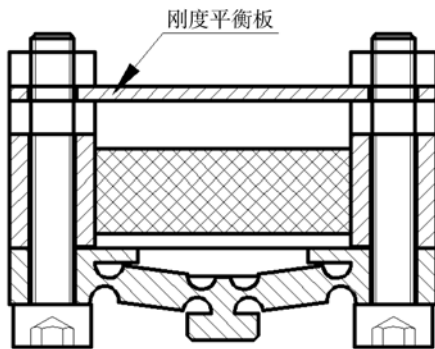


图 4 预紧结构刚度平衡方法

Fig. 4 Method of stiffness equilibrium

首先,利用 ANSYS 有限元软件仿真计算三角放大结构等效拉伸刚度,将三角放大结构一端固定,另一端加载不同值的水平载荷,载荷与位移的比值即为三角放大结构等效拉伸刚度,计算结果如表 2 和图 5 所示。

表 2 三角放大结构水平载荷与位移值

Tab. 2 Horizontal displacements under different loads

载荷/N	40	100	160	220
位移/ μm	3.6	9	14.4	19.8

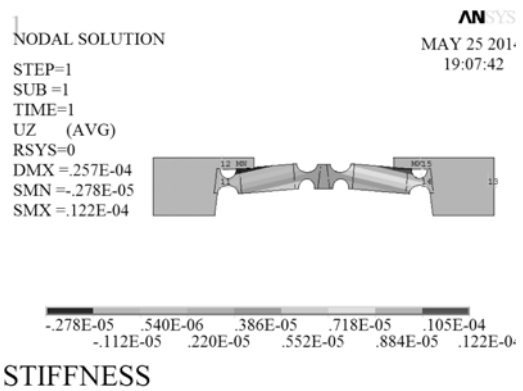
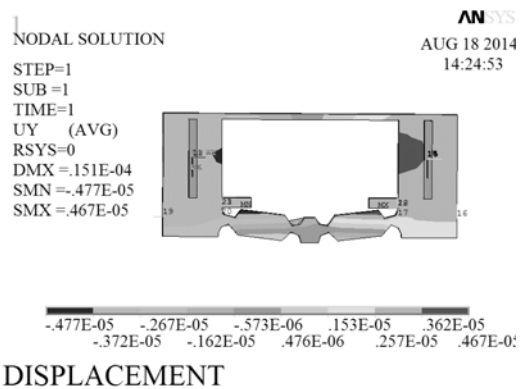


图 5 100 N 载荷作用下水平位移

Fig. 5 Horizontal displacement under 100 N

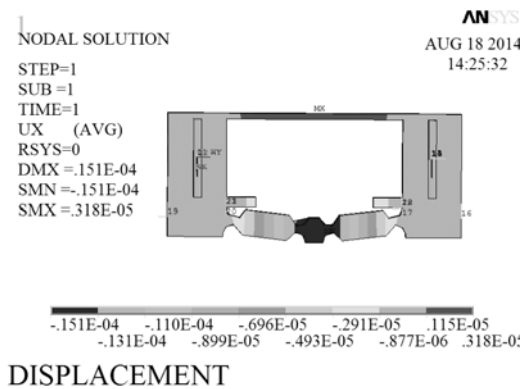
根据表 2 仿真数据计算得到三角放大结构等效拉伸刚度为 $11.1 \text{ N}/\mu\text{m}$ 。

刚度平衡板材料选取与三角放大结构相同的硬铝合金,弹性模量 $E=70 \text{ GPa}$;根据压电叠堆尺寸,选取刚度平衡板长度为 18 mm ,宽度为 8 mm ;为满足箝位体刚度平衡,刚度平衡板拉伸刚度与三角放大结构等效拉伸刚度应相等。利用 ANSYS 有限元软件对箝位体建模,经多次仿真计算,当刚度平衡板厚度为 0.6 mm 时,箝位体偏转量较小。仿真结果如图 6 所示。由图 6(b)可见,增加刚度平衡板后,在 400 N 载荷作用下,箝位头垂直位移为 $15.1 \mu\text{m}$,与图 2(b)结果相比,箝位头垂直位移增加了近 1 倍,表明箝位体刚度平衡可以减小箝位体端部偏转量,增加三角放大结构两端的水平位移,有助于提高箝位体对导轨的放松程度。



(a)水平位移云图

(a)Cloud chart of horizontal shift



(b)垂直位移云图

(b) Cloud chart of vertical displacement

图 6 0.6 mm 厚度的刚度平衡板仿真结果

Fig. 6 FEM result of stiffness equilibrium

4.2 刚度平衡后偏转实验

测试了箝位体刚度平衡后水平位移和偏转量的大小,实验结果如表 3 所示。

表 3 刚度平衡后箝位体水平位移

Tab. 3 Horizontal displacements of clampings after equilibrium

箝位体	左侧位移/ μm		右侧位移/ μm		偏转率/%
	上部	下部	上部	下部	
1号	3.5	5	5.5	5	21
2号	10	12	0.6	-1.1	34.4
3号	8	8	4	3.5	4.2
4号	10	12	-2.4	-3.5	38.5

由表 3 可见,与刚度平衡前相比,箝位体水平位移值得到显著提高,偏转率也显著降低,最高偏转率仅为 38.5%,验证了三角放大结构刚度平衡对提高箝位体输出位移具有重要的影响,对具有类似三角放大结构的微驱动装置提供了设计依据。

5 驱动器性能比较

5.1 驱动器预紧状态控制

为研究箝位体刚度平衡对驱动器性能的影响,假设平衡前后驱动器应具有相同的预紧(或箝位)状态,即箝位体对导轨的预紧力(或箝位力)相同。

由于直接测量箝位体与导轨间的箝位力比较

困难,如图 1(b)所示,故采用调整垫片的厚度来改变箝位体与导轨间的预紧力,通过测量箝位体对导轨的保持力,间接地实现刚度平衡前后驱动器具有相同的预紧状态。

5.2 箝位头垂直位移对比

测试了刚度平衡前后箝位体在自由状态下,4 个箝位头处的垂直位移随箝位电压的变化。由于加工导致的误差,4 个箝位体箝位头处的垂直位移略有不同,但相差较小,给出了 3 号箝位体刚度平衡前后的实验结果,如图 7 所示。

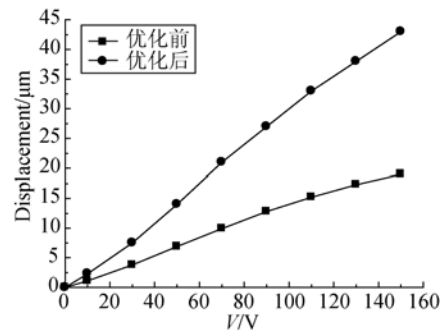


图 7 3 号箝位体刚度平衡前后箝位头垂直位移

Fig. 7 Vertical displacements of head of No. 3 clamping

由图 7 可见,刚度平衡前,箝位头处的最大位移为 19 μm ;改进后,箝位头位移为 43 μm 。实验证明,刚度平衡后,箝位体偏转量的减小使三角放大结构的水平位移增加,从而使箝位头垂直位移得到显著提高(约为优化前的 2 倍)。

5.3 箝位保持力对比

测试了箝位体刚度平衡前后驱动器箝位保持力随箝位电压的变化,在驱动箝位体和保持箝位体同时加载相同的箝位电压,并测量导轨所承受的箝位保持力,实验结果如图 8 所示。

由图 8 可见,箝位电压为 0 时,刚度平衡前,双箝位体对导轨的静态保持力为 17.4 N;刚度平衡后,驱动器进行了重新装配,其箝位体对导轨静态保持力为 20.8 N,两者比较接近,可以认为预紧状态相同。从图 8 中还可以看出,刚度平衡前,驱动箝位体和保持箝位体在额定电压 150 V 条件下,双箝位体对导轨的剩余箝位力为 11.2 N,箝位力的减小量为 6.2 N,证明箝位体对导轨放松程度较小。刚度平衡后,相同条件下,双箝位体对导轨箝位保持力为 1 N,导轨接近于完全放松状态。实验结果验证了箝位体刚度平衡使箝位头垂直位移增加,箝位体对导轨的放松程度提高。

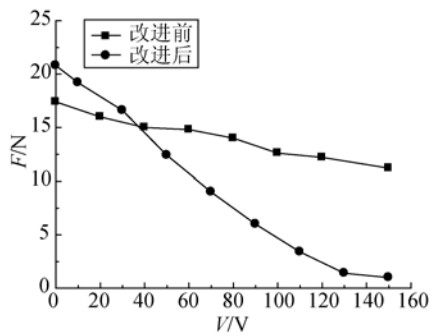


图8 刚度平衡前后不同箱位电压下导轨的箱位力

Fig. 8 Clamping forces before and after stiffness equilibriums

5.4 空载特性对比

测试了额定电压 150 V 条件下,相同预紧状态,刚度平衡前后驱动器的空载特性,实验结果如图 9 所示。

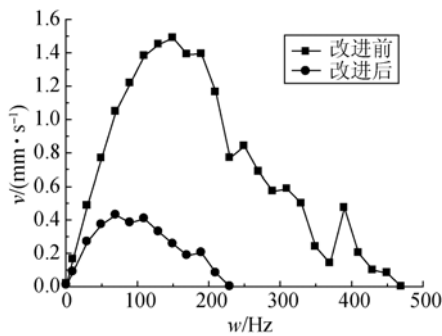


图9 刚度平衡前后驱动器空载特性对比

Fig. 9 No load characteristics before and after equilibriums

刚度平衡后驱动器最大运行速度和最高响应频率均得到显著提高。最大运行速度由 0.43 mm/s 提高到 1.49 mm/s,相应的驱动频率从 70 Hz 增加到 150 Hz;最大响应频率由 210 Hz 增加到 450 Hz,驱动器工作频带变宽,可控范围增大。驱动器动态响应频率提高的原因是增加了刚度平衡板后,箱位体等效拉伸刚度增加,导致动态响应频率提高。同时,箱位体在额定箱位电压的作用下导轨接近于完全放松的状态,驱动箱位体和保持箱位体之间的干涉较小,箱位体与导轨间相对滑动减小,驱动器运行速度增加。

5.5 负载特性对比

测试了刚度平衡前后相同预紧状态下驱动器的负载特性,结果如图 10 所示。由于驱动器负载特性受驱动频率的影响,给出了驱动电压为 150 V 条件下,驱动器刚度平衡前后负载特性较好的特性曲线。

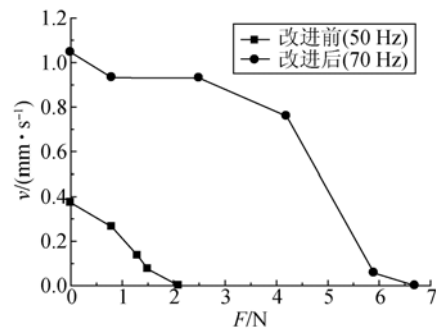


图10 刚度平衡前后驱动器负载特性对比

Fig. 10 Load characteristics before and after equilibriums

由图 10 可见,箱位体刚度平衡前,驱动器在驱动频率为 50 Hz 时负载特性较好,最大驱动力为 2.1 N,空载运行速度为 0.37 mm/s;箱位体刚度平衡后,驱动器在驱动频率为 70 Hz 时负载特性较好,最大驱动力为 6.9 N,空载运行速度为 1.05 mm/s,当频率较低时,最大驱动力可达 7 N。实验结果表明,箱位体刚度平衡提高了箱位体对导轨的放松程度,驱动箱位体和保持箱位体剩余箱位力相互干涉作用减小,箱位体与导轨间相对滑动量减小,驱动体的有效输出力增加,驱动力增大。对比分析表明,箱位体刚度平衡后驱动器负载特性得到显著提高,验证了箱位体刚度平衡对提高驱动器性能具有显著作用。

6 结论

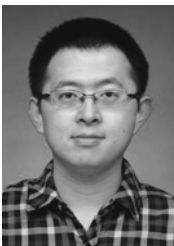
本文研究了带有三角放大结构的箱位体刚度平衡对有效输出位移和驱动性能的影响。当刚度不平衡时,箱位体结构产生偏转位移,导致箱位头垂直位移降低,驱动器性能下降,对导轨放松程度较小;增加刚度平衡板,驱动器性能改善,动态响应频率提高,工作频带变宽,最大动态响应频率为 450 Hz,最大运行速度为 1.49 mm/s,最大驱动力为 7 N。其原因是:刚度平衡板使箱位体整体拉伸刚度增加,压电叠堆两侧等效拉伸刚度接近相等,偏转量减小,箱位体水平位移和箱位头垂直位移提高。

本文研究内容具有通用性,可应用于其它带有三角放大结构的驱动器或微驱动平台,使其满足刚度平衡的条件,提高其有效输出位移。

参考文献:

- [1] 马立,周莎莎,王坤. 行走式尺蠖压电直线驱动器研究现状及关键技术综述 [J]. 微电机, 2012, 45 (7): 82-85.
MA L, ZHOU SH SH, WANG K. State-of-the-art and key technologies in piezoelectric linear actuator of walker inchworm [J]. *Micromotors*, 2012, 45 (7): 82-85. (in Chinese)
- [2] 张兆成,胡泓. 蠕动式压电直线驱动器的发展及应用 [J]. 微特电机, 2009, 3: 56-59.
ZHANG ZH CH, HU H. Development and application of inchworm-type piezoelectric linear actuator [J]. *Small & Special Electrical Machines*, 2009, 3: 56-59. (in Chinese)
- [3] 刘建芳. 压电步进精密驱动器理论及实验研究 [D]. 长春: 吉林大学机械学院, 2005.
LIU J F. *Theoretical and Experimental Study on Piezoelectric Precision Step Actuator* [D]. Changchun: College of Mechanical Science & Engineering, Jilin University, 2005. (in Chinese)
- [4] LI J, ZHU ZH Q. Design of a linear piezomotor with ultra-high stiffness and nanoprecision [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2000, 4(5): 441-443.
- [5] BI ZH, ZHEN Q ZH. Developing a linear piezomotor with nanometer resolution and high stiffness [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 1997, 2(1): 22-29.
- [6] JEREMY F, GARY H K, WEICHING CH, *et al.*. Design and performance of a high force piezoelectric inchworm motor [J]. *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 1999, 3668(II): 717-723.
- [7] 张鹏. 内箱位步进式压电驱动机构研究 [D]. 长春: 吉林大学机械学院, 2005.
ZHANG P. *Research on Theory and Experiment of Method of Stepping Driving by Piezoelectric Strangulated inside* [D]. Changchun: College of Mechanical Science & Engineering, Jilin University, 2005. (in Chinese)
- [8] 潘雷. 多足箱位式压电直线电机的研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学机械设计及理论学科硕士论文, 2012.
PAN L. *Study on Multi-foot Clamping Piezoelectric Linear Motor* [D]. Nanjing: College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012. (in Chinese)
- [9] TIMOTHY P G, JEREMY E F, JULIEN B, *et al.*. Design, modeling, and performance of a high force piezoelectric inchworm motor [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 1998: 756-767.
- [10] CHANWOO M, SUNGHO L, CHUNG J K. A new fast inchworm type actuator with the robust I/Q heterodyne interferometer feedback [J]. *Mechatronics*, 2006, 16(2): 105-110.
- [11] JAEHWAN K, JIN H L. Self-moving cell linear motor using piezoelectric stack actuators [J]. *Smart Materials and Structures*, 2005, 14: 934-940.
- [12] JIAN L, RAMIN S, JAVAD D, *et al.*. Design and development of a new piezoelectric linear Inchworm actuator [J]. *Mechatronics*, 2005: 651-680.
- [13] SULEMAN A, BURNS S, WAECHTER D. Design and modeling of an electrostrictive inchworm actuator [J]. *Mechatronics*, 2004, 14(5): 567-586.
- [14] ZHANG SH, HUANG W Q, WANG Y. Research on the S-Type Linear Piezoelectric Motor [C]. *Piezoelectricity, Acoustic Waves and Device Applications*, 2012: 167-170.
- [15] 黄辉. 圆柱形被动箱位式压电蠕动直线电机研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
HUANG H. *Research of the Passive Clamp Type Cylindrical Inchworm-Type Piezo Electric Linear Motor* [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013. (in Chinese)
- [16] 曲建俊, 郭文峰, 王佳男. 被动箱位式压电驱动器: 中国, CN 102664554 A [P]. 2012-09-12.
QU J J, GUO W F, WANG J N. Inverse inchworm motor: China, CN 102664554 A [P]. 2012-09-12. (in Chinese)

作者简介:



郭文峰(1983—),男,黑龙江哈尔滨人,博士研究生,2006年、2009年于东北林业大学分别获得学士、硕士学位,主要从事压电驱动技术研究。E-mail: guowenfengmail@163.com

导师简介:



曲建俊(1962—),男,黑龙江佳木斯人,教授,博士生导师,1984年于东北重型机械学院获得学士学位,1989年于燕山大学获得硕士学位,1998年于哈尔滨工业大学获得博士学位,主要从事摩擦学与压电驱动技术研究。E-mail: qujianjun@hit.edu.cn