

文章编号 1004-924X(2015)03-0803-07

菱形压电微位移放大机构的设计

黄卫清*, 史小庆, 王 寅

(南京航空航天大学 机械结构力学及控制国家重点实验室, 江苏 南京 210016)

摘要:为提高叠层压电陶瓷作动行程,并使之具有往复对称作动的特性,提出一种基于三角放大原理的菱形压电微位移放大机构。该机构以叠层压电陶瓷作为驱动元件,利用三角位移放大原理,在放大叠层压电陶瓷位移输出的同时,实现在平衡位置两侧的双向主动输出。提出了相应的驱动方法,实现了对该机构输出方向和大小的控制。分析了机构的工作原理,通过解析计算得到该机构的理论放大倍数为 2.9,与所建立有限元模型通过仿真计算得到放大倍数 2.5 相近。制作了试验样机并进行了试验验证,结果显示:该机构在驱动电压为 200 V 时最大输出位移为 $(32 \pm 16) \mu\text{m}$,对叠层压电陶瓷位移输出的放大比例为 2.4 倍,与理论计算相近;频率响应试验表明信号频率对位移输出影响较小。提出的设计方案实现了位移放大和位移双向主动输出这两个预期目标。

关键词:叠层压电陶瓷;压电微位移放大;三角位移放大;双向作动

中图分类号:TH112.5;TN384 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152303.0803

Design of diamond piezoelectric micro displacement amplification mechanism

HUANG Wei-qing*, SHI Xiao-qing, WANG Yin

(State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

* Corresponding author, E-mail: mehwwq@nuaa.edu.cn

Abstract: To improve the actuator stroke of laminated piezoelectric ceramic and to let it be with the ability of reciprocating symmetrical actuation, a diamond piezoelectric micro displacement amplification mechanism was proposed based on the triangle amplification principle. The laminated piezoelectric ceramic was taken as a driving element of the mechanism. On the basis of the triangle displacement amplification principle, a two-way active output on both sides of the equilibrium position was achieved while amplifying the output displacement of the laminated piezoelectric ceramics. A corresponding driving method was proposed to achieve the control of direction and magnitude of the output. The working principle of the mechanism was analyzed, and the geometric calculation results show that the magnification is 2.9, which is close to the simulation calculation magnification result 2.5 based on finite element model. A test prototype was developed to test the performance of the mechanism. The experimental results indicate that the maximum output displacement of the mechanism is 32 microns (± 16 microns) when the driving voltage is 200 V and its amplification is 2.4 for the displacement of the laminated piezoelectric ceramic, which is close to the theoretical calculation. The experiment also shows

收稿日期:2014-07-09;修订日期:2014-09-05.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51375224)

that the signal frequency has a minor effect on the displacement output. The mechanism achieves both of the displacement amplifications and two-way movement outputs as desired.

Key words: laminated piezoelectric ceramic; piezoelectric micro displacement amplification; triangle displacement amplification; two-way movement

1 引言

从 90 年代起,为了满足超精密加工与测量的要求,许多机构需要在大范围内实现高步距准确地连续微进给运动,如光栅刻划机进给系统、集成电路制造系统等。目前,微进给机构的主要驱动形式有热变形、弹性变形^[1]、伺服电动机、直线电动机^[2]、电磁力驱动、扭轮驱动^[3]、摩擦驱动^[4]、压电驱动等。随着纳米科技的兴起和迅猛发展,压电作动器,尤其是叠层压电作动器由于具有能量转换效率高、电源功耗低、响应速度快、分辨率高、输出力大,特别是体积小且能实现低压驱动等特点,而在扫描探测显微镜、超精密加工、微外科手术、光学精密工程、电子及生物医疗等诸多前沿技术中表现出良好的应用前景^[5-10]。

然而,由于叠层压电陶瓷的输出位移较小(一般不大于 $50\mu\text{m}$),其应用范围还是受到了限制。为了解决这一问题,需对叠层压电陶瓷的输出位移进行放大,目前研究人员已提出了杠杆放大,压曲放大,桥式放大和三角放大等多种压电微位移放大机构。张建瓴、陈万银等人^[11]设计了差式杠杆微位移放大机构,并对该机构的放大倍数进行了理论计算和有限元仿真,并且发现两者存在差异。Xin Jiang 和 Yuchuan Zhu^[12]通过试验分别研究了将压电材料和超磁致伸缩材料运用于压曲放大机构的效果。Qingsong Xu 和 Yangmin Li^[13]设计了压电驱动的混合桥式位移放大机构,该机构具有较大的放大比例和紧凑的结构,同时其侧向刚度较大,更利于对放大机构进行隔离和保护。朱华和曹如意等人^[14]设计了基于三角位移放大原理的压电作动器,并将其用于光学干涉显微镜,满足了干涉显微镜聚焦调节系统对驱动机构的精度要求。

但是由于受到压电材料特性的限制,目前常见的微位移放大机构只能实现由压电材料输出推力而获得的正向主动输出,反向回程位移只能依靠放大机构中材料的弹性恢复实现。

本文设计了一种菱形压电微位移放大机构,该机构以叠层压电陶瓷作为核心驱动单元,对目前常用三角放大原理进行改进来实现位移放大,获得了平衡位置两侧的双向主动位移输出。另外,文中提出了放大机构的驱动控制准则,实现了对放大机构输出方向及大小的控制。通过几何计算及仿真计算对机构的放大效果进行了研究,并进行了试验验证。

2 结构设计

为了同时实现放大位移和双向输出的目标,本文提出的放大机构的结构如图 1 所示。

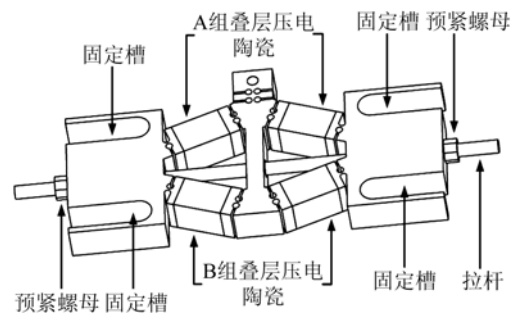


图 1 放大机构的结构

Fig. 1 Structure of amplification mechanism

该菱形压电微位移放大机构包含 4 个叠层压电陶瓷,两个一组,分别安装在拉杆两侧。为了防止机构工作时 4 个叠层压电陶瓷因为长度变化而偏离原安装角度,故在每个叠层压电陶瓷端部均以柔性铰链铰接。位于中央的输出元件被与其接触的 4 个叠层压电陶瓷固定,整个装配结构通过横贯放大机构的拉杆连接,并由拉杆两端的预紧螺母提供预紧力,最后使用紧固螺栓通过固定槽安装在适当位置。

3 设计原理

3.1 三角放大原理

传统的位移放大机构有杠杆式放大机构、桥

式放大机构和三角放大机构,目前运用较为普遍的是基于直角三角放大原理的三角放大机构,其放大原理如图 2 所示。

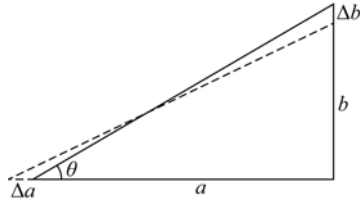


图 2 三角放大原理

Fig. 2 Principle of triangle amplification

设长直角边长度为 a ,短直角边长度为 b ,长直角边与斜边的夹角为 θ 。当长边伸长 Δa 时,短边缩短量为 Δb ,则有下式:

$$a^2 + b^2 = (a + \Delta a)^2 + (b - \Delta b)^2. \quad (1)$$

省略 Δa^2 和 Δb^2 两个高阶无穷小量,由式(1)可得放大倍数 β 的表达式:

$$\beta = \frac{\Delta b}{\Delta a} \approx \frac{a}{b} = \frac{1}{\tan \theta}. \quad (2)$$

由式(2)可以看出,放大倍数 β 只与长直角边和斜边之间的夹角 θ 有关,而与直角边和斜边的长度无关。根据式(2)最后所得的表达式可知,随着 θ 角不断减小,放大倍数不断增大。

3.2 三角放大原理拓展

本文所设计的位移放大机构所采用的位移放大原理有别于上述的三角放大原理,其设计原理如图 3 所示。

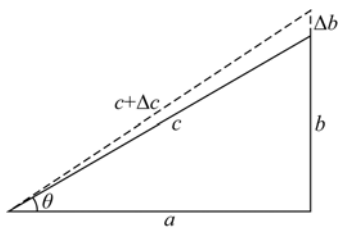


图 3 拓展三角放大原理

Fig. 3 Principle of patulous triangle amplification

设长直角边长度为 a ,短直角边长度为 b ,斜边长度为 c ,长直角边与斜边的夹角为 θ 。固定长直角边 a 不变,当斜边伸长 Δc 时,短直角边伸长量为 Δb ,则根据直角三角形的性质,有下式:

$$a^2 + b^2 = c^2, \quad (3)$$

$$a^2 + (b + \Delta b)^2 = (c + \Delta c)^2. \quad (4)$$

综合式(3)、式(4),忽略高阶无穷小量 Δb^2 和 Δc^2 ,可以得到式(5)所示的放大倍数 β 的表达式:

$$\beta = \frac{\Delta b}{\Delta c} \approx \frac{c}{b} = \frac{1}{\sin \theta}. \quad (5)$$

由式(5)可以看出,放大倍数 β 只与长直角边和斜边之间的夹角 θ 有关,而与直角边和斜边的长度无关。根据式(5)所得最后关系式可知,由于 $\sin \theta \leq 1$,故 $\beta \geq 1$ 。根据三角函数的性质也可知减小 θ 角,可以得到更大的放大倍数。

4 微位移放大机构的工作原理

4.1 微位移放大机构结构设计原理

本文利用 3.2 节所述的三角放大原理,将压电微位移放大机构设计成菱形对称结构,如图 4 所示。

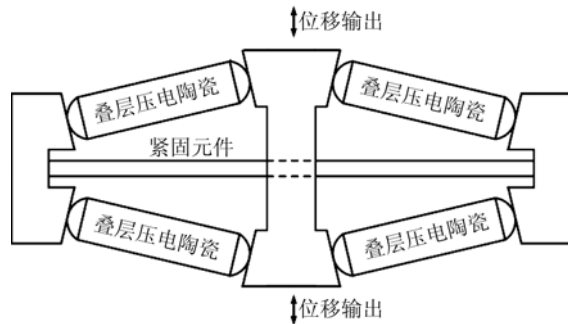


图 4 放大机构示意图

Fig. 4 Schematic of amplification mechanism

该放大式菱形压电作动器包含 4 个叠层压电陶瓷,两个一组。每个叠层压电陶瓷端部铰接,以一个较小的角度固定在内部空间中。整个装配结构通过中间的拉杆提供预紧力,并由固定件固定。4 个叠层压电陶瓷均安置在直角三角形的斜边位置,由 4 个相同的直角三角形构成一个菱形,实现微位移放大输出。由图 4 可知,当紧固元件上方的一对叠层压电陶瓷两端的电压在基准电压的基础上升高时,会输出一个微小变形量 δ , δ 即为直角三角形斜边伸长 Δc ,若使紧固元件下方的一对叠层压电陶瓷两端的电压在基准电压的基础上降低,则此时在竖直方向上会产生向上的位移输出,大小为 $\beta \times \delta$,其中 β 为与叠层压电陶瓷安装角度有关的放大倍数。同理,当改变上下两组叠层压电陶瓷两端的电压时,可以得到竖直向下的位移输出。由于结构具有上下的对称性,所以可以得

到上下对称的双向位移输出。

4.2 微位移放大机构驱动原理

如图 4 所示,位于紧固元件同一侧的一对叠层压电陶瓷在作动时同步伸长或缩短,而紧固元件两侧的两对叠层压电陶瓷则同时做相反变化。由于叠层压电陶瓷的伸长量与叠层压电陶瓷两端的电压呈近似线性的变化关系,根据位移放大机构实现位移输出的工作原理,设计驱动电路原理图,如图 5 所示。

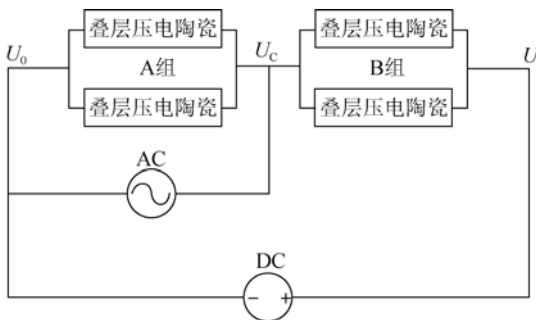


图 5 驱动原理

Fig. 5 Driving Schematic

图 5 中, U_0 为零位电压, U_C 为控制电压, U 为恒定峰值电压。通过调节施加于 A, B 两组叠层压电陶瓷上的电压, 可以对输出位移的大小和方向进行控制。

A 组压电陶瓷两端的电压为 U_A , 则有:

$$U_A = U_C - U_0. \quad (6)$$

B 组压电陶瓷两端的电压为 U_B , 则有:

$$U_B = U - U_C. \quad (7)$$

由压电陶瓷的形变量与电压呈近似线性相关的特点可知, 通过控制 A, B 两组叠层压电陶瓷的相对形变量实现控制放大机构输出的过程可以转换为控制 A, B 两组叠层压电陶瓷的相对电压达到控制最终位移输出的目的, 综合式(6)和式(7), 可得:

$$U_B - U_A = U - 2U_C + U_0. \quad (8)$$

由式(8)可以看出, 当 $U_C = 0.5(U + U_0)$ 时, $U_B - U_A = 0$, 即放大机构处于平衡状态。当 $U_C > 0.5(U + U_0)$ 时, $U_B - U_A < 0$, 由于 A 组叠层压电陶瓷两端电压高于 B 组叠层压电陶瓷, 故放大机构的输出方向为 A 组叠层压电陶瓷所在一侧, 输出位移的大小与 $U_B - U_A$ 的绝对值呈近似线性的关系, 反之亦然。

5 微位移放大机构有限元分析

为初步验证所设计结构的放大效果, 本文采用有限元仿真软件对提出的放大机构进行了仿真。为了减小计算量, 在确保不影响计算结果的前提下, 本文对仿真模型进行了简化, 仅保留作动部分的结构, 而用于试验固定的 U 型槽和拉杆等均被省略。

仿真中, 压电陶瓷部分采用 solid5 单元, 而其余部分采用 solid186 单元, 材料为 45 钢。机构左右两端完全固支。

图 6 为放大机构的位移场分布, 根据仿真结果可知, 当叠层压电陶瓷输出微位移为 $2 \mu\text{m}$ 时, 放大机构在 Z 方向上的位移输出为 $5.01 \mu\text{m}$, 即该机构的单向输出放大倍数为 2.5, 而采用解析法计算出的单向输出放大结果约为 2.9 倍。两者存在差异的原因是解析计算中没有将铰链转角刚度的影响考虑在内, 由于柔性铰链吸收部分能量, 从而使仿真结果较解析计算结果有所下降。

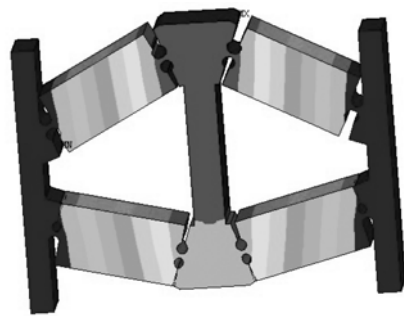


图 6 位移场分布

Fig. 6 Distribution of displacement field

图 7 为放大机构的应力场分布, 从中可知, 该放大机构的最大应力发生在柔性铰链处。

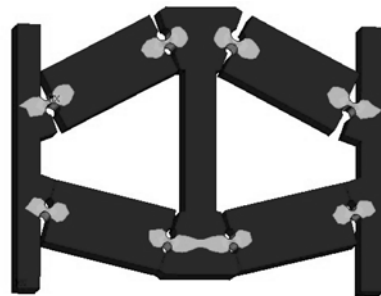


图 7 应力场分布

Fig. 7 Distribution of stress field

6 试验研究

6.1 微位移放大机构输出测试

根据上述分析设计制作了该机构的样品,对设计原理进行了试验验证。

本试验使用的是西安康弘公司的 PT0707 型压电陶瓷,其单片结构尺寸为 7.5 mm×7.5 mm×3.6 mm。试验前,将 3 片该型号陶瓷机械串联,并且电学并联组成 1 个叠层压电陶瓷,制作 4 个同样的叠层压电陶瓷,并将它们安装于样机中,构成“菱形”的布置形式。然后通过拉杆两端的螺母和压簧给 4 个叠层压电陶瓷同时施加预紧力。经测试,此时叠层压电陶瓷所受预紧力为 100 N。放大机构装配完成后,使用 4 个 M6 的螺栓通过放大机构上的 4 个固定槽固定于隔震台上,如图 8 所示:

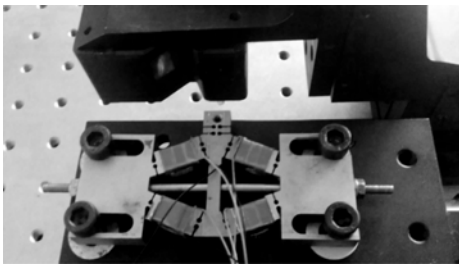


图 8 放大机构实物图

Fig. 8 Prototype diagram of amplification mechanism

由于该微位移放大机构最终输出位移为微米级别,为了能够精确测量实际输出位移的大小,试验中使用了基恩士 LK-H020 型激光位移传感器。该激光位移传感器的测量精度可以达到 1 nm,在试验中将该传感器的激光束对准微位移放大机构的位移输出端,在给 4 个叠层压电陶瓷施加适当的激励信号之后,即可通过计算机观察在一段时间内该机构的输出变化情况。

试验激励原理如图 9 所示。

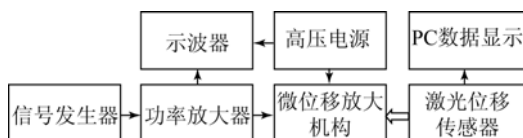


图 9 试验电路框图

Fig. 9 Block diagram of test circuit

根据本文 4.2 节所述驱动电路原理,高压电源输出一恒定的峰值电压 U ,由信号发生器产生一带偏置的正弦信号,经由功率放大器放大后得到偏置为 $U/2$,幅值也为 $U/2$ 的正弦信号,即 U 与 U_c 始终满足下式:

$$U_c = \frac{U}{2} + \frac{U}{2} \sin \omega t. \quad (9)$$

同时设定零位电压 U_0 为 0,则 A 组叠层压电陶瓷两端电压 U_A 和 B 组叠层压电陶瓷两端电压 U_B 以及峰值电压 U 之间有如图 10 所示的关系。

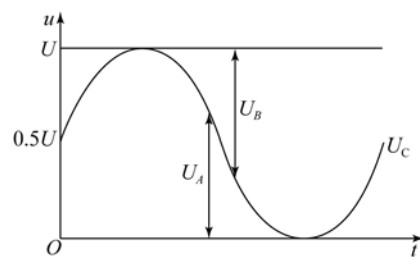


图 10 激励信号间的关系

Fig. 10 Relationship of excitation signals

此时,放大机构输出端将在平衡位置两端做往复运动。将该放大机构按照激励原理连接激励信号后,在 10~200 V 内以 10 V 为梯度,逐渐改变峰值电压 U 的值,同时根据峰值电压 U 的变化控制电压 U_c ,使它们始终满足式(9)。通过激光位移传感器测量到的输出位移震荡幅值,如图 11 所示。

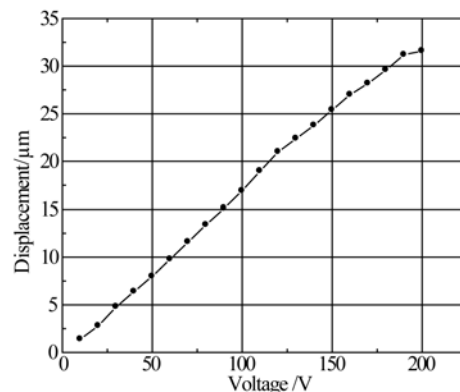


图 11 放大机构输出特性

Fig. 11 Output characteristics of amplification mechanism

由图 11 可以看出,该放大机构的位移输出随电压升高而增大,且呈近似线性关系。

6.2 叠层压电陶瓷的输出位移测量

通过上述试验得到了经过放大机构放大后的位移输出,但是为了了解该放大机构的放大效果,必须获得叠层压电陶瓷的位移输出,为此设计试验对叠层压电陶瓷输出微位移进行了测量。试验中使用如图 12 所示的装置对叠层压电陶瓷施加等同于其在放大机构中所受到的预紧力。



图 12 等效预紧力装置

Fig. 12 Equivalent preload device

通过激光位移传感器测量其峰峰值为 10~200 V 的一系列正弦信号激励下的位移输出,得到如图 13 所示的微位移曲线图。

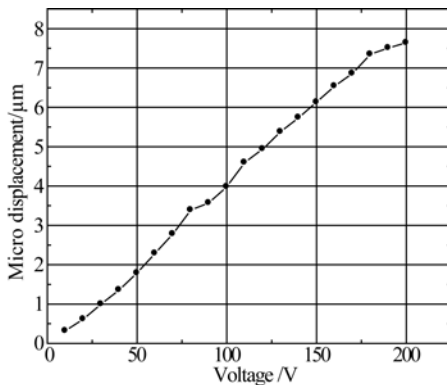


图 13 叠层压电陶瓷输出特性

Fig. 13 Output characteristics of laminated piezoelectric ceramic

由图 13 可以看出,叠层压电陶瓷的微位移随电压升高而增大,并且呈现出线性变化的规律。对比图 11 和图 13 可以看出,放大机构对叠层压电陶瓷输出的微位移有明显的放大效果。通过运算,可以得到双向输出放大倍数在 2~2.4 之间波动。

6.3 控制信号频率对位移输出的影响

为了进一步研究控制信号是否会对放大机构的输出位移产生较大的影响,设计了频率-位移输出试验,测量控制信号在恒定电压下不同频率时对应的位移输出,试验中选用恒压 100 V,控制电压频率为 10~100 Hz,测得在不同频率下的位移输出如图 14 所示。

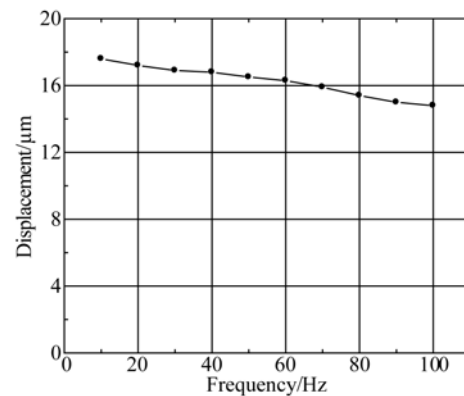


图 14 信号频率-输出特性

Fig. 14 Characteristic of frequency-output

由图 14 可以看出,当控制信号电压不变而频率从 10 Hz 升高至 100 Hz 时,输出位移有线性减小的趋势,表现为频率每升高 10 Hz,输出位移将减小 0.3 μm。

由此可知频率会对位移输出产生影响,但通过对比由于频率升高而产生的位移减小量与最终输出位移的大小可知,该影响较小。

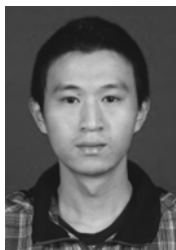
7 结 论

本文提出了一种基于三角放大原理的菱形压电微位移放大机构,根据几何关系对该机构的放大倍数进行了解析计算,建立了有限元模型,对该机构的位移放大效果进行了仿真计算。样机试验结果表明,该微位移放大机构可以实现在平衡位置两侧的双向位移输出,同时,通过比较叠层压电陶瓷微位移输出与放大机构的位移输出可知,实际放大倍数为 2.4,与解析计算的结果 2.9 和仿真计算的结果 2.5 相近。该设计方案实现了位移放大和双向对称位移主动输出这两个预期目标。

参考文献:

- [1] 张国智.超精密机床弹性微进给装置设计方法研究[J].机床与液压,2013,41(4):24-27.
ZHANG G ZH. Study on design method for elastic micro-feeding device of ultraprecision machine tool [J]. *Machine Tool & Hydraulics*,2013,41(4):24-27. (in Chinese)
- [2] 赵榕.力矩电动机及直线电动机在齿轮磨床数控改造中的应用[J].改装与维修,2014,(5):117-118.
ZHAO R. Application of torque motor and linear motor in CNC transformation of gear grinding machine [J]. *Refitting and Maintenance*,2014,(5):117-118. (in Chinese)
- [3] 邓明敏,龙威,王海鹏.基于精密空气静压导轨的扭轮传动机构的设计与分析[J].新技术新工艺,2013,(8):36-38.
DENG M M, LONG W, WANG H P. Design and analysis of twist-roller transmission based on the precision aerostatic guideway [J]. *New Technology & New Process*, 2013, (8):36-38. (in Chinese)
- [4] 李晓韬,杨志刚,程明光,等.基于惯性冲击原理的变摩擦式微位移机构的运动特性[J].光学精密工程,2008,16(4):135-138.
LI X T, YANG ZH G, CHENG M G, *et al.*. Movement characteristics of micro-displacement mechanism with variable friction based on inertial impact principle [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(4):135-138. (in Chinese)
- [5] LI J P, ZHAO H W, QU H, *et al.*. A piezoelectric-driven rotary actuator by means of inchworm motion [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2013, 194:269-276.
- [6] 潘松,黄卫清,王寅,等.基于压电作动器的直线电机及其高效驱动[J].光学精密工程,2011,19(10):2464-2471.
PANG S, HUANG W Q, WANG Y, *et al.*. High efficiency driving of liner motor based on piezoelectric actuator [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(10):2464-2471. (in Chinese)
- [7] SHI Y L, ZHAO C S. Simple new ultrasonic piezoelectric actuator for precision linear positioning [J]. *Journal of Electroceramics*, 2012, 28(4):233-239.
- [8] MIKIO M, SHIN S. Displacement amplifier for piezoelectric actuator based on honeycomb link mechanism [J]. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 2010, 157(1):84-90.
- [9] NI Z Y, ZHANG D W, WU Y J, *et al.*. Analysis of parasitic motion in parallelogram compliant mechanism [J]. *Precision Engineering*, 2010, 34(1):133-138.
- [10] KIM J J, CHOI Y M, AHN D, *et al.*. A millimeter-range flexure-based nano-positioning stage using a self-guided displacement amplification mechanism [J]. *Mechanism and Machine Theory*. 2012, 50(4):109-120.
- [11] 张建瓴,陈万银,可欣荣,等.一种微位移放大机构的设计与仿真[J].机械设计,2009,26(12):9-12.
ZHANG J L, CHEN W Y, KE X R, *et al.*. Design and simulation of a kind of micro-displacement amplification mechanism [J]. *Journal of Machine Design*, 2009, 26(12):9-12. (in Chinese)
- [12] JIANG X, ZHU Y CH. Mechanical amplifier for giant magnetostrictive materials and piezoelectric materials [J]. *Hydromechatronics Engineering*. 2013, 41(24), 30-43.
- [13] XU Q S, LI Y M. Analytical modeling, optimization and testing of a compound bridge-type compliant displacement amplifier [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2011, 46(2):183-200.
- [14] 朱华,曹如意,管磊.应用于干涉显微镜的直线压电作动器[J].光学精密工程,2013,21(6):1524-1530.
ZHU H, CAO R Y, JIAN L. Linear piezoelectric actuator applied to interference microscope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(6):1524-1530. (in Chinese)

作者简介:



史小庆(1989—),男,贵州都匀人,硕士研究生,2012年于南京航空航天大学获得学士学位,主要从事直线压电作动技术的研究。E-mail: shiqing1220@sina.com

导师简介:



黄卫清(1965—),男,江苏南通人,教授,博士生导师,1987年、1990年于南京航空航天大学分别获得学士、硕士学位,1999年于香港理工大学获得博士学位,主要从事压电精密致动技术的研究。E-mail: mehqw@nuaa.edu.cn

(本栏目编辑:马健)

(版权所有 未经许可 不得转载)