

文章编号 1004-924X(2006)04-0001-04

外驱动双向推力型压电步进精密驱动器研究

杨树臣^{1,2}, 刘建芳², 杨志刚², 赵宏伟²

(2. 吉林大学 机械科学与工程学院, 吉林 长春 130025)

摘要:提出了一种新型的压电直线精密步进驱动器。该驱动器采用步进仿生运动的原理(Pusher),以定子箝位和定子驱动的方式实现动子被动运动。在对驱动器工作原理和机械结构分析的基础上,建立以压电叠堆为驱动元件的直线驱动数学模型,并对其结构进行了有限元分析。这种驱动器采用双向推力的结构原理,实现了在正反向与运动过程中驱动特性的一致。实验证明,以这种新型驱动方式构造的驱动器实现了箝位牢固、高频率(100 Hz)驱动、高步进速度(30 mm/min)、大行程(>10 mm)、高分辨率(0.05 μm)、大驱动力(100 N)等特点,大幅度提高了压电型步进驱动器的驱动性能。该驱动器在精密运动、微操作、光学工程、精密定位等精密工程中有广阔的应用前景。

关键词:压电驱动;外驱动;精密驱动器;双向推力;分辨率

中图分类号:TN384 文献标识码:A

Study on outer driving precision PZT linear step actuator

YANG Shu-chen, LIU Jian-fang, ZHAO Hong-wei, YANG Zhi-gang

(College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China)

Abstract: A new precision linear PZT actuator was proposed to improve its drive capabilities. Based on the piezoelectric (PZT) technology, the actuator adopts the principle of bionics and works with a new method of stator initiative anchoring/loosen and a distortion structure of double-side thin flexible hinge to solved the problem of anchoring/loosen, frequency, journey, resolution and velocity. The experimental results show that the new linear PZT actuator has high frequency (100 Hz), high speed (30 mm/min), large travel (>10 mm), high resolution(0.05 μm) and high load (100 N) it can be applied for large travel and high resolution driving device, optics engineering, precision positioning and some micro-manipulation field.

Key words: piezoelectric actuator; stator initiative anchoring/loosen; step actuator; double-side thin flexible hinge; large travel

1 引言

压电精密驱动是利用压电材料与机械结构相

结合,实现微/纳传动与驱动的高新技术。压电陶瓷元件在驱动时具有纳米级的稳定输出位移精度,并且驱动线性好、控制方便、分辨率高、频率响应好、不发热、无磁干扰、无噪声等,同时,压电驱

动器具有体积小、质量轻、大功率密度等特点。因此在光学工程、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得到了较多的应用。目前压电型精密微驱动技术已成为国内外的重点研究方向^[1-5]。

步进式的工作原理是根据自然界某些爬虫类动物爬行的方法而提出的,故称为步进式驱动机构,其运动方式又称为蠕动式(inchworm)运动方式。在时序控制电压信号的作用下,驱动装置可实现定向运动^[6-7]。由于步进驱动的机械结构比较复杂,因此研究人员采用多种步进方案实现步进运动,而目前研究最多的为“walker”型的步进驱动^[8-9],这种步进方式是运动体(又称动子)自身产生位移来形成步进驱动其动子结构复杂,运动过程受到的自身的干扰很大,影响驱动器整体的工作特性。

本文提出一种外驱动(或被动驱动)的工作方式和机械结构,利用定子箝位和驱动的工作方式实现压电精密步进驱动,针对压电陶瓷叠堆受拉力和压力特性不同的特点,提出正反向推力的工作结构,实现双向工作时的驱动一致。由于该驱动器在工作时,动子是在外力的推动下工作的,所用又称为“Pusher”型驱动^[10]。

2 结构原理

图 1 为外驱动双向推力型压电步进直线驱动器的整体结构原理图。驱动器整体结构主要由四部分组成:与底座相连的中间定子箝位体单元;直线动子单元;由驱动柔性铰链以及驱动压电叠堆组成的驱动体单元;通过驱动体单元与中间定子箝位体相连接的运动箝位体单元和。各工作单元的组成如图中所示。

以直线动子向左运动为例,该驱动器的工作原理过程描述如下:

初始时,各工作单元处于自由状态→左侧箝位压电叠堆带电伸长,箝位柔性铰链变形对直线动子进行箝位→驱动压电叠堆带电伸长,由于中间定子箝位体侧与底座相连等于固定,所以驱动柔性铰链向左侧变形,推动左运动箝位体单元向左运动一步 $\delta_{左}$,由于左箝位单元与直线动子箝位在一起,可带动直线动子向左运动一步 $\delta_{左}$ →中

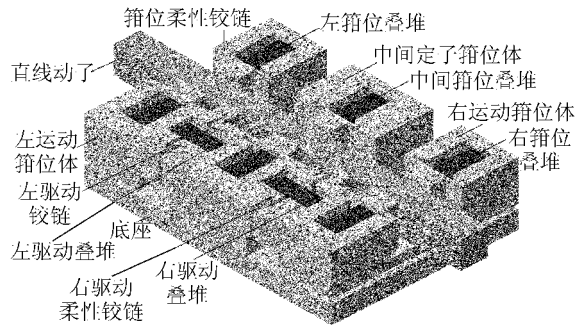


图 1 压电步进精密直线驱动器的整体结构原理图

Fig. 1 Mechanism of precision linear step actuator

间定子箝位叠堆带电伸长,使中间定子箝位体对直线动子进行箝位→左箝位单元与直线动子松开→左驱动叠堆放电回缩,左箝位体在柔性铰链的回弹力作用下向右回缩 $\delta_{左}$,回到初始位置→左侧箝位压电叠堆带电伸长,柔性铰链变形对直线动子进行箝位→中间定子箝位体松开,完成一个工作周期。其间,除直线动子向左步进移动 $\delta_{左}$ 外,其它工作单元均回到原始位置。重复以上运动过程,则直线动子以步进的方式被动的向左连续运动,并且向左运动过程是对载荷端的推力驱动。在整个运动过程中,中间定子箝位体的右侧部分一直处于自由状态。

在上述运动过程中,直线动子自身既不产生箝位动作,又不产生驱动动作,其运动过程完全在外部结构的动作下完成,因此,称这种工作方式为外驱动,由于其每一步的驱动都是在外部的推力下完成,所以又称为“Pusher”方式。

同理,由于驱动器定子箝位体左侧和右侧结构完全一致,所以在不同的控制时序下,可以与上述完全相同的工作方式实现直线动子向右运动,并且这种运动以推力的方式实现。

3 结构动力学分析

由于直线动子和箝位运动体的存在,以及对压电叠堆预紧力的作用,在忽略阻尼的情况下,外驱动型压电步进驱动器实际模型如图 2 所示。

由压电叠堆振动原理可知:

$$\begin{cases} \xi_3 = S_3 \times l \\ S_3 = s_{33}^E + d_{33} E_3 \end{cases}, \quad (1)$$

由牛顿运动定律:

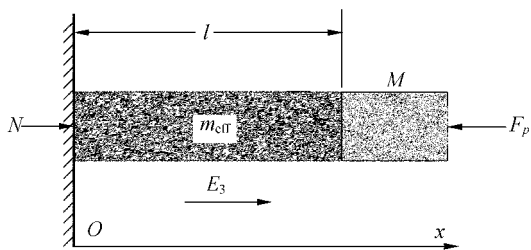


图 2 压电叠堆驱动受力模型

Fig. 2 Dynamics model of the PZT actuator

$$\begin{cases} N - F_0(t) = \frac{1}{2} \times m_{\text{eff}} \frac{d^2 \xi_3}{dt^2} \\ F_0(t) - F_p = M \frac{d^2 \xi_3}{dt^2} \end{cases}, \quad (2)$$

其中:

- m_{eff} —压电叠堆等效质量;
- M —箱位体加直线动子质量;
- F_p —压电叠堆预紧力;
- E_3 —电场方向。

解方程得到压电叠堆右端即 M 的位移方程和加速度方程分别为:

$$\xi_3 = (d_{33} E_3 l - \frac{F_p s_{33}^E l}{S_{\text{area}}}) (1 - \cos(A_1 t)), \quad (3)$$

$$\frac{d^2 \xi_3}{dt^2} = B \cos(A_1 t), \quad (4)$$

式中: $B = (d_{33} E_3 - F_p s_{33}^E) / s_{33}^E (1/2 m_{\text{eff}} + M)$

d_{33} —压电常数; s_{33}^E —弹性柔顺常数

通过以上分析可以看出,压电叠堆由于受到预紧力作用,其振幅减小。在实际中,由于压电叠堆变形和力的影响,预紧力是一个随时间变化的量,可以用 $F_p = k(x_0 + \xi_3)$ 表示,此时可得出系统的频率因子和振幅因子为:

$$A_\omega = \sqrt{1 + \frac{k s_{33}^E l}{S_{\text{area}}}} \cdot A_1, \quad (5)$$

$$B_\omega = d_{33} E_3 l - \frac{k(x_0 + d_{33} E_3 l)}{S_{\text{area}} + k s_{33}^E}, \quad (6)$$

图 3 为驱动器驱动过程的有限元分析变形模型图(作相应可视化修改)。分析过程中,用 CATIA 三维软件建立实体模型,再用 ANSYS 软件进行模型分析。在单元划分中,以 SOLID45 为实体单元模型,对中间定子箱位体进行约束固定,对驱动柔性铰链左侧施加一个静态力 F ,相当于压电叠堆产生的推力,则得到直线动子的输出位移 δ (如图所示)。在向左方向运动时,右侧部分

处于静止状态,通过有限元分析可以看到,直线动子是沿直线运动的。结构的变形只发生在驱动柔性铰链部分,其他部分只出现平动。

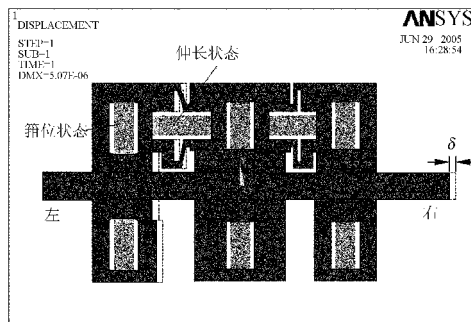


图 3 驱动器驱动过程的有限元分析模型

Fig. 3 FEM displacement of the actuator

图 4 是为箱位块的有限元分析变形模型图。分析过程中,对箱位体的底部进行约束固定,对箱位块施加一个静态力 F ,则得到箱位体的输出位移 δ_a ,并且箱位体刚性运动,弹性变形只发生在柔性铰链部分。从图中的分析结果可以看到最大位移为 $0.507 \times 10^{-5} \text{ m} = 5.07 \mu\text{m}$ 。

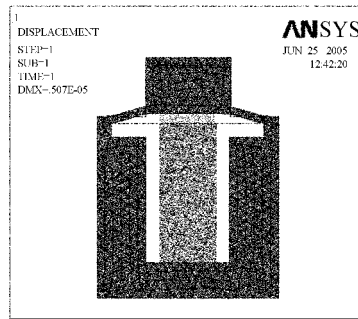


图 4 箱位体的静态变形有限元分析

Fig. 4 FEM displacement of the anchor/loosen structure

箱位体在变形过程中,会出现应力分布的变化,其应力主要集中在柔性铰链的连接处。该箱位应力的分布情况如图 5 所示。在伸长变形时,与箱位块连接处柔性铰链外侧主要受到拉应力 δ_i ,内侧受压应力;而与箱位体相连接的柔性铰链的外侧受压应力 δ_p 作用,内侧受拉应力作用,而应力也正集中在柔性铰链的两端连接点处。在位移变化较小的情况下,虽然柔性铰链有应力的存在,但应力集中现象不明显,因此该柔性铰链具有较高的使用寿命。箱位块作为刚体运动,除了连

接点处外,其它地方无应力变化。

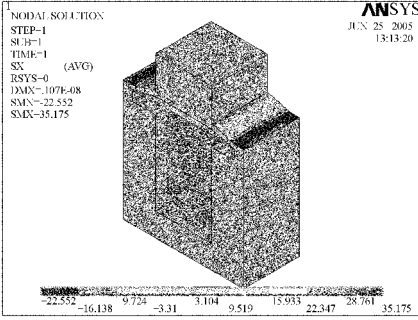


图 5 箱位柔性铰链的有限元应力分析

Fig. 5 FEM stress of the anchor/loosen structure

4 系统控制

整个控制系统原理框图如图 6 所示。PC 机作为整个系统的核心来控制其运动状态。PC 发出的数字信号经 6 路 D/A 转换成模拟信号并通过 6 路放大装置进行放大。6 路经放大的信号对 6 路压电叠堆驱动电源进行控制,并按给定的时序对箱位压电叠堆和驱动压电叠堆进行协调控制。在控制系统回路中,由于压电陶瓷为电容性器件,为使其具有快速伸缩的性能特点,必须针对压电叠堆设计出高频完全放电回路,使压电叠堆在断电时其内部存储。

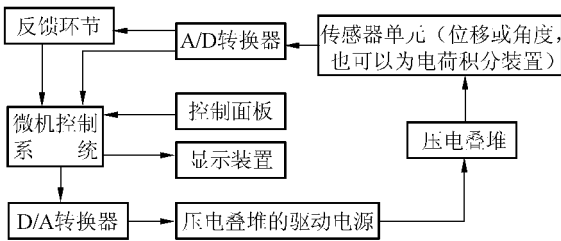


图 6 系统控制原理图

Fig. 6 Principle of the control system

单向驱动时 3 路时序信号的相位关系如图 7 所示,第 1、第 3 路为箱位压电叠堆通电信号,第 2 路为驱动压电叠堆通电信号。时序信号为梯形信号,这样可消除电源信号的上升沿和下降沿由于突变而产生的冲击噪声,并且对压电驱动元件起到保护作用,提高压电叠堆的使用寿命。在控制信号的设计方面,应充分考虑各部分的时序分配和分布,如图所示:把一个周期 T 分为 6 等分,每

等分 $t=T/6$,电源信号的上升沿和下降沿分别占 $\Delta t, \Delta t \approx t/4$ 。箱位电压信号的平均低电平(断电)时间为 $2t=T/3$,平均高电平(通电)时间为 $4t=2T/3$,驱动电压信号的高电平和低电平时间是相等的,分别占 $T/2$,左右箱位电压信号的时序相差 $3t$ 。这种时序关系充分考虑了箱位和驱动等各个动作的占空比,除了能使箱位更加牢靠,还能在高频工作时避免出现局部动作时间过少,导致步进节拍混乱。

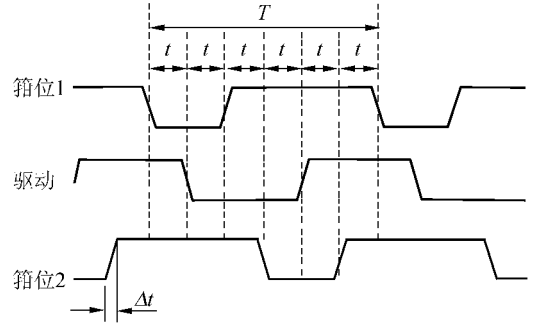


图 7 时序控制图

Fig. 7 Sequence control system

5 试验测量

5.1 试验说明

图 8 是研制的外驱动型压电步进驱动器的实物图。上边输出面连接在直线动子上,当直线动子运动时带动输出板并连接外载荷一起运动。对压电步进驱动器的参数测量主要包括箱位稳定性(箱位误差)、步距、分辨率、连续驱动力、工作频率、步进速度等。在试验测量以前先对压电叠堆进行预紧,具体过程为:对压电叠堆施加预紧力,当压电叠堆输出最高瞬时电压达到 ΔV 伏时,可

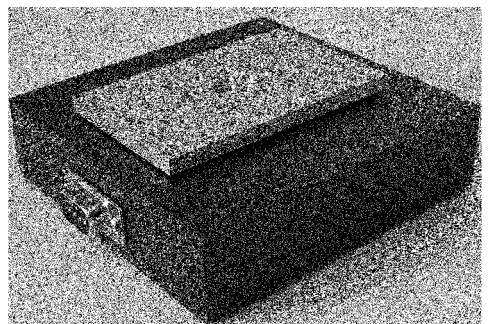


图 8 外驱动双向推力型压电步进驱动器实物图

Fig. 8 Photo of the actuator

视为预紧良好,并且通过多次预紧达到最终预紧效果。

5.2 参数测量

图 9 是对驱动器箝位稳定性的测量曲线,箝位稳定性又叫箝位误差,是指箝位过程对直线动子产生的影响程度,具体描述为:当箝位体箝位时,直线动子由于箝位的冲击而产生的在运动方向上的位移量。图中曲线是一次预紧和多次预紧后测得的在不同箝位电压下的箝位误差。可见,通过多次预紧后,箝位对直线动子的影响误差大大减小。试验中,经过 6 次预紧后,箝位平均误差降低至 $0.016 \mu\text{m}$ 。可见,通过多次对压电叠度的预紧,大大提高了箝位稳定性。

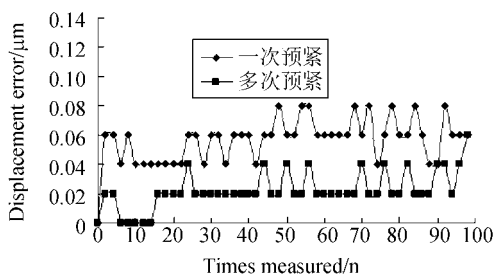


图 9 箝位稳定性测量

Fig. 9 Anchor/loosen stability test

分辨率是指驱动器步进运动时每一步所能达到的最小步长,分辨率是精密驱动器的一个重要指标。图 10 是空载时对该驱动器进行分辨率测量的曲线图。从图中可以看出,驱动电压为 4 V 时得到其平均分辨率约为 $0.06 \mu\text{m}$,驱动电压 3.4 V 时得到其平均分辨率约为 $0.04 \mu\text{m}$,3 V 以下测量仪器无显示。因此可以认为驱动器的分辨率为 $0.04 \mu\text{m}$,而 3.4 V 驱动电压就称为驱动截止电压。

图 11 是连续驱动力大小和驱动电压之间的关系曲线。该曲线是在有连续位移输出的情况下测得的,当驱动电压高于 60 V 时,曲线斜率有轻微下降,这是因为当电压增加时,与压电叠堆相连接的柔性铰链产生较大变形,该变形产生的附加载荷施加到压电叠堆上,从而影响有效输出的驱动力。从图中可以看出其最大连续步进驱动力达到 47 N。

步距在压电步进驱动器工作中直接影响着驱动器的运动精度和运动速度。在空载状态下,

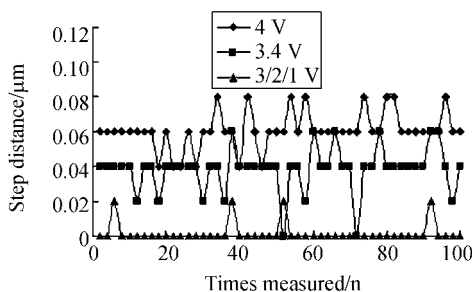


图 10 步进分辨率测量

Fig. 10 Resolution experiment

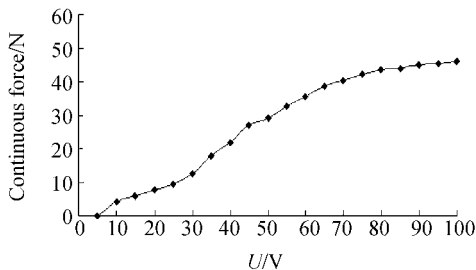


图 11 连续驱动力测量

Fig. 11 Experiment of continuous force

步距量与驱动电压值的关系如图 12 所示。从图中可以看出,步进驱动的步距量与驱动电压成近似的线性关系,超过 70 V 驱动电压时,曲线斜率有轻微的下降,这是因为当驱动柔性铰链变形较大时,对压电叠堆产生了较大的附加载荷所致。可以看出,在驱动电压达到 100 V 时可产生超过 $6 \mu\text{m}$ 的步进量。

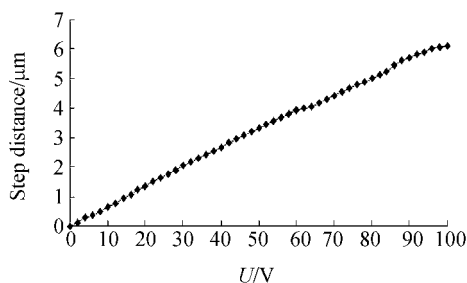


图 12 步距测量

Fig. 12 Step displacement test

步进驱动速度由驱动电压和步进频率决定。通过测量,得出图 13 中不同驱动电压下的几种典型频率的速度曲线,从图中可以看出,驱动器在无外加载荷的情况下,步进频率 40 Hz 时速度达到

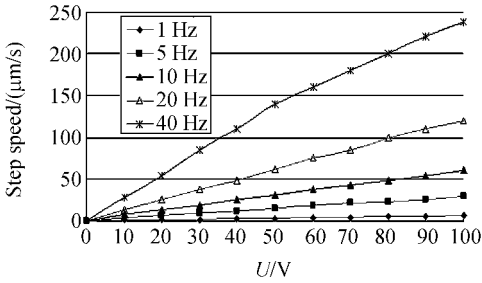


图 13 步进速度测量

Fig. 13 Linear speed test

240 $\mu\text{m/s}$, 实现了较高速精密运动, 并且根据需要可适当调节频率和驱动电压来实现速度调整。另外, 从图中还可以看出, 在频率较低时, 速度和电压之间的线性度较好。分析认为, 低频时, 机械结构各个系统的变形和恢复能够更充分的完成,

参考文献:

- [1] LIU Y T, FUNG R F, HUANG T K. Dynamic response of a precision positioning table impacted by a soft-mounted piezoelectric actuator[J]. *Precision Engineering*, 2004, 28(3): 252-260.
- [2] TENZER P E, MRAD R B. On amplification in inchworm precision positioners[J]. *Mechatronics*, 2004, 14: 515-531.
- [3] KIM S CH, KIM S H. Precise rotary actuator by inchworm motion using dual wrap belts[J]. *Review of Science Instruments*, 1999, 70(5): 2546-2550.
- [4] AWABDY B A, AHIH W C, AUSLANDER D M. Nanometer positioning of a linear motion stage under static loads [J]. *IEEE Trans Mechatronics*, 1998, 3(2): 113-119.
- [5] 杨宜民. 新型驱动器及其应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 1998.
YANG Y M. *A new driver and its application*[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 1998.
- [6] FRANK J, KOOPMANN G H, CHEN W. Design and performance of a high force piezoelectric inchworm actuator [J]. *SPIE*, 1999, 3668: 717-723.
- [7] 吴一辉, 王立鼎, 马建旭. 新型微变位致动器的发展与应用[J]. *光学 精密工程*, 1996, 4(2): 7-13.
WU Y H, WANG L D, MA J X. Develop and applications of new micro-motion actuators[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1996, 4(2): 7-13. (in Chinese)
- [8] 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): 7-13.
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): 7-13. (in Chinese)
- [9] 张福学, 王丽坤. 现代压电学[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
ZHANG F X, WNAG L K. *Modern piezoelectrinics*[M]. Beijing: Science Press, 2001.
- [10] SHAMOTO E, MORIWAKI T. Development of a "walking drive" ultra precision positioner[M]. *Precision Engineering*. 1997, 20(2): 85-92. (in Chinese)

作者简介: 杨树臣(1971—), 男, 吉林大学博士研究生, 吉林工程技术师范学院讲师, 主要研究方向为压电驱动与控制, 微/纳机械。近三年来, 承担国家“863”计划项目 2 项, 国家自然科学基金 1 项, 吉林省和长春市项目 1 项, 发表论文 6 篇。Email: dixonyang@yahoo.com.cn (杨树臣); jfliu@jlu.edu.cn (刘建芳)

而在高频时可能受到一定的影响。因此, 低频率驱动的稳定性和精度要高于高频驱动。

6 结 论

外驱动双向推力型压电步进精密驱动器采用外驱动、双向推力的新型工作方式, 实现了驱动过程中的箱位稳定、驱动分辨率高的特点, 并且在前进和后退方向上全部以推力方式实现, 充分利用了压电叠堆的驱动特性。

研制的驱动器达到了以下参数指标: 有效频率(40 Hz)、可测分辨率(0.04 μm)、连续驱动力(47 N)、步进速度(240 $\mu\text{m/s}$), 并且实现了 25 mm 的工作行程。该压电步进驱动器性能稳定可靠, 在将来的超精密驱动领域有广阔的应用前景。