

DOI: 10.7652/xjtuxb201904008

等腰梯形压电黏滑直线驱动器设计与试验研究

董景石¹, 徐智¹, 丁肇辰¹, 黄虎¹, 范尊强¹, 赵宏伟¹, 郭抗², 沈传亮³

(1. 吉林大学机械与航空航天工程学院, 130022, 长春; 2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 130033, 长春; 3. 吉林大学汽车仿真与控制国家重点实验室, 130022, 长春)

摘要: 提出了一种等腰梯形压电黏滑直线驱动器, 通过粘贴在等腰梯形柔性机构柔性斜梁两侧的 4 片矩形压电陶瓷片使驱动足驱动滑块, 以达到基于黏滑运动的高分辨率和大行程线性运动。调整等腰梯形柔顺机构斜梁的角度, 可使驱动足产生横向运动, 基于有限元方法, 获得了柔性梁的适当角度。通过等腰梯形柔性铰链驱动足的横向运动, 可增加使滑块前进的静摩擦力, 减少回退动摩擦力。搭建了试验测试系统并进行了一系列试验, 结果表明, 该样机在 4 N 锁定力下最大输出速度为 601.803 $\mu\text{m/s}$, 最大输出力为 2.8 N, 最小步进距离为 0.026 μm 。采用压电陶瓷片作驱动源, 易于小型化, 拓宽了压电陶瓷片的应用领域。

关键词: 压电陶瓷片; 黏滑驱动器; 等腰梯形; 角度调整; 横向运动

中图分类号: TM384; TH703 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2019)04-0051-07

Design and Experimental Analysis for Isosceles Trapezoid-Type Stick-Slip Piezoelectric Linear Actuator

DONG Jingshi¹, XU Zhi¹, DING Zhaochen¹, HUANG Hu¹, FAN Zunqiang¹,
ZHAO Hongwei¹, GUO Kang², SHEN Chuanliang³

(1. School of Mechanical and Aerospace Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China;

2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun 130033, China;

3. State Key Laboratory of Automotive Simulation and Control, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: An isosceles trapezoid-type stick-slip piezoelectric linear actuator is proposed. Four rectangular piezoelectric ceramic plates bonded on both sides of the flexible skew beam of the isosceles trapezoid flexible mechanism are utilized to generate a bending mode and make the driving foot drive slide to achieve high-resolution and large-stroke linear motion. With finite element method, the angle adjustment of the flexible beam is determined for producing lateral motion of the driving foot of the isosceles trapezoid flexible mechanism. According to the finite element analysis, the isosceles trapezoid flexible mechanism can increase static friction force in slider forward movement stage and reduce kinetic friction force in backward movement stage by lateral motion of the driving foot. An experimental system is constructed, on which a series of experiments are carried out. The results indicate that the maximum output velocity is 601.803 $\mu\text{m/s}$, the maximum output force is 2.8 N, and the minimum stepping displacement is 0.026 μm for locking force of 4 N. The stick-slip actuator driven by the piezoelectric ceramic plates is easy to miniaturize to widen its application ranges.

收稿日期: 2018-10-21。 作者简介: 董景石(1973—),男,副教授,硕士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61604150,51705197,51875237)。

网络出版时间: 2018-12-21

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20181220.1008.002.html>

Keywords: piezoelectric ceramic plates; stick-slip actuator; isosceles trapezoid-type; angle adjustment; lateral motion

利用压电材料作动力源的压电驱动器具有尺寸小、响应速度快、分辨率高等特点,在生物医学工程、半导体制造、光学聚焦和扫描显微镜等领域得到了广泛的应用^[1-5]。根据工作原理,压电驱动器可分为直接驱动型、超声马达、尺蠖型驱动器和摩擦惯性驱动器,各类型压电驱动器各有优缺点。直接驱动型常用压电叠堆作驱动元件,有较高的定位分辨率,但工作行程受限^[6-8]。例如,美国 Sebastian 提出的直接驱动定位平台^[6],可实现 x 、 y 两个方向的运动,有 1 nm 的定位精度,但是运动行程只有 15 μm 。超声马达擅长高速运动,常用兰杰文振子和压电陶瓷片作驱动元件,但是分辨率较低,磨损、发热严重,同时常处于共振状态,降低驱动器的使用寿命^[9-10]。尺蠖型驱动器常用压电叠堆作驱动元件,具有较大的输出力^[11-12],但尺蠖型驱动器也有结构和控制系统复杂、运动速度低的不足^[13-14]。摩擦惯性压电驱动器又分为冲击惯性型和黏滑惯性型,其中冲击惯性型常用压电叠堆和压电双晶片作驱动元件,具有较好的运动输出特性,但是输出力和分辨率比黏滑惯性驱动器小^[15-17]。综合比较输出力、运动速度、运动分辨率,黏滑驱动器有较好的输出特性。

在一个循环周期中,黏滑驱动器可以分为两个阶段,静摩擦力驱动的滑块前进阶段和滑动摩擦力驱动的滑块回退阶段^[18]。南台湾科技大学设计的一种用于实现长行程直线运动的压电黏滑定位平台^[19]和捷克理工大学研制的在透射电子显微镜下工作的黏滑微定位平台^[20],都存在严重的回退现象。已公开技术表明,滑动摩擦力是使滑块回退的主要原因^[18],这是由黏滑原理的特性决定的。在现已公开的黏滑型压电驱动技术中,尚未检索到不存在回退现象的,因此为了提高驱动器的输出性能,期望驱动器较大的静摩擦力和较小的动摩擦力。为此,吉林大学李建平等提出了横向运动,采用一个平行四边形弯曲铰链机构和一个压电堆栈产生横向运动,以此来增加静摩擦力,减少动摩擦力^[21],使横向运动同时在 x (滑块运动方向)和 y (正压方向)两个方向上产生运动。同年,李建平等又提出了一种寄生型变摩擦力压电直线驱动器,使用桥式柔性铰链和一个压电叠堆产生横向运动,驱动转子转动^[22]。王书鹏等提出了一种变力偶旋转驱动器,也是采用横向运动原理,驱动器配备平行四边形柔性机构,以

产生一对可变量耦合来驱动转子^[23]。

现有黏滑驱动器大多数使用压电叠堆作驱动元件,压电叠堆的多层结构致使驱动器进一步小型化比较困难。此外,横向运动通常通过不对称挠曲铰链机构本身来实现,这意味着设计人员必须设计一些特殊的不对称结构,使弯曲铰链机构复杂化。因此,本文提出一种使用压电陶瓷片作驱动元件的等腰梯形压电黏滑驱动器,通过驱动足的横向运动,可以增加滑块前进阶段的静摩擦力,减小滑块回退阶段的动摩擦力。

1 结构和工作原理

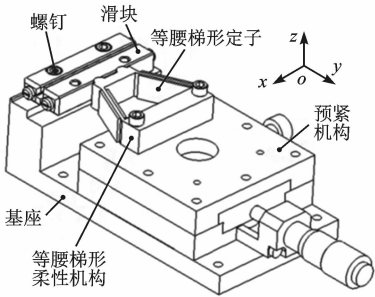
1.1 驱动器结构

本文提出的压电线性驱动器的结构如图 1a 所示,主要由基座、滑块、等腰梯形定子和预紧机构组成。滑块和预紧机构安装于基座上,安装有等腰梯形定子的预紧机构用于预加载等腰梯形定子和滑块。滑块为蒂业技凯公司生产的圆柱滚子滑块,工作行程约为 28 mm,滑块的质量约为 23.6 g。等腰梯形定子通电后产生横向运动,根据黏滑运动原理,驱动足推动滑块水平移动。用于提供滑块运动所需驱动力的等腰梯形定子包括等腰梯形柔性机构和 4 片矩形压电陶瓷片,详细结构如图 1b 所示。通过 2 个安装孔将等腰梯形柔性机构固定于预紧机构表面。左侧 2 块压电陶瓷片称为左弯曲压电陶瓷,通过环氧树脂粘合到左柔性梁的左、右两侧;另外 2 个陶瓷片称为右弯曲压电陶瓷,粘合到右柔性梁的左、右两侧。矩形压电陶瓷片的极化方向如图 1c 所示,压电陶瓷片的极化用“+”标记,4 片压电陶瓷片沿厚度方向极化,且具有相同的偏振方向。左驱动足用于驱动滑块向 x 正向移动,右驱动足用于驱动滑块向 x 负向移动。柔性梁与横轴之间有一个角度 θ ,通过调整角度 θ 来调整驱动足所需的横向运动。

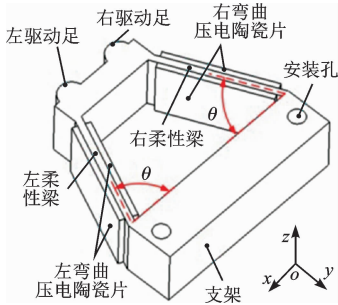
1.2 工作原理

本文提出的压电线性驱动器的工作原理和力分析如图 2 所示。初始状态下,预加载力 F 保持滑块和两驱动足相互接触。当时间 $t = t_0$ 时,滑块的预加载力 F 等于预加载机构产生的正压力 F_p ,左、右弯曲压电陶瓷的驱动信号为锯齿波。每个运动周期分为两个步骤:

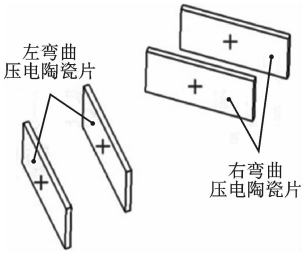
步骤 1:从 t_0 到 t_1 时刻,左、右弯曲压电陶瓷同



(a) 整机三维模型



(b) 定子三维模型



(c) 压电陶瓷片极化方式

图 1 等腰梯形压电线性驱动器结构

时缓慢偏振,使等腰梯形柔性机构的左驱动足获得 x 和 y 方向上的两个位移(l_x 和 l_y),产生的静摩擦力 F_s 推动滑块沿 x 轴正向前进 ΔL ;

步骤 2:从 t_1 到 t_2 时刻,左、右弯曲压电陶瓷同时快速恢复,因此等腰梯形柔性机构返回到初始位置,由于惯性力的作用,滑块将保持不动。

通过重复步骤 1 和 2,提出的压电线性驱动器逐步实现沿着 x 轴正向的大工作行程运动。

从图 2 可以看出,在 $t_0 \sim t_1$ 阶段,静摩擦力 F_s 是滑块前进的驱动力,左驱动足产生的 x 轴正向位移 l_x 用于推动滑块沿 x 轴正向移动;产生的 y 轴负向位移 l_y 用来增加产生静摩擦力 F_s 的正压力 F_p 。在步骤 2 中,由正压力 F_p 产生的动摩擦力 F_d 是阻力。动摩擦力 F_d 可定义如下

$$F_d = \mu_d F_p \quad (1)$$

式中: μ_d 是动摩擦系数。在 t_1 时刻,正压力 F_p 达到最大值,从 t_1 到 t_2 时刻,正压力 F_p 迅速降低到 F ,

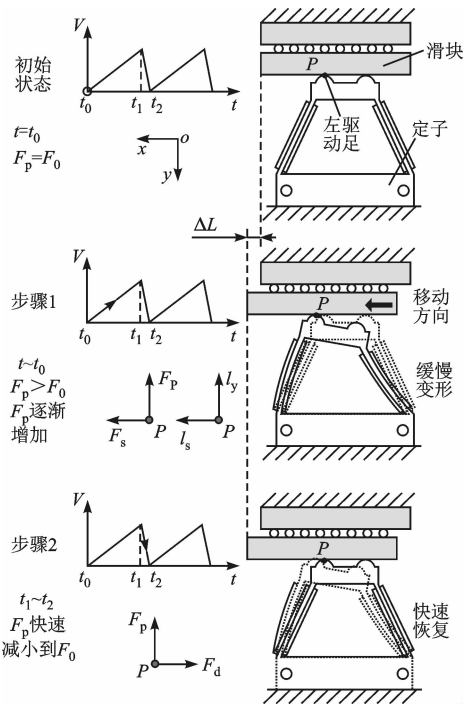


图 2 所提出的压电线性驱动器工作原理

根据式(1)可知,正压力 F_p 减小使产生回退的动摩擦力 F_d 减少,因此抑制了回退^[18]。

要实现沿着 x 轴负向的大行程运动时,只需提供如图 3 所示的锯齿波驱动电信号即可,等腰梯形定子的右驱动足驱动滑块沿 x 轴负向运动。

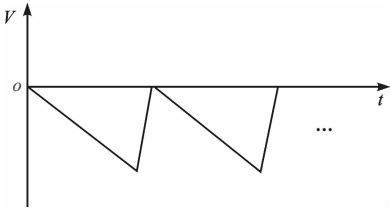


图 3 反向运动锯齿波驱动电信号

2 等腰梯形定子的优化

等腰梯形定子是驱动器的核心部件,为了使驱动足产生有效的横向运动,应调整等腰梯形柔性机构的两柔性梁角度 θ 。等腰梯形定子的主要结构参数如图 4 所示,两个半径相同($R=2.5 \text{ mm}$)的驱动足与滑块保持接触,等腰梯形柔性机构支架长度 L 和柔性梁与水平轴之间的角度 θ 是变量。应该注意的是, L 仅由角度 θ 确定。

使用有限元法分析这个角度调整过程。采用静态结构分析的方法,调整参数 θ ,可以获得不同角度下等腰梯形柔性机构驱动足的变形情况,如图 5 所示。等腰梯形柔性铰链机构的材料为 45 钢,密度 ρ

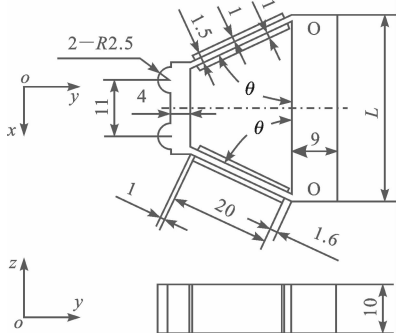


图4 等腰梯形定子的主要结构参数

$=7\,800\text{ kg/m}^3$, 杨氏模量 $E=2.06\times 10^{11}\text{ N/m}^2$, 泊松比 $\mu=0.33$ 。选择具有较高压电常数的陶瓷材料 PZT-4, 矩形压电陶瓷片厚度为 1 mm , 其物理参数如下

$$\mathbf{d} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 10.5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 10.5 & 0 & 0 \\ -4.1 & -4.1 & 14.1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (10^{10}\text{ C/N}) \quad (2)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}^T = \begin{bmatrix} 7.124 & 0 & 0 \\ 0 & 7.124 & 0 \\ 0 & 0 & 5.814 \end{bmatrix} \quad (\text{nF/m}) \quad (3)$$

$$\mathbf{c}^E = \begin{bmatrix} 13.2 & 7.1 & 7.3 & 0 & 0 & 0 \\ 7.1 & 13.2 & 7.3 & 0 & 0 & 0 \\ 7.3 & 7.3 & 11.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2.6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2.6 \end{bmatrix} \quad (10^{10}\text{ N/m}^2) \quad (4)$$

式中: $\mathbf{d}$ 、 $\mathbf{c}^E$ 和 $\boldsymbol{\varepsilon}^T$ 分别是压电矩阵、刚度矩阵和介电矩阵。

在静力学分析过程中, 在两个安装孔上施加固定约束, 给左、右弯曲压电陶瓷施加 100 V 电压, 定子的变形情况如图 5a 所示。驱动足的横向运动位移定义如下

$$U_{\text{sum}} = (U_x^2 + U_y^2)^{1/2} \quad (5)$$

式中: U_x 是 x 轴方向上驱动足的最大位移; U_y 是 y 轴方向上驱动足的最大位移; U_{sum} 是横向运动位移。

在不同的角度 θ 下, 左驱动足 x 和 y 向最大位移和横向运动位移见图 5b。随着角度 θ 的增加, U_{sum} 也随之增加; θ 的增加对 U_x 和 U_y 有相反的影响, 但是与 U_y 的下降相比, U_x 有更快的上升; 当 $\theta \geq 65^\circ$ 时, U_{sum} 基本保持不变。这个仿真分析结果证实了等腰梯形定子的驱动足可同时实现 x 和 y 向的运动, 与图 2 工作原理中的描述一致, 通过增加 y



(a) 等腰梯形定子网格划分

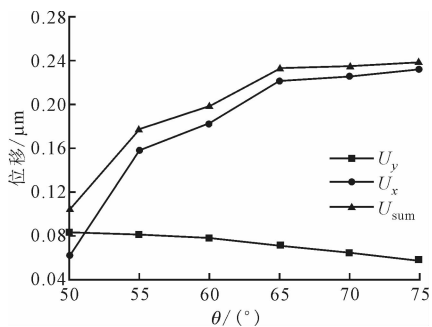
(b) 不同角度 θ 下左驱动足位移

图5 等腰梯形定子的有限元分析

负向位移来增加滑块前进阶段的静摩擦力, 通过减小 y 正向位移来减小滑块回退阶段的动摩擦力。

基于图 5 给出的仿真结果, 为达到驱动器小型化的目的, 我们选择 U_x 和 U_y 的位移均较大的 $\theta = 65^\circ$ 的等腰梯形柔性机构进行加工。

3 驱动器性能测试

3.1 搭建试验平台

定子的等腰梯形柔性机构是通过线切割方式加工而成的。搭建的试验测试系统如图 6 所示, 主要由计算机、信号发生器、功率放大器、激光位移传感器、样机组成。在该试验系统工作的情况下, 信号控制器产生锯齿波电压信号, 通过功率放大器 (RH41-D) 为 4 片压电陶瓷片放大该电压信号。采用 KEYENCE 公司的激光传感器 (LK-H020) 测量滑块的端部运动, 测得的所有数据都由计算机进行处理和保存。试验均采用占空比 100% 的锯齿波电信号进行控制。

3.2 性能测试

锁定力是给定预紧力 (正压力) F_p 条件下的最大静摩擦力, 并且通过沿水平方向悬挂砝码来测量, 直到滑块即将移动, 因此锁定力是定子和滑块之间的预紧力的函数。驱动器的输出性能随锁定力的改变而改变, 在 $U=100\text{ V}$ 驱动电压和 $f=10\text{ Hz}$ 驱动

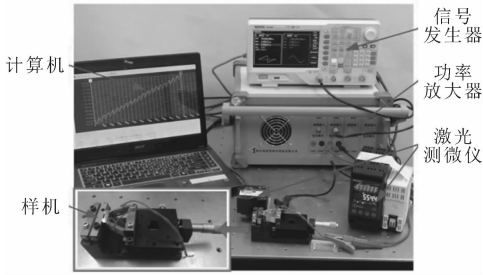


图 6 压电线性驱动器试验测试系统

频率下,不同锁定力位移-时间关系如图 7 所示。从图中可以看出,压电线性驱动器运行稳定,但每一步都能看到后退动作,这可能是由滑块和定子驱动足之间的动摩擦力造成的。如图 2 所示,从 t_1 到 t_2 时刻,压电陶瓷片迅速回复,滑块和驱动足之间的动摩擦力使滑块向后移动一小段距离,因此所提出的线性驱动器步距为图 7 中的 ΔL 。同时,从图 7 中还可看到,随着锁定力的增大,回退随之变大,这可用式(1)解释,锁定力增大即是预紧力(正压力) F_p 增大,导致动摩擦力 F_d 增大,从而导致回退变大。

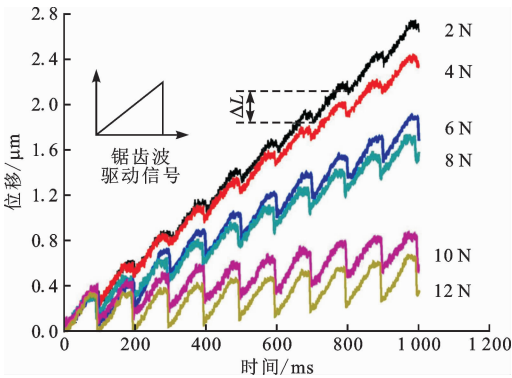


图 7 100 V、10 Hz 条件下驱动器不同锁定力位移和时间的关系

在 $U=100\text{ V}$ 和 $f=10\text{ Hz}$ 下,输出速度 v 与锁定力的关系如图 8 所示。随着锁定力的增加,输出速度先增加后减少;锁定力为 1 N 时,滑块的运动速度最大, $v=4.087\text{ }\mu\text{m/s}$;当锁定力达到 14 N 时,驱动器停止工作;在锁定力从 3 N 至 4.5 N 的范围内,速度下降较缓,输出性能相对较稳定。因此,为了避免驱动器工作一段时间之后,等腰梯形定子和滑块之间的磨损等因素可能会导致驱动器输出性能下降,同时为了使驱动器的获得相对较大推力,故选取 4 N 的锁定力做本次试验。

驱动电压与步距的关系如图 9 所示,驱动频率为 10 Hz。随着驱动电压升高,步距增加,同压电陶瓷片的偏振与其近似驱动电压成比例的事实一致。当驱动电压为 100 V 时,最大步距约为 $0.235\text{ }\mu\text{m}$ 。

当驱动器的驱动电压低于 30 V 时,驱动器不能稳定工作,因此驱动器的最小启动电压为 30 V,此时最小步距为 $0.026\text{ }\mu\text{m}$ 。最小步距即为本文提出的压电线性驱动器的分辨率,与平行四边形柔性铰链驱动器 $0.04\text{ }\mu\text{m}$ 的分辨率相比有所提高。

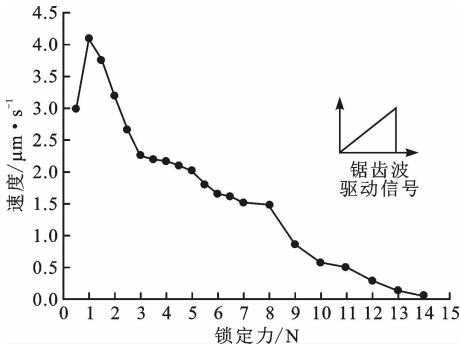


图 8 100 V、10 Hz 条件下驱动器输出速度与锁定力的关系

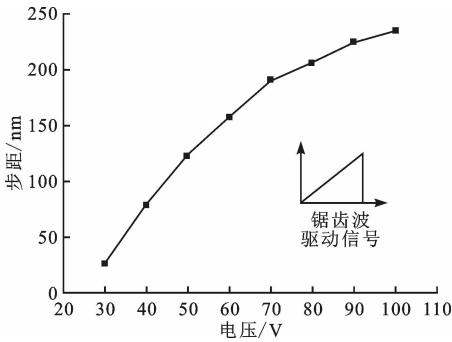


图 9 10 Hz 驱动频率下驱动器步距与电压的关系

驱动频率是影响提出的压电线性驱动器性能的另一个重要因素。图 10 显示了在 100 V 驱动电压下,步距与驱动频率之间的关系以及输出速度与驱动频率之间的关系。在 $f<3\text{ kHz}$ 的情况下,步距保持在 $0.2\text{ }\mu\text{m}$ 附近,此时驱动频率是使运动速度升高的主要原因,滑块移动速度随着驱动频率 f 的增加而增加。驱动器的输出速度与驱动频率的线性关系可以用下式表示

$$v = 0.196f + 0.854 \tag{6}$$

此时,输出速度 v 和驱动频率 f 之间的线性拟合度 $R^2=0.996$,这证实了所提出的驱动器的稳定性。当 $f=3\text{ kHz}$ 时,运动速度最大为 $601.803\text{ }\mu\text{m/s}$;当 $f>3\text{ kHz}$ 时,步距快速下降,这可能是由于压电陶瓷片偏振时间太短而不能偏转到理论位置造成的,因此滑块移动速度随之下降。

本文驱动器最高输出速度低于平行四边形柔性铰链驱动器 14.25 mm/s 的运动速度,主要原因可能是,本文设计的定子采用压电陶瓷片代替压电叠

堆,在非共振条件下,压电陶瓷片所产生的位移低于压电叠堆。本文的目的之一便是采用压电陶瓷片代替压电叠堆,因此在今后的研究中,提高驱动器的运动速度是要研究的重点。

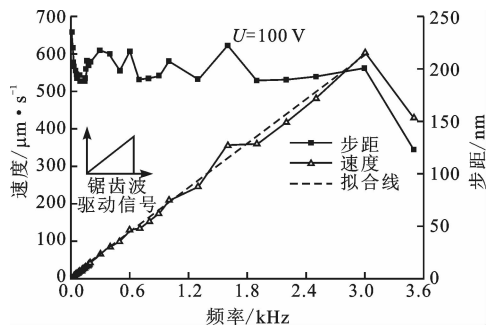


图10 100 V驱动电压下驱动器输出速度、步距和频率之间的关系

图11给出了驱动器输出速度与负载的关系。在试验过程中,将标准砝码通过一根铜线系在滑块的背面充当负载来测量所提出的压电线性驱动器的输出力。当负载增加时,输出速度从 $2.346 \mu\text{m/s}$ 减小到 $0.047 \mu\text{m/s}$,而当砝码质量大于280 g后,驱动器输出不稳定。由此得出,所提出的压电线性驱动器的最大输出力约为2.8 N,略低于平行四边形柔性铰链驱动器3.43 N的最大输出力,可能原因是,本文采用的是输出力远小于压电叠堆的压电陶瓷片作驱动源。采用压电陶瓷片取代压电叠堆便于小型化也是本文的研究目的之一。

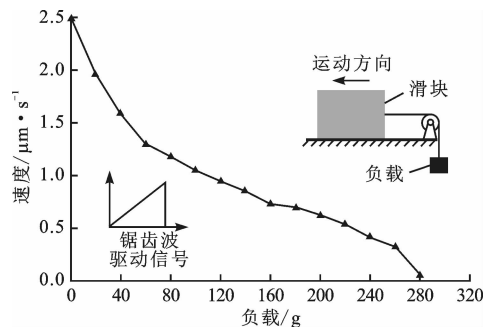


图11 100 V、10 Hz条件下驱动器输出速度与负载的关系

4 结论

本文提出了一种等腰梯形压电黏滑直线驱动器。通过粘贴在等腰梯形柔性斜梁两侧的4片矩形压电陶瓷片使驱动足驱动滑块,以达到基于黏滑运动的高分辨率和大行程线性运动。调整等腰梯形柔性斜梁角度可使驱动足产生横向运动。通过等腰梯形柔性铰链的驱动足的横向运动,增加使滑块前进

的静摩擦力,减少回退动摩擦力。试验结果表明,该样机在4 N锁定力下最大输出速度为 $601.803 \mu\text{m/s}$,最大输出力为2.8 N,最小步进距离为 $0.026 \mu\text{m}$ 。今后的工作重点是在提高驱动器的输出速度和输出负载的同时进一步使结构小型化。

参考文献:

- [1] ZHU W L, ZHU Z, HE Y, et al. Development of a novel 2-D vibration-assisted compliant cutting system for surface texturing [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2017, 22(4): 1796-1806.
- [2] 董景石,程光明,沈传亮,等. 压电驱动型胰岛素泵的研究 [J]. 西安交通大学学报, 2007, 41(5): 602-605.
DONG Jingshi, CHENG Guangming, SHEN Chuanliang, et al. Piezoelectric insulin pump [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2007, 41(5): 602-605.
- [3] UCHINO K. Piezoelectric actuator renaissance [J]. Energy Harvesting & Systems, 2015, 88(3): 342-355.
- [4] GUO J, CHEE S K, YANO T, et al. Micro-vibration stage using piezo actuators [J]. Sensors & Actuators: A Physical, 2013, 194(5): 119-127.
- [5] ZHANG Y, TAN K K, HUANG S. Vision-servo system for automated cell injection [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(1): 231-238.
- [6] YONG Y K, MOHEIMANI S O, KENTON B J, et al. High-speed flexure-guided nanopositioning: mechanical design and control issues [J]. Review of Scientific Instruments, 2012, 83(12): 802-843.
- [7] POLIT S, DONG Jingyan. Development of a high-bandwidth XY nanopositioning stage for high-rate micro-nanomanufacturing [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2011, 16(4): 724-733.
- [8] YONG Y K, MOHEIMANI S O R. Design of an inertially counterbalanced Z-nanopositioner for high-speed atomic force microscopy [J]. IEEE Transactions on Nanotechnology, 2013, 12(2): 137-145.
- [9] LIU Y, YANG X, CHEN W, et al. A bonded-type piezoelectric actuator using the first and second bending vibration modes [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(3): 1676-1683.
- [10] LIU Y, CHEN W, YANG X, et al. A rotary piezoelectric actuator using the third and fourth bending vibration modes [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(8): 4366-4373.
- [11] 赵宏伟,吴博达,杨志刚,等. 尺蠖型压电旋转驱动

- 器钳位特性分析 [J]. 西安交通大学学报, 2007, 41(9): 1022-1025.
- ZHAO Hongwei, WU Boda, YANG Zhigang, et al. Clamping performance for inchworm-type piezoelectric rotary actuator [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2007, 41(9): 1022-1025.
- [12] SHAO S, SONG S, CHEN N, et al. Structure and control strategy for a piezoelectric inchworm actuator equipped with MEMS ridges [J]. Sensors & Actuators: A Physical, 2017, 264: 40-50.
- [13] SALISBURY S P, WAECHTER D F. Design considerations for complementary inchworm actuators [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2006, 11(3): 265-272.
- [14] TORII A, ITATSU Y. An inchworm using levitation caused by vertical vibration [J]. IEEJ Transactions on Electronics Information & Systems, 2015, 190(4): 19-25.
- [15] PARK M H, CHONG H H, LEE B H, et al. Study on the new type of piezoelectric actuator utilizing smooth impact drive mechanism [J]. Ferroelectrics, 2016, 500(1): 218-228.
- [16] 曾平, 孙淑杰, 李立安, 等. 双向旋转非对称惯性压电驱动器理论与试验研究 [J]. 西安交通大学学报, 2013, 47(12): 90-94.
- ZENG Ping, SUN Shujie, LI Li'an, et al. Theoretical and experimental analysis on bidirectional rotary asymmetric piezoelectric actuator [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2013, 47(12): 90-94.
- [17] EDELER C. Measurements and potential applications of force-control method for stick-slip-driven nanohandling robots [J]. Key Engineering Materials, 2011, 467/468/469: 1556-1561.
- [18] CHENG T, HE M, LI H, et al. A novel trapezoid-type stick-slip piezoelectric linear actuator using right circular flexure hinge mechanism [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, PP(99): 1.
- [19] CHU C L, FAN S H. A novel long-travel piezoelectric-driven linear nanopositioning stage [J]. Precision Engineering, 2006, 30(1): 85-95.
- [20] HOLUB O, SPILLER M, HURAK Z. Stick-slip based micropositioning STage for transmission electron microscope [C] // IEEE International Workshop on Advanced Motion Control. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2006: 484-487.
- [21] LI J, ZHOU X, ZHAO H, et al. Design and experimental performances of a piezoelectric linear actuator by means of lateral motion [J]. Smart Materials and Structures, 2015, 24(6): 065007.
- [22] LI J, ZHOU X, ZHAO H, et al. Design and experimental tests of a dual-servo piezoelectric nanopositioning stage for rotary motion [J]. Review of Scientific Instruments, 2015, 86(4): 045002.
- [23] WANG S, RONG W, WANG L, et al. Design, analysis and experimental performance of a novel stick-slip type piezoelectric rotary actuator based on variable force couple driving [J]. Smart Material and Structures, 2017, 26(5): 055005.

(编辑 杜秀杰)

(上接第 43 页)

- [18] BOUCHAMA Z, HARMAS M N. Optimal robust adaptive fuzzy synergetic power system stabilizer design [J]. Electric Power Systems Research, 2012, 83(1): 170-175.
- [19] 王斌, 徐俊, 曹秉刚, 等. 升压型电池-超级电容复合电源的自适应滑模控制 [J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(10): 36-41.
- WANG Bin, XU Jun, CAO Binggang, et al. An adaptive sliding-mode control strategy for hybrid power sources of battery-supercapacitor with a boost converter [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(10): 36-41.
- [20] ABDERREZEK H, AISSA A, HARMAS M N. Adaptive non-singular terminal synergetic power system control using PSO [C] // Proceedings of the International Conference on Modelling, Identification and Control. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2017: 449-454.

(编辑 刘杨)