

文章编号 1004-924X(2018)05-1124-09

黏滑驱动式小型精密运动平台

时运来, 娄成树*, 张 军, 程丁继

(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:为满足微纳操作系统对精密驱动技术的需求, 本文提出了一种基于黏滑原理的小型精密运动平台。该平台将柔性铰链、惯性质量块以及弹性元件结合为独立的定子基座, 并与压电叠堆、陶瓷球固连为定子, 安装在平台基座底部, 通过螺钉调节弹性元件端部垂直方向的位置, 就可以改变定子与移动台间的预压力, 进而获得最佳的驱动力。为研究黏滑驱动的运动机理, 分析各参数对平台运动的影响, 进行了力学建模; 而摩擦力作为黏滑驱动的关键因素, 为了能准确地表达黏滑驱动的摩擦机理, 在力学建模中引入了 LuGre 摩擦模型, 并利用 Matlab/Simulink 软件进行了仿真分析。设计加工的黏滑驱动平台的整体尺寸为 40 mm×40 mm×18 mm, 质量为 32 g。试验表明: 该平台最小可实现 10 nm 的运动步长, 速度最高可达 2.5 mm/s, 行程为 22 mm。

关键词:黏滑驱动; 压电叠堆; 平台; 精密运动; 力学分析

中图分类号: TP242 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20182605.1124

Small precision motion platform based on stick-slip driving principle

SHI Yun-lai, LOU Cheng-shu*, ZHANG Jun, CHENG Ding-ji

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

* Corresponding author, E-mail: 1248909930@qq.com

Abstract: To realize precise actuation of micro/nano-manipulation systems, a type of nano-motion platform based on the stick-slip principle was designed. Flexure hinges, a mass block, and an elastic component were integrated as an independent stator base. The stator consisted of a stator base, a piezoelectric stack, and a ceramic ball installed in the base bottom. The vertical position of the end of the elastic component can be adjusted by rotating an adjustment screw to change the pre-pressure between the stator and moving platform. Thus, the optimal driving force can be obtained. Because of the motion mechanisms of stick-slip driving and the influence of various parameters on the platform motion, mechanical modeling was carried out. Friction force was of key significance for stick-slip driving. In order to accurately express the friction mechanism of stick-slip driving, the LuGre friction model was introduced into the mechanical modeling. The simulation analysis was performed using MATLAB/Simulink software. The overall size of the stick-slip driving platform is 40 mm×40 mm×18 mm, and its mass is 32 g. Experiments show that the platform can achieve a minimum step size of 10 nm, its highest speed is 2.5 mm/s, and its stroke is 22 mm.

Key words: stick-slip driving; piezoelectric stack; platform; precision motion; mechanical analysis

收稿日期: 2017-11-23; 修订日期: 2018-01-02.

基金项目: 南京航空航天大学研究生创新基地(实验室)开放基金资助项目(No. kfjj20160102); 航空科学基金资助项目(No. 2016ZA52014); 江苏高校优势学科建设工程基金资助

1 引言

微驱动技术作为纳米操作系统的关键技术之一,在生物工程、微细加工、超精密加工及机械微组装,微机电系统(Micro Electro-mechanical System, MEMS)等领域得到了广泛应用^[1-3]。目前,在对微观对象进行操作的过程中,通常需要辅以高精度的显微系统,例如扫描电子显微镜(SEM)、原子力显微镜(AFM)等。由于显微系统的腔体空间有限,其驱动装置的尺寸要求越来越高。因此,该类具有纳米级分辨率、毫米级运动行程以及小尺寸的运动平台及其驱动技术成为纳米操作系统中亟待解决的关键技术问题之一。

目前,现有的微驱动技术基本可分为四类:宏微混合式驱动^[4]、尺蠖式驱动^[5]、超声电机驱动^[6]、黏滑式驱动^[7]。其中,基于黏滑驱动原理的作动器具有结构灵活、分辨率高、行程大等优点,它结合压电材料的特殊性能(无磁性等),在国内外受到了广泛的应用。从20世纪80年代,黏滑原理只是作为由摩擦引起的耗散力,一直停留在如何避免此类耗散力对电机工作中引起的能量消耗以及失稳等问题上。90年代,黏滑驱动开始逐渐应用于精密定位平台的研究上,J-M. Breguet等人率先研制的一维运动平台^[8],在 $\pm 133\text{ V}$ 的电压作用下可实现 $\pm 187\text{ nm}$ 的运动量, $\pm 7.5\text{ mm}$ 的运动范围以及 200 mN 的驱动力。目前,德国SmarAct公司^[9]研制出的系列基于黏滑驱动式的平台系统,行程最大可达 100 mm ,可实现亚纳米级分辨率以及 10 mm/s 的运动速度。该系列产品结构紧凑、运动精度高,但价格非常昂贵。目前,国内尚无此类产品问世,仅少数院校和研究所在开展此方面的研究工作。其中,哈尔滨工业大学的张世忠^[10]以及苏州大学的杨飞雨^[11]、李宗伟^[12]等人取得了很好的研究成果。

对于基于黏滑驱动原理的小型精密定位平台系统,主要难点在于平台作动机构在压电叠堆的作动方向和预压力施加方向上的解耦,同时为了实现运动平台的微型化,在整体结构设计上最好做到各功能部件的一体化。由此,本文综合国内外基于黏滑驱动的优点,设计了一种结构简单紧凑的小型运动平台,并建立了平台的静力学和动力学模型,进行了系列的仿真和试验研究。

2 平台结构设计

2.1 驱动原理以及致动器的选择

本文所设计的单自由度运动平台是基于黏滑原理进行驱动的,即利用接触面间动静摩擦相互交替来实现步进位移。如图1所示,在平台由 a 变化至 b 的过程中,随着电压缓慢上升,压电叠堆逐步伸长,进而推动前端惯性质量块以及陶瓷球向前移动,由于陶瓷球与移动台间相对运动速度很小,可忽略不计,因此接触面间摩擦力可近似为静摩擦,移动台便在陶瓷球带动下向前推进;而当由 b 变化至 c 的过程中,压电叠堆快速收回,惯性质量块在叠堆的带动下后退,由于接触面间相对速度突然变大,摩擦力由静摩擦转为动摩擦,而移动台由于惯性保持原有的运动状态,因此移动台整体前进了 Δs 的距离。在该周期信号的连续驱动下,移动台便可以向右连续推进。同理可得,当改变驱动信号,由 ab 慢升, bc 快降转为 ab 快升, bc 慢降时,摩擦力和移动台的运动方向也将随之改变。

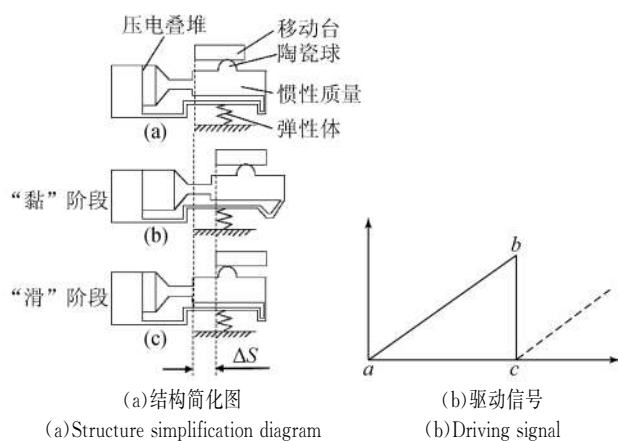


图1 平台驱动工作原理图

Fig. 1 Working principle of platform driver

在某些应用场合,如扫描电子显微镜(SEM),不仅对运动平台的尺寸、精度有要求,同时需要平台自身无磁性。而压电叠堆所具有的响应快、分辨率高、无磁场和尺寸小等优点,能够充分满足上述要求,故本文采用压电叠堆作为运动平台的驱动元件。在充分考虑刚度、尺寸以及最大驱动电压和输出位移等指标的情况下,最终采

用丹麦 Noliac 公司型号为 NAC2003 的压电叠堆。该压电叠堆尺寸为 $5\text{ mm} \times 5\text{ mm} \times 2\text{ mm}$, 密度为 7.85 kg/m^3 , 在最大驱动电压 60 V 下的输出位移为 $2.6\text{ }\mu\text{m}$, 刚度可达 $350\text{ N}/\mu\text{m}$ 。

2.2 定子及平台结构设计

定子结构如图 2 所示, 定子主要由压电叠堆、定子基座以及陶瓷球所构成。其中定子基座作为定子的核心组成部分, 可分为三个部分: 柔性铰链、惯性质量块以及刚柔耦合弹性力传递单元。柔性铰链从功能上又可分为三种: 传动柔性铰链、预压力调整柔性铰链和复合柔性铰链。其中, 传动柔性铰链主要起到传递输出位移的目的; 预压力调整柔性铰链是为了配合调节预压力; 而复合柔性铰链, 是对上述两种铰链的补偿。在位移传递过程中, 复合柔性铰链在传动方向的刚度过小, 会影响定子位移的输出, 从而导致平台运动性能变差; 而在预压力调整过程中, 复合柔性铰链垂直于传动方向上的刚度过大, 会阻碍预压力的传递, 使调节效果变差。因此在复合柔性铰链的设计过程中, 既要保证垂直于传动方向的刚度较小, 能满足预压力的调节; 在传动方向上又要具有足够大的刚度, 满足传动的需求。

在黏滑驱动中, 如果接触面两端皆呈刚性, 则“滑”将作为主体, 移动台无法运动; 反之, 如果两方都呈柔性, 则“黏”将作为主体, 移动台将随定子做前后反复运动, 无法有效输出。因此设计过程中, 要保证接触面间的刚柔耦合。由于移动台在运动过程中, 同时得起到承担负载的作用, 假使移动台作为柔性体, 将改变接触面预压力, 导致工作状态改变, 移动台运动不稳定。因此本文最终采取移动台作为刚性体, 定子作为柔性体。同时, 如图 2 所示, 本文在定子基座底部设计了一种曲线弹性体, 作为弹性力传递单元保持垂直方向上的柔性。

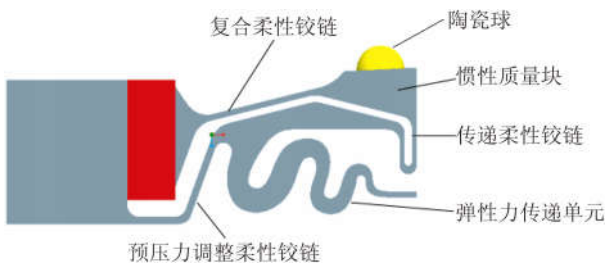
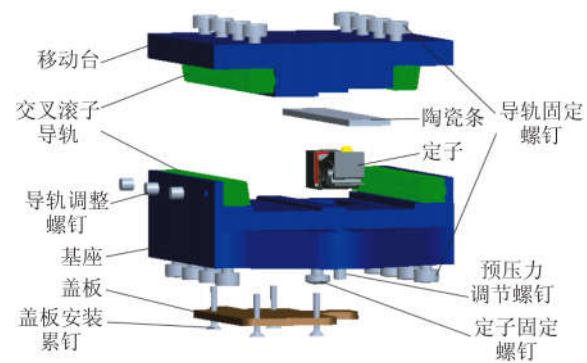


图 2 定子结构图

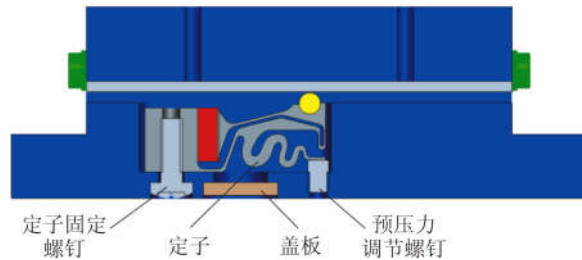
Fig. 2 Structure of stator

平台的整体结构设计如图 3(a)和 3(b)所示。其中定子通过螺钉连接安装于基座底部; 移动台下方则在相应位置贴有陶瓷条, 与定子前端陶瓷球配合进行驱动; 基座与移动台通过交叉滚子导轨相连为整体, 并且为了防止灰尘以及电源线晃动对平台工作造成影响, 在其底部安装盖板, 最终形成完整的运动平台。此外, 通过添加导轨调整螺钉进行导轨位置的调整, 以及利用基座底部的预压力调节螺钉调节移动台与定子间的预压力, 以达到最佳的驱动方式。



(a) 装配图

(a) Overview



(b) 剖面图

(b) Section-view

图 3 平台整体结构图

Fig. 3 Overall structure of single platform

3 平台力学模型分析

为了实现精密运动输出, 在平台的设计过程中, 必须对平台整体设计参数进行详细分析, 以确定例如预压力、移动台质量等对平台运动性能的影响, 从而提高平台的运动性能。

3.1 静力学模型

为确定压电叠堆与传动柔性铰链间的相互作用力 F 以及输出位移 x 等设计参数, 建立了平台的静力学模型。在此黏滑系统中, 定子与平台基

座固连一起,而定子前端质量块与陶瓷球在预压力作用下与移动台紧压一起,质量块在压电叠堆作用下实现对移动台的驱动。然而压电叠堆在位移输出过程中会受到接触面间摩擦力的反作用,造成叠堆位移输出的变化,因此本文针对压电叠堆与传动柔性机构分别建立静力学方程。其中,传动部分由定子基座中的复合柔性铰链、质量块以及传动柔性铰链组成。在此,将定子简化为一个单自由度弹簧-质量系统。

图 4 为平台的等效静力学模型,针对压电叠堆建立静力学方程,则压电叠堆与传动柔性机构间的接触力可表示为:

$$F = (F_0 - F_p) - k_p \cdot x = k_p \cdot (\Delta L_0 - x) - F_p, \quad (1)$$

其中: F 为压电叠堆与传动柔性机构间的相互作用力(不包括预紧力), F_0 为压电叠堆在最大电压下的驱动力, F_p 为安装压电叠堆时所施加的预紧力, k_p 为压电叠堆刚度, x 为定子实际输出位移, ΔL_0 为压电叠堆在自由状态下的输出位移。

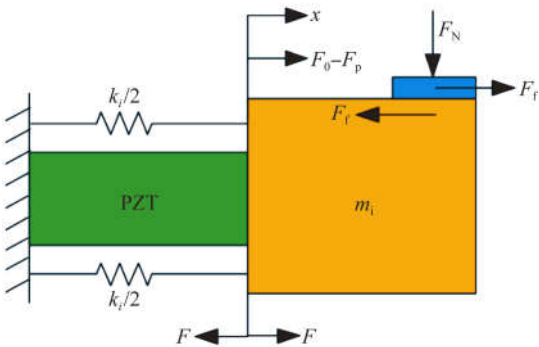


图 4 平台静力学模型

Fig. 4 Statics model of platform

针对柔性传动机构建立力学方程,压电叠堆与柔性传动机构间的接触力可表示为:

$$F = k_i \cdot x + F_f = k_i \cdot x + F_N \cdot \mu, \quad (2)$$

其中: k_i 为柔性传动机构的刚度, F_f 为定子与移动台间的摩擦力, F_N 为定子与移动台间的正压力, μ 为接触面间的摩擦系数。

通过联立方程(1)和(2),可得压电叠堆与柔性传动机构间的相互作用力 F 以及共同输出位移 x :

$$F = (k_p \cdot \Delta L_0 - F_p - F_f) \cdot k_i / (k_i + k_p) + F_f, \quad (3)$$

$$x = \frac{k_p \cdot \Delta L_0 - F_p - F_f}{k_i + k_p}. \quad (4)$$

3.2 动力学模型及其仿真

由前文可知,平台结构主要由驱动部分、柔性传动机构和移动台三部分构成。压电叠堆与柔性传动机构均可简化为单自由度质量-阻尼-弹簧系统。摩擦力作为平台直接驱动力,摩擦模型的选择将起到至关重要的作用。考虑到黏滑原理包含“黏”和“滑”两种状态,且在运动过程中两个状态的频繁切换,最终采用 LuGre 模型^[13-14]。该模型利用鬃毛效应的思想,认为在微观接触表面存在大量具有随机行为的弹性鬃毛,基于鬃毛的平均变形进行建模,它能够充分反映动、静摩擦状态以及两者间的过渡过程,具有非常高的精准性。由此建立了黏滑驱动平台的动力学模型,如图 5 所示。

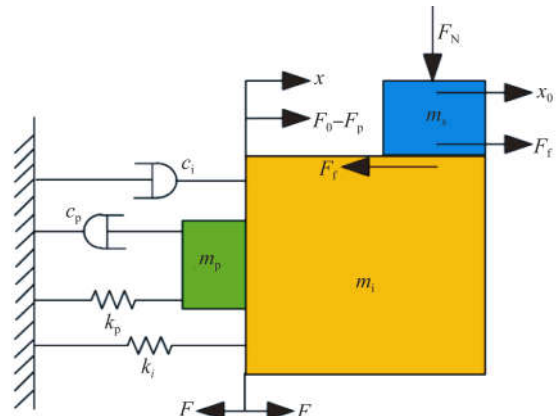


图 5 平台动力学模型

Fig. 5 Kinetic model of platform

压电叠堆的简化模型由等效质量 m_p 、刚度 k_p 和阻尼 c_p 组成;同理,定子中的柔性传动机构也可简化为 m_i , k_i 和 c_i 。根据图 5 所示动力学模型,分别对压电叠堆、柔性传动机构进行数学建模,得到如下运动方程:

压电叠堆动力学建模:

$$m_p \ddot{x} + c_p \dot{x} + k_p x = f - F_p - F. \quad (5)$$

柔性传动机构动力学建模:

$$m_i \ddot{x} + c_i \dot{x} + k_i x = F - F_f. \quad (6)$$

移动台动力学模型:

$$m_s \ddot{x}_0 = F_f. \quad (7)$$

所采用的 LuGre 摩擦模型为^[13-14]:

$$F_f = \sigma_0 z + \sigma_1 \dot{z} + \sigma_2 v, \quad (8)$$

$$\dot{z} = v - \frac{\sigma_0}{g(v)} z |v|, \quad (9)$$

$$g(v) = \frac{F_{fc} + (F_{fs} - F_{fc}) e^{[-(v/v_s)]}}{\sigma_0}, \quad (10)$$

$$v = \dot{x} - \dot{x}_0, \quad (11)$$

其中: σ_0 为鬃毛刚度; σ_1 为微观阻尼系数; σ_2 为黏性摩擦系数; z 为鬃毛平均变形量; F_{fs} 为最大静摩擦力; F_{fc} 为动摩擦力; v 为惯性质量块与载物台之间的相对运动速度; v_s 为发生 Stribeck 效应下的速度; x, x_0 分别为惯性质量块和载物台的位移; m_s 为载物台质量; F_N 为接触面间的正压力; 其中 F_{fs}, F_{fc} 是 LuGre 摩擦模型结合库伦摩擦的部分, 其值与正压力 F_N 、摩擦系数 μ 呈线性关系, 即 $F_i = \mu F_N$ 。

此外在参数设置方面, 压电叠堆的选型已经确定; 而定子基座采用弹性好、强度高的 65Mn, 陶瓷球采用耐磨性好的氧化铝, 同时结合 Proe 三维建模软件得到柔性传动机构的质量为 4.1 g, 刚度为 0.206 N/ μm , 移动台的质量为 16.0 g; 摩擦系数取 0.1。

根据式(5)~式(11)以及所设置参数, 利用 Matlab/Simulink 进行动力学仿真, 分别研究了系统在不同预压力下对载物台位移输出的影响, 以及不同惯块的质量对整个系统振荡的影响。

工作环境设为在空载情况下, 驱动电压为 60 V, 频率为 1 Hz, 下降时间为 100 ms 的锯齿波信号。在该环境下, 分别施加 1, 1.5, 2 和 3 N 的系列预压力, 仿真结果如图 6 所示。从图 6 可以看出, 步长随着正压力的增加而减小, 当预压力达到 3 N 时平台的输出位移基本为 0。由于预压力与负载的施加都是在垂直面上, 因此适当地减小预压力有助于提高平台的负载能力。

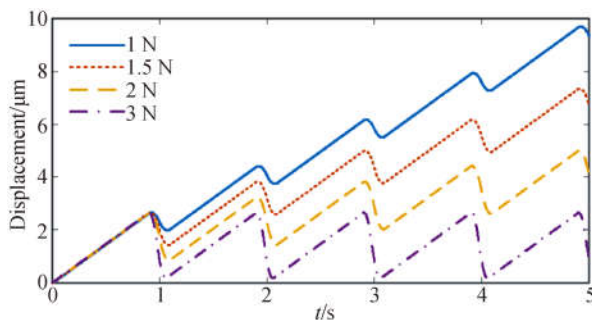


图 6 平台运动随预压力的变化

Fig. 6 Movement of platform vs. preload

如图 7 所示, 在不改变其它参数的情况下, 随着移动台质量由 $m_s/2$ 逐步递增至 $2m_s$ 的过程中, 平台的步长也随之增加。然而, 移动台在“黏”过程中随质量块前进的距离并没增加, 步长增大的主要原因在于“滑”过程中移动台回程距离的减少。这是由于移动台质量的增加使其惯性变大, 从而保持原有运动状态的能力变强, 因此减小了回程, 增加了步长。

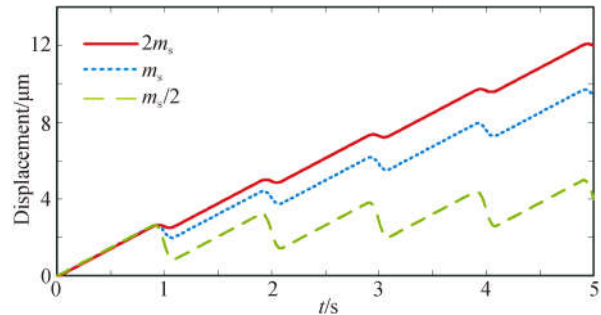


图 7 移动台质量对平台运动的影响

Fig. 7 Movement of platform vs. mass of mobile station

4 性能测试

本文制作的小型精密运动平台如图 8 所示, 整体尺寸为 40 mm \times 40 mm \times 18 mm, 质量约为 32 g, 最大行程可达 22 mm。为了能够精确测量平台的各项性能, 搭建了如图 9 所示的测试平台系统。系统采用 Tektronix 公司 AFG3022C 型信号发生器产生驱动信号, 然后通过功率放大器放大驱动信号; 接着利用 TDS1012B-SC 的示波器来监测平台输入信号的变化; 最后通过 LG-2MM 型激光测微仪对平台进行位移测试。



图 8 小型精密运动平台实物图

Fig. 8 Prototype of small precision motion platform

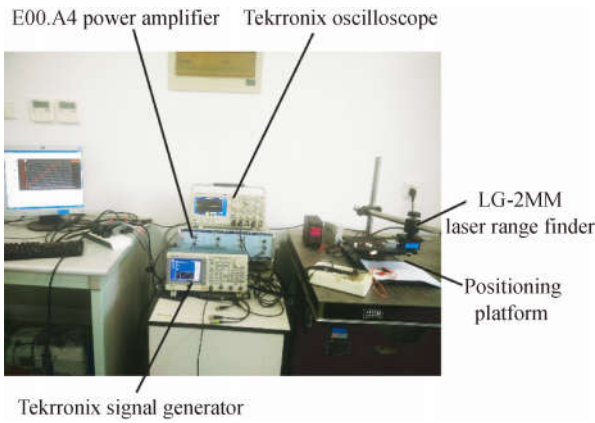


图 9 实验平台

Fig. 9 Experimental platform

4.1 位移测试

平台在电压为 60 V, 频率为 1 Hz 的锯齿波信号驱动下, 位移测试结果如图 10 所示。平台正向运动的平均步长为 1.841 μm , 反向的平均步长为 1.766 μm , 两者相差 0.075 μm 。再利用仿真得到的平台正反向曲线与平台实验数据进行对比: 从运动特征上, 平台步长在阶跃信号的影响下, 均存在一个滑动过程, 即短暂的回程; 从位移数据来看, 实验测得步长与仿真步长相差 8 nm, 基本一致。从驱动信号来看, 平台前后步距不一致主要是由于系统上升与下降部分存在不同的响应时间所导致。

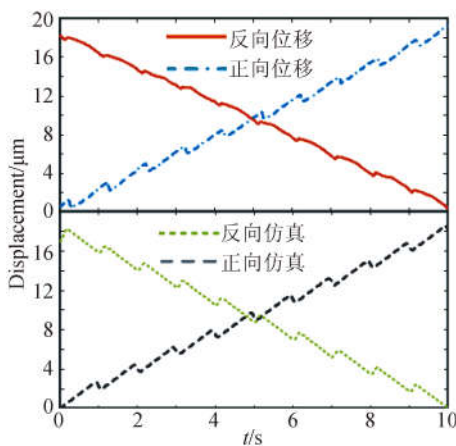


图 10 正反向位移及仿真曲线

Fig. 10 Forward and backward displacements and simulation curves

4.2 速度测试

从工作原理上, 平台运动速度与电压和频率成正比。但在实际工作过程中, 由于平台的步长会受到系统响应时间的影响, 当频率提高到一定值之后, 系统响应无法跟上驱动信号, 此时黏滑系统实现“滑”过程的阶跃时间与“黏”过程的斜坡运动时间将由系统响应时间决定, 成为完全对称的三角波信号, 平台将不再运动。

由于机械动力学模型的构架基本确定, 所以只能从电学上改变系统响应时间。图 11 所示为压电叠堆电学模型。

压电叠堆等效电学公式为^[15]:

$$\frac{V_1 - V_0}{R_1} = \frac{V_0}{R_2} + C \frac{dV_0}{dt} \quad (12)$$

压电叠堆两端伸长量 $l_0(t)$ 为:

$$l_0(t) = n \cdot V_0 \cdot d_{33} \quad (13)$$

由于压电叠堆本身电阻 $R_2 \gg R_1$, 所以经过拉普拉斯变化后, 可近似得到压电叠堆两端伸长量 $l_0(t)$ 与充电电压 V_1 之间的传递函数^[16]:

$$\frac{l_0(s)}{V_1(s)} = n \cdot d_{33} \cdot \frac{1}{R_1 \cdot C \cdot s + 1} \quad (14)$$

其中: V_1 为外界对压电叠堆施加的充电电压, V_0 为压电叠堆的两端电压, R_1 为信号发生器和功放等效电阻, R_2 和 C 为压电叠堆的等效电阻和电容, $l_0(t)$ 为压电叠堆两端伸长量, n 为压电叠堆的压电陶瓷层数, d_{33} 为压电陶瓷在轴向上的压电常数。

从式(14)中可以看出, 压电叠堆的电学模型为一个典型的惯性系统, 其系统响应时间由系统的等效电容 C 和信号发生器和功放等效电阻 R_1 所决定, 因此减小系统电容或者电阻, 能有效地提高平台性能。为此, 在平台系统中专门设计了一个充放电回路, 来减小系统的响应时间。

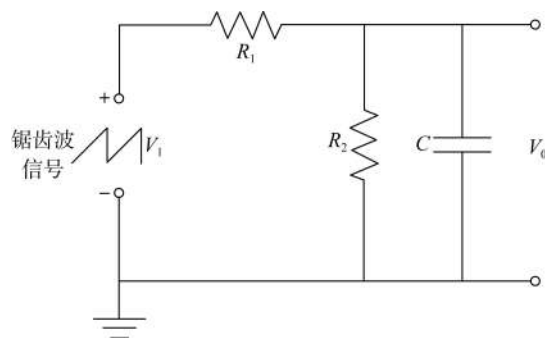


图 11 压电叠堆电学模型

Fig. 11 Electrical model of piezoelectric ceramics

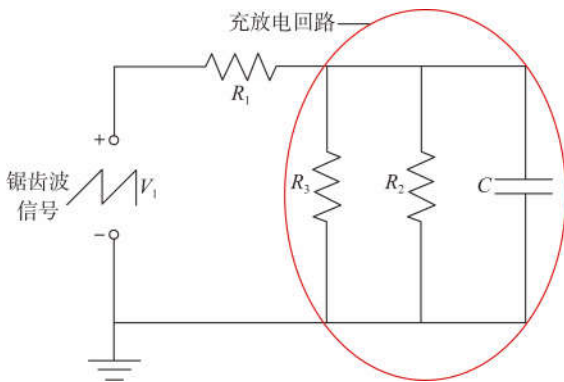


图 12 充放电回路工作原理

Fig. 12 Working principle of charge and discharge

充放电回路的工作原理如图 12 所示,通过并联一个小电阻 R_3 ,在减小系统整体阻抗的同时,也能让电容 C 快速地充放电,起到了减小系统响应时间的作用。如图 13 和图 14 所示,经实验证明,在添加该电路后平台驱动信号得到了改善,并且运动速度得到了很大的提高。

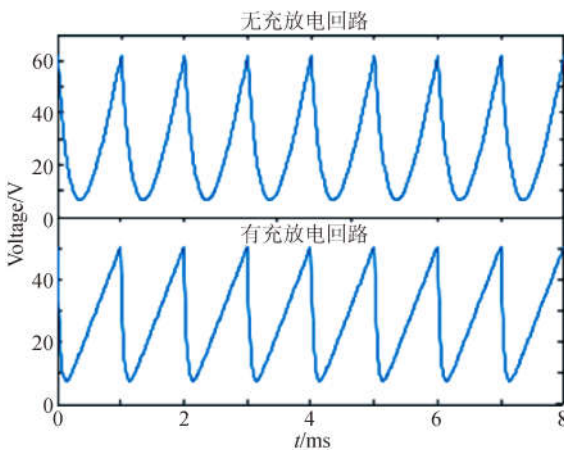


图 13 充放电回路对驱动信号的影响

Fig. 13 Influence of charge and discharge circuit on driving signal

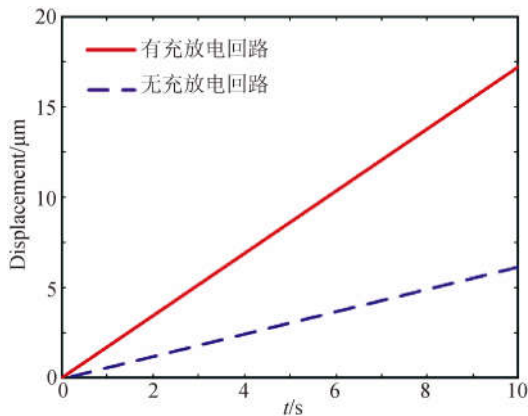


图 14 1 kHz 下有无充放电回路位移图

Fig. 14 Displacement diagram with charge and discharge circuit at working frequency of 1 kHz

从图 15 观察可得,无论正反向运动,随着驱动频率的上升,平台的速度先是与驱动频率呈线性增加,到了某一峰点之后,平台速度迅速下降。这是由于起初,系统响应时间远快于驱动信号周期,因此平台速度与驱动频率大致呈线性关系;随着驱动频率的进一步提高,系统响应逐渐变差,不再呈现锯齿波特征,由此平台速度逐渐下降。由图 15 可得,平台正向运动的最快速度发生在 2 200 Hz,为 2.5 mm/s;反向运动的最快速度在 1 400 Hz,为 1.8 mm/s。

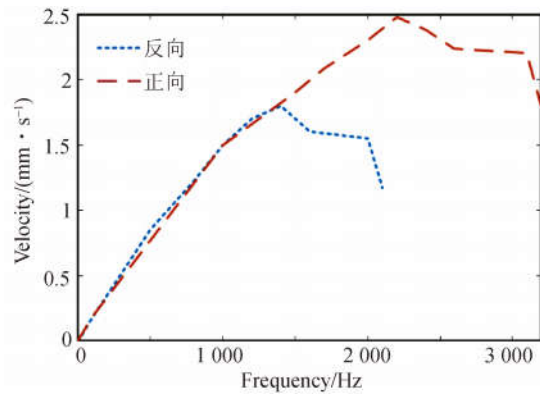


图 15 正反向运动速度随频率变化图

Fig. 15 Variation of forward and reverse speeds with frequency variation

4.3 最小步长测试

测试初期,对平台施加频率为 100 Hz、幅值为 3.8 V 的锯齿波信号,每 10 个周期间隔 5 s。在采样频率为 1 000 Hz 的条件下,测微仪测得平台正反向步进位移,并从中各抽取 6 个阶梯,如图 16 所示。从图中可观测得到,平台的正反向阶梯运动明显且步进位移均匀,均为 200 nm。

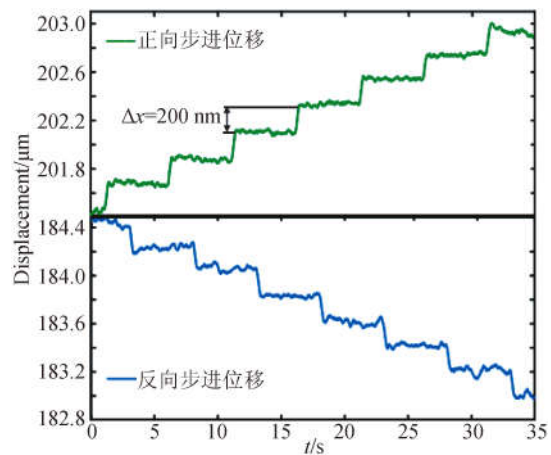


图 16 正反向连续运动步进位移

Fig. 16 Forward and backward continuous moving step displacements

基于上述实验,测试过程中通过减小电压以及周期数的方式,获取平台可观测的最小步进位移。最后经实验测得,平台在频率为 100 Hz、幅值为 2.2 V 的锯齿波信号,以及每周期间隔 5 s 的测试环境下,正反向最小步进位移均可达到 10 nm,如图 17 所示。

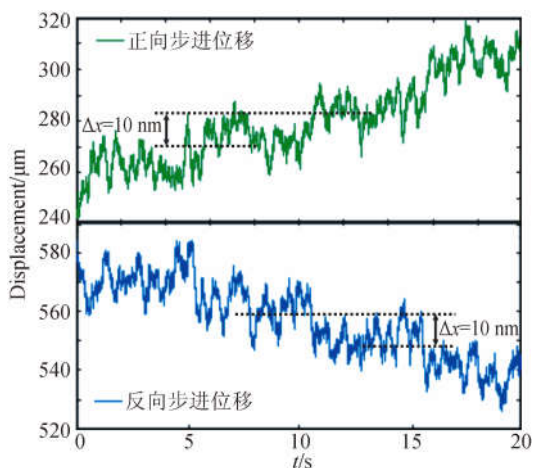


图 17 正反向最小步进位移

Fig. 17 Forward and backward minimum step displacements

参考文献:

- [1] 曾毅波, 蒋书森, 黄彩虹, 等. 激光共焦扫描显微镜在微机电系统中的应用 [J]. 光学精密工程, 2008, 16(7):1241-1246.
ZENG Y B, JIANG SH S, HUANG C H, *et al.*. Application of laser scanning confocal microscope in micro-electro-mechanical system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(7): 1241-1246. (in Chinese)
- [2] 李晓莹, 李慧敏, 常洪龙, 等. 微机电系统光学组件的系统级建模 [J]. 光学精密工程, 2012, 20(5):1069-1075.
LI X Y, LI H M, CHANG H L, *et al.*. System-level modeling for MEMS optical components [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(5):1069-1075. (in Chinese)
- [3] 张娟, 吴文荣, 毕列. 微颗粒的三维空间跨尺度装配方法 [J]. 光学精密工程, 2017, 25(1):115-122.
ZHANG J, WU W R, BI L. Trans-scale assembly method of micro-particles in 3D space [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(1):115-122. (in Chinese)
- [4] NI X X, WANG ZH SH, CHEN H M, *et al.*. A

5 结论

本文设计了黏滑驱动式小型精密运动平台,其整体尺寸为 40 mm×40 mm×18 mm,可实现 22 mm 的运动行程以及 10 nm 的最小步长,在 2 200 Hz 和 1 400 Hz 的时候,正反向速度达到最大值,分别为 2.5 mm/s 和 1.8 mm/s。在设计上,为了能够减小平台尺寸,提高结构的紧凑性,将三种功能柔性铰链、惯性质量块以及弹性元件结合为独立的定子基座,并与压电叠堆、陶瓷球固连为定子,安装于基座底部。该定子基座在起到传递压电叠堆位移的同时,又能通过螺钉调节定子与移动台接触面间的预压力。这种多功能一体化设计不仅能简化结构,更降低了加工难度。此外,根据 Matlab/Simulink 对运动平台动力学模型的仿真分析,得出了定子与移动台间预压力以及移动台质量等对平台性能的影响,不仅为平台后续优化提供了基础,更对该类黏滑驱动的研究带来了支持。

hybrid-driven active clamp forward converter based on LM5027 [C]. *Proceedings of the 26th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, IEEE, 2011:1516-1520.

- [5] YU L ZH, CHEN J. General control model for bionic inchworm robot moving modes based on discrete hopfield neural network [C]. *Proceedings of the 2nd International Conference on Intelligent System Design and Engineering Application (ISDEA)*, IEEE, 2012:687-690.
- [6] MUJJALINVIMUT E, KONGHIRUN M, LAORATANAKUL P. A design study of ultrasonic motor drive [C]. *Proceedings of the 6th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*, IEEE, 2009:274-277.
- [7] BERGANDER A, BREGUET J M, SCHMITT C, *et al.*. Micropositioners for microscopy applications based on the stick-slip effect [C]. *Proceedings of 2000 International Symposium on Micromechanics and Human Science*, IEEE, 2000:213-216.
- [8] BREGUET J M, CLAVEL R. Stick and slip actuators: design, control, performances and applications

- [C]. *Proceedings of 1998 International Symposium on Micromechatronics and Human Science*, IEEE, 1998:89-95.
- [9] BREGUET J M, DRIESEN W, KAEGI F, *et al.*. Applications of piezo-actuated micro-robots in micro-biology and material science [C]. *Proceedings of 2007 International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*, IEEE, 2007:57-62.
- [10] 张世忠, 荣伟彬, 台国安, 等. 基于黏滑运动原理的单自由度纳米定位台设计与动力学分析 [J]. *机械工程学报*, 2012, 48(19):29-34.
ZHANG SH ZH, RONG W B, TAI G A, *et al.*. Designing and dynamic modeling of 1D nanopositioner based on stick-slip motion principle [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2012, 48(19):29-34. (in Chinese)
- [11] 杨飞雨, 潘鹏, 徐伟, 等. 基于压电陶瓷的摩擦可调粘滑定位平台 [J]. *压电与声光*, 2017, 39(6):825-828, 833.
YANG F Y, PAN P, XU W, *et al.*. Friction adjustable stick-slip positioning stage based on piezoelectric ceramics [J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2017, 39(6):825-828, 833. (in Chinese)
- [12] LI Z W, ZHONG B W, WANG ZH H, *et al.*. Large thrust trans-scale precision positioning stage based on inertial stick-slip driving [J]. *Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2015, 32(2):204-209.
- [13] MADI M S, KHAYATI K, BIGRAS P. Parameter estimation for the LuGre friction model using interval analysis and set inversion [C]. *Proceedings of 2004 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, IEEE, 2004:428-433.
- [14] BARAHANOV N, ORTEGA R. Necessary and sufficient conditions for passivity of the LuGre friction model [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2000, 45(4):830-832.
- [15] 潘鹏. 基于粘滑驱动原理的跨尺度纳米级定位平台研究 [D]. 苏州:苏州大学, 2016.
PAN P. *Study of Nanopositioner with Cross-scale Travel Based on Stick-slip Principle* [D]. Suzhou:Soochow University, 2016. (in Chinese)
- [16] 钟博文. 基于粘滑驱动的跨尺度精密运动平台及其关键技术研究 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2012.
ZHONG B W. *Research on Key Technologies of Cross-scale Precision Movement Stage Based on Stick-slip Driving* [D]. Harbin:Harbin Institute of Technology, 2012. (in Chinese)

作者简介:



时运来(1976—),男,山东邹城人,博士,副教授,2006年、2011年于南京航空航天大学分别获得硕士、博士学位,主要从事压电作动技术和精密运动系统设计及控制方面的研究。E-mail:shuyunlai950438@nuaa.edu.cn

通讯作者:



姜成树(1993—),男,浙江宁波人,硕士研究生,2015年于湘潭大学获得学士学位,主要从事压电作动器方面的研究。E-mail:1248909930@qq.com