

# 尺蠖式压电线性作动器设计及实验研究\*

柏德恩<sup>1</sup>, 邓少龙<sup>1</sup>, 李云涛<sup>2</sup>, 沈刚<sup>1</sup>, 朱真才<sup>1</sup>

(1. 中国矿业大学机电工程学院 徐州, 221116) (2. 上海航天控制技术研究所 上海, 201109)

**摘要** 针对空间环境下小型抓取操作机构对新型作动器的使用需求,考虑压电作动器具有耐温范围宽、无电磁干扰及断电自锁等特点,仿照昆虫尺蠖的行走方式设计一种新型压电线性作动器。首先,利用柔性铰链式位移放大机构放大压电陶瓷(Pb-Zr-Ti,简称PZT)叠堆的输出位移,以增大线性作动器的移动步长及对导轨的夹紧变形量,将多个压电陶瓷叠堆器件分为3组,分别作为尺蠖式压电线性作动器的2个夹持单元和1个推进单元的激励源,以获得较大的驱动力并进一步增大作动器的移动步长;其次,借助有限元仿真分析软件,研究压电陶瓷叠堆力电耦合行为的预测方法,并实验验证该方法的可行性;然后,简化柔性铰链式位移放大机构,提出放大倍数的数值分析方法,对位移放大机构在压电陶瓷叠堆作用方向上的刚度进行仿真分析,并验证放大倍数的数值分析方法的准确性;最后,基于设计的线性作动器开展实验研究。结果表明:位移放大机构对压电陶瓷叠堆输出位移的放大倍数为7.3,处于理论值与仿真值之间;在激励电压频率为5 Hz时,作动器的最大空载移动速度为413  $\mu\text{m/s}$ ;作动器的最大推动力为16 N,对应的驱动速度为19  $\mu\text{m/s}$ 。以上研究结果能为小型抓取操作机构的智能驱动提供技术支持。

**关键词** 尺蠖式;压电作动器;压电陶瓷叠堆;位移放大;断电自锁

**中图分类号** TH122

## 引言

压电作动器利用压电材料的逆压电效应将电能转化为机械能,实现运动的输出,广泛应用于机器人<sup>[1-2]</sup>、精密仪器<sup>[3-5]</sup>、纳米级定位台<sup>[6-7]</sup>、多自由度指向平台<sup>[8-9]</sup>及生物工程<sup>[10-11]</sup>等领域。与传统电磁电机相比,压电作动器具有无电磁干扰、断电自锁、结构紧凑、分辨率高及耐温范围宽等优点<sup>[12-15]</sup>。

依据振动特性,可将压电作动器分为谐振型与非谐振型2种。谐振型压电作动器利用谐振时形成的椭圆形运动轨迹驱动转子运动。当采用2个或多个异型振动模态的压电作动器复合实现椭圆运动轨迹时,需考虑各振动模态谐振频率的简并<sup>[16]</sup>。此外,压电作动器的谐振频率存在动态变化的问题,导致谐振型压电作动器的稳定性较差,难以实现高精度<sup>[17]</sup>。非谐振型压电作动器工作频率低,可获得较高的稳定性和定位精度。Tang等<sup>[18]</sup>提出的由非谐振型压电作动器驱动的纳米级定位台的闭环定位精度高达400 nm。非谐振型压电作动器通常分为直驱型、惯性型及尺蠖型3种<sup>[19]</sup>。直驱型压电作动器利用放大机构对压电陶瓷叠堆的轴向变形进行放大,实现对物体直接驱动。马金玉等<sup>[20]</sup>基于柔顺机

构原理设计了桥式微操作机构,对压电陶瓷叠堆的位移放大倍数为9.8,机构的行程达到180  $\mu\text{m}$ ,最大位移误差为0.128  $\mu\text{m}$ 。惯性型压电作动器通过调节锯齿波形激励电压的占空比,结合滑块惯性及定子与滑块间的摩擦力,实现对滑块的驱动。Boudaoud等<sup>[21]</sup>提出了多自由度惯性型压电作动器,并建立了其电压频率方程,揭示了压电作动器在粗定位、精确定位2种工作模式下的动力学行为。尺蠖型压电作动器通常包含2个夹持单元和1个推进单元。仿照昆虫尺蠖的行走方式,加持单元和推进单元按照特定的规律周期性交替动作,可实现大行程的驱动。Shao等<sup>[22]</sup>结合微机电系统与压电陶瓷叠堆研制了一种结构简单、装配精度要求低并具备自锁功能的尺蠖型压电作动器,提出了具有滞后和驱动压缩补偿机制的控制策略。Gao等<sup>[23]</sup>基于光电传感器和永磁体反馈控制提出了一种具有自适应夹紧能力的尺蠖型压电作动器,在幅值为150 V、频率为40 Hz的激励电压作用下,作动器分别实现了15 g的最大推动力、1 100 g的最大载重量及0.03  $\mu\text{m}$ 的步距。

压电陶瓷叠堆是压电作动器的动力源,输出位移较小,通常只有几十微米,难以满足大步长驱动的

\* 国家自然科学基金资助项目(52005496);江苏省自然科学基金资助项目(BK20200641)

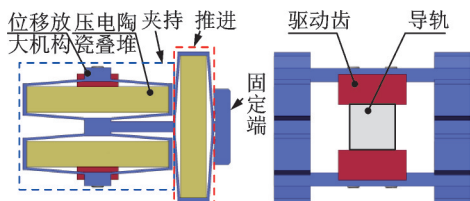
收稿日期:2022-06-30;修回日期:2022-08-25

使用需求。柔性铰链式位移放大结构能有效放大压电执行器的输出位移,具有结构简单、运动平稳、无摩擦及精度高等优点。俞军涛等<sup>[24]</sup>利用柔性铰链式位移放大结构放大压电陶瓷叠堆的输出位移,研制了一种压电直动式高速开关阀,满足了大流量与快速性的要求。笔者结合压电陶瓷叠堆与位移放大机构设计尺蠖式压电线性作动器,并开展作动器的建模分析与实验研究。

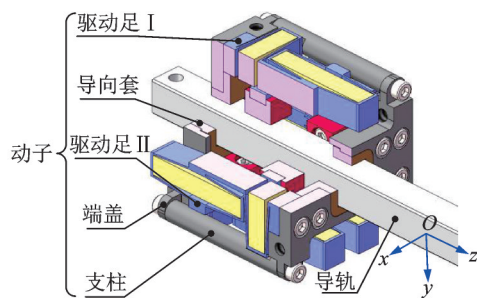
## 1 作动器结构与工作原理

### 1.1 作动器整体结构

图1为线性作动器结构示意图。尺蠖式压电线性作动器包含2个驱动足组件,其结构如图1(a)所示。驱动足组件由6个压电陶瓷叠堆、2个驱动齿及1个位移放大机构组成。6个压电陶瓷叠堆均粘贴在位移放大机构内部,构成了驱动足的激励单元,用于实现驱动足的夹持动作与推进动作。夹持部分的压电陶瓷叠堆受激励电压作用后,沿其长度方向产生变形,位移放大机构将该变形进行放大,带动驱动齿夹紧在导轨上。同理,推进部分的压电陶瓷叠堆受激励电压作用后,位移放大机构将会产生较大变形,减小驱动齿与驱动足固定端的距离,进而实现驱动足沿导轨的运动。图1(b)所示为压电线性作动器的3维剖视图。作动器主要包含驱动足组件、导向套、导轨及端盖等部件。2个驱动足组件面对面安装,结构紧凑,减小了z轴方向的长度尺寸。导轨



(a) Schematic diagram of the driving foot structure



(b) 3D sectional view of the linear actuator

图1 线性作动器结构示意图

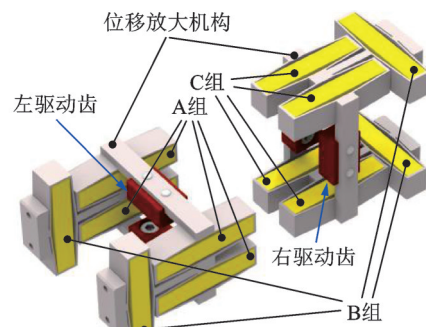
Fig.1 Structural diagram of the linear actuator

固定安装在基座上,作为作动器的定子。驱动足组件、导向套及端盖等零部件共同组成了动子,在导轨上整体移动。

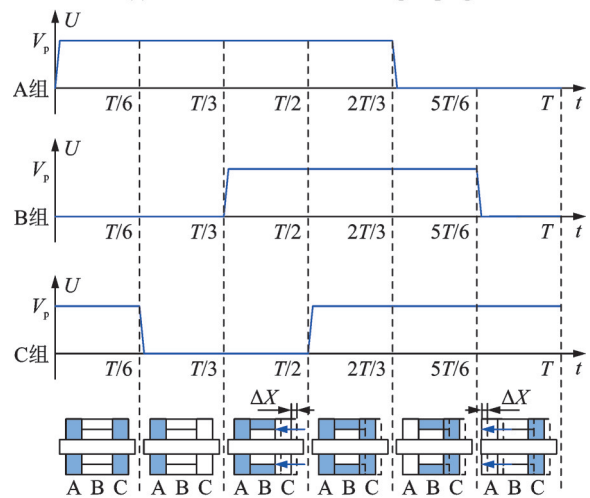
### 1.2 作动器工作原理

尺蠖式线性作动器工作原理如图2所示。笔者所提线性作动器的2个驱动足组件中包含12个压电陶瓷叠堆。依据激励方式不同,将12个压电陶瓷叠堆等分为A,B,C组,如图2(a)所示。对A,C组压电陶瓷叠堆施加激励电压,可分别使左、右驱动齿夹紧在导轨上,作为尺蠖式作动器的2个夹持单元。B组压电陶瓷叠堆受激励电压作用后,可改变2组驱动齿间的距离,是尺蠖式作动器的推进单元。对3组压电陶瓷叠堆分别施加特定的周期性激励电压,即可实现线性作动器的尺蠖式运动。图2(b)所示为一个完整运动周期内,3组压电陶瓷叠堆的激励方式运动原理,可分为以下步骤:

1) 对A,C组压电陶瓷叠堆施加激励电压  $V_p$ ,B组压电陶瓷激励电压为0,2组驱动齿同时夹紧在导



(a) Piezoelectric ceramic stack grouping



(b) Voltage excitation method and moving principle

图2 尺蠖式线性作动器工作原理

Fig.2 The working principle of inchworm linear actuator

轨上;

2) A,B组压电陶瓷叠堆激励电压保持不变,C组压电陶瓷叠堆激励电压降为0,右侧驱动齿释放,与导轨间摩擦力变小;

3) A,C组压电陶瓷叠堆激励电压保持不变,B组压电陶瓷叠堆施加激励电压  $V_p$ ,由于左、右2组驱动齿与导轨间的摩擦力不同,左侧驱动齿保持静止,右侧驱动齿向左移动一个步长  $\Delta X$ ;

4) 3组陶瓷同时施加激励电压  $V_p$ ,左、右2组驱动齿同时夹紧在导轨上;

5) B,C组压电陶瓷叠堆激励电压保持不变,A组压电陶瓷叠堆激励电压降为0,左侧驱动齿释放,与导轨间的摩擦力变小;

6) A,C组压电陶瓷叠堆激励电压保持不变,B组压电陶瓷叠堆激励电压降为0,此时右侧驱动齿与导轨间摩擦力大于左侧驱动齿,右侧驱动齿保持静止,左侧驱动齿向左移动一个步长  $\Delta X$ ,至此作动器整体沿导轨移动一个步长  $\Delta X$ 。

## 2 作动器建模与分析

### 2.1 压电陶瓷叠堆分析

单片压电陶瓷片的输出位移通常较小,将多层压电陶瓷片及电极层相互叠加,使用外部印刷电路引出内部电极,形成机械串联、电气并联的叠堆结构,可大幅提高压电器件的输出位移。压电陶瓷叠堆选用MTP75/3×3/18.8(耦合系数  $K_p=0.68$ ,机械品质因数  $Q_m=60$ ),基本参数如表1所示。

采用有限元分析软件ANSYS Workbench中的压电分析模块,研究等效模型在施加不同激励电压

表1 压电陶瓷叠堆参数

参数	数值
总体尺寸/mm	$3.4 \times 4.8 \times 18.8$
压电陶瓷尺寸/mm	$3 \times 3 \times 18$
驱动电压/V	0~75
最大出力/N	360
最大位移/ $\mu\text{m}$	18
刚度/ $(\text{N} \cdot \mu\text{m}^{-1})$	20
电介质矩阵/ $(\text{F} \cdot \text{m}^{-1})$	$\begin{bmatrix} 2.77 & 0 & 0 \\ 0 & 2.77 & 0 \\ 0 & 0 & 3.01 \end{bmatrix} \times 10^{-8}$
压电耦合矩阵/ $(\text{C} \cdot \text{N}^{-1})$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 7.4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 7.4 & 0 & 0 \\ -2.7 & -2.7 & 5.9 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \times 10^{-12}$

下的输出位移。压电陶瓷叠堆的尺寸为  $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \times 18 \text{ mm}$ ,长度方向与极化方向均为  $z$  轴。采用六面体单元进行网格划分,网格单元尺寸为  $0.4 \text{ mm}$ 。设定沿长度方向的一端为固定端,另一端为自由端。在压电陶瓷叠堆的  $z$  向上施加变化范围为  $7.5 \sim 75 \text{ V}$  的等效激励电压,电压梯度为  $7.5 \text{ V}$ 。压电陶瓷叠堆在施加  $75 \text{ V}$  等效激励电压时,其总变形如图3所示。压电陶瓷叠堆自由端的输出位移达到  $23 \mu\text{m}$ 。

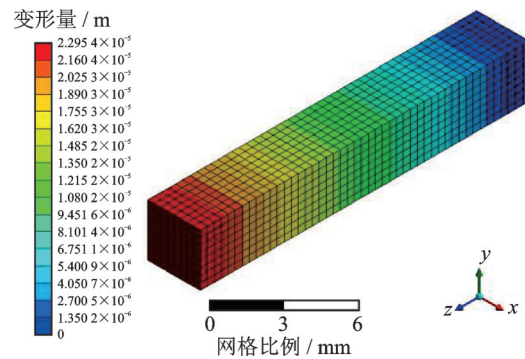


图3 压电陶瓷叠堆总变形

Fig.3 Total deformation of the PZT stack

表2为压电陶瓷叠堆在不同激励电压下输出位移的实验值与仿真值结果对比,可知仿真值与实验值的最大相对误差为  $6.5\%$ ,说明采用有限元分析方法能较好地预测压电陶瓷叠堆的机电耦合行为。

表2 仿真结果对比

激励电压/V	输出位移/ $\mu\text{m}$		相对误差/%
	仿真值	实验值	
7.5	2.3	2.1	4.5
15.0	4.6	4.6	2.2
22.5	6.9	7.2	4.2
30.0	9.2	9.6	4.0
37.5	11.5	12.3	6.5
45.0	13.8	14.6	5.5
52.5	16.1	16.7	3.6
60.0	18.4	18.6	1.1
67.5	20.7	20.2	2.5
75.0	23.0	21.7	6.0

### 2.2 位移放大机构建模与分析

#### 2.2.1 位移放大原理与建模

压电陶瓷叠堆自由时的变形量  $\Delta L_{NL}$  与激励电压  $V_p$  满足

$$\Delta L_{NL} = nd_{33} V_p \quad (1)$$

其中:  $d_{33}$  为压电陶瓷叠堆压电系数;  $n$  为组成压电陶瓷叠堆的陶瓷片个数。

压电陶瓷叠堆的变形量较小,需借助位移放大机构对其进行放大。使用耐低温环氧树脂胶将压电

陶瓷叠堆粘接固定在位移放大机构内部,位移放大机构简化示意图如图4所示。

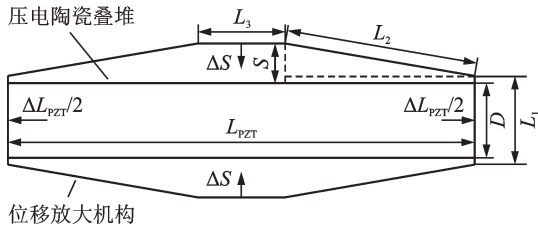


图4 位移放大机构简化示意图

Fig.4 Simplified schematic diagram of displacement amplifying mechanism

为保证压电陶瓷叠堆动态使用时的性能,需施加适当的预紧力。笔者提出的线性作动器利用位移放大机构对压电陶瓷叠堆施加预紧力 $F_{PF}$ ,因此压电陶瓷叠堆的输出位移受位移放大机构的等效刚度 $K_{RM}$ 及预紧力 $F_{PF}$ 的影响<sup>[22]</sup>。在预紧力 $F_{PF}$ 作用下,压电陶瓷叠堆与位移放大机构的变形量满足

$$\begin{cases} F_{PF} = K_{RM} \Delta L_{RM} \\ F_{PF} = K_{PZT} \Delta L_{PF} \end{cases} \quad (2)$$

其中: $\Delta L_{RM}$ 为位移放大机构在压电陶瓷叠堆长度方向上的预变形量; $K_{PZT}$ 为压电陶瓷叠堆的刚度; $\Delta L_{PF}$ 为压电陶瓷叠堆的预压缩量。

结合式(1)和式(2),压电陶瓷叠堆与位移放大机构协同变形时,在激励电压 $V_p$ 的作用下,压电陶瓷叠堆的输出位移 $\Delta L_{PZT}$ 为

$$\Delta L_{PZT} = \Delta L_{NL} K_{PZT} / (K_{RM} + K_{PZT}) \quad (3)$$

图4中放大机构水平面距压电陶瓷叠堆的尺寸 $S$ 表征了位移放大机构的单边输出位移, $S$ 与压电陶瓷叠堆的长度 $L_{PZT}$ 满足

$$S(L_{PZT}) = \left[ L_2^2 - \frac{1}{4}(L_{PZT} - L_3)^2 \right]^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{2}(L_1 - D) \quad (4)$$

其中: $L_2$ 为位移放大机构的斜边长度; $L_3$ 为位移放大机构水平段长度; $L_1$ 为位移放大机构的侧面宽度; $D$ 为压电陶瓷叠堆截面宽度。

假设位移放大机构工作时,斜边长度 $L_2$ 与侧面宽度 $L_1$ 保持不变,由式(4)可确定位移放大机构的放大倍数 $k$ ,即放大机构输出位移的变化量 $\Delta S$ 与压电陶瓷叠堆长度的变化 $\Delta L_{PZT}$ 的比值为

$$k = \frac{\Delta S}{\Delta L_{PZT}} = \frac{S(L_{PZT} + \Delta L_{PZT}) - S(L_{PZT})}{\Delta L_{PZT}} \quad (5)$$

### 2.2.2 结果与分析

借助有限元分析方法研究位移放大机构在压电陶瓷叠堆作动方向上的刚度。位移放大机构的几何尺寸如图5所示,其材料为TC4钛合金,密度为 $4\,600\text{ kg/m}^3$ ,弹性模量为 $107\text{ GPa}$ ,泊松比为 $0.34$ 。

位移放大机构刚度分析如图6所示,外部作用力在 $0\sim 50\text{ N}$ 的范围内变动时,其变形量与作用力的大小近似成线性关系。由拟合结果计算出位移放大机构的刚度 $K_{RM}$ 约为 $2.8\text{ N}/\mu\text{m}$ ,远小于压电陶瓷叠堆的刚度 $K_{PZT} = 20\text{ N}/\mu\text{m}$ 。

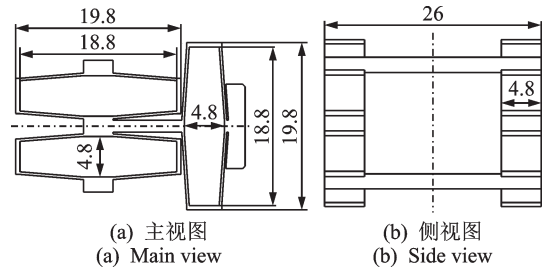


图5 位移放大机构的几何尺寸(单位:mm)

Fig.5 Geometric dimensions of displacement amplifying mechanism (unit: mm)

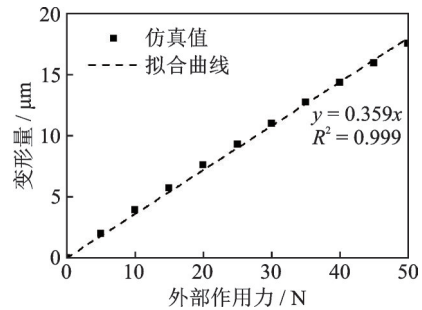


图6 位移放大机构刚度分析

Fig.6 Stiffness analysis of displacement amplifying mechanism

借助有限元分析方法验证位移放大倍数理论分析的准确性。位移放大倍数分析如图7所示,有限元分析时对压电陶瓷叠堆施加激励电压,提取压电陶瓷叠堆与位移放大机构的协同变形量。图7(a)为激励电压为 $75\text{ V}$ 时,在压电陶瓷叠堆极化方向( $z$ 向)上的变形图,由分析结果可知,压电陶瓷叠堆总伸长量 $\Delta L_{PZT}$ 为 $20.6\text{ }\mu\text{m}$ ,对应的单边伸长量 $\Delta L_{PZT}/2$ 为 $10.3\text{ }\mu\text{m}$ 。此时位移放大机构在 $x$ 向的变形量为 $161.6\text{ }\mu\text{m}$ ( $2\Delta S$ ),如图7(b)所示,对应的单边位移变化量 $\Delta S$ 为 $80.8\text{ }\mu\text{m}$ 。位移放大机构的单边位移变化量 $\Delta S$ 与压电陶瓷叠堆的单边伸长量 $\Delta L_{PZT}/2$ 的比值即为位移放大机构的位移放大倍数,因此 $75\text{ V}$ 激励电压时的位移放大倍数为 $7.8$ 。图7(c)为不同激励电压下,压电陶瓷叠堆与位移放大机构在 $x,z$ 方向上的协同变形量与激励电压的对应关系,由分析结果可知,2个方向上的变形量均随电压的增加而增大,近似呈线性关系。图7(d)为不同激励电压下位移放大倍数的仿真值与理论值的对比,激励电压在 $0\sim 75\text{ V}$ 范围内时,理论放大倍数约为 $7.4$ ,仿真放大倍数约为 $7.8$ 。2种分析方法的绝对误差为 $0.4$ ,验证了

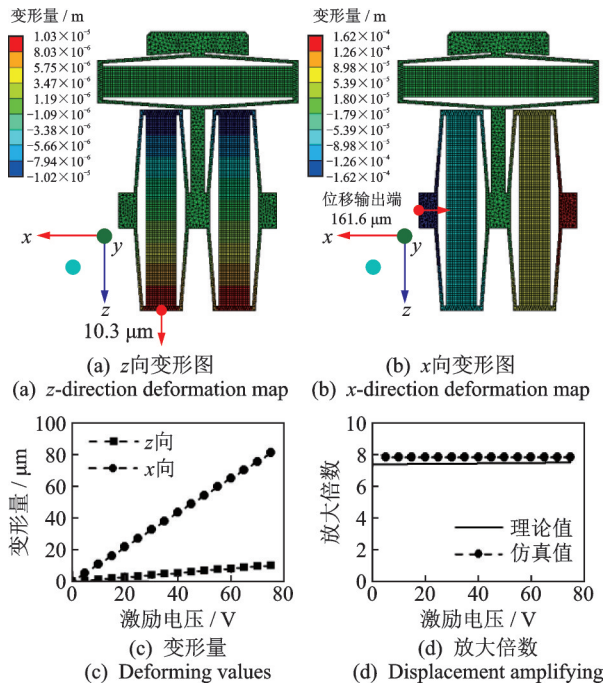


图 7 位移放大倍数分析

Fig.7 Displacement amplifying analysis

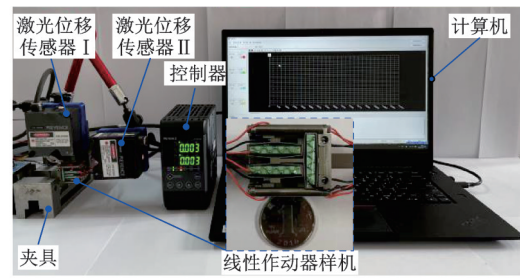
位移放大机构放大倍数理论分析方法的准确性。

### 3 实验与测试

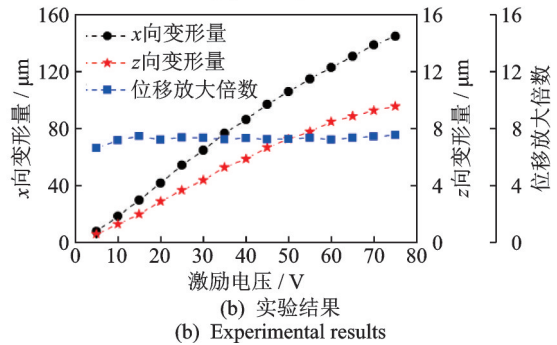
研制的作动器样机尺寸为 26 mm×26 mm×30 mm。位移放大机构输出特性测试如图 8 所示,测试系统包含计算机、激光位移传感器(基恩士 LK-H020)、控制器、电源及加持装置等。测试具体过程如下:夹持装置固定线性作动器,电源为压电陶瓷叠堆提供激励电压,2 个激光位移传感器分别测试位移放大机构在  $x, z$  方向上的变形量,利用配套的 LK-Navigator 软件采集并存储测量数据。压电陶瓷叠堆的激励电压为 75 V 时,位移放大机构与压电陶瓷叠堆的  $x$  向变形量为 145.1  $\mu\text{m}$  ( $2\Delta S$ ),  $z$  向变形量为 9.6  $\mu\text{m}$ 。位移放大机构单侧变形量  $\Delta S$  为 61.7  $\mu\text{m}$ ,对应的位移放大倍数为 7.6,处于理论值与仿真值之间。

实验研究作动器空载时激励电压大小对移动速度的影响规律,当激励电压频率为 5 Hz 时,激励电压对移动速度的影响如图 9 所示。结果表明:当电压小于 20 V 时,作动器的移动速度为 0,这是因为压电陶瓷叠堆与位移放大机构形成的推力不足以克服驱动齿与导轨间预压力产生的摩擦力;当电压大于 20 V 时,作动器的移动速度随电压的增加逐渐增大;激励电压为 75 V 时的移动速度为 413  $\mu\text{m}/\text{s}$ 。

实验研究激励电压为 25 V 时作动器的空载位移响应特性,以确定作动器的位移分辨率。作动器



(a) 测试系统  
(a) Test system



(b) 实验结果  
(b) Experimental results

图 8 位移放大机构输出特性测试

Fig.8 Output characteristic test of displacement amplifying mechanism

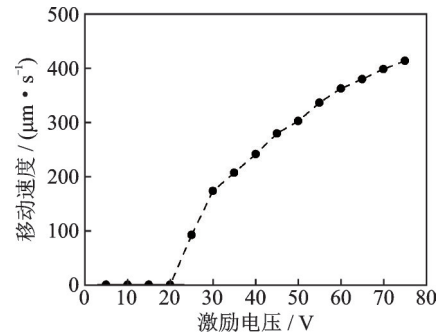


图 9 激励电压对移动速度的影响

Fig.9 Influence of excitation voltage on moving speed

在 5 Hz 激励电压作用下 1 s 内的位移-时间曲线如图 10 所示,实验结果表明,当激励电压为 25 V 时,作动器的位移分辨率约为 19.2  $\mu\text{m}$ 。

设置压电陶瓷叠堆激励电压频率为 5 Hz,幅值为 75 V,使用砝码与滑轮对作动器施加负载力,测量不同负载力下的平均移动速度,负载力对移动速

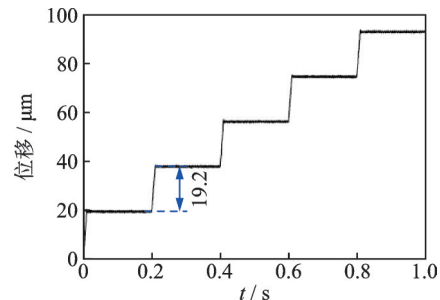


图 10 作动器位移-时间曲线

Fig.10 Displacement of the actuator versus time

度的影响如图11所示。由图可见,作动器的移动速度随负载力的增大逐渐减小,当负载力为16 N时,移动速度达到最小值19  $\mu\text{m}/\text{s}$ 。

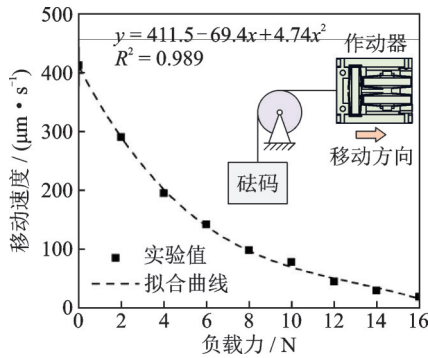


图11 负载力对移动速度的影响

Fig.11 Influence of load force on moving speed

对笔者提出的作动器与现有尺蠖式线性作动器<sup>[23, 25-28]</sup>在尺寸、速度、驱动力及激励电压4个方面进行了对比,对比结果如表3所示。与现有作动器相比,所提出的作动器3维尺寸较小,且具有一定的移动速度和较大的驱动力,在空间环境下抓取小型操作机构的应用方面具有一定的优势。

表3 与现有尺蠖式线性作动器的对比

Tab.3 Comparisons between the proposed piezoelectric actuator and existing inchworm linear actuators

作动器	尺寸/ mm	$v$ / ( $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ )	驱动 力/N	激励 电压/V
文献[23]	84×54×26	$1.2 \times 10^{-3}$	11.00	150
文献[25]	110×106×10	44.690	60.00	80
文献[26]	150×45×30	0.720	—	120
文献[27]	135×120×35	0.445	3.75	100
文献[28]	61×29×7	0.471	5.88	150
本研究	26×26×30	0.413	16.00	75

## 4 结论

1) 使用多组压电陶瓷叠堆分别作为作动器的夹持单元与推进单元的动力源,结合特定的周期性激励电压施加方式可实现作动器的尺蠖式运动。

2) 采用ANSYS Workbench有限元分析方法研究压电陶瓷叠堆的机电耦合行为,仿真值与实验值的最大误差为6.5%,验证了该方法的可行性。

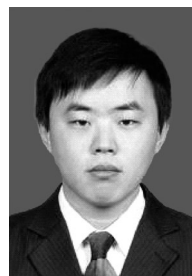
3) 使用柔性铰链式位移放大机构可有效放大压电陶瓷叠堆的输出位移,建立了位移放大机构放大倍数的分析模型,实验验证了分析模型的准确性。

4) 所研制的作动器样机尺寸为26 mm×26 mm×30 mm。在75 V激励电压时,沿导轨( $z$ 向)的空载移动速度为413  $\mu\text{m}/\text{s}$ ;最大作动力为16 N时,对应的移动速度为19  $\mu\text{m}/\text{s}$ 。

## 参 考 文 献

- [1] JALILI H, SALARIEH H, VOSSOUGH G. Study of a piezo-electric actuated vibratory micro-robot in stick-slip mode and investigating the design parameters [J]. *Nonlinear Dynamics*, 2017, 89(3):1927-1948.
- [2] XU Z M, WANG Y D, CHEN C. Micro converter with a high step-up ratio to drive a piezoelectric bimorph actuator applied in mobile robots[J]. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2018, 15(2):1-9.
- [3] QIAO P Y, YANG J, DAI C, et al. Design of composite disturbance observer and continuous terminal sliding mode control for piezoelectric nanopositioning stage[J]. *Electronics*, 2021, 10(18):2242.
- [4] SHAO J, LI Q, FENG C, et al. AIN based piezoelectric micromirror[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(5):987-990.
- [5] 宋帅官, 杨依领, 吴高华, 等. 压电柔顺 $x$ - $y$ 微夹持器的设计与分析[J]. *振动与冲击*, 2022, 41(10):154-161.  
SONG Shuaiguan, YANG Yiling, WU Gaohua, et al. Design and analysis of a piezoelectric compliant  $x$ - $y$  microgripper[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2022, 41(10):154-161. (in Chinese)
- [6] FLEMING A J, YONG Y K. An ultrathin monolithic XY nanopositioning stage constructed from a single sheet of piezoelectric material[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2017, 22(6):2611-2618.
- [7] AN D, YANG Y X, XU Y, et al. Compensation of hysteresis in the piezoelectric nanopositioning stage under reciprocating linear voltage based on a mark-segmented PI model[J]. *Micromachines*, 2020, 11(1):9.
- [8] 刘凡, 周进雄, 马小飞. 压电驱动六自由度指向平台的机电耦合分析[J]. *机械工程学报*, 2020, 56(7):10-15.  
LIU Fan, ZHOU Jinxiong, MA Xiaofei. Electro-mechanical coupling analysis of piezoelectrically driven six-degree-of-freedom pointing platform [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(7):10-15. (in Chinese)
- [9] 卢倩, 陈西府, 黄卫清, 等. 菱形压电电机在并联精密定位平台中的应用[J]. *振动、测试与诊断*, 2020, 40(4):680-688.  
LU Qian, CHEN Xifu, HUANG Weiqing, et al. Application of rhombic piezoelectric actuator in parallel positioning platform [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2020, 40(4):680-688. (in Chinese)
- [10] WANG G W, XU Q S. Design and precision position/force control of a piezo-driven microinjection system[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2017, 22(4):1744-1754.
- [11] SHIN D, HONG S W, HWANG Y. Recent advances in organic piezoelectric biomaterials for energy and biomedical applications[J]. *Nanomaterials*, 2020, 10(1):123.

- [12] RAN L Q, ZHOU W, HE J B, et al. A novel three-dimensional contact model of piezoelectric traveling wave ultrasonic micromotor [J]. *Smart Materials and Structures*, 2020, 29(7):75016.
- [13] WANG L, QUAN Q Q, XUE K L, et al. Development of a three-DOF piezoelectric actuator using a thin cross-beam vibrator[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2018, 149:54-61.
- [14] 杨淋, 陈亮, 任韦豪, 等. 新型行波直线超声电机的结构与有限元分析[J]. *振动、测试与诊断*, 2022, 42(3):439-445.  
YANG Lin, CHEN Liang, REN Weihao, et al. Structure and finite element analysis of a novel traveling wave linear ultrasonic motor[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2022, 42(3):439-445. (in Chinese)
- [15] 朱华, 崔云鹏, 刘军. 板式四足直线超声电机的分析与实验[J]. *振动、测试与诊断*, 2021, 41(5):913-918.  
ZHU Hua, CUI Yunpeng, LIU Jun. Analysis and experiment of plate type four-leg linear ultrasonic motor [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2021, 41(5):913-918. (in Chinese)
- [16] 刘英想, 陈维山, 冯培连, 等. 弯振复合型超声驱动器振动特性研究[J]. *振动与冲击*, 2013, 32(1):25-29.  
LIU Yingxiang, CHEN Weishan, FENG Peilian, et al. Vibration characteristics of an ultrasonic actuator with composite bending vibration modes[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2013, 32(1):25-29. (in Chinese)
- [17] ZHANG S J, LIU J K, DENG J, et al. Development of a novel two-DOF pointing mechanism using a bending-bending hybrid piezoelectric actuator[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, 66(10):7861-7872.
- [18] TANG H, GAO J, CHEN X, et al. Development and repetitive-compensated PID control of a nanopositioning stage with large-stroke and decoupling property [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, 65(5):3995-4005.
- [19] WANG L, LIU Y X, DENG J, et al. A non-resonant sandwich type bidirectional stepping piezoelectric actuator driven by oblique two-dimensional trajectory: Design, analysis and experiment evaluation[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2020, 135:106424.
- [20] 马金玉, 余胜东, 康升征, 等. 基于压电作动器驱动的微操作机构设计与运动控制[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(9):417-426.  
MA Jinyu, YU Shengdong, KANG Shengzheng, et al. Design and motion control of piezo-driven puncture micromanipulation mechanism[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(9):417-426. (in Chinese)
- [21] BOUDAUD M, LU T, LIANG S, et al. A voltage/frequency modeling for a multi-DOFs serial nanorobotic system based on piezoelectric inertial actuators[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2018, 23(6):2814-2824.
- [22] SHAO S B, SONG S Y, CHEN N, et al. Structure and control strategy for a piezoelectric inchworm actuator equipped with MEMS ridges[J]. *Sensors and Actuators A:Physical*, 2017, 264:40-50.
- [23] GAO Y Y, WEN J M, MA J J, et al. A self-adapting linear inchworm piezoelectric actuator based on a permanent magnets clamping structure [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, 132:429-440.
- [24] 俞军涛, 焦宗夏, 吴帅. 大流量压电式高速开关阀设计与仿真测试[J]. *机械工程学报*, 2020, 56(18):226-234.  
YU Juntao, JIAO Zongxia, WU Shuai. Design, simulation and test of high-flow high-speed on/off valve driven by piezoelectric[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(18):226-234. (in Chinese)
- [25] LING J, CHEN L, FENG Z, et al. Development and test of a high speed pusher-type inchworm piezoelectric actuator with asymmetric driving and clamping configuration [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2022, 176:104997.
- [26] DONG H J, LI T J, WANG Z W, et al. Design and experiment of a piezoelectric actuator based on inchworm working principle[J]. *Sensors and Actuators A:Physical*, 2020, 306:111950.
- [27] XUE X Y, TIAN X, ZHANG D, et al. Design of a piezo-driven inchworm flexure stage for precision positioning[J]. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 2016, 50:569-581.
- [28] MA X F, LIU Y X, DENG J, et al. A walker-pusher inchworm actuator driven by two piezoelectric stacks [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2022, 169:108636.



**第一作者简介:**柏德恩,男,1987年9月生,博士、讲师、硕士生导师。主要研究方向为压电驱动技术、超声辅助钻探技术。

E-mail:baideen@cumt.edu.cn

**通信作者简介:**沈刚,男,1982年10月生,博士、教授。主要研究方向为电液伺服系统、并联机器人控制及水下导弹发射装置。

E-mail:shenganghit@163.com