

菱形-杠杆放大机构压电驱动器的设计与实验^{*}

于思淼^{1,2}, 张乾一¹, 孟中杰², 徐冬梅³, 童泽磊¹, 梁佳雨¹

(1. 西安建筑科技大学机电工程学院 西安, 710055)

(2. 西北工业大学航天学院 西安, 710072)

(3. 西安科技大学机械工程学院 西安, 710054)

摘要 非共振型压电驱动器定位精度高且易于控制,但其工作行程小,驱动效率相对较低。针对此问题,提出了一种具有两级放大机构的非共振型压电驱动器,其采用菱形-杠杆放大机构设计,结构简单。首先,阐述了压电驱动器的工作原理,通过放大压电叠堆的输出位移增加工作行程;其次,合成两个正交的压电叠堆产生的位移,生成斜线轨迹,并实现双足交替驱动导轨,提高了驱动效率;然后,对压电驱动器的结构进行了有限元静力学分析和模态分析,分别验证了放大倍数和结构的应力,并得到驱动器定子的 1 阶固有频率;最后,加工制作了实验样机。实验结果表明,所设计的压电驱动器能够将压电叠堆的单侧工作行程从 10 μm 放大到 117.27 μm ,在 135 V、60 Hz 激励条件下的驱动速度为 744.77 $\mu\text{m/s}$ 。

关键词 非共振型压电驱动器;杠杆放大;菱形放大;交替驱动
中图分类号 TH11

0 引言

与传统电磁电机相比,压电驱动器具有响应速度快、精度高、行程大及输出力高等特点,其驱动和定位精度能够达到纳米级,结构设计更为紧凑,质量更轻,并且形式多样,能够更好地应用于航空航天和超精密加工等领域^[1-3]。然而,单个压电陶瓷的工作范围有限,可以通过将多个压电陶瓷片纵向堆叠并粘结制成压电叠层,再结合位移放大机构对压电叠层的位移进行放大,实现大行程驱动,使其具有更宽的工作范围^[4-5]。经过放大后的压电驱动器可以达到几百微米范围内的输出位移^[6-7]。根据振动状态,压电驱动器可分为共振型和非共振型^[8],共振型压电驱动器又称为超声电机,需要工作在共振频率下,由于频率漂移、发热等原因,其运动性能可能会不稳定^[9]。与超声电机相比,非共振型压电驱动器对定子尺寸和加工精度要求不高,驱动简单^[10-11]。压电叠堆具有体积小、精度高的特点,非共振型压电驱动器直接利用压电叠堆的轴向位移进行输出^[12-13],不需要工作在共振频率下,受外界环境影响较小,工作状态稳定^[14]。

现有的非共振型压电驱动器可分为尺蠖型压电

驱动器、惯性驱动型压电驱动器和直接驱动型压电驱动器^[15-16]。Bai 等^[17]提出了一种尺蠖型压电驱动器,通过结合柔性铰链、菱形放大机构和压电叠堆来实现驱动足的输出,得到驱动器的最大驱动速度为 1 260 $\mu\text{m/s}$,但是该驱动器结构使用了 8 个压电叠堆,设计比较复杂。应志奇等^[18]设计了一种一体式结构的尺蠖型压电驱动器,由一个驱动机构和两个箝位机构控制实现连续运动,实验测得在 120 V 电压、30 Hz 频率下驱动器可达到的最大驱动速度为 170 $\mu\text{m/s}$,但该驱动器需要分别控制对箝位与驱动过程的激励。Lu 等^[19]基于柔性铰链和三角形位移放大机构的结合,提出了一种惯性粘滑式压电驱动器,在 100 V 电压和 610 Hz 频率下,获得了 20.17 mm/s 的最大输出速度,但其在驱动过程中有向后运动产生的向后位移。Gao 等^[20]设计了一种非对称结构的惯性粘滑式压电驱动器,通过改变压电叠堆结构两侧的柔性铰链的厚度,产生了一个可以驱动导轨的倾斜运动,在 100 V 电压下驱动导轨速度为 15.04 mm/s,但是驱动足和导轨之间存在阻碍导轨运动的摩擦力。Chen 等^[21]设计了一种三明治式结构的直接驱动型压电驱动器,在驱动足末端形成了一个椭圆运动轨迹以驱动导轨运动,在

^{*} 国家自然科学基金资助项目(62303370);安徽省博士后科研资助项目(2023B753);中国博士后科学基金面上资助项目(2024M762449);陕西省教育厅服务地方专项资助项目(24JC055)

收稿日期:2024-10-30;修回日期:2024-12-06

2.05 kHz的频率下,其最大空载速度为3.95 mm/s,但该驱动器受激励频率的影响很大,太小或太大的激励频率都会导致其无法稳定工作。钟相强等^[22]利用两级杠杆放大原理,结合柔性铰链与放大机构设计了一种直接驱动型压电驱动器,实现了驱动足对导轨的驱动,并测得在120 V电压、110 Hz频率下驱动器最大速度为16.163 mm/s,但是该驱动器的驱动原理较为复杂,需要对4个压电叠堆分别施加4种信号。

尺蠖型压电驱动器^[23-24]模仿生物界尺蠖的运动,利用箱位驱动的原理进行驱动,定位精度高,但是需要分别控制驱动足的夹紧与驱动,驱动原理复杂,而且对加工精度和装配精度都有较高要求。惯性驱动型压电驱动器^[25]利用惯性力的作用实现运动,其中粘滑式驱动器^[26]由两种不同的摩擦状态驱动:粘性和滑动,其结构简单,但驱动力较小,且存在向后的运动。直接驱动型压电驱动器^[27]利用压电叠堆的位移作为其输出,输出力大,但行程较小,需要结合位移放大机构进行放大。

本研究设计了一种结合两级菱形-杠杆放大机构的直接驱动型压电驱动器,可有效放大压电叠堆的输出位移并提高驱动速度。通过结构和激励电压设计,采用2个压电叠堆和2个驱动足,在1个驱动周期内驱动导轨2次,从而提高了驱动效率。

1 结构和原理

1.1 压电驱动器的结构

压电驱动器整体结构如图1所示,主要由定子、2个压电叠堆、导轨、预紧机构和底板组成。定子用螺栓固定在底板上,压电叠堆安装在定子中。为了更好地激发压电叠堆的输出性能,采用螺栓预紧的方法对压电叠堆进行预紧,并在螺栓和叠堆之间添加垫片,以保证叠堆与定子之间连接的紧密性,同时使用螺旋千分尺来预紧压电驱动器。

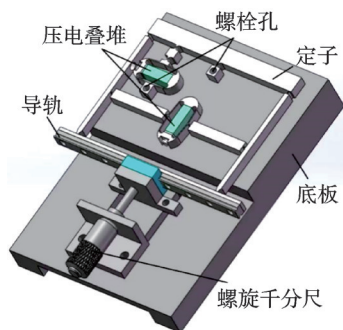


图1 压电驱动器整体结构

Fig.1 Overall structure of piezoelectric actuator

本研究设计了一种菱形放大机构,用于放大压电叠堆的输出位移,并将运动传递给驱动足。竖直放置的菱形放大机构将叠堆的输出转换为驱动足在水平方向上的位移以驱动导轨运动;水平放置的菱形放大机构结合杠杆组成两级放大机构,将叠堆的输出转换为竖直方向的驱动足位移,控制驱动足接触或远离导轨,实现2个驱动足交替驱动。

1.2 位移放大倍数设计

由于压电叠堆输出位移小,需要结合放大机构来放大位移,以实现长行程的驱动。常用的位移放大原理^[28]主要分为杠杆放大和三角放大,本研究选择三角放大原理的菱形放大机构对压电叠堆的纵向伸长量进行放大,作为一级放大。

三角放大原理的放大倍数计算公式为

$$A_1 = 1/\tan \alpha \quad (1)$$

放大倍数只取决于角度 α ,为了方便后期制造和整体放大倍数的计算,这里取 $\tan \alpha = 1/12$,因此一级放大倍数为12。

竖直方向要控制2个驱动足远离或接触导轨,以实现左右驱动足的交替驱动。如果驱动足竖直方向的位移较小,驱动足可能不能有效抬起,就不能完全离开导轨,在驱动过程中会造成回撤,导致驱动效率降低,因此需要对竖直方向的位移也进行放大。采用两级放大时,选择杠杆放大机构结合菱形放大机构,再一次对菱形放大机构所放大的位移进行放大。

杠杆放大机构的放大倍数等于输出力臂与输入力臂的比值,即

$$A_2 = L_4/L_3 \quad (2)$$

确定第2级杠杆放大的放大倍数为5/3,两级放大倍数为放大倍数相乘,因此最终的放大倍数为 $A = A_1 A_2 = 20$ 倍。

压电驱动器定子结构尺寸及主要尺寸参数分别如图2、表1所示。图2中的 $\alpha = 4.76^\circ$,其余参数值见表1。

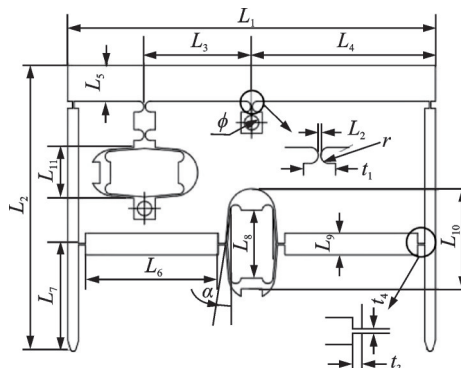


图2 压电驱动器定子结构尺寸图

Fig.2 Piezoelectric actuator stator structure dimension drawing

表 1 压电驱动器定子主要尺寸参数
Tab.1 Piezoelectric actuator stator major dimensional parameters

参数	数值	参数	数值
L_1	100	L_{10}	30
L_2	80	L_{11}	14
L_3	30	t_1	6
L_4	50	t_2	0.4
L_5	10	t_3	2
L_6	37	t_4	0.4
L_7	30	ϕ	4
L_8	19	r	1.5
L_9	6		

1.3 工作原理

压电驱动器工作原理示意图如图 3 所示。基于设计的压电驱动器结构,当压电叠堆 1 伸长时,驱动足 1 向下移动,驱动足 2 向上移动(O_y 方向)。类似地,当压电叠堆 2 伸长时,驱动足 1 向右移动,驱动足 2 向左移动(O_x 方向)。通过按一定的时间顺序合成上述水平方向(O_x)和竖直方向(O_y)的运动,可以获得斜线轨迹。改变驱动轨迹的方向即可改变导轨的运动方向,实现双向驱动。

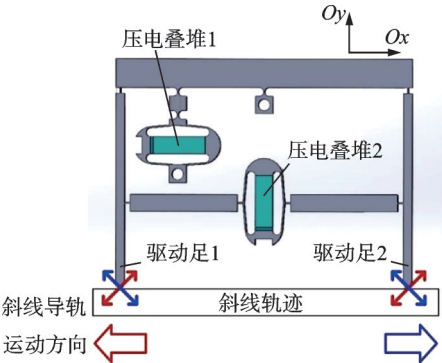


图 3 压电驱动器工作原理示意图

Fig.3 Schematic diagram of PA working principle

导轨向左运动时的激励电压如图 4 所示。其中: T 为 1 个驱动周期。当给压电叠堆施加这样的方波信号时,导轨将向左运动。具体驱动过程如下。

1) 当 $t=0$ 时,施加给压电叠堆 2 的电压为 $U_{\max}$,压电叠堆 2 伸长,驱动足 1 向右移动,驱动足 2 向左移动;施加给压电叠堆 1 的电压为 0,压电叠堆 1 保持不变。该时刻虽然产生了水平方向的运动,但驱动足没有与导轨接触,因此没有驱动效果。

2) 在 $0\sim T/3$ 期间,与 $t=0$ 时相比,施加给压电叠堆的电压保持不变,驱动足的位置也没有变化。

3) 当 $t=T/3$ 时,施加给压电叠堆 1 的电压从 0 变为 $U_{\max}$,施加给压电叠堆 2 的电压从 $U_{\max}$ 变为 0。此时压电叠堆 2 收缩,驱动足 1 向左移动,驱动足 2 向右移动;压电叠堆 1 伸长,驱动足 1 向下移动并与导轨接触,驱动足 2 向上移动并远离导轨。驱动足 1 产生从右上到左下的运动,驱动导轨向左运动一次;驱动足 2 产生从左下到右上的运动,不具有驱动效果。

4) 在 $T/3\sim 2T/3$ 期间,激励电压保持不变,驱动足的位置与 $t=T/3$ 时相同。

5) 当 $t=2T/3$ 时,施加给压电叠堆 2 的电压从 0 变为 $U_{\max}$,施加给压电叠堆 1 的电压从 $U_{\max}$ 变为 0。此时压电叠堆 2 伸长,驱动足 1 向右移动,驱动足 2 向左移动;压电叠堆 1 收缩,驱动足 1 向上移动并远离导轨,驱动足 2 向下移动并与导轨接触。驱动足 2 产生从右上到左下的运动,驱动导轨再次向左移动;驱动足 1 产生从左下到右上的运动,不具有驱动效果。

6) 在 $2T/3\sim T$ 期间,驱动足的位置与 $t=2T/3$ 时相同。

7) 当 $t=T$ 时,激励电压与 $t=0$ 时相同,此时进入下一个周期。在 1 个周期内,交替向左驱动导轨 2 次。

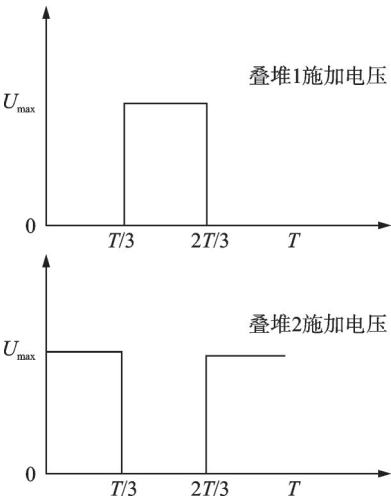


图 4 导轨向左运动时的激励电压

Fig.4 Excitation voltages when the guide rail moves to the left

导轨向右运动时的激励电压如图 5 所示。当给压电叠堆施加这样的方波信号时,导轨将向右运动。具体驱动过程如下。

1) 当 $t=0$ 时,电压 $U_{\max}$ 同时施加给压电叠堆 1 和 2。此时压电叠堆 1 伸长,驱动足 1 向下移动与导

轨接触,驱动足 2 向上移动远离导轨;同时压电叠堆 2 伸长,驱动足 1 向右移动,驱动足 2 向左移动。驱动足 1 从初始位置向右下移动,从而驱动导轨向右移动;驱动足 2 产生从初始位置到左上的运动,没有驱动效果。

2) 在 $0\sim T/2$ 期间,施加给 2 个叠堆的电压保持不变,驱动足的位置与 $t=0$ 时相同。

3) 当 $t=T/2$ 时,施加给 2 个压电叠堆的电压从 $U_{\max}$ 变为 0。此时压电叠堆 1 收缩,驱动足 1 向上移动远离导轨,驱动足 2 向下移动并与导轨接触;同时压电叠堆 2 收缩,驱动足 1 向左移动,驱动足 2 向右移动。驱动足 2 向右下移动,从而驱动导轨向右移动;驱动足 1 向左上移动,没有驱动效果。

4) 在 $T/2\sim T$ 期间,2 个驱动足的位置与 $t=T/2$ 时一致。

5) 当 $t=T$ 时,激励电压与 $t=0$ 时相同,此时进入下一个周期。在 1 个周期内,交替向右驱动导轨 2 次。

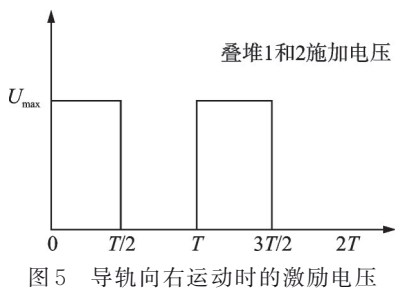


图 5 Excitation voltages when the guide rail moves to the right

2 有限元分析

ANSYS 有限元仿真模型的建立主要包括几何建模、网格划分以及约束条件的定义等,再对模型进行求解。将建立好的定子模型导入到 ANSYS workbench 软件中,分别对定子进行静力学分析和模态分析。首先,设置材料的属性,选择 65Mn 弹簧钢作为定子的材料;其次,划分网格尺寸为 0.5 mm,生成有限元模型;然后,对定子施加约束,由于定子是通过螺栓固定在底板上的,因此选择 2 个螺栓孔进行约束;最后,分别对定子进行静力学和模态分析。65Mn 材料性能见表 2。

表 2 65 Mn 材料性能		
Tab.2 Property of 65 Mn material		
密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	泊松比	弹性模量/MPa
7 854	0.288	200 000

2.1 静力学分析

根据叠堆性能检测报告,所用的压电叠堆在 135 V 电压时的输出位移为 $18.813\text{ }\mu\text{m}$,因此在仿真时分别对定子与压电叠堆的接触面施加 $9.406\text{ }\mu\text{m}$ 和 $-9.406\text{ }\mu\text{m}$ 的位移。通过静力学分析测得水平方向上驱动足 1 的位移为 $107.7\text{ }\mu\text{m}$,驱动足 2 的位移为 $107.9\text{ }\mu\text{m}$ 。根据结构设计,水平方向的放大倍数为 12 倍,理论放大位移为 $112.878\text{ }\mu\text{m}$ 。对比仿真结果,其误差小于 5%,验证了放大机构设计的合理性。定子静力学仿真结果如图 6 所示。

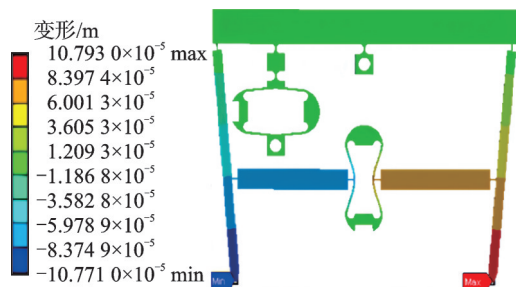


图 6 定子静力学仿真结果
Fig.6 Stator static simulation result diagram

2.2 应力分析

为验证压电驱动器工作的可靠性,对压电驱动器定子结构进行了仿真应力分析。分别向菱形放大机构两侧施加 $10\text{ }\mu\text{m}$ 的位移,得到图 7 所示的定子应力仿真结果。由图可知,定子结构大部分区域应力水平较低,定子应力主要集中于发生变形的菱形放大机构和柔性铰链处,最大应力为 151.24 MPa 。对比 65Mn 弹簧钢的屈服强度 784 MPa ,可以说明施加位移变形后结构是安全的。

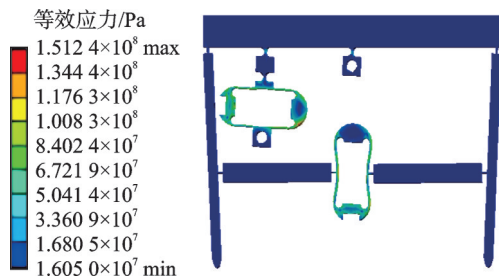


图 7 定子应力仿真结果
Fig.7 Stator stress simulation results

2.3 模态分析

利用 ANSYS 软件的模态分析模块可以计算出结构的各阶模态振型及其对应的固有频率。通过模态分析,对所设计的定子进行 6 阶模态仿真,可以得到 6 阶仿真的振型图和固有频率。根据仿真结果,

6 阶模态中定子的固有频率均在 67.203 Hz 以上,因此施加给压电叠堆的工作频率应当低于 67 Hz,以避免产生共振。定子 1 阶模态仿真结果如图 8 所示。

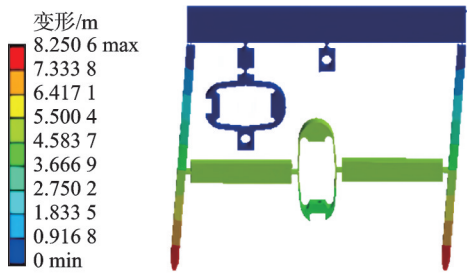


图 8 定子 1 阶模态仿真结果

Fig.8 Stator first-order modal simulation results

3 实 验

压电驱动器实验平台如图 9 所示。采用 PSt150/5*5/20L 型叠堆,叠堆性能参数见表 3。实验平台主要包括电容位移传感器、信号发生器及功率放大器等,通过信号发生器施加相位差为 90°、占空比为 50% 的方波信号,并通过功率放大器对激励信号进行放大,再施加给压电叠堆。

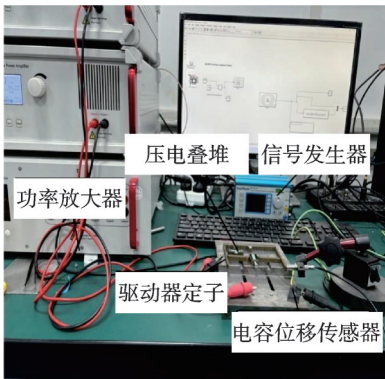


图 9 压电驱动器实验设备平台

Fig.9 Experimental equipment platform of piezoelectric actuator

表 3 叠堆性能参数

Tab.3 Stack performance parameters

型号	尺寸/mm	电压/V	行程/ μm
PSt150/5*5/20L	6×6×18	0~150	19.820

为了提高压电叠堆的输出性能,在进行实验前需要先对压电叠堆及驱动器进行预紧。对压电叠堆采用螺栓预紧,通过螺旋千分尺调节定子与导轨之间的接触,对预压力进行多次调试,调整到一个合适的位置,使压电驱动器达到较高的输出性能。

使用 PID-E20.200 型号电容位移传感器(测量范围为 200 μm ,分辨率为 0.004 μm)测量驱动足的步距,通过施加给压电叠堆 135 V 的方波信号,测量

不同频率下驱动足在驱动方向上的摆动幅度,即驱动器步距。实验测得驱动足的位移为 117.27 μm ,对比静力学仿真中驱动足的输出位移 107.9 μm ,误差为 8 %。由模态分析结果得到定子的 1 阶固有频率为 67.3 Hz,为了避开共振频率点,测试 30~67 Hz 频率范围内驱动足的步距。135 V 电压时不同频率下驱动器的步距如图 10 所示。可以看出,随着频率的增加,驱动器的步距逐渐减小,这可能是由于结构的振动加剧导致压电叠堆与定子松脱,使得连接不紧密而造成。

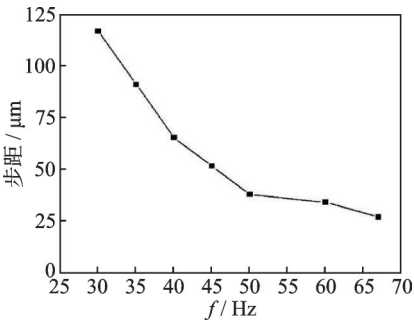


图 10 135 V 电压时不同频率下驱动器的步距

Fig.10 Actuator step at different frequencies at 135 V

驱动速度是压电驱动器的关键性能之一,本研究使用 MSK200/1-0108 型磁栅传感器测量其驱动导轨时的速度。为了避免共振造成结构的损坏,测试了 30~67 Hz 频率范围内驱动器的驱动速度。135 V 电压时不同频率下驱动器的驱动速度如图 11 所示。由图可知,当频率为 60 Hz 时,速度达到最大值 744.77 $\mu\text{m}/\text{s}$,超过 60 Hz 后随着频率的增加驱动器速度减小,这主要是由于压电叠堆的迟滞特性和柔性机构的阻尼导致速度降低。

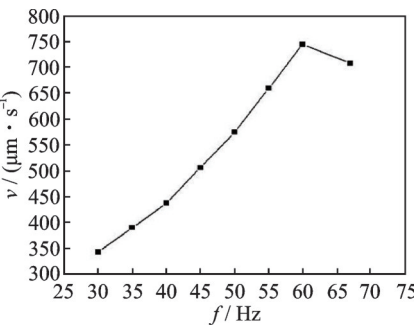


图 11 135 V 电压时不同频率下驱动器的驱动速度

Fig.11 Actuator's driving speed in different frequencies at 135 V voltage

设定系统的工作频率为 60 Hz,测试不同电压下压电驱动器的驱动速度,如图 12 所示。由图可知,驱动速度随着电压的增加而增加,基本呈线性关系。由于压电叠堆的最大工作电压不超过 150 V,这里只取到 135 V。

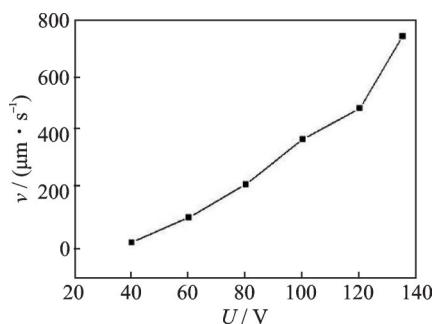


图12 60 Hz频率时不同电压下驱动器的驱动速度

Fig.12 Actuator's driving speed in different voltages at 60 Hz

当工作频率为60 Hz、电压为135 V时,测量驱动器所能承受的最大负载。分别在导轨上施加2.5、5和10 g的负载,测试压电驱动器在不同负载条件下的驱动速度。135 V、60 Hz时不同负载条件下的驱动器速度如图13所示。由图可知,随着负载的增加,驱动速度逐步降低。负载在10 g时达到最大值,此时驱动器的驱动速度接近于0,因此压电驱动器可承受的最大负载为0.1 N。

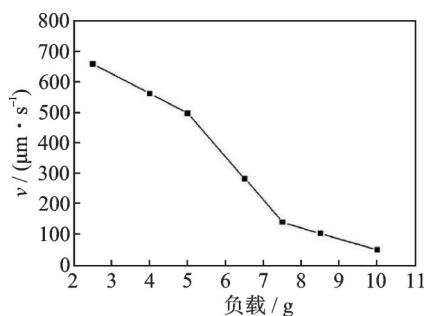


图13 135 V、60 Hz时不同负载条件下的驱动器速度

Fig.13 Driving speed under different loads at 135 V and 60 Hz

4 结束语

本研究提出了一种具有菱形-杠杆放大机构的非共振压电驱动器,其2个压电叠堆分别控制2个驱动足的水平 and 竖直方向的运动。基于所提出的结构,在相位差为90°的方波信号激励下实现了双足交替驱动,并融合位移放大机构,对压电叠堆的行程进行放大,使压电驱动器获得了长行程的驱动。对所设计的结构进行了理论和仿真分析,并通过实验对驱动器的相关性能进行了测试。实验结果表明,所设计的压电驱动器在135 V电压、60 Hz频率时交替驱动导轨的速度为744.77 μm/s,可承受的最大负载为0.1 N。

参 考 文 献

[1] 肖晓兰,林健鑫,区楚源,等.压电驱动在超精密加工

领域的应用现状与发展趋势综述[J].机电工程技术, 2024, 53(7): 34-40.

XIAO Xiaolan, LIN Jianxin, OU Chuyuan, et al. Review of application status and development trend of piezoelectric drive in ultra-precision machining[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2024, 53(7): 34-40.(in Chinese)

[2] 刘英想,邓杰,常庆兵,等.压电驱动技术研究进展与展望[J].振动、测试与诊断, 2022, 42(6): 1045-1061.

LIU Yingxiang, DENG Jie, CHANG Qingbing, et al. Progress and prospects in piezoelectric actuation technologies[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2022, 42(6): 1045-1061.(in Chinese)

[3] GAO X Y, YANG J K, WU J G, et al. Piezoelectric actuators and motors: materials, designs, and applications [J]. Advanced Materials Technologies, 2020, 5 (1) : 1900716.

[4] SUN M X, HUANG W Q, WANG Y, et al. Research on a novel non-resonant piezoelectric linear motor with lever amplification mechanism[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2017, 261: 302-310.

[5] 刘雪瑞,黄卫清,王寅,等.双向驱动压电作动器结构设计[J].振动、测试与诊断, 2017, 37(6): 302-310.

LIU Xuerui, HUANG Weiqing, WANG Yin, et al. Structural design of bidirectional piezoelectric actuator [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2017, 37(6): 302-310.(in Chinese)

[6] ZHOU X Y, WU S, WANG X X, et al. Review on piezoelectric actuators: materials, classifications, applications, and recent trends[J]. Frontiers of Mechanical Engineering, 2024, 19(1): 6.

[7] MA X F, LIU J K, ZHANG S J, et al. Recent trends in bionic stepping piezoelectric actuators for precision positioning: a review[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2023, 364: 114830.

[8] MOHITH S, UPADHYA A R, NAVIN K P, et al. Recent trends in piezoelectric actuators for precision motion and their applications: a review[J]. Smart Materials and Structures, 2020, 30(1): 013002.

[9] XU D M, YANG W Z, ZHANG X H, et al. A U-shaped and alternately driven ultrasonic motor using three bending coupled modes [J]. Smart Materials and Structures, 2023, 32(3): 035017.

[10] HUANG W Q, SUN M X. Design, analysis, and experiment on a novel stick-slip piezoelectric actuator with a lever mechanism[J]. Micromachines, 2019, 10(12): 863.

[11] 王道智,黄卫清,孙梦馨,等.双柔铰导向式非共振压电直线电机[J].振动、测试与诊断, 2018, 38(6): 1103-1107.

- WANG Daozhi, HUANG Weiqing, SUN Mengxin, et al. Non-resonant piezoelectric linear motor with double flexible hinges guide[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2018, 38(6): 1103-1107.(in Chinese)
- [12] WANG L, LIU Y X, SHEN Q Q, et al. Design and experimental verification of a bolt-clamped piezoelectric actuator based on clamping and driving mechanism[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 146: 107065.
- [13] LIU J K, LIU Y X, ZHAO L L, et al. Design and experiments of a single-foot linear piezoelectric actuator operated in a stepping mode[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(10): 8063-8071.
- [14] WANG S P, RONG W B, WANG L F, et al. A survey of piezoelectric actuators with long working stroke in recent years: classifications, principles, connections and distinctions[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 123: 591-605.
- [15] WANG L, CHEN W S, LIU J K, et al. A review of recent studies on non-resonant piezoelectric actuators[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 133: 106254.
- [16] 邓浩, 王怀明, 聂中原, 等. 非谐振式压电直线位移驱动器研究综述[J]. 机械设计, 2020, 37(增刊1): 87-91.
- DENG Hao, WANG Huaming, NIE Zhongyuan, et al. Review on non-resonant piezoelectric linear displacement actuator[J]. Journal of Machine Design, 2020, 37(S1): 87-91.(in Chinese)
- [17] BAI D E, DENG S L, LI Y T, et al. A novel inchworm piezoelectric actuator with rhombic amplification mechanism[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2023, 360: 114515.
- [18] 应志奇, 刘文翠, 惠相君, 等. 基于结构一体化的压电尺蠖直线电机设计[J]. 压电与声光, 2019, 41(2): 229-233.
- YING Zhiqi, LIU Wencui, HUI Xiangjun, et al. Design of piezoelectric inchworm linear motor based on structural integration[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2019, 41(2): 229-233.(in Chinese)
- [19] LU X H, GAO Q, LI Y K, et al. A linear piezoelectric stick-slip actuator via triangular displacement amplification mechanism[J]. IEEE Access, 2020, 8: 6515-6522.
- [20] GAO Q, HE M, LU X H, et al. Simple and high-performance stick-slip piezoelectric actuator based on an asymmetrical flexure hinge driving mechanism[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2019, 30(14): 2125-2134.
- [21] CHEN X F, HUANG W Q. A new type of non-resonant linear motor with piezoelectric stacks[C] // 2010 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Xi'an, China: IEEE, 2010: 1224-1227.
- [22] 钟相强, 黄卫清, 张轩, 等. 二级杠杆柔性铰链复合结构的双足压电直线电机[J]. 光学精密工程, 2018, 26(1): 86-94.
- ZHONG Xiangqiang, HUANG Weiqing, ZHANG Xuan, et al. Double-foot piezoelectric linear motor with secondary lever and flexure hinge composite structure[J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 26(1): 86-94. (in Chinese)
- [23] 韩硕, 杨晓峰. 尺蠖式压电陶瓷电机的双模式驱动器开发与研究[J]. 压电与声光, 2024, 46(4): 562-569.
- HAN Shuo, YANG Xiaofeng. Development of dual-mode driver for inchworm piezoelectric ceramic motor[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2024, 46(4): 562-569.(in Chinese)
- [24] YU S M, LIANG J Y, YANG F, et al. A novel inchworm piezoelectric actuator using two-stage amplification mechanism with high speed: design, modeling, and experimental evaluation[J]. Smart Materials and Structures, 2023, 32(5): 055020.
- [25] 田晓超, 王海刚, 王虎, 等. 压电惯性驱动器理论分析与应用测试[J]. 压电与声光, 2020, 42(6): 800-805.
- TIAN Xiaochao, WANG Haigang, WANG Hu, et al. Theoretical analysis and application test of piezoelectric inertial actuator[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2020, 42(6): 800-805.(in Chinese)
- [26] 程廷海, 高琪, 李义康, 等. 压电粘滑驱动器研究现状与进展分析[J]. 长春工业大学学报(自然科学版), 2018, 39(4): 321-331.
- CHENG Tinghai, GAO Qi, LI Yikang, et al. Current situation and development of piezoelectric stick-slip actuator[J]. Journal of Changchun University of Technology (Natural Science Edition), 2018, 39(4): 321-331. (in Chinese)
- [27] BERRY D, KHANH VO T V, LI K H H, et al. Progressing towards high performance non-resonant piezoelectric stepping actuators[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2023, 358: 114439.
- [28] CHEN J L, ZHANG C L, XU M L, et al. Rhombic micro-displacement amplifier for piezoelectric actuator and its linear and hybrid mod[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2015, 50: 580-593.



第一作者简介: 于思淼,男,1988年4月生,博士、讲师。主要研究方向为压电驱动理论与技术、压电驱动机器人动力学与控制、刚柔结构的振动力学建模与振动抑制控制等。

E-mail: simiaoyu@xauat.edu.cn