

# 双压电叠堆驱动执行器率相关迟滞建模与分析

李宇阳,朱玉川,李仁强,王振宇,罗 樟

(南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016)

**摘要:**提出一种双压电叠堆驱动执行器设计方案,即执行器由2根不同尺寸的压电叠堆驱动,中间由套筒连接。为描述执行器在不同频率下的迟滞特性,利用准静态下的非对称 Maxwell 模型、系统动力学方程及一阶惯性环节等建立数学模型,并进行参数辨识、模型仿真与实验研究。仿真与实验结果表明,在 140 V、600 Hz 激励电压信号同时驱动 2 个长度不超过 20 mm 压电叠堆时,输出位移可达 37.1  $\mu\text{m}$ ,相较于 140 V、1 Hz 时的位移仅衰减 7.1%,与其他执行器位移放大机构相比,具有较好的高频性能。所建立的执行器率相关迟滞模型在 600 Hz 内幅值最大误差不超过 1.71  $\mu\text{m}$ ,均方根误差最大为 1.34  $\mu\text{m}$ ,可较准确地描述执行器位移输出特性,为执行器高精度控制提供了基础。

**关键词:**双压电叠堆;率相关;参数辨识;迟滞非线性;高频响

**中图分类号:**TM282;TH137

**文献标识码:**A

**DOI:**10.11977/j.issn.1004-2474.2019.02.024

## Modeling and Analysis of Rate-Dependent Hysteresis for Dual-Piezoelectric Stack Driven Actuator

LI Yuyang, ZHU Yuchuan, LI Renqiang, WANG Zhenyu, LUO Zhang

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** A design scheme of the dual piezoelectric stack driven actuator is proposed, in which the actuator is driven by two piezoelectric stacks of different sizes and connected by a sleeve in the middle. To describe the hysteresis characteristics of actuators at different frequencies, the asymmetric Maxwell model, system dynamics equation and first-order inertia link under quasi-static state are used to establish mathematical models, and the parameter identification, model simulation and experimental research are carried out. The simulation and experimental results show that the output displacement can reach 37.1  $\mu\text{m}$  when the two piezoelectric stacks with a length of not more than 20 mm are driven simultaneously by the excitation voltage signals of 140 V and 600 Hz. Compared with the displacement at 140 V and 1 Hz, only 7.1% of the displacement has been attenuated. The proposed displacement amplification mechanism has better high frequency performance over other displacement amplification mechanisms. The established actuator rate-dependent hysteresis model has a maximum amplitude error of no more than 1.71  $\mu\text{m}$  and a root mean square error of 1.34  $\mu\text{m}$  in 600 Hz, which can accurately describe the displacement output characteristics of the actuator and provide a basis for high-precision control of the actuator.

**Key words:** dual-piezoelectric stack; rate-dependent; parameter identification; hysteresis nonlinearity; high frequency response

### 0 引言

压电叠堆执行器(PSA)利用压电陶瓷刚度大,输出力大,响应快和分辨率高等优点,已被广泛应用于光学、航空航天、电静液作动器、振动控制及医疗等技术领域<sup>[1]</sup>。但压电陶瓷输出位移小,且具有迟滞非线性,如压电叠堆的输出位移为 0.1%~

0.2%,导致其应用范围受限。因此,如何合理地将压电陶瓷的位移放大,使其可应用于更多场合成为一个亟待解决的问题。

针对智能材料驱动执行器输出位移小的缺陷,国内外学者提出了杠杆放大、菱形放大、压曲放大及柔性铰链等多种位移放大机构,虽然这几种放大机

**收稿日期:**2018-05-03

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(51575258);江苏高校“青蓝工程”,2017年南京航空航天大学研究生教育教学改革研究基金资助项目(2017YJXGG09);中国运载火箭技术研究院高校联合创新基金资助项目(CALT201706);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(kfjj20170521)

**作者简介:**李宇阳(1993-),男,山东枣庄人,硕士生,主要从事压电叠堆执行器及压电叠堆作动器的研究。通信作者:朱玉川,男,教授,主要从事智能材料与智能结构、机电控制及电液伺服阀技术等研究,已发表论文 50 余篇。E-mail:meeyczhu@nuaa.edu.cn。

构都可实现执行器位移的成倍放大,但都存在一个共性问题,即随着输入信号频率的升高,输出位移幅值会出现较大幅度的衰减。蒋鑫<sup>[2]</sup>研制的压曲放大式磁致伸缩执行器样机,其动态频宽可达 50 Hz;黄卫清等<sup>[3]</sup>研制了一种 4 根压电叠堆驱动的菱形放大机构,实验表明,在 100 V 的驱动电压下,10 Hz 时输出位移约为 18  $\mu\text{m}$ ,在 100 Hz 内,频率每升高 10 Hz,输出位移将减小 0.3  $\mu\text{m}$ 。研究者的研究范围多在 100 Hz 以内,未提供更多的位移-频率数据。然而,在电液伺服阀、航空航天作动器等领域均需具有高频响应特性的 PSA<sup>[4]</sup>。

压电材料除输出位移小外,其固有迟滞特性也受到研究者们的广泛关注。近年来,国内外学者用 Preisach 模型、Bouc-Wen 模型、Maxwell 模型及神经网络等描述 PSA 的滞环。Goldfarb 等<sup>[5]</sup>首先采用中心对称的 Maxwell 模型描述压电材料的迟滞特性,采用无质量、受摩擦力的物块-弹簧系统的输出力与输入位移的关系来描述迟滞现象。裘进浩等<sup>[6]</sup>在此基础上提出了一种非对称的 Maxwell 模型,将原模型基础单元拆分成一个上升段的基础单元和一个下降段的基础单元,使基础单元的力-位移曲线由原 Maxwell 模型对称的四边形变为梯形,具有描述非对称滞环的能力。

为实现压电叠堆执行器高频大位移和高精度控制,本文设计了一种双压电叠堆执行器(DPSA)。它由 2 个规格不同的压电叠堆同时驱动(复合驱动),2 个压电叠堆间通过套筒连接,通过位移叠加方式实现位移的增大,并在 600 Hz 复合驱动时输出位移仅衰减了 7.1%。同时,本文还对 DPSA 进行迟滞建模与仿真分析,运用系统动力学方程、准静态下的非对称 Maxwell 模型及一阶惯性环节等建立了 DPSA 的率相关模型,并将模型结果与实验结果进行了对比,在 600 Hz 内幅值最大误差不超过 1.71  $\mu\text{m}$ ,均方根误差最大为 1.34  $\mu\text{m}$ 。对比结果证明,本文所建立模型可较准确地描述执行器的迟滞非线性。

## 1 原理与结构

图 1 为 DPSA 原理图(以向上为正方向)。2 个压电叠堆由一个套筒连接,筒形压电叠堆 1(PZT1)伸长会同时带动套筒向正方向运动,套筒的运动带动压电叠堆 2(PZT2)向正方向运动,处于套筒内的 PZT2 在跟随套筒正向运动的同时自身也会伸长,从而 PZT2 顶端的输出位移是两叠堆位移的叠加,实现了在相同执行器长度下产生更大输出位移的效果。

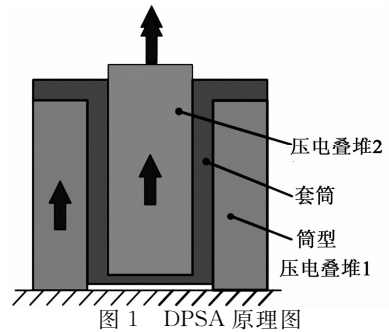


图 1 DPSA 原理图

根据现有的压电叠堆型号,考虑 2 个压电叠堆间的嵌套关系,DPSA 结构如图 2 所示。其中,PZT1 和 PZT2 是 2 个不同尺寸的环型压电叠堆(PZT1 的型号为 PTH1502619201,外径  $\varnothing 26 \text{ mm}$ 、内径  $\varnothing 19 \text{ mm}$ 、长度 18 mm;PZT2 的型号为 PTH1501206201,外径  $\varnothing 12 \text{ mm}$ 、内径  $\varnothing 6 \text{ mm}$ 、长度 20 mm)。由于 PZT2 需将导线引出以驱动,故在套筒底部开一个 45°、宽度比导线稍宽的圆弧槽。

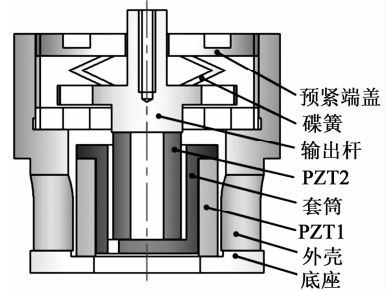


图 2 DPSA 结构示意图

在 2 个压电叠堆同时伸长时,传递到输出杆的伸长量是 2 个压电叠堆位移的叠加,碟簧同时为 2 个压电叠堆提供必要的预压力;2 个压电叠堆同时缩短时,碟簧的回复力将输出杆压回,从而实现往复运动。此结构中,碟簧同时为 2 个压电叠堆提供相同大小的预压力,故碟簧的预压力应满足:

$$F_{\text{预}} < \min(F_{\text{预max1}}, F_{\text{预max2}}) \quad (1)$$

式中: $F_{\text{预}}$  为碟簧提供的预压力; $F_{\text{预max1}}$  为 PZT1 所能承受的最大预压力; $F_{\text{预max2}}$  为 PZT2 所能承受的最大预压力。

为防止压电叠堆损坏,通过调整预紧端盖的旋合长度,使 2 个压电叠堆承受的初始预压力保持在 500 N 左右。

## 2 率相关迟滞非线性模型及参数辨识

### 2.1 非对称 Maxwell 准静态模型

本文采用非对称 Maxwell 模型对 DPSA 进行准静态建模。非对称 Maxwell 模型由若干个梯形基础单元叠加而成,梯形可分解为上升段和下降段<sup>[6]</sup> 2 个基础单元,如图 3(a)、(b)所示。上升段和

下降段 2 个基础单元的输入与输出分别用 2 个有向的三角形单元进行数学描述,最终 2 个三角形单元可合并成梯形基础单元。

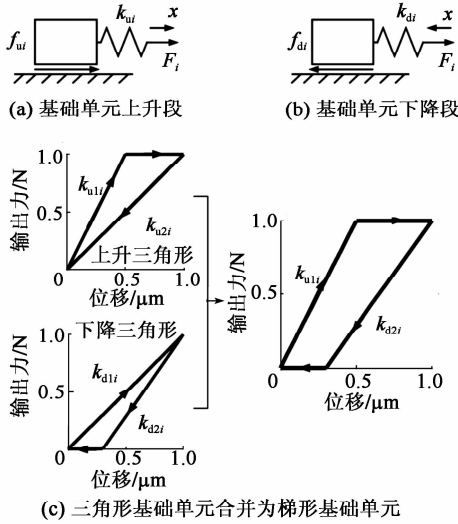


图 3 非对称 Maxwell 模型基础单元

上升基础单元的输入(位移  $x$ )与输出(输出力  $F_u$ )的关系可表示为

$$F_{ui}(kT) = \begin{cases} F_{ui}((k-1)T) + k_{u1i} \Delta x & (F_{ui}(kT) < f_{u1i}, \Delta x > 0) \\ f_{u1i} & (F_{ui}(kT) \geq f_{u1i}, \Delta x > 0) \\ F_{ui}((k-1)T) + k_{u2i} \Delta x & (\Delta x < 0) \end{cases} \quad (2)$$

下降基础单元的输入(位移  $x$ )与输出(输出力  $F_d$ )的关系可表示为

$$F_{di}(kT) = \begin{cases} F_{di}((k-1)T) + k_{d1i} \Delta x & (\Delta x > 0) \\ F_{di}((k-1)T) + k_{d2i} \Delta x & (F_{di}(kT) > f_{d2i}, \Delta x < 0) \\ f_{d2i} & (F_{di}(kT) \leq f_{d2i}, \Delta x < 0) \end{cases} \quad (3)$$

最终将各个单元模型并联叠加,得到系统模型表达式<sup>[6]</sup>为

$$F(kT) = \begin{cases} \sum_{i=1}^n (F_{ui}(kT) + F_{di}(kT)) - \Delta x \sum_{i=1}^n k_{d1i} & (\Delta x > 0) \\ \sum_{i=1}^n (F_{ui}(kT) + F_{di}(kT)) - \Delta x \sum_{i=1}^n k_{u2i} & (\Delta x < 0) \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $F_i(kT)$  为第  $i$  个单元当前输出力;  $F_i((k-1)T)$  为第  $i$  个单元前一个采样周期的输出力;  $f_{ui}$ ,  $f_{di}$ ,  $k_{ui}$ ,  $k_{di}$  分别为第  $i$  个单元上升段摩擦力、下降

段摩擦力、上升段弹簧弹性系数及下降段弹簧弹性系数;  $T$  为采样周期;  $\Delta x$  为输入位移增量。

非对称 Maxwell 模型实质是将单位化后的静态迟滞曲线的上升段与下降段各取  $n$  个点,斜率变化大的地方取点密集,斜率变化小的地方取点稀疏,通过第  $i$  点与第  $i-1$  个点之间的斜率与第  $i$  点的横、纵坐标,辨识出  $n$  个  $k_{u1i}$ 、 $k_{d2i}$  与  $\Delta x_i$ ,从而将原静态迟滞曲线简化成多段斜率不同且首尾相连的有向线段,完成对迟滞曲线的描述。分别对 DPSA 中 2 个压电叠堆进行基于 Maxwell 模型的准静态参数辨识,首先要获得两叠堆各自的迟滞曲线。得到两叠堆各自的准静态迟滞曲线的方法为:在图 2 所示的 DPSA 中,用频率为 1 Hz、峰-峰值 140 V、偏置 70 V 的电压驱动 PZT1,得到 PZT1 的电压-位移迟滞曲线;再用同样的电压信号驱动 PZT2,得到 PZT2 的电压-位移迟滞曲线。在对两叠堆分别进行 Maxwell 准静态迟滞辨识的过程中,上升段和下降段均各取 20 个点。由于模型参数较多,本文仅对辨识结果进行对比。将 PZT1、PZT2 的归一化电压-位移迟滞曲线分别与辨识后的 Maxwell 模型的迟滞曲线进行对比,如图 4 所示。由图可知,Maxwell 模型可精确描述执行器的滞环。

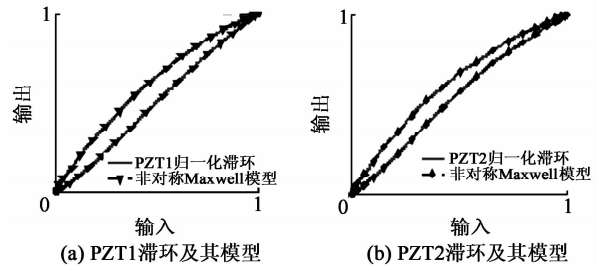


图 4 Maxwell 模型与实际滞环比较

在准静态时,压电叠堆的阻尼力和惯性力可忽略,在输入电压-力-位移的传递过程中,可认为压电叠堆的力-位移为线性关系,故电压-位移与电压-力的归一化迟滞曲线相同,因此,将 Maxwell 归一化迟滞模型作为压电叠堆准静态下的电压-力单位迟滞模型,用  $F_{h1}(t)$  和  $F_{h2}(t)$  表示。

### 2.2 率相关迟滞模型的建立

DPSA 除 2 个压电叠堆外还包含输出杆、套筒等零部件,会影响其输出位移,为使模型更能反映其实际特性,在建模过程中要考虑零部件的影响,引入动力学方程<sup>[7]</sup>描述 DPSA 的动态模型。由于 DPSA 由 2 个压电叠堆驱动,故不能直接将其整体简化为一个二阶系统,应分别对各部分进行建模。根据系统动力学,将 DPSA 系统分为 PZT1、套筒、PZT2 以

及输出杆 4 个部分,如图 5 所示。图中,  $x_1$  为 PZT1 的输出位移,  $x_2$  为套筒与 PZT2 接触面的位移,  $x_3$  为 PZT2 顶端的位移,  $x_4$  为输出杆的位移(即执行

器输出位移),  $F_1$  为 PZT1 的输出力,  $F_2$  为 PZT2 的输出力,  $F_2'$  为  $F_2$  的反力。具体参数及数值如表 1 所示。其系统动力学表达式为

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 = F_1 - k_1 x_1 - k_2 (x_1 - x_2) - c_2 (\dot{x}_1 - \dot{x}_2) \\ m_2 \ddot{x}_2 = -F_2' - k_2 (x_2 - x_1) - c_2 (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) - k_3 (x_2 - x_3) - c_3 (\dot{x}_2 - \dot{x}_3) \\ m_3 \ddot{x}_3 = F_2 - k_3 (x_3 - x_2) - c_3 (\dot{x}_3 - \dot{x}_2) - k_4 (x_3 - x_4) - c_4 (\dot{x}_3 - \dot{x}_4) \\ m_4 \ddot{x}_4 = -k_4 (x_4 - x_3) - c_4 (\dot{x}_4 - \dot{x}_3) - k_5 x_4 \end{cases} \quad (5)$$

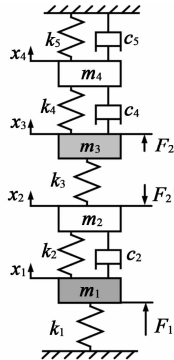


图 5 DPSA 系统动力学模型

表 1 DPSA 系统动力学模型各项参数

参数	数值
PZT1 质量 $m_1/g$	38.16
套筒质量 $m_2/g$	6.25
PZT2 质量 $m_3/g$	15.40
输出杆质量 $m_4/g$	10.31
PZT1 刚度 $k_1/(N \cdot \mu m^{-1})$	360
套筒刚度 $k_2/(N \cdot \mu m^{-1})$	297
PZT2 刚度 $k_3/(N \cdot \mu m^{-1})$	100
输出杆刚度 $k_4/(N \cdot \mu m^{-1})$	1 654
碟簧刚度 $k_5/(N \cdot \mu m^{-1})$	3.24
套筒阻尼 $c_2/(N \cdot s \cdot m^{-1})$	1 000
输出杆阻尼 $c_4/(N \cdot s \cdot m^{-1})$	800
碟簧阻尼 $c_5/(N \cdot s \cdot m^{-1})$	600

压电叠堆各项参数由厂家提供,套筒与输出杆的参数由零件结构计算得到。由于 PZT1 为单端固定的压电叠堆,根据动能等效原理<sup>[8]</sup>,其等效质量为  $m_1/3$ ,在仿真中 PZT1 用其等效质量搭建模型。

引入动力学方程描述 DPSA 系统的动态响应,但动力学方程并不包含压电叠堆自身输出力的动态响应。为了描述压电叠堆输出力的动态响应,将压电叠堆的力响应分为静态力响应与动态力响应,最终压电叠堆输出力的形式为二者按比例进行叠加,即

$$\begin{cases} F_j(t) = k_{sj} \cdot F_{sj}(t) + k_{dj} \cdot F_{dj}(t) \\ k_{sj} + k_{dj} = 1 \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $j$  为压电叠堆的序号 ( $j = 1, 2$ ), 分别表示 PZT1 与 PZT2;  $F_j(t)$  为式(5)中  $F_1$  与  $F_2$  等同;

$F_{sj}(t)$  为 PZTj 的静态力响应;  $k_{sj}$  为 PZTj 静态力比例系数;  $F_{dj}(t)$  为 PZTj 输出的动态力响应;  $k_{dj}$  为 PZTj 动态力比例系数。

PZTj 的动态力可视为一阶惯性环节<sup>[9]</sup>,  $F_{sj}$  与  $F_{dj}$  分别为

$$\begin{cases} F_{sj}(t) = k_{pj} \cdot F_{hj}(t) \\ \tau_j \frac{dF_{dj}(t)}{dt} + F_{dj}(t) = k_{pj} \cdot F_{hj}(t) \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $k_{pj}$  为 PZTj 的单位力放大倍数,在数值上等于压电叠堆的阻断力;  $\tau_j$  为 PZTj 的一阶惯性环节时间常数,其值可由压电叠堆阶跃响应实验得出;  $F_{hj}(t)$  为归一化处理后的 Maxwell 模型描述的准静态单位力滞环。

在输入电压频率很低时,系统可视为准静态系统,  $\tau_j$  的影响可忽略,则在输入电压频率很低时可化简为

$$F_j(t) = (k_{sj} + k_{dj}) \cdot k_{pj} \cdot F_{hj}(t) = k_{pj} \cdot F_{hj}(t) \quad (8)$$

联立式(5)~(8),当输入电压频率很低时,DP-SA 的电压-位移迟滞曲线由 Maxwell 模型与系统动力学方程决定;当输入电压频率高时,DPSA 电压-位移迟滞曲线由 Maxwell 模型、系统动力学方程和两压电叠堆的一阶惯性环节共同决定,从理论上说明了该模型可描述 DPSA 的静态迟滞特性和动态迟滞特性。

利用上述理论,在 Matlab/Simulink 中建立的仿真模型如图 6 所示。在模型中通过控制开关 S1 与 S2 的开闭可模拟 PZT1、PZT2 单独驱动及复合驱动的状态。

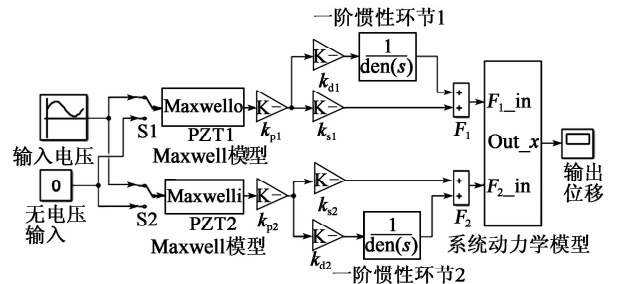


图 6 DPSA 系统 Simulink 模型

### 2.3 迟滞模型参数辨识

PZT<sub>j</sub> 一阶惯性环节的单位力比例系数  $k_{pj}$  在数值上等于压电叠堆的阻断力,由厂家提供的参数可知,PZT1 和 PZT2 阻断力分别为 7 200 N 和 3 000 N,故  $k_{p1} = 7\ 200, k_{p2} = 3\ 000$ 。

由于  $\tau_j$  为压电叠堆自身的性质,需去除压电叠堆外的其他零件进行阶跃响应实验,但叠堆工作时需要一定的预压力,因此,在辨识  $\tau_j$  的实验中移除碟簧,将输出杆用上端盖压紧,下方用称重传感器测量力响应,如图 7 所示。

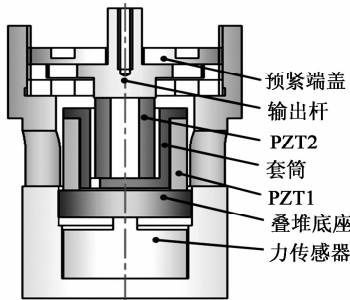


图 7 力响应测试结构图

在此结构下进行了 140 V 阶跃电压下 PZT1 单独驱动及 PZT2 单独驱动实验,力响应辨识实验测试平台如图 8 所示。信号发生器输出的阶跃信号经功率放大器放大后输入 PZT<sub>j</sub>,叠堆产生的力会由底部的压力传感器采集、转化为电压信号,并输入示波器进行显示。直流电源用来为压力传感器供电。

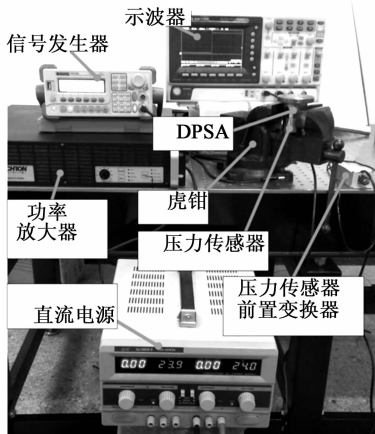


图 8 力响应实验测试

平台一阶惯性环节的阶跃响应<sup>[10]</sup>为

$$F_j(t) = (1 - e^{-t/\tau_j}) \cdot F_{maxj} \quad (9)$$

式中: $F_j(t)$ 为 PZT<sub>j</sub> 的阶跃力; $F_{maxj}$ 为 PZT<sub>j</sub> 阶跃响应恒定后的力。

实验中,由于称重传感器存在底噪,且所测得的

阶跃力为毫伏级,所用称重传感器的灵敏度为 600 N/V,故所得结果存在较大噪声。为消除噪声影响,在 Matlab 中借助 Curve Fitting Tool 工具对测得的阶跃力响应曲线用式(9)拟合,得到在 140 V 电压下 PZT1、PZT2 单独驱动的阶跃力响应曲线,如图 9 所示,由式(9)可得  $\tau_1 = 138.5\ \mu\text{s}, \tau_2 = 120.9\ \mu\text{s}$ 。

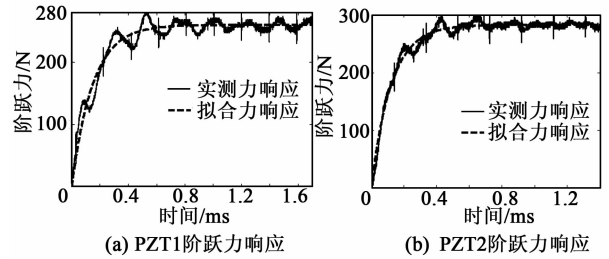


图 9 压电叠堆阶跃力响应及时间常数辨识

### 3 执行器仿真与实验对比

图 10 为双压电叠堆执行器实物及其位移测试平台。信号发生器输出的正弦电压经功率放大器放大后输入 PZT1 与 PZT2,使 DPSA 输出杆产生位移,此位移由电涡流采集后转换为电压信号在示波器上显示。

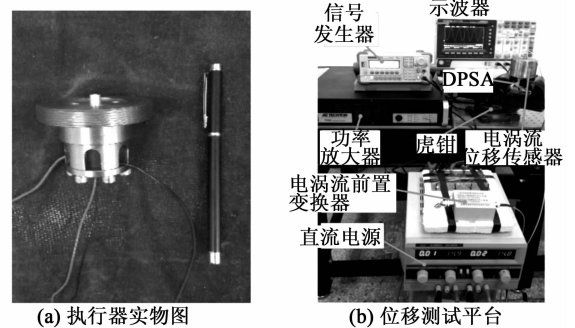
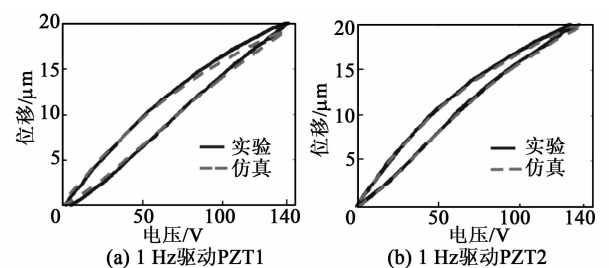
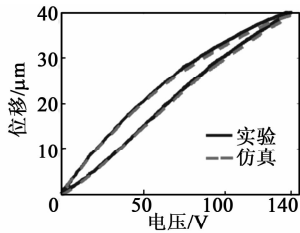


图 10 双压电叠堆执行器实物及其位移测试平台

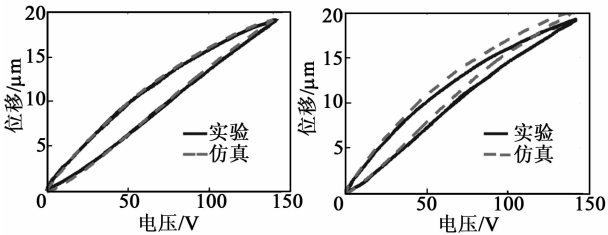
将得到的实验数据与仿真作对比,以验证仿真模型的准确性。在峰-峰值 140 V、偏置 70 V 的电压、碟簧预压力 500 N 的条件下,对 PZT1 单独驱动、PZT2 单独驱动、复合驱动 3 种情况的滞环进行对比,结果如图 11~14 所示。复合驱动下模型检验误差如表 2 所示。





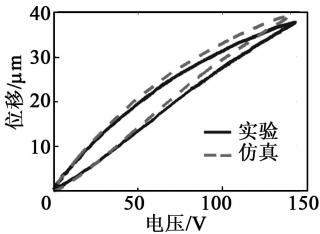
(c) 1 Hz复合驱动

图 11 1 Hz 驱动 DPSA 电压-位移滞环仿真与实验对比



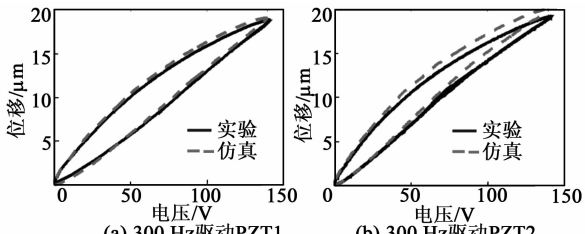
(a) 100 Hz驱动PZT1

(b) 100 Hz驱动PZT2



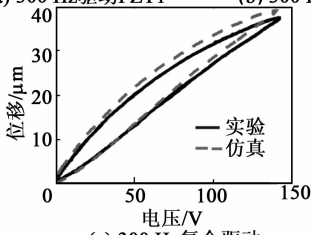
(c) 100 Hz复合驱动

图 12 100 Hz 驱动 DPSA 电压-位移滞环仿真与实验对比



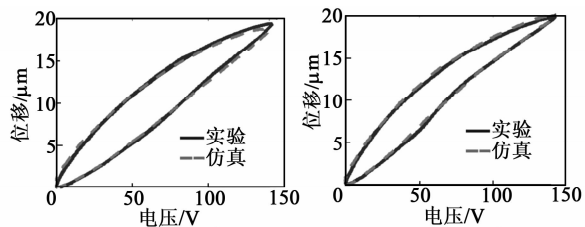
(a) 300 Hz驱动PZT1

(b) 300 Hz驱动PZT2



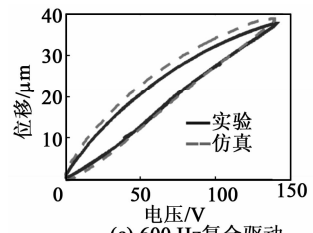
(c) 300 Hz复合驱动

图 13 300 Hz 驱动 DPSA 电压-位移滞环仿真与实验对比



(a) 600 Hz驱动PZT1

(b) 600 Hz驱动PZT2



(c) 600 Hz复合驱动

图 14 600 Hz 驱动 DPSA 电压-位移滞环仿真与实验对比

表 2 模型检验误差

频率/Hz	均方根误差/ $\mu\text{m}$	幅值最大误差/ $\mu\text{m}$
1	0.486	0.71
100	0.914	1.03
300	1.044	1.63
600	1.340	1.71

由图 11~14 及表 2 可知,建立的模型可较好地描述 PZT1 单独驱动的迟滞曲线,对于 PZT2 单独驱动及复合驱动的情况,此模型在准静态下可准确描述执行器滞环,在动态时可描述滞环变化趋势。600 Hz 内,复合驱动下幅值最大误差不超过 1.71  $\mu\text{m}$ ,均方根误差最大为 1.34  $\mu\text{m}$ ,随着频率的增加,模型误差有增大趋势。在准静态时幅值存在误差的可能原因是压电叠堆实际的阻断力与厂家提供的阻断力有微小差别,且每次实验时功率放大器的放大倍数可能存在微小波动。综上所述,此模型描述 DPSA 动态特性的可行性得到验证。

PZT1、PZT2 单独驱动及复合驱动的位移随频率的关系如图 15 所示。由位移-频率曲线可知,到 600 Hz 为止,DPSA 在 3 种驱动模式下的位移衰减均未达 -3 dB,复合驱动时在 600 Hz 衰减 7.1%,与其他位移放大机构相比,响应频率有很大提升,与同等长度的压电叠堆执行器相比,输出位移可达 2 倍。

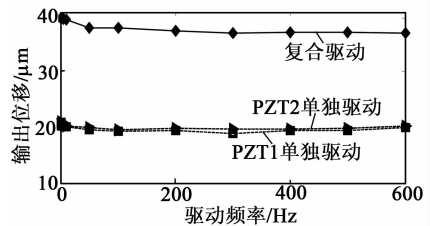


图 15 不同驱动形式下 DPSA 位移-频率的关系

#### 4 结束语

本文提出并设计了一种双压电叠堆复合驱动的执行器,包含 2 根尺寸不同的压电叠堆,可单独驱

动,也可同时驱动。利用非对称 Maxwell 模型建立在静态下 2 个压电叠堆的电压-力单位迟滞曲线,并通过一阶惯性环节描述压电叠堆的动态迟滞曲线,将合成后的力输入系统动力学模型。通过仿真与实验的位移对比,600 Hz 内复合驱动的幅值最大误差不超过  $1.71 \mu\text{m}$ ,均方根误差最大为  $1.34 \mu\text{m}$ ,说明 Simulink 模型可描述滞环变化趋势,且有一定的预测性。执行器在 600 Hz 内,位移衰减了 7.1%,与其他位移放大机构相比,其具有很好的高频性能。本文从原理上验证了双压电叠堆作动器实现位移叠加的可行性,若需要得到更大的叠加位移,可采用更长且可互相匹配的压电叠堆进行实验研究。

#### 参考文献:

- [1] VIJAYA M S. Piezoelectric materials and devices: Applications in engineering and medical sciences[M]. Boca Raton; CRC Press, 2016:57-124.
- [2] 蒋鑫. 喷嘴挡板阀用位移放大超磁致伸缩执行器的研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2014.
- [3] 黄卫清,史小庆,王寅. 菱形压电微位移放大机构的设计[J]. 光学精密工程,2015,23(3):803-809. HUANG Weiqing, SHI Xiaoqing, WANG Yin. Design of diamond piezoelectric micro displacement amplification mechanism[J]. Optics and Precision Engineering, 2015,23(3):803-809.
- [4] 李志鹏,李万宝,那少聃,等. 基于滑模观测器的感应电机力矩伺服系统研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学),2017(10):198-203. LI Zhipeng, LI Wanbao, NA Shaodan, et al. Research of torque servo system of induction motor based on sliding mode observer[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2017(10):198-203.
- [5] GOLDFARB M, CELANOVIC N. Modeling piezoelectric stack actuators for control of micromanipulation [J]. IEEE Control Systems Magazine,1997,17(3):69-79.
- [6] 裘进浩,陈海荣,陈远晟,等. 压电驱动器的非对称迟滞模型[J]. 纳米技术与精密工程,2012,10(3):189-197. QIU Jinhao, CHEN Hairong, CHEN Yuansheng, et al. A model for asymmetric hysteresis of piezoelectric actuators[J]. Nanotechnology and Precision Engineering,2012,10(3):189-197.
- [7] 叶芳. 结构振动控制中超磁致伸缩执行器的系统建模与控制[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2009.
- [8] GU Guoying, LI Chunxia, ZHU Limin, et al. Modeling and identification of piezoelectric-actuated stages cascading hysteresis nonlinearity with linear dynamics [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2016, 21(3):1792-1797.
- [9] 郭亚子,朱玉川. 压电叠堆执行器迟滞非线性建模与分析[J]. 压电与声光,2017,39(4):520-524. GUO Yazi, ZHU Yuchuan. Modeling and analysis on hysteresis nonlinear characteristics of the piezoelectric stack actuators [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2017,39(4):520-524.
- [10] 董景新. 控制工程基础[M]. 3 版. 北京:清华大学出版社,2009:76-95.

### 《压电与声光》免费索阅卡

姓名:\_\_\_\_\_ 职务:\_\_\_\_\_ 职称:\_\_\_\_\_ 单位:\_\_\_\_\_

地址:\_\_\_\_\_ 邮编:\_\_\_\_\_ 电话:\_\_\_\_\_

企业产品:\_\_\_\_\_

索阅期号:\_\_\_\_\_年\_\_\_\_\_月(每次仅限壹期)

复印有效