

# 压电纤维致动器的率相关偏置迟滞建模及补偿\*

杨浩<sup>1</sup>, 娄军强<sup>1,2</sup>, 杨依领<sup>1</sup>, 陈特欢<sup>1</sup>, 陈海荣<sup>1</sup>, 魏燕定<sup>2</sup>

(1. 宁波大学机械工程与力学学院 宁波, 315211)

(2. 浙江大学浙江省先进制造技术重点研究实验室 杭州, 310027)

**摘要** 为了克服传统压电陶瓷韧性不足, 利用压电宏纤维(macro fiber composite, 简称MFC)换能效率高且变形能力强的优点, 提出了一种MFC致动的柔性结构, 建立了描述MFC动态偏置迟滞非线性的率相关双极性偏置PI(rate-dependent bipolar bias PI, 简称RDBBPI)迟滞模型, 并进行了前馈补偿控制研究。首先, 针对MFC致动柔性结构的静态偏置迟滞特性, 利用Prandtl-Ishlinskii(PI)模型描述系统的对称迟滞特性, 并通过叠加死区算子来捕捉其双极性偏置特性, 建立了MFC致动器的静态双极性偏置PI(bipolar bias PI, 简称BBPI)模型; 其次, 确立迟滞环斜率与驱动信号速率之间的线性关系, 得到描述MFC致动器动态迟滞特性的RDBBPI模型; 最后, 进行了实验验证。实验结果表明: 所提出的RDBBPI模型能够很好地捕捉不同频率下MFC致动柔性结构的动态迟滞特性; 在基于RDBBPI模型的前馈补偿下, MFC致动柔性梁构件的实测振动位移与期望跟踪位移基本重合, 补偿后结构实测位移与期望轨迹之间的线性度误差为4.62%, 证实了所提RDBBPI模型对MFC致动器驱动控制和位移跟踪精度的改善效果。

**关键词** 压电宏纤维致动器; 动态迟滞非线性; 率相关; 双极性偏置; 前馈补偿

**中图分类号** TH113.1; TP273

## 引言

柔性结构广泛应用于精密医疗器械、航空航天及仿生机器人等诸多领域<sup>[1]</sup>。以压电材料为代表的智能材料具有驱动精度高、响应速度快且易与柔性结构集成的特点, 是柔性结构精密驱动、变形控制和振动控制的首选元件<sup>[2]</sup>。尤其是近年来NASA研发的MFC, 克服了传统压电陶瓷变形小且柔韧性差的缺点, 具有较好的柔韧性、较大的致动力矩以及优异的机电转化效率。Shi等<sup>[3]</sup>提出了一种MFC致动的多模态剪切波除冰技术, 实现了柔性薄板式机翼的除冰控制。基于智能蒙皮技术, Henry等<sup>[4]</sup>通过MFC驱动机翼产生变形, 实现了小型无人机的姿态和转弯控制。Cen等<sup>[5]</sup>利用悬臂梁的振动模仿鲔科鱼类尾鳍摆动, 设计了一款游速可达7.5 cm/s的MFC致动仿生水下机器人。任泉荣等<sup>[6]</sup>实验测得了MFC致动的仿锦鲤尾鳍式小型水下推进器的摆动特性, 并分析了该仿生推进器摆动过程中周围流场的分布及演化情况。可见, MFC致动器在柔性结构的变形驱动、空间柔性结构的颤振抑制、柔性微纳器件的精密定位以及仿生机器人的驱动控制等领域

展现出了巨大的潜在应用价值<sup>[7]</sup>。

压电致动器基于逆压电效应实现高精度、高分辨率的驱动定位, 但是压电材料本身的迟滞特性导致其驱动信号与输出位移之间存在着多值映射关系, 从而导致系统定位精度的一致性和重复性下降, 甚至有可能导致系统发散, 造成系统不稳定。由于压电材料迟滞非线性的物理成因非常复杂, 研究人员建立了多种唯象模型来描述迟滞现象中输入与输出之间的数学关系, 该类模型主要包括Bouc-Wen模型、Preisach(P)模型、PI模型及Krasnosel'skii-Pokrovskii(KP)模型等<sup>[8]</sup>。

与传统的压电陶瓷相比, MFC致动器的高输入电压以及多种材料复合结构带来更加严重的迟滞非线性问题。Chen等<sup>[9]</sup>研究了MFC致动器迟滞现象的擦除性和一致性, 并建立了基于准静态实验结果的改进Preisach模型来描述MFC致动器的迟滞行为。为克服Preisach模型计算量大和求逆复杂的缺点, Xue等<sup>[10]</sup>建立了描述MFC致动器静态迟滞非线性的Bouc-Wen模型, 并采用遗传算法对模型参数进行优化求解。在经典PI模型的基础上, 刘宽等<sup>[11]</sup>提出了一种修正PI模型对MFC致动的悬臂梁结构进

\* 国家自然科学基金资助项目(51975517, 51805276); 浙江省自然科学基金资助项目(LY20E050007); 浙江省省属高校基本科研业务费专项资金资助项目(SJLY2021014); 宁波市自然科学基金资助项目(2019A610112)

收稿日期: 2020-10-15; 修回日期: 2021-01-20

行了静态迟滞特性建模与补偿控制研究。在等幅双极性电压激励下, Johannes等<sup>[12]</sup>发现MFC致动悬臂梁结构的正负向振动位移存在着偏置问题, 而经典PI模型不能很好地描述该迟滞行为。Xue等<sup>[13]</sup>实验证实了MFC致动器的压电应变常数 $d_{33}$ 与驱动电压的极性有关, 造成MFC致动器的驱动能力在正、负极性激励电压下存在着明显差异。Qu等<sup>[14]</sup>发现了MFC致动器的迟滞环具有“类椭圆”特性。大量相关研究证实压电致动器的迟滞特性与激励信号的频率有关, 呈现出动态率相关特性<sup>[15]</sup>。综上, MFC致动器的驱动电压与响应位移之间不仅存在着显著的双极性偏置迟滞非线性, 而且还具有动态率相关特性。

为了提高MFC致动柔性结构的定位精度和跟踪效果, 本研究针对MFC致动器的率相关双极性偏置特性, 提出相应的迟滞模型并设计补偿控制方法。首先, 搭建了MFC致动柔性结构实验测控平台, 测试得到MFC致动柔性结构的率相关双极性偏置迟滞特性; 其次, 在PI迟滞模型的基础上引入一系列具有无记忆、非奇对称特性的单边死区算子来捕捉双极性偏置特性, 确立迟滞环斜率与驱动电压变化速率之间的关系, 从而使得率无关的PI迟滞模型具有描述率相关特性的能力; 然后, 建立了可以用于描述和补偿MFC致动器率相关双极性偏置迟滞特性的RDBBPI迟滞模型, 给出了正、逆模型的求解过程, 并通过最小二乘法辨识得到RDBBPI正、逆模型参数; 最后, 进行了不同迟滞模型建模精度和位移跟踪补偿比较实验。

## 1 MFC致动的柔性结构系统

MFC是由美国航空航天局兰利中心研发的一种新型压电纤维复合材料, 其主要成分包括矩形截面的压电纤维、聚合物柔性基体材料、交叉指型铜电极以及聚酰亚胺薄膜等。与其他传统形式的压电陶瓷材料相比, MFC具有柔韧性好、变形量大、输出力大且响应速度快等优点, 因此被广泛应用于柔性结构的主动变形控制及振动抑制中。MFC结构示意图

如图1所示。

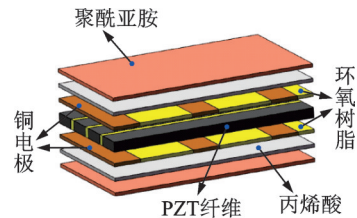


图1 MFC结构示意图

Fig.1 Structure diagram of the MFC laminate

为了测试MFC致动柔性结构动态特性, 搭建了MFC致动柔性梁构件实验系统, 实验装置图如图2所示。MFC致动器由美国Smart Material公司生产, 为了保证更好的驱动效果, 选用工作模式为 $d_{33}$ 的致动器, 具体型号为M2814-P1。MFC致动器通过粘结性能优异的环氧树脂胶3M-DP460对称地粘贴在柔性铝梁根部, 梁构件及MFC致动器参数如表1所示。在测试过程中, 上位机先通过USB总线将驱动电压信号传输到多槽嵌入式机箱cDAQ-9178, 然后经D/A模块NI-AO9263将数字信号转换为模拟电压信号传输到高压驱动器Trek-PZD700A中, 将驱动信号放大200倍后, 施加到MFC致动器上。MFC致动器基于自身逆压电效应产生形变, 驱动梁构件产生动态变形。同时, 置于梁构件末端的激光位移传感器LK-G80(基恩士, 分辨率为 $0.15\ \mu\text{m}$ )实时检测梁构件的振动位移, 并将信号调理后经A/D模块NI-AI9205传输到上位机。整个测试系统基于LabVIEW软件平台搭建完成。

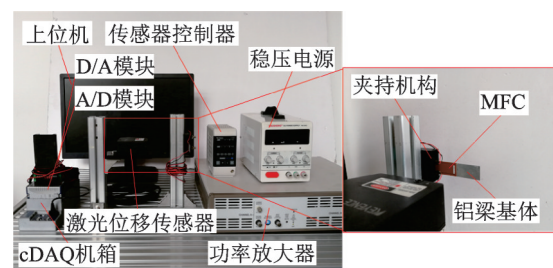


图2 实验装置图

Fig.2 Photograph of the experimental setup

表1 梁构件及MFC致动器参数

Tab.1 Parameters of the beam and MFC actuator

参数	材料	(长×宽×厚)/mm	MFC型号	(总体长×宽×厚)/mm
梁构件参数	1100纯铝	76×20×0.2	—	—
致动器(MFC)参数	—	28×14×0.3	MFC M2814-P1	38×20×0.6

将峰值为 $\pm 400\ \text{V}$ , 频率分别为0.1, 1, 5以及10 Hz的4个三角波信号施加到MFC致动器上, 用

激光位移传感器测得柔性构件的末端振动位移与驱动电压之间的关系, MFC致动器的迟滞环如图3所

示。由图可见,MFC致动器的驱动电压和柔性结构末端的响应位移之间具有典型的迟滞现象,且不同驱动频率下的迟滞环也各不相同。需要指出的是,在MFC致动器的等幅双极性电压驱动下,柔性结构的正、负向振动位移还存在着明显的偏置问题,且偏置现象也随着驱动频率发生相应变化。在频率为0.1 Hz的双极性三角波电压激励下,柔性结构的正、负振动位移分别为0.901和-0.743 mm,其迟滞误差和偏置误差分别为34.1%和17.5%;而在输入频率为10 Hz时的正、负振动位移分别为0.594和-0.468 mm,相应的迟滞误差和偏置误差可达47.5%和21.3%。显然,MFC致动器的多相复合结构导致其具有显著的率相关偏置迟滞特性,从而降低了MFC致动柔性结构的定位和操控精度。因此,有必要对MFC致动器的率相关偏置迟滞特性进行深入研究,并提出相应的补偿方法以改善其驱动精度。

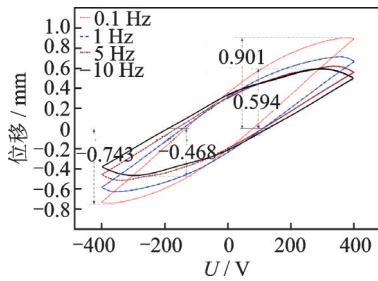


图3 MFC致动器的迟滞环

Fig.3 Hysteresis loops of the MFC actuators

## 2 双极性率相关偏置迟滞模型建立

### 2.1 双极性偏置PI模型

PI迟滞模型作为应用最广泛的唯象模型,具有模型参数与物理特性无关、数学表达式简单、参数少、辨识容易及求逆方便等优点<sup>[16]</sup>。PI模型中基本迟滞单元Play算子如图4所示。

其定义为

$$F_r[x](0) = f_r(x(0), 0) \quad (1)$$

$$F_r[x](t) = f_r(x(t), F_r[x](t-T)) \quad (2)$$

其中: $x(t)$ ,  $F_r[x](t)$ 分别为Play算子的输入和输出; $T$ 为采样间隔; $r$ 为Play算子的阈值; $f_r$ 为基本算子。

经典PI迟滞模型的核心思想是通过多个阈值不同、权重不同的基本算子加权叠加来描述迟滞现象,其表达式为

$$y[x](t) = F_r[x(t), y_0] = \sum_{i=0}^n w_{Hi} F_r[x](t) = F^T W_{Hi} \quad (3)$$

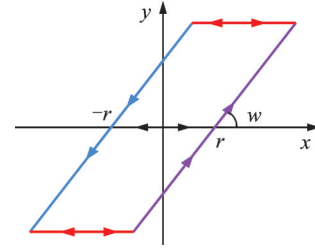


图4 Play算子

Fig.4 Play operator

其中: $F^T = [F_{r_0}[x](t), F_{r_1}[x](t), \dots, F_{r_n}[x](t)]^T$ 为Play算子向量; $n$ 为Play算子个数; $W_{Hi} = [\omega_{H0}, \omega_{H1}, \dots, \omega_{Hn}]^T$ 为Play算子的权值向量。

由于Play算子的中心对称性,经典PI模型仅能描述对称的迟滞现象。为了克服这种局限性,在经典PI迟滞模型的基础上串联具有无记忆、非奇对称特性的单边死区算子,其表达式为

$$G_s[y](t) = G_s(y(t), r_{si}) =$$

$$\begin{cases} \max\{y(t) - r_{si}, 0\} & (r_{si} > 0) \\ y(t) & (r_{si} = 0) \\ \min\{y(t) - r_{si}, 0\} & (r_{si} < 0) \end{cases} \quad (4)$$

其中: $G_s$ 为单边死区算子; $y(t)$ 和 $r_{si}$ 分别为死区算子的输入和阈值。

将不同阈值的单边死区算子加权叠加,得到

$$G[x](t) = w_{si}^T G_s[y](t) \quad (5)$$

其中: $w_{si}^T = [\omega_{s-m}, \omega_{s-m+1}, \dots, \omega_{s0}, \omega_{s1}, \dots, \omega_{sm}]$ 为单边死区算子的权值向量,其个数为 $2m+1$ ;  $G_s = [G_{-m}, G_{-m+1}, \dots, G_0, G_1, \dots, G_m]$ 为单边死区算子向量。

在经典PI迟滞模型基础上,将一系列Play算子 $F_r$ 与另一系列单边死区算子 $G_s$ 串联,得到描述MFC致动器静态偏置迟滞现象的BBPI模型,即

$$y(t) = \Gamma[x](t) = \underbrace{w_{si}^T G}_{\text{Dead zone}} \left[ \underbrace{W_{Hi}^T F}_{\text{Play}} \right] (t) \quad (6)$$

其中:Dead zone为死区算子;Play为Play算子。

对式(6)求逆可得到其逆模型为

$$\Gamma^{-1}[x](t) = W_{Hi}^T F [w_{si}^T G_s^{-1}](t) \quad (7)$$

### 2.2 基于BBPI模型的率相关迟滞模型

BBPI迟滞模型通过引入单边死区算子解决了PI迟滞模型的对称问题,但是仍属于率无关静态迟滞模型,不能表征MFC致动器的率相关动态迟滞特性。为了有效地描述MFC致动器的动态迟滞特性,在BBPI模型的基础上,建立和引入Play算子权重 $w_{Hi}$ 与输入电压频率之间的关系,从而使得本来率无关的Play算子具有率相关性。相关研究表明,



Play算子的权重不仅与阈值 $r_{Hi}$ 有关,而且还取决于激励信号的速率<sup>[17]</sup>。设迟滞环斜率与激励信号速率具有如下线性关系

$$\dot{y}(t) = k\dot{u}(t) + b \quad (8)$$

其中: $y(t)$ 和 $\dot{y}(t)$ 分别为系统输出及其导数; $u(t)$ 和 $\dot{u}(t)$ 分别为致动器的激励电压信号及其导数。

将式(8)写成矩阵形式,得到

$$\dot{Y} = K\dot{U} + B \quad (9)$$

其中: $\dot{Y} = [y_0, y_1, \dots, y_n]^T$ 为输出向量; $\dot{U} = [u_0, u_1, \dots, u_n]^T$ 为输入向量; $B = [b_1, b_2, \dots, b_n]^T$ 为截距常数向量; $K$ 为 $n \times n$ 的斜率向量, $K =$

$$\begin{bmatrix} k_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & k_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & k_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_n \end{bmatrix}_{n \times n}。$$

PI模型的初始加载曲线是由适量阈值分割成的多段线性折线组成,如图5所示。

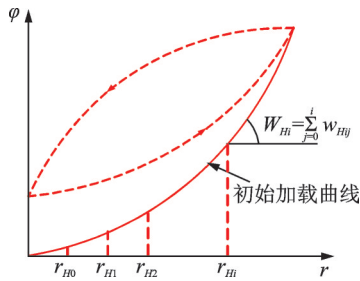


图5 初始加载曲线

Fig.5 Initial loading curve

初始加载曲线的数学表达式为

$$\varphi(r) = \sum_{j=0}^i w_{Hj}(r - r_{Hi}) \quad (10)$$

$$(r_{Hi} \leq r < r_{Hi+1}, i = 0, 1, \dots, n)$$

其中: $w_{Hj}$ 为Play算子权重; $r_{Hj}$ 为Play算子阈值。

对式(10)求导,即可得到每段折线斜率为

$$\frac{d}{dr} \varphi(r) = \sum_{j=0}^i w_{Hj} \quad (r_{Hi} \leq r < r_{Hi+1}; i = 0, 1, \dots, n) \quad (11)$$

将式(11)展开写成矩阵形式,即

$$\dot{Y} = R W_{Hi} \quad (12)$$

其中:

$$W_{Hi} = [w_1 \quad w_2 \quad \dots \quad w_n]^T; R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}_{n \times n}。$$

将式(12)代入式(9),得到

$$W_{Hi} = R^{-1}(K\dot{U} + B) = R^{-1}K\dot{U} + R^{-1}B \quad (13)$$

令 $R^{-1}K = K_a$ ,  $R^{-1}B = K_b$ ,则Play算子权重 $w_{Hi}$ 与激励信号输入速率之间的关系为

$$W_{Hi} = K_a \dot{U} + K_b \quad (14)$$

因此,描述MFC致动器动态偏置迟滞特性的RDBBPI迟滞模型的表达式为

$$y(t) = \Gamma[x, \dot{x}(t)](t) = \underbrace{w_{si}^T G}_{\text{Dead zone}} \left[ \underbrace{W_{Hi}^T(\dot{x}(t)) F_r}_{\text{Rate-dependent}} \right](t) \quad (15)$$

其中:Rate-dependent为率相关。

在利用建立起来的RDBBPI迟滞模型描述MFC致动器动态迟滞特性的基础上,通过对其求逆即可得到MFC致动器的补偿控制电压。由于RDBBPI迟滞模型与其逆模型互为反函数,其补偿控制电压可通过对式(15)的2层算子依次求逆得到,即

$$\Gamma^{-1}[x](t) = W_{Hi}'^T(\dot{x}(t)) F_r[w_{si}'^T G^{-1}[x]](t) \quad (16)$$

其中: $W_{Hi}'$ ,  $w_{si}'$ 为RDBBPI逆模型的权重矩阵。

$W_{Hi}'$ 和 $w_{si}'$ 计算公式分别为

$$W_{Hi}'(\dot{x}(t)) = 1/w_{H0}(\dot{x}(t)) \quad (17)$$

$$W_{Hi}'(\dot{x}(t)) =$$

$$\frac{-w_{Hi}(\dot{x}(t))}{\left( w_{H0} + \sum_{j=1}^i w_{Hj}(\dot{x}(t)) \right) \left( w_{H0} + \sum_{j=1}^{i-1} w_{Hj}(\dot{x}(t)) \right)} \quad (18)$$

$$w_{s0}' = 1/w_{s0} \quad (19)$$

$$w_{si}' = \frac{-w_{si}}{\left( w_{s0} + \sum_{j=1}^i w_{sj} \right) \left( w_{s0} + \sum_{j=1}^{i-1} w_{sj} \right)} \quad (20)$$

其中: $i = -m, \dots, -1, 1, \dots, m_0$ 。

### 3 RDBBPI迟滞模型参数辨识及验证

首先,忽略MFC致动器的动态迟滞效应,对MFC致动器的准静态双极性偏置(BBPI)迟滞模型进行参数辨识。将幅值为 $\pm 400$  V、频率为0.1 Hz的等幅三角波电压信号施加到致动器上,并同步获取柔性结构的振动位移。参数辨识过程中,算子个数与拟合精度关系密切。一般而言,随着算子数目的增加,拟合精度相应提高,但也伴随着辨识和逆模型计算量大的不足,且降低了辨识模型的鲁棒性。综合多组不同Play算子和死区算子个数的辨识结果,最终确定Play算子与死区算子的个数分别为11和

3。计算得到 BBPI 迟滞模型中算子及相应逆算子的阈值与权重, Play 算子与其逆算子参数如表 2 所示,死区算子与其逆算子参数如表 3 所示。

表 2 Play 算子与其逆算子参数

**Tab.2 Parameters of the Play operators and their inverse**

$i$	$r_{Hi}$	$w_{Hi}$	$r'_{Hi}$	$w'_{Hi}$
1	0	0.042 5	0	23.500 0
2	36.36	0.424 0	1.55	-21.400 0
3	72.73	0.146 0	18.60	-0.509 0
4	109.10	0.234 0	40.80	-0.452 0
5	145.50	0.211 0	71.60	-0.236 0
6	181.80	0.165 0	110.00	-0.127 0
7	218.20	0.048 5	154.40	-0.031 2
8	254.50	0.067 7	200.60	-0.039 8
9	290.90	0.043 2	249.30	-0.023 3
10	327.30	$8.49 \times 10^{-15}$	299.50	$-4.45 \times 10^{-15}$
11	363.60	$1.37 \times 10^{-14}$	349.80	$-7.17 \times 10^{-15}$

表 3 死区算子与其逆算子参数

**Tab.3 Parameters of the dead zone operators and their inverse**

$i$	$r_{si}$	$w_{si}$	$r'_{si}$	$w'_{si}$
1	146.6	$-5.49 \times 10^{-4}$	0.397	94.2
2	0	0.002 7	0	369.6
3	174.5	$-6.57 \times 10^{-4}$	0.472	118.6

进一步获取 RDBBPI 迟滞模型相关参数,需要确定式(9)中斜率向量  $K$  和截距向量  $B$  的值。实验过程中以幅值为  $\pm 400$  V、频率分别为 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 1.0, 1.3, 1.5, 1.7, 2.0, 2.3, 2.5 和 2.7 Hz 的 12 个三角波信号为输入激励,并以对应得到柔性构件末端的振动响应位移为输出信号。由于 RDBBPI 迟滞模型主要针对 Play 算子权重的率相关性,因此先通过参数辨识得到 12 个激励信号各自对应的 11 个 Play 算子的权重  $w_{Hi}$ ,然后通过线性回归拟合得到 Play 算子权重  $w_{Hi}$  与激励电压速率之间的线性关系,Play 算子权重与输入信号速率拟合曲线如图 6 所示。

由图 6 可以看出,Play 算子权重  $w_{Hi}$  与输入信号速率具有显著的线性相关性,拟合得到每一个 Play 算子所对应的斜率向量  $K$  和截距向量  $B$  的值如表 4 所示。

为检验所提 RDBBPI 迟滞模型对 MFC 致动柔性结构动态迟滞特性的刻画能力,在 0.1, 1.5 以及 10 Hz 这 4 个不同频率三角波输入信号下,对经典 PI 模型、BBPI 模型以及 RDBBPI 模型预测输出与柔性结构实际振动响应进行对比,同时还给出了 3 个模型预测输

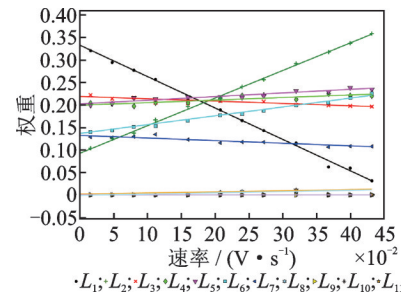


图 6 Play 算子权重与输入信号速率拟合曲线

Fig.6 Fitting lines between weights of Play operators and the velocities of the input signals

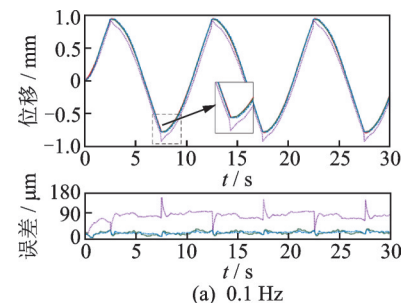
表 4 斜率向量和截距向量值

**Tab.4 Parameters of the slope vector and intercept vector**

$i$	$K$	$B$
1	$-6.957 \times 10^{-5}$	0.332
2	$6.114 \times 10^{-5}$	0.092
3	$-5.154 \times 10^{-6}$	0.218
4	$5.704 \times 10^{-6}$	0.198
5	$8.078 \times 10^{-6}$	0.201
6	$1.955 \times 10^{-5}$	0.136
7	$-5.799 \times 10^{-6}$	0.132
8	$2.414 \times 10^{-6}$	0.002
9	$1.874 \times 10^{-12}$	$-6.859 \times 10^{-10}$
10	$2.551 \times 10^{-13}$	$-9.331 \times 10^{-11}$
11	$2.797 \times 10^{-6}$	-0.001

出与实测输出之间的偏差,不同激励信号下 PI, BBPI 和 RDBBPI 模型的实验对比及误差对比分别如图 7 和表 5 所示。其中,经典 PI 和 BBPI 的模型辨识参数都是基于 0.1 Hz 三角波激励信号下的实验结果。

由图 7 和表 5 可见:①Play 算子的中心对称结构导致经典 PI 模型不能描述 MFC 致动器的双极性偏置特性,使得不同激励信号下经典 PI 模型的预测输出与实验结果均有较大偏差,且 PI 模型的率不相关性导致其模型预测误差随着输入信号速率增加亦相应变大,如图 7(d) 中 PI 模型逼近 10 Hz 位移信号的模型误差高达 23.29%;②由于 BBPI 迟滞模型中的死区算子很好地描述了 MFC 致动器的偏置特性,



(a) 0.1 Hz

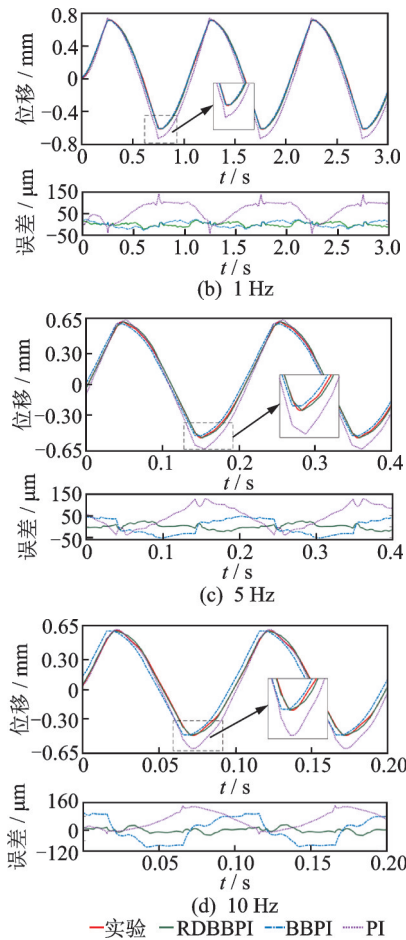


图7 三角波激励信号下PI, BBPI和RDBBPI模型实验对比图

Fig.7 Experimental comparisons among the PI, BBPI and RDBBPI model subjected to triangular wave excitations

表5 三角波激励信号下PI, BBPI和RDBBPI模型误差对比

Tab.5 Comparison of modeling errors among the PI, BBPI and RDBBPI model subjected to triangular wave excitations

$f/\text{Hz}$	模型	绝对误差/ $\mu\text{m}$	平均误差/ $\mu\text{m}$	相对误差/%
0.1	PI	158.2	76.1	17.15
	BBPI	22.1	3.7	2.37
	RDBBPI	23.4	6.6	2.51
1.0	PI	139.9	64.8	19.05
	BBPI	28.4	11.2	4.02
	RDBBPI	23.0	7.0	3.26
5.0	PI	133.2	54.8	21.07
	BBPI	68.8	33.5	11.64
	RDBBPI	26.0	9.3	4.25
10.0	PI	140.0	59.8	23.29
	BBPI	114.2	60.6	18.31
	RDBBPI	27.5	14.2	4.94

在0.1和1 Hz激励信号下的预测输出与柔性结构振动位移基本一致(见图7(a, b)),模型误差仅为2.37%和4.02%,但是BBPI模型对于变化速率较快的结构响应不能很好逼近,仍存在着较大的模型误差(见图7(c, d)),在5和10 Hz激励信号下的模型误差分别为11.64%和18.31%;③引入率相关Play算子的RDBBPI迟滞模型对不同频率激励信号下的柔性结构振动响应均实现了较为准确地逼近,4组实验中RDBBPI的模型误差均不超过5%。因此,所提出的RDBBPI迟滞模型能够描述MFC致动器的率相关双极性偏置迟滞特性。

### 4 前馈补偿控制实验

为检验基于RDBBI迟滞模型前馈控制方法的有效性,开展了柔性构件在MFC致动器作用下的实时位移跟踪控制实验。实验中根据建立的迟滞逆模型算式,计算得到前馈补偿控制电压,然后将补偿电压施加到MFC致动器上,驱动柔性结构产生相应的振动位移,三角波激励下理想轨迹与实际轨迹及实测轨迹偏差对比分别如图8和图9所示。3种前馈补偿器下的轨迹跟踪误差如表6所示。由图8和图9可见:①相较于PI和BBPI迟滞模型,基于RDBBPI迟滞模型的前馈控制实现了对MFC致动

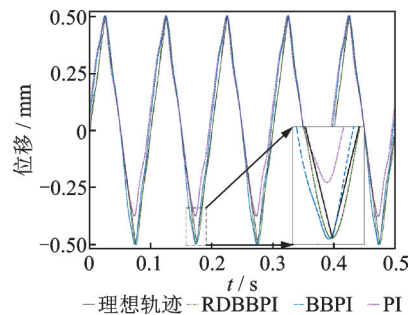


图8 三角波激励下理想轨迹与实际轨迹对比图

Fig.8 Comparisons between the desired and experimental trajectories subjected to a triangular wave excitation

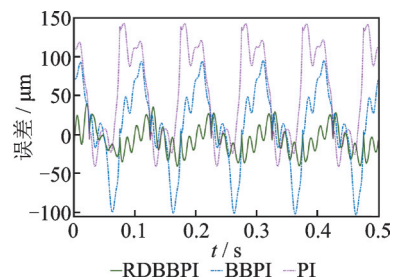


图9 三角波激励下理想轨迹与实测轨迹偏差对比图

Fig.9 Comparison of tracking errors between the desired and measured trajectories subjected to a triangular wave excitation

表 6 3种前馈补偿器下的轨迹跟踪误差

Tab.6 Trajectory tracking errors with the three feed-forward compensators

模型	绝对误差/ $\mu\text{m}$	平均误差/ $\mu\text{m}$	相对误差/%
PI	142.7	61.8	14.27
BBPI	105.9	44.2	10.59
RDBBPI	40.2	14.9	4.02

器双极性偏置特性和率相关迟滞特性的补偿,补偿后柔性构件末端的实测跟踪位移曲线与理想位移曲线基本重合;②最大跟踪误差发生在轨迹曲线的转折处,且正负跟踪误差基本一致,约为  $40\ \mu\text{m}$ (见表 6);③BBPI迟滞逆模型基本实现了对 MFC 致动器双极性偏置特性的补偿,使得柔性结构的正负向位移跟踪误差基本相等,但基于经典对称 PI 迟滞模型的补偿控制却存在着较大的单向跟踪误差,其值高达  $142.7\ \mu\text{m}$ (见表 6)。

图 10 为变频三角波下理想位移与实际位移对比。由图可知:①柔性结构的振动位移对 0.1, 1, 5 以及 10 Hz 的期望轨迹均实现了良好地连续动态跟踪;②不同频率下的位移上升、下降阶段的偏置迟滞现象得到了有效补偿;③由于 RDBBPI 模型中的算子权重参数是基于低频信号实验结果辨识得到,导致柔性结构在跟踪变频三角波位移中的 10 Hz 高频信号时的跟踪误差明显大于其他 3 个频率的信号部分,最大跟踪误差达  $57.5\ \mu\text{m}$ 。

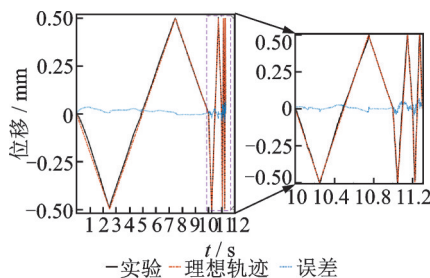


图 10 变频三角波下理想位移与实际位移对比

Fig.10 Comparisons between the experiment and desired trajectories subject to a triangular wave with random frequencies

基于柔性结构跟踪变频三角波位移的实验结果,得到补偿后柔性结构的实测振动位移与理想轨迹之间的关系,理想轨迹与实测位移线性度误差如图 11 所示,二者基本呈线性关系。实测位移点偏离理想直线的最大值为  $46.2\ \mu\text{m}$ ,因此得到实测振动位移与理想轨迹之间的线性误差为 4.62%。

表 7 为基于 RDBBPI 模型的补偿结果。由表可见,本研究所提的基于 RDBBPI 迟滞模型的前馈补偿方法能够在很大程度上补偿 MFC 致动器的率相

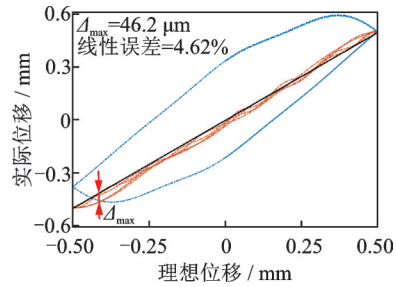


图 11 理想轨迹与实测位移线性度误差

Fig.11 Linearity error between the desired and actual trajectories

关双极性偏置迟滞误差,提高了 MFC 致动柔性结构的位移跟踪精度,但是无法完全消除迟滞误差,因此有必要引入反馈控制,进一步提高 MFC 致动柔性结构的动态跟踪和定位指向精度。

表 7 基于 RDBBPI 模型的补偿结果

Tab.7 Compensation results based on the RDBBPI model

期望跟踪波形	最大跟踪误差/ $\mu\text{m}$	相对跟踪误差/%
标准三角波	44.0	4.40
变频三角波	57.5	5.75

## 5 结 论

1) 针对 MFC 致动器的率相关双极性偏置迟滞非线性问题,提出 RDBBPI 唯象迟滞模型对 MFC 致动柔性结构进行了动态迟滞特性建模和前馈补偿控制。利用经典 PI 模型描述其对称迟滞特性,通过叠加死区算子来捕捉双极性偏置特性,并确立迟滞环斜率与驱动电压变化速率之间的线性关系,最终建立描述 MFC 致动器率相关双极性偏置迟滞特性的 RDBBPI 模型。辨识结果表明,所提出的 RDBBPI 模型可以较为准确地刻画 MFC 致动柔性结构的率相关双极性偏置迟滞现象,提高了系统的建模精度。

2) 在所建 RDBBPI 模型的基础上,基于 RDBBPI 迟滞逆模型提出了一种前馈控制策略。实验结果表明,MFC 致动器驱动的梁结构实际振动位移和理想位移相对误差分别为 4.40% 和 5.75%,对一定范围内定频或变频的参考位移均具有良好的跟踪效果,验证了所提出方法的可行性和有效性。

## 参 考 文 献

[1] 娄军强,周优鹏,张振振,等. 谐波驱动柔性臂系统耦合动力学建模及辨识[J]. 振动、测试与诊断, 2019, 39(6):1198-1204.  
LOU Junqiang, ZHOU Youpeng, ZHANG Zhenzhen,



- et al. Coupling dynamic modeling and parameter identification of a flexible manipulator system with harmonic driven[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2019, 39(6):1198-1204. (in Chinese)
- [2] 邱志成, 李城. 双连杆柔性机械臂振动主动控制与实验[J]. *振动、测试与诊断*, 2019, 39(3):503-511.  
QIU Zhicheng, LI Cheng. Experimental study on two-link rigid-flexible manipulator vibration control[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2019, 39(3):503-511. (in Chinese)
- [3] SHI Y, JIA Y. Multimodal shear wave deicing using fiber piezoelectric actuator on composite for aircraft wings[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2018, 23(5):2090-2098.
- [4] HENRY A C, MOLINARI G, RIVA-PADILLA J R, et al. Smart morphing wing: optimization of distributed piezoelectric actuation[J]. *AIAA Journal*, 2019, 57(6):2384-2393.
- [5] CEN L, ERTURK A. Bio-inspired aquatic robotics by untethered piezohydroelastic actuation[J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2013, 8(1):016006.
- [6] 任泉荣, 娄军强, 贾振, 等. 压电纤维致动的仿鲤鱼尾鳍式小型推进器的摆动特性及流固耦合机理[J]. *机械工程学报*, 2019, 55(20):214-221, 230.  
REN Xiaorong, LOU Junqiang, JIA Zhen, et al. Oscillating performance and fluid-structure interaction mechanism of a small Koi's caudal fin-like underwater propulsion actuated by MFC[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 55(20):214-221, 230. (in Chinese)
- [7] BAGHAEE M, FARROKHABADI A, JAFARITALOOKOLAEI R A. Modeling, analysis, and control of MFC sandwiched laminate panel flutter with general layouts and arbitrary boundary conditions [J]. *Composite Structures*, 2019, 223:110940.
- [8] 季宏丽, 孙宏君, 裘进浩, 等. 扫描隧道显微镜扫描器的迟滞非线性控制[J]. *振动、测试与诊断*, 2017, 37(2):221-227.  
JI Hongli, SUN Hongjun, QIU Jinhao, et al. Control of hysteresis nonlinearity for scanning stage in scanning tunneling microscope[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2017, 37(2):221-227. (in Chinese)
- [9] CHEN L Q, WU X H, SUN Q, et al. Experimental study on the electromechanical hysteresis property of macro fiber composite actuator[J]. *International Journal of Acoustics & Vibrations*, 2017, 22(4):467-480.
- [10] XUE X M, CHEN L Q, WU X H, et al. Study on electric-mechanical hysteretic model of macro-fiber composite actuator[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2014, 25(12):1469-1483.
- [11] 刘宽, 赵梓舒, 武文华, 等. 宏纤维复合材料MFC作动器迟滞非线性分析与补偿方法研究[J]. *机械工程学报*, 2019, 55(14):178-185.  
LIU Kuan, ZHAO Zishu, WU Wenhua, et al. Hysteresis nonlinear analysis and its compensation method of MFC actuator[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 55(14):178-185. (in Chinese)
- [12] JOHANNES S, THOMAS M, ANDREAS K. Control of a flexible beam actuated by macro-fiber composite patches (ii): hysteresis and creep compensation, experimental results[J]. *Smart Materials and Structures*, 2011, 20(1):015016.
- [13] XUE Z, LI L, ICHCHOU M N, et al. Hysteresis and the nonlinear equivalent piezoelectric coefficient of MFCs for actuation[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2017, 30(1):88-98.
- [14] QU Q, JI H L, QIU J H. The synergism of peak to peak value, frequency and superimposed DC bias voltage on electric-field-induced strain of PZT based-macro fiber composites[J]. *Ceramics International*, 2019, 45(17):22067-22077.
- [15] ALJANAIDEH O, JANAIDEH M A, RAKHEJA S, et al. Compensation of rate-dependent hysteresis nonlinearities in a magnetostrictive actuator using an inverse Prandtl-Ishlinskii model[J]. *Smart Materials and Structures*, 2013, 22(2):025027.
- [16] 于志亮, 刘杨, 王岩, 等. 基于改进PI模型的压电陶瓷迟滞特性补偿控制[J]. *仪器仪表学报*, 2017, 38(1):129-135.  
YU Zhiliang, LIU Yang, WANG Yan, et al. Hysteresis compensation and control of piezoelectric actuator based on an improved PI model[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38(1):129-135. (in Chinese)
- [17] YANG M J, LI C X, GU G Y, et al. Modeling and compensating the dynamic hysteresis of piezoelectric actuators via a modified rate-dependent Prandtl-Ishlinskii model[J]. *Smart Materials and Structures*, 2015, 24(12):125006.



**第一作者简介:**杨浩,男,1997年1月生,硕士生。主要研究方向为压电致动器的迟滞特性。

E-mail: Nbumechanical22@163.com

**通信作者简介:**娄军强,男,1986年7月生,博士,副教授。主要研究方向为智能材料应用。

E-mail: loujunqiang@nbu.edu.cn