

基于 Bouc-Wen 前馈及模糊 PID 反馈的三层 MFC-PBP 并联变形翼大位移控制



李兴秋, 葛沪建, 胡凯明

中国计量大学, 浙江 杭州 310018

摘要:三层预压缩压电宏纤维复合材料双晶片(MFC-PBP)并联变形翼存在较强的迟滞非线性,严重影响变形控制精度。为了实现对它的精确变形控制,本文提出了以 Bouc-Wen 逆模型为前馈补偿,以模糊 PID 作为反馈控制器的三层 MFC-PBP 并联变形翼的大位移跟踪控制策略。首先,利用遗传算法对 Bouc-Wen 模型进行参数识别,构建前馈模型并对变形翼进行开环控制;其次,加入模糊 PID 反馈控制器,得到可以自适应改变 PID 参数的闭环控制。变形跟踪控制试验结果表明,Bouc-Wen 前馈控制的相对误差(RE)约为 13.5%,将 Bouc-Wen 前馈模型与模糊 PID 结合后控制的相对误差在 4% 以内,提高了变形控制精度。

关键词:变形翼; 压电宏纤维复合材料双晶片; 变形控制; 迟滞特性; Bouc-Wen 模型; 模糊 PID

中图分类号:TB381

文献标识码:A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2024.05.010

柔性机翼的弦向弯度变形能够适应于多种飞行工况,并降低气动阻力以及振动和噪声^[1]。智能材料结构可实现结构功能一体化设计,降低变形机构重量(质量),因此基于智能材料的变体机翼结构成为未来飞行器的重大技术方向^[2]。常应用于变形翼的智能材料有形状记忆合金(SMA)、介电弹性体和压电材料等^[3-5],其中,压电双晶片具有结构简单、质量轻、体积小、带宽大、响应速度快等优点。Barrett 等^[6-7]用后屈曲预压缩(PBP)压电陶瓷双晶片来操控机翼的偏转,实现了比传统压电双晶片更大的偏转。与传统的伺服驱动副翼相比,零件数大幅度减小,重量减轻,工作带宽增大^[8-10]。但是,PBP 作动器相对于传统舵机的输出位移仍较小,因而限制了其只能在微小无人机变形翼小变形中应用。2000年,美国国家航空航天局(NASA)兰利研究中心(LRC)开发了压电纤维复合材料(MFC)^[11]。MFC 不仅保持了传统压电陶瓷响应快、变形精确的优点,而且克服了其较大脆性的缺陷。目前,国内外学者已经将 MFC 应用于变形翼中。Paradies 等^[12]设计了一种按比例缩放的机翼,利用分布式压电片来控制

制滚转。试验证明,主动机翼可产生的滚转控制力矩与传统副翼相比较小,但已经满足无人机的滚转控制要求。Kim 等^[13]使用 MFC 开发了仿生柔性扑翼,机翼的最大弦向弯曲幅度可达到-2.6%~4.4%的弦长,尽管弦向机翼的柔性降低了有效迎角,但 MFC 作动器将最大升力系数提高了 24.4%。胡凯明等^[14-15]对 MFC 双晶片施加预压力得到 MFC-PBP 作动器,并利用带槽翼肋将三层 MFC-PBP 并联起来,提出了一种新型的大变形、大输出力压电柔性变形翼,其自由偏转达到 $\pm 12^\circ$,端部阻塞力为 1.6N。

由于压电材料属于容性器件,因此在电压控制下会产生一定的迟滞现象,加之轴向预压力的施加,会加剧迟滞非线性,从而对控制精度造成严重影响。为了消除迟滞带来的影响,提高变形精度,国内外研究者开展了大量的建模与控制研究。目前,常用的模型有 Preisach 模型、PI 模型、Bouc-Wen 模型和最小二乘支持向量机(LS-SVM)模型等。Gu Guoying 等^[16]对现有压电驱动器的建模与控制方法进行综述。王代华等^[17]基于 Bouc-Wen 模型构建了压电陶瓷

收稿日期: 2023-11-02; 退修日期: 2024-01-19; 录用日期: 2024-03-15

引用格式: Li Xingqiu, Ge Hujian, Hu Kaiming. Three-layers MFC-PBP parallel morphing wing large deflection control based on Bouc-Wen feedforward and fuzzy PID feedback[J]. Aeronautical Science & Technology, 2024, 35(05): 110-117. 李兴秋, 葛沪建, 胡凯明. 基于 Bouc-Wen 前馈及模糊 PID 反馈的三层 MFC-PBP 并联变形翼大位移控制[J]. 航空科学技术, 2024, 35(05): 110-117.

执行器的迟滞位移在线观测器,并采用迟滞位移在线观测器构成了前馈控制系统,基本实现了输出位移与输入电压之间的线性化。胡凯明等^[18]将描述静态条件下的 Bouc-Wen 迟滞非线性模块和描述率相关动态特性的自回归模块串联,证明了基于 Bouc-Wen 模型的 Hammerstein 率相关迟滞模型能够较好地描述压电双晶片驱动器的迟滞率相关特性。Gan Jinqiang 等^[19]提出了广义的 Bouc-Wen 模型,该模型是在经典 Bouc-Wen 模型中加入了松弛函数,使模型具有了率相关性。钱承等^[20]采用 Preisach 模型与 LS-SVM 的混合建模法来描述压电作动器的迟滞非线性。毛雪飞等^[21]提出了平方指数型自适应权函数,由此构建了自适应加权最小二乘支持向量机(AWLSSVM)模型,进一步提高了迟滞模型的预测精度。

Bouc-Wen 模型属于微分方程模型,具有参数较少、模型简单且求逆容易等特点,因此 Bouc-Wen 逆模型常被作为前馈以补偿迟滞特性。但是,单纯前馈补偿属于开环控制,对模型要求较高,导致控制精度很难达到要求。本文将 Bouc-Wen 模型与模糊 PID 相结合,不仅提高了变形翼的迟滞补偿控制精度,还具有自适应参数调节功能。

1 变形翼及 Bouc-Wen 迟滞模型

1.1 变形翼作动器

图1~图3分别为三层 MFC-PBP 作动器并联变形翼的结构示意图、控制试验系统框图及试验样机测试图。在本文中,对两侧 MFC-PBP 施加 16N、中间施加 12N 的轴向压力,记录变形翼末端位置的位移变化。

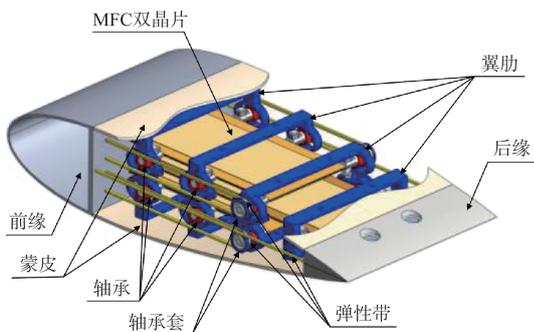


图1 变形翼结构图

Fig.1 Structural diagram of deformed wing

当控制输入电压频率分别为 0.05Hz、0.10Hz 和 0.20Hz 时,得到变形翼电压—位移信号的迟滞曲线如图4所示。

1.2 Bouc-Wen 模型

Bouc-Wen 模型将迟滞曲线分成线性分量和迟滞分量两部分,其微分方程为

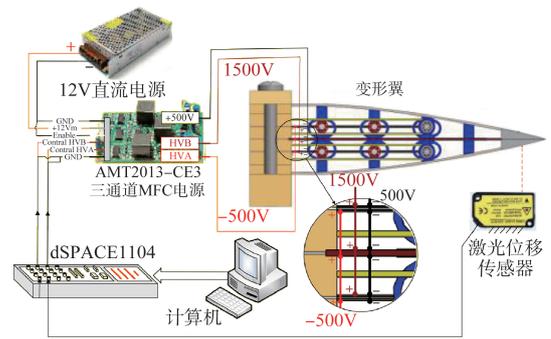


图2 试验系统框图

Fig.2 Test system block diagram



图3 变形翼位移测试试验

Fig.3 Deformation wing displacement test

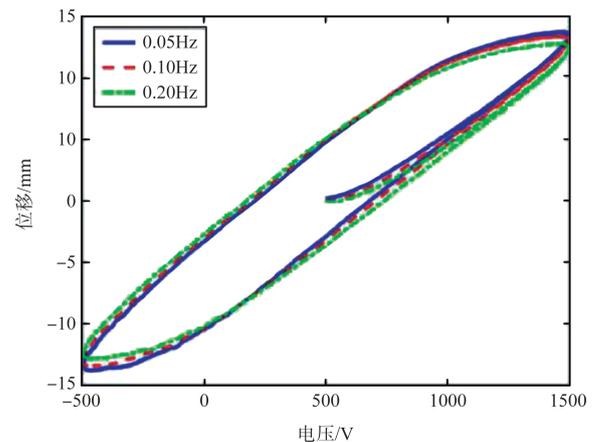


图4 变形翼在不同频率电压下的迟滞环

Fig.4 The hysteresis loop of the deformed wing under different frequency voltage

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \dot{X}(t) - \dot{h}(t) = d\dot{V}(t) + x_0 - \dot{h}(t) \\ \dot{h}(t) = \alpha \dot{V}(t) - \beta |\dot{V}(t)| |h(t)|^{n-1} h(t) - \gamma \dot{V}(t) |h(t)|^n \end{cases} \quad (1)$$

式中, $x(t)$ 为变形翼末端点位移; $X(t)$ 为线性位移分量; $h(t)$ 为迟滞位移分量; $V(t)$ 为 MFC-PBP 作动器的驱动电压,三层作动器使用相同的电压; d 为输出位移与驱动电压之间的比例常数;由于变形翼原理样机制作以及组装产生的结构误差,导致机翼变形量无法完全对称, x_0 为变形翼初始状态下

的形变; α 、 β 、 γ 三个参数为迟滞环形状的控制参数; n 为屈服的尖锐程度参数。

1.3 Bouc-Wen 模型的遗传算法参数识别

本文采用遗传算法对 α 、 β 、 γ 、 d 和 n 的 5 个参数进行参数识别。选用的目标函数如下

$$F = \sqrt{\sum_{i=1}^N (y_i - f(x_i))^2} \quad (2)$$

式中, y_i 为测试值; $f(x_i)$ 为预测值; N 为输入样本数。其中, 目标函数(适应度值)用来表明个体(参数解)的优劣性。

Bouc-Wen 模型参数识别流程(见图 5)过程如下: (1) 根据经验设置(见表 1)的遗传算法参数; (2) 根据所设置的个体数目(种群大小)和变量的二进制位数, 产生随机的初始二进制式的个体(参数组合), 再将种群内每个个体从二进制转化为十进制后分别赋值给对应的参数; (3) 按顺序将得到的参数代入 Bouc-Wen 模型中, 通过输入的控制信号预测输出, 并与试验数据进行比较, 计算出目标函数值 F ; (4) 由于每个个体都对应着一组参数, 再对应着通过预测结

果与试验结果计算出的 F , 由此可根据 F 值判断出对应个体的适应度, 再使用选择、交叉和变异操作对种群进行更新; (5) 基于设置的代沟值, 利用子代种群中优秀的个体替换掉父代中较差的个体; (6) 将得到的新种群内的个体同样经过十进制转换后再次赋值给各个参数, 再次进行电压预测和目标函数的计算后对种群进行更新, 以此往复直至达到最大遗传代数后结束循环, 得到模型参数。

较大的样本数量可以防止参数收敛到局部最优, 较大的遗传代数可以使优化值尽可能接近最优目标。但由于样本数量和遗传代数较大时需要消耗较长的计算时间, 为了尽可能减轻计算量和避免局部最优, 本文先选用较大的样本数量和较小的遗传代数, 在得到参数的大致范围后缩小寻优区间, 再减小样本数量和增加遗传代数。

经过多次寻优计算, 得到 5 个参数的大致范围为 $\alpha=(0\sim 1)$, $\beta=(0\sim 0.1)$, $\gamma=(0\sim 1)$, $d=(0\sim 1)$, $n=(1\sim 5)$ 。通常, 试验数据采集具有不同幅值和频率的电压位移信号用于建模, 以增加模型的泛化能力。表 1 为遗传算法参数, 通过寻优计算得到表 2 所示的 Bouc-Wen 模型参数。

表 1 遗传算法主要控制参数

Table 1 Main control parameters of genetic algorithm

参数名称	数量
变量维数/个	5
个体数目/个	100
最大遗传代数/代	30
变量的二进制位数/位	20
代沟(子代数/父代数)	0.9

表 2 Bouc-Wen 模型参数的寻优结果

Table 2 Optimization results of Bouc-Wen model parameters

参数	α	β	γ	d	n
数值	0.0112	0.0016	6.104e-5	0.0170	1.2918

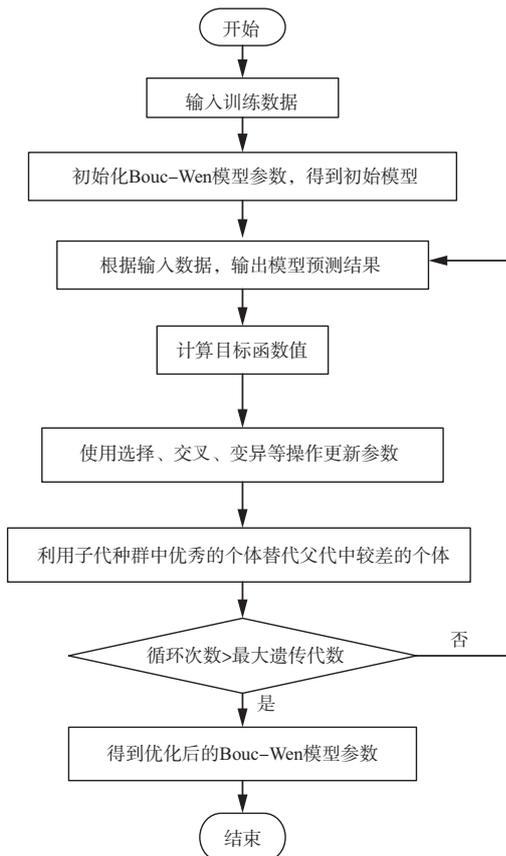


图 5 基于遗传算法的 Bouc-Wen 模型参数识别流程

Fig.5 Bouc-Wen model parameter identification flow chart based on genetic algorithm

1.4 试验结果与分析

由于 MFC-PBP 的工作电压为 $-500\sim 1500\text{V}$, 500V 时为平衡位置, 为了验证模型的泛化性, 输入信号需尽可能地包含低频、低幅、高频、高幅、变频和变幅等情况。因此, 本文选用如式(3)~式(5)所示的三组电压信号对 MFC-PBP 变形翼作动器的 Bouc-Wen 迟滞模型进行测试。其表达式分别为

$$V_1 = 1000\sin(0.2\pi t) + 500 \quad (3)$$

$$V_2 = 440\sin(0.1\pi t) + \sin(0.2\pi t) + \sin(0.4\pi t) + 500 \quad (4)$$

$$V_3 = 1000\sin(2\pi t e^{-2.9957 + 0.014t}) \{0.5\cos[0.5\pi \cos(0.05\pi t)] + 0.5\} + 500 \quad (5)$$

式中, V_1 为频率 0.1Hz 、幅值 1000V 的正弦信号; V_2 为 0.05Hz 、 0.1Hz 和 0.2Hz 三种频率混合信号; V_3 为变频变幅信

号。由于MFC-PBP的工作电压为-500~1500V,500V时为平衡位置,所以需要将 V_1 、 V_2 和 V_3 都偏置500V。

为了对比控制效果,对试验误差采用相对误差(RE)评价,其表达式为

$$RE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - f(x_i))^2}{\sum_{i=1}^N (y_i)^2}} \quad (6)$$

Bouc-Wen模型的Simulink框图如图6所示。将Bouc-Wen模型预测的位移信号与试验所得的位移信号相比较,得到其误差曲线如图7所示,其误差结果见表3。

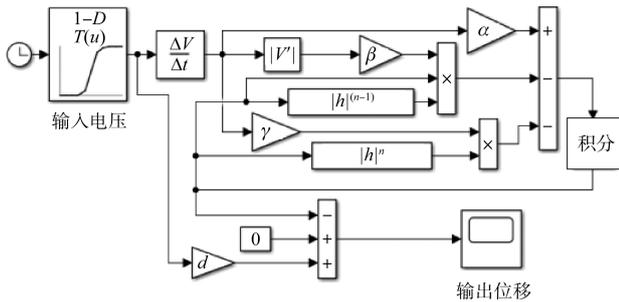


图6 Bouc-Wen模型Simulink框图

Fig.6 Simulink block diagram of Bouc-Wen model

从以上结果可知,Bouc-Wen模型可以较好地预测变形翼作动器的迟滞特性。

2 试验建模

2.1 Bouc-Wen前馈模型

利用Bouc-Wen逆模型作为前馈控制,将位移信号作为输入量,通过逆模型来预测控制对象所需的电压,以达到对控制对象中迟滞的补偿目的。前馈模型的补偿方法属于开环控制,不影响系统的稳定性。根据变形翼作动器的Bouc-Wen模型的表达式(1),其逆模型表达式为

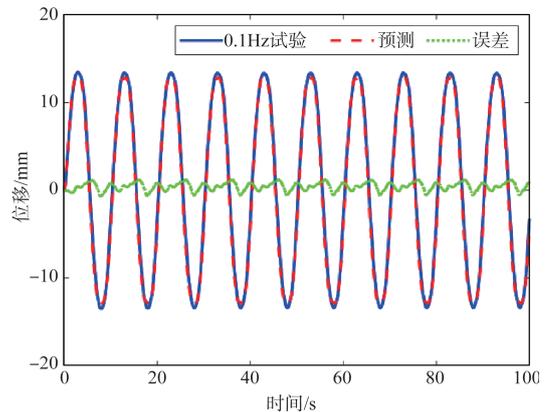
$$V_f(t) = (x(t) - x_0 + h(t))/d \quad (7)$$

式中, $x(t)$ 为前馈控制的输入位移信号; $V_f(t)$ 为前馈模型输出的电压信号;前馈控制框图如图8所示。

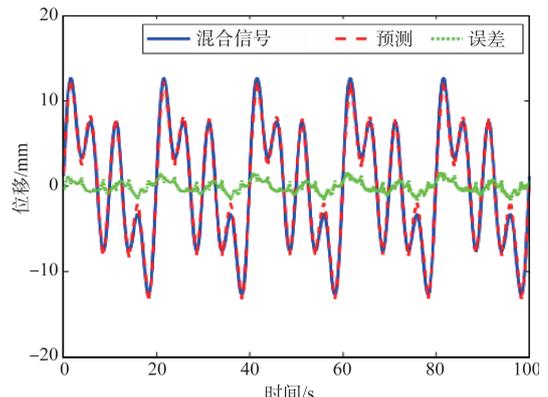
图8中, $H(\cdot)$ 用以计算 $h(t) - x_0$ 的值, V_f 表示前馈模型预测电压, x 和 \bar{x} 分别表述输入目标位移和输出位移。搭建Bouc-Wen前馈模型的半实物仿真控制回路如图9所示。

2.2 前馈+模糊PID复合控制模型

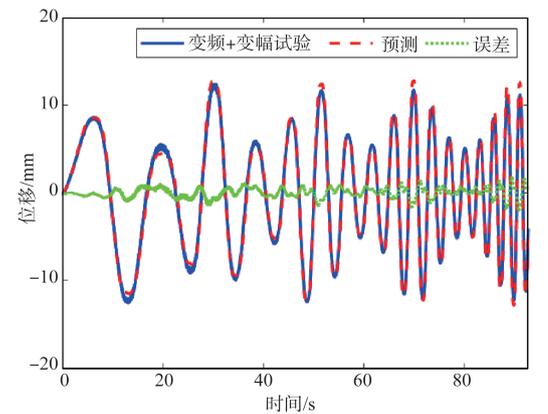
在PID反馈控制中加入模糊控制器前,首先需建立单独PID与前馈模型的复合控制框图,如图10所示。图10中, e 是指令位移 x 与实际输出位移 \bar{x} 之差。此时控制电压 V 的值应为PID控制器输出的值与前馈回路中的电压信号



(a) 0.1Hz



(b) 混合信号



(c) 变频变幅

图7 Bouc-Wen模型预测结果与试验数据对比

Fig.7 Comparison between Bouc-Wen model prediction results and test data

表3 Bouc-Wen模型预测相对误差

Table 3 Relative error of Bouc-Wen model prediction

电压信号	0.1Hz	混合信号	变频和变幅
RE/%	6.47	8.86	8.99

值之和,表达式为

$$V = x(t) - x_0 + h(t)/d + K_p e + K_I \int edt + K_D \dot{e} \quad (8)$$

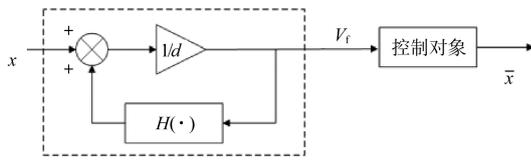


图8 Bouc-Wen逆模型前馈控制框图

Fig.8 Bouc-Wen inverse model feedforward control block diagram

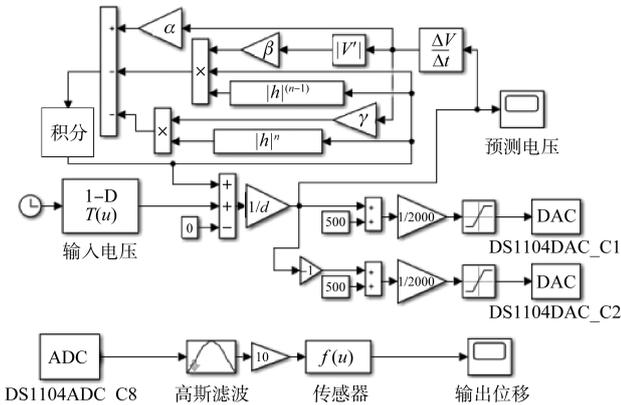


图9 MATLAB/Simulink半实物仿真控制系统

Fig.9 MATLAB/Simulink hardware-in-the-loop simulation control system

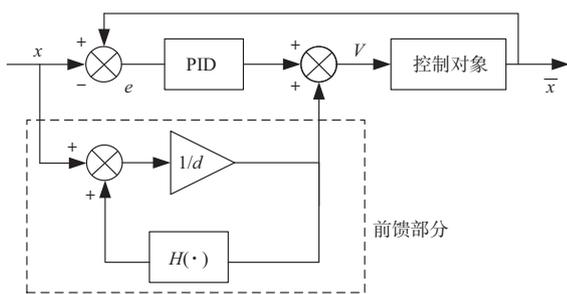


图10 Bouc-Wen前馈+PID反馈复合控制框图

Fig.10 Bouc-Wen feedforward + PID feedback composite control block diagram

式中, K_p 为比例增益; K_i 为积分增益; K_D 为导数(微分)增益; \dot{e} 为误差 e 的倒数。

因为本文的控制试验是基于半实物仿真进行的,属于离散时间情况,所以采用离散增量式PID控制器,其公式为

$$\Delta u(k) = K_p [e(k) - e(k-1)] + K_i e(k) + K_D [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \quad (9)$$

最后输出的结果则是在式(9)的基础上累计控制输出量 u , 因此每刻的输出量 u 为

$$u(k) = \Delta u(k) + \Delta u(k-1) + \dots + \Delta u(1) \quad (10)$$

模糊控制是将输入PID控制器的误差 e 以及误差变化率 e_c 同时输入模糊控制器中,且都取绝对值,然后通过模糊化、近似推理以及清晰化处理,以调整 K_p 、 K_i 及 K_D 三个参

数。控制框图如图11所示。

由于本文变形控制信号处于低频段,因此没有考虑参数 K_D 。输入变量误差 e 和误差变化率 e_c , 采用高斯隶属度函数,输出变量 ΔK_p 、 ΔK_i 采用三角隶属度函数。都采用默认的三个模糊子集,分别命名为S、M和L。在变形翼作动器PID控制试验的多次参数调整中,从累积的数据以及经验中总结的模糊规则见表4。设置误差的输入范围为[0,5], 误差速率的输入范围为[0,1000],两个输出变量 ΔK_p 、 ΔK_i 的输出范围都为[0,1],其输出量曲面如图12所示。

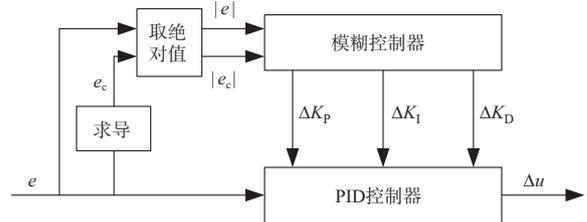


图11 模糊PID控制器框图

Fig.11 Fuzzy PID controller block diagram

表4 K_p 和 K_i 的模糊控制规则

Table 4 Fuzzy control rules for K_p and K_i

$ e \backslash e_c $	L	M	S
L	S/S	M/M	S/S
M	S/S	M/S	S/S
S	S/S	M/M	S/S

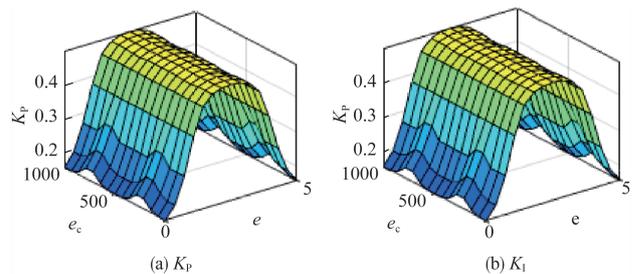


图12 输出量曲面

Fig.12 Output surface

3 试验控制结果

本文的控制试验都是基于dSPACE半实物仿真系统进行的。输入位移信号仍为式(3)~式(5),采样频率为1kHz。图13为控制试验中机翼在偏转前的位置和偏转后的最大位置,得到的纯Bouc-Wen前馈模型和前馈+模糊PID复合模型控制结果如图14所示。

图13中对各层MFC-PBP的两侧MFC材料分别施加相位差为180°的-500~1500V电压,使三层MFC-PBP同时

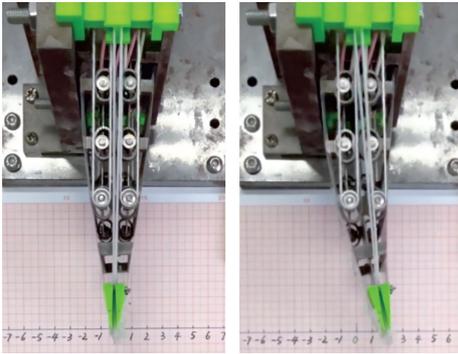


图13 变形机翼原理样机的偏转

Fig.13 The deflection of the deformed wing principle prototype 向一侧弯曲,实现变形翼的整体大功率偏转。试验控制结果的相对误差见表5。

图14(a)、图14(c)和图14(e)分别为不同控制方法对三

表5 试验控制结果的相对误差

Table 5 Relative error of test control results

位移信号		0.1Hz	混合信号	变频和变幅
RE/%	前馈	12.45	12.35	15.89
	前馈+模糊PID	1.38	3.62	3.51

种不同位移信号的跟踪结果和误差。图14(b)、图14(d)和图14(f)分别为利用前馈+模糊PID控制方法对三种信号的位移跟踪控制过程中,在模糊控制器的调节下 K_p 和 K_i 随时间的变化情况。结果表明,仅用Bouc-Wen前馈模型控制时,三组试验的平均相对误差较大,约为13.5%;而前馈+模糊PID复合控制对于变化信号具有较强的自适应能力,且跟踪精度都得到大幅提升,位移跟踪的相对误差都可以控制在4%以内。因此,Bouc-Wen前馈+模糊PID反馈的复合控制能够满足三层MFC-PBP变形翼位移跟踪控制的要求。

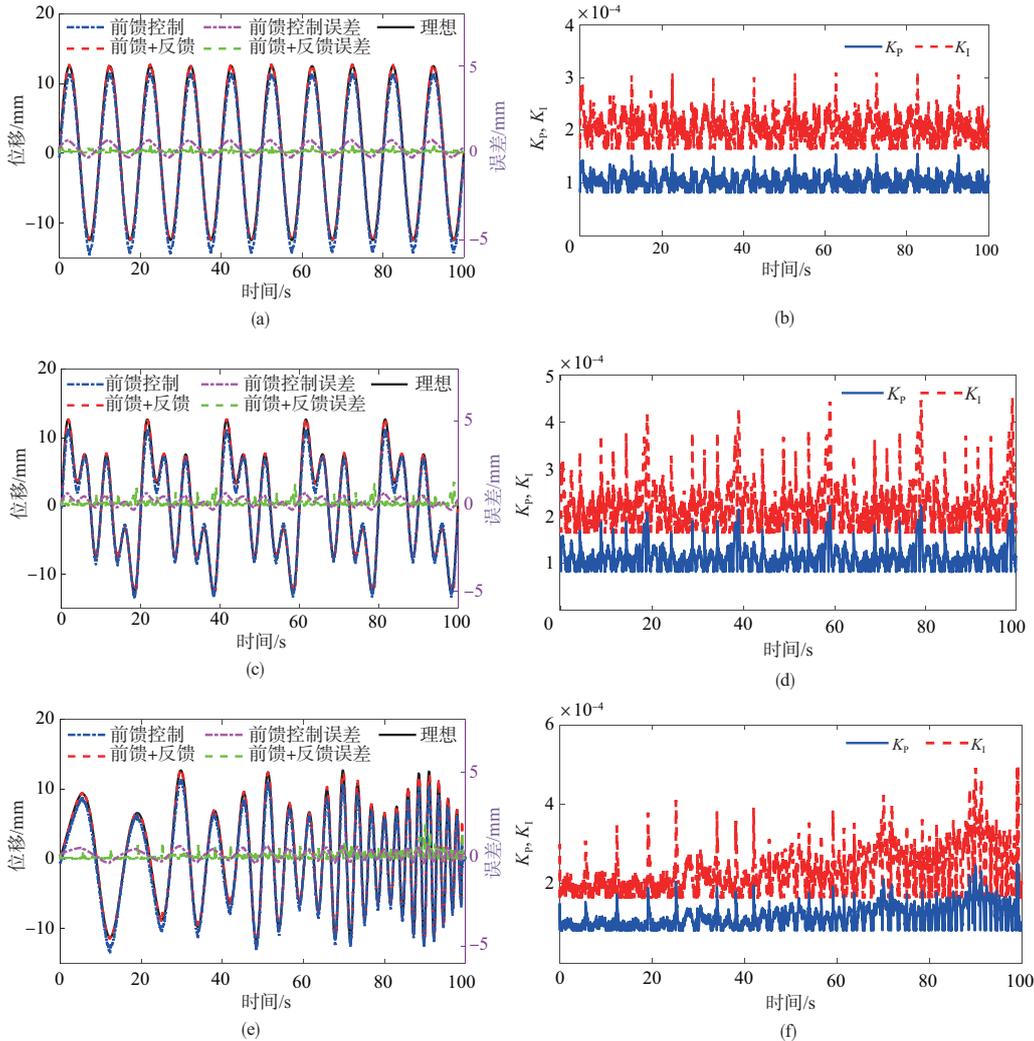


图14 试验控制结果

Fig.14 Test control results

4 结论

由于三层MFC-PBP作动器并联变形翼中存在显著的迟滞非线性,因此变形控制精度较低。为了实现高精度变形控制,本文提出了基于Bouc-Wen前馈+模糊PID反馈的控制器,并进行了变形翼位移跟踪控制验证,得到了如下结论:

(1)建立了三层MFC-PBP作动器并联变形翼的Bouc-Wen模型,并使用Bouc-Wen逆模型作为前馈搭建了前馈补偿器,完成了变形翼作动器的位移跟踪控制,控制误差约为12%~16%。

(2)使用Bouc-Wen前馈+模糊PID反馈控制器实现了变形翼作动器的位移跟踪控制。试验结果表明,模糊控制器能够实现对PID参数的自适应修正,在输入不同频率和幅值的信号时选择不同的参数组合,实现了自适应控制,控制误差控制在4%以内,大幅减小了迟滞特性对变形精度的影响。

AST

参考文献

- [1] 王彬文,杨宇,钱战森,等. 机翼变弯度技术研究进展[J]. 航空学报,2022,43(1): 144-163.
Wang Binwen, Yang Yu, Qian Zhansen, et al. Review of technical development of variable camber wing[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2022, 43(1): 144-163. (in Chinese)
- [2] 吴斌,杜旭朕,汪嘉兴. 变体飞机智能结构技术进展[J]. 航空科学技术,2022,33(12):13-30.
Wu Bin, Du Xuzhen, Wang Jiaying. Smart structure technology progress of morphing aircraft[J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2022,33(12):13-30. (in Chinese)
- [3] 姚佐聪,胡和平,高乐. 压电驱动机构在直升机ACF智能旋翼上的应用[J]. 航空科学技术,2023,34(4):66-71.
Yao Zuocong, Hu Heping, Gao Le. The application of piezoelectric driving mechanism on the helicopter ACF intelligent rotor[J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2023, 34(4): 66-71. (in Chinese)
- [4] Chu Lingling, Li Qi, Gu Feng, et al. Design, modeling, and control of morphing aircraft: A review[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2022, 35(5): 220-246.
- [5] Emiliavaca A, Araújo C J, Souto C R, et al. Characterization of shape memory alloy micro-springs for application in morphing wings[J]. *Smart Materials and Structures*, 2019, 28(1):015010.
- [6] Vos R, Barrett R, de Breuker R, et al. Post-buckled pre-compressed elements: A new class of control actuators for morphing wing UAVs[J]. *Smart Materials and Structures*, 2007, 16(3): 919.
- [7] Vos R, Barrett R. Post-buckled precompressed techniques in adaptive aerostructures: An overview [J]. *Journal of Mechanical Design*, 2010, 132(3):031004.
- [8] 胡凯明,文立华. 新型弹载压电舵机驱动器方案设计及力学分析[J]. 机械工程学报,2015,51(21): 104-112.
Hu Kaiming, Wen Lihua. Scheme design and mechanical analysis of new missile-borne piezoelectric steering gear driver [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 51(21): 104-112. (in Chinese)
- [9] 陈恒,陈超,刘士祥,等. 轴向预压缩双晶片动力学模型与特性分析[J]. 振动、测试与诊断, 2020,40(3): 541-547,627-628.
Chen Heng, Chen Chao, Liu Shixiang, et al. Dynamic model and characteristic analysis of axial precompression bimorph [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2020, 40(3): 541-547,627-628. (in Chinese)
- [10] 姚建均,刘凤琪,王佳奇,等. 基于压电驱动器的微型智能弹药舵机系统及其控制策略[J]. 哈尔滨工程大学学报,2022,43(3):414-420.
Yao Jianjun, Liu Fengqi, Wang Jiaqi, et al. Micro-intelligent ammunition steering gear system based on piezoelectric driver and its control strategy[J]. *Journal of Harbin Engineering University*,2022,43(3):414-420. (in Chinese)
- [11] Wilkie W K, Bryant R G, High J W, et al. Low-cost piezocomposite actuator for structural control applications[C]. *Smart Structures and Materials 2000: Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies*. SPIE, 2000: 323-334.
- [12] Paradies R, Ciresa P. Active wing design with integrated flight control using piezoelectric macro fiber composites[J]. *Smart Materials and Structures*, 2009, 18(3): 035010.
- [13] Kim D K, Han J H, Kwon K J. Wind tunnel tests for a flapping wing model with a changeable camber using macro-fiber composite actuators[J]. *Smart Materials and Structures*, 2009, 18(2): 024008.
- [14] 胡凯明,李孝禄,李运堂,等. 基于预压缩层叠式压电复合材料双晶片大位移变形翼及其方法:中国,ZL202010043794.5 [P]. 2020-12-08.
Hu Kaiming, Li Xiaolu, Li Yuntang, et al. Large displacement

- morphing wing based on multi-layer parallel pre-compressed MFC bimorph and its method: China, ZL202010043794.5[P]. 2020-12-08. (in Chinese)
- [15] Hu Kaiming, Ge Hujian, Li Hua, et al. High actuation capability and smooth-deformation piezo morphing wing based on multi-layer parallel pre-compressed MFC bimorph[J]. *Aerospace Science Technology*, 2023, 132: 108083.
- [16] Gu Guoying, Zhu Limin, Su Chunyi, et al. Modeling and control of piezo-actuated nanopositioning stages: A survey[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2016, 13(1): 313-332.
- [17] 王代华, 严松林, 朱炜. 基于 Bouc-Wen 模型的压电执行器的前馈线性化控制器[J]. *仪器仪表学报*, 2015, 36(7): 1514-1521. Wang Daihua, Yan Songlin, Zhu Wei. Feedforward linearization controller for piezoelectric actuators based on Bouc-Wen model[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2015, 36(7): 1514-1521. (in Chinese)
- [18] 胡凯明, 文立华. PBP 驱动器率相关迟滞特性研究及其线性化控制[J]. *机械工程学报*, 2016, 52(12): 205-212. Hu Kaiming, Wen Lihua. Research on rate-dependent hysteresis characteristics of PBP actuators and its linearization control [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52(12): 205-212. (in Chinese)
- [19] Gan Jinqiang, Zhang Xianmin. Nonlinear hysteresis modeling of piezoelectric actuators using a generalized Bouc-Wen model [J]. *Micromachines*, 2019, 10(3): 183.
- [20] 钱承, 胡红生. 基于最小二乘支持向量机的压电作动器迟滞非线性建模及参数辨识[J]. *中国机械工程*, 2018, 29(4): 835-841. Qian Cheng, Hu Hongsheng. Hysteresis nonlinear modeling and parameter identification of piezoelectric actuator based on least squares support vector machine[J]. *China Mechanical Engineering*, 2018, 29(4): 835-841. (in Chinese)
- [21] Mao Xuefei, Wang Yijun, Liu Xiangdong, et al. An adaptive weighted least square support vector regression for hysteresis in piezoelectric actuators[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2017, 263: 423-429.

Three-layers MFC-PBP Parallel Morphing Wing Large Deflection Control Based on Bouc-Wen Feedforward and Fuzzy PID Feedback

Li Xingqiu, Ge Hujian, Hu Kaiming

China Jiliang University, Hangzhou 310018, China

Abstract: The three-layer macro-fiber composite posted buckled pre-compressed bimorph (MFC-PBP) parallel morphing wing has strong hysteresis nonlinearity, which seriously affects the deformation control accuracy. To realize the precise deformation control, this paper proposes a large-displacement tracking control strategy of three-layer MFC-PBP parallel morphing wing with Bouc-Wen inverse model as feedforward compensation and fuzzy PID as feedback controller. Firstly, genetic algorithm is used to identify the parameters of Bouc-Wen model, then the feedforward model is established and the open-loop control test is carried out for the morphing wing. Secondly, the fuzzy PID feedback controller is added to obtain the closed-loop control which can change the PID parameters adaptively. The test results of deformation tracking control show that the relative error (RE) of Bouc-Wen feedforward control is about 13.5%, the RE of feedforward combined with fuzzy PID is less than 4%, which greatly improves the precision of deformation control.

Key Words: morphing wing; MFC-PBP; deformation control; hysteresis characteristics; Bouc-Wen model; fuzzy PID