

压电作动器非对称迟滞模型的建立和参数辨识*

顾寒烈¹, 吴洪涛¹, 杨小龙¹, 李耀¹, 程世利²

(1. 南京航空航天大学机电学院 南京 210016; 2. 盐城工学院汽车工程学院 盐城 224000)

摘要: 现有的众多基于传统 Bouc-Wen 改进的压电陶瓷非对称迟滞模型存在参数冗余, 降低了模型参数辨识的准确性, 而且常用的粒子群算法 (PSO) 在辨识压电陶瓷非对称迟滞模型参数方面收敛慢且容易陷入局部最优值。为此, 首先提出了一种归一化的非对称迟滞模型, 采用两个多项式达到非对称效果, 利用归一化 Bouc-Wen 消除参数冗余; 然后采用参数和变异策略自适应的差分进化算法进行迟滞参数辨识; 建立了相应的测试系统, 对压电陶瓷作动器进行了实验研究。结果表明, 相比于传统的 Bouc-Wen 模型, 所提出的模型能更精确地描述压电陶瓷实际电压位移曲线, 而且消除了参数的冗余, 降低了参数辨识的难度。相比于粒子群算法和传统差分进化算法, 自适应差分进化算法能更快更精准地找到最优参数值。

关键词: 压电作动器; 非对称迟滞; 归一化 Bouc-Wen; 参数辨识; 自适应差分进化算法

中图分类号: TP271 TN384 TH701 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.80

Modeling and parameter identification of asymmetric hysteresis for piezoelectric actuator

Gu Hanlie¹, Wu Hongtao¹, Yang Xiaolong¹, Li Yao¹, Cheng Shili²

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. School of Automotive Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng 224000, China)

Abstract: Many asymmetric hysteresis models based on traditional Bouc-Wen for the piezoelectric actuator have some redundant parameters, which reduce the accuracy of parameter identification. The most frequently used particle swarm algorithm converges slowly and is easy to fall into local optimum in terms of parameter identification of the piezoelectric actuator. Thus, a normalized asymmetric hysteresis model is proposed by introducing two polynomials to describe the asymmetric hysteresis behavior and using the normalized Bouc-Wen model to eliminate the redundancy of the parameters. The self-adaptive differential evolution algorithm is developed for parameter identification, in which both associated control parameters and trial vector generation strategies can be self-adapted with the increase of generations. An experimental system about the piezoelectric actuator is set up. The results show that the proposed model is better to represent the actual characteristic of the piezoelectric actuator and successfully eliminate the redundancy of the parameters, which decreases the difficulty of parameter identification. Compared with traditional differential evolution algorithm and particle swarm algorithm, the self-adaptive differential evolution algorithm can find the optimal solution more quickly and more accurately.

Keywords: piezoelectric actuator; asymmetric hysteresis; normalized Bouc-Wen; parameter identification; self-adaptive differential evolution algorithm

1 引言

压电陶瓷作动器在最近几年被广泛应用于超高精密

定位行业中, 压电陶瓷作动器相比于其他类型作动器有很明显的优势, 如快速响应、高刚度、高定位精度、高机电耦合率和小尺寸等^[1-3]。然而其缺点也很明显, 最主要的就是非线性迟滞, 这是因为压电陶瓷是铁电材料, 输出量

不仅取决于输入量还和前面的输入历史有关,同时,压电陶瓷自身的蠕变和周围的环境因素会使得其定位产生漂移,可见正是这些因素大大限制了超精密驱动行业的发展,如何减少非线性迟滞的影响是这些应用行业所亟待解决的问题。

目前,针对压电陶瓷非线性迟滞问题,一般从两种途径着手:1)采用电荷控制,实验表明电荷放大器能有效抑制压电陶瓷作动器的迟滞特性^[4],但电路的设计较复杂;2)采用电压控制,通过各种数学模型从而建立输入电压与输出位移之间的迟滞模型。非线性迟滞模型的建立主要通过两个方面实现:1)引入数学算子,比较经典的如 Prandtl-Ishlinskii 模型^[5],Preisach 模型^[6]等,这些模型的关键在于加入无穷多的算子来不断逼近真实的迟滞曲线;2)通过微分方程组来描述迟滞,如 Backlash-like 模型^[7]、Duhem 模型^[8]和 Bouc-Wen 模型^[2],不仅能描述动态特性,而且相比于算子,更加简洁和高效。

传统 Bouc-Wen(B-W)模型只利用了一个辅助的微分方程来描述各种迟滞形状,因而受到各类学者的青睐,但 B-W 模型也有缺陷,即只能描述关于原点对称的迟滞环,无法表征压电陶瓷作动器的非对称迟滞特性,虽然文献[9-11]通过改变 B-W 模型中迟滞函数来达到非对称,但是模型固有的参数冗余性加大了辨识的难度,同时微分方程中过多的未知参数也会导致数值解的发散,不利于控制。

为了消除传统 B-W 模型参数冗余,同时能够更好描述压电陶瓷作动器非对称迟滞,本文在归一化 B-W 基础上,提出了一种多项式的非对称迟滞模型。在参数辨识过程中,先对非迟滞部分参数进行拟合,再采用自适应差分进化算法得出迟滞部分参数值,并与传统差分进化算法和粒子群算法(particle swarm optimization, PSO)进行对比。

2 非对称迟滞模型的建立

2.1 传统 B-W 模型

在实际中,单片压电陶瓷要想获得微米级位移量必须通过增加单层厚度才能实现,但这所需要的电压就很大,会达到上千伏,这明显有很大弊端。所以,人们常常把单片压电陶瓷通过堆叠、粘合组成多层压电陶瓷,使其机械串联、电学并联,从而加小电压就可实现微米级位移^[12],这种堆叠的压电陶瓷作动器在很多行业中应用广泛。

众多研究表明^[13-15],堆叠压电陶瓷作动器的动力学模型可以简化为质量-弹簧-阻尼系统,则系统动力学方程为:

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = F(t) \quad (1)$$

根据 B-W 理论^[13]可知,压电陶瓷作动器的输出力为:

$$F(t) = \alpha k_p u(t) + (1 - \alpha)k_p h(t) \quad (2)$$

式中: $u(t)$ 是输入的电压, α, k_p 是系数, $h(t)$ 是非线性迟滞项。由于在实验中都是给压电陶瓷低频的周期电压,所以可以将式(1)中 $M\ddot{x}$ 和 $C\dot{x}$ 忽略不计,这样堆叠压电陶瓷作动器的输出位移与电压的关系为:

$$x(t) = \alpha k u(t) + (1 - \alpha)k h(t), \dot{h}(t) = A\dot{u}(t) - \beta |\dot{u}(t)| |h(t)| |h(t)|^{n-1} - \gamma \dot{u}(t) |h(t)|^n \quad (3)$$

式中: $k = k_p/K, A, \beta, \gamma$ 和 n 是改变迟滞环形状的系数, A 值与迟滞环幅值有关, β, γ 控制迟滞环形状,而 n 可以改变曲线的光滑度。

1.2 归一化的非对称迟滞模型

文献[12]中指出,式(3)存在参数的冗余,即可以通过不同的参数来描述同一种迟滞环,如取一组参数为 $k = k_1, \alpha = \alpha_1, A = A_1, \beta = \beta_1, \gamma = \gamma_1, n = n_1$ 根据式(3)有:

$$x_1(t) = \alpha_1 k_1 u(t) + (1 - \alpha_1)k_1 h_1(t), \dot{h}_1(t) = A_1 \dot{u}(t) - \beta_1 |\dot{u}(t)| |h_1(t)| |h_1(t)|^{n_1-1} - \gamma_1 \dot{u}(t) |h_1(t)|^{n_1} \quad (4)$$

取另一组参数为 $k = k_1, \alpha = \alpha_1, A = A_1, \beta = c^n \beta_1, \gamma = c^n \gamma_1, n = n_1, c$ 是任意正实数,则:

$$x_2(t) = \alpha_1 k_1 u(t) + (1 - \alpha_1)k_1 h_2(t), \dot{h}_2(t) = A_1 \dot{u}(t) - c^n \beta_1 |\dot{u}(t)| |h_2(t)| |h_2(t)|^{n_1-1} - c^n \gamma_1 \dot{u}(t) |h_2(t)|^{n_1} \quad (5)$$

另 $h_c(t) = ch(t)$, 得:

$$\dot{h}_c(t) = A_1 \dot{u}(t) - \beta_1 |\dot{u}(t)| |h_c(t)| |h_c(t)|^{n_1-1} - \gamma_1 \dot{u}(t) |h_c(t)|^{n_1} \quad (6)$$

由此可知,式(4)和(6)是相同的,从而证明了传统的 B-W 模型存在参数的冗余。

为了消除这种参数的冗余,引入常量 h_0 , 得:

$$h_0 = \sqrt[n]{\frac{A}{\beta + \gamma}} \quad (7)$$

不妨令 $w(t), \rho, \sigma, k_u, k_w$ 为:

$$w(t) = \frac{h(t)}{h_0} \quad (8)$$

$$\rho = \frac{A}{h_0} > 0, \sigma = \frac{\beta}{\beta + \gamma} \geq 0, k_u = \alpha k > 0, k_w = (1 - \alpha)k h_0 < 0 \quad (9)$$

则将式(7)~(9)代入式(3)中,可得式(10)。

$$x(t) = k_u u(t) + k_w w(t), \dot{w}(t) = \rho(\dot{u}(t) - \sigma |\dot{u}(t)| |w(t)|^{n-1} w(t) + (\sigma - 1)\dot{u}(t) |w(t)|^n) \quad (10)$$

式(10)即为归一化 B-W 模型,虽然能消除参数冗余,但无法描述非对称性质。

本文在式(10)的基础上引入两个多项式,如下:

$$x(t) = f_1 - f_2 \cdot w(t), f_1 = \sum_{i=0}^N k_{ui} \cdot u^i, f_2 = \sum_{j=0}^M k_{wj} \cdot w^j \quad (11)$$

式中: N, M 是正整数, 表示阶数; k_{ui}, k_{wj} 分别是多项式 f_1, f_2 的系数。由于 $w(t)$ 是归一化 B-W 模型中纯迟滞量, 处于有界输入-有界输出状态, 范围恒定在 $-1 \sim 1$, 故可通过增加两个多项式来将对称极限环变为非对称。

利用等式(10)、(11), 从而建立压电陶瓷非对称迟滞模型:

$$x(t) = f_1 - f_2 w(t) = \sum_{i=0}^N k_{ui} u^i - w(t) \sum_{j=0}^M k_{wj} w^j, \\ \dot{w}(t) = \rho(\dot{u}(t) - \sigma |\dot{u}(t)| |w(t)|^{n-1} w(t) + (\sigma - 1)\dot{u}(t) |w(t)|^n) \quad (12)$$

为了验证该模型的非对称性, 不妨取 $N = 2, M = 1, k_{u0} = -1, k_{u1} = 2, k_{u2} = -0.001, k_{w0} = 1, k_{w1} = 0.2, \rho = 2, \sigma = 2, n = 1$ 。如图1所示, 可以很明显看出, 仿真的输入输出曲线具有非对称性。

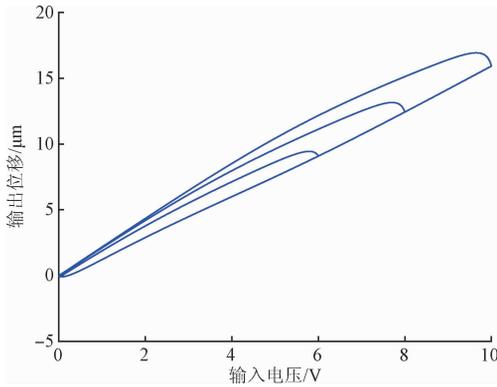


图1 归一化非对称迟滞模型的仿真

Fig.1 Simulation of the normalized asymmetric hysteresis model

3 参数辨识

参数辨识是通过给定的输入输出从而得出系统模型的未知参数。为了对压电陶瓷作动器非对称迟滞模型进行参数辨识, 将此辨识过程分为两个部分, 非迟滞部分的参数辨识和迟滞部分的参数辨识。

3.1 非迟滞部分参数辨识

归一化 B-W 模型中 $w(t)$ 的范围恒定在 $-1 \sim 1$, 根据图2中虚线, 有界区 w 如下赋值:

$$w = \begin{cases} 1, & \dot{u} > 0 \\ -1, & \dot{u} < 0 \end{cases} \quad (13)$$

则式(12)中的第1项可以改为:

$$\begin{cases} x_l = f_1 - f_2, & \dot{u} > 0 \\ x_u = f_1 + f_2, & \dot{u} < 0 \end{cases} \quad (14)$$

式中: x_l 是电压上升部分压电陶瓷响应的位移, x_u 是电压下降部分所响应的位移, 如图3所示, 虚线以内区域即为有界区域的响应, 一般虚线的选取与实际曲线非线性强度有关。

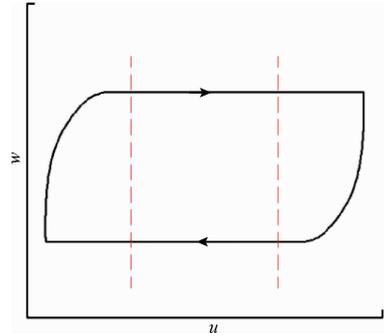


图2 有界区域

Fig.2 Bounded region

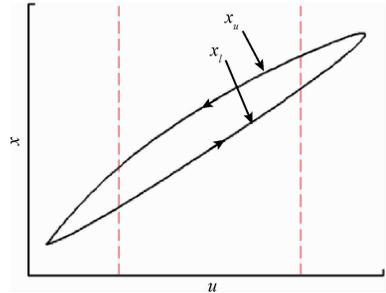


图3 有界区域响应

Fig.3 Response of bounded region

根据式(14), 可以很容易得到 f_1 和 f_2 的表达式:

$$\begin{cases} f_1 = \frac{x_u + x_l}{2} \\ f_2 = \frac{x_u - x_l}{2} \end{cases} \quad (15)$$

从而根据实际值可以拟合出 f_1 和 f_2 的系数, N, M 根据拟合情况而取。

3.2 迟滞部分参数辨识

迟滞参数即为式(12)中的 ρ, σ, n , 这里采用自适应差分进化算法来进行参数辨识。不失一般性, 采用文献[14]中的目标函数, 均方根误差 (root mean square error, RMSE) 来描述参数辨识的精确度。

$$\text{Min}_{\rho, \sigma, n} J(x) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_h(i) - x(i))^2} \quad (16)$$

式中: $x_h(i)$ 是第 i 时刻由实验测得的压电陶瓷作动器的输出位移, $x(i)$ 是第 i 时刻模型的输出位移, N 是总的样本数。各参数范围如表1所示。

表1 参数范围

Table 1 The range of parameters

待辨识参数	取值范围
ρ	[0,1]
σ	[1,50]
n	[1,5]

差分进化算法(differential evolution, DE)是一种简单的基于群体智能的随机并行搜索算法,通过模仿大自然群体间适者生存、优胜劣汰的方式进行优化搜索,与遗传算法类似,但比遗传算法简单,受控参数也较少,所以在近几年应用十分广泛^[16-17]。传统的差分进化算法中缩放因子 F 和交叉概率 CR 都是定值,不随种群的变化而变化,同时变异策略也固定不变,一般都是 DE/rand/1 或者 DE/best/1,由于压电陶瓷迟滞模型辨识的复杂性,需要一种随着种群数目的增加能随时改变参数,调整策略的算法,从而加快收敛速度并找到最优解。

在变异策略中,DE/rand/1 策略有着良好的全局搜索能力,但局部搜索能力较弱,因此希望在算法初期,使用 DE/rand/1 策略,而在算法中后期,使用 DE/best/1 策略来加强局部搜索能力,从而保证得到的值是最优解。因此,自适应差分变异操作产生新个体的方式如下:

$$V_{i,G} = \begin{cases} X_{a,G} + F \times (X_{b,G} - X_{c,G}), & rand > \varphi \\ X_{best,G} + F \times (X_{b,G} - X_{c,G}), & rand \leq \varphi \end{cases} \quad (17)$$

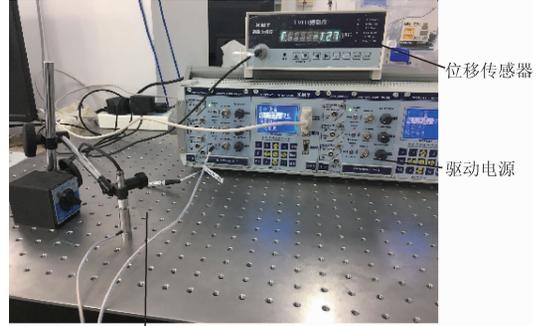
式中: φ 是阈值, $\varphi = \sqrt{G/G_m}$, 与当前进化代数 G 和最大进化代数 G_m 有关。 $X_{a,G}$ 、 $X_{b,G}$ 、 $X_{c,G}$ 是在当前种群中选取的 3 个互不相同的个体,下标 a 、 b 、 c 是从种群数目中随机取的整数且不同于下标 i 。 $X_{best,G}$ 是当前代数中最优个体。可以看出在算法初期,将过多采用 DE/rand/1 策略进行全局搜索,而到了中后期,将更多地采用 DE/best/1 策略,加强了局部搜索能力。同时,为了加快算法的收敛速度,按照式(18)自适应改变参数 F 和 CR :

$$\begin{cases} F = F_{\max} - (F_{\max} - F_{\min}) \cdot \sqrt{\frac{G}{2G_m}} \\ CR = CR_{\min} + (CR_{\max} - CR_{\min}) \times \sqrt{\frac{G}{2G_m}} \end{cases} \quad (18)$$

在该算法中,需要设置的参数有最大进化代数 G_m , 初始种群数目 N_p , 最大最小缩放因子 F_{\max} 、 F_{\min} , 最大最小交叉概率 CR_{\max} 、 CR_{\min} 。对于种群数目,一般取辨识参数数目的 10 倍左右,故这里取 30。最大进化代数根据收敛情况而取,本文取 300。对于 F 一般在 0~2 中选取,根据文献[18],可以将其设置为 $F_{\max} = 0.9$, $F_{\min} = 0.5$ 。交叉概率一般在 0.6~0.9 内选取,所以不妨设置 $CR_{\max} = 0.9$, $CR_{\min} = 0.6$ 。

4 实验结果与分析

为了对压电陶瓷作动器进行参数辨识,需要对其测量输入电压和输出位移值,因此本实验构建了以堆叠压电陶瓷作动器为研究对象的实验系统,如图 4 所示。



压电作动器

图4 压电作动器实验系统

Fig. 4 Experimental system for piezoelectric actuator

实验系统由堆叠压电陶瓷作动器(型号: VS12, 尺寸: 7 mm × 7 mm × 12 mm, 驱动电压: 0~120 V, 输出位移: 0~20 μm)、质量块、压电陶瓷驱动电源(E00.6)、信号采集系统和计算机控制系统组成。信号采集系统由 LVDT 位移传感器和 A/D 转换组成,测量精度达到微米级,通过 A/D 转换反馈给计算机系统。

本实验由上位机软件控制压电陶瓷驱动电源输出 120 V 正弦电压,通过位移传感器测出位移量,传输到计算机中。

对于非迟滞参数辨识部分,选取 3 阶多项式进行拟合。考虑到为了适当避开换向区域,选取 20~100 V 之间的两条曲线作为等式(14)中的 x_1 和 x_u , 则:

$$\begin{cases} f_1 = -0.3309 + 0.1819u + 4.172 \times 10^{-5}u^2 - 2.266 \times 10^{-6}u^3 \\ f_2 = 0.1065 + 0.0277u - 3.207 \times 10^{-4}u^2 + 8.429 \times 10^{-7}u^3 \end{cases} \quad (20)$$

图 5 所示为非迟滞参数部分的拟合曲线,其中虚线里面的区域为拟合区,外面的即为换向区,从图中可以看出,拟合曲线与实际曲线基本重合, RMSE 分别为 0.044 6 和 0.054 0,因而曲线拟合较好,为换向区的拟合做了铺垫。

迟滞参数部分的辨识通过自适应差分进化算法(self-adaptive differential evolution, SADE)完成,这里将其与 DE 和 PSO 进行比较。如图 6 所示,虽然 3 种算法都能在一定代数内寻求到最优值,但可以很明显看出实线 SADE 在第 10 代左右开始缓慢收敛,而其他两个算法都在第 30 代左右才开始趋于平缓,故相比于 DE 和 PSO 算法,SADE 算法更具有优越性,更加适合本文提出的归一化非对称迟滞模型的参数辨识。

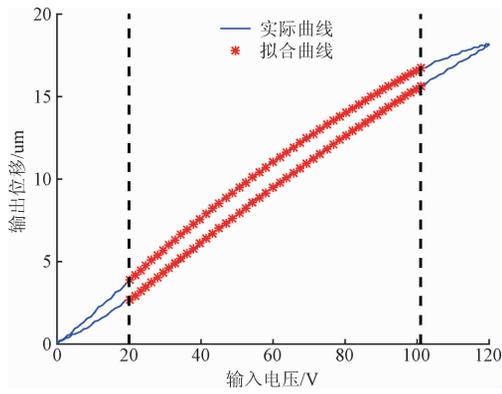


图5 非迟滞参数拟合曲线

Fig. 5 Fitting curve of the non-hysteresis parameters

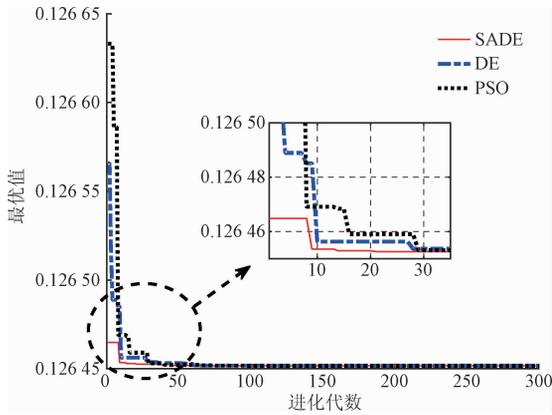
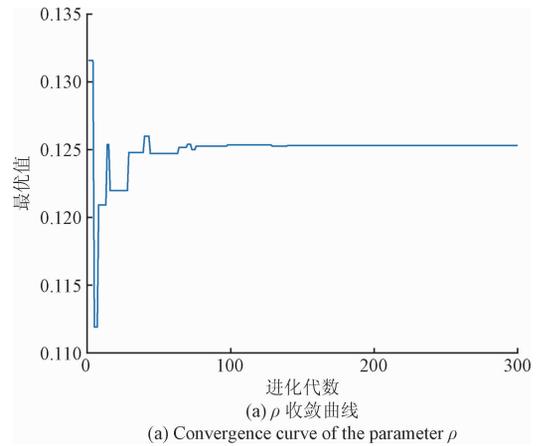


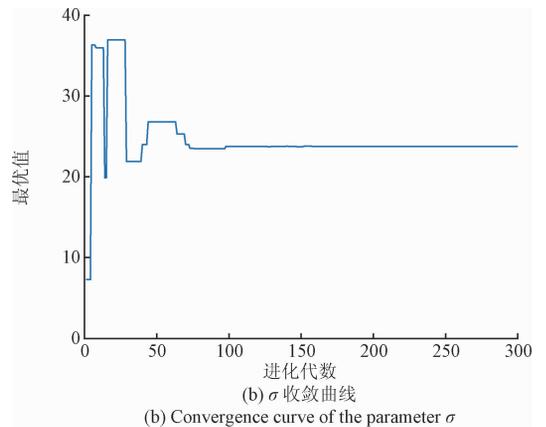
图6 三种算法收敛特性比较

Fig. 6 Comparison of the convergence performance for three algorithms

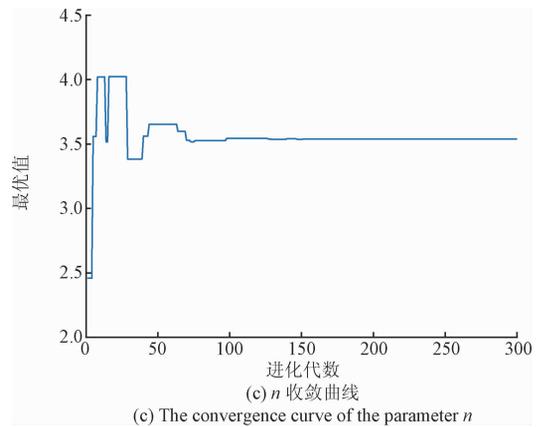
图7所示为采用SADE算法的各参数收敛曲线图。表2所示为3种算法下,传统B-W模型参数值,表3所示为归一化B-W模型的迟滞参数值,从两表可以看出,归一化B-W模型的参数在3种算法下都能找到最优值,而且参数值都一样,而传统B-W模型对于每个算法都能找到不同的参数值,存在参数冗余,且容易陷入局部最优值中。同时,归一化B-W模型辨识所耗时间短,在3种算法中,SADE算法耗时最短。因此,在压电陶瓷迟滞模型的参数辨识中,参数冗余的消除必不可少,从而能够获得待辨识参数的全局最优值。



(a) Convergence curve of the parameter ρ



(b) Convergence curve of the parameter σ



(c) The convergence curve of the parameter n

图7 归一化B-W模型各参数收敛曲线
Fig. 7 Convergence curves of each parameter for normalized B-W model

表2 传统B-W模型参数值

Table 2 Parameters for traditional B-W model

算法类型	k_a	k_b	A	β	γ	n	RMSE	时间/s
PSO	0.159 1	-1.000 0	0.040 3	0.999 8	-0.842 3	3.000 0	0.407 8	20.458 9
DE	0.158 3	-0.567 4	0.245 1	0.018 4	0.179 0	1.866 8	0.403 4	19.332 4
SADE	0.159 8	0.746 8	-0.212 2	0.006 1	-0.270 4	1.300 7	0.387 6	15.132 5

表3 归一化 B-W 模型参数值

Table 3 Parameters for normalized B-W model

算法	ρ	σ	n	RMSE	时间/s
PSO	0.125 3	23.753 2	3.539 3	0.126 5	7.347 6
DE	0.125 3	23.753 2	3.539 3	0.126 5	7.144 8
SADE	0.125 3	23.753 2	3.539 3	0.126 5	5.600 4

式(12)中的参数已全部辨识出,将参数代入模型中,与实际值进行比较,图8所示为输入电压和输出位移曲线,图9所示为模型与实际的误差曲线。由图8可以看出,虚线所代表的归一化非对称迟滞模型更加贴合实际曲线,而传统 B-W 模型偏离实际曲线。图9中,归一化非对称迟滞模型的最大误差绝对值为0.403 4,而传统 B-W 模型的最大误差绝对值为0.715 8,因此,归一化非对称迟滞模型更加符合实际曲线。

5 结 论

为了消除传统 B-W 模型的参数冗余,同时能更好地描述压电陶瓷作动器的迟滞性,提出了一种归一化非对称迟滞模型。在模型方面,采用两个多项式达到非对称效果,利用归一化的 B-W 消除了参数的冗余。在参数辨识方面,先对多项式系数进行拟合取值,再采用自适应差分进化算法进行迟滞参数的辨识。

相比于传统 B-W 模型,该模型的最大误差绝对值降低了43.64%,均方根误差降低了67.05%。相比于传统差分进化算法和粒子群算法,自适应差分进化算法仅在第10代左右开始缓慢收敛,而其他两个算法需要近30代,并且自适应差分进化算法运行时间短,效率高,由此验证了模型和算法的有效性,具有一定实用价值。

参考文献

[1] 葛川,李朋志,徐立松,等.电阻应变式位移传感器电路设计与实现[J].国外电子测量技术,2015,34(6):58-61.
 GE CH, LI P ZH, XU L S, et al. Design and implement of resistance strain displacement sensor circuit [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2015, 34(6):58-61.

[2] 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 D H, YAN S L, ZHU W. Bouc-Wen model based feedforward linearization controller for piezoceramic micro-actuators [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(7):1514-1521.

[3] 汝长海,王科俊,叶秀芬.基于迟滞模型压电陶瓷跟踪控制方法[J].仪器仪表学报,2006,27(增刊1):536-538.
 RU CH H, WANG K J, YE X F. Tracking control for piezoelectric actuator based on hysteresis model [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27 (Suppl. 1):536-538.

[4] CHEN L S, YEN J Y, CHEN J, et al. Precision tracking of a piezo-driven stage by charge feedback control [J]. Precision Engineering, 2013, 37(4):793-804.

[5] YANG M J, GU G Y, ZHU L M. Parameter identification of the generalized Prandtl - Ishlinskii model for piezoelectric actuators using modified particle swarm optimization [J]. Sensors & Actuators A Physical,

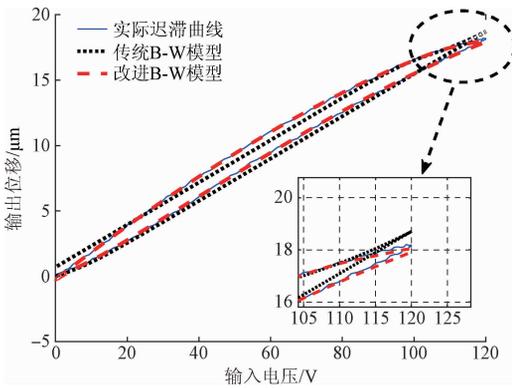


图8 改进 B-W 模型与传统 B-W 模型比较

Fig. 8 Comparison of modified B-W and traditional B-W model

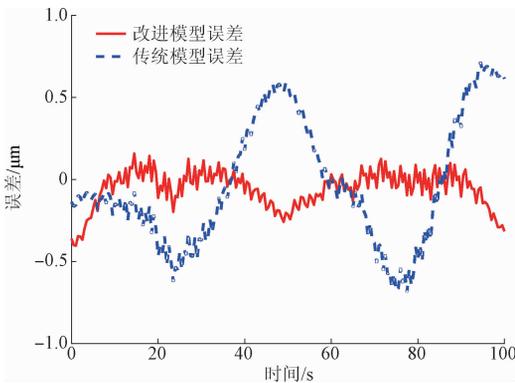


图9 两种模型的误差曲线

Fig.9 Error curves for two models

- 2013, 189(2):254-265.
- [6] 李黎,刘向东,王伟,等. 压电陶瓷执行器迟滞特性的广义非线性 Preisach 模型及其数值实现[J]. 光学精密工程, 2007, 15(5):706-712.
LI L, LIU X D, WANG W, et al. Generalized nonlinear Preisach model for hysteresis nonlinearity of piezoceramic actuator and its numerical implementation [J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15(5):706-712.
- [7] LAI G, ZHI L, YUN Z, et al. Adaptive fuzzy tracking control of nonlinear systems with asymmetric actuator Backlash based on a new smooth inverse [J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2016, 46(6):1250-1262.
- [8] FENG Y, RABBATH C A, CHAI T, et al. Robust adaptive control of systems with hysteretic nonlinearities: A Duhem hysteresis modelling approach [C]. Africon, 2009:1-6.
- [9] LI W, CHEN X, LI Z. Inverse compensation for hysteresis in piezoelectric actuator using an asymmetric rate-dependent model [J]. Review of Scientific Instruments, 2013, 84(11):115003.
- [10] QIN H, BU N, CHEN W, et al. An asymmetric hysteresis model and parameter identification method for piezoelectric actuator [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2014, 2014(1):1-14.
- [11] ZHU W, RUI X T. Hysteresis modeling and displacement control of piezoelectric actuators with the frequency-dependent behavior using a generalized Bouc-Wen model [J]. Precision Engineering, 2015, 43(1):299-307.
- [12] 李国荣,陈大任,殷庆瑞. PZT 系多层片式压电陶瓷微驱动器位移性能研究 [J]. 无机材料学报, 1999, 14(3):418-424.
LI G R, CHEN D R, YIN Q R. Displacement characterization of the PZT-based monolithic multilayer piezoelectric actuators [J]. Journal of Inorganic Materials, 1999, 14(3):418-424.
- [13] GOMIS-BELLMUNT O, IKHOUANE F, MONTESINOS-MIRACLE D. Control of a piezoelectric actuator considering hysteresis [J]. Journal of Sound & Vibration, 2009, 326(3-5):383-399.
- [14] LIN C J, LIN P T. Tracking control of a biaxial piezo-actuated positioning stage using generalized Duhem model [J]. Computers & Mathematics with Applications, 2012, 64(5):766-787.
- [15] GU G Y, ZHU L M, SU C Y, et al. Motion control of piezoelectric positioning stages: Modeling, controller design, and experimental evaluation [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2012, 18(5):1459-1471.
- [16] 徐雪松,杨胜杰,陈荣元. 复杂环境移动群机器人最优路径规划方法 [J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(2):274-282.
XU X S, YANG SH J, CHEN R Y. et al. Dynamic differential evolution algorithm for swarm robots search path planning [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2016, 30(2):274-282.
- [17] 朱敏,高鹰,刘扬,等. 基于差分进化算法的测试序贯优化技术 [J]. 电子测量技术, 2015, 35(10):36-40.
ZHU M, GAO Y, LIU Y, et al. Optimization of testing sequence based on enhanced differential evolution algorithm [J]. Electronic Measurement Technology, 2015, 35(10):36-40.
- [18] MALLIPEDDI R, SUGANTHAN P N, PAN Q K, et al. Differential evolution algorithm with ensemble of parameters and mutation strategies [J]. Applied Soft Computing, 2011, 11(2):1679-1696.

作者简介



顾寒烈, 2015 年于南京航空航天大学获得学士学位, 现为南京航空航天大学硕士研究生, 主要研究方向为压电驱动型主动隔振技术研究。

E-mail: guhlle@163.com

Gu Hanlie received his B. Sc. degree in 2015 from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. Now he is a master candidate in Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. His main research interest is active vibration isolation with piezoelectric actuator.



吴洪涛(通讯作者), 1992 年于天津大学获得博士学位, 现为南京航空航天大学机电学院教授, 博士生导师, 主要研究方向为机械多体系统动力学。

E-mail: mehtwu@126.com

Wu Hongtao (Corresponding author) received his Ph. D. degree from Tianjin University in 1992. Now he is a professor and doctoral supervisor in College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. His main research interest is dynamics of mechanical multibody system.