DOI: 10.3901/JME.2019.14.178

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*

刘 宽^{1,2} 赵梓舒^{1,2} 武文华^{1,2} 周文雅³ 王晓明³

(1. 大连理工大学工业装备结构分析国家重点实验室 大连 116024;

2. 大连理工大学工程力学系 大连 116024;

3. 大连理工大学航空航天学院 大连 116024)

摘要: 作为一种新型的压电纤维复合材料作动器,宏纤维复合材料 MFC(Macro fiber composite)具有响应迅速、机电转换效率高、封装完备和环境适应性强等特点,广泛应用于工程结构的振动、主动变形控制的领域。然而压电材料所固有的迟滞非线性特性直接影响着作动器的控制精度和驱动效果。构造 MFC 作动器驱动的悬臂梁结构的试验系统,建立基于试验数据的 PI(Prandtl-Ishlinskii)和修正 PI 迟滞模型,进而开展针对主动控制的迟滞逆补偿模型研究。通过试验对这两种模型的准确性和逆补偿的有效性进行比较,结果表明修正的 PI 迟滞模型对 MFC 作动器的迟滞非线性特性具有良好的补偿结果,修正的 PI 逆模型的拟合位移是未进行电压补偿控制的 2.14 倍,是 PI 逆模型补偿控制的 1.56 倍。所发展的修正 PI 迟滞模型研究方法可以推广到其他压电材料迟滞行为的模拟。

关键词: 宏纤维复合材料;迟滞非线性;修正 PI 模型;逆补偿控制

中图分类号: TP13; TB535

Hysteresis Nonlinear Analysis and Its Compensation Method of MFC Actuator

LIU Kuan^{1,2} ZHAO Zishu^{1,2} WU Wenhua^{1,2} ZHOU Wenya³ WANG Xiaoming³

(1. State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment,

Dalian University of Technology, Dalian 116024;

2. Department of Engineering Mechanics, Dalian University of Technology, Dalian 116024;

3. School of Aeronautics and Astronautics, Dalian University of Technology, Dalian 116024)

Abstract: As a new of piezoelectric fiber composite actuators, MFC (macro fiber composite) is widely used in active vibration and deformation control of engineering structures due to the advantages of fast response, high electromechanical energy conversion efficiency, good encapsulation, strong environmental adaptability, etc. However, the intrinsic hysteresis nonlinearity of piezoelectric material affects the driven efficiency and the control accuracy. The cantilever beam driven by MFC actuator is taken as the research object. The PI (Prandtl-Ishlinskii) hysteresis model and the modified PI hysteresis model are established based on experimental data. And then, an inverse compensation hysteresis model is developed for active control. The accuracy and the inverse compensation effect of two present models are analyzed and compared by experimental tests. The experimental results indicate that the modified PI hysteresis model have the better compensation effect for the hysteresis nonlinearity of the MFC actuator. The fitting displacement of the compensated PI inverse model compensation control is 2.14 times that of the displacement without the voltage compensation control, and is 1.56 times the displacement of the PI inverse model compensation control. The proposed research strategy of hysteresis nonlinearity can be extended to the analysis of hysteresis behavior of other piezoelectric materials.

Key words: macro fiber composite(MFC); hysteretic nonlinearity; modified PI hysteresis model; inverse compensation control

* 国家自然科学基金(11572072)和国家科技重大专项(2016ZX05028-02-05)
资助项目。20180915 收到初稿, 20190315 收到修改稿

0 前言

宏纤维复合材料 MFC(Macro fiber composite)是一种新型压电复合材料^[1-5], 于 2002 年由 SMART MATERIAL 公司首先对其封装上市。相较于其他传统压电作动器, MFC 采用截面为矩形的压电纤维, 增大了压电纤维和叉指式电极的接触面积, 并具有面内各项异性的压电特性。MFC 具有压电材料响应迅速、机电换能效率高、兼具正逆压电效应等优点, 同时弥补了材料脆性大、不易加工的缺陷, 被广泛的应用于结构的变形和振动控制^[6-7]。

MFC 作动器进行结构变形控制中, 存在“迟滞非线性”^[8-10]的行为, 而结构的位移变形随着加载电压载荷的变化, 存在明显的非线性行为(图 1)。

图 1 MFC 非线性迟滞效应

它的具体表征为在压电作动器两端提升电压或者降低电压的过程中, 作动器对应的位移变化路径存在着差异, 表现出明显的回路特征^[11-13]。如果存在如图 2 所示期望位移的曲线, 由初始 0 位移加载到位移 y_1 , 再由 y_1 卸载得到位移 y_2 , 假设不考虑压电作动器的迟滞非线性, 即加载电压和控制位移为线性关系, 则电压位移曲线如图 3 中由 A 点到 B 点, 再由 B 点返回到 F 点。但是如果考虑压电作动器迟

图 2 期望位移时程曲线

图 3 电压-位移关系曲线

滞非线性特征, 则随着加载电压的变化, 实际位移曲线由 A 点到 D 点, 再由 D 点回到 G 点。可见, 迟滞非线性效应的存在使实际位移不能达到期望位移设计的 y_1 和 y_2 值, 压电作动器的实际控制位移也无法达到设计的极值。

近些年来, 研究人员从数学角度对迟滞效应开展了相关研究, 并建立了多种描述迟滞非线性的数学模型。传统的迟滞模型分为物理迟滞模型和唯象迟滞模型两类, 宋召清等^[14]介绍了压电材料的迟滞非线性特性, 从迟滞系统的建模方面对上述两类不同的迟滞模型进行了综述说明。迟滞唯象模型是根据系统的输入输出数据进行建模, 而不考虑材料的物理机制。裘进浩等^[15]在原有模型的平行四边形的基础单元上改进成以两个三角形合成梯形单元的基础单元模型, 并进行开环和复合控制试验; 结果表明, 改进的 Maxwell 迟滞模型能够很好地描述非对称迟滞特性。朱炜等^[16]对 Bouc-Wen 迟滞模型进行了研究, 指出定参数模型无法表现压电执行器迟滞的频移和时变性。采用限定记忆递推最小二乘在线辨识方法实时辨识模型参数的方法; 试验验证结果表明, 该在线辨识方法能够有效地提高 Bouc-Wen 模型的模拟精度。陈辉等^[17]根据 Weierstrass 第一逼近定理, 提出以多项式逼近 Duhem 模型的函数, 采用递推最小二乘算法辨识 Duhem 模型的参数和多项式系数, 并计算出压电陶瓷的逆模型。通过试验证明了模型能有效地减少压电陶瓷的迟滞现象。李欣欣等^[18]介绍了 Jiles-Atherton 磁滞模型的主要思想及其主要模型参数, 在其全逆模型的基础上给出了利用磁滞环的宽度, 重新给定反向起始点迭代初值的磁滞补偿方法。郑凯等^[19-20]分别对 Priesach 模型、极坐标模型进行分析, 参数的物理意义, 进行压电叠层作动器位移响应试验和重构非线性迟滞隔振系统的恢复力一位移回线试验, 验证 Priesach 模型和极坐标模型的准确性。李以农等^[21]针对迟滞非线性现象, 提出了采用 PI 逆模型进行迟滞非线性补偿行为研究, 并以试验证明了 PI 模型和 PI 逆模型的正

确性和有效性。对于 PI 模型带来的奇对称、凸函数等特性, BAHASH 等^[22-23]引入单边死区算子对 PI 模型进行修正, 修正模型能够较好地描述压电材料的迟滞非线性特性, 但并没有给出修正 PI 模型的迟滞补偿器方案。本文首先介绍了 PI 迟滞模型, 进而建立以悬臂梁结构和 MFC 为主体的迟滞非线性试验系统, 开展基于修正 PI 模型的 MFC 作动器迟滞非线性效应研究, 分析了修正 PI 逆模型及其对应的模型参数。利用试验系统对 MFC 作动器迟滞非线性开展了补偿控制研究, 结果表明修正 PI 逆模型及其拟合模型参数能够有效地处理 MFC 作动器的迟滞非线性效应。

1 MFC 作动器的迟滞模型

1.1 PI 迟滞模型

PI 迟滞模型是唯象模型的一种典型代表, 模型建立与压电作动器的物理特性无关, 是通过试验数据对迟滞非线性效应^[24]进行分析得到。其核心思想是将多个迟滞单元算子通过加权叠加得到 PI 迟滞模型。迟滞单元算子如图 4 所示, 整个模型需两组变量即可描述, 使得 PI 迟滞模型相对于其他迟滞模型的计算更为简便。迟滞单元算子定义为

$$h(t) = \max\{x(t) - r_i, \min\{x(t) + r_i, y(t - T)\}\} \quad (1)$$

式中, x 为 PI 迟滞单元算子的输入值, h 为 PI 迟滞单元算子的输出值, r_i 是输入阈值, T 为试验数据的采样周期。

图 4 PI 迟滞单元算子

式(1)中迟滞单元算子的初始项为

$$h(0) = \max\{x(t_0) - r_i, \min\{x(t_0) + r_i, y_0\}\} \quad (2)$$

式中, t_0 为初始时刻, $x(t_0)$ 为初始时刻的输入量, y_0 为初始时刻的输出量。

PI 迟滞模型的位移量 Y 可以通过多个迟滞单元算子与多个权值 w 加权叠加得到

$$Y(t) = \mathbf{w}_H^T \cdot \mathbf{H}_r[x, y_0](t) = \sum_{i=0}^n \mathbf{w}_H^i \cdot y(t) = \sum_{i=0}^n \mathbf{w}_H^i \cdot \max\{x(t) - r_H^i, \min\{x(t) + r_H^i, y(t - T)\}\} \quad (3)$$

式(3)即为 PI 迟滞模型的完整表达形式。

1.2 基于单边死区算子的修正 PI 模型

奇对称与凸模型是传统 PI 模型固有的两个特性。由于与真实的迟滞现象存在差异, 使得 PI 模型化在应用中的准确性^[25-28]被限制。

应用单边死区算子可以较好地处理 PI 模型中的奇对称与凸模型现象, 单边死区算子如图 5 所示。将单边死区算子与 PI 模型串联, 就能得到修正 PI 模型。其既保持了 PI 模型对迟滞非线性问题的描述, 又解决了其凸模型与奇对称的问题。

图 5 单边死区算子

单边死区算子的表达式如下

$$S_r[x] = \begin{cases} \max\{x - r_s, 0\} & r_s > 0 \\ x & r_s = 0 \\ \min\{x - r_s, 0\} & r_s < 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中, S_r 为单边死区算子, x 为模型数值参量, r_s 为算子阈值。

将不同阈值的单边死区算子加权叠加, 可得到单边死区模型表达式为

$$\mathbf{S}[\mathbf{x}](t) = \mathbf{w}_s^T \cdot \mathbf{S}_r[\mathbf{x}](t) \quad (5)$$

式中, $\mathbf{w}_s^T$ 为单边死区模型的权系数矢量。串联 PI 模型的迟滞算子与单边死区算子, 可得到修正的 PI 模型如下

$$\mathbf{G}[\mathbf{x}(t)] = \mathbf{w}_s \cdot \mathbf{S}_r[\mathbf{w}_H \cdot \mathbf{H}_r[\mathbf{x}, y_0]](t) \quad (6)$$

2 迟滞非线性逆补偿模型及参数辨识方法

相较于其他迟滞模型, PI 迟滞模型的一个优点是具有解析形式的迟滞逆模型, 且模型参数易于求解^[29]。利用迟滞逆补偿方法是解决 MFC 作动器迟滞非线性问题的有效手段。

PI 迟滞逆模型表达式如下, 其值可以通过 PI 迟滞模型的参数求解

$$z(t) = \sum_{i=0}^n H_i^{-1}[y, z_0](t) =$$

$$\sum_{i=0}^n w_H^i \max\{y(t) - r_H^i, \min\{y(t) + r_H^i, z(t - T)\}\} \quad (7)$$

应用单边死区算子进行修正后的 PI 迟滞逆模型数学表达式为

$$G^{-1}[y](t) = w_H^i \cdot H_r[w_s^i \cdot S_r[y], z_0^i](t) \quad (8)$$

实际应用中, 需要基于试验数据辨识模型参数。为得到逼近于真实迟滞现象的模型参数, 需要尽量遍历整体电压施加区间。修正的 PI 模型的阈值参数可以通过下面的公式获得

$$\begin{cases} r_H^i = \frac{r_{\max}}{n+1} i & i = 0, 1, \dots, n \\ r_s^0 = 0 \\ r_s^i = \frac{y_{\max}}{m} \left(i - \frac{1}{2}\right) & i = 1, 2, \dots, m \end{cases} \quad (9)$$

修正的 PI 模型与实测数据误差函数表达式为

$$E(x, y)(t) = (w_H^T \ w_s^T) \cdot (H_{r_H}[x, y_0](t) - S_{r_s}[y](t)) \quad (10)$$

为了使模型拟合效果更加理想, 将参数 w_H^i 和 w_s^i 的辨识问题转化为误差函数 $E(x, y)$ 最小值的二次优化问题, 即

$$\begin{aligned} & \min\{(w_H^T \ w_s^T) \\ & \int_{t_0}^{t_e} (H_{r_H}[x, y_0](t) - S_{r_s}[y](t)) \times \\ & \left\{ (H_{r_H}[x, y_0](t)^T - S_{r_s}[y](t)^T) dt \begin{pmatrix} w_H \\ w_s \end{pmatrix} \right\} \end{aligned} \quad (11)$$

该优化问题的约束条件为

$$\begin{cases} \begin{pmatrix} U_H & 0 \\ 0 & U_s \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} w_H \\ w_s \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} u_H \\ u_s \end{pmatrix} \leq \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \\ \left[(\|x\|_{\infty} \cdot i - r_H)^T \ o^T \right] \cdot \begin{pmatrix} w_H \\ w_s \end{pmatrix} - \|x\|_{\infty} = 0 \end{cases} \quad (12)$$

PI 迟滞逆模型中的参数可以通过相关参数转换得到

$$w_H^0 = \frac{1}{w_H^0} \quad (13)$$

$$w_H^i = \frac{-w_H^j}{(\sum_{j=0}^i w_H^j)(\sum_{j=0}^{i-1} w_H^j)} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (14)$$

$$r_H^i = \sum_{j=0}^i w_H^j (r_H^i - r_H^j) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (15)$$

$$z_0^i = \sum_{j=0}^i w_H^j y_0^i + \sum_{j=i+1}^n w_H^j y_0^j \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (16)$$

3 迟滞非线性试验系统及参数辨识结果分析

以 MFC 作动器驱动的悬臂梁系统为研究对象测试迟滞非线性逆补偿模型的有效性。图 6 给出了试验装置示意图。包含 MFC 作动器、铝合金悬臂梁、工控机, 信号发生器、电压放大器、激光位移传感器及信号采集软件六部分。其中, 梁结构的一端夹持, 另一端为自由状态。选用作动器型号为 M8528 P1, 参数为 85 mm×28 mm, 电压范围-500 V 到 1 500 V。激光位移传感器波特率 9 600, 供电 24 V, 量程范围是 40~60 mm, 精度 0.001 mm。

图 6 MFC 试验系统

根据文献[30]可知, 为取得较大的变形量, MFC 作动器最合理的粘贴位置为悬臂梁固定端的根部, 为避免导线与金属试验台接触, 实际布设过程将 MFC 作动器粘贴于距离根部 20 mm 处, 如图 7 所示。激光位移传感器距离悬臂梁的直线距离为 50 mm, 测点位置设置在距离悬臂梁自由端 45 mm 处。

图 7 MFC 作动器驱动的悬臂梁结构

具体试验步骤如下。

(1) 打开工控机, 信号发生器和电压放大器。打开激光位移传感器, 打开采集软件采集激光位移的测量数据。

(2) 由 MFC 作动器的电压加载区间[-500 V, 1 500 V], 工控机输出控制信号, 并传送给信号发生器, 信号发生器生成相应的电压信号, 然后经过电压放大器放大, 对 MFC 施加如图 8 所示电压加载曲线。

图 8 初始电压加载曲线图

(3) MFC 作动器将接收到的电压信号转化为机械应变，产生改变悬臂梁的弯矩，在测点位置产生位移。

(4) 激光位移传感器将测点位移数据传送回工控机，利用测量悬臂梁结构测点位移与 MFC 作动器加载电压的对应关系，绘制电压与位移的曲线。

由图 9 可以看出，随着升压降压过程，测点位置的位移与电压值存在着明显的非线性关系，表现出了典型的迟滞非线性。

图 9 MFC 作动器迟滞图

基于试验结果，利用式(6)~(8)可得到 PI 迟滞模型及其逆补偿模型的相关参数，如表 1 所示。

表 1 迟滞非线性算子阈值及权重值表

序号 i	输入阈值/V	修正输入阈值/V	权重	修正权重	算子阈值	修正单边死区权重
1	0	0	0.550	1.817	0	67.628
2	50	27.507	0	0	0.301	4.653
3	100	55.014	0	0	0.903	7.594
4	150	82.520	0.131	-0.349	1.506	-33.213
5	200	116.560	0.104	-0.195	2.108	41.134
6	250	155.805	0.056	-0.085	2.711	-0.909
7	300	197.861	0	0	3.314	-57.978
8	350	239.916	0	0	3.916	82.461
9	400	281.972	0.180	-0.210	4.519	-47.045
10	450	333.033	0	0	5.121	-10.260
11	500	384.094	0	0	5.724	72.302
12	550	435.155	0	0	6.326	-61.318
13	600	486.216	0	0	6.929	0.535
14	650	537.277	0.058	-0.053	7.531	43.839
15	700	591.243	0	0	8.134	-60.602
16	750	645.210	0	0	8.736	38.603
17	800	699.177	0	0	-2.070	105.314
18	850	753.143	0	0	-1.927	-192.737
19	900	807.110	0.044	-0.037	-1.784	232.849
20	950	863.298	0	0	-1.641	-99.817
21	1 000	919.487	0	0	-1.499	-11.923
22	1 050	975.676	0	0	-1.356	23.773
23	1 100	1 031.864	0	0	-1.213	-144.881
24	1 150	1 088.053	0	0	-1.070	160.069
25	1 200	1 144.242	0	0	-0.928	-160.069
26	1 250	1 200.430	0	0	-0.785	248.539
27	1 300	1 256.619	0	0	-0.642	-248.539
28	1 350	1 312.807	0	0	-0.499	96.233
29	1 400	1 368.996	0	0	-0.356	-33.427
30	1 450	1 425.185	0.373	-0.222	-0.214	153.784

当获得修正 PI 模型参数后, 可通过增加补偿试验装置(利用激光位移传感器采集数据, 将数据带入模型计算控制电压, 将逆补偿模型计算得到的电压带入到试验中, 得到模型对应的实际补偿位移值)开展迟滞补偿对比分析。对比结果如图 10 所示。其中图 10a 中将未进行电压补偿控制的位移、PI 逆模型补偿控制的位移、修正的 PI 逆模型补偿控制的位移与期望位移进行对比分析, 图 10b 将无补偿位移与期望位移相对比, 图 10c 将修正的 PI 补偿位移和无补偿位移同时与期望位移相对比, 图 10d 将 PI 逆补偿位移与修正的 PI 逆补偿位移同时与期望位移相对比。观察试验结果, 可知未进行电压补偿控制的位移、PI 逆模型补偿控制的位移、修正的 PI

逆模型补偿控制的位移与期望位移的平均绝对误差分别为 2.098 mm、1.542 mm、1.086 mm, 平均方差分别为 1.645, 1.045, 0.844 5。修正的 PI 逆模型补偿控制的位移与期望位移的拟合度是未进行电压补偿控制的位移的 2.14 倍, 是 PI 逆模型补偿控制的位移的 1.56 倍, 因此修正的 PI 逆模型可以得到与期望位移吻合度最好的补偿结果, 而 PI 逆模型得到的补偿结果与期望位移基本吻合, 但在极值点拐角后会出现偏离期望位移的现象。尤其在最后一段加载区间, 极值拐角后的偏离现象更加严重。而对于未加任何补偿的控制模型, 位移出现小于期望极大值, 大于极小值的分布规律, 且位移曲线升降速率都会大于期望位移, 导致与期望位移出现较大偏离。

图 10 PI 迟滞模型及其逆补偿模型的相关参数

4 结论

(1) 利用唯象模型对 MFC 作动器的迟滞非线性进行了建模和逆补偿控制。

(2) 在 PI 模型的基础上, 通过引入单边死区算子建立了修正的 PI 模型, 模型具有消除典型 PI 模型的奇对称、凸函数现象的特性。

(3) 建立了 MFC 迟滞非线性参数辨识试验系统。试验结果表明了修正的 PI 逆模型得到结果与期望结果的拟合度是未进行电压补偿控制的位移的

2.14 倍, 是 PI 逆模型补偿控制的位移的 1.56 倍, 能够有效地处理 MFC 作动器的迟滞非线性效应。与期望试验值相比, 其模型的绝对误差为 1.086 mm, 好于未进行电压补偿控制的 2.098 mm 和 PI 逆模型补偿控制的 1.542 mm。

参 考 文 献

- [1] 狄思思, 李华峰. MFC 及其发展现状[J]. 振动·测试与诊断, 2013(增刊 2): 157-160, 226.
- GENG Sisi, LI Huafeng. A review of macro fiber composite and its application[J]. Journal of Vibration,

- Measurement & Diagnosis, 2013(Suppl.2): 157-160, 226.
- [2] 高乐. 基于压电智能复合材料的振动主动控制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012
- GAO Le. Active vibration control based on piezoelectric smart composite [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.
- [3] 黄国平, 李百明, 肖勇, 等. 压电材料的发展与展望[J]. 科技广场, 2010(1): 208-210
- HUANG Guoping, LI Baiming, XIAO Yong, et al. Development and prospect of piezoelectric material [J]. Science Mosaic, 2010(1): 208-210.
- [4] 何超, 陈文革. 压电材料的制备应用及其研究现状[J]. 功能材料, 2010, 41(增刊 1): 11-13
- HE Chao, CHEN Wenge. Fabrication and research and application of piezoelectric materials [J]. Journal of Functional Materials, 2010, 41(Suppl.1): 11-13
- [5] 裴先茹, 高海荣. 压电材料的研究和应用现状[J]. 安徽化工, 2010, 36(3): 4-6.
- PEI Xianru, GAO Hairong. The research state and influence of piezoelectric materials [J]. Anhui Chemical Industry, 2010, 36(3): 4-6
- [6] 范丽峰. 基于压电作动器 MFC 的柔性梁振动主动控制 [D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
- FAN Haifeng. Active vibration control of flexible beam with piezoelectric actuator MFC[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014.
- [7] 罗亚军, 蒋竺佟, 葛东明, 等. 基于 MFC 的柔性机翼结构振动主动控制技术研究[C]//全国模态分析与试验学术会议, 2016: 1
- LUO Yajun, JIANG Zhutong, GE Dongming, et al. Research on active vibration control of flexible wing structure [C]//Proceedings of the 16th National Symposium on Modal Analysis and Experiment, 2016: 1.
- [8] 崔玉国, 孙宝元, 董维杰, 等. 压电陶瓷执行器迟滞与非线性成因分析[J]. 光学精密工程, 2003, 11(3): 270-275
- CUI Yuguo, SUN Baoyuan, DONG Weijie, et al. Causes for hysteresis and nonlinearity of piezoelectric ceramic actuators [J]. Optics and Precision Engineering, 2003, 11(3): 270-275
- [9] 张涛, 孙立宁, 蔡鹤皋. 压电陶瓷基本特性研究[J]. 光学精密工程, 1998, 6(5): 26-32.
- ZHANG Tao, SUN Lining, CAI Hegao. Study on the fundamental characteristics of piezoelectric element [J]. Optics and Precision Engineering, 1998, 6(5): 26-32.
- [10] 唐凤, 黄尚廉, 刘光聪. PZT 非线性特性的研究[J]. 压电与声光, 1997(3): 180-183.
- TANG Feng, HUANG Shanglian, LIU Guangcong. Study on non-linearity of PZT [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 1997(3): 180-183.
- [11] HONG Tian, Chang T N. Control of nonlinear piezoelectric stack using adaptive dither//American Control Conference, 1995. Proceedings of the IEEE Xplore, vol.11995: 76-80.
- [12] GUYOMAR D, AURELLE N, EVRAUD L. Piezoelectric ceramics nonlinear behavior: application to Langevin transducer[J]. Journal De Physique III, 1997, 7(6): 1197-1208.
- [13] HWANG S C, MCMEEKING R M. A finite element model of ferroelectric polycrystals [J]. Ferroelectrics, 1998, 211(1): 177-194.
- [14] 宋召青, 龙玉峰, 孙俊平. 迟滞非线性系统的建模与控制研究综述[J]. 海军航空工程学院学报, 2014, 29(6): 528-534.
- SONG Zhaoqing, LONG Yufeng, SUN Junping. General on modeling and control of hysteresis nonlinear system [J]. Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University, 2014, 29(6): 528-534
- [15] 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.
- [16] 朱炜, 芮筱亭. 压电执行器的 Bouc-Wen 模型在线参数辨识[J]. 光学精密工程, 2015, 23(1): 110-116.
- ZHU Wei, RUI Xiaoting. Online parameter identification of Bouc-Wen model for piezoelectric actuator [J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(1): 110-116.
- [17] 陈辉, 谭永红, 周杏鹏, 等. 压电陶瓷执行器的动态模型辨识与控制[J]. 光学精密工程, 2012, 20(1): 88-95.
- CHEN Hui, TAN Yonghong, ZHOU Xingpeng et al. Identification and control of dynamic modeling for piezoceramic actuator [J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(1): 88-95.
- [18] 李欣欣, 王文, 陈戡恒, 等. Jiles-Atherton 模型的超磁致伸缩驱动器磁滞补偿控制[J]. 光学精密工程, 2007(10): 1558-1563.
- LI Xinxin, WANG Wen, CHEN Jianheng, et al. Hysteresis compensation of giant magnetostrictive actuator based on Jiles-Atherton model [J]. Optics and Precision Engineering, 2007(10): 1558-1563.
- [19] 郑凯, 阎绍泽, 温诗铸, 等. 压电叠层作动器迟滞特性模型[J]. 清华大学学报, 2003(5): 628-631.
- ZHENG Kai, YAN Shaoze, WEN Shizhu, et al. Hysteresis compensation in piezoelectric stack actuators[J]. Journal of Tsinghua University, 2003(5): 628-631.

- [20] 赵荣国. 类椭圆非线性迟滞隔振系统动力学模型[C/CD]// 第八届全国振动理论及应用学术会议论文集摘要, 2003.
ZHAO Rongguo. Ellipse-like dynamic model for nonlinear hysteretic vibration isolation system [C/CD]//Abstracts of proceedings of the Eighth National Symposium on vibration theory and Applications, 2003.
- [21] 李以农, 张锋, 郑玲. 压电作动器的迟滞非线性建模和实时补偿控制仿真[J]. 功能材料, 2009, 40(8): 1297-1301.
LI Yinong, ZHANG Feng, ZHENG Ling. Modeling and real-time compensation control of nonlinear hysteresis for piezoelectric actuator [J]. Journal of Functional Materials, 2009, 40(8): 1297-1301.
- [22] SCHROCK, JOHANNER, MEURER T, et al. Control of a flexible beam actuated by macro-fiber composite patches: II. Hysteresis and creep compensation, experimental results [J]. Smart Materials & Structures, 2011, 20(1): 015016.
- [23] BAHASH S, JALILI N. Robust multiple frequency trajectory tracking control of piezoelectrically driven micro/nanopositioning systems[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2007, 15(5): 867-878.
- [24] 郭国法, 党选举. 基于 PI 模型的压电陶瓷执行器迟滞特性建模[J]. 微计算机信息, 2008(4): 282-284.
GUO Guofa, DANG Xuanju. Modeling for piezoceramic actuators based on PI model[J]. Microcomputer Information, 2008(4): 282-284
- [25] 郑军辉, 崔玉国, 蔡成波, 等. 串联死区算子的压电钳 PI 迟滞模型[J]. 压电与声光, 2015, 37(4): 650-654.
ZHENG Junhui, CUI Yuguo, CAI Chengbo, et al. Research on PI hysteresis model with dead-zero operator of piezoelectric micro-gripper [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2015, 37(4): 650-654
- [26] 马宏伟, 须颖, 安冬, 等. 基于三段 PI 模型的压电驱动器迟滞补偿方法[J]. 纳米技术与精密工程, 2017, 15(1): 53-60.
MA Hongwei, XU Ying, AN Dong, et al. Compensation of hysteresis on piezoelectric actuators based on tripartite PI model [J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2017, 15(1): 53-60.
- [27] 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.
- [28] 胡冰. 压电陶瓷执行器迟滞非线性模型研究[D]. 长春: 吉林大学, 2015.
HU Bing. Research of hysteresis nonlinear model for piezoelectric ceramic actuators [D]. Changchun: Jilin University, 2015.
- [29] 张桂林, 张承进, 李康. 基于 PI 迟滞模型的压电驱动器自适应辨识与逆控制[J]. 纳米技术与精密工程, 2013, 11(1): 85-89.
ZHANG Guilin, ZHANG Chengjin, LI Kang. Adaptive identification and inverse control of piezoelectric actuators based on PI hysteresis model [J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2013, 11(1): 85-89.
- [30] 黄秀峰, 崔洪宇, 洪明, 等. 振动控制中压电元件优化配置研究进展[J]. 压电与声光, 2015, 37(5): 768-779
HUANG Xiufeng, CUI Hongyu, HONG Ming, et al. Advances in optimal allocation of piezoelectric sensor/actuator in structural vibration control [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2015, 37(5): 768-779.

作者简介: 刘宽, 男, 1992 年出生。主要研究方向为动力学与控制。

E-mail: wictor1992@163.com

武文华(通信作者), 男, 1973 年出生, 博士, 教授。主要研究方向为工程力学和结构振动控制。

E-mail: lxyuhua@dlut.edu.cn