

文章编号 1004-924X(2015)06-1650-07

压电式快速控制反射镜的迟滞特性及线性化

袁 刚^{1,2*}, 张小波¹, 王代华^{1,2}, 陈 敏¹

- (1. 重庆大学 光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044;
2. 重庆大学 光电工程学院 精密与智能实验室, 重庆 400044)

摘要:针对压电式快速控制反射镜(Fast Steering Mirror, FSM)的迟滞问题,分析了压电式 FSM 的工作原理和迟滞特性,建立了基于 Bouc-Wen 算子的压电式 FSM 的数学模型及其参数辨识方法。通过 Bouc-Wen 算子模拟压电式 FSM 输出镜面偏转角度中的迟滞分量,并根据在两个相位相同的输入驱动电压信号下压电式 FSM 的输出镜面偏转角度曲线辨识 Bouc-Wen 算子的全部参数。在此基础上,提出了压电式 FSM 的前馈线性化方法。为了验证提出的数学模型和线性化方法的原理,建立了压电式 FSM 及其线性化控制器的快速原型系统和 Bouc-Wen 算子参数辨识实验装置。实验结果表明:本文提出的参数辨识方法能够准确辨识压电式 FSM 的 Bouc-Wen 算子参数,提出的前馈线性化方法能够将压电式 FSM 的输出镜面偏转角度与输入控制电压的线性度提高到 2.3%,迟滞误差减小到 $\pm 0.5\%$,满足实际应用对精确控制压电式 FSM 的要求。

关键词:快速控制反射镜;压电陶瓷叠堆执行器;倾斜镜;迟滞;线性化

中图分类号: TN384; TH703 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152306.1650

Hysteresis and linearization of piezoelectric fast steering mirror

YUAN Gang^{1,2*}, ZHANG Xiao-bo¹, WANG Dai-hua^{1,2}, CHEN Ming¹

- (1. Key Laboratory of Optoelectronic Technology and Systems of the Ministry of Education, Chongqing 400044, China;
 2. Precision & Intelligence Laboratory, College of Optoelectronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)
- * Corresponding author, E-mail: cqyuan@cqu.edu.cn

Abstract: For the hysteresis of a piezoelectric Fast Steering Mirror (FSM), the working principle and hysteresis properties of the piezoelectric FSM were analyzed. The Bouc-Wen hysteresis operator based mathematical model of the piezoelectric FSM and the corresponding parameter identification method were proposed. The hysteresis component of excursion angle of the piezoelectric FSM was estimated by the Bouc-Wen hysteresis operator, and parameters of Bouc-Wen hysteresis operator were identified according to the excursion angles of the piezoelectric FSM at two driven voltage waves with the same phase position. On this basis, a feedback forward linearization method for the piezoelectric FSM was proposed. In order to validate the proposed mathematical model and linearization method, the rapid prototyping system for the piezoelectric FSM and a linearization controller and an experimental set for the parameter identification of the Bouc-Wen hysteresis operator were established. The experimental

收稿日期:2015-01-23;修订日期:2015-02-23.

基金项目:中央高校基本科研业务费资助项目(No. CDJZR12120005)

results show that the proposed identification method estimates the parameters of the Bouc-Wen hysteresis operator of the piezoelectric FSM accurately and the feedback forward linearization method increases the linearity of mirror deflection angle and input control voltage of the piezoelectric FSM by 2.3% and decreases the delaying error by $\pm 0.5\%$ respectively. It satisfies the requirements of precision control of the piezoelectric FSM.

Key words: Fast Steering Mirror (FSM); Piezoelectric Ceramic Stack Actuator (PCSA); tilt mirror; hysteresis; linearization

1 引言

压电式快速控制反射镜(Fast Steering Mirror, FSM)采用压电陶瓷叠堆执行器(Piezoelectric Ceramic Stack Actuator, PCSA)作为驱动器,具有体积小、响应快、精度高、动态性能好、无电磁辐射等优点,在自适应光学补偿、光束跟踪和指向^[1]、图像稳定^[2]、激光扫描^[3-4]、跟踪、捕获、瞄准系统^[5]、空间光通信^[6]等方面有着广泛的应用前景。

由于PCSA的输出位移与驱动电压之间存在较强的迟滞特性^[7],压电式FSM的输出特性也存在较明显的迟滞问题^[8]。一种解决思路是通过闭环控制^[6,9],利用高精度的位移传感器和控制算法进行反馈控制,但该方法会导致成本增加、结构尺寸增大,且由于容易受外界扰动影响,可能引起稳定性和鲁棒性等问题。另一种解决方法是通过开环前馈方式对PCSA的位移执行特性进行线性化,即求解PCSA及其构成系统的数学模型,并根据其逆模型从驱动电压中减去迟滞分量对应的电压来消除PCSA及其构成系统的迟滞特性。

目前,已有的PCSA的数学模型包括多项式模型、Preisach模型^[10]、Prandtl-Ishlinskii模型^[11]、神经网络模型^[12]、Bouc-Wen模型^[13,14]等。陈远晟等^[10]用2个双曲函数分别拟合迟滞主环的上升段与下降段,建立了基于双曲函数的Preisach类迟滞非线性模型,控制后的最大误差比控制前减小了44.26%。王钰锋^[11]等以改进的Prandtl-Ishlinskii模型表示静态非线性部分,以外因输入自回归模型表示动态线性部分,设计了

基于前馈自适应逆补偿和PI反馈的复合控制策略。魏强等^[12]用径向基函数神经网络的输出作滑模控制的等价控制量,由迟滞补偿器估计控制器参数误差、外部扰动和近似计算,对神经网络控制量进行补偿后,平均定位误差减小为 $0.27\ \mu\text{m}$,最大误差减小为 $0.49\ \mu\text{m}$ 。考虑Bouc-Wen模型采用具有待定参数的非线性微分方程模拟迟滞现象,通过选择合适的参数能够较好地模拟各种不同类别的迟滞系统,王代华^[13-14]提出了一种PCSA的Bouc-Wen模型及其参数辨识方法,能够较好地模拟PCSA的迟滞特性,且参数辨识过程简单,其预测结果的最大相对误差为5.79%。

本文针对压电式FSM的迟滞问题,分析了压电式FSM的工作原理和迟滞特性,基于Bouc-Wen算子建立了压电式FSM的数学模型及其参数辨识方法。在此基础上,提出了压电式FSM的前馈线性化方法。建立了压电式FSM的Bouc-Wen算子参数辨识和线性化控制的快速原型系统,最后通过实验对建立的数学模型和线性化方法的原理进行了验证。

2 压电式FSM的工作原理

大角度偏转压电式FSM结构如图1所示,由反射镜面、柔性铰链连杆及镜架、桥式位移放大机构、PCSA和球头垫片等组成。PCSA固定在桥式位移放大机构中,在输入驱动电压作用下产生伸长的位移,通过桥式位移放大机构放大后拉动柔性铰链连杆向下运动,使反射镜面绕镜面旋转轴顺时针偏转。当输入驱动电压减小时,在柔性铰的弹性力作用下,反射镜面绕镜面旋转轴逆时针偏转。

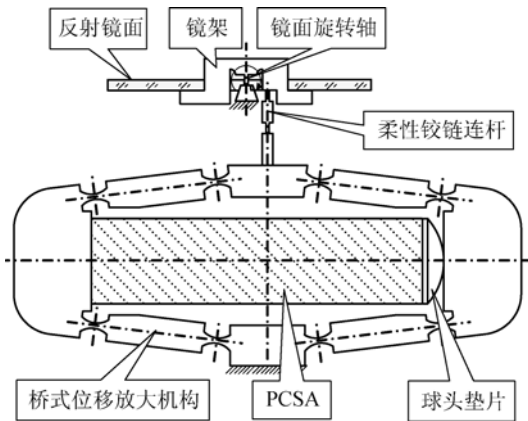


图 1 压电式 FSM 结构示意图
Fig. 1 Configuration of piezoelectric FSM

考虑到压电式 FSM 的输出镜面偏转角度较小 ($<5^\circ$), 机构的变形对桥式位移放大机构的构型和柔性铰链连杆相对于镜面旋转轴的作用力臂长度的影响可以忽略, 则压电式 FSM 输出镜面偏转角度与 PCSA 输出位移的比值为常数。如果将 PCSA 视作理想的线性位移执行器, 即输出位移只与输入驱动电压成正比而与负载无关, 则压电式 FSM 的输出镜面偏转角度与输入驱动电压成线性关系。通过控制输入驱动电压变化, 即可对压电式 FSM 的镜面偏转角度进行准确控制。

3 压电式 FSM 的迟滞问题

3.1 压电式 FSM 迟滞特性及其数学模型

由于 PCSA 本身存在迟滞特性, 即在相同输入驱动电压下, 上升和下降过程所对应的 PCSA 的输出位移之间存在较大差异 (一般在 10% 以上), 影响了 PCSA 的控制精度, 不能视作理想的线性位移执行器。利用 PCSA 构成的压电式 FSM 的输出镜面偏转角度与输入驱动电压之间也表现出迟滞特性, 可以将压电式 FSM 的输出镜面偏转角度表示为线性分量和迟滞分量的叠加, 其等效模型如图 2 所示。

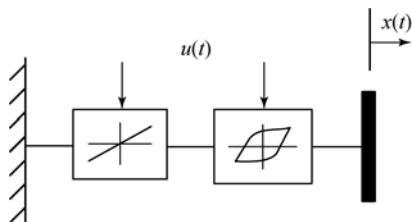


图 2 压电式 FSM 的等效模型
Fig. 2 Equivalent model of piezoelectric FSM

压电式 FSM 的输出镜面偏转角度可表示为^[13-14]:

$$x(t) = k_v u(t) + h(t), \quad (1)$$

式中: $x(t)$ 为压电式 FSM 的偏转角度; $u(t)$ 为输入驱动电压; k_v 为线性分量的比例系数; $h(t)$ 为迟滞分量, 利用 Bouc-Wen 算子, 可以近似模拟为:

$$\dot{h}(t) = A\dot{u}(t) - \beta|\dot{u}(t)|h(t) - \gamma\dot{u}(t)|h(t)|, \quad (2)$$

式中: A, β 和 γ 为 Bouc-Wen 迟滞算子的参数。

式(1)和(2)所描述的即为基于 Bouc-Wen 算子的压电式 FSM 数学模型, 利用该模型即可预测压电式 FSM 的输出镜面偏转角度与输入驱动电压的迟滞曲线。

3.2 参数辨识方法

为了利用压电式 FSM 的 Bouc-Wen 数学模型, 必须对模型中的各项参数进行辨识。通过分析 3 种不同情况下压电式 FSM 的输出镜面偏转角度与输入驱动电压间的关系, 可以依次解算出 k_v, A, β 和 γ ^[13,14]。

考虑依次对 FSM 输入 2 个相位相同的驱动电压信号 $u_1(t)$ 和 $u_2(t)$, 满足:

$$u_2(t) = u_1(t) + u_b, \quad (3)$$

式中: u_b 为直流偏置电压。

根据式(1)~(3), 利用压电式 FSM 的输出镜面偏转角度可以解算得到 k_v :

$$k_v = \frac{x(t_A) \Big|_{u < t_A > = u_2 < t_A >} - x(t_A) \Big|_{u < t_A > = u_1 < t_A >}}{u_b}, \quad (4)$$

式中: $x(t_A) \Big|_{u < t_A > = u_1 < t_A >}$ 和 $x(t_A) \Big|_{u < t_A > = u_2 < t_A >}$ 分别为 t_A 时刻输入驱动电压 $u_1(t_A)$ 和 $u_2(t_A)$ 时的输出镜面偏转角度曲线。

考虑迟滞曲线上端点处的情况, 此时 $h(t) = 0$, 根据式(1)和(2)有:

$$A = \frac{\dot{x}(t)}{\dot{u}(t)} - k_v. \quad (5)$$

根据式(5), 即可由迟滞曲线端点处所对应的输入驱动电压和压电式 FSM 的输出镜面偏转角度得到参数 A 。

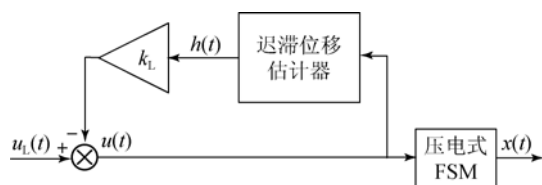


图 3 压电式 FSM 的前馈线性化控制原理图
Fig. 3 Principle of feedforward linearization for piezoelectric FSM

考虑输入驱动电压分别为 u_A 和 u_B 的情况满足 $\dot{u}(t)|_{u(t)=u_A} > 0$ 和 $\dot{u}(t)|_{u(t)=u_B} < 0$, 且均满足 $h(t) > 0$, 根据式(1)和(2)有:

$$(\beta + \gamma) [\dot{u}(t)h(t)]|_{u(t)=u_A} = [k_v \dot{u}(t) + A\dot{u}(t) - \dot{x}(t)]|_{u(t)=u_A}, \quad (6)$$

$$\beta = \frac{1}{2} \left[\frac{k_v \dot{u}(t) + A\dot{u}(t) - \dot{x}(t)}{\dot{u}(t)h(t)} \right]_{u(t)=u_A}$$

$$\gamma = \frac{1}{2} \left[\frac{k_v \dot{u}(t) + A\dot{u}(t) - \dot{x}(t)}{\dot{u}(t)h(t)} \right]_{u(t)=u_B}$$

根据式(8)和(9), 即可由 u_A 和 u_B 所对应的压电式 FSM 的输入驱动电压、输出镜面偏转角度和迟滞曲线上测得的迟滞分量辨识出参数 β 和 γ 。

由上述 3 种情况, 只需对压电式 FSM 依次输入 2 个相位相同的驱动电压信号 $u_1(t)$ 和 $u_2(t)$, 根据输入驱动电压信号和获得的输出镜面偏转角度曲线, 依次利用式(4)、(5)、(8)和(9)即可实现压电式 FSM 的 Bouc-Wen 数学模型全部参数的辨识。

4 压电式 FSM 的前馈线性化

利用式(1)和(2)所示的压电式 FSM 数学模型可预测输出镜面偏转角度的迟滞分量, 进而可通过前馈调整输入驱动电压使得输出镜面偏转角度与输入控制电压呈线性关系, 即:

$$x(t) = k_v u_L(t), \quad (10)$$

式中: $u_L(t)$ 为前馈线性化控制的输入控制电压。

压电式 FSM 的前馈线性化控制原理如图 3 所示。迟滞位移估计器根据式(2)设计, 可以由输入驱动电压 $u(t)$ 估计出压电式 FSM 输出镜面偏转角度的迟滞分量 $h(t)$, 将其乘以灵敏度系数 k_L 后反馈到输入端, 从输入控制电压 $u_L(t)$ 中减去反馈的电压作为输入驱动电压, 以消除输出镜面偏转角度 $x(t)$ 中的迟滞分量。根据式(1)和(10)可知:

$$k_L = 1/k_v. \quad (11)$$

利用图 3 所示的原理即可对压电式 FSM 的输出镜面偏转角度曲线进行前馈线性化, 无需外设传感器反馈迟滞信息, 解算过程中 $h(t)$ 和 $u(t)$ 的值可以由上一采样时刻的值代替。

$$(-\beta + \gamma) [\dot{u}(t)h(t)]|_{u(t)=u_B} = [k_v \dot{u}(t) + A\dot{u}(t) - \dot{x}(t)]|_{u(t)=u_B}, \quad (7)$$

式中: $|_{u(t)=u_A}$ 和 $|_{u(t)=u_B}$ 分别表示竖线左侧变量取输入驱动电压为 u_A 和 u_B 时对应的值。

根据式(6)和(7)可得:

$$-\frac{k_v \dot{u}(t) + A\dot{u}(t) - \dot{x}(t)}{\dot{u}(t)h(t)} \Big|_{u(t)=u_B} \Big], \quad (8)$$

$$+\frac{k_v \dot{u}(t) + A\dot{u}(t) - \dot{x}(t)}{\dot{u}(t)h(t)} \Big|_{u(t)=u_B} \Big]. \quad (9)$$

5 实验测试及结果

为了验证数学模型及前馈线性化方法的有效性, 对线性化前后压电式 FSM 的输出镜面偏转角度曲线进行了实验测试。

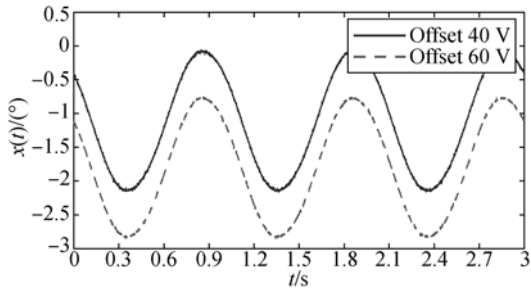
建立的压电式 FSM 及其线性控制器的快速原型系统和 Bouc-Wen 算子参数辨识实验装置如图 4 所示, 由实时仿真系统(dSPACE DS1103 和 MATLAB/Simulink)、压电陶瓷驱动器、压电式 FSM 和激光多普勒测振仪 (OFV-505/5000, Polytec) 等组成。实时仿真系统产生的控制信号, 经过压电陶瓷驱动器放大后驱动压电式 FSM 的反射镜面偏转, 激光多普勒测振仪测量压电式 FSM 反射镜面上特定点沿垂直方向的位移, 转换为电压信号采集到实时仿真系统中, 解算出镜面偏转角度。



图 4 压电式 FSM 及其线性化控制器的快速原型系统和 Bouc-Wen 算子参数辨识实验装置实物图

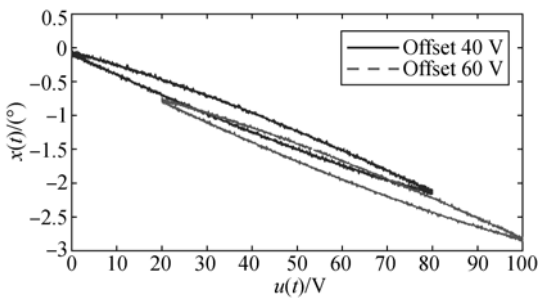
Fig. 4 Photograph of rapid prototyping system of piezoelectric FSM with linearization controller and experimental set for parameter identification of Bouc-Wen hysteresis operator

在频率 1 Hz、幅值 40 V，偏移分别为 40 和 60 V 的正弦输入驱动电压作用下，测得压电式 FSM 输出镜面偏转角度曲线及其与输入驱动电压的迟滞曲线分别如图 5(a)、5(b) 所示。由图 5(b) 可知，压电式 FSM 的输出镜面偏转角度与输入驱动电压之间表现出明显的迟滞特性，其线性度为 8.5%，迟滞误差为 ±8.9%。



(a) 输出镜面偏转角度曲线

(a) Time histories of output excursion angles



(b) 输入驱动电压-输出镜面偏转角度关系曲线

(b) Relationship between output excursion angles and input driven voltages

图 5 线性化前压电式 FSM 的测试结果

Fig. 5 Test results of piezoelectric FSM without linearization

根据图 5 中的测量曲线和建立的参数辨识方法，利用式(4)、(5)、(8)和(9)解算出压电式 FSM 的数学模型中 Bouc-Wen 算子各参数值，如表 1 所示。根据表 1 和图 3 在 MATLAB/Simulink 中建立压电式 FSM 的前馈线性化控制器，如图 6 所示。由信号发生器模块产生正弦或三角波输入控制电压 $u_i(t)$ ，从 $u_i(t)$ 中减去通过迟滞位移估计器 $h(t)$ 模块后的反馈电压作为输入驱动电压，通过 dSPACE 实时仿真系统的 DAC5 端口输出，并经过压电陶瓷驱动器作用到 PCSA 上。当开

关 K_2 向下闭合时，为没有使用前馈线性化控制的状态，此时输入驱动电压等于输入控制电压。Switch 为 FSM 的延时停止模块，用于保证断电时作用的输入控制电压低于 10 V。此外，由 ADC14 端口读取激光多普勒测振仪测得的位移结果，转化为镜面偏转角度并输出到 Scope $x(t)$ 显示模块。将模型下载后运行，并通过 ControlDesk 软件进行开关设置和测量结果的显示和记录。

表 1 压电式 FSM 的数学模型中 Bouc-Wen 算子的参数值

Tab. 1 Parameters of model of piezoelectric FSM

Parameter	Value
k_v	$5.092 \times 10^{-6} \text{ V/m}$
A	-4.9863×10^{-6}
β	0.1889
γ	-0.0131

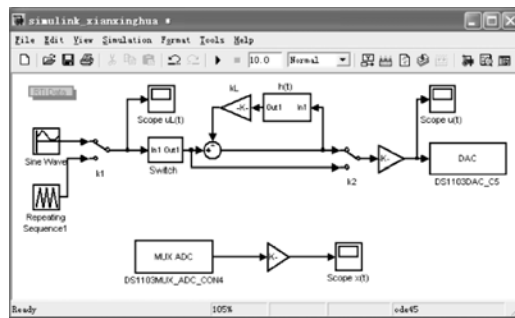


图 6 压电式 FSM 的前馈线性化控制器框图程序

Fig. 6 Block diagram of feedforward linearization controller of piezoelectric FSM

当输入为频率 1 Hz、幅值和偏移均为 50 V 的正弦信号时，前馈线性化控制前后压电式 FSM 输出镜面偏转角度曲线和输入控制电压的迟滞曲线如图 7 所示。前馈线性化控制前迟滞曲线的线性度为 9.3%，迟滞误差为 ±8.1%；前馈线性化控制后关系曲线中迟滞环明显减小，其线性度为 2.3%，迟滞误差为 ±0.5%。表明建立的压电式 FSM 的 Bouc-Wen 数学模型能够对压电式 FSM 镜面偏转角度的迟滞特性进行估计；迟滞误差是引起压电式 FSM 输出非线性的主要原因；通过前馈线性化控制能够有效减小迟滞误差和非线性误差。

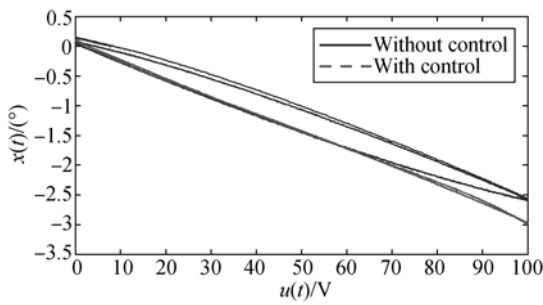
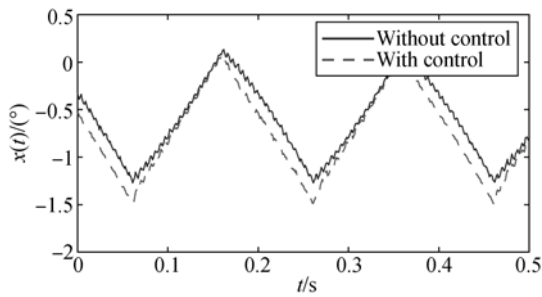


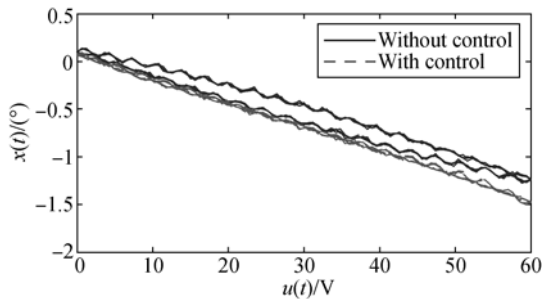
图 7 正弦输入控制驱动电压作用下压电式 FSM 的输入控制电压-输出镜面偏转角度关系曲线

Fig. 7 Relationship between output excursion angles and input control voltages of piezoelectric FSM with sinusoid wave input control voltages



(a) 输出镜面偏转角度曲线

(a) Time histories of output excursion angles



(b) 输入控制电压-输出镜面偏转角度关系曲线

(b) Relationship between output excursion angles and input control voltages

图 8 三角波输入控制电压作用下压电式 FSM 的测试结果

Fig. 8 Test results of piezoelectric FSM with triangular wave input control voltages

当输入频率为 5 Hz、幅值为 60 V 的三角波信号时,前馈线性化控制前后压电式 FSM 输出镜面偏转角度及其与输入控制电压的关系曲线分别如图 8(a) 和 8(b) 所示。根据图 8(a),由于线性度得到了提高,线性化控制后输出偏转角度的三角波信号的对称性有了明显的提高,但依然存在小的波动,主要是输入三角波控制信号中所包含的高频成分引起了压电式 FSM 的谐振,频率约为 180 Hz,与实测的压电式 FSM 的固有频率结果一致。在实际使用时,可以对输入控制信号进行处理以消除高频信号产生的波动。根据图 8(b),线性化后压电式 FSM 的输出镜面偏转角度与输入控制电压的关系曲线中迟滞环明显减小,其线性度为 5.4%,迟滞误差为 $\pm 1.2\%$ 。相比图 7,其线性度和迟滞误差均较大,主要是受到三角波控制信号中的高频成分所引起的波动影响。

6 结 论

本文针对压电式 FSM 的迟滞问题,建立了压电式 FSM 的数学模型及其参数辨识方法。在此基础上,提出压电式 FSM 的前馈线性化方法。通过实验测试对建立的数学模型和线性化方法的原理进行验证。测试结果表明,参数辨识方法和前馈线性化方法能够明显改善压电式 FSM 的输出镜面偏转角度与输入控制电压的关系曲线中迟滞特性,线性度从 9.3% 减小到 2.3%,迟滞误差由 $\pm 8.1\%$ 减小到 $\pm 0.5\%$ 。

将压电式 FSM 视作线性控制对象,并利用线性控制方法进行反馈控制,能够进一步提高压电式 FSM 的角位移执行精度,为实现高精度的光学跟踪和执行系统奠定基础。

控制信号中的高频成分对迟滞误差会产生一定影响。压电式 FSM 的工作频率范围较宽时,其偏转角度的迟滞特性值得进一步深入研究。在实际工程应用中,可以考虑通过对控制信号进行处理以减少高频抖动。

参考文献:

[1] 王恒坤, 张国玉, 郭立红, 等. 高精度动载体激光发射系统光束控制反射镜[J]. 光学精密工程, 2012, 20(12): 336-341.
WANG H K, ZHANG G Y, GUO L H, et al.. High

performance fast-steering mirror for beam control of vehicular high energy laser system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(12): 336-341. (in Chinese)
[2] 洪华杰, 王学武, 翁千飞. 光电侦察装备中的反射镜稳定技术[J]. 应用光学, 2011, 32(4): 591-597.
HONG H J, WANG X W, WENG G F. Mirror stabilization in electro-optical reconnaissance system

- [J]. *Journal of Applied Optics*, 2011, 32(4): 591-597. (in Chinese)
- [3] 向思桦, 陈四海, 吴鑫, 等. 基于新型压电驱动器的快速扫描反射镜[J]. *中国激光*, 2009, 36(6): 208-212.
XIANG S H, CHEN S H, WU X, *et al.*. Research on novel piezoelectric fast steering mirror [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(6): 208-212. (in Chinese)
- [4] PARK J H, LEE H S, LEE J H, *et al.*. Design of a piezoelectric-driven tilt mirror for a fast laser scanner [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2012, 51(9): 1-5.
- [5] 元波, 陈洪斌, 任戈, 等. 100 km 量子纠缠分发实验捕获跟踪技术[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(6): 1628-1634
QI B, CHEN H B, REN G, *et al.*. ATP technology for 100-kilometer quantum entanglement distribution experiment [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(6): 1628-1634. (in Chinese)
- [6] TANG T. Acceleration feedback of a CCD-based tracking loop for fast steering mirror [J]. *Optical Engineering*, 2009, 48(1): 1-6
- [7] 刘泊, 郭建英, 孙永全. 压电陶瓷微位移驱动器建模与控制[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(6): 1503-1509
LIU B, GUO J Y, SUN Y Q. Modeling and control for PZT micro-displacement actuator [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(6): 1503-1509. (in Chinese)
- [8] LIU W J, LIAO W J; JIA K M, *et al.*. Hysteresis property of tip-tilt-piston micromirror based on tilt-and-lateral shift-free piezoelectric unimorph actuator [J]. *Integrated Ferroelectrics*, 2014, 150(1): 14-22.
- [9] KIM B S, GIBSON S, TSAO T C. Adaptive control of a tilt mirror for laser beam steering [C]. *American Control Conference*, 2004, (4): 3417-3421.
- [10] 陈远晟, 裘进浩, 季宏丽, 等. 基于双曲函数的 Preisach 类迟滞非线性建模与逆控制[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(5): 1205-1212
CHEN Y SH, QIU J H, JI H L, *et al.*. Modeling and inverse control of Preisach type hysteresis nonlinearity using hyperbola functions [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(5): 1205-1212. (in Chinese)
- [11] 王钰锋, 郭咏新, 毛剑琴. 压电作动器的率相关迟滞建模与跟踪控制[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(3): 616-625
WANG Y F, GUO Y X, MAO J Q. Rate-dependent modeling and tracking control of piezoelectric actuators [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(3): 616-625. (in Chinese)
- [12] 魏强, 张承进, 张栋, 等. 压电陶瓷驱动器的滑模神经网络控制[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(5): 1055-1063
WEI Q, ZHANG CH J, ZHANG D, *et al.*. Neural network control for piezo-actuator using sliding-mode technique [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(5): 1055-1063. (in Chinese)
- [13] 王代华, 朱炜. WTYD 型压电陶瓷微位移器的迟滞特性建模与实验验证[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(1): 205-211.
WANG D H, ZHU W. Hysteretic modeling and experimental verification for WTYD type piezoceramic micro-actuators [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(1): 205-211. (in Chinese)
- [14] WANG D H, ZHU W, YANG Q. Linearization of stack piezoelectric ceramic actuators based on bouc-wen model [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2011, 22(5): 401-413.

作者简介:



袁刚(1982—),男,湖北麻城人,博士,讲师,2003年、2006年、2010年于重庆大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事智能结构与系统、传感器技术和振动能量收集等方面的研究。
E-mail: cqyuan@cqu.edu.cn



张小波(1990—),女,四川崇州人,2013年于合肥工业大学获得学士学位,主要从事压电执行器与系统的研究。
E-mail: 20130802050@cqu.edu.cn