

## 大口径压电快摆镜机构迟滞非线性补偿与控制

张 泉<sup>1,2,3</sup>, 尹达一<sup>1,2,3</sup>, 魏传新<sup>1,3</sup>

(1. 中国科学院红外探测与成像技术重点实验室, 上海 200083;  
2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

**摘要:** 为了提高空间天文望远镜精密稳像系统中大口径压电快摆镜机构 (Fast Steering Mirror, FSM) 的控制精度, 采用迟滞前馈补偿和最优 PID 控制算法相结合的复合控制策略。针对基于广义 Play 算子的 Prandtl-Ishlinskii (PI) 模型可逆性受约束条件限制以及求逆过程中模型参数估计误差累加的问题, 提出了一种基于广义 Stop 算子的 PI 逆模型进行压电执行器 (Piezoelectric Actuator, PZT) 迟滞补偿。针对逆迟滞模型的不确定性和直接前馈控制抗干扰能力差的问题, 在控制系统中加入最优 PID 闭环控制器。采用自适应差分进化算法 (Adaptive Differential Evolution, ADE) 对迟滞逆模型参数和 PID 控制器参数进行寻优并引入混沌搜索机制来提高 ADE 算法的性能。实验结果表明: 与传统 PI 模型解析求逆方法相比, 基于广义 Stop 算子的 PI 逆模型能够更好描述逆迟滞曲线, 拟合频率为 1 Hz 的迟滞曲线, 拟合精度提高 78.04%; 实时跟踪频率分别为 1、10、20 Hz 的大口径快摆机构目标摆动位移, 复合控制策略的跟踪精度相比于直接前馈控制分别提高了 38.56%、22.92% 和 13.5%。  
**关键词:** 大口径压电快摆镜; 迟滞补偿; 广义 Stop 算子; 自适应差分进化算法; 混沌搜索; 复合控制

中图分类号: TN209 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201948.0218004

## Hysteresis nonlinear compensation and control for large-aperture piezoelectric fast steering mirror

Zhang Quan<sup>1,2,3</sup>, Yin Dayi<sup>1,2,3</sup>, Wei Chuanxin<sup>1,3</sup>

(1. Key Laboratory of Infrared System Detection and Imaging Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;  
3. Shanghai Institute of Technical Physics of the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

**Abstract:** In order to improve the control accuracy of large-aperture piezoelectric fast steering mirror (FSM) in precision image stabilization system in space telescope, the compound control strategy combining hysteresis feed forward compensation with the optimal PID control algorithm was adopted. According to the problems that the reversibility of Prandtl-Ishlinskii (PI) model based on Play operator was limited by the constraint condition and the estimation error accumulation of model parameters in the inverse process, the PI inverse model based on the generalized Stop operator was proposed to compensate the PZT hysteresis. The optimal PID closed loop controller was added in the control system for the

收稿日期: 2018-09-10; 修订日期: 2018-10-20

基金项目: 国家自然科学基金(40776100)

作者简介: 张泉(1992-), 男, 博士生, 主要从事大口径快摆镜执行机构驱动与精密检测技术方面的研究。Email: zh\_quan4444@126.com

导师简介: 尹达一(1976-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事空间光电遥感技术方面的研究。Email: yindayi@mail.sitp.ac.cn

problems of the inverse hysteresis model uncertainty and the poor anti-interference ability of direct feed forward control. The adaptive differential evolution (ADE) was used to optimize the hysteresis inverse model and PID controller parameters and the chaos search mechanism was introduced to improve the performance of ADE. The experimental results show that, compared with the traditional analytic method to obtain the inverse model, the hysteresis inverse model based on the Stop operator can better describe the inverse hysteresis curve, and the fitting precision increases by 78.04% when fitting the hysteresis curve with 1 Hz frequency; the tracking accuracy of compound control algorithm increases by 38.56%, 22.92% and 13.5% respectively compared with the direct feedforward control, in the real-time tracking for target swinging displacements of large-aperture piezoelectric fast steering mirror with 1 Hz, 10 Hz and 20 Hz frequencies.

**Key words:** large-aperture piezoelectric FSM; hysteresis compensation; generalized Stop operator; adaptive differential evolution; chaotic search mechanism; compound control

## 0 引言

大口径二维快摆镜机构(Large-aperture FSM, LAFSM)是空间天文望远镜精密稳像系统的关键组成部分,望远镜精密稳像系统利用精细导星仪(Fine Guidance Sensor, FGS)检测并反馈视轴偏移量进行精密光闭环控制,可有效抑制指向跟踪系统残余的视轴误差,实现高精度稳像<sup>[1]</sup>。压电执行器(Piezoelectric Actuator, PZT)具有谐振频率高、位移分辨率大的优点,是大口径快摆镜常用作动器。然而,PZT自身的迟滞非线性会对快摆镜机构的摆动精度造成不利影响从而降低稳像系统性能<sup>[2]</sup>,因此,需要对大口径压电快摆镜的迟滞非线性补偿和控制进行探究。

近年来,国内外学者对压电迟滞补偿和闭环控制算法进行了很多相关研究。目前学界普遍采用建立前馈补偿器的方法进行压电迟滞补偿,PI(Prandtl-Ishlinskii)模型是在Preisach模型基础上发展起来的迟滞模型,因其具有实现简单和逆模型易于求解等优点<sup>[3]</sup>,获得了越来越多的关注。胡亮亮<sup>[4]</sup>利用PI正逆模型之间对应的参数关系建立迟滞逆模型实现压电迟滞补偿,但是其采用的经典PI模型没有反映出迟滞曲线的非对称性质,而且采用最小二乘法辨识参数容易发散且辨识精度不高。田艳兵<sup>[5]</sup>建立了广义PI模型并对求解逆模型的方法进行了说

明,广义PI模型虽能够较好地描述迟滞曲线的非对称性,但是解析求逆过程复杂,而且没有考虑约束条件对模型可逆性的影响。

Young-Rae Ko<sup>[6]</sup>对广义PI模型可逆性的约束条件进行分析,讨论了约束条件及解析求逆对模型精度的不利影响,提出了直接辨识逆模型参数的思想,避免了复杂的求逆过程及对约束条件的制约。受参考文献[6]的启发,文中提出一种基于广义Stop算子的PI迟滞逆模型进行压电迟滞补偿,采用自适应差分进化算法(Adaptive Differential Evolution, ADE)对模型参数进行辨识,引入混沌搜索机制提高ADE算法摆脱局部最优的能力和收敛速度,设计了一种迟滞前馈补偿和最优PID控制算法相结合的复合控制方案,并用CADE算法整定PID控制器参数,通过所搭建的系统验证了算法的可行性。

## 1 大口径压电快摆镜机构及其复合控制

### 1.1 大口径压电快摆镜机构

文中的大口径二维快摆镜机构由快摆镜镜体、压电执行器,柔性支撑微位移机构组成,镜体口径为330 mm×340 mm,质量为2 020 g<sup>[7]</sup>。快摆镜机构采用四点驱动模式来实现二维摆动,通过PZT\_A和PZT\_C的伸缩实现X轴的摆动,通过PZT\_B和PZT\_D的伸缩实现Y轴的摆动,如图1所示。

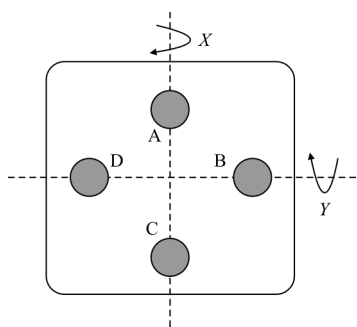


图 1 大口径快摆机构驱动结构

Fig.1 Driving structure of LAFSM

大口径快摆镜机构使用柔性变形零件来解决运动部件之间微小量级的相对移动问题。柔性支撑微位移放大机构将 PZT 的作动力转化为菱形结构的形变实现大口径快摆镜的驱动。如图 2 所示,菱形结构 y 方向上的形变大于 x 方向上的形变,因此,y 方向上的输出位移大于压电执行器的输出位移,从而实现了位移的放大<sup>[8]</sup>。

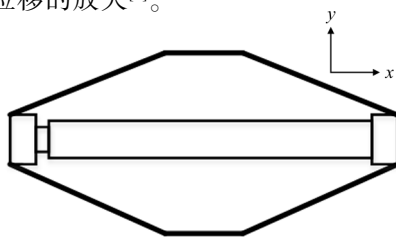


图 2 柔性支撑微位移放大机构结构

Fig.2 Structure of resilient mounting micro displacement amplification mechanism

PZT 的具体参数如表 1 所示。

表 1 PZT 参数

Tab.1 Parameters of PZT

Parameter	Distance 0-100 V/ $\mu\text{m}$	Displacement resolution/nm	Resonant frequency/kHz
	60	0.6	7.5

### 1.2 复合控制算法实现

基于逆模型的迟滞补偿是消除压电陶瓷迟滞非线性的常用方法,文中利用基于广义 Stop 算子的 PI 逆模型来对目标位移反解获得 PZT 驱动电压,从而实现目标输出与实际输出的线性化。

为了进一步提高压电大口径快摆机构控制的线性度,采用前馈补偿与 PID 控制结合的复合控制策略,借助混沌自适应差分进化算法(CADE)整定 PID 控制器参数,复合控制的总体框图如图 3 所示,具体

算法将在下文做详细介绍。

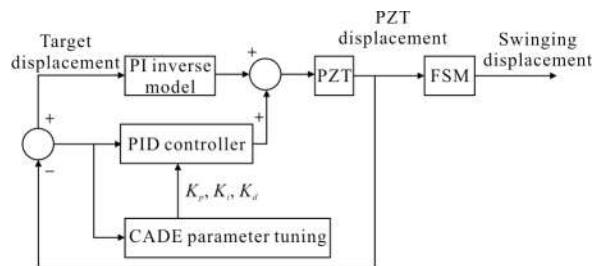


图 3 复合控制原理图

Fig.3 Schematic diagram of compound control

## 2 改进的广义 PI 逆模型及参数辨识

### 2.1 基于广义 Play 算子的 PI 模型及其逆模型

迟滞特性是压电陶瓷本身物理性质导致的反映在输入输出之间的非线性关系,PI 模型从数学角度描述了压电迟滞现象,原理和结构简单,可由一定数量的 Play 算子按权重累加求得<sup>[9]</sup>。参考文献[4]采用的 Play 算子为线性算子,可以很好地拟合出对称的迟滞环,但是对非对称性的迟滞曲线拟合效果就差,而文中采用的 PZT 的迟滞特性为非对称。所以需要基本 Play 算子进行改进,采用广义 Play 算子,如公式(1)所示。

$$Fr(0)=\max\{f_i(v(0))-r, \min\{f_r(v(0))+r, Fr(0)\}\}$$

$$Fr(k)=\max\{f_i(v(k))-r, \min\{f_r(v(k))+r, Fr(k-T)\}\}$$

$$f_i(v(k))=a_1 v(k)+b_1$$

$$f_r(v(k))=a_2 v(k)+b_2 \quad (1)$$

式中: $f_i(v(k))$ 为上升曲线驱动电压; $f_r(v(k))$ 为下降曲线驱动电压; $a_1, a_2, b_1, b_2$ 都大于 0。基本 Play 算子为广义 Play 算子的特殊情况,即  $f_i(v(k))=v(k), f_r(v(k))=v(k)$ 。

将公式(1)的 Play 算子按一定的权重关系叠加可得出广义 PI 模型,如公式(2)所示。

$$y(k)=q*f(k)+\sum_{i=1}^N p_i Fr(k)$$

$$f(k)=\begin{cases} f_i(v(k)) & \dot{v}(k) \geq 0 \\ f_r(v(k)) & \dot{v}(k) < 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$p_i = \rho e^{-\tau r}$$

$$r_i = ci$$

式中: $f(k)$ 为初载曲线; $q$ 为初载曲线权重; $p_i$ 为算子权重; $N$ 为算子数量; $\tau, \rho, c$ 均为大于零的常数。

如果 PI 模型中  $v_i(\cdot), v_r(\cdot)$  以及  $p_i$  满足公式(3)

的约束条件, 则广义 PI 逆模型可以通过解析法求得, 如公式(4)所示。

$$v_i(\cdot)-p_i \leq v_r(\cdot)+p_i \quad \forall i \quad (3)$$

$$y^{-1}(k)=f^{-1}\left(q'v((k))+\sum_{i=1}^N p_i'Fr'(k)\right)$$

$$f^{-1}(v(k))=\begin{cases} f_i^{-1}(v(k)) \dot{v}(k) \geq 0 \\ f_r^{-1}(v(k)) \dot{v}(k) < 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $q'$ ,  $p_i'$  以及  $r'$  可以根据广义 PI 模型辨识的参数按照正逆模型对应的参数关系求出, 如公式(5)~(7)所示。

$$q'=\frac{1}{q} \quad (5)$$

$$r_i'=qr_i+\sum_{j=1}^{i-1} p_j(r_i-r_j) \quad (6)$$

$$p_i'=\frac{p_i}{\left(q+\sum_{j=1}^i p_j\right)\left(q+\sum_{j=1}^{i-1} p_j\right)} \quad (7)$$

广义 PI 模型拟合可以视为有约束的多元非线性函数的最优化问题, 约束条件的存在增加了模型拟合的难度。从公式(5)~(7)可以看出, 解析法求逆模型参数过程复杂, 而且正模型参数拟合的误差在逆模型参数求解过程中会发生累加, 从而影响逆模型的准确度。

### 2.2 基于广义 Stop 算子的 PI 逆模型

Stop 算子的轨迹与 Play 算子相反, 两者是互补关系, 相加即为输入信号, 如公式(8)所示。

$$u(k)=Fr(k)+Er(k) \quad (8)$$

式中:  $u(k)$  为驱动电压;  $Fr(k)$  为 Play 算子;  $Er(k)$  为 Stop 算子。Stop 算子的离散数学表达式为:

$$Er(0)=\min\{r_i, \max\{-r_i, u(k)+Er(0)\}\}$$

$$Er(k)=\min\{r_i, \max\{-r, u(k)-u(k-1)+Er(k-T)\}\} \quad (9)$$

式中:  $u(k)$  为输出位移;  $Er(k)$  为算子值;  $r_i$  为算子阈值;  $Er(0)$  为算子初值。因为 PZT 的驱动电压为正, 所以文中采用单边 Stop 算子, 如公式(10)所示。

$$Er(0)=\min\{r_i, \max\{0, u(k)+Er(0)\}\}$$

$$Er(k)=\min\{r_i, \max\{0, u(k)-u(k-1)+Er(k-T)\}\} \quad (10)$$

公式(10)的 Stop 算子为对称算子, 不能很好地描述非对称性迟滞曲线, 文中将广义 Play 算子的改进思想应用到 Stop 算子中, 得到广义 Stop 算子, 如公式(11)所示。

$$Er(k)=\min\{r_i, \max\{0, f(k)-f(k-1)+Er(k-T)\}\}$$

$$f(k)=\begin{cases} f_i(u(k)) \dot{u}(k) \geq 0 \\ f_r(u(k)) \dot{u}(k) < 0 \end{cases} \quad (11)$$

$$f_i(u(k))=a_1 u(k)+b_1$$

$$f_r(u(k))=a_2 u(k)+b_2$$

式中:  $f_i(u(k))$  为上升曲线输入电压;  $f_r(u(k))$  为下降曲线输入电压,  $a_1, a_2, b_1, b_2$  都大于 0。

将公式(11)的广义 Stop 算子按一定的权重关系叠加可得出广义 PI 逆模型, 如公式(12)所示。

$$u(k)=q*y(k)+\sum_{i=1}^N p_i Er(k)$$

$$p_i=\rho e^{-\tau i} \quad (12)$$

$$r_i=ci$$

式中:  $q$  为初载曲线权重;  $p_i$  为算子权重;  $N$  为算子数量;  $\tau, \rho, c$  均为大于零的常数。只要辨识出  $q, \tau, \rho, c, a_1, a_2, b_1, b_2$  参数值就可以直接建立逆模型补偿电压迟滞非线性, 避免了复杂的求逆过程以及摆脱了约束条件的限制, 而且建立的模型可以很好地描述 PZT 迟滞非对称的特性。

### 2.3 自适应差分进化算法

差分进化算法(Differential Evolution, DE)是一种简单高效的全局寻优算法, 具有收敛快速和鲁棒性强的特点。自适应差分进化算法利用差分变异、杂交和选择等方法使群体不断进化, 直至寻到最优值, 在差分变异阶段采用自适应缩放因子, 算法的流程如图 4 所示。

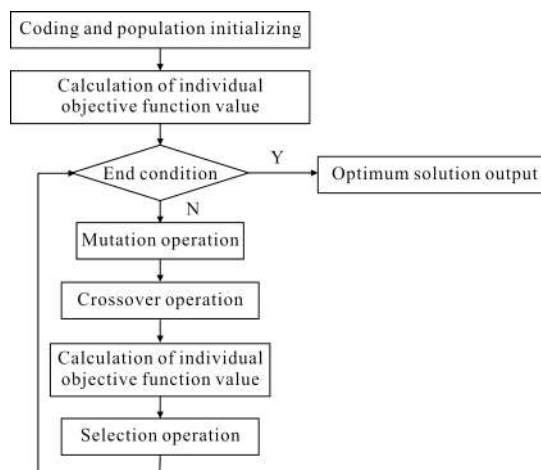


图 4 差分进化算法流程图

Fig.4 Flow chart of DE algorithm

自适应差分进化算法具体步骤为:

(1) 编码与初始化群体。假设模型的辨识参数有  $D$  个, 则群体中第  $i$  个个体  $X_i$  如公式(13)所示。

$$X_i = \{x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(D)\} \quad (13)$$

式中:  $x_i(j)$  为在  $[l_j, u_j]$  的随机均匀初始化实数,  $i=1, \dots, NP, j=1, \dots, D, l_j$  和  $u_j$  分别为参数范围上界和下界。  $NP$  为种群数, 根据参考文献[10],  $NP$  取值为自变量维数的 5~10 倍。

(2) 差分变异操作。将两个随机个体进行向量差缩放, 再与待变异个体向量合成, 如公式(14)所示。

$$V_i = X_{r_1} + F * (X_{r_2} - X_{r_3}) \quad (14)$$

式中:  $r_1 \neq r_2 \neq r_3, F$  为缩放因子。公式(14)中的  $X_{r_1}$  可以取参数范围内的随机数 (DE/Rand/1 策略), 也可以取上一次迭代的最优值 (DE/best/1 策略), 后文将对二者进行比较, 选择最优策略。为了避免算法早熟, 采用自适应的缩放因子, 如公式(15)所示。

$$\lambda = e^{\frac{1 - \max DT}{\max DT + 1 - DT}}$$

$$F = F_0 * 2^\lambda \quad (15)$$

算法开始时, 缩放因子在  $F_0$  和  $2F_0$  之间, 相对较大, 这样可以保持个体多样性, 避免局部收敛。随着迭代次数增加, 缩放因子逐渐变小从而保留优良信息, 增加了搜索到全局最优解的概率, 文中模型辨识缩放因子初值设置为  $F_0 = 0.5$ 。在迭代过程中, 为了保证所生成的变异向量每一维均满足边界约束条件  $[l_j, u_j]$ , 对于违约自变量在边界范围内用随机法重新生成。

(3) 杂交操作。DE 算法的杂交算子主要包括二项式杂交算子(binomial crossover)和指数杂交算子(exponential crossover), 二项式杂交所得的子个体自变量每维都可离散地来自变异向量或目标向量, 而指数杂交所得子个体的自变量只能继承变异向量或目标向量的自变量, 文中参数辨识采用公式(16)所示的二项式杂交算子, 如:

$$U_i(j) = \begin{cases} V_i(j) & \text{if } \text{rand}[0, 1] < CR \text{ of } j = j_{\text{rand}} \\ X_i(j) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (16)$$

式中:  $j=1, \dots, D, j_{\text{rand}}$  为  $[1, D]$  之间随机整数, 使向量  $U_i$  至少有一维来自变异算子,  $CR$  的取值与具体问题有关, 文中取 0.9。

(4) 选择操作。DE 采用贪婪算法, 将子个体与父个体进行比较, 较优者进入下一代种群中, 如公式(17)所示。

$$X_i = \begin{cases} U_i & \text{if } f(U_i) \leq f(X_i) \\ X_i & \text{otherwise} \end{cases} \quad (17)$$

式中:  $f(X_i)$  为个体  $X_i$  的目标函数值。

### 2.4 混沌自适应差分进化算法

混沌思想结合了质性思考与量化分析, 且具有很强的全局搜索特性, 因此引入混沌搜索机制来提高 ADE 算法摆脱局部最优的能力和收敛速度, 具体步骤如下:

(1) 当 ADE 早熟时, 启动混沌搜索机制寻全局最优解, 从而提高收敛速度。将种群所有个体的目标函数值方差作为反映群体状态的变量来判断是否局部最优, 设置阈值  $C$ , 如果方差小于  $C$ , 则开始混沌搜索<sup>[11]</sup>。

(2) 采用 Logistic 混沌<sup>[12]</sup>映射方程产生混沌序列, 如公式(18)所示。

$$Y_n = 4X_n(1 - X_n) \quad (18)$$

式中:  $n$  为迭代次数;  $X_n$  为局部最优解;  $Y_n$  为混沌序列。

(3) 通过公式(19)将生成的混沌序列以载波的方式线性变换到  $(-r, r)$  优化变量取值区间上, 并用搜索到的最优解替换 ADE 的最优解。

$$Y_{\text{best}} = X_{\text{best}} + R_0 * (2Y_n - r) \quad (19)$$

式中:  $X_{\text{best}}$  为 ADE 算法的局部最优解;  $Y_n$  为混沌序列;  $Y_{\text{best}}$  为混沌搜索最优解, 文中  $r$  设为 1,  $R_0$  为初始搜索半径。

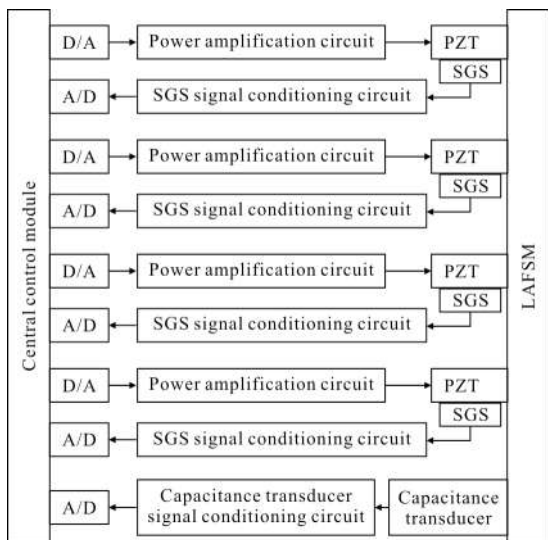
## 3 实验结果分析

### 3.1 实验系统搭建

实验系统由 SGS 微位移传感器、SGS 信号调理电路、主控模块、功率放大电路、大口径压电快摆镜、电容传感器和电容传感器信号调理电路等部分组成。

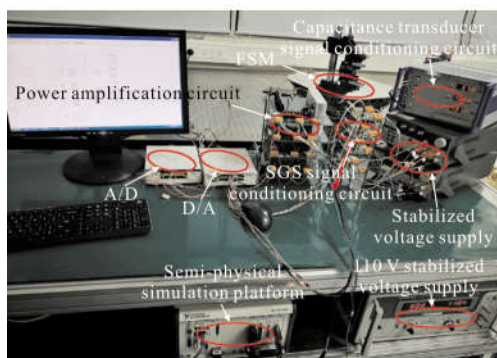
在该系统中, 主控模块采用半实物实时仿真平台, 将四点目标位移分别经过各自前馈补偿器反解得到驱动电压, 再经过功率放大电路驱动四点 PZT 实现快摆机构的二维摆动, SGS 微位移传感器集成

在 PZT 内部,SGS 信号调理电路将 PZT 实际位移反馈给主控模块,从而组成闭环系统,电容传感器实时检测快摆镜机构的摆动位移,系统采样率为 10 Hz,搭建的实验系统如图 5 所示。



(a) 实验系统结构框图

(a) Structure block diagram of experimental system



(b) 实际实验系统搭建

(b) Building of actual experiment system

图 5 实验系统

Fig.5 Experimental system

### 3.2 算法比较分析

该节以图 1 中的压电陶瓷 PZT\_A 为例,采集在频率为 1 Hz,幅值为 0~20 V 的驱动电压下的输入输出数据分析比较不同算法的优劣。

采用 CADE 算法辨识基于广义 Stop 算子的 PI 逆模型参数  $a_1, a_2, b_1, b_2, \tau, \rho, c$  算子数设为 50,并与 ADE 算法和粒子群算法 (PSO) 的拟合结果进行比较。寻优算法的核心问题是选取目标函数<sup>[13]</sup>:

$$F = \sqrt{\frac{\sum (V_i - V_i^{PI\_INVERSE})^2}{N}} \quad (20)$$

式中:  $F$  为模型驱动电压与实际驱动电压的均方根误差;  $N$  为数据样本数。

设 CADE 的迭代次数为 400,种群数  $NP=100$ ,交叉概率  $CR=0.9$ ,缩放因子初值  $F_0=0.5$ ,混沌搜索初始半径  $R_0=5$ ,局部最优阈值  $C=0.05$ ,混沌搜索次数  $M$  设为 150。各算法收敛曲线对比图如图 6 所示。

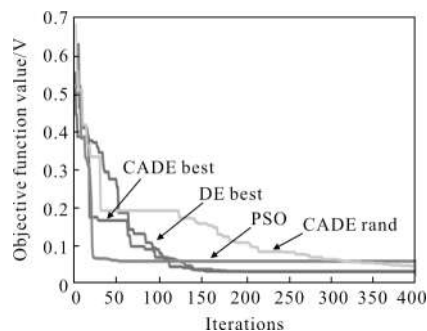


图 6 各算法收敛曲线

Fig.6 Convergence curve of algorithms

由于差分策略 DE/best/1 相比于 DE/rand/1 的收敛速度更快,拟合精度更高,因而文中选择 DE/best/1 策略。CADE, ADE 以及 PSO 都可以辨识出 PI 迟滞逆模型参数,但是 CADE 算法的收敛速度比 ADE 算法更高,并在第 20 次迭代后开始收敛。PSO 虽然收敛很快,但是容易陷入局部最优。因此 CADE 算法在 PI 逆模型参数拟合上具有优越性。实验结果为:拟合模型的驱动电压和实际驱动电压的均方根误差 0.031 6 V,相对误差 0.158%,拟合的模型参数如表 2 所示。

表 2 基于广义 Stop 算子的 PI 逆模型参数

Tab.2 PI inverse model parameters based on generalized Stop operator

Parameter	Value	Parameter	Value
$a_1$	0.556 2	$\tau$	0.295 0
$b_1$	9.418 6e-15	$\rho$	0.159 6
$a_2$	0.575 5	$c$	0.340 5
$b_2$	4.084 3	$q$	1.291 8

拟合基于 Play 算子的 PI 模型参数,然后按照公式(5)~(7)求解 PI 逆模参数,逆模型驱动电压和实际

驱动电压的均方根误差为 0.143 9 V，相对误差为 0.719 5%，不论是复杂程度还是模型精度方面明显比文中提出的基于广义 Stop 算子的 PI 逆模型要差。两种方法的拟合曲线如图 7 所示。

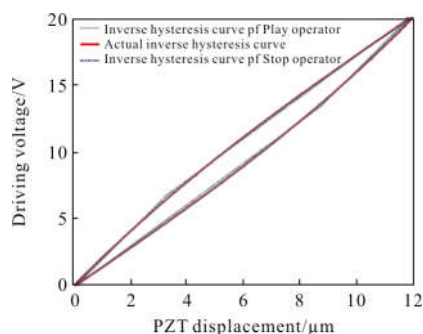


图 7 拟合逆迟滞曲线与实际逆迟滞曲线

Fig.7 Fitting inverse hysteresis curve and actual inverse hysteresis curve

利用表 2 拟合的逆模型参数直接作为前馈补偿器,再用 CADE 对 PID 控制器参数进行整定,得到控制器参数  $K_p, K_d, K_i$  分别为 0.402 4、0.000 2、1.121,然后在实验系统上跟踪 1 Hz 正弦微位移信号。测量结果为:直接前馈控制跟踪均方根误差 0.1 264  $\mu\text{m}$ ,相对误差 1.05%,复合控制策略跟踪均方根误差 0.074  $\mu\text{m}$ ,相对误差 0.6%,实时跟踪和误差曲线如图 8 所示。

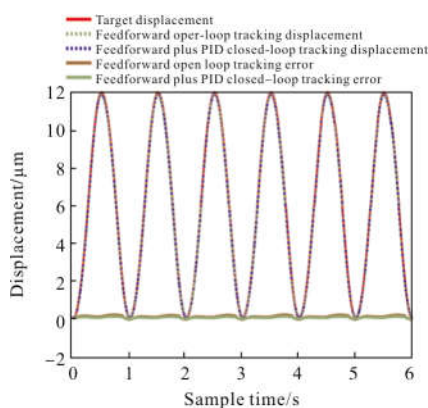


图 8 频率 1 Hz, PZT 目标位移开闭环跟踪和误差曲线

Fig.8 Closed and open loop tracking and error curve of PZT target displacement with 1 Hz frequency

将 PZT\_A 的复合控制器设计方法应用到 PZT\_B、PZT\_C 和 PZT\_D 上,实时跟踪大口径压电陶瓷快摆镜的目标摆动位移。测量结果为:跟踪均方根误差 0.100 1  $\mu\text{m}$ ,相对误差 1.08%。跟踪和误差曲线

如图 9(a)所示。

为了验证文中复合控制策略在不同频率下的有效性,分别对 10 Hz 和 20 Hz 频率的快摆机构的目标摆动位移进行实时跟踪。跟踪和误差曲线如图 9(b)、(c)所示,跟踪均方根误差和相对误差如表 3 所示。

从表 3 和图 9 可以看出,直接前馈控制和复合控制策略都可以有效跟踪大口径压电快摆镜目标摆动位移,但是复合控制策略跟踪精度更高,实测结果验证了控制算法的有效性。

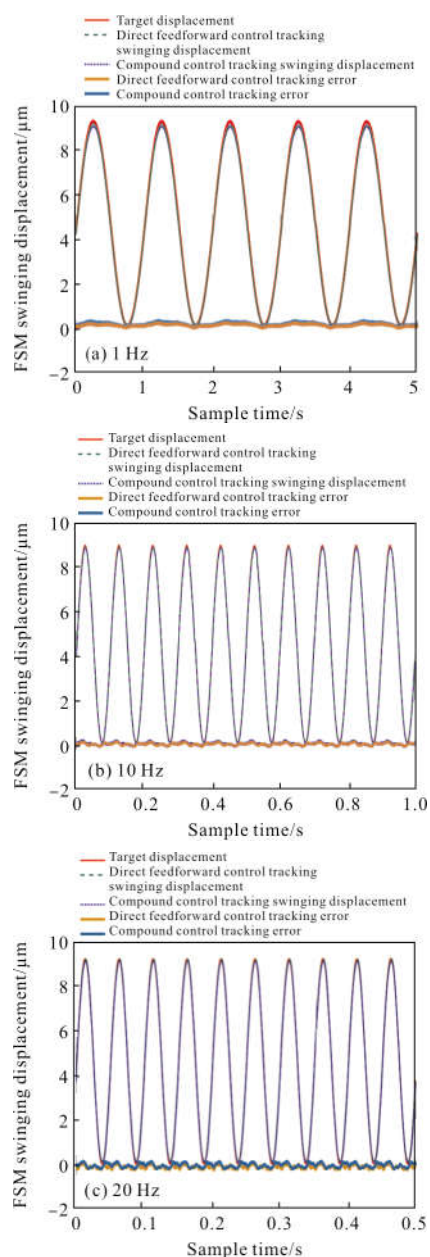


图 9 不同频率快摆机构目标摆动位移实时跟踪及误差曲线

Fig.9 Real-time tracking and error curve of FSM target swinging displacement with different frequencies

表 3 不同控制策略快摆机构目标摆动位移跟踪精度

**Tab.3 Tracking precision of FSM target swinging displacement with different control strategies**

Control strategy	Frequency/Hz	RMSE/ $\mu\text{m}$	RE
Direct feedforward control	1	0.162 9	1.7%
	10	0.080 7	0.8%
	20	0.100 8	1.09%
Compound control	1	0.100 1	1.08%
	10	0.062 2	0.69%
	20	0.087 2	0.9%

### 4 结 论

针对空间天文望远镜精密稳像系统大口径压电快摆镜机构的控制精度受压电陶瓷迟滞非线性影响的情况,提出一种基于前馈补偿和 CADE\_PID 的复合控制策略。实验结果表明,与传统的 PI 模型求解析逆方法相比,基于广义 Stop 算子的 PI 迟滞逆模型既避免了复杂的逆求解过程也提高了迟滞逆模型建模精度,混沌搜索机制的差分进化算法可以更好地辨识模型参数,1 Hz 迟滞曲线拟合均方根误差为 0.031 6 V,相对误差为 0.158%。

基于前馈补偿和 CADE\_PID 的复合控制效果良好,实时跟踪 1、10、20 Hz 快摆镜机的目标摆动位移,复合控制跟踪均方根误差分别为 0.100 1  $\mu\text{m}$ (相对误差为 1.08%)、0.062 2  $\mu\text{m}$ (相对误差为 0.69%)和 0.087 2  $\mu\text{m}$ (相对误差为 0.9%),跟踪精度比直接前馈控制法分别提高了 38.56%、22.92%和 13.5%。实验结果验证了本复合控制算法在不同频率下的有效性和优越性。

### 参考文献:

[1] Shi Shaolong. Research on control technology of precision image stabilization system in space telescope [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014. (in Chinese)

[2] Wang G. Robust tracking control of piezoelectric fast steering mirror with hysteresis and disturbances correction [C]//Control Conference, IEEE, 2015: 389-

394.

[3] Tiberiu-Gabriel Zsurzsan. Preisach mode of hysteresis for the Piezoelectric Actuator Drive [C]//Conference of IEEE Industrial Electronics Society, 2015: 002788 - 002793.

[4] Hu Liangliang. Open loop control of fast steering mirror based on PI inverse model [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(8): 0818001. (in Chinese)

[5] Tian Yanbing. Compounding control of ultra-precision positioning stage based on inverse generalized PI model [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 51(2): 198-206. (in Chinese)

[6] Young-Rae Ko. Identification of inverse generalized asymmetric Prandtl-Ishlinskii model for compensation of hysteresis nonlinearities [C]//IEEE Conference on Control Technology and Applications, 2017: 1183 - 1188.

[7] Wei Chuanxin. Research on Kinetics of the image stabilization system in space telescope [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2016. (in Chinese)

[8] Fang Chu. Design of rhomboid micro stroke amplifier for FSM system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(10): 1018004. (in Chinese)

[9] Wu Yiling. Research on compound control arithmetic of piezoelectric ceramic based on PI model [J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2015, 3 (6): 950-953. (in Chinese)

[10] Dai Xiaoying. The integrated interface of differential evolution algorithm and its modified algorithms [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2013. (in Chinese)

[11] Liu Junmin. Differential evolution algorithm based on chaos searching [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2008, 44(12): 66-68. (in Chinese)

[12] Tan Yue. Research on particle swarm optimization with chaotic local search [D]. Changsha: Central South University, 2013. (in Chinese)

[13] Xiao S, Li Y. Dynamic compensation and H control for piezoelectric actuators based on the inverse Bouc-Wen model [J]. *Robotics and Computer -Integrated Manufacturing*, 2014, 30(1): 47-54.