文章编号　1004-924X(2017)08-2113-08

# 压电陶瓷执行器迟滞补偿及复合控制

于志亮[1*]，王　岩[1]，曹开锐[2]，陈　昊[3]

(1. 哈尔滨工业大学 航天学院，黑龙江 哈尔滨 150001；
2. 哈尔滨工业大学 空间光通信技术研究中心，黑龙江 哈尔滨 150001；
3. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所，吉林 长春 130033)

**摘要**：快速倾斜镜是星间激光通信终端精瞄系统的核心部件，其驱动装置为压电陶瓷执行器，而压电陶瓷具有迟滞特性，其严重影响了快速倾斜镜的定位精度，进而对星间通信链路的稳定性造成不利影响。为解决这一问题，本文设计了一种改进 Prandtl-Ishlinskii(P-I)模型对压电陶瓷执行器进行建模。在此基础上，提出了压电陶瓷执行器前馈线性化方法，以对迟滞特性进行前馈逆补偿。接着，提出了一种结合改进的 P-I 模型与增量式 PID 算法的复合控制算法，并在 DSP 中实现了该复合控制算法。最后，在试验平台上对该算法进行了验证。结果显示：当分别对系统输入 10Hz 和 100Hz 减幅正弦、等幅正弦曲线时，模型误差在 0.59%以内，在输入同频 100 Hz 以下的减幅正弦曲线时，传统 PID 算法的最大误差为 59.31 μrad，而该复合算法的最大误差为 14.22 μrad。实验数据表明，本文复合控制方法的动态跟踪性能明显优于传统 PID 方法，改进 Prandtl-Ishlinskii(P-I)模型可以精确描述压电陶瓷的迟滞特性。本文设计的复合控制方法满足实际应用对快速倾斜镜的要求。

**关　键　词**：快速倾斜镜；激光通信；精瞄系统；压电陶瓷执行器；迟滞特性；改进 PI 迟滞模型；复合控制

**中图分类号**：TL361　　**文献标识码**：A　　**doi**：10.3788/OPE.20172508.2113

# Hysteresis compensation and composite control for Piezoelectric actuator

YU Zhi-liang[1*], WANG Yan[1], CAO Kai-rui[2], CHEN Hao[3]

(1. *School of Aerospace, Harbin Institute of Technology, Harbin* 150001, *China*;
2. *Free Space Optical Communication Technology Research Center, Harbin Institute of Technology, Harbin* 150001, *China*;
3. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*)
* *Corresponding author, E-mail: yuzl@hit.edu.cn*

**Abstract**: Fast Steering Mirror (FSM) is the core part in terminal fine aiming system of inter-satellite laser communication. As the driving device for FSM, Piezoelectric actuator's (PEA) hysteresis characteristics seriously affect FSM's position accuracy, and therefore have adverse influence on stability of inter-satellite communication link. In order to solve this problem, a modified Prandtl-Ishlinskii (MPI) model was proposed to describe PEA. On this basis, a feed-forward linearization approach for PEA was presented to achieve feed-forward inverse compensation for hysteresis. Meanwhile, a com-

**收稿日期**：2016-11-02；**修订日期**：2017-01-16.

**基金项目**：国家科技重大专项(No. 2009ZX02207)；国家自然科学基金重点资助项目(No. 51537002)；国家青年自然科学基金资助项目(No. 61503096)

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

posite control method was developed by combining the MPI model and the incremental PID control algorithm, then the composite control algorithm was implemented in DSP later. At last, the performance of proposed algorithm was verified on test platform. The experimental results indicate that when system was input with damped sinusoidal and constant amplitude sinusoidal curves of 10 Hz and 100 Hz respectively, model error was within 0.59%. Under damped sinusoidal input curve of same frequency under 100Hz, the greatest error of traditional PID algorithm was 59.31μrad, and that of proposed composite algorithm was 14.22 μrad. Experimental data shows that MPI model can accurately depict hysteresis characteristics of PEA and corresponding composite control method has obviously better dynamic tracking performance than traditional PID method, which can satisfy requirements of practical application to FSM.

**Key words**: fast steering mirror; laser communication; fine aiming system; Piezoelectric actuator; hysteresis characteristics; modified PI hysteresis model; composite control

## 1 引 言

由于压电陶瓷执行器(Piezoelectric Actuators,PEA)具有定位精度高、带宽大、位移分辨率高、响应速度快、输出力大等优点[1],因此被广泛应用于电源执行器[2]、微定位平台[3]、原子力显微镜[4]、磁盘驱动器[5]等仪器设备中,尤其在空间激光通信和捕获[6]、瞄准系统[7]中的应用更为广泛。而且它是空间激光通信精瞄系统中快速倾斜镜(FSM)的理想执行元件。

然而,在实际应用中由于PEA本身固有的迟滞和蠕变特性,导致输出位移与控制输入电压之间存在固有非线性,这会对FSM的定位精度造成一定的影响[8],进而影响整个通信系统的稳定性,其中迟滞特性的影响最为明显[9]。针对压电陶瓷的迟滞非线性,国内外学者进行了大量的研究。袁刚等[10]针对压电式快速倾斜镜的迟滞问题展开研究,通过分析其工作原理以及迟滞特性,建立了基于Bouc-Wen算子迟滞数学模型,并利用辨识方法得到了模型中的参数。在此基础上,他又提出了前馈线性化方法,使得FSM的输出角度与输入电压之间的线性度提高了2.3%。王钰锋等[11]通过建立压电陶瓷作动器率相关的Hammerstein迟滞模型,设计了基于前馈自适应逆补偿和PI反馈相结合的复合控制策略。该控制策略对于实时跟踪信号频率在100 Hz以内的应用,具有良好的实时跟踪性能。Liu Yan Fang等[12]提出了一种Maxwell Resistive Capacitor(MRC)模型,对PEA迟滞特性进行补偿,目的是使其线性化,并且通过动力学方程对补偿后的线性系统参数进行辨识,接着,利用前馈轨迹预测方法和PI反馈控制器组成闭环系统,以进一步提高PEA的定位精度。Omar ALJANAIDEH等[13]提出了一种基于RDPI(Rate-Dependent Prandtl-Ishlinskii)模型的前馈补偿方法来补偿率相关的迟滞非线性。该方法的主要创新点是在逆多乘方案中引入了线性可逆项和率相关迟滞,并通过RDPI模型来描述和分析迟滞非线性特性,进而补偿率相关迟滞特性使系统线性化。James A. Mynderse等[14]提出了一种不需要预先知道期望轨迹并且计算量较低,带宽较高的逆模型补偿方法和控制策略。文中设计了一个二自由度的控制器作用于压电陶瓷动态镜上,并用多项式拟合对迟滞进行补偿,然后利用LQR(Linear Quadratic Regulator)反馈控制器来消除补偿后的误差,实验结果表明通过上述方法可以将迟滞非线性减少91.5%。Matteo Biggio等[15]通过对压电陶瓷迟滞特性的电流和电荷变化进行详细分析和建模,推导出一种基于PEA电流和电荷的控制策略来对迟滞非线性特性进行补偿。

针对PEA的迟滞非线性特性,最为直接和有效的办法就是前馈逆补偿控制方法[16-17],然而由于开环逆补偿控制过程中存在各种扰动,严重影响压电陶瓷的动态定位精度。考虑到Prandtl-Ishlinskii (P-I)模型结构相对简单,描述非线性模型所用参数少,误差不累积,并且可以得到解析形式逆模型,在工程中易于实现,因此本文提出采用改进P-I迟滞模型与增量式PID方法相结合的复合控制算法,并通过实验验证了方法的有效性。

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

## 2　改进 P-I 迟滞模型及控制方法

压电陶瓷迟滞特性曲线如图 1 所示[18]，可见，其输入与输出呈现多值映射关系，即在相同输入值下，有多个不同输出值。从另一个角度讲，在相同输出值下，也有多个不同的输入值。输出不仅和当前的输入有关，还与输入信号的历史极值有关。当输入的最大值或最小值中任意一个发生改变时，则迟滞特性所记忆的极值也将随之发生改变。由图 1 可知，迟滞特性与所输入电压频率的依赖关系较弱，这是由于压电陶瓷为铁电类电介质材料，介电常数与频率依赖关系弱[19]。

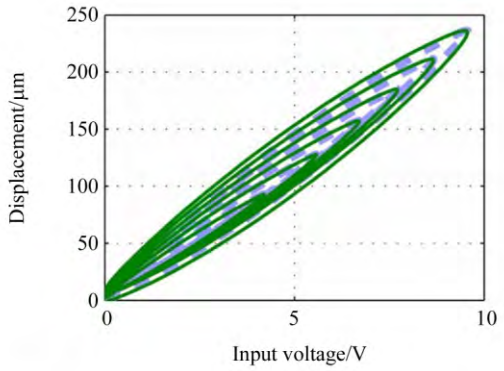



图 1　PEA 迟滞特性曲线

Fig. 1　Hysteresis curves for PEA

传统 P-I 模型中用于描述迟滞特性的 PLAY 算子 $F_r[u](t)$ 表示为：

$$\begin{aligned} w(t)&=F_r[u](t)=f_r(u(t),w(t_k)) \\ w(0)&=F_r[u](0)=f_r(u(0),0) \end{aligned}, \quad (1)$$

其中 $w(t)$ 为 PLAY 算子输出值，$w(0)$ 为 PLAY 算子初始输出值，$u(t)$ 为 PLAY 算子输入值，$u(0)$ 为 PLAY 算子初始输入值，$t_k$ 为前一采样周期时间。

PLAY 算子中 $f_r(u,w)$ 函数定义如式(2)所示：

$$f_r(u,w)=\max\{u-r,\min(u+r,w)\}, \quad (2)$$

其中 $r$ 为 PLAY 算子阈值，并且 $r\geqslant 0$。$f_r(u,w)$ 函数如图 2 所示。

传统 P-I 模型的输出是通过对 PLAY 算子进行加权积分得到的，但是积分运算在实际工程中所需的参数较多，计算复杂度大。因此，本文通过对 PLAY 算子 $F_r[u](t)$ 进行加权积分得到 P-I

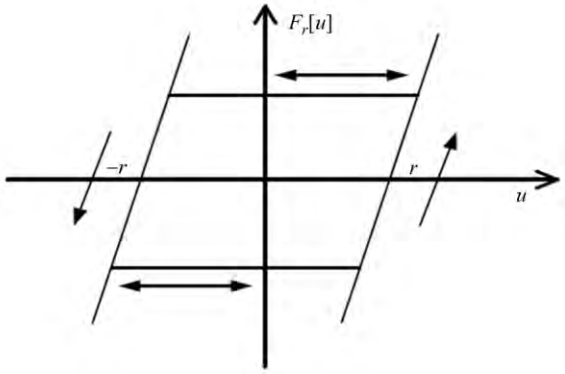



图 2　函数图形

Fig. 2　Framework of function

模型输出 $y(t)$ 为：

$$y(t)=\int_0^{+\infty} p(r)F_r[u](t)\mathrm{d}r, \quad (3)$$

其中 $p(r)$ 是积分密度函数，当 $p(r)\geqslant 0$ 时有

$$\int_0^{+\infty} rp(r)\mathrm{d}r<+\infty. \quad (4)$$

定义：当 $u(t)\in[u_{ai},u_{bi}]$ 时，若 PLAY 算子输出 $F_r[u](t)$ 保持不变，则称算子 $F_r[u](t)$ 是输入的水平算子；若算子输出 $F_r[u](t)$ 发生改变，则称算子 $F_r[u](t)$ 是输入 $u(t)$ 的环形算子，如图 3 所示。

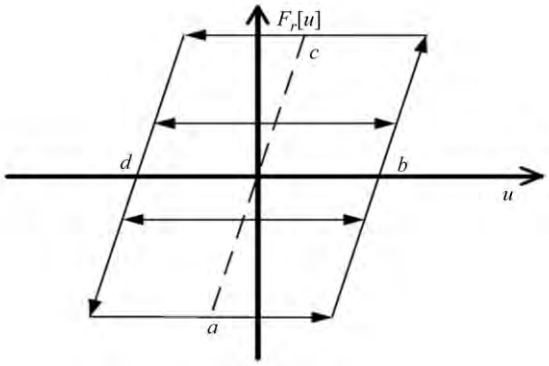



图 3　环形算子与水平算子结构示意图

Fig. 3　Schematic diagrams of PLAY operators

当输出位于图 3 所示单调不减区间 $abc$ 时，PLAY 算子可表示为：

$$w(t)=\begin{cases} u(t)-r, 0\leqslant r<\dfrac{u(t)-u_{a_i}}{2} \\ u_{a_i}+r, \dfrac{u(t)-u_{a_i}}{2}\leqslant r<\dfrac{u_{b_i}-u_{a_i}}{2} \\ w_{a_i}, \quad r\geqslant\dfrac{u_{b_i}-u_{a_i}}{2} \end{cases}, \quad (5)$$

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

同理，当输出位于单调不增区间 $cda$ 时，有

$$w(t)=\begin{cases} u(t)+r, 0\leqslant r<\dfrac{u_{b_i}-u(t)}{2} \\ u_{b_i}-r, \dfrac{u_{b_i}-u(t)}{2}\leqslant r<\dfrac{u_{b_i}-u_{a_i}}{2} \\ w_{b_i}, \quad r\geqslant\dfrac{u_{b_i}-u_{a_i}}{2} \end{cases}, \tag{6}$$

其中阈值 $r\geqslant 0$，$u(t)$ 为输入，$w(t)$ 为算子输出，$w_{ai}$ 为单调不减区间中的水平算子值，$w_{bi}$ 为单调不增区间中的水平算子值。P-I 模型通过对线性 PLAY 算子做加权积分来描述迟滞特性。

对于单调不减区间 $abc$，由式(3)、(4)、(5)可得：

$$\frac{\Delta y}{2}=\int_0^{\frac{\Delta u}{2}} p(r)(\frac{\Delta u}{2}-r)\mathrm{d}r. \tag{7}$$

设两个参数函数为关于积分密度函数 $H(x)$ 和 $Q(x)$，其表达式如下所示：

设

$$\begin{cases} \dfrac{\partial^2 H(r)}{\partial r^2}=p(r) \\ Q(x)=H(x)-H(0)-xH'(0) \end{cases},$$

则通过 $H(x)$ 和 $Q(x)$ 可以将式(7)改写为：

$$\frac{\Delta y}{2}=\int_0^{\frac{\Delta u}{2}} p(r)(\frac{\Delta u}{2}-r)\mathrm{d}r=$$

$$H(\frac{\Delta u}{2})-H(0)-\frac{\Delta u}{2}H'(0),$$

进而可以得出：

$$\frac{\Delta y}{2}=Q(\frac{\Delta u}{2}), \tag{8}$$

同理对于单调不增区间 $cda$，有：

$$\frac{\Delta y}{2}=-Q(-\frac{\Delta u}{2}), \tag{9}$$

综合式(8)和式(9)可得：

$$\left|\frac{\Delta y}{2}\right|=Q(\left|\frac{\Delta u}{2}\right|), \tag{10}$$

式中，在单调不减区间时 $\Delta u$ 为正，$\Delta y$ 取正号，在单调不增区间则相反。

公式(10)将 P-I 模型参数函数 $P(r)$ 转化为新的参数函数 $Q(x)$，参数函数 $Q(x)$ 又是输入变化量与输出变化量的映射函数，所以新的参数函数 $Q(x)$ 具有明确的物理意义，其辨识方便且容易求解。该模型还将 P-I 模型复杂的积分运算转换成输入变化量与输出变化量的单值映射关系，并且使得 P-I 模型的计算复杂度由 $O(n)$ 降低至 $O(1)$，从而大大减少了系统计算时间，有利于提高系统带宽并便于嵌入式处理器的求解运算。

本文采用改进的 P-I 逆模型与增量式 PID 相结合的复合控制方法对输入信号进行补偿和跟踪控制。通过改进 P-I 逆模型将压电陶瓷的迟滞非线性补偿成近线性，接下来，为进一步减小跟踪误差，提高跟踪精度，采用增量式 PID 控制方法，以使 PEA 达到更高的跟踪定位精度，并提高 PEA 系统的动态性能。

## 3 实验验证及结果

### 3.1 实验平台构成

为验证本文复合控制方法的有效性，基于在轨运行的‘海洋 2 号’通信卫星的精瞄系统建立实验平台。其中，压电陶瓷执行器的型号为 S-330.2SL，由德国 Physik Instrumente (PI)公司生产，最大转角为 2 mrad，等效电容为每轴 3 μF，响应

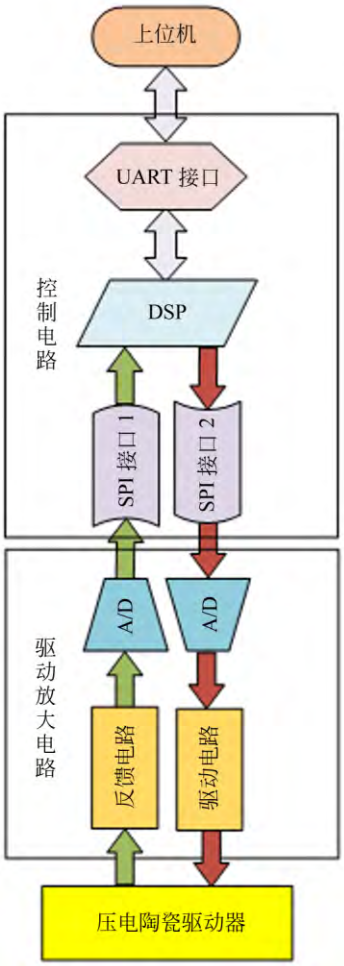



图 4 控制系统示意图

Fig. 4 Schematic of control system

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

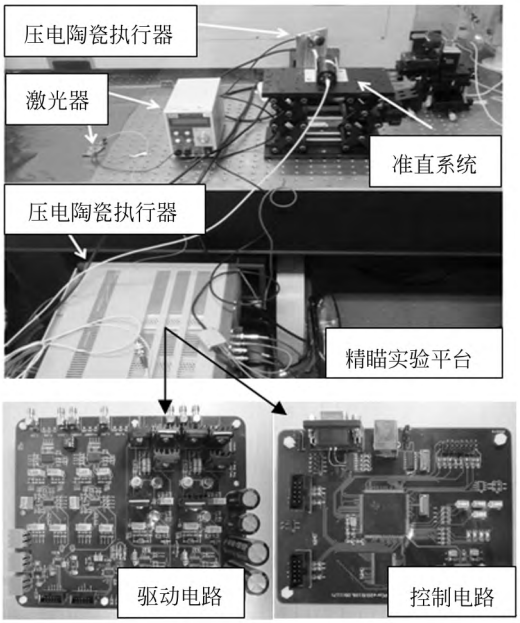



**图 5　实验设备**

Fig. 5　Experiment control system of PEA

时间达亚毫秒级，致动结构采用压电陶瓷加柔性铰链结构，供电电压为 100 V，控制电压为 0～100 V，反馈结构采用电阻应变式传感器，通过传感器将当前压电陶瓷形变位置所对应的电压值反馈到电路中。

图 4 为自行研制的压电陶瓷控制系统，其主要分为控制电路和驱动电路两部分，控制电路处理完输入期望电压信号后，由驱动电路对控制电压进行放大，进而驱动 PEA 运动。

### 3.2　改进 P-I 模型测试

为验证改进 P-I 模型的有效性，利用开环控制策略控制 PEA，实验装置见图 5。采集不同频率下的迟滞数据，对式(11)进行多次拟合从而得到最优 $Q(x)$，在拟合过程中要求拟合函数满足 $Q'(0)=Q(0)=0$，本文中选择：

$$Q(x)=x^2\cdot\left(\frac{a_0+a_1x+a_2x^2+a_3x^3}{1+b_1x+b_2x^2+b_3x^3}\right). \quad (11)$$

式(11)中的系数由拟合过程中拟合误差最小曲线来确定。对拟合得到的模型进行验证，验证方法是对实验设备与仿真模型输入相同的控制波形，再对比两者的输出误差，如图 6 所示。然后通过输入不同频率的等幅和减幅正弦曲线来测试系统的性能。

当输入信号为 60 V，10 Hz 等幅正弦波时，模型均方误差为 0.39%，如图 7 所示。当输入信号为 60 V，100 Hz 等幅正弦波时，模型最大误差为 0.59%，如图 8 所示。

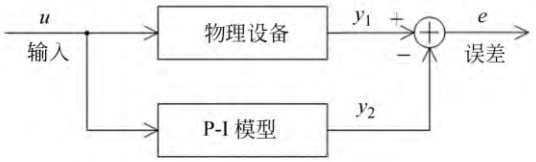
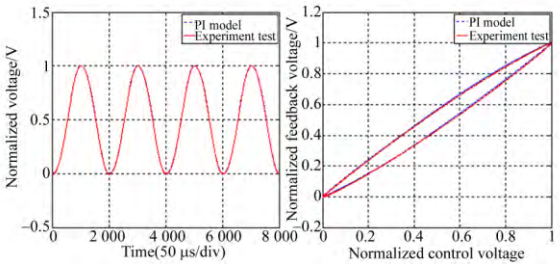


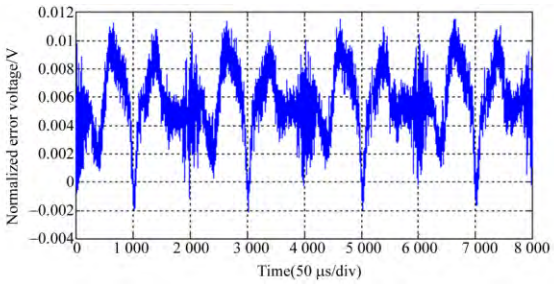

**图 6　拟合模型的验证示意图**

Fig. 6　Verification experiment diagram for fitting model




(a)60 V，10 Hz 正弦波　(b)实物与仿真迟滞曲线

(a)Sine wave with 60 V and 10 Hz　(b)Hysteresis curves of PI model and experiment test

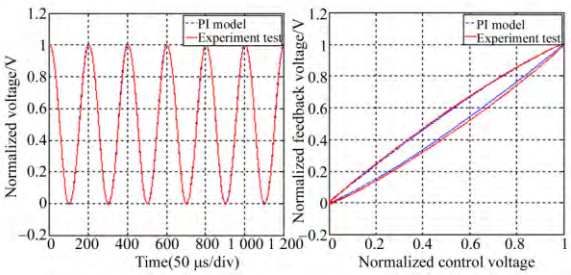



(c)实物与仿真迟滞曲线误差

(c)Normalized error voltage of hysteresis curves of PI model and experiment test

**图 7　10 Hz 正弦测试实验**

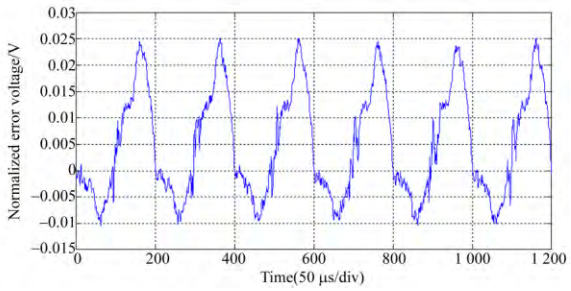
Fig. 7　10Hz sinusoidal test experiment




(a)60 V，100 Hz 正弦波　(b)实物与仿真迟滞曲线

(a)Sine wave with 60 V and 100 Hz　(b)Hysteresis curves of PI model and experiment test

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



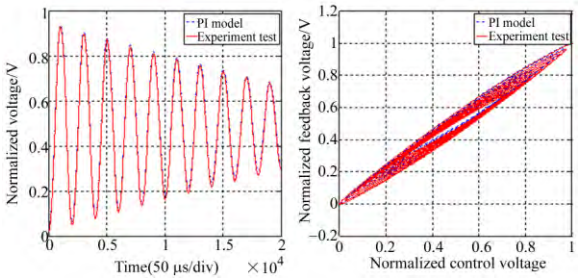

(c)实物与仿真迟滞曲线误差

(c)Normalized error voltage of hysteresis curves of PI model and experiment test

图 8 100 Hz 正弦测试实验

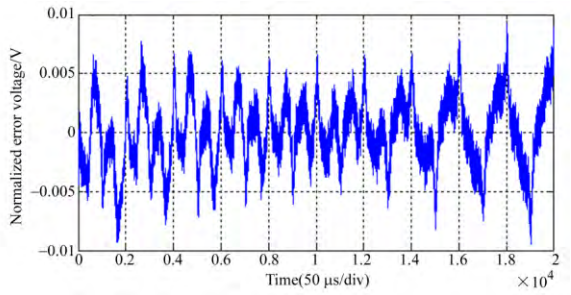
Fig. 8 100Hz sinusoidal test experiment

由于压电陶瓷迟滞特性对极值具有记忆性，因此输入不同极值控制信号来验证复合方法的有效性。当输入信号为 60 V，10 Hz 减幅正弦波时，模型最大误差为 0.42%，如图 9 所示。




(a)60 V，10 Hz 减幅正弦波 (b)实物与仿真迟滞曲线

(a)Damped sinusoidal wave with 60 V and 10 Hz (b)Hysteresis curves of PI model and experiment test




(c)实物与仿真迟滞曲线误差

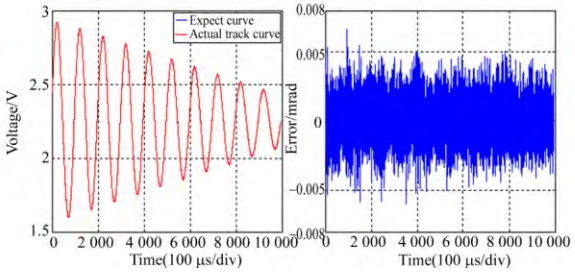
(c)Normalized error voltage of hysteresis curves of PI model and experiment test

图 9 10 Hz 减幅正弦测试实验

Fig. 9 Test curves of 10 Hz damped sinusoid experiment

### 3.3 动态跟踪性能测试

通过输入不同频率(10、20、50、100 Hz)减幅曲线来对比分析 P-I 复合方法与传统 PID 方法在动态定位精度方面的性能差别，结果如图 10－13 所示。

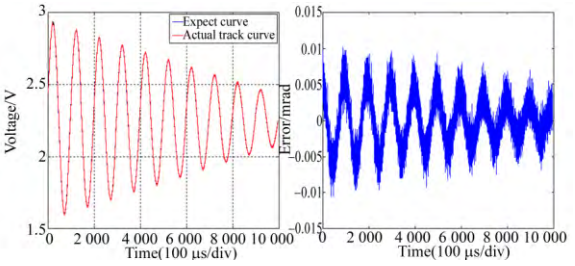



(a)跟踪曲线 (b)跟踪误差

(a)Tracking curve (b)Tracking error

图 10 10 Hz 减幅正弦 P-I 复合方法测试曲线

Fig. 10 Test curves of P-I composite control method wtih 10Hz damped sinusoid input

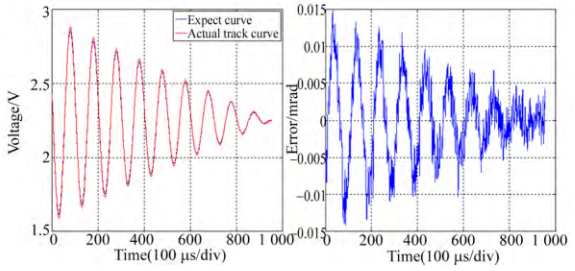



(a)跟踪曲线 (b)跟踪误差

(a)Tracking curve (b)Tracking error

图 11 10 Hz 减幅正弦输入验证示意图

Fig. 11 Test curves of PID method with 10Hz damped sinusoid input




(a)跟踪曲线 (b)跟踪误差

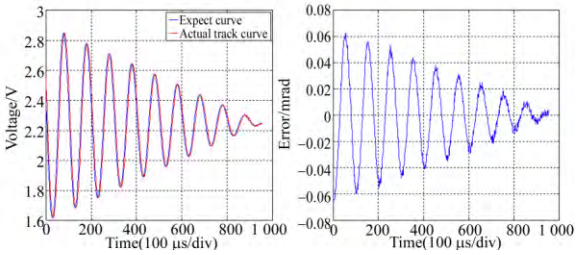
(a)Tracking curve (b)Tracking error

图 12 100 Hz 减幅正弦输入验证示意图

Fig. 12 Test curves of P-I composite control method with 100 Hz damped sinusoid input

通过图 10－13 可以看出，P-I 复合控制方法的跟踪误差比传统 PID 方法小，动态跟踪性能明显优于传统 PID 方法。另外从图中还可以看出，

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net




(a)跟踪曲线　　(b)跟踪误差

(a)Tracking curve　(b)Tracking error

图 13　100 Hz 减幅正弦输入 PID 验证示意图

Fig. 13　Test curves of PID method with 100Hz damped sinusoid input

在输入曲线频率增加的情况下，传统 PID 跟踪曲线明显滞后于期望位置曲线。

表 1 为 10、20、50、100Hz 同频减幅正弦输入曲线的最大误差。由表 1 可以看出，在输入相同频率的减幅正弦信号时，P-I 复合方法的误差远远小于传统 PID 方法，在 FSM 的定位跟踪性能上要明显优于传统 PID 方法。

表 1　同频曲线跟踪误差

Tab. 1　Tracking errors of same frequency trajectory

| 控制方法 | 频率/Hz | 最大误差/mrad |
|---|---|---|
| PI 复合方法 | 10 | 0.006 65 |
| | 20 | 0.007 20 |
| | 50 | 0.008 03 |
| | 100 | 0.014 22 |
| 传统 PID 方法 | 10 | 0.011 35 |
| | 20 | 0.016 12 |
| | 50 | 0.033 39 |
| | 100 | 0.059 31 |

## 4　结　论

本文针对快速倾斜镜压电陶瓷执行器的迟滞问题，提出了一种改进的 Prandtl-Ishlinskii(P-I)模型。该模型可使压电陶瓷执行器的迟滞曲线线性度误差减小到 1%以内，明显改善了压电陶瓷执行器的迟滞非线性特性，大大提高了压电陶瓷的定位精度。通过前馈线性化逆补偿之后，将压电陶瓷执行器视为线性控制对象，结合增量式 PID 形成复合控制算法，并用于压电陶瓷执行器的快速动态定位控制中。通过向控制系统输入不同频率(10、20、50、100 Hz)减幅正弦控制曲线来对比 P-I 复合方法与传统 PID 方法的性能。实验结果表明 P-I 复合控制方法的最大误差分别为 0.006 65、0.007 20、0.008 03、0.014 22 mrad。传统 PID 控制方法的误差分别为 0.011 35、0.016 12、0.033 39、0.059 31 mrad。通过对比可以看出 P-I 复合方法的控制性能优于传统 PID 方法，大大提高了控制系统的跟踪性能，为星间激光通信终端的精瞄快速倾斜镜控制提供了一种有效的方法。

参考文献：

[1]　HAMID H. 深空光通信[M]. 北京：清华大学出版社，2009：283-296.
HAMID H. *Deep Space Optical Communication* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009: 283-296. (in Chinese)

[2]　黄健，张鹏，邓科，等. 星地相干激光通信中的自适应光学系统边界参数设计[J]. 光学 精密工程，2014，22(5)：1204-1211.
HUANG J, ZHANG P, DENG K, *et al*.. Boundary parameters of adaptive optical system in satellite to ground coherent laser communication system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(5): 1204-1211. (in Chinese)

[3]　GREGORY M, HEINE F, KAMPFNER H, *et al*.. Commercial optical inter-satellite communication at high data rates [J]. *Optical Engineering*, 2012, 53(3): 031202.

[4]　TOYOSHINA M, ARAKI K. In-orbit measurement of short term attitude and vibrational environment on the engineering test satellite VI using laser communication equipment [J]. *Optical Engineering*, 2001, 40(5): 827-832.

[5]　KIM I I, RILEY B, WONG N M. Lessons learned from the STRV-2 satellite-to-ground lasercom experiment [C]. *Conference on Free-Space Laser Communication Technologies* Ⅻ, 2001, 24-25.

[6]　ARVIZU A, SANTOS J, DOMINGUEZ E, *et al*.. ATP subsystem for optical communications on a cubesat[C]. 2015 *IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications*, 2015: 1-5.

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

[7] 李锐,李洪祚,唐雁峰,等. 空间光通信复合轴APT系统[J]. 红外与激光工程,2011,40(7):1333-1336.
LI R, LI H Z, TANG Y F, *et al*.. Compound-axis APT system in space optical communication[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011,40(7):1333-1336. (in Chinese)

[8] 卢宁,柯熙政,张华. 自由空间激光通信中APT粗跟踪研究[J]. 红外与激光工程,2010, 39(5):943-949.
LU N, KE X ZH, ZHANG H. Research on APT coarse tracking in free space laser communication [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(5):943-949. (in Chinese)

[9] 亓波,陈洪斌,任戈,等. 100km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*.. APT technology for 100-kilometer quantum entanglement distribution experiment [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(6): 1628-1634. (in Chinese)

[10] 袁刚,张小波,王代华,等. 压电式快速控制反射镜的迟滞特性及线性化[J]. 光学 精密工程,2015,23(6): 1650-1656.
YUAN G, ZHANG X B, WANG D H, *et al*.. Hysteresis and linearization of piezoelectric fast steering mirror [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(6):1650-1656. (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] LIU Y F,SHAN J J,QI N M. Creep modeling and identification for piezoelectric actuators based on fractional-order system [J]. *Mechatronics*, 2013, 23(*SI*): 840-847.

[13] ALJANAIDEH O, JANAIDEH M AI, RAKOTONDRABE M. Inversion-free feedforward dynamic compensation of hysteresis nonlinearities in piezoelectric micro/nano-positioning actuators[C]. 2015 *IEEE International Conference on Robotics and Automation*(*ICRA*), 2015:2673-2678.

[14] MYNDERSE J A, CHIU GTC. Two-degree-of-freedom hysteresis compensation for a dynamic mirror actuator [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2016, 21(1):29-37.

[15] BIGGIO M,OLIVERI A,STELLINO F,*et al*.. A circuit model of hysteresis and creep [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, 2015, 62(5):501-505.

[16] IYER R V, TAN X B, KRISHNAPRASAD P S. Approximate inversion of the Preisach hysteresis operator with application to control of smart actuators[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2005, 50(6):798-810.

[17] XIAO S L, LI Y M. Modeling and high dynamic compensating the rate-dependent hysteresis of piezoelectric actuators via a novel modified inverse Preisach model[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2012, 99:1-9.

[18] XU Q S. Identification and compensation of piezoelectric hysteresis without modeling hysteresis inverse[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013,60(9):3927-3937.

[19] 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 Y G,SUN B Y,DONG W J,*et al*.. Causes for hysteresis and nonlinearity of piezoelectric ceramic actuators[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003,11(3): 270-275. (in Chinese)

**作者简介:**

**于志亮**(1987—),男,黑龙江同江人,博士研究生,2010年、2012年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士学位,主要从事空间光通信星间链路稳定性研究。E-mail: yuzl@hit.edu.cn

**导师简介:**

**王 岩**(1972—),男,黑龙江哈尔滨人,博士,教授,博士生导师,1995年、1997年、2001年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事高精度先进运动控制、智能控制等方面研究。E-mail:yanw@hit.edu.cn

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net