

引用格式:左守印,王合龙,周德召,等.基于几何法求解PI逆模型参数[J].电光与控制,2019,26(1):47-50,60. ZUO S Y, WANG H L, ZHOU D Z, et al. Solution of parameters for PI inverse model based on geometric method[J]. Electronics Optics & Control, 2019, 26(1):47-50, 60.

基于几何法求解PI逆模型参数

左守印^{1,2}, 王合龙¹, 周德召^{1,2}, 高军科^{1,2}

(1. 中国航空工业集团公司洛阳电光设备研究所,河南 洛阳 471000; 2. 光电控制技术重点实验室,河南 洛阳 471000)

摘要: 压电陶瓷驱动的快速反射镜具有优良的动态性能,能够满足高精度定位的任务需求,但其固有的迟滞特性严重影响了其性能的进一步提高。基于PLAY算子的迟滞数学模型具有结构简单、便于数学求解、模型精度较高的优点,但模型参数需要通过系统辨识得到,并且其逆模型参数辨识存在物理量不易获得、误差较大的不利条件。利用几何法,提出了一种求解PI逆模型参数的算法。实验证明该算法动态性能好、模型精度较高,同时基于该算法的PI逆模型前馈控制较好地解决了压电陶瓷驱动的快反镜迟滞效应补偿问题。

关键词: 机载光电系统; 快速反射镜; 迟滞效应; PI逆模型; 参数辨识; 前馈控制

中图分类号: V271.4 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2019.01.011

Solution of Parameters for PI Inverse Model Based on Geometric Method

ZUO Shou-yin^{1,2}, WANG He-long¹, ZHOU De-zhao^{1,2}, GAO Jun-ke^{1,2}

(1. Luoyang Institute of Electro-Optic Equipment, AVIC, Luoyang 471000, China;

2. Science and Technology on Electro-Optic Control Laboratory, Luoyang 471000, China)

Abstract: Fast steering mirror powered by piezoelectric ceramic has fine dynamic performance, and can meet the demand for high precision positioning in engineering, but its hysteresis effect restricts the further performance development. The mathematical model of hysteresis character based on PLAY operator has the advantages of being simple in structure, convenient for calculation, and high precision of model. However, the realization depends on parameter estimation precision, and it's difficult to obtain the physical quantity with a high precision. An algorithm is proposed to work out the parameters of PI inverse model by using geometric method. Experimental results show that the algorithm has good dynamic performance and high precision of modeling, and the algorithm based feed-forward control of PI inverse model can compensate well for the hysteresis effect of the fast steering mirror powered by piezoelectric ceramic.

Key words: airborne photoelectric system; fast steering mirror; hysteresis effect; PI inverse model; parameter estimation; feed-forward control

0 引言

随着现代军事技术的不断变革,对机载光电系统提出了在目标与载机高机动条件下,能够对目标进行快速捕获、高精度跟踪的要求。而在实际情况中:一方面制约系统跟踪性能提升的外界扰动因素较多,且其频率较高;另一方面机载光电系统本身具有大转动惯量、驱动电机响应速度有限的特点。传统伺服控制系统构型无法对高频扰动进行补偿,系统的带宽难以提

升,无法对高机动条件下的目标进行快速搜索、捕获与稳定跟踪^[1]。

基于压电陶瓷驱动的快速反射镜具有惯量小、带宽高、响应速度快、精度较高的特性,可以满足系统快速到位、高跟踪精度的需求。但压电陶瓷具有迟滞、蠕变等非线性特性,其中以迟滞特性影响最为明显^[2-4]。迟滞特性会影响系统快速到位与跟踪精度,甚至导致系统丢失目标,因此,研究解决迟滞效应的补偿问题具有很强的实用性。文献[5]提出了通过高精度参数辨识提高控制精度的方法,但参数辨识工作量大、存在非确定性误差;文献[6]提出了基于PI迟滞模型的压电驱动器自适应辨识与逆控制,该算法精度较高但工作

收稿日期:2018-07-12

修回日期:2018-09-30

作者简介:左守印(1994—),男,河南濮阳人,硕士生,研究方向为控制工程。

量大,距离工程实用尚有差距。本文以几何法求解基于 PLAY 算子的 PI 逆模型参数,省去了 PI 逆模型参数辨识过程,为迟滞补偿的工程实用提供了理论依据。

1 迟滞特性

压电陶瓷的迟滞效应产生原因十分复杂,一般认为迟滞效应由压电陶瓷的铁电效应产生。非 180° 畴在电场力作用下的转向造成压电陶瓷执行器的非线性,而非 180° 畴转向的不完全可逆造成其执行器的迟滞现象^[7]。这种变化与压电陶瓷逆压电效应产生的变化相比较小,但去掉电压后,其体积不能迅速恢复初始状态,这就导致了其体积与电压的非线性关系^[8]。

压电陶瓷的迟滞效应如图 1 所示,其迟滞特性曲线的轨迹为 $0 \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow 0$

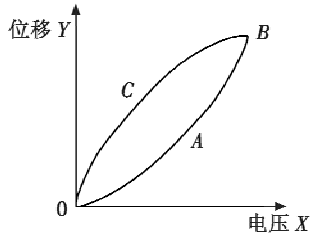


图 1 迟滞特性示意图

Fig. 1 Diagram of hysteresis characteristics

由图 1 可知,迟滞系统输出与输入为非线性关系,系统输出不仅跟当前输入有关,还跟历史输入与输出有关,这种特性给压电材料用于高精度控制系统带来了麻烦。

目前,关于压电材料迟滞效应的模型主要分为两类。

1) 基于物理原理的数学模型。以 Jiles-Atherton 模型为代表,从物理机理的观点出发对迟滞特性进行建模,分析了其位移、能量、应力等物理量,便于理解^[9]。但由于引发迟滞特性的实际原因并不完全清楚,且对于不同材料必须单独建模,这类方法适应性不强。

2) 基于迟滞现象的数学模型。以 Preisach 模型、PI (Prandtl-Ishlinskii) 模型和 KP (Krasnoselskii-Pokrovskoo) 模型为代表,从迟滞的表面现象出发,采用与迟滞环形状类似的基本算子线性迭加来描述迟滞^[9],该模型从纯数学的角度描述迟滞输入输出之间的关系,形式简单,便于分析。

2 基于 PLAY 算子的 PI 模型

考虑到 PI 模型(PI 模型通常用于描述迟滞效应,又称为 PI 迟滞模型,下文统称为 PI 模型)的算子迭加形式简单,其算子迭加数目 n 有限,便于工程应用,本文以 PI 模型为基础提出一种迟滞补偿方法。

PI 模型的基本算子为 PLAY 算子,如图 2 所示。

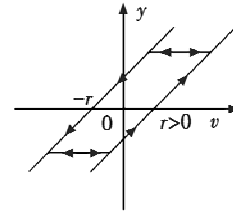


图 2 基本 PLAY 算子

Fig. 2 Basic PLAY operator

在输入信号 v 与输出信号 y 之间的递归数学表达式为

$$y(t) = \begin{cases} \max\{v(t) - r, \min\{v(t) + r, 0\}\} & t = 0 \\ \max\{v(t) - r, \min\{v(t) + r, y(t - T)\}\} & t \geq T \end{cases} \quad (1)$$

式中: r 为算子的阈值; $v(t)$ 为 t 时刻输入; $y(t)$ 为 t 时刻输出。

对多个不同阈值的算子进行线性加权迭加,可以得到 PI 模型输出表达式为

$$Y(t) = H[v_i(t), y_i(t)] = \sum_{i=1}^n w_i y_i(t) \quad (2)$$

式中: n 表示算子总数目; w_i 表示第 i 个算子权值; $y_i(t)$ 表示第 i 个算子输出值。

本文采用建立迟滞逆模型进行前馈控制对压电陶瓷的迟滞效应进行补偿的方法,其基本思想见图 3。

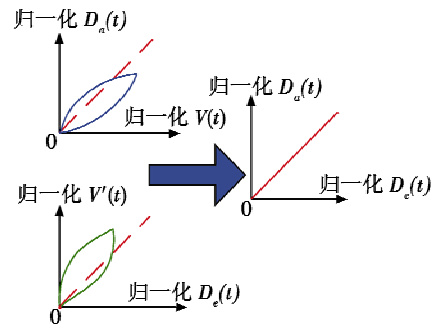


图 3 逆模型补偿迟滞非线性原理图

Fig. 3 Schematic diagram of hysteresis nonlinear compensation based on inverse model

图 3 中: $V(t)$ 为 t 时刻输入电压; $D_a(t)$ 为 t 时刻压电陶瓷实际位移; $D_c(t)$ 为其逆模型输入位移即目标位移; $V'(t)$ 为逆模型输出电压值。

对于压电陶瓷驱动器而言,输入电压与输出位移存在迟滞非线性关系,记为 $D_a(t) = H(V(t))$,而迟滞逆模型描述了预期输出位移与输入电压之间的关系^[10],记为 $V(t) = H^{-1}(D_c(t))$ 。因此,将此迟滞逆模型用于对压电陶瓷迟滞效应的前馈补偿时,可以获得实际输出位移与预期输入位移的线性关系,即

$$D_a(t) = H(H^{-1}(D_c(t))) = kD_c(t) \quad (3)$$

式中, k 为补偿后线性关系的比例系数。

3 几何方法求解逆模型参数

目前大多数研究人员是利用参数辨识的方法获得 PI 模型及其逆模型参数^[11]。参数辨识法通常需要对系统采集一定量的数据,其采集数据过程易受外界干扰,引入误差。另外,逆模型数据不太便于采集,这给基于 PI 模型的压电陶瓷迟滞补偿应用带来困难。本文提出一种几何学方法来推导其逆模型参数,而 PI 模型参数可通过离线提取压电陶瓷电压与位移数据,通过最小二乘法进行参数辨识得到。

如图 4 所示,PI 模型实质上是用首尾相连的线段来模拟迟滞曲线。

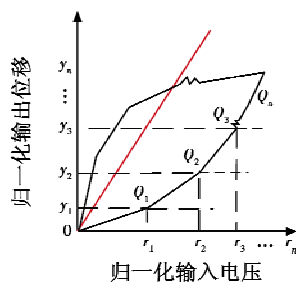


图 4 基于 PLAY 算子的 PI 模型

Fig. 4 PI model based on PLAY operator

图 4 中 $(Q_1, Q_2, Q_3, \dots, Q_n)$ 分别为各线段交点,其归一化坐标分别为 $(r_1, y_1), (r_2, y_2), (r_3, y_3), \dots, (r_n, y_n)$ 。

由于压电陶瓷只能接通正电压,因此将式(1)的 PLAY 算子简化为单边算子,即

$$y(t) = \begin{cases} \max\{v(t) - r, \min\{v(t), 0\}\} & t = 0 \\ \max\{v(t) - r, \min\{v(t), y(t - T)\}\} & t \geq T \end{cases} \quad (4)$$

对于阈值为 $r_i (i = 1, 2, 3, \dots, n)$ 的算子,其权重为 w_i ,则 PI 模型中每一线段的斜率为

$$k_i = \tan \varphi_i = \sum_j w_j \quad (5)$$

每一线段首尾连接点 M_i 的坐标分别为 (r_i, y_i) ,其中, y_i 满足

$$y_i = \begin{cases} 0 & i = 0 \\ r_1 w_1 & i = 1 \\ y_{i-1} + (r_i - r_{i-1}) k_i & i \geq 2 \end{cases} \quad (6)$$

设 PI 逆模型中算子的阈值为 r'_i ,对应的权重系数为 w'_i ,每一条线段的斜率为 k'_i ,交接点的坐标为 M'_i ,由于 PI 模型与其逆模型关于直线 $y = x$ 对称,则

$$k'_i = 1/k_i \quad (7)$$

$$r'_i = y_i \quad (8)$$

$$w'_i = \begin{cases} k'_i & i = 1 \\ k'_i - k'_{i-1} & i \geq 2 \end{cases} \quad (9)$$

由以上算式可以推导出 PI 模型及其逆模型中阈值、权重系数之间的关系,即

$$r'_i = \begin{cases} 0 & i = 1 \\ r_1 w_1 & i = 2 \\ r_1 w_1 + \sum_{j=2}^{i-1} (r_j \sum_{l=1}^j w_l) & i \geq 3 \end{cases} \quad (10)$$

$$w'_i = \begin{cases} \frac{1}{w_1} & i = 1 \\ -\frac{w_1}{\sum_j w_j \sum_{j=1}^{i-1} w_j} & i \geq 2 \end{cases} \quad (11)$$

对于输入输出都进行归一化处理,并且 PI 模型的阈值取等间隔时,式(10)可以简化为

$$r'_i = \begin{cases} 0 & i = 1 \\ \Delta r \sum_{j=1}^{i-1} \sum_{l=1}^j w_l & i \geq 2 \end{cases} \quad (12)$$

式中, $\Delta r = r_i - r_{i-1}$ 。

因此可得其逆模型具有与 PI 模型输出相同的形式,只是阈值与权重系数发生了变化,即

$$P'_i(t) = \begin{cases} \max\{v(t) - r'_i, \min\{v(t), 0\}\} & t = 0 \\ \max\{v(t) - r'_i, \min\{v(t), P'_i(t - T)\}\} & t \geq T \end{cases} \quad (13)$$

$$y'_p(t) = \sum_{i=1}^n w'_i P'_i(t) \quad (14)$$

式中: r'_i 为逆模型阈值; $y'_p(t)$ 为逆模型输出值; w'_i 为逆模型权值。

4 仿真实验及总结

首先,离线采集压电陶瓷输入电压与位移数据,压电陶瓷驱动器型号见后面实验部分,辨识得到 PI 模型参数,如表 1 所示。

表 1 PI 模型参数

Table 1 PI model parameters

w (权值)	r (阈值)	w (权值)	r (阈值)
0.451	0	0.249	0.5
-1.050	0.1	-0.239	0.6
0.481	0.2	0.402	0.7
0.407	0.3	0.003	0.8
0.093	0.4	0.198	0.9

通过逆模型参数求解方法求得逆模型参数见表 2。

表 2 PI 逆模型参数

Table 2 PI inverse model parameters

w' (权值)	r' (阈值)	w' (权值)	r' (阈值)
2.217	0	-1.031	0.163
-3.887	0.045	0.965	0.202
-6.826	0.033	-1.290	0.282
11.952	0.062	-0.005	0.361
-0.840	0.100	-0.250	0.461

设 V_N 是一组归一化的三角波电压值,电压间隔为 0.01,以 V_N 作为输入,利用基于 PLAY 算子的 PI 模型

通过 Matlab 数据计算出压电陶瓷的输出位移为 Y_{FZT} ，再以 Y_{FZT} 作为输入，利用基于 PLAY 算子的 PI 逆模型计算出所需电压值 V_P ，将 V_P 与 V_N 进行比较，通过计算补偿模型输出的电压值与实际输入电压值之间的偏差可以评价两个模型的补偿效果^[12]。部分仿真数据如表 3 所示。

表 3 部分仿真数据

Table 3 Partial simulation data

V_N	V_P	V_N	V_P	V_N	V_P	V_N	V_P
0	0.002	0.5	0.492	1.0	0.998	0.5	0.493
0.1	0.089	0.6	0.594	0.9	0.894	0.4	0.390
0.2	0.192	0.7	0.695	0.8	0.795	0.3	0.291
0.3	0.294	0.8	0.794	0.7	0.694	0.2	0.194
0.4	0.393	0.9	0.897	0.6	0.595	0.1	0.108

图 5 为仿真效果图，图 5a 是未补偿迟滞效应的归一化电压 - 位移图，图 5b 是加入 PI 逆模型后归一化位移 - 误差图。由图 5b 可知，补偿前误差最大可达 3.3×10^{-3} ，且呈现出明显的单边性，上升沿误差为正，下降沿误差为负，经过逆模型补偿后，其误差稳定在 $\pm 1 \times 10^{-3}$ 之内。可以证明式 (13) 和式 (14) 对基于 PLAY 算子的 PI 逆模型是正确的。

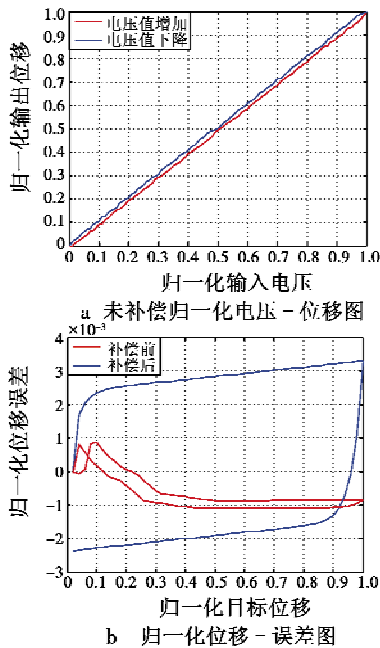


图 5 仿真效果图

Fig. 5 Diagram of simulation

为验证该算法的有效性，利用 E70 系列压电陶瓷驱动作为实验对象，其控制电压为 0 ~ 120 V，输出位移量程为 0 ~ 2200 μm ，驱动器为其配套的 E70 控制器。

通过 RS422 与上位机进行通讯，利用所得的 PI 逆模型搭建闭环系统对快反镜进行前馈控制，其原理如图 6 所示。

以三角波作为输入，其输入范围为 0 ~ 2000 μm ，

考虑到压电陶瓷驱动器具有较高带宽，测试频率选择为 100 Hz，通过外置板卡对上位机进行实时查询位移，并进行反馈位移的解析，得到数据如图 7 所示。

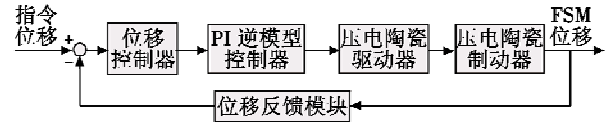


图 6 实验原理图

Fig. 6 Schematic diagram of experiment principle

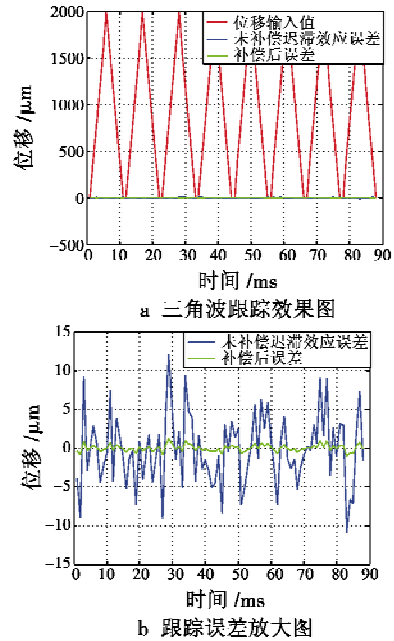


图 7 实验结果图

Fig. 7 Experimental result

图 7 中，在 100 Hz 三角波位移输入的情况下，未补偿迟滞效果的最大绝对跟踪误差为 13 μm ，平均跟踪误差为 4.82 μm ；补偿迟滞效果后，其最大跟踪误差为 3 μm ，平均跟踪误差为 0.8 μm 。

5 结束语

针对压电陶瓷在高精度定位中存在的迟滞现象，从提高其线性度、模型参数建立精度的角度出发，分析其产生机理，并提出了基于几何法求解逆模型参数的方法来降低辨识逆模型参数带来的误差。实验表明，基于 PLAY 算子的 PI 逆模型前馈控制可以将误差控制在 10^{-6} 以内，该方法为工程上补偿快反镜的迟滞效应提供了参考。

参考文献

[1] 鲁亚飞. 快速反射镜机械结构特性设计问题研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2009.
 [2] 陶帅, 白鸿柏, 侯军芳, 等. 压电致动器系统迟滞特性分

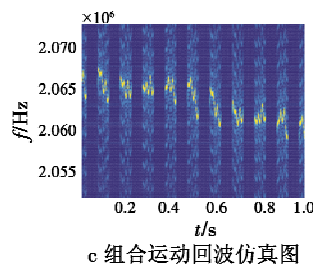


图 10 组合运动频移理论与仿真对比
Fig. 10 Theoretical and simulated frequency shift caused by combined motion

4 结束语

本文通过建立锥形载体的运动模型推导了雷达引信在锥形载体再入飞行状态下的回波多普勒频率,重点分析了摆动、锥进对回波多普勒频率影响,并利用时频分析的方法仿真了回波信号,仿真结果表明,锥形载体的运动因素对回波的多普勒频率确实有较大影响,验证了推导模型的正确性。通过探究运动因素对多普勒频率的影响规律,可以为雷达引信回波的仿真奠定基础,以及为雷达引信终端处理中多普勒滤波器组的中心频率设计提供依据,可使滤波器更加精确。由于篇幅有限,未对锥旋角变化的章动进行分析,下一步会进行探究。

参 考 文 献

- [1] 王林瑶,刘延飞,罗大成,等. 软件无线电引信技术综述[J]. 现代防御技术,2016,44(1):90-97.
- [2] 郭庆伟,王毅,张磊,等. 弹道修正引信技术发展综述[J]. 飞航导弹,2016(10):47-51.
- [3] CHEN V C, LI F Y, HO S S, et al. Micro-Doppler effect in radar: phenomenon, model and simulation study[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems(S0018-

9251), 2006, 42(1):2-21.

- [4] 束长勇,张生俊,黄沛霖,等. 基于微多普勒的空间锥体目标微动分类[J]. 北京航空航天大学学报,2017,43(7):1387-1394.
- [5] 肖金国,杜兰,韩勋,等. 基于参数化时频分析的进动锥目标瞬时微多普勒频率提取方法[J]. 电子与信息学报,2016,38(1):90-96.
- [6] 张瑜,赵小纳,王召迎. 弹道导弹微动特征散射点的选取[J]. 电光与控制,2017,24(11):1-6.
- [7] 孙璟潇,姜勤波,马红光. 弹载雷达回波模拟技术探讨[J]. 飞航导弹,2016(3):55-58.
- [8] 孙璟潇,马红光,姜勤波. 弹载雷达模拟回波关键参数特性分析[J]. 电光与控制,2016,23(5):89-93.
- [9] 潘越,周树德. 弹道导弹弹道建模与仿真技术研究[J]. 计算机仿真,2014,31(9):71-74.
- [10] 苏宪飞,张忠阳,张强,等. 远程防空导弹的新型弹道优化设计[J]. 现代防御技术,2017,45(5):29-34.
- [11] 孙璟潇,姜勤波,马红光. 自旋条件下弹载脉冲多普勒雷达回波特性研究[J]. 科学技术与工程,2015,15(24):203-207.
- [12] 赵双,鲁卫红,冯存前,等. 基于宽窄带微多普勒信息的进动目标特征提取[J]. 北京航空航天大学学报,2016,42(10):2250-2257.
- [13] 李松,冯有前,刘昌云,等. 弹道导弹微动模型及微多普勒特征研究[J]. 现代防御技术,2011,39(6):95-99.
- [14] 张素玲,席峰,陈胜焱,等. 基于正交压缩采样系统的脉冲雷达回波信号实时重构方法[J]. 电子与信息学报,2016,38(5):1064-1071.
- [15] 原帅,盛美菊,王学勤,等. 复合微多普勒效应中几种时频方法的比较[J]. 电光与控制,2008,15(8):57-60.
- [16] 艾春安,蔡笑风,刘继方,等. 短时傅里叶变换声-超声检测信号缺陷识别[J]. 中国测试,2015,41(4):29-31.

(上接第 50 页)

析及影响[J]. 科学技术与工程,2007,24(7):6427-6430.

- [3] 范伟,余晓芬,奚琳. 压电陶瓷驱动系统及控制方法研究[J]. 光学精密工程,2007,15(3):368-371.
- [4] 谭志波. 压电陶瓷驱动器迟滞补偿方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2008.
- [5] 王婉婷. 基于高精度辨识的复合轴控制策略研究[D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,2016.
- [6] 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.
- [7] GU G Y, ZHU L M. Modeling of rate-dependent hysteresis

in piezoelectric actuators using a family of ellipses[J]. Sensors and Actuators A:Physical, 2011, 165(2):303-309.

- [8] 朱炜. 压电陶瓷叠堆执行器及其系统的迟滞现象模拟、线性化及控制方法的研究[D]. 重庆:重庆大学,2012.
- [9] 方楚. 光束指向控制设备中快速反射镜系统设计研究[D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,2017.
- [10] 江国栋,王晓东. 基于 PI 逆模型的压电执行器复合控制[J]. 压电与声光, 2016,38(4):553-557.
- [11] 张丽敏,郭劲. 快速反射镜双 X-Y 轴控制的仿真研究[J]. 光学精密工程,2008,13(s1):142-147.
- [12] 许晏铭. 单探测器复合轴的跟踪技术研究[D]. 长春:长春理工大学,2014.