

# 快速反射镜系统的扰动抑制控制研究

韩志鹏<sup>1</sup> 王玫羽<sup>2\*</sup>

(1. 海装沈阳局, 长春 130033; 2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

**摘要:** 快速反射镜 (Fast Steering Mirror, FSM) 作为惯性稳定平台的精跟踪控制系统, 能够进一步提高惯性稳定平台的视轴稳定精度。针对 FSM 在工作过程中受到的外界风力干扰、载机姿态变化和内部摩擦力等多源扰动, 设计基于干扰观测器 (Disturbance Observer, DOB) 的抗扰控制方法。先建立 FSM 的数学模型, 对实体快反镜进行模型辨识, 然后设计基于干扰观测器的速度环扰动抑制控制方法。通过仿真实验验证了所设计扰动抑制方法的有效性, 可为扰动抑制方法的工程应用奠定基础。

**关键词:** 干扰抑制; 跟踪控制; 快速反射镜 (FSM); 干扰观测器 (DOB)

DOI:10.16107/j.cnki.mmte.2023.0365

**The Research of Disturbance Rejection Control for Fast Steering Mirror System**

HAN Zhipeng<sup>1</sup>, WANG Meiyu<sup>2\*</sup>

(1. Seawear Shenyang Bureau, Changchun 130033;

2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033)  
**Abstract:** Fast Steering Mirror(FSM), as a fine tracking control system for inertial stabilized platform, can further improve the line of sight stabilization accuracy of inertial stabilized platform. The Disturbance Observer(DOB) based disturbance rejection control method is designed for the multi-source disturbances such as external wind disturbance, carrier attitude change and internal friction during the operation of FSM. Firstly, the mathematical model of FSM is established, and the model identification of the solid FSM is carried out, based on which the DOB-based velocity loop disturbance suppression control method is designed. The effectiveness of the designed disturbance suppression method is verified by simulation experiments, which lays the foundation for the application of the disturbance suppression method in engineering.

**Keywords:** disturbance rejection; tracking control; Fast Steering Mirror(FSM); Disturbance Observer(DOB)

惯性稳定平台 (Inertially Stabilized Platform, ISP) 是一种广泛应用于机载、舰载、车载中的光学侦查、跟踪、打击设备<sup>[1]</sup>。随着现代战争的发展, ISP 的探测距离越来越远, 导致光电载荷的焦距加长, 视场角变小, 对视轴指向稳定性和精度的要求更加严格。为了进一步提升视轴指向控制精度, 在 ISP 的内部安装了跟踪速度快、跟踪精度高的快速反射镜装置 (Fast Steering Mirror, FSM)。

FSM 作为 ISP 的精跟踪系统, 对框架粗跟踪的误差进行补偿, 能够显著提高系统的响应速度和控制精度。但是, 在实际工程应用中, 由于 ISP 工作环境复杂, 平台会受到多源扰动的影响, 如系统外部的载体姿态变化、风阻力矩、系统内部摩擦力及发动机振动等。这些扰动因素会引起视轴抖动, 影响稳定精度。

经典的比例积分微分 (Proportion Integration Differentiation, PID) 控制方法虽然得到了广泛应用, 但是抗扰能力有限。国内外学者进行了大量研究, 提出了各种改进方法, 包括滑模控制<sup>[2]</sup>、鲁棒控制<sup>[3]</sup>、模糊控制<sup>[4]</sup>及神经网络<sup>[5]</sup>等。虽然这些方法提高了

系统的鲁棒性和抗干扰能力, 但计算过程复杂, 难以在实际工程中广泛应用。

针对这一问题, 文章采用扰动观测器 (Disturbance Observer, DOB) 抑制外部扰动, 能够实时观测和补偿系统干扰, 从而提高系统的鲁棒性。DOB 的核心思想是将实际模型的输出量与名义模型的输出量之差作为反馈量补偿到控制系统, 从而达到抑制外部扰动的目的<sup>[6]</sup>。

## 1 快速反射镜工作原理及建模

### 1.1 快速反射镜工作原理

FSM 通过驱动器驱动反射镜, 实现对光束传播方向的高频率、高精度校正。它最早被用于补偿波前像差, 后来被广泛应用于视轴稳定、光电对抗、激光通信等领域。FSM 的驱动方式主要有压电陶瓷驱动器和音圈电机驱动器两种。压电陶瓷驱动器具有带宽高、力矩大的优点, 但是行程有限, 存在严重迟滞和蠕变问题。音圈电机的行程可以达到  $\pm 5^\circ$ , 且不存在迟滞问题。因此, 音圈式快速反射镜在航空领域的 ISP 上得到了广泛应用。音圈快速反射镜结构, 如图 1 所示。

\*通信作者: 王玫羽。

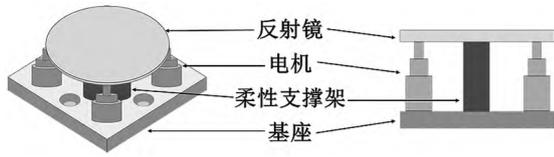


图1 音圈快速反射镜结构

在工程应用中，FSM 通常安装于相机的成像光路，如图 2 所示。FSM 的两个轴的安装方向与 ISP 的方位轴、俯仰轴分别对应，在音圈电机的驱动下，通过调整反射镜的运动角度改变光束方向，从而实现 ISP 视轴指向的进一步校正。

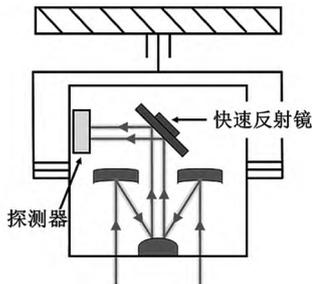


图2 快速反射镜光路

1.2 系统模型建立

FSM 等效电路如图 3 所示 [7]。

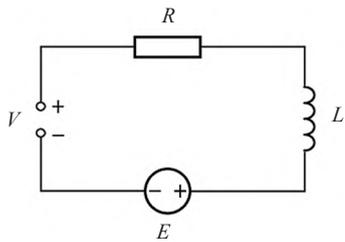


图3 快速反射镜等效电路

音圈电机的电压平衡方程为

$$L \frac{di}{dt} + Ri + E = V \tag{1}$$

式中： $V$  为施加在电机两端的电压； $E = k_e w$  为反电动势，其中  $k_e$  为反电势系数， $w$  为反射镜角速度； $L$  为电枢电感； $R$  为电阻； $i$  为电枢电流。

快反镜的动力学方程为

$$J\ddot{\theta} + B\dot{\theta} + K\theta = K_t i \tag{2}$$

式中： $J$  为 FSM 的转动惯量； $B$  为 FSM 的粘滞阻尼系数； $K$  为支撑结构的转动刚度； $K_t$  为电机力矩系数； $\theta$  为反射镜转角； $\dot{\theta}$  为反射镜转角的角速度； $\ddot{\theta}$  为反射镜转角的角加速度。

联立式 (1) 和式 (2)，并进行拉氏变换，可得

$$\begin{cases} Js^2\theta(s) + Bs\theta(s) + K\theta(s) = K_t i(s) \\ Lsi(s) + Ri(s) + K_e s\theta(s) = u(s) \end{cases} \tag{3}$$

式中： $s$  为拉普拉斯算子； $u(s)$  为系统的输入量。消去  $i(s)$ ，可得

$$G(s) = \frac{K_t}{JLs^3 + (LB + JR)s^2 + (BR + KL + K_e K_t)s + KR} \tag{4}$$

因为音圈电机的电感  $L$  和阻尼系数  $B$  很小，可以忽略不计，所以反射镜模型可近似表示为

$$G(s) = \frac{k}{s^2 + as + b} \tag{5}$$

式中： $k = \frac{K_t}{JR}$ ； $a = \frac{Rc + K_e K_t}{JR}$ ； $b = \frac{K}{J}$ 。

1.3 系统模型修正

在实际 FSM 系统中，由于机械结构并非完全刚性，当 FSM 受力后会产生弹性形变，导致系统产生机械谐振。为消除谐振对系统带宽的影响，引入阻尼系数  $c$  对 FSM 的系统模型进行修正，原理如图 4 所示。

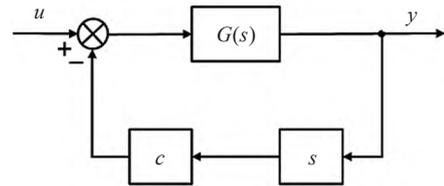


图4 快速反射镜模型修正原理图

修正后，FSM 系统的闭环传递函数为

$$G_p(s) = \frac{k}{s^2 + (a + kc)s + b} \tag{6}$$

1.4 系统模型辨识

为了进一步研究 FSM 模型，对 FSM 进行模型辨识，获得了其闭环传递函数的准确参数。采用频率为 0.1 ~ 1 000 Hz、幅值为 0.1 V 的正弦信号作为 FSM 系统的输入信号，同时采集系统的输出信号。通过拟合获得 FSM 系统校正前后的开环系统幅频特性曲线，如图 5 所示。

经过拟合，得到 FSM 闭环系统模型为

$$G(s) = \frac{361\,829}{s^2 + 143s + 16\,900} \tag{7}$$

由频率特性图图 5 可以看出， $100 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$  的频率点出现谐振，引入阻尼系数  $c = 0.000\,3$  消除谐振点的影响，拟合得到加入阻尼滞后系统模型为

$$G_p(s) = \frac{361\,829}{s^2 + 251.55s + 16\,900} \tag{8}$$

2 扰动抑制控制器设计

2.1 控制系统整体结构

在实际工作过程中，由于载机的姿态变化、温度变化、重力等不平衡力矩的存在，FSM 会受到系

统外部和内部扰动的影响。虽然建立了 FSM 的精确数学模型，但是不能保证名义模型与实际模型完全相等，且模型中的不确定因素会导致系统扰动的增加。经典的 PID 控制器无法完全克服这些非线性因素和被控对象模型的不确定性问题。为此，文章设计了基于 DOB 的干扰抑制控制器，提高 FSM 系统的抗扰能力。快速反射镜 X-Y 轴两个运动方向相互独立，控制器设计互不影响，下面以 X 轴运动方向为例进行控制器设计。FSM 的控制系统框图，如图 6 所示。图 6 中： $G_p(s)$  为修正后的被控对象传递函数； $G_n(s)$  为被控对象的名义逆模型； $d$  为系统受到的外界扰动的集合； $u_r$  为反馈控制器的控制量，用于实现 FSM 的跟踪控制功能； $\hat{d}$  为 DOB 对集总扰动的估计值，即扰动  $d$  的估计值； $Q(s)$  为低通滤波器； $\varepsilon$  为检测噪声。控制系统的内环是 DOB，用于系统扰动的观测和补偿。外环是系统的反馈控制器，采用经典的 PID 控制方法，实现 FSM 的指令跟踪功能。

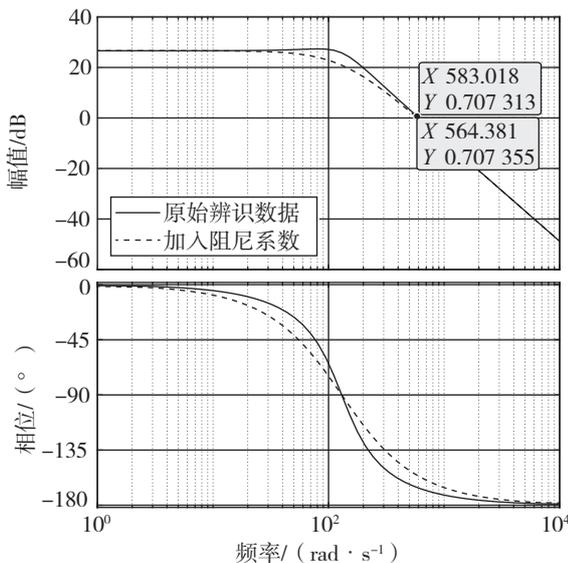


图 5 快速反射镜模型幅频特性曲线

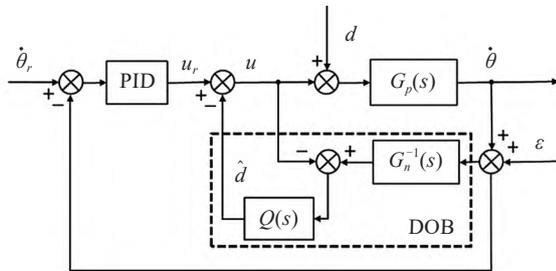


图 6 快速反射镜控制系统框图

2.2 干扰观测器设计

为了便于设计控制器，对式 (6) 进行变形，那么被控系统的输入与输出之间的关系可以表示为

$$G_p(s) = \frac{1}{Js^2 + Bs + C} \tag{9}$$

式中： $C$  为弹性阻尼系数。

被控系统的名义模型为

$$G_n(s) = \frac{1}{J_n s^2 + B_n s + C_n} \tag{10}$$

式中： $J_n$ 、 $B_n$ 、 $C_n$  分别为  $J$ 、 $B$ 、 $C$  的名义值。

设计的 DOB 位于 FSM 的速度环，根据 DOB 的原理，系统的输出为

$$\dot{\theta}(s) = G_{u\theta}(s)u_r(s) + G_{d\theta}(s)d(s) + G_{\varepsilon\theta}(s)\varepsilon(s) \tag{11}$$

式中，有

$$G_{u\theta}(s) = \frac{G_n(s)G_p(s)}{G_n(s) + [G_p(s) - G_n(s)]Q(s)} \tag{12}$$

$$G_{d\theta}(s) = \frac{G_n(s)G_p(s)[1 - Q(s)]}{G_n(s) + [G_p(s) - G_n(s)]Q(s)} \tag{13}$$

$$G_{\varepsilon\theta}(s) = \frac{G_p(s)Q(s)}{G_n(s) + [G_p(s) - G_n(s)]Q(s)} \tag{14}$$

干扰观测器设计的关键在于设计低通滤波器  $Q(s)$ 。虽然低通滤波器的阶次越高，抑制高频干扰的效果越好，但是会带来相位滞后并使控制器的设计变得复杂<sup>[8]</sup>。因此，通常选择与被控对象阶次相同的低通滤波器。

在保证 DOB 性能的前提下，文章使用一阶滤波器抑制系统的高频干扰，具体公式为

$$Q(s) = \frac{1}{\tau s + 1} \tag{15}$$

在低频信号通过时， $Q(s) = 1$ ，可得

$$\begin{cases} G_{u\theta}(s) \approx G_{pn}(s) \\ G_{d\theta}(s) \approx 0 \\ G_{\varepsilon\theta}(s) \approx 1 \end{cases} \tag{16}$$

可以看出， $Q(s)$  满足低通滤波的特性，满足系统要求。

2.3 反馈控制器设计

已知反射镜的角速度为  $\dot{\theta}$ ，反射镜的期望角速度与实际角速度之差记作  $e$ ，具体公式为

$$e = \dot{\theta} - \dot{\theta}_r \tag{17}$$

为实现对指令的跟踪功能，FSM 速度环 PID 控制率可设计为

$$u_r = k_p e + k_i \dot{e} + k_d \ddot{e} \tag{18}$$

式中： $k_p \in R^3$ ， $k_i \in R^3$ ， $k_d \in R^3$ ，均为 PID 控制器的参数。

### 3 仿真验证与分析

研究以 FSM 的 X 轴运动方向为例, 设计基于 DOB 的干扰抑制控制器。为验证控制器的有效性, 在数学仿真软件中建立 FSM 系统仿真模型。控制系统如图 7 所示。

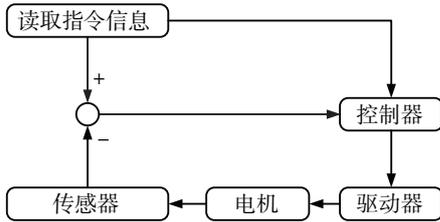


图 7 快速反射镜控制系统

验证实验分为两组, 分别是阶跃响应对比实验和正弦响应对比实验。为了实验的公平性, 对比实验中 PID 控制器的参数采用同一组, 即  $k_p=750$ 、 $k_i=50$ 、 $k_d=0$ , 滤波器参数  $\tau=0.003$ 。

#### 3.1 阶跃响应实验

在第 5 s 时, 给定系统幅值为 50" 的阶跃响应信号, 并在 7~17 s 加入扰动信号, 如图 8 所示。该扰动信号用于模拟 FSM 所受到的集总扰动。PID 控制算法的输出响应如图 9 所示, PID+DOB 控制算法的输出结果如图 10 所示。

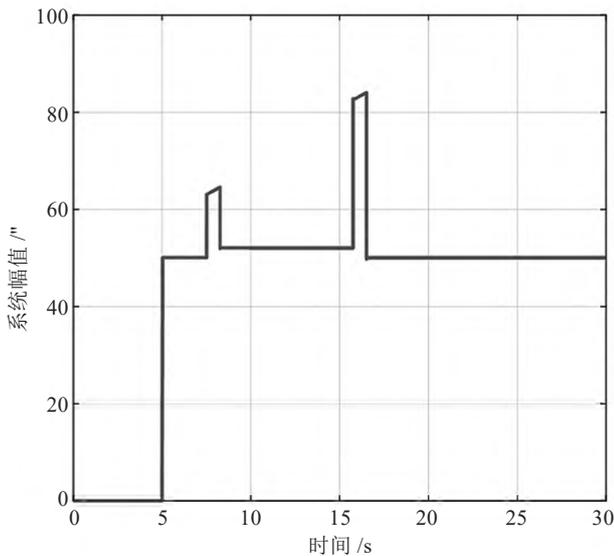


图 8 阶跃输入信号

#### 3.2 正弦响应实验

给定系统幅值为 5"、周期 15 s 的正弦信号, 并在 7~17 s 加入扰动信号, 实验输入信号如图 11 所示。PID 和 PID+DOB 控制算法的输出响应分别如图 12、图 13 所示。跟踪系统仿真实验结果, 如表 1 所示。

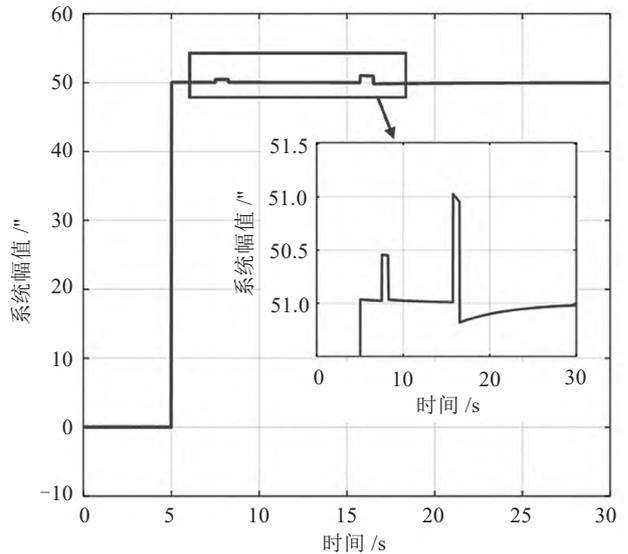


图 9 PID 控制算法阶跃响应输出

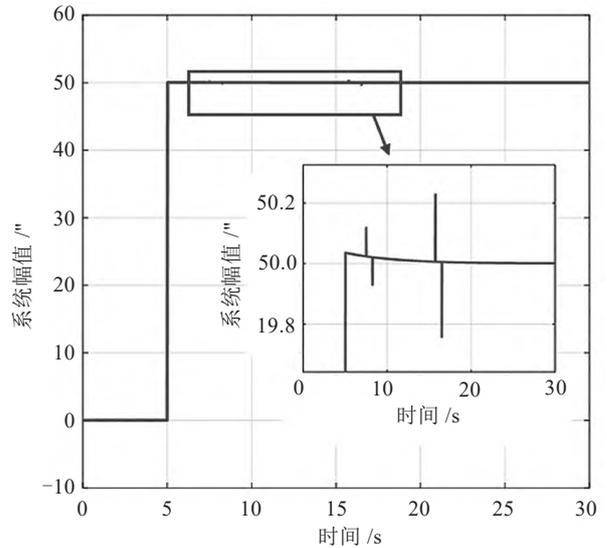


图 10 PID+DOB 控制算法阶跃响应输出

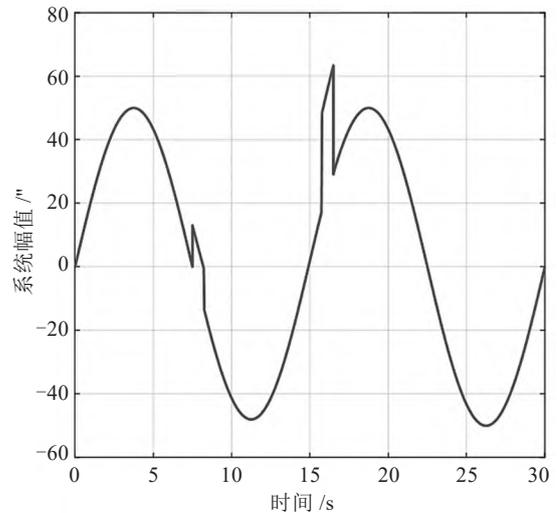


图 11 正弦输入信号

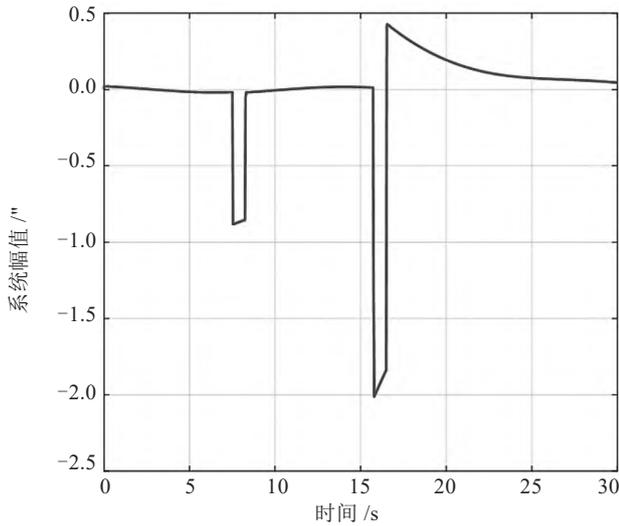


图 12 PID 控制算法正弦响应输出

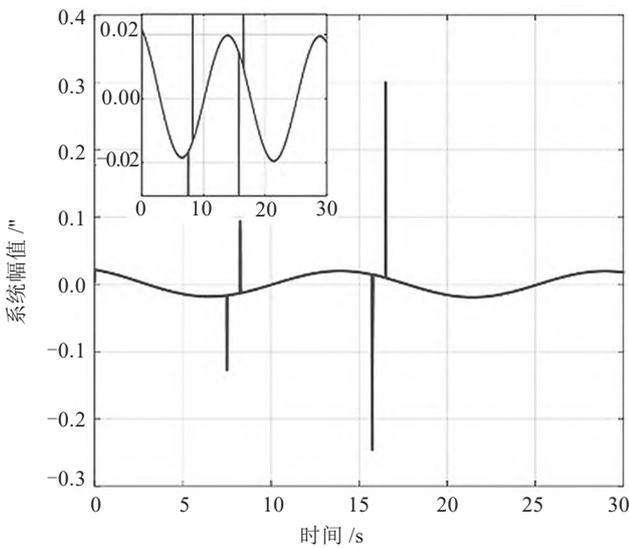


图 13 PID+DOB 控制算法正弦响应输出

表 1 跟踪系统仿真实验结果

控制方法	最大扰动 /"	跟踪误差均方根 /"
PID	33	0.353 7
PID + DOB	33	0.014 9

从两组实验结果可以看出：PID、PID + DOB 方法均能对输入信号快速响应，但 DOB 控制器对扰动信号有更好的抑制能力。

#### 4 结语

针对 FSM 工作过程中存在多源扰动的问题，在

传统 PID 控制算法的基础上，引入能够观测并补偿系统扰动的 DOB，实现了对系统干扰进行补偿的功能。文中先对 FSM 建立数学模型，然后进行控制器设计，利用数学仿真软件对 FSM 进行跟踪控制仿真实验。实验结果表明，FSM 的数学模型辨识正确，干扰抑制控制器能够实现对目标信号的实时跟踪并抑制外界扰动，跟踪误差均方根为 0.014 9"，符合工程应用需求。

#### 参考文献

[1]FU F, LEI X, WANG R.A compound control method based on the adaptive linear extended state observer and global fast terminal sliding mode control for inertially stabilized platform[J].Machines, 2022 (6): 426.

[2]ZHANG S, ZHANG B, LI X, et al.A method of enhancing fast steering mirror's ability of anti-disturbance based on adaptive robust control[J].Mathematical Problems in Engineering, 2019 (Pt.1): 1-9.

[3]李贤涛, 张晓沛, 毛大鹏, 等.高精度音圈快速反射镜的自适应鲁棒控制[J].光学精密工程, 2017 (9): 2428-2436.

[5]CHEN J, HU Q, LIN Z, et al.Adaptive sliding mode control for fast steering mirror based on rbf neural network self-learning[C]//2021 33rd Chinese Control and Decision Conference (CCDC), 2021.

[6]SARIYILDIZ E, OBOE R, OHNISHI K.Disturbance observer-based robust control and its applications : 35th anniversary overview[J].IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020 (3): 2042-2053.

[7]王凯迪.反射镜伺服控制系统研究与设计[D].西安:中国科学院大学(中国科学院西安光学精密机械研究所), 2017.

[8]王福超, 田大鹏, 王昱棠.基于 DOB 和 ZPETC 的 PWM 驱动快速反射镜控制方法研究[J].机电工程, 2015 (7): 903-908.