

文章编号 1004-924X(2026)02-0245-10

音圈电机反射镜系统的高精度自适应滑模 有限时间控制与实现

王丽娜¹, 谷雅楠¹, 梁怀丹¹, 张 崇², 石广丰^{1*}

(1. 长春理工大学, 机电工程学院, 吉林 长春 130022;

2. 驻长春地区某单位, 吉林 长春 130033)

摘要: 为了提升航空动态光学成像系统的控制精度, 本研究针对音圈电机驱动反射镜 (Voice Coil Motor-Driven Mirror, VCMM) 的高精度控制问题, 提出了一种基于自适应滑模有限时间控制的综合控制策略。该系统在存在外部干扰和模型不确定性的条件下, 仍能实现精确的指令跟踪。首先, 基于 VCMM 的机电特性建立了一般形式的系统动力学模型。其次, 构建了一种非线性比例-积分-微分型滑模面, 以提高控制系统收敛速度并抑制稳态误差。在此基础上, 基于分层抗干扰思想, 设计与模型参数和误差有关的反馈控制项、滑模切换控制项以及自适应控制项, 通过 Lyapunov 稳定性定理严格证明了闭环系统的有限时间内收敛特性。最后, 通过对比实验验证了提出的复合控制策略的有效性。实验结果表明, 在幅值为 180"、频率为 1 Hz 的正弦指令下, 施加周期性有界突变扰动时, 该系统跟踪误差的均方根值和峰峰值分别仅为 0.28" 和 4.04", 显著优于常规滑模控制。该控制算法不仅能够保持良好的跟踪性能, 对于干扰的抑制性能更优越。本研究为解决高精度航空光电成像系统中的扰动抑制与跟踪控制问题提供了有效方案。

关键词: 音圈电机反射镜; 航空动态成像系统; 滑模控制; 自适应控制; 有限时间收敛

中图分类号: TP23 **文献标识码:** A

doi: 10. 37188/OPE. 20263402. 0245

CSTR: 32169. 14. OPE. 20263402. 0245

High-precision adaptive sliding mode finite-time control and implementation for voice coil motor-driven mirror systems

WANG Lina¹, GU Yanan¹, LIANG Huaidan¹, ZHANG Cong², SHI Guangfeng^{1*}

(1. College of Electro-Mechanical Engineering, Changchun University of Science and Technology,
Changchun 130022, China;

2. A Certain Unit Stationed in Changchun, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: shiguangfeng@cust.edu.cn

Abstract: To enhance the control precision of aerial dynamic optical imaging systems, this study addresses the high-precision control problem of Voice Coil Motor-Driven Mirrors (VCMM) by proposing an integrated control strategy based on an adaptive sliding mode finite-time control. This strategy enables precise command tracking under conditions of external disturbances and model uncertainties. First, a generalized form of the system dynamics model was established based on the electromechanical characteristics of the VCMM. Second, a nonlinear proportional-integral-derivative type sliding surface was constructed to im-

收稿日期: 2025-09-24; 修订日期: 2025-10-17.

基金项目: 吉林省科技发展计划项目 (No. 20250102230JC); 国家自然科学基金项目 (No. 52375405)

prove the convergence speed of the control system and suppress steady-state errors. Based on this, following a hierarchical anti-disturbance framework, feedback control terms related to model parameters and errors, sliding mode switching control terms, and adaptive control terms were designed. The finite-time convergence characteristics of the closed-loop system were rigorously demonstrated using Lyapunov stability theory. Finally, the effectiveness of the proposed composite control strategy was validated through comparative experiments. Experimental results showed that under a sinusoidal command with an amplitude of 180 arcseconds and a frequency of 1 Hz, and in the presence of periodic bounded disturbances, the system achieved tracking errors with root mean square and peak-to-peak values of only 0.28 arcseconds and 4.04 arcseconds, respectively, significantly outperforming conventional sliding mode control. The proposed control algorithm not only maintains excellent tracking performance but also demonstrates superior disturbance suppression capabilities. This study provides an effective solution for addressing disturbance rejection and tracking control in high-precision aerial optoelectronic imaging systems.

Key words: voice coil mirror-driven mirror; aerial dynamic optical imaging systems; sliding mode control; adaptive control; finite-time convergence

1 引 言

反射镜作为航空动态光学成像领域的核心执行元件,在现代光学工程具有重要作用。通过驱动反射镜面实现高速、精密的偏转运动,可有效校正光束传播路径中的误差,补偿动基座平台晃动与外界扰动,从而确保视轴的稳定性和指向精度^[1]。随着光束控制技术的不断发展,反射镜已在激光通信^[2]、自适应光学^[3]、天文观测^[4]、激光雷达^[5]、精密加工与军事^[6]领域中得到广泛应用。上述应用场景对反射镜的响应速度、跟踪精度和抗干扰能力提出极高要求,推动着反射镜技术在新材料、新工艺与先进控制方法等方面的持续创新^[7]。

根据驱动器类型的不同,反射镜主要可分为音圈电机驱动型和压电陶瓷驱动型^[8]。压电陶瓷执行器基于逆压电效应实现运动,具有较高定位精度。然而,压电陶瓷驱动型反射镜存在行程短、驱动电压高、机械结构脆弱、非线性明显以及温敏性强等缺点^[9],限制了其在苛刻环境下的工程应用。

音圈电机(Voice Coil Motor, VCM)是一种电流驱动型线性电机,主要由动圈和永磁体构成,具有结构紧凑、响应速度快、机械简单和线性行程长等优点^[10],因此被广泛应用于精密运动控制领域^[11]。尽管当前商用的音圈电机驱动反射镜(Voice Coil Motor-Driven Mirror, VCMM)在一般应用中表现良好,但在高精度要求的场合,

其稳定性能仍面临严峻挑战,因此提升 VCMM 的定位精度成为本研究的主要目标。

VCMM 控制系统存在多项技术难点:系统本身具有高阶、欠阻尼特性,机械谐振频率显著影响其动态响应^[12];实际工作环境中的扰动进一步增加了高精度控制的难度;此外,系统模型难以精确建立,且参数易发生漂移,因此控制策略需要具备较强的鲁棒性和自适应性。

为应对上述问题,国内外学者研究了多种控制策略。传统比例-积分-微分 PID 控制及其改进算法结构简单、可靠性高,但难以有效处理非线性、模型不确定性和强外部扰动,常出现超调大、调节时间长等问题。为此,先进控制算法逐渐成为研究热点。例如,文献[13]针对反射镜系统提出结合前馈解耦与固定时间扩张状态观测器的滑模控制策略,提升了抗扰性能。在宽温域适应性方面,文献[14]采用温度分段 PID 自适应策略,改善了系统在 $-40\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内的响应性能。文献[15]则通过耦合补偿数字控制器提高了解耦与定位精度。此外,自抗扰控制^[16-17]、改进重复控制^[18]和鲁棒控制^[19]也被用于增强抗扰能力。

近年来,将有限时间控制应用于 VCMM 的研究取得了显著进展,其主要优势在于能够确保系统状态在有限时间内快速收敛至平衡点,从而提升系统的动态响应性能与鲁棒性^[20]。例如,文献[21]针对两轴推力不对称的音圈电机平台,设计了分数阶积分终端滑模控制器,实现了两自由

度的高精度指令跟踪,有效提升了系统的收敛速度与抗干扰能力。文献[22]提出了一种结合降阶非线性扩张状态观测器和快速非奇异终端滑模的改进预设性能控制方法,通过预设性能函数约束跟踪误差,满足了高动态激光通信系统对有限时间收敛的苛刻要求。文献[23]提出一种结合有限时间优化估计和模型预测的控制方法,在保证稳态精度的同时显著降低了系统振荡,提高了控制带宽。

尽管,现有研究证明了有限时间控制在VCMM中的应用潜力,但其高性能控制仍面临若干关键挑战:首先,许多方法对系统模型的精确性依赖较强,而实际应用中存在的参数摄动、未建模动态等不确定性因素,易导致控制性能下降甚至失稳,尤其在温度波动、电磁干扰等复杂工况下更为突出。其次,先进控制算法常伴随较高的计算复杂度,与VCMM系统对实时性的苛刻要求之间存在矛盾,制约了其在嵌入式平台上的应用^[24-25]。

为克服上述局限性,本文针对VCMM控制系统中的非线性扰动问题,提出一种计算高效、鲁棒性强的复合控制策略。核心工作是设计一种自适应有限时间滑模控制器,该控制器融合有限时间控制的快速收敛特性与自适应滑模控制的强鲁棒性,旨在有效抑制模型不确定性并加速误差收敛。

本文结构安排如下:第二部分阐述VCMM系统结构与建模;第三部分详细阐述所提出的控制方法;第四部分进行实验验证;第五部分总结研究成果并展望下一步研究方向。

2 音圈电机驱动反射镜系统建模

VCMM系统采用两个音圈电机对称分布在柔性轴承两端,构成推拉结构,实现反射镜一个自由度的偏转运动,结构示意图如图1所示。

音圈电机是一种基于洛伦兹力原理的高精度运动执行器,其核心是通过通电线圈与永磁体磁场的相互作用实现直线或圆弧运动。一般地,流过线圈的电流 i_a 与输出力矩 T_a 成正比例:

$$T_a = K_a i_a, \quad (1)$$

其中, K_a 是等效的力矩常数,在推拉结构中,两个音圈电机共同推动反射镜偏摆运动,则有:

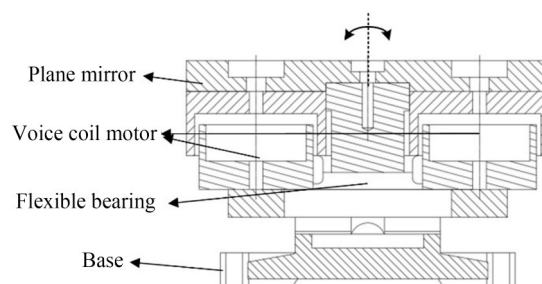


图1 音圈电机驱动反射镜的结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of VCMM

$$T_a = K_a (i_1 + i_2), \quad (2)$$

其中, i_1 和 i_2 分别表示推拉结构中两个音圈电机的绕组电流。在实际应用中,两个电机绕组的接线端子反向并联于同一电机驱动器的输出端,则可以实现一个驱动模块控制一个运动维度的目的。

在忽略电机绕组电感的条件下,则驱动器输出的电压量 U 可表示为:

$$U = E_{a1} + E_{a2} + R_{a1} i_1 + R_{a2} i_2, \quad (3)$$

其中: U 表示电机驱动器的输出电压量, R_{a1} 和 R_{a2} 表示音圈电机绕组电阻值, E_{a1} 和 E_{a2} 表示反电动势,其与转动角速度成正比例:

$$E_{a1,2} = K_{e1,2} \dot{\theta}, \quad (4)$$

其中: K_{e1} 和 K_{e2} 表示反电动势常数, θ 表示转动的角度。

一般来说,推拉结构中的音圈电机选择同类型同批次的音圈电机,电机参数一致性较好。另外,驱动器的线性度通常也较好,则进一步简化上述公式有:

$$u = (2K_e \dot{\theta} + R_a i_a) / K_d, \quad (5)$$

其中: u 表示电机驱动器的输入电压量, K_d 表示驱动器输出与输入的比值, $K_e = K_{e1} = K_{e2}$ 表示反电动势常数, $R_a = R_{a1} = R_{a2}$ 表示电机绕组阻值, $i_a = i_1 + i_2$ 表示等效的绕组电流。

另一方面,输出的力矩带动镜面转动,再根据刚体动力学可知:

$$T_a = J_n \ddot{\theta} + B_n \dot{\theta} + K_n \theta, \quad (6)$$

其中: J_n , B_n , K_n 表示刚体转动的等效惯量、等效阻尼和弹性系数。结合式(1)、式(5)和式(6)有:

$$u = \frac{R_a J_n}{K_a K_d} \ddot{\theta} + \frac{R_a}{K_a K_d} \left(B_n + \frac{2K_e K_a}{R_a} \right) \dot{\theta} + \frac{K_n R_a}{K_a K_d} \theta. \quad (7)$$

一般来说,上述公式中的常数单独获取不准确且不容易,因此可采用模型辨识和数据拟合的方法来获取整个方程的常数数值,则一种通用的音圈电机反射镜控制系统的模型可等价成如式(8)所示的形式:

$$u(t) + d(t) = \ddot{\theta}(t) + a_1 \dot{\theta}(t) + a_2 \theta(t), \quad (8)$$

其中:模型的常值参数定义为 $a_1 = \frac{1}{J_n} \left(B_n + \frac{2K_r K_a}{R_a} \right)$, $a_2 = \frac{K_n}{J_n}$; $d(t)$ 表示包含模型不确定性的系统等价干扰, $u(t)$ 表示被控系统的等效控制量。

3 自适应滑模有限时间控制

从上述被控对象的等价模型可以看出,若要实现对音圈电机驱动的反射镜系统精密的跟踪控制,首要解决干扰的问题,而滑模控制方法广泛用来处理带干扰影响的非线性系统的控制问题。因此,本文的设计目标是使音圈电机驱动反射镜系统的输出位移与期望指令信号保持一致,同时实现系统状态的有限时间收敛特性和对干扰的鲁棒性。

3.1 变增益滑模面设计

首先,为了实现有限时间收敛,本文基于PID形式的滑模面设计了一种变增益的滑模面如下:

$$s = \dot{e} + p_1 \int_0^t e(\tau) d\tau + \frac{p_2}{Q(e)} e, \quad (9)$$

其中: s 表示滑模面状态, $e = \theta_d - \theta$ 表示角位置误差, $p_1 > 0, p_2 > 0$ 分别表示积分增益和比例增益的常数。 $Q(e)$ 是关于 $|e|$ 的单调递减函数:

$$Q(e) = \alpha + (1 - \alpha) \exp(-\beta|e|^\gamma), \quad (10)$$

其中: α, β, γ 是常数,满足 $0 < \alpha < 1, \beta > 0, \gamma > 0$ 。

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s\dot{s} + k_{ad}\dot{k}_{ad} = s(-\dot{d} - k_s \operatorname{sgn}(s) - \dot{k}_{ad}) + k_{ad}(-k_1 k_{ad} + k_2 s - k_3 \operatorname{sgn}(k_{ad})) = \\ &-ds - k_s |s| - k_{ad} \dot{s} - k_1 k_{ad}^2 + k_2 k_{ad} s - k_3 |k_{ad}| \leq (\delta - k_s) |s| - k_3 |k_{ad}| + (k_2 - 1) k_{ad} s. \end{aligned} \quad (18)$$

为了保证控制器的有限时间收敛特性,令滑模控制的切换增益略大于干扰上界,即 $\delta < k_s$,同时 $k_2 = 1$ 。则式(18)化简为:

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq -\min\{k_s - \delta, k_3\} (|s| + |k_{ad}|) \leq \\ &-\sqrt{2} \min\{k_s - \delta, k_3\} V^{\frac{1}{2}}. \end{aligned} \quad (19)$$

显然地,函数 $1/Q(e)$ 在误差 $|e|$ 趋近于零时趋于1,在误差 $|e|$ 趋近于无穷大时趋于 α 。这意味着当误差值较大时系统收敛速度更快。最重要的是,该函数的数值范围是 $Q(e) \in (\alpha, 1]$, 这有效避免了除法运算导致的数值奇异性问题^[26]。

3.2 自适应滑模有限时间控制器设计

在上述滑模面基础上,根据分层抗扰和滑模控制理论中的等效控制思想,设计包含三部分的控制器:

$$u = u_1 + u_2 + u_3, \quad (11)$$

其中: u_1 表示等效控制量,与模型参数和误差有关; u_2 是滑模控制量,保证滑模控制的可达性; u_3 是自适应控制量,保证控制器的有限时间收敛。

$$u_1 = \ddot{\theta}_d + a_1 \dot{\theta} + a_2 \theta + p_1 e + p_2 \left(\frac{\dot{e}}{Q} - \frac{e\dot{Q}}{Q^2} \right), \quad (12)$$

$$u_2 = k_s \operatorname{sgn}(s), \quad (13)$$

$$u_3 = k_{ad}, \quad (14)$$

其中: $\ddot{\theta}_d$ 表示期望的角加速度, $\dot{\theta}, \theta$ 分别表示当前的角速度和角位置, $\dot{e}$ 表示误差的导数, $\dot{Q}$ 表示滑模面中 Q 函数的导数, Q^2 表示滑模面中 Q 函数的平方计算, k_s 表示滑模控制的切换增益常数, $\operatorname{sgn}()$ 表示符号函数,自适应控制量 k_{ad} 与时间有关,形式如下:

$$\dot{k}_{ad}(t) = -k_1 k_{ad}(t) + k_2 s - k_3 \operatorname{sgn}(k_{ad}(t)), \quad (15)$$

其中,常数满足 $k_1 > 0, k_2 > 0, k_3 > 0$ 。

3.3 控制器有限时间收敛性分析

为了证明本文提出控制算法的有限时间收敛性,选取正定的Lyapunov函数:

$$V = \frac{1}{2} s^2 + \frac{1}{2} k_{ad}^2. \quad (16)$$

首先,假设干扰是有界的,即:

$$|d(t)| \leq \delta, \quad (17)$$

则对Lyapunov函数求导,化简有:

根据有限时间收敛定理可知,收敛时间上界为:

$$T \leq \frac{2V^{\frac{1}{2}}(x_0)}{\sqrt{2} \min\{k_s - \delta, k_3\}}. \quad (20)$$

4 实验验证结果

4.1 实验装置及参数设置

为了验证本文控制算法的实用性,搭建如图2所示的实验系统,包括稳压电源,电源模块,音圈电机驱动的反反射镜,基于DSP28335的嵌入式平台,在线调试的仿真器和数据传输的422转USB线缆。

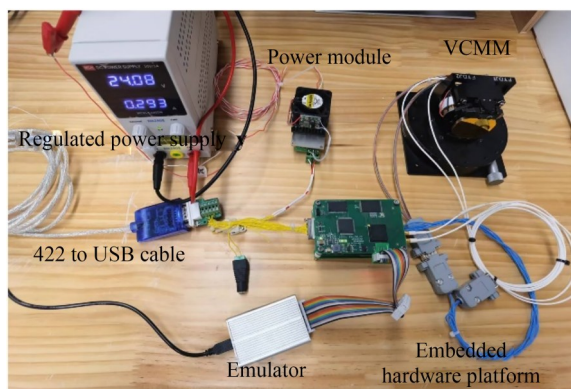


图2 本研究的实验系统

Fig. 2 Experimental system of this study

反射镜采用电涡流传感器测量旋转角度,其原理是利用两个涡流探头对称安装在柔性铰链两侧,基于涡流效应,通过敏感测量探头与金属表面之间的电感变化,获得距离信息,进而得到反射镜的转动角度量。本文的控制算法通过C语言在DSP28335芯片中实现,控制频率5 kHz。在实验中,通过程序生成典型控制指令,将指令、状态变量和闭环控制后的反馈数据发送到电脑端,利用串口助手和数据处理软件绘制实验曲线。音圈反射镜的主要技术指标如表1所示。

表1 音圈反射镜主要技术指标

Tab. 1 Main technical indicators of VCMM

序号	主要技术指标	数值
1	运动行程	$\pm 1^\circ$
2	镜面尺寸	$35 \times 43 \text{ mm}$
3	一阶谐振频率	30 Hz

4.2 参数整定

第一部分控制器 u_1 中的常数 a_1 和 a_2 由被控对象模型本身决定,通常需通过离线模型辨识方

法获取。在本实验中, $a_1 = 150, a_2 = 28\,500$ 。参数 p_1, p_2 功能上等效于滑模面的积分项与比例项增益,其整定思路可借鉴PID参数整定方法中的比例与积分调节规律,在保证系统稳定性前提下优化动态响应。在本实验中经整定后,选择 $p_1 = 60\,000, p_2 = 1\,200$ 。滑模面中还包含参数 α, β, γ ,其中,常数 α 决定了函数 $Q(e)$ 的变化范围,其值被设置为 $\alpha = 0.2$,意味着 $Q(e)$ 的变化范围被约束在0.2~1之间。另外两个参数用于调节系统的收敛速度:较高的 β 与较低的 γ 配合有助于缩短收敛时间。因此,本研究中,选择 $\beta = 8$ 和 $\gamma = 2$ 。

第二部分控制器 u_2 的核心参数是切换增益 k_s ,该参数与传统滑模控制中的切换增益含义一致,需被整定至略大于系统等效干扰的上界,以此确保控制系统在存在扰动下的稳定性。但需注意,过大的切换增益会加剧控制抖振,因此应在保证鲁棒性的前提下尽量选取较小值。为进一步抑制抖振,本实验采用饱和函数替代理想的符号函数,平滑控制切换过程。最终,本实验中选择 $k_s = 0.01$ 。

第三部分控制器 u_3 是本研究的核心,其性能及系统有限时间收敛特性依赖于该部分的参数配置。该控制器包含参数 k_1, k_2, k_3 。理论分析表明,系统状态变量 $s(t)$ 将在有限时间内指数收敛至平衡点附近的邻域内,即 $|s(t)| \leq \frac{k_3}{k_2}$,且其收敛速度由 k_1 决定,其中 k_2 选取固定值保证系统的有限时间稳定性。该控制器具有自适应特性:当系统状态远离滑模面(即 $|s| \gg 0$)时, k_{ad} 有效值增大,以提高趋近速度;当系统状态接近滑模面(即 $|s| \rightarrow 0$)时, k_{ad} 有效值自动减小,以实现平滑逼近并削弱抖振。这种机制使控制器能自适应地调整控制量,以补偿模型不确定性及外部扰动带来的变化。最终,本实验中选择 $k_1 = 100\,00, k_2 = 1, k_3 = 0.01$ 。

为更清晰地介绍主要参数整定过程,并明确各参数的调整步骤和方向,图3给出了本文控制器主要参数的整定流程图。

第一步,在控制器中仅使用 u_2 ,调整 k_s 使其保证系统稳定即可。第二步,同步调节 k_1 和 k_3 ,使得系统在取得快速性的同时不出现明显抖振。

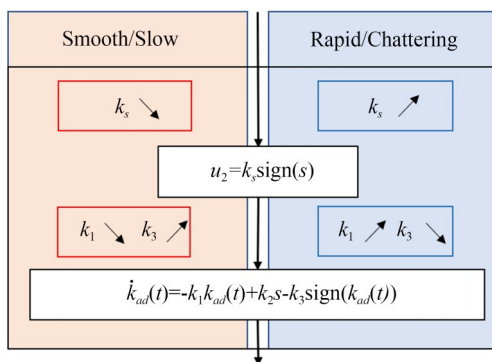


图3 本文控制器主要参数整定流程图

Fig. 3 Flowchart of the main parameter tuning for the proposed controller

4.3 实验验证

首先,通过给闭环控制系统变频率正弦信号的方式,辨识闭环控制系统带宽,以验证控制器的动态性能;其次,通过幅值 $180''$ 、频率 1 Hz 的正弦参考信号和由多个频率成分组成的复合正弦信号,验证控制器的指令跟踪性能;最后,通过模拟外部干扰,验证控制系统的扰动抑制能力。对比算法选用基于PID型滑模面的滑模控制方法,为保障对比的公平性,两种算法中滑模控制相关参数设置保持一致。

需要说明的是本文指令选择依据有如下考虑:在运动控制领域,采用特定频率和幅值的正弦指令进行测试是一种广泛接受的性能评估方法,选择 1 Hz 频率,旨在验证算法在低频段的动态跟踪能力,选择 $180''$ 幅值模拟了中高精度的应用场景。该量级的指令能有效考验控制算法在非线性和测量噪声影响下的精度保持能力。

4.3.1 控制系统带宽

在该实验中,选用小幅值、频率逐渐增加的正弦信号作为控制系统输入,频率变化从 $0.1\sim 300\text{ Hz}$,同步采集输入和输出信号,绘制闭环控制系统的波特图如图4所示。

根据bode图可知,本文研究算法闭环控制后的系统带宽大约为 200 Hz ,可见,该控制方法具有较好的动态性能。

4.3.2 正弦信号跟踪性能

在实验中,以幅值为 $180''$ 、频率为 1 Hz 的正弦信号作为系统输入指令,分别测试本文算法与滑模算法的跟踪性能。实验过程中采集两种算法的传感器反馈信号。为深入分析本文算法的

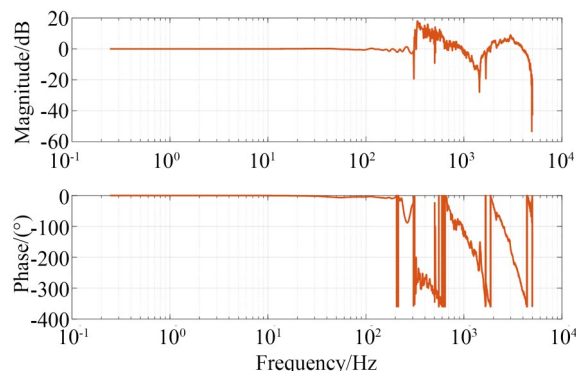
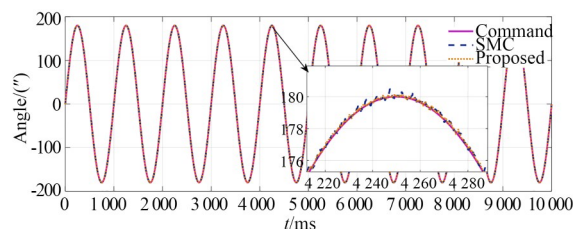


图4 本文控制器的闭环系统bode图

Fig. 4 Bode curve of the closed-loop system for the proposed controller

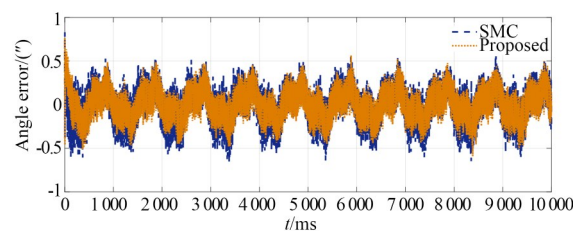
控制特性,同时记录了所提算法输出的控制量、滑模面状态变化以及自适应控制量的实时变化。实验结果如图5所示。

由实验结果可以看出,两种控制算法均能有效跟踪正弦指令信号,但本文所提算法在跟踪精度方面表现更优。具体而言,SMC算法的跟踪



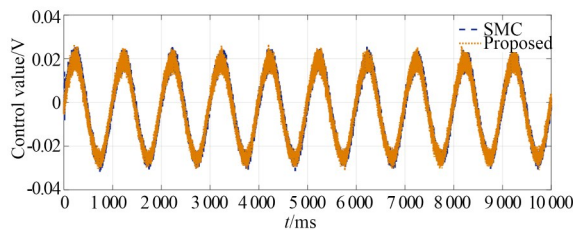
(a) 1 Hz正弦输入输出曲线

(a) Response curve with 1 Hz sine wave input



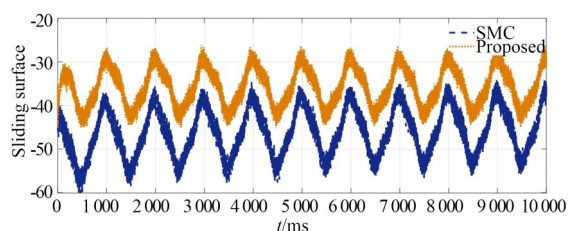
(b) 1 Hz正弦误差曲线

(b) Error curve with 1 Hz sine wave input



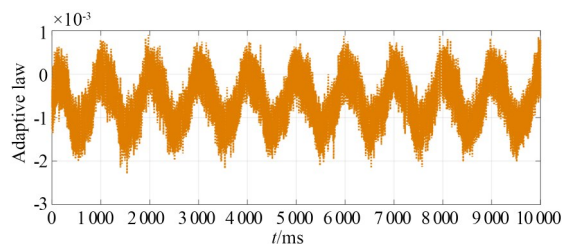
(c) 1 Hz正弦的控制量

(c) Control output with 1 Hz sine wave input



(d) 1 Hz正弦的滑模面状态

(d) Sliding mode surface state with 1 Hz sine wave input



(e) 1 Hz正弦本文算法的自适应控制量

(e) Adaptive control of the proposed algorithm with 1 Hz sine wave input

图5 1 Hz正弦信号跟踪结果

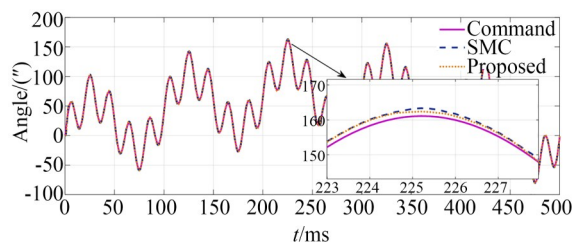
Fig. 5 Tracking results for the 1 Hz sine wave signal

误差均方根值(RMSE)和峰峰值(PPE)分别为 $0.19''$ 和 $1.22''$,而本文算法的对应指标分别为 $0.15''$ 和 $1.16''$,显示出更高的控制精度。此外,本文控制量与SMC的变化趋势类似,并未出现明显发散、饱和等问题,而滑模状态的变化相比SMC的更小。性能的提升主要源于本文算法中引入的自适应调节机制:该机制能够动态调整关键参数,从而有效克服了固定增益滑模控制在动态响应过程中的局限性。此外,在跟踪动态信号过程中,系统的滑模面、控制量及自适应律均保持动态有界,表明控制系统具有良好的稳定性和鲁棒性。

4.3.3 复合正弦信号跟踪性能

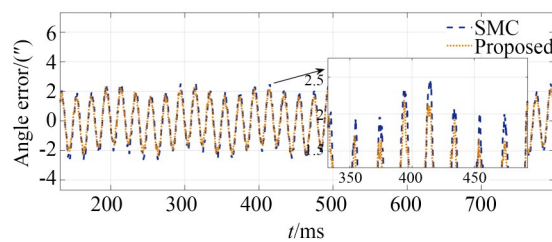
为了评估控制系统对复杂信号的跟踪性能,开展如下实验。该实验采用的指令信号由1 Hz, 5 Hz和10 Hz正弦波叠加复合而成。两种控制算法的跟踪结果如图6所示。

实验结果表明,两种控制算法均能有效跟踪复合正弦信号,且控制系统未出现发散或明显抖动。相比之下,本文所提算法展现出更优越的跟踪性能与更小的跟踪误差。具体而言,SMC算法的跟踪误差均方根值(RMSE)和峰峰值(PPE)分别为 $1.48''$ 和 $5.52''$;而本文算法的RMSE和PPE分别降至 $1.29''$ 和 $5.05''$ 。这一结



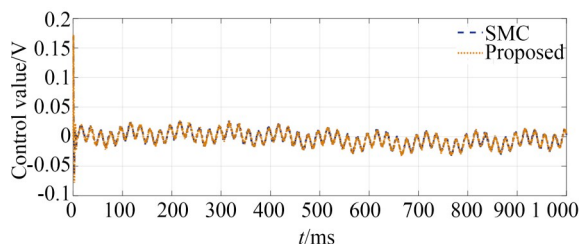
(a) 复合正弦输入输出曲线

(a) Response curve with composite sine wave input



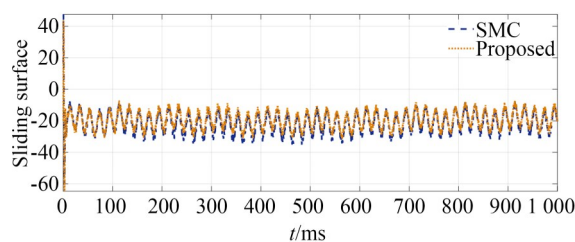
(b) 复合正弦误差曲线

(b) Error curve with composite sine wave input



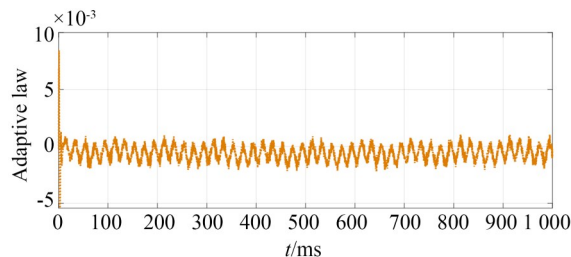
(c) 复合正弦的控制量

(c) Control output with composite sine wave input



(d) 复合正弦的滑模面状态

(d) Sliding mode surface state with composite sine wave input



(e) 复合正弦本文算法的自适应控制量

(e) Adaptive control of the proposed algorithm with composite sine wave input

图6 复合正弦信号跟踪结果

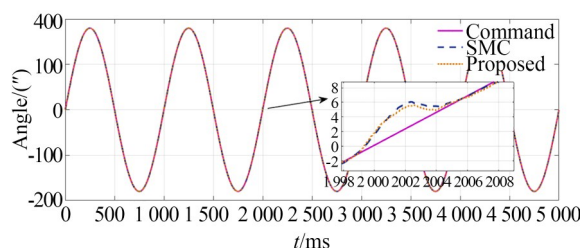
Fig. 6 Tracking results for the composite sine wave signal

果说明,本文算法中的自适应控制量有效抑制了由系统不确定性带来的干扰影响。

4.3.4 干扰条件下 1 Hz 正弦信号跟踪性能

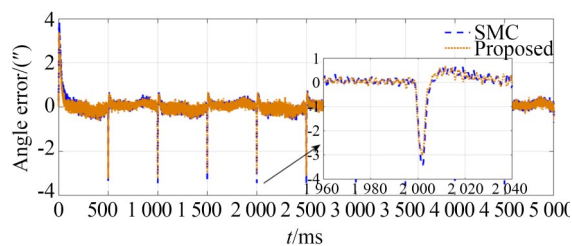
为检验算法对外部干扰的抑制能力,在第四组实验中,系统在跟踪幅值 $180''$ 、频率 1 Hz 的正弦指令时,被施加一个周期为 0.5 s、固定幅值为 0.01 V 的冲击干扰。两种算法的控制结果如图 7 所示。

根据实验结果可知,两种算法在面对有界突变干扰时均能保持系统稳定。本文算法表现出更优的抗干扰性能:在干扰引入后,系统具有更快的收敛速度和更小的控制误差。这主要得益于自适应控制量能够随干扰快速调整,从而加速了动态响应过程。在该实验条件下,SMC 算法的 RMSE 和 PPE 分别为 $0.31''$ 和 $4.46''$,而本文算法则进一步降低至 $0.28''$ 和 $4.04''$ 。为进一步



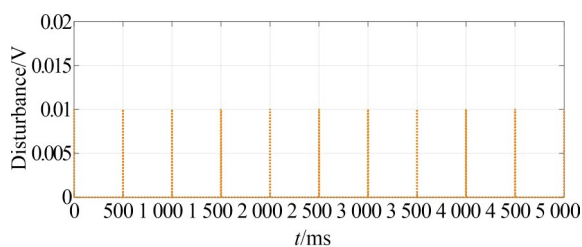
(a) 干扰条件下 1 Hz 正弦输入输出曲线

(a) Response curve with 1 Hz sine wave input under disturbance conditions



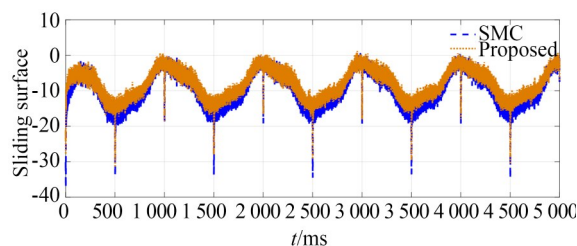
(b) 干扰条件下 1 Hz 正弦误差曲线

(b) Error curve with 1 Hz sine wave input under disturbance conditions



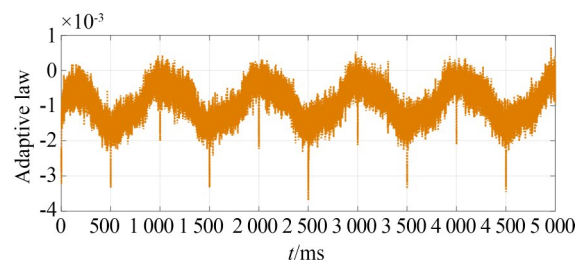
(c) 干扰曲线

(c) Disturbance curve



(d) 干扰条件下的滑模面状态

(d) Sliding mode surface state with 1 Hz sine wave input under disturbance conditions



(e) 干扰条件下本文算法的自适应控制量

(e) Adaptive control of the proposed algorithm with 1 Hz sine wave input under disturbance conditions

图 7 干扰条件下 1 Hz 正弦信号跟踪结果

Fig. 7 Tracking results for the 1 Hz sine wave signal under disturbance conditions

分析干扰对性能的影响,对比了第二组(无干扰)和第三组(有干扰)实验中两种算法的 PPE,结果如图 8 所示。

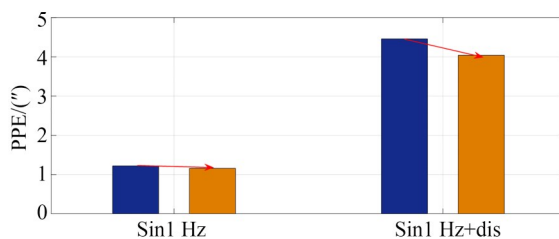


图 8 是否存在扰动时两种算法 PPE 结果

Fig. 8 PPE comparison results of two algorithms under disturbed and undisturbed conditions

分析可知,当系统无外界干扰或干扰较小时,本文控制器中第一及第二部分已能实现良好的跟踪性能,此时本文算法的 PPE 较传统 SMC 算法降低了 4.9%。然而,当系统存在较大幅值突变干扰时,本文算法第三部分的核心作用显著增强:该部分通过自适应机制实时调节控制量,迅速抑制扰动,并在扰动消失后快速退出,使得本文算法的 PPE 较 SMC 进一步降低了 9.4%。

这一结果充分体现了本文算法在干扰条件下的优异稳定性与收敛性。

5 结 论

本研究针对高精度机载光电成像系统对扰动抑制与跟踪控制的迫切需求,深入探讨了音圈电机反射镜系统的先进控制问题。首先建立了系统的被控对象模型,并在此基础上,提出了一种自适应的有限时间滑模控制方法,并给出了相应的控制器参数整定策略。实验结果表明,在幅值为 $180''$ 、频率为 1 Hz 的正弦指令下,即使施加周期性有界突变扰动,该控制系统仍能表现出卓越的性能,其跟踪误差的RMSE和PPE分别仅为 $0.28''$ 和 $4.04''$ 。与常规滑模控制方法相比,本文所提算法在控制精度和抗干扰能力上均展现

出显著优势,特别是在扰动幅值增大时,其性能优势更为明显。

然而,必须指出,本研究仍存在一定的局限性。例如,实验所设定的工况和扰动类型未能完全覆盖航空条件等实际应用场景中常见的多源、时变及非线性复杂干扰,这在一定程度上限制了研究结论的普适性。未来的研究工作将重点考察算法在更广泛扰动类型(如随机噪声、周期性扰动等)下的适应性与鲁棒性。

作者贡献声明:

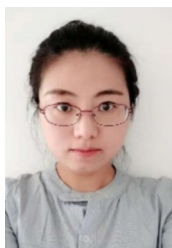
王丽娜:控制方法的提出,论文构思和撰写;
谷雅楠:数据处理、文章校对与修改;
梁怀丹:论文数据管理与分析;
张崇:控制方法应用场景指导;
石广丰:验证实验的设计及论文审核。

参考文献:

- [1] KLUK D J, BOULET M T, TRUMPER D L. A high-bandwidth, high-precision, two-axis steering mirror with moving iron actuator[J]. *Mechatronics*, 2012, 22(3): 257-270.
- [2] CHANG Y H, HAO G B, LIU C S. Design and characterisation of a compact 4-degree-of-freedom fast steering mirror system based on double Porro prisms for laser beam stabilization[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2021, 322: 112639.
- [3] 胡鹏, 张建柱. 激光系统中元件热效应时空特性分析[J]. *光学学报*, 2020, 40(20): 2014001.
HU P, ZHANG J Z. Analysis of spatio-temporal characters of thermal effects of optical components in laser system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(20): 2014001. (in Chinese)
- [4] DRIBUSCH C, CHO M K, RYU J, et al. Control modeling of the fast-steering secondary mirror for GMT [C]. *Modeling, Systems Engineering, and Project Management for Astronomy VIII*. June 10-15, 2018. Austin, USA. SPIE, 2018: 37.
- [5] 韩文, 夏润秋, 陈青山. 激光雷达快反镜扫描控制性能优化方法[J]. *应用光学*, 2025, 46(4): 750-757.
HAN W, XIA R Q, CHEN Q S. Optimization method of fast steering mirror scanning control performance in laser radar[J]. *Journal of Applied Optics*, 2025, 46(4): 750-757. (in Chinese)
- [6] NGUYEN-VAN D, DANG X D, VU T D. Optical design with non-rotationally symmetric field mapping for infrared search and track system[C]. *Optical Design and Testing XI*. October 10-13, 2021. Nantong, China. SPIE, 2021: 54.
- [7] LI C, QU Y M, SONG Z X, et al. Research on SMA motor modelling and control algorithm for optical image stabilization [J]. *Microsystem Technologies*, 2025, 31(6): 1381-1400.
- [8] WANG L N, WANG Z S, WANG F C, et al. Robust finite-time adaptive control for high performance voice coil motor-actuated fast steering mirror [J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2022, 93(12): 125003.
- [9] ZHONG J P, LI L C, NISHIDA R, et al. Design and evaluation of a PEA-driven fast steering mirror with a permanent magnet preload force mechanism [J]. *Precision Engineering*, 2020, 62: 95-105.
- [10] 李智斌, 李亮, 张建强, 等. 双轴音圈电机快速反射镜的系统建模与滑模控制[J]. *光学精密工程*, 2023, 31(24): 3580-3594.
LI Z B, LI L, ZHANG J Q, et al. System modeling and sliding mode control of dual-axis voice coil actuator fast steering mirror [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2023, 31(24): 3580-3594. (in Chinese)
- [11] BEKKALI A, FUJITA H, HATTORI M. New generation free-space optical communication systems with advanced optical beam stabilizer [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2022, 40(5): 1509-1518.
- [12] GONG Z, HUO D H, NIU Z Y, et al. A novel

- long-stroke fast tool servo system with counterbalance and its application to the ultra-precision machining of microstructured surfaces[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2022, 173: 109063.
- [13] 李智斌, 李亮, 张建强. 快速反射镜的复合快速非奇异终端滑模控制[J]. 中国光学(中英文), 2024, 17(4): 959-970.
LI Z B, LI L, ZHANG J Q. Composite fast nonsingular terminal sliding mode control of fast steering mirror[J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(4): 959-970. (in Chinese)
- [14] 牛明康, 陈青山, 刘力双, 等. 宽温域精密音圈电机快反镜的自适应控制[J]. 激光技术, 2025, 49(6): 855-860.
NIU M K, CHEN Q S, LIU L S, *et al.* Adaptive control of precision voice coil actuator fast steering mirror for wide temperature range[J]. *Laser Technology*, 2025, 49(6): 855-860. (in Chinese)
- [15] WANG L, LIU X L, LIANG S N, *et al.* Decoupling modeling design and high-precision position control of fast steering mirror[J]. *Precision Engineering*, 2024, 88: 487-496.
- [16] WANG K D, SU X Q, LI Z, *et al.* ADRC system of FSM for image motion compensation[J]. *Second International Conference on Photonics and Optical Engineering*, 2017, 10256: 1025604.
- [17] 缙泽恩, 韩顺杰, 李双成, 等. 基于扩张状态观测器的快速反射镜滑模控制[J]. 红外技术, 2024, 46(2): 150-154.
GOU Z E, HAN S J, LI S C, *et al.* Fast-steering-mirror slip-mode control based on extended state observer[J]. *Infrared Technology*, 2024, 46(2): 150-154. (in Chinese)
- [18] TANG T, NIU S X, YANG T, *et al.* Vibration rejection of Tip-Tilt mirror using improved repetitive control[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, 116: 432-442.
- [19] 冯万臣, 李亮, 张建强. 快速反射镜的系统辨识与回路成形 H_∞ 鲁棒控制[J]. 光学精密工程, 2024, 32(10): 1511-1527.
FENG W C, LI L, ZHANG J Q. System identification and loop shaping H_∞ robust control of voice coil actuator fast steering mirror[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2024, 32(10): 1511-1527. (in Chinese)
- [20] LIU C S, JIANG K C, CHEN M F, *et al.* Design and characterization of four-degree-of-freedom fast steering mirror for laser compensation system[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2024, 60(3): 3850-3859.
- [21] CHEN S Y, WU G W, YU C J. Robust fractional-order integral terminal sliding mode control with adaptive uncertainty observation for a VCM-driven X-Y motion stage[J]. *IET Electric Power Applications*, 2023, 17(2): 161-180.
- [22] LI L, FENG W C, ZHANG J Q. Improved prescribed performance control of a fast steering mirror based on switching strategy[J]. *Applied Optics*, 2025, 64(18): 4975-4985.
- [23] ZHOU L W, EULL M, PREINDL M. Optimization-based estimation and model predictive control for high performance, low cost software-defined power electronics[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2023, 38(1): 1022-1035.
- [24] ZHAO L, LIU L, LI X F, *et al.* High-precision finite-time positioning control for an inertial reference unit with asymmetric loads and mover sideslip[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2023, 70(3): 2971-2981.
- [25] KUANG S, GUAN X K, DONG D Y. Finite-time stabilization control of quantum systems[J]. *Automatica*, 2021, 123: 109327.
- [26] WANG Z S, XU R, TIAN D P. Fast fixed-time adaptive sliding mode control for a piezoelectric-actuated micro-motion stage[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2025, 113(11): 13451-13466.

作者简介:



王丽娜(1986—),女,黑龙江鹤岗人,博士,讲师,2014年于哈尔滨工程大学获得硕士学位,2021年于中国科学院大学获得博士学位,2023年于长春理工大学博士后科研流动站顺利出站,现为长春理工大学机电工程学院讲师,主要从事动基座成像的伺服控制、多模图像配准与融合等方面的研究。
E-mail: mailto: wangln@cust.edu.cn



石广丰(1981—),男,吉林长春人,教授,博导,2010年于中国科学院长春光机所获得博士学位,现为长春理工大学机电工程学院教授,主要从事图像特征检测与识别方面的研究。
E-mail: shiguangfeng@cust.edu.cn