

文章编号:1002-2082(2018)05-0714-08

## 滑模动态面控制在快速反射镜系统中的应用

魏文军,赵雪童

(兰州交通大学 自动化与电气工程学院,甘肃 兰州 730070)

**摘 要:**针对快速反射镜系统在捕获、跟踪、瞄准过程中,由于外界环境以及音圈电机机械惯性和电磁惯性所引起的跟踪精度以及响应时间的不确定性干扰问题,提出了一种滑模动态面控制器(SMDSC)。此控制器引入跟踪微分器(TD)代替传统动态面控制中的一阶滤波器,改善了一阶惯性环节收敛速度和控制精度不理想的问题,另外控制器将滑模控制和动态面控制相结合,进一步提高了系统的抗干扰能力和跟踪精度。研究表明,设计的 SMDSC 与传统动态面控制、经典 PID 控制相比较,上升时间分别提高了 62.5%、75%;调节时间分别提高了 72%、88%;跟踪精度分别提升了 75%、96%。

**关键词:**快速反射镜;动态面;滑模;跟踪微分器;音圈电机

中图分类号:TN929.1

文献标志码:A

DOI:10.5768/JAO201839.0505003

### Application of sliding mode dynamic surface control in fast steering mirror

Wei Wenjun,Zhao Xuotong

(College of Electrical Engineering and Automation ,Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070,China)

**Abstract:**A sliding mode dynamic surface control(SMDSC) strategy was proposed in order to solve the uncertain interference problem which may influence the tracking precision and the response time of the fast steering mirror (FSM)system ,due to the external environment and the mechanical inertia and electromagnetic inertia of the voice coil actuator in the course of acquisition, tracking and pointing in FSM system. The controller introduces the tracking differentiator (TD) to instead the first-order filter in the traditional dynamic surface control, which improves the problem of unsatisfactory convergence speed and control precision of the first-order inertial link. Besides, the controller which combines sliding mode control with dynamic surface control further improves the anti-interference ability and tracking accuracy of the system. A large number of simulation studies show that ,compared with the traditional dynamic surface control and classical proportional-integral-derivative (PID) control, the designed SMDSC increases by 62.5%,75% respectively in the response time, 72%,88% respectively in the adjustment time, and 75%,96% respectively the tracking accuracy.

**Key words:** fast steering mirror; dynamic surface; sliding mode; tracking differentiator; voice coil actuator

收稿日期:2018-05-02; 修回日期:2018-06-03

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2017YFB1201003-020)

作者简介:魏文军(1971-),男,甘肃兰州人,博士,教授,主要从事智能控制及故障诊断方面的研究。

E-mail:weiwenjun@mail.lzjtu.cn

通信作者:赵雪童(1993-),女,硕士,主要从事智能控制及光电伺服系统方面的研究。E-mail:136532675@qq.com

## 引言

快速反射镜(fast steering mirror, FSM)是一种通过镜面反射光源与目标之间光束方向的装置,作为精密跟踪的核心部件,具有惯量小、响应速度快、跟踪误差小等优点,且常常与大惯量机架结构的粗跟踪系统结合,共同构成复合轴跟踪系统,被大量用在激光通讯、图像稳定光学系统、自适应光学系统、跟踪瞄准光学系统等领域<sup>[1-3]</sup>。复合轴跟踪系统通常分为粗跟踪和包含快速反射镜的精跟踪两部分,粗跟踪首先对目标进行捕获和跟踪,使目标进入精跟踪的视场范围内,精跟踪单元根据粗跟踪单元给出的位置信息继而控制快速反射镜完成对目标的最终跟踪和对准<sup>[4]</sup>,所以复合轴控制系统的控制精度取决于快速反射镜的跟踪精度。由于系统的非线性特性、环境因素、内部参数变化以及在跟踪过程中大气湍流等干扰的影响,使控制器实现快速、稳定的跟踪有一定的难度。

为此在早期将 PID 算法<sup>[5]</sup>应用于快速反射镜系统中,提高了系统的跟踪精度。但是要获得良好的控制效果,需要合适的 PID 参数,文献<sup>[6]</sup>和<sup>[7]</sup>给出了 FSM 系统中 PID 控制器参数的整定方法。为了增强快速反射镜系统适应性,自适应算法<sup>[8-9]</sup>被应用于 FSM 系统之中,丁科<sup>[10]</sup>提出了误差自适应前馈控制算法,相比于 PID 控制,其跟踪精度提高了近 10 倍。杨东将模型参考自适应算法<sup>[11]</sup>应用于快速反射镜系统中,增加了系统的抗干扰能力,但跟踪精度还不够理想。文献<sup>[12]</sup>采用模糊补偿控制解决了 FSM 系统干扰问题。田福庆、李克玉<sup>[13]</sup>等人将自适应反演滑模算法应用于快速反射镜系统当中,有效降低了跟踪误差,但是并未考虑反演算法所带来的“微分爆炸”问题。文献<sup>[14]</sup>和<sup>[15]</sup>提出了动态面算法,相比反演法,引入一阶滤波器解决了由于虚拟信号被迭代微分而产生的“微分爆炸”问题,但是一阶滤波器的引入不可避免地降低了系统快速性以及控制精度。基于动态面算法,又相继有学者提出了滑模动态面算法,文献<sup>[16]</sup>将滑模动态面算法应用于大型液压起竖系统中,得到了良好的控制效果。文献<sup>[17]</sup>在无人机姿态控制系统中引入滑模动态面容错控制方法,提高了系统的跟踪精度。

针对文献<sup>[14]</sup>中的缺点,本文设计了一种基于 Lyapunov 函数的滑模动态面控制算法。该算

法为了改善一阶滤波器响应时间和控制精度不理想的问题,提出了使用跟踪微分器(tracking differentiator, TD)代替传统动态面控制中的一阶滤波器。同时为了提高鲁棒性和跟踪精度,在控制器中加入适应性强的滑模控制,得到滑模动态面控制器。仿真结果表明,在音圈电机(voice coil actuator, VCA)驱动的快速反射镜系统中,滑模动态面控制策略有效提高了系统的动态性能和稳态性能。

## 1 快速反射镜数学模型

目前 FSM 系统常用的两种微位移驱动元件分别是压电陶瓷和音圈电机<sup>[1-3,18]</sup>。压电陶瓷转动惯量小,控制方便,但是其非线性迟滞严重影响系统跟踪精度。VCA 对环境适应性强,相比压电陶瓷驱动电压小,行程大,而且调速能力好,所以本系统选取 VCA 为驱动元件。

VCA 的原理是通电导体在磁感应强度为  $B$  的磁场中切割磁感线产生洛伦兹力  $F$ ,当给两端施加电压  $u$ ,在回路内会产生电流  $i$ ,电机产生漏感抗电压  $u_e = vk_s$ ,其中: $v$  为电枢切割磁力线的速度(m/s); $k_s$  是电机力常数, $k_s = 1.357k_b$ , $k_b = BNl$ 。线圈电感  $L$  的感应压降  $u_L = L \times di/dt$ ,图 1 为 VCA 等效电路图,根据基尔霍夫电压定律可以得出:

$$u = u_R + u_L + u_e \quad (1)$$

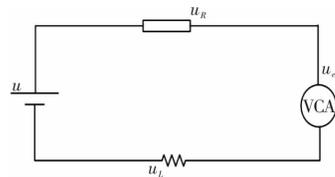


图 1 VCA 等效电路图

Fig. 1 Equivalent circuit diagram of VCA

分别将  $u_L$ 、 $u_R$ 、 $u$  带入上式,可得 VCA 电压平衡方程:

$$u = L \frac{di}{dt} + Ri + vk_s \quad (2)$$

VCA 空载时力平衡方程为

$$m \frac{dv}{dt} = BLiN \quad (3)$$

FSM 转动过程中会受到 VCA 驱动力矩  $T_e = k_b i r$ 、阻尼力矩  $T_d = c \dot{\omega}$ 、惯性力矩  $J \ddot{\omega}$  的作用,其中: $J$  为快速反射镜的转动惯量; $\omega$  为 FSM 镜面在

VCA 驱动下旋转的角度;  $r$  为镜面半径;  $c$  为阻尼系数。由于镜面采用悬挂结构,无弹性力矩。根据力矩平衡方程,建立系统的运动微分方程为

$$J \ddot{\omega} + T_d = T_e \quad (4)$$

因此,有

$$J \ddot{\omega} + c \dot{\omega} = k_b i r \quad (5)$$

在不考虑角加速度(即 $\ddot{\omega} = 0$ )的情况下,联立(2)、(3)和(5)式可得快速反射镜系统的机电动力学方程<sup>[19]</sup>为

$$\frac{Lc + JR}{k_b r} \ddot{\omega} + \frac{cR + k_b k_s r^2}{k_b r} \dot{\omega} - u = 0 \quad (6)$$

被控对象二阶状态方程为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -\frac{cR + k_b k_s r^2}{Lc + JR} x_2 + \frac{k_b r}{Lc + JR} u \end{cases} \quad (7)$$

(7)式可以写成(8)式的形式:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -Ax_2 + Bu \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $A = \frac{cR + k_b k_s r^2}{Lc + JR}$ ;  $B = \frac{k_b r}{Lc + JR}$ 。

## 2 滑模动态面控制器设计

### 2.1 跟踪微分器设计

传统的动态面是反步法的一个改进,反步法是用不大于系统阶数的子系统代替原有的非线性系统,每个子系统设计部分 Lyapunov 函数和中间虚拟控制量,一直“退后”到整个系统,把它们集成起来组成整体的控制律<sup>[20-21]</sup>,但是反步法的一个弊端就是在每一步的反推过程中会使中间虚拟控制量出现迭代微分,在系统阶数较高的情况下,会出现由于虚拟控制量迭代微分而产生的“微分爆炸”问题,传统的动态面算法为了解决此问题,引入如(9)式所示的一阶滤波器:

$$\begin{cases} \tau \dot{\alpha} + \alpha = \beta \\ \alpha(0) = \beta(0) \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $\tau$  为待设计的时间常数,且  $\tau > 0$ ;  $\alpha$  为滤波器的输出;  $\beta$  为滤波器的输入。

将每一个动态面控制中的虚拟控制量作为滤波器的输入,用滤波器的输出代替原来的虚拟控制量带入动态面算法中,可以避免“微分爆炸”问题,但是一阶惯性环节的加入在一定程度上牺牲了收敛速度和控制精度。为了解决此问题,本文提出了具有良好跟踪效果的跟踪微分器。

跟踪微分器是韩京清先生提出的用来合理提取系统位置信息与速度信息的控制器<sup>[22]</sup>,通常用来解决系统超调与响应时间之间的矛盾,改善系统的性能。针对 FSM 系统,设计如下形式的跟踪微分器。

$$\begin{cases} \dot{v}_1 = v_2 \\ \dot{v}_2 = R^2 [a_1 (v_1 - \varphi) + a_2 \frac{v_2}{R}] \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $R$  为调节快速因子;  $a_1$ 、 $a_2$  为待设计增益;  $\varphi$  为 TD 的输入信号;  $v_1$ 、 $v_2$  分别为输入信号  $\varphi$ 、输入信号微分  $\dot{\varphi}$  的估计值,TD 的收敛性由引理 1 给出。

引理 1<sup>[23]</sup>假设(10)式中的系数矩阵:

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ a_1 & a_2 \end{pmatrix} \quad (11)$$

为 Hurwitz 矩阵,  $\varphi: [0, \infty] \rightarrow \mathbf{R}$  满足  $\sup_{t \in [0, T]} |\dot{\varphi}| = M < \infty$ , 且任意  $T, M > 0$ 。则对于任意的  $0 < a < T$ , 当  $R \rightarrow \infty$  时,任意给定 TD 的初值  $(v_{10}, v_{20})$ ,  $v_1$ 、 $v_2$  在区间  $[a, T]$  内一致收敛于  $\varphi$ 、 $\dot{\varphi}$ 。

根据引理 1,给定有界输入  $\varphi$ ,对于任意的  $T > 0$ , (10)式中所设计的 TD 在保证矩阵  $A$  满足 Hurwitz 矩阵时,满足:

$$\begin{cases} \lim_{R \rightarrow \infty} v_1 = \varphi \\ \lim_{R \rightarrow \infty} v_2 = \dot{\varphi} \end{cases} \quad (12)$$

### 2.2 滑模动态面控制器设计

使用上节所设计的跟踪微分器代替传统动态面中的一阶滤波器,将改进的动态面与滑模控制相结合,同时利用 Lyapunov 第二方法通过定义和分析一个在平衡状态邻域的广义能量函数来分析平衡状态的稳定性,通过该能量函数得到滑模动态面控制律,保证快速反射镜系统在受到外界干扰后,仍有能力自动地保持在平衡状态下的稳定性,滑模动态面控制器设计过程如下。

第 1 步,设定快速反射镜粗跟踪的脱靶量,定义第 1 个动态面  $s_1$ :

$$s_1 = x_1 - x_d \quad (14)$$

其导数为

$$\dot{s}_1 = \dot{x}_1 - \dot{x}_d \quad (15)$$

取 Lyapunov 函数:

$$V_1 = \frac{1}{2} s_1^2 \geq 0 \quad (16)$$

对(16)式求导得:

$$\dot{V}_1 = s_1(x_2 - \dot{x}_d) \quad (17)$$

为使  $\dot{V}_1 < 0$ , 取  $x_2$  的理论虚拟控制为

$$\bar{\alpha}_1 = -k_1 s_1 + \dot{x}_d \quad (18)$$

式中  $k_1$  为大于零的常数,  $\bar{\alpha}_1$  通过(10)式所示的TD, 即:

$$\begin{cases} \dot{v}_1 = v_2 \\ \dot{v}_2 = R^2[a_1(v_1 - \bar{\alpha}_1) + a_2 \frac{v_2}{R}] \end{cases} \quad (19)$$

由引理1可以看出, 跟踪微分器可以快速、精确的获得实际虚拟控制量  $v_1$  以及其精确微分值, 采用  $v_1$  为实际虚拟控制输入。

第2步, 定义第2个动态面  $s_2$ :

$$s_2 = x_2 - v_1 \quad (20)$$

其导数为

$$\dot{s}_2 = \dot{x}_2 - \dot{v}_1 \quad (21)$$

根据滑模变结构理论, 切换函数设计为

$$s = c_1 s_1 + s_2 \quad (22)$$

式中  $c_1 > 0$ , 取 Lyapunov 函数

$$\dot{V}_2 = \frac{1}{2} S^2 \geq 0 \quad (23)$$

对(23)式求导得

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 = s \dot{s} = s(c_1 \dot{s}_1 + \dot{s}_2) = \\ s[c_1(x_2 - \dot{x}_d) + (-Ax_2 + Bu) - \dot{v}_1] \end{aligned} \quad (24)$$

为了使  $\dot{V}_2 < 0$ , 设计控制律如下:

$$\begin{aligned} u = \frac{1}{B} [\dot{v}_1 - c_1(x_2 - \dot{x}_d) + Ax_2 - \\ k_2 s - \eta fal(\cdot)] \end{aligned} \quad (25)$$

式中  $k_2 > 0$ , 为了削弱滑模控制存在的高频抖振现象, 引入非线性  $fal(\cdot)$  函数, 其定义如下:

$$fal(e, \alpha, \delta) = \begin{cases} |e|^\alpha \text{sign}(e), & |e| > \delta \\ e/\delta^{1-\alpha}, & |e| \leq \delta \end{cases} \quad (26)$$

式中:  $\delta$  为线性因子;  $\alpha$  为非线性因子;  $e$  为输入误差。(26)式具有大误差、小增益、小误差、大增益的特点, 这是传统的饱和函数  $sat(\cdot)$  不具备的。

本节所设计的滑模动态面控制器首先在传统动态面中引入上节所设计的跟踪微分器, 解决了传统动态面中一阶滤波器收敛速度慢, 控制精度不理想问题, 大大提高了快速反射镜系统的响应速度, 减小了对目标的跟踪误差, 使系统具有更好的跟踪精度, 然后结合对参数及扰动不灵敏的滑模控制, 由于滑模控制会在动态过程中迫使系统按照原定的“滑动模态”状态轨迹运动, 且此“滑动模态”设计时与被控对象参数和扰动无关, 所以引

入滑模控制可以使快速反射镜系统具有更强的抗干扰能力, 克服了跟踪、捕获、瞄准过程中的不确定性干扰, 而且 SMDSC 参数设计简单, 降低了控制器的复杂性。

### 3 Simulink 仿真研究

#### 3.1 仿真参数设置

文中选用美国 Newport 公司的 FSM-002-02 型号快速反射镜, 其参数如表1所示:

表1 快速反射镜主要参数

Table 1 Main parameters of FSM

参数名	符号	数值
快速反射镜半径/m	$r$	0.025
转动惯量/(kg·m <sup>2</sup> )	$J$	0.000 027
阻尼系数/(N·s·m <sup>-1</sup> )	$c$	0.055
线圈电阻/ $\Omega$	$R$	2
线圈电感/mH	$L$	1.3
电机力常数/(N/A)	$k_s$	19.6

SMDSC 控制器的参数设置如下:

$$k_1 = 30\ 000, k_2 = 13\ 000, c_1 = 200, \eta = 1\ 100\ 000$$

非线性跟踪微分器:

$$R = 50, a_1 = -0.2, a_2 = -0.3$$

$fal(\cdot)$  中的参数:

$$\alpha = -0.8, \delta = 0.1$$

#### 3.2 仿真及分析

##### 3.2.1 系统快速性仿真分析

选用 Matlab/Simulink 验证所设计的滑模动态面控制器性能。图2为输入为单位阶跃信号时, 虚拟控制指令理论值与实际值(即  $\bar{\alpha}_1$  和  $v_1$ ) 的对比曲线。

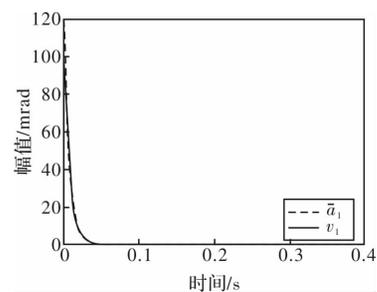


图2 滑模动态面虚拟控制指令曲线

Fig. 2 Virtual control instruction curve of SMDSC

图2中可以看出跟踪微分器的输出  $v_1$  可以在很短时间内精确收敛到  $\bar{\alpha}_1$ , 从而说明了跟踪微分器快速、良好的跟踪效果。为了进一步说明滑模动态面控制器的快速性, 给快速反射镜系统输入幅值为1的单位阶跃信号, 对所设计的滑模动态

面,传统动态面以及经典 PID 3 种控制器进行了对比分析,如图 3 所示。

给快速反射镜系统施加幅值为 1 的单位阶跃输入,从图 3 中可以得到以下结论,本文提出的 SMDSC 使系统可以无超调地快速跟踪单位阶跃信号,传统动态面控制虽然没有超调,但是其响应速度并没有 SMDSC 的优越。SMDSC、传统动态面以及经典 PID 的上升时间分别为 15 ms,40 ms 以及 60 ms,系统到达稳态的时间分别是 18

ms,65 ms 以及 160 ms,滑模动态面控制器较后两者在上升时间上分别提高了 62.5%,75%;在调节时间上分别提升了 72%,88%,说明本文提出的 SMDSC 策略具有良好的动态性能。

### 3.2.2 系统抗干扰仿真分析

为了进一步验证 SMDSC 策略的优越性,在 0.2 s 处人为地给系统施加幅值为 5 单位阶跃扰动,对比 SMDSC,传统动态面控制以及经典 PID 控制的抗干扰能力,结果如图 4 所示。

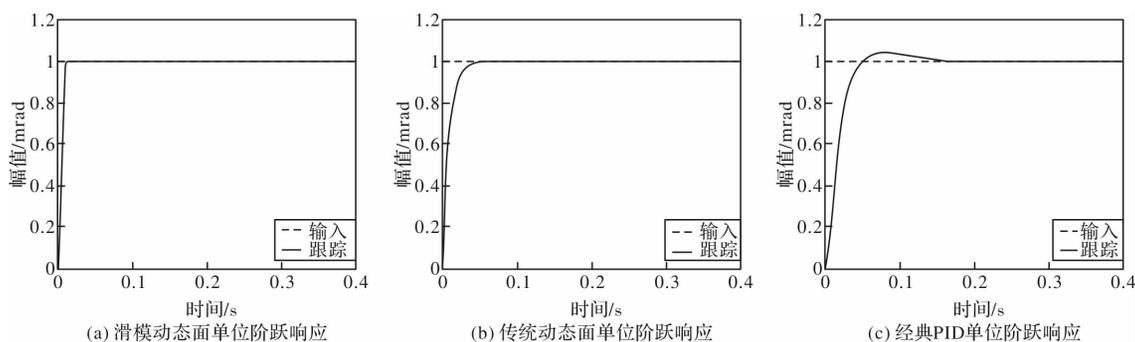


图 3 幅值为 1 的阶跃响应

Fig. 3 Step response with amplitude of 1

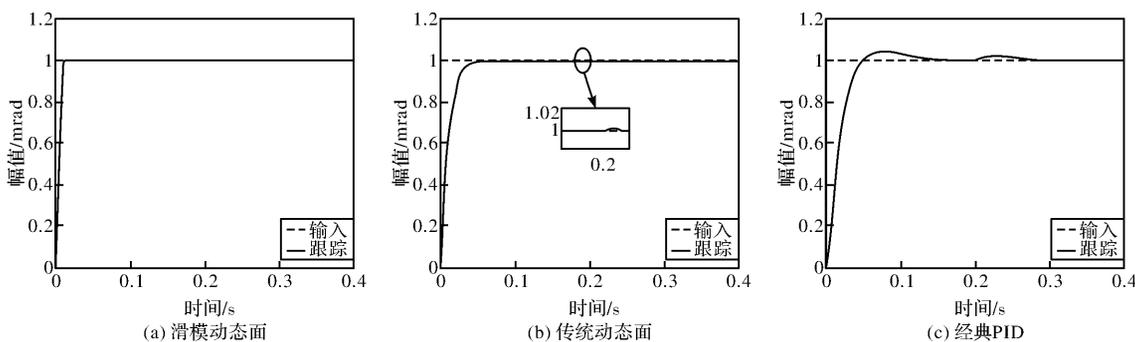


图 4 扰动为 5 的单位阶跃响应

Fig. 4 Unit step response with disturbance of 5

从图 4 中可以看出,当系统加入幅值为 5 的阶跃扰动时,扰动对滑模动态面算法控制的快速反射镜系统几乎没有影响,而传统动态面控制器鲁棒性较滑模动态面来说会差一些,经典 PID 控制很明显没有前两种控制器的抗干扰能力强,这表明了本文所设计的 SMDSC 控制器具有较强的适应性以及鲁棒性。

### 3.2.3 系统跟踪精度仿真分析

对系统输入周期为 250 ms 的正弦信号,分别验证滑模动态面控制策略,传统动态面控制以及经典 PID 控制的控制效果,其结果如图 5、图 6 和图 7 所示。

图 5 为输入为正弦信号时,虚拟控制指令理论与实际值的对比曲线。图 5 中可以看出,跟踪微分器具有优良的控制效果。

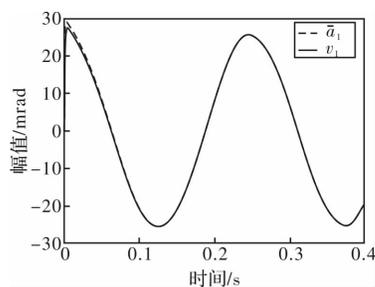


图 5 滑模动态面虚拟控制指令曲线

Fig. 5 Virtual control instruction curve of SMDSC

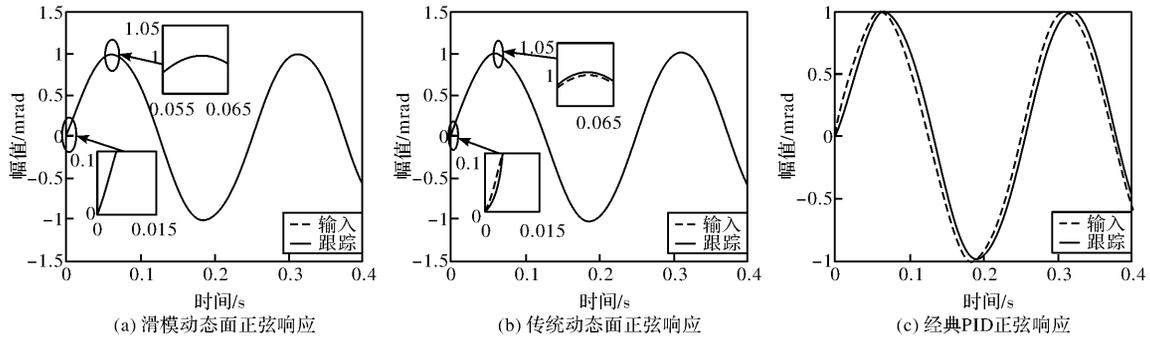


图6 正弦响应曲线

Fig. 6 Sinusoidal response curve

从图6可以发现,经典PID控制的跟踪精度远远不如前2种控制策略,传统动态面控制在跟踪起始时误差较大,而滑模动态面控制跟踪效果比较理想。图7是3种控制策略对250 ms正弦信号的跟踪误差。

从图7中可以看出,滑模动态面控制,传统动态面控制,以及经典PID控制的最大跟踪误差分别为0.004 8、0.019以及0.13,本文提出的滑模动态面算法较动态面以及经典PID算法跟踪精度分别提高了75%、96%,大大提升了FSM系统的稳态性能。

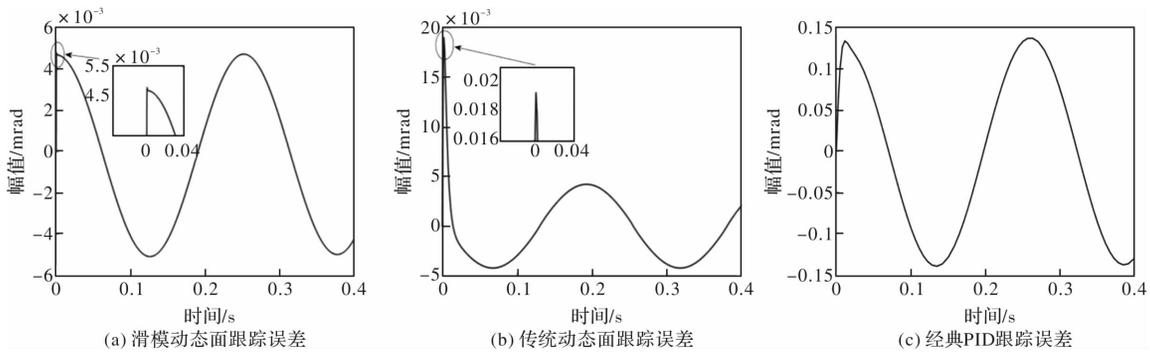


图7 正弦跟踪误差曲线

Fig. 7 Sinusoidal tracking error curve

## 4 结论

文中先由机理建模方法得到了VCA驱动的FSM二阶数学模型,针对传统动态面算法中一阶滤波器收敛速度和控制精度不理想问题,引入跟踪微分器,为了提高鲁棒性和跟踪精度,将滑模控制和动态面控制相结合,提出了滑模动态面控制。通过仿真研究发现,SMDSC较传统动态面控制以及经典PID控制具有更好的动态性能和稳态性能,同时具有较强的鲁棒性和适应性,可以满足快速反射镜系统对快速性,高精度以及抗干扰能力的要求。

### 参考文献:

[1] FANG Chu. Design and research on fast steering mirror system used in beam steering control devices

[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, 2017.

方楚. 光束指向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.

[2] JIAO Zhongke. Research on key technologies in intersatellite optical communication[D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics Chinese Academy of Sciences, 2017.

焦仲科. 星间激光通信若干关键技术研究[D]. 成都:中国科学院光电技术研究所, 2017.

[3] LOU Lixuan, ZHANG Feng. Stabilization of laser beam position based on a closed-loop fast steering mirror system; Oceans 2017 [C]. Aberdeen: [s. n.], 2017.

[4] XU Feifei, LIU Sha, YIN Mingdong, et al. Performance comparison and analysis of coarse and fine com-

- bined stabilization control system based on mirror compensation[J]. *Journal of Applied Optics*, 2013, 34(1):15-20.
- 徐飞飞,刘莎,尹明东,等. 基于反射镜补偿的粗精组合稳定控制系统性能对比与分析[J]. *应用光学*, 2013, 34(1):15-20.
- [5] LIU Bo, GUO Jianying, SUN Yongquan. Modeling and control for PZT micro-displacement actuator[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(6):1503-1509.
- 刘泊,郭建英,孙永全. 压电陶瓷微位移驱动器建模与控制[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(6):1503-1509.
- [6] LONG Baijun, OU Long, XIANG Rujian, et al. Optimization of control strategy for FSM system by using simulated annealing algorithm[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(9):2232-2239.
- 龙柏君,欧龙,向汝建,等. 利用模拟退火优化快速反射镜控制策略[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(9):2232-2239.
- [7] ERNST C, GEORGE S. Parametric PID controller tuning for a fast steering mirror; IEEE Conference on Control Technology & Applications, Hawaii, August 27-30, 2017[C]; USA: IEEE, 2017.
- [8] WANG Geng, RAO Changhui. Adaptive control of piezoelectric fast steering mirror for high precision tracking application[J]. *Smart Materials and Structures*, 2015, 24(3):35019.
- [9] LI Xiantao, ZHANG Xiaopei, MAO Dapeng, et al. Adaptive robust control over high-performance VCM-FSM[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(9):2428-2436.
- 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, 25(9):2428-2436.
- [10] DING Ke, HUANG Yongmei, MA Jianguang, et al. Error adaptive feedforward composite control of fast-steering-mirror[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(7):184-189.
- 丁科,黄永梅,马佳光,等. 快速反射镜的误差自适应前馈复合控制[J]. *中国激光*, 2011, 38(7):184-189.
- [11] YANG Dong, MAO Yao, DING Ke, et al. Application of model reference adaptive algorithm in fast-steering mirrors[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(10):1697-1702.
- 杨东,毛耀,丁科,等. 模型参考算法在快速反射镜中的应用[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(10):1697-1702.
- [12] AI Zhiwei, TAN Yi, WU Qiongyan, et al. Fuzzy compensation control of disturbance signal in fast steering mirror[J]. *Laser & Infrared*, 2017, 47(2):210-215.
- 艾志伟,谭毅,吴琼雁,等. 快速反射镜扰动信息的模糊补偿控制[J]. *激光与红外*, 2017, 47(2):210-215.
- [13] TIAN Fuqing, LI Keyu, WANG Yu, et al. Adaptive backstepping sliding mode control of fast steering mirror driven by piezoelectric actuator [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26(1):59-63.
- 田福庆,李克玉,王钰,等. 压电驱动快速反射镜的自适应反演滑膜控制[J]. *强激光与粒子束*, 2014, 26(1):59-63.
- [14] GUO Lidong. The controller of stabilized platform for shipborne laser weapons[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2010.
- 郭立东. 舰载激光武器稳定平台控制技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2010.
- [15] LI Juan, QIU Junting, GAO Haitao. Design and application of dynamic surface auto-disturbance rejection control for nonlinear systems[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2017, 38(8):1278-1284.
- 李娟,邱军婷,高海涛. 非线性系统的动态面自适应抗扰控制器设计及应用[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2017, 38(8):1278-1284.
- [16] LI Liang, XIE Jian, HUANG Jianzhao. Dynamic surface sliding mode control for large hydraulic erecting system [J]. *Acta Armamentarii*, 2014, 35(2):235-240.
- 李良,谢建,黄建招. 动态面滑模控制在大型液压起竖系统中的应用研究[J]. *兵工学报*, 2014, 35(2):235-240.
- [17] ZHAI Lixiang, QIAN Moshu, LIU Jianwei. Fault-tolerant control scheme of sliding mode dynamic surface for uav attitude control system[J]. *System Simulation Technology*, 2017(3):246-251.
- 翟丽相,钱默抒,刘剑慰. 无人机姿态控制系统滑模动态面容错控制方法[J]. *系统仿真学报*, 2017(3):246-251.
- [18] YOUM W, LEE S, PARK K. Optimal design and control of voice coil motor driven flexure hinge for AFM actuator [C]//IEEE/ASME Conference on ASME 2005. USA: IEEE, 2005: 325-328.
- [19] DENG Yaochu. The light-beam pointing stability techniques based on FSM[D]. Xi'an: Xidian University, 2008.
- 邓耀初. 基于快速反射镜的光束指向稳定技术[D]. 西安:西安电子科技大学, 2008.

- [20] ZHANG Shen, WANG Qing, DONG Zhaoyang, et al. Reduced step control of hypersonic vehicle based on tracking differentiator[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2017, 43(10): 2054-2062.  
张伸,王青,董朝阳,等. 基于跟踪微分器的高超声速飞行器减步控制[J]. 北京航空航天大学学报, 2017, 43(10): 2054-2062.
- [21] YANG Junhua, WU Jie. Backstepping method and its applications to nonlinear robust control[J]. Control and Decision, 2002, 17(s1): 641-647.  
杨俊华,吴捷. 反步方法原理及在非线性鲁棒控制中的应用[J]. 控制与决策, 2002, 17(s1): 641-647.
- [22] HAN Jingqing, WANG Wei. Nonlinear tracking differentiator [J]. Journal of Systems Science and Mathematical Science, 1994, 14(2): 177-183.  
韩京清,王伟. 非线性跟踪-微分器[J]. 系统科学与数学, 1994, 14(2): 177-183.
- [23] GUO Baozhu, ZHAO Zhiliang. On convergence of tracking differentiator and application to frequency estimation of sinusoidal signals[J]. Control Conference, 2011, 53(12): 1470-1475.