

基于改进蜻蜓算法的快反镜积分终端滑模控制

冯建鑫, 李昊阳, 巩建雄, 龚柏春

(南京航空航天大学 航天学院, 南京 210016)

摘要: 为提高空间激光通信跟瞄系统中快反镜(FSM)的跟踪精度和抗干扰能力, 设计了新型积分快速非奇异终端滑模控制器。通过设计积分快速非奇异终端滑模面, 提高了滑动模态阶段性能, 同时设计新型的指数型趋近率, 提高趋近阶段动态品质。利用蜻蜓算法(DA)对控制器参数进行优化, 以提高系统的动态性能并保证较强的鲁棒性。针对传统蜻蜓算法的不足, 对蜻蜓算法的惯性因子、队列权重、聚集权重的调整方式进行改进, 并引入逐维评价机制及改进正余弦算法的位置更新机制, 进一步提高蜻蜓算法的寻优能力。最后, 通过仿真验证了本文方法在快反镜控制过程中的有效性。

关键词: 快速反射镜; 非奇异终端滑模; 积分滑模; 蜻蜓算法; 参数优化

中图分类号: TP 273 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2025)11-3745-06

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20240112

Integral terminal sliding mode controller of fast steering mirror based on improved dragonfly algorithm

FENG Jian-xin, LI Hao-yang, GONG Jian-xiong, GONG Bai-chun

(Academy of Astronautics, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In order to improve the tracking accuracy and anti-interference ability of the fast steering mirror (FSM) in the space laser communication tracking and aiming system, a new integral fast non-singular terminal sliding mode controller was designed. By designing an integral fast non-singular terminal sliding surface, the performance of the sliding mode stage is improved, and a new exponential convergence rate is designed to improve the dynamic quality of the convergence stage. The dragonfly algorithm(DA) was used to optimize the controller parameters, in order to improve the dynamic performance of the system and ensure strong robustness, in view of the shortcomings of the traditional DA, the adjustment methods of the inertia factor, queue weight, and aggregation weight of the DA are improved, it also introduces a dimension-by-dimension evaluation mechanism and an improved position update mechanism of the Sine cosine algorithm to further improve the optimization capability of the DA. Finally, the effectiveness of the proposed method in the fast mirror control process was verified through simulation.

Key words: fast steering mirror; nonsingular terminal sliding mode; integral sliding mode; dragonfly algorithm; parameter optimization

收稿日期: 2024-02-28.

基金项目: 国家自然科学基金项目(12272168).

作者简介: 冯建鑫(1982-), 男, 副教授, 博士. 研究方向: 复合轴控制, 激光通信高精度跟瞄机构伺服控制系统设计.

E-mail: fengjx@nuaa.edu.cn

0 引言

空间激光通信应用中要求快反镜(Fast steering mirror, FSM)有较高的跟踪精度和抗扰能力^[1],传统PID控制器虽然得到了广泛应用,但是其控制精度和对扰动的抑制能力不能很好地满足空间激光通信对FSM的要求。为了更好地保障高速率空间激光通信质量,提高FSM的精度和抗扰能力,国内外研究人员采用自抗扰控制^[2]、模糊控制^[3]、神经网络控制^[4]、滑模变结构控制^[5]等方法,对快反镜进行了广泛研究。其中,滑模控制因其快速性、强鲁棒性和简单可行的优点而被广泛应用^[6]。然而传统的滑模控制采用线性滑模面,只能保证系统渐近收敛,此外变结构控制在滑动模式下伴随抖振。终端滑模(Terminal sliding mode, TSM)相较于线性滑模控制能保证系统状态在有限时间内收敛到平衡点,它的缺点是控制律存在奇异。文献[7]提出一种非奇异终端滑模面,解决了控制量无穷大的问题,但当系统状态到达远离平衡点的滑模面时,相较于相同参数的线性滑模面,收敛速度较慢;文献[8]提出了一种新型快速非奇异终端滑模面,将线性滑模面在远离平衡点处收敛速度较快与非奇异终端滑模面有限时间收敛的优点相结合,提高了系统状态在远离原点处的收敛速度。

本文提出了一种积分快速非奇异终端滑模控制方法,该方法将快速非奇异终端滑模面与积分滑模思想结合,通过设计积分项,避免传统积分滑模的Windup效应;又设计了一种变增益的指数型趋近率,提高趋近阶段动态品质;另外,提出一种新的改进蜻蜓算法(Improved dragonfly algorithm, IDA),用于控制参数优化,提高控制品质并降低滑模控制器输出抖振。将本文方法应用于快反镜,能提高快反镜控制性能。

1 非线性积分滑模控制器的设计

1.1 积分滑模面设计

选用新型快速非奇异终端滑模面^[8]结合积分型滑模控制思想,本文提出一种新型积分快速非奇异终端滑模面,表达式如式(1)所示:

$$\begin{cases} s = e + \beta |\dot{e}|^q \operatorname{sgn}(\dot{e}) + k \int_0^t g(e) |\dot{e}|^{q-1} dt \\ q = \delta + (1 - \delta) \operatorname{sgn}(|e| - \epsilon) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $1 < \delta < 1.5$; $\epsilon \geq 1$; $\beta > 0$; $k > 0$; $g(e)$ 为误

差 e 的函数,采用“大误差限幅,小误差放大”的思想设计,对其积分可减小系统稳态误差,有效避免传统积分滑模的Windup效应。

本文所设计的 $g(e)$ 函数式为:

$$g(e) = \begin{cases} h \operatorname{sgn}(e), & |e| \geq h \\ h \left(\frac{e}{h}\right)^{\frac{1}{3}} + l h \sin\left(\frac{\pi e}{h}\right), & |e| < h \end{cases} \quad (2)$$

1.2 趋近律改进

本文提出一种新型指数型趋近律,相较于传统指数趋近律有更快的趋近速度,同时设计变速项,起到削弱抖振的作用,其表达式如下:

$$\dot{s} = -\lambda(e) \operatorname{sgn}s - \eta |s|^\alpha s \quad (3)$$

$$\text{其中: } \lambda(e) = \begin{cases} \lambda_b & |e| \geq \lambda_b \\ \sqrt{\lambda_b^2 - (|e| - \lambda_b)^2} & |e| < \lambda_b \end{cases}; \alpha =$$

$\gamma \operatorname{sgn}(|s| - 1)$, 变量满足关系 $0 < \gamma < 1$ 。

1.3 滑模控制设计

快反镜系统通常可简化为二阶模型,表示为:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f(x, t) + b(x, t)u(t) + d(t) \\ y = x_1 \end{cases} \quad (4)$$

式中: 系统状态 $x = [x_1, x_2]^T \in R^2$, 控制量 $u(t) \in R$, 系统输出 $y \in R$; $\hat{f}(x, t)$ 为 $f(x, t)$ 的估计值,且 $|\Delta f(x, t)| = |f(x, t) - \hat{f}(x, t)|$ 。

$\Delta f(x, t) + d(t)$ 为系统参数摄动与外部干扰之和,假设 $\Delta f(x, t) + d(t)$ 有界。

使用式(1)设计的滑模面, $e = x - x_d$, x_d 为期望输出。对式(1)中 s 求导得:

$$\dot{s} = \dot{e} + \beta q |\dot{e}|^{q-1} \ddot{e} + kg(e) |\dot{e}|^{q-1} \quad (5)$$

使用本文提出的趋近律(3),令:

$$\begin{aligned} \dot{s} = & (-\lambda(e) \operatorname{sgn}s - \eta |s|^\alpha s + \Delta f(x, t) + \\ & d(t)) \beta q |x_2 - \dot{x}_d|^{q-1} \end{aligned} \quad (6)$$

将系统方程(4)代入(5)可得:

$$\begin{aligned} \dot{s} = & x_2 - \dot{x}_d + \beta q |x_2 - \dot{x}_d|^{q-1} [\hat{f}(x, t) + \Delta f(x, t) + \\ & b(x, t)u(t) + d(t) - \ddot{x}_d] + kg(x_1 - x_d) |x_2 - \dot{x}_d|^{q-1} = \\ & (-\lambda(e) \operatorname{sgn}s - \eta |s|^\alpha s + \Delta f(x, t) + \\ & d(t)) \beta q |x_2 - \dot{x}_d|^{q-1} \end{aligned} \quad (7)$$

设计的控制律为:

$$\begin{aligned} u = & b(x, t)^{-1} [-|x_2 - \dot{x}_d|^{2-q} / (\beta q) \operatorname{sgn}(x_2 - \dot{x}_d) + \\ & \ddot{x}_d - kg(x_1 - x_d) / (\beta q) - \lambda(e) \operatorname{sgn}s - \eta |s|^\alpha s - \\ & \hat{f}(x, t)] \end{aligned} \quad (8)$$

1.4 稳定性证明

选取李雅普诺夫函数为 $V = 1/2s^2$, 求导可得:

$$\begin{aligned} \dot{V} = & s [(-\lambda(e) \operatorname{sgn} s - \eta |s|^a s + \Delta f(x, t) + \\ & d(t)) \beta q |x_2 - \dot{x}_d|^{q-1}] \leq \\ & [-\lambda(e) |s| - \eta |s|^{a+2} + (\Delta f(x, t) + \\ & d(t)) |s|] \beta q |x_2 - \dot{x}_d|^{q-1} = \\ & [(-\lambda(e) + \Delta f(x, t) + d(t)) |s| - \\ & \eta |s|^{a+2}] \beta q |x_2 - \dot{x}_d|^{q-1} \end{aligned} \quad (9)$$

令 $\lambda_b \geq \Delta f(x, t) + d(t)$, 可得 $\dot{V} \leq 0$ 。根据李雅普诺夫稳定性理论, 该滑模控制器可以到达滑模面。

上述控制器性能主要受 4 个参数 ($\beta, \lambda_b, k, \eta$) 影响, 手动调参依赖调参者经验且需较多时间, 为达到更好的控制效果, 本文设计了一种基于改进蜻蜓算法的自适应滑模控制, 通过改进蜻蜓算法优化控制器参数, 减弱系统抖振, 提高控制精度。

2 蜻蜓算法

2.1 改进的蜻蜓算法

传统的蜻蜓算法在应用中常出现收敛速度慢、精度低、容易陷入局部最优等现象^[9]。针对这些情况, 本文提出以下改进措施: ①调整惯性因子、队列权重、聚集权重的更新曲线; ②采用逐维更新评价策略; ③引入改进正余弦优化算法的位置更新机制。通过 3 种改进从整体上提高算法的寻优性能。

2.1.1 惯性因子更新曲线的调整

传统的蜻蜓算法惯性因子 ω 在搜索过程中按照线性方式递减。然而, 算法前期维持较大的 ω 值更有利于全局搜索, 算法后期 ω 值快速减小更有利于局部开发, 加快收敛速度。本文设计的惯性因子更新曲线如下:

$$\omega(i) = \omega_{\max} - (\omega_{\max} - \omega_{\min}) \left(\frac{\mu_i}{\mu_{\max}} \right)^3 \quad (10)$$

2.1.2 队列权重、聚集权重更新曲线的调整

为了提高全局搜索效率, 算法前期采用较高的队列权重和较低的聚集权重, 在算法后期采用较高的聚集权重和较低的队列权重提高局部搜索效率。按照上述改进思想, 将队列权重和聚集权重改进为按照非线性曲线更新。表达

式如下:

$$a = 2 \cdot r \cdot [0.1 - 0.1 \left(\frac{\mu_i}{\mu_{\max}} \right)^3] \quad (11)$$

$$c = 0.2 \cdot r \cdot \left(\frac{\mu_i}{\mu_{\max}} \right)^3 \quad (12)$$

2.1.3 逐维更新的评价策略

传统的蜻蜓算法通常采取个体内各维度全部更新完后统一评价的策略, 而采取逐维更新评价策略则可以分别考虑各维度值的更新效果, 对于对个体适应度没有正向影响的维度更新可以选择拒绝, 仅选择能改善个体适应度的更新值。保障了某一维度的进化不会因为其他维度退化而被忽略, 算法后期加入提高解的质量和算法的收敛速度。

2.1.4 改进正余弦优化算法的位置更新机制

蜻蜓算法融合改进正余弦算法的位置更新机制, 实现蜻蜓个体位置更新既受到个体最优位置影响, 又受到种群的历史最优位置影响^[10]。同时结合正余弦算法较强的搜索能力和避免陷入局部最优的能力^[11]。结合两种算法的特点, 将标准正余弦算法参数数量简化, 在保持原算法性能的基础上降低公式复杂度。每次迭代中蜻蜓邻域内有其他个体时, 位置更新公式如下:

$$\begin{aligned} x_{t+1} = & \begin{cases} x_t + r_1 \cdot \sin(r_2) \cdot (\Delta x_{t+1} + |x^* - x_t|) & r_1 < 0.5 \\ x_t + r_1 \cdot \cos(r_2) \cdot (\Delta x_{t+1} + |x^* - x_t|) & r_1 \geq 0.5 \end{cases} \end{aligned} \quad (13)$$

式中: $r_1 = \operatorname{rand}(0, 1)$; $r_2 = \operatorname{rand}(0, 2\pi)$; x^* 为该蜻蜓个体历史最优位置。

2.2 测试函数

如表 1 所示, 为了验证改进蜻蜓算法的收敛速度和算法的综合性能, 将改进前后的算法进行对比试验, 选择 8 个基准函数进行测试, 设置种群大小为 20, 迭代次数为 50 次, 验证算法在多维、单

表 1 标准测试函数

函数名	维数	搜索区间
香蕉函数	10	$[-30, 30]$
拉斯特里金函数	10	$[-5.12, 5.12]$
阿克力函数	10	$[-32, 32]$
格栅函数	10	$[-600, 600]$
惩罚函数	10	$[-50, 50]$
谢克尔函数	2	$[-65.536, 65.536]$
科瓦利克函数	4	$[-5, 5]$
驼峰函数	2	$[-5, 5]$

局部极值、多局部极值等不同情况下的表现,分别独立运行 30 次,选取均值和最小寻优值为测试结果见表 2。

表 2 标准函数测试结果

Table 2 Results of standard function

函数名	IDA		DA	
	最小值	平均值	最小值	平均值
香蕉函数	76.226 3	4 784.9	359.672	20 095
拉斯特里金函数	9.604 6	37.806 9	14.288 7	44.059 4
阿克力函数	3.054 7	5.745 9	4.541 6	8.238 3
格栅函数	1.093 2	2.153 4	1.106 7	3.357 2
惩罚函数	0.878 9	55.325 2	1.218	298.877 3
谢克尔函数	0.998	2.749 9	0.998	5.921
科瓦利克函数	5.56E-04	0.001 5	8.48E-04	0.008 3
驼峰函数	-1.031 6	-1.031 6	-1.031 6	-1.031 6

3 FSM 模型

本文研究的 FSM 的电压-位置开环传递函数如下:

$$G(s)=\frac{148\ 536}{s^2+45.97s+5\ 871}\quad(14)$$

选取时间绝对误差积分准则 ITAE 函数作为优化算法的适应度函数,表达式如下:

$$J=\int_0^{\infty}t|e(t)|dt\quad(15)$$

式中: $e(t)$ 为系统误差; t 为时间。

仿真参数做如下设置:蜻蜓种群数量为 20,迭代结束次数为 50,惯性权重的最大值为 0.9,最小值为 0.4,待优化参数 $(\beta, \lambda_b, k, \eta)$ 的下界设置为 $[0.000\ 01, 0.001, 0.000\ 1, 500]$,上界设置为 $[2, 100, 2, 10\ 000\ 000]$ 。

4 数值仿真

将本文提出的新型趋近律与指数趋近律进行比较,滑模面选择本文提出的滑模面。新型趋近律的参数如下: $\lambda_b=10, \eta=2\ 500, \gamma=0.5$ 。指数趋近律 $\dot{s}=-\lambda'\text{sgn}s-\eta's$ 的参数如下: $\lambda'=10, \eta'=2\ 500$ 。跟踪幅值为 1 mrad 的阶跃信号,结果如图 1 所示。

将本文提出的滑模面与传统积分滑模面及新型快速非奇异终端滑模结合普通积分项构成的积分滑模面进行比较,趋近律采用本文提出的趋近律,本文提出的滑模面参数为 $k=0.05, \beta=0.01, h=0.2, l=0.01, \epsilon=1, \delta=1.2$,传统积

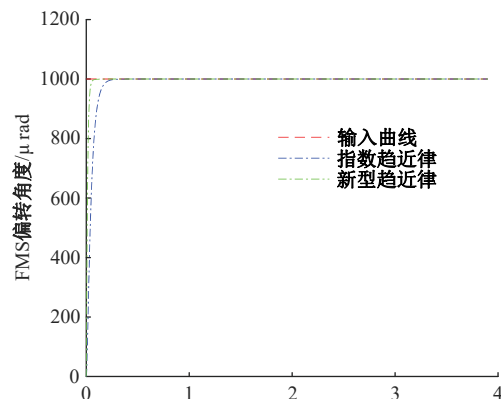


图 1 阶跃信号下两种趋近律的输出响应对比图

Fig. 1 Comparison of the output responses of the two approach laws when tracking step signals

分滑模面 $s=e+\beta'\dot{e}+k'\int_0^t e dt$ 的参数设置为 $\beta'=0.07, k'=0.05$,新型快速非奇异终端滑模结合普通积分项构成的积分滑模面 $s=e+\beta''|\dot{e}|^q\text{sgn}(\dot{e})+k''\int_0^t e|\dot{e}|^{q''-1}dt, q''=\delta''+(1-\delta'')\text{sgn}(|e|-\epsilon'')$ 的参数设置为 $\beta''=0.07, k''=0.05, \epsilon''=1, \delta''=1.2$ 。仿真结果如图 2 所示。

由图 1 可以看出,本文提出的趋近律速度优于指数趋近律的趋近速度。从图 2 可以看出,本文提出的滑模面在消除稳态误差方面有更优越的性能。

系统跟踪正弦信号幅值-频率为 20 μrad-40 Hz 采用文献[2]中的滤波器模拟星体振动,控制器参数分别用改进前后的蜻蜓算法进行优化,表 3 为优化后控制器的 4 个参数和适应度最小值,图 3 为两种算法的适应度收敛情况,图 4 为模拟卫星振动信号。

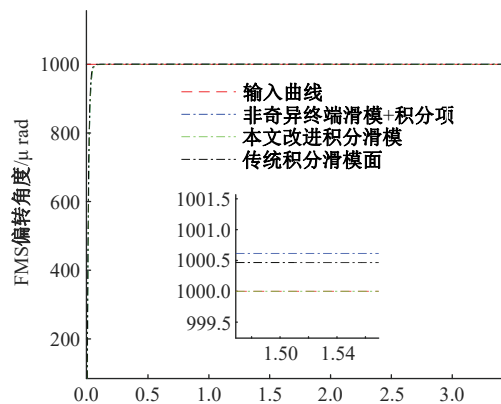


图 2 3 种积分滑模面的输出响应对比图

Fig. 2 Comparison of output responses of the three integral sliding mode surfaces

表 3 优化后的控制器参数及相应最小适应度值

Table 3 Optimized controller parameters and corresponding minimum fitness values

算法	β	λ_b	k	η	Minfit
DA	3.46×10^{-3}	74.291 2	0.148 5	6.67×10^5	$4.060 9 \times 10^{-4}$
IDA	1.18×10^{-3}	17.349 2	0.154 6	2.90×10^6	$2.473 7 \times 10^{-4}$

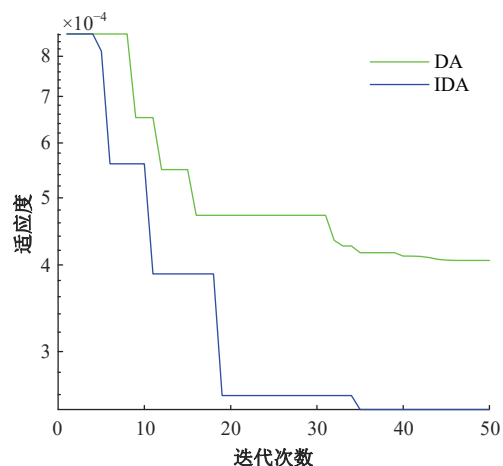


图 3 适应度函数收敛曲线

Fig. 3 Fitness function convergence curve

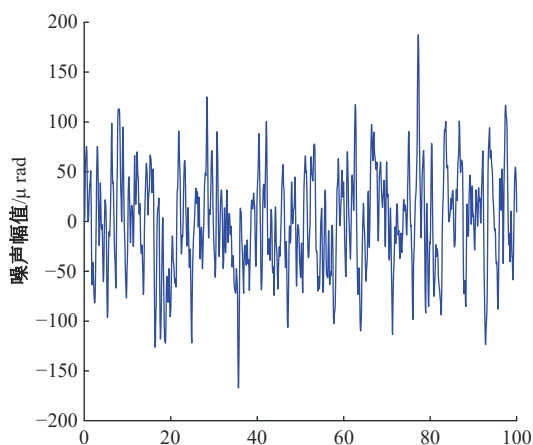


图 4 模拟卫星振动信号

Fig. 4 Signals that simulate satellite vibrations

从图 3 可以看出,在算法搜索前期 IDA 比 DA 有较快收敛速度,算法后期寻优能力也相对较强,针对本文的参数优化问题能找到更优解。

为了验证改进蜻蜓算法及本文提出的新型积分滑模的优越性,将改进前后的蜻蜓算法整定的参数分别应用于本文提出的积分滑模及传统积分滑模,传统积分滑模选择指数趋近律。跟踪幅值-频率为 $20 \mu\text{rad}$ - 40 Hz 高频正弦信号,并与传统 PID 控制器和进行比较。PID 控制器参数通过试凑法取得,分别为: $k_p = 30$, $k_i = 16$, $k_d = 0.013$ 。加入扰动前后稳态误差对比如图 5、图 6 所示。

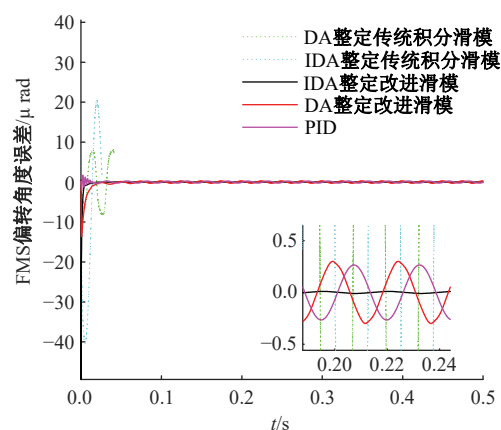


图 5 未加扰动稳态误差对比图

Fig. 5 Comparison of steady-state error without disturbance

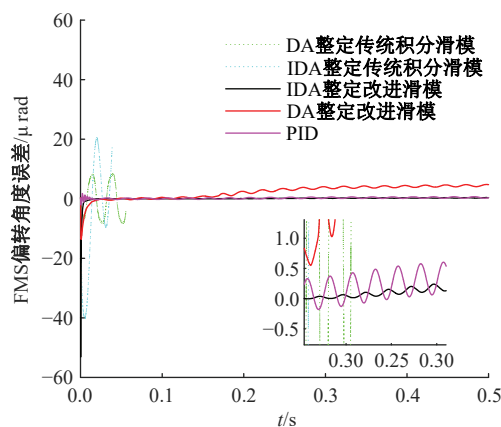


图 6 添加扰动后稳态误差对比图

Fig. 6 Steady-state error comparison chart after adding disturbance

由图 5 可以看出,IDA 整定的参数应用于本文改进滑模控制器,跟踪稳态误差小于 DA 整定的参数应用于本文改进滑模控制器。IDA 整定的参数相较于 DA 整定的参数应用于本文改进滑模控制器达到稳态所需时间更短。由图 6 可以看出,IDA 整定的参数应用于本文改进滑模控制器相较于传统 PID 控制器有更好的抗扰性和更高的稳态精度。此外,在相同参数条件下,本文改进积分滑模控制器比传统积分滑模控制器对 FSM 有更好的控制效果。

5 结束语

本文针对快反镜的高性能控制问题,提出一种新型积分快速非奇异终端滑模控制方法。针对滑动模态阶段,本文结合快速非奇异终端滑模面和改进积分项设计了一种非线性积分滑模面,提高了滑动模态阶段性能。为提高趋近阶段动态性

能,本文在指数趋近律基础上提出了一种新型指数趋近律,提高趋近速度,并可削弱抖振现象。针对控制器参数优化问题,改进了蜻蜓算法用于参数整定,提高了蜻蜓算法的寻优速度和精度。最后通过仿真验证了研究成果的有效性。

参考文献:

- [1] 张士涛, 张葆, 李贤涛, 等. 基于零相差轨迹控制方法提升快速反射镜性能[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2018, 48(3): 853-858.
- Zhang Shi-tao, Zhang Bao, Li Xian-tao, et al. Enhancing performance of FSM based on zero phase error tracking control[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2018, 48(3): 853-858.
- [2] 崔宁, 陈兴林, 曹开锐, 等. 空间光通信精跟踪系统的模糊自抗扰控制[J]. 光学精密工程, 2015, 23(5): 1394-1400.
- Cui Ning, Chen Xing-lin, Cao Kai-rui, et al. Fuzzy active disturbance rejection control of fine tracking system for free space optical communication[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(5): 1394-1400.
- [3] Alvi A B, Asif M, Siddiqui A F, et al. Fast steering mirror control using embedded self-learning fuzzy controller for free space optical communication[J]. Wireless Personal Communications, 2014, 76(3): 643-656.
- [4] 王瑞, 苏秀琴, 乔永明, 等. 基于双前馈+双神经网络自适应快速反射镜的解耦控制[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(11): 231-237.
- Wang Rui, Su Xiu-qin, Qiao Yong-ming, et al. Decoupling control of fast steering mirror based on dual feedforward + dual neural network adaptive[J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(11): 231-237.
- [5] 田福庆, 李克玉, 王珏, 等. 压电驱动快速反射镜的自适应反演滑模控制[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(1): 65-69.
- Tian Fu-qing, Li Ke-yu, Wang Jue, 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): 65-69.
- [6] 吴爱国, 韩俊庆, 董娜. 基于极局部模型的机械臂自适应滑模控制[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2020, 50(5): 1905-1912.
- Wu Ai-guo, Han Jun-qing, Dong Na. Adaptive sliding mode control based on ultra-local model for robotic manipulator[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2020, 50(5): 1905-1912.
- [7] 冯勇, 鲍晟, 余星火. 非奇异终端滑模控制系统的设计方法[J]. 控制与决策, 2002(2): 194-198.
- Feng Yong, Bao Sheng, Yu Xing-huo. Design method of non-singular terminal sliding mode control systems[J]. Control and Decision, 2002(2): 194-198.
- [8] Xin L J, Wang Q L, Li Y. A new fast nonsingular terminal sliding mode control for a class of second-order uncertain systems[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2016, 12: 1743861.
- [9] 冯建鑫, 王雅雷, 王强, 等. 改进蜻蜓算法的快速反射镜自抗扰控制[J]. 光学精密工程, 2021, 29(6): 1301-1310.
- Feng Jian-xin, Wang Ya-lei, Wang Qiang, et al. Active disturbance rejection controller of fast steering mirror based on improved dragonfly algorithm[J]. Optics and Precision Engineering, 2021, 29(6): 1301-1310.
- [10] 马芳武, 韩丽, 吴量, 等. 基于遗传与粒子群算法的隔振平台减振性能优化[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2020, 50(5): 1608-1616.
- Ma Fang-wu, Han Li, Wu Liang, et al. Damping optimization of heavy-loaded anti-vibration platform based on genetic algorithm and particle swarm algorithm[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2020, 50(5): 1608-1616.
- [11] 王蕾, 丁正生. 融合正弦余弦算法和精英算子的花授粉算法[J]. 计算机工程与应用, 2020, 56(6): 159-164.
- Wang Lei, Ding Zheng-sheng. Improved flower pollination algorithm combining sine cosine algorithm and elite operator[J]. Computer Engineering and Applications, 2020, 56(6): 159-164.