文章编号 1004-924X(2017)01-0148-07

光电跟踪系统快速捕获时间最优滑模控制技术

程 龙[1,2,3*],陈 娟[1,2],陈茂胜[2,3],王卫兵[2],王挺峰[2],郭 劲[2]
(1. 长春工业大学 电气与电子工程学院,吉林 长春 130033;
2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 激光与物质相互作用国家重点实验室,吉林 长春 130033;
3. 长光卫星技术有限公司,吉林 长春 130033)

摘要:针对光电跟踪系统目标的快速捕获过程,本文提出了时间最优滑模控制方法。该控制的滑模面函数为时间最优控制系统状态最优运动轨迹,保证系统状态变量沿着最优轨迹滑动;设计相应的指数趋紧率,使状态变量快速平稳趋近滑模面。以 180°、90°、60°阶跃信号为捕获目标进行仿真与实验研究,实验结果为时间最优滑模控制调节时间比时间最优控制和滑模控制分别减小了约 43.66%、59.67%,超调量为 0,稳态波动量为 0,稳态误差减小了约为 44.94%和 62.34%,与仿真结果相吻合。结果表明该方法调节时间短,超调小,稳态值平稳,稳态误差小,鲁棒性强等优点适合应用于光电跟踪系统目标快速捕获,具有重要的研究与应用价值。

关 键 词:捕获;时间最优滑模控制;时间最优控制;滑模控制
中图分类号:TM351;TP273 **文献标识码**:A **doi**:10.3788/OPE.20172501.0148

Fast acquisition of time optimal sliding model control technology for photoelectric tracking system

CHENG Long[1,2*], CHEN Juan[1,2], CHEN Mao-sheng[2,3],
WANG Wei-bing[2], WANG Ting-feng[2], GUO Jin[2]

(1. *Electric and Electronic College of Changchun University of Technology*, *Changchun* 130033, *China*;
2. *State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter in Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics*, *Chinese Academy of Science*, *Changchun* 130033, *China*;
3. *Chang Guang Satellite Technology CO.*, *LTD*, *Changchun* 130033, *China*)
* *Corresponding author*, *E-mail*: *longcheng*201304011@163.*com*

Abstract: Atime optimal sliding model controlwas proposed based on the fast acquisitionprocess of photoelectric tracking system. The sliding mode surface function of the control wasoptimal motion trail of time optimal control, which guaranteed that the system state variables slide along the optimal tracks; relevant exponential reaching lawwas designed to make the variables closer to sliding mode surface quickly and stably. Simulation and experiment research were carried out based on the capture targets of step signals of 180°, 90° and 60°. The experiment result shows that time optimal sliding model control and accommodation time decreases about 43.66% and 59.67% respectively compared with time optimal control and sliding model control. Besides, its overshoot and steady fluctuationare

收稿日期:2016-05-20;**修订日期**:2016-06-27.
基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. y5813nq150)

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

both 0, andsteady state errorsare decreased 44.94% and 62.34% approximately, whichare identical with the simulation result. The result indicates that the advantages of the method, such as short accommodation time, small overshoot, stable steady state value, little steady state error and strong robust, are applicable to quickly capture thephotoelectric tracking system and of significant research and application value.

Key words: photoelectric tracking system; acquisition; time optimal control; sliding model control; steady state errors; robustness

1　引　言

光电跟踪系统主要由光学、伺服、测角、记录和辅助等子系统组成，常用于陆基、海基、空基和天基中对相对运动目标的实时跟踪测量[1]。光电跟踪系统目标捕获过程是指在视场中发现目标，伺服系统迅速反应到捕获住目标，是进行稳定跟踪的前提。目标捕获过程系统的调节时间、超调量、稳态波动量是衡量光电跟踪系统快速捕获能力的重要指标，其中小超调量和小稳态波动量对成功实现目标捕获与跟踪的自动切换过渡过程起着重要作用。

目前光电跟踪系统常用的目标捕获方法有经典频域设计法[1-3]、多模切换控制[3]、模糊控制[4]等。其中，经典频域设计法主要采用超前滞后控制校正模型，在频域内通过调节开环增益、相角裕度和剪切频率来调节系统快速性和稳定精度，这种方法需要调整的参数比较多，且光电跟踪伺服系统由于轴系间的摩擦等干扰已经使系统呈现非线性，因此单纯的超前滞后控制不能满足控制要求；多模切换控制主要采用线性与非线性相结合的控制方法，设计多个控制器根据目标特性不同相互切换，但是由于在切换过程中容易引入噪声和产生跃变，控制算法复杂，没有成形的设计理论；模糊控制可以克服频域设计法的缺点，但由于模糊规则与控制量的大小无明确的关系，不能连续、精确控制系统的状态变量。

针对上述方法的不足，本文拟整合时间最优控制[5-6]和滑模控制[7-10]，以避免超前滞后校正模型经常需要调整参数，多模切换控制频繁切换控制器引入噪声，模糊控制不能获得连续精确的控制量等问题，并使系统获得强鲁棒性和快速调节性等特点。进行了大量理论仿真与实验研究，取得了较好的控制效果。

2　光电跟踪伺服系统数学模型

光电跟踪伺服系统的伺服系统伺服电机永磁同步电机（Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM），采用 $i_d=0$ 的控制方式可以使单位定子电流获得最大转矩。PMSM 在 dq 坐标系下电磁转矩方程为：

$$T_e=p_0\psi_f i_q=K_t i_q. \tag{1}$$

系统运动方程为：

$$\begin{cases} J\dfrac{dw_m}{dt}=T_e-T_l-Bw_m \\ w_m=\dfrac{d\theta_m}{dt} \end{cases}, \tag{2}$$

式中：T_e 为电磁转矩；p_0 为磁极对数；ψ_f 为永磁体磁链；i_q 为旋转 dq 坐标系 q 轴电流分量；i_d 为旋转 dq 坐标系 d 轴电流分量；K_t 为电磁转矩系数；J 为转动惯量；w_m 为转子机械角速度；θ_m 为转子机械角位置；T_l 为负载转矩；B 为摩擦系数。

在不考虑外部负载扰动 T_l 情况下，根据式(1)、式(2)伺服系统角位置的传递函数：

$$G(s)=\frac{k}{s(T_m s+1)}, \tag{3}$$

式中：$k=K_t/B$，$T_m=J/B$。

采用扫频法[1]，对式中的 k 和 T_m 进行辨识，最终辨识结果 $k=13.01$，$T_m=0.5185$。

3　目标快速捕获控制器设计

3.1　时间最优控制器设计

设状态变量 $\boldsymbol{X}=\begin{bmatrix}x_1\\x_2\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\theta-\theta_r\\w\end{bmatrix}$，$\theta$ 为转子的机械角位移；θ_r 为转角给定值；从而可得到系统的

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

状态方程为：

$$\dot{\boldsymbol{X}}(t)=\begin{bmatrix}\dot{x}_1(t)\\ \dot{x}_2(t)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0 & 1\\ 0 & -a\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x_1(t)\\ x_2(t)\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}0\\ b\end{bmatrix}u(t), \tag{4}$$

式中：$a=1/T_m=1.719\ 7$；$b=k/T_m=25.091\ 6$。

令式(4)中 $u(t)=u=\pm u_{max}$，可解得状态函数：

$$x_1(t)=x_{10}-\frac{1}{a^2}(ax_{20}-bu)(e^{-at}-1)+\frac{bu}{a}t, \tag{5}$$

$$x_2(t)=\left(x_{20}-\frac{bu}{a}\right)e^{-at}+\frac{bu}{a}. \tag{6}$$

式(5)、(6)中 x_{10}、x_{20} 为状态初始值，整理得：

$$x_1(t)=-\frac{b}{a^2}u_{max}\ln\frac{ax_2(t)-bu_{max}}{-bu_{max}}-\frac{1}{a}x_2(t). \tag{7}$$

为了便于分析、实现，采用最小二乘方法对方程(7)进行逼近拟合[7]，得到：

$$x_2=-cx_1=-\frac{1}{0.233\ 5}x_1,$$

$$c=\frac{1}{0.233\ 5},x_1\in[-180\quad 180]. \tag{8}$$

由式(8)得到的相平面上的最优状态轨迹如图1所示。

$$s=-cx_1-x_2. \tag{9}$$

时间最优控制即以正反两个方向最大控制信号施加到控制系统中，以最快的速度趋近空间平衡点。由图1可知最优控制轨线将空间分成两部分，当状态 x_1、x_2 在最优轨线上部时，系统以反向最大速度趋近空间平衡点；相反可知，系统以正向最大速度趋近空间平衡点；即最优控制满足：

$$u=\begin{cases}-u_{max}, s\leqslant 0 \text{ or } x_2>0\\ u_{max}, s\geqslant 0 \text{ or } x_2<0\end{cases}. \tag{10}$$

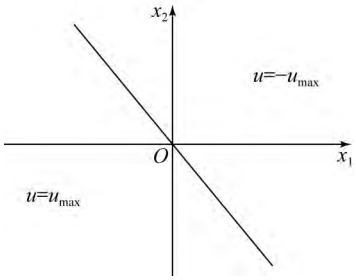

图1 相平面最优轨迹图

Fig. 1 Phase plane of optimal trajectory

3.2 滑模控制器设计

滑模控制即空间任一初始状态通过相应控制策略引导到滑模面(趋近运动)；在滑模面上的运动是渐进稳定的(滑模运动)。趋近运动为 $S(x)\to 0$ 的过程，而滑模运动为 $S(x)=0$ 的运动。

根据被控对象的特性，选择滑模面函数为：

$$s(t)=ge(t)-\dot{e}(t), \tag{11}$$

其中：$g=10.5$，$e(t)=x_1(t)$，$\dot{e}(t)=\dot{x}_1(t)=x_2(t)$。

采用指数趋近率，有：

$$\dot{s}=-\varepsilon\mathrm{sgn}s-ks, \tag{12}$$

其中：$\varepsilon=1.95$，$k=12$，sgn 为符号函数。由式(11)、(12)得：

$$\dot{s}(t)=\dot{x}_1(t)-\dot{x}_2(t)=-\varepsilon\mathrm{sgn}s-ks. \tag{13}$$

滑膜控制器为：

$$u(t)=\frac{1}{b}((g+a)x_2(t)+\varepsilon\mathrm{sgn}s+ks). \tag{14}$$

3.3 时间最优滑模控制器设计

由以上分析知当系统状态变量处于滑模面时，系统对参数摄动和外部扰动具有较好的鲁棒性。因此如果将滑模面函数取为时间最优控制轨迹构成时间最优滑模控制器。采取相应控制策略使系统任一初始状态快速平稳的趋近滑模面并沿着滑模面运动。保证系统状态快速平稳的沿着时间最优轨线运动，避免由于时间最优控制在 $\pm u_{max}$ 控制量切换时引起的震颤。

为了保证时间最优滑模控制快速趋近滑模面，采用指数趋紧率形式如式(12)所示，指数趋紧率趋近速度从以较大值逐步减小到零，不仅缩短了趋近时间，而且还保证状态点到达滑模面时速度很小，避免系统震颤。

由式(4)、式(9)和式(12)得：

$$\dot{s}=-c\dot{x}_1-\dot{x}_2=-\varepsilon\mathrm{sgn}(s)-ks=$$
$$-cx_2+ax_2-bu(t)=-\varepsilon\mathrm{sgn}(s)-ks. \tag{15}$$

整理得出基于指数趋紧率的时间最优控制器为：

$$u(t)=\frac{1}{b}((a-c)x_2(t)+\varepsilon\mathrm{sgn}(s)+ks). \tag{16}$$

选取 Lyapunov 函数为 $V=\frac{1}{2}S^2$，则 $\dot{V}=s\dot{s}=s(-\varepsilon\mathrm{sgn}(s)-ks)$，无论 $S>0$ 或 $S<0$，易证 $\dot{V}<0$。由 Lyapunov 稳定判据知时间最优滑模控制系统渐进稳定。

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

4　仿真分析与实验验证

4.1　仿真分析

为了验证时间最优滑模控制算法的有效性，分别与时间最优控制和滑模控制进行仿真与实验。在 Matlab 中建立仿真模型并进行仿真验证。三种控制方法均采用相同的限幅方式（限幅与目标捕获快速性有关）。仿真结果如图 2、图 3、图 4 所示，定量仿真结果如表 1 所示：

表 1　三种控制方法定量仿真结果

Tab. 1　Quantitative simulation results of three control algorithms

控制方法	指标	180°	90°	60°
滑模控制	调节时间/s	1.554 0	1.395 0	1.257 4
	上升时间/s	0.348 8	0.285 7	0.257 1
	超调量/%	56.17	59.67	56.98
时间最优滑模控制	调节时间/s	0.657 3	0.536 8	0.540 3
	上升时间/s	0.542 2	0.466 4	0.433 1
	超调量	0	0	0
时间最优控制	调节时间/s	1.627 0	1.517 2	1.179 0
	上升时间/s	0.299 6	0.263 6	0.238 5
	超调量	51.50	54.89	50.02

分别以 180°、90°、60°阶跃信号为捕获目标进行仿真研究，从图 2、图 3、图 4 对比及表 1 定量分析中的可知，时间最优控制、滑模控制系统响应最快即上升时间最短，但超调量都比较大，调节时间也比较长；而时间最优滑模控制调节时间最短，超调量也最小。通过以上仿真分析中可知，时间最优控制、滑模控制虽然动态响应速度快，但是超调量大，调节时间长，不利于光电跟踪系统目标捕获过程；而时间最优滑模控制超调量和调节时间都小于上述两种控制方法，有利于光电跟踪系统目标的快速捕获。仿真结果表明时间最优滑模控制在光电跟踪目标捕获中具有一定的应用研究价值。

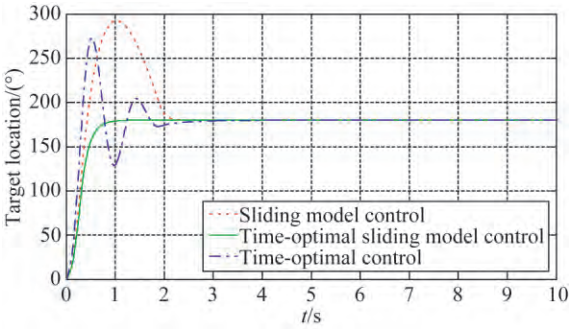

图 2　三种控制方法捕获 180°阶跃目标仿真对比

Fig. 2　Comparison of three control algorithms to acquire 180° step target simulation

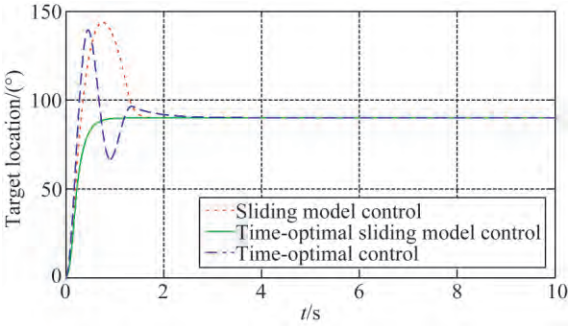

图 3　三种控制方法捕获 90°阶跃目标仿真对比

Fig. 3　Comparison of three control algorithms to acquire 90° step target simulation

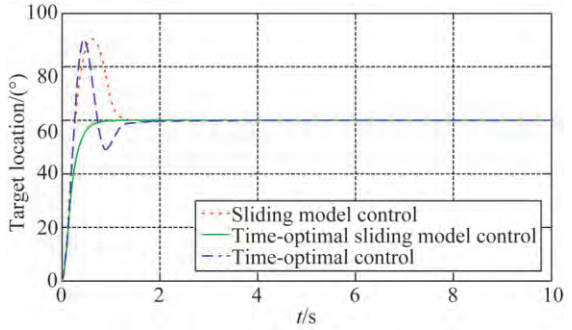

图 4　三种控制方法捕获 60°阶跃目标仿真对比

Fig. 4　Comparison of three control algorithms to acquire 60° step target simulation

4.2　实验验证

光电跟踪伺服控制系统硬件结构如图 5 所示，角位置传感器采用绝对式光电编码器，被控电机采用 16 对极面装式永磁同步电机，控制器采用 TMS30F28335DSP 和 Xilinx FPGA 集成嵌入式模块。SVPWM 控制信号的频率为 800 Hz，三种控制方法均采用相同的限幅方式（限幅与目标捕获快速性有关）。实验结果如图 6、图 7、图 8 所示，定量实验结果如表 2 所示。

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

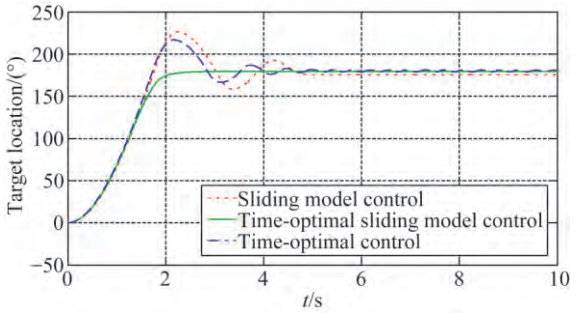

图 5 三种控制方法捕获 180°阶跃目标实验对比

Fig. 5 Comparison of three control algorithms to acquire 180° step target experiment

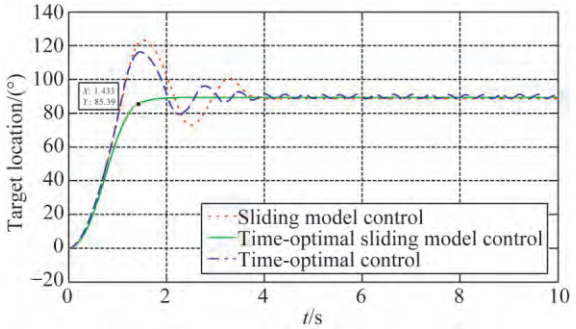

图 6 三种控制方法捕获 90°阶跃目标实验对比

Fig. 6 Comparison of three control algorithms to acquire 90° step target experiment

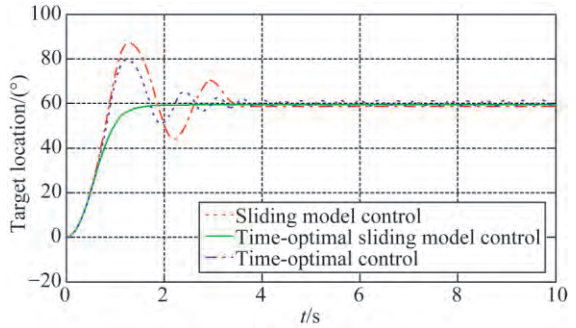

图 7 三种控制方法捕获 60°阶跃目标实验对比

Fig. 7 Comparison of three control algorithms to acquire 60° step target experiment

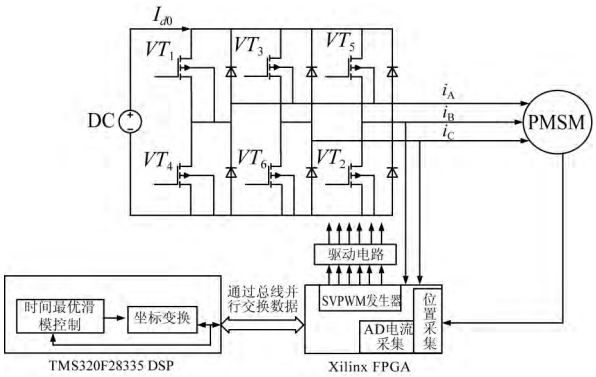

图 8 光电跟踪伺服系统系硬件原理图

Fig. 8 Hardware principle diagram of photoelectric tracking servo system

表 2 三种控制方法定量实验结果

Tab. 2 Quantitative experimental results of three control algorithms

控制方法	指标	180°	90°	60°
滑模控制	调节时间/s	4.379 1	3.554 3	3.281 0
	上升时间/s	1.661 1	1.043 1	0.833 7
	超调量/%	28.99	39.37	48.44
	稳态误差	4.567 9	1.556 9	1.309 8
	稳态波动量/%	0	0	0
时间最优滑模控制	调节时间/s	1.899 1	1.433 1	1.314 1
	上升时间/s	1.755 3	1.264 1	1.096 1
	超调量	0	0	0
	稳态误差	0.545 2	0.586 4	0.599 6
	稳态波动量/%	0	0	0
时间最优控制	调节时间/s	3.371 0	2.914 1	2.511 1
	上升时间/s	1.630 1	1.036 0	0.857 5
	超调量	21.14	30.66	35.41
	稳态误差	1.028 0	1.065 1	1.117 6
	稳态波动量/%	1.09	2.01	4.04

定义稳态波动量为：

$$\delta=\frac{|e_{max}|+|e_{min}|}{h}\times 100\%, \tag{17}$$

式中：e_{max}为稳态误差最大值，e_{min}为稳态误差最小值，h 为稳态值。稳态波动量是衡量最终系统输出在稳态值附近波动程度。从图 6、图 7、图 8 及表 2 实验结果对比中可知，时间最优控制、滑模控制上升时间最短，但调节时间长，超调量大，与上述仿真结果相验证；时间最优控制稳态波动量大，与理论分析相符；滑模控制稳态值虽然平稳但稳态误差大，这可能由系统轴系间的摩擦导致。时间最优滑模控制调节时间与时间最优控制和滑模控制相比分别减小了约 43.66%、59.67%，时间最优滑模控制超调量为 0，稳态波动量也为 0，稳态误差小。由以上分析可知，时间最优滑模控制调节时间、超调量小说明它具有时间最优控制与滑模控制快速调节性，稳态波动量和稳态误差为 0 说明它具有滑模控制的鲁棒性，这与时间最优滑模控制理论相符，也与上述仿真结果相吻合。实验研究结果表明时间最优滑模控制调节时间短、超调小，稳态值平稳，稳态误差小适合应用于

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

光电跟踪系统目标快速捕获，具有重要研究与应用价值。

5 结　论

本文针对光电跟踪系统目标的快速捕获过程，提出了时间最优滑模控制方案。时间最优滑模控制的滑模面为时间最优控制系统状态最优运动轨迹，设计相应的趋近率。使时间最优滑模控制不仅具有时间最优控制与滑模控制的快速调节性，还有滑模控制的鲁棒性。最终以 180°、90°、60° 阶跃信号为捕获目标进行仿真与实验研究，实验结果为时间最优滑模控制调节时间比时间最优控制和滑模控制分别减小了约 43.66%、59.67%，超调量为 0，稳态波动量为 0，稳态误差小减小了约为 44.94%和 62.34%，这与仿真结果相吻合。仿真与实验研究结果表明间最优滑模控制调节时间短，超调小，稳态值平稳，稳态误差小，鲁棒性强等优点适合应用于光电跟踪系统目标快速捕获，具有重要的研究与应用价值。

参考文献：

[1] 王卫兵. 光电跟踪伺服系统控制策略理论与实验研究[D]. 中国科学院研究生院长春光学精密机械与物理研究所，2012.
WANG W B. *Research in Theory and Experiment of Control Strategies for Opto-electronics Tracking Servo System* [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2012. (in Chinese)

[2] 郭劲，王卫兵，陈娟，等. 最小节拍组合控制方法在光电跟踪系统中的应用[J]. 光学 精密工程，2013，(10):2594-2602.
GUO J, WANG W B, CHEN J, *et al*.. Application of minimal prototype control method inopto-electronics tracking system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(8):2594-2602. (in Chinese)

[3] 吴培. 基于滑模变结构控制的光电经纬仪目标捕获动态性能研究[D]. 长春：长春光学精密机械与物理研究所，2010.
WU P. *Performance Research of Target Acquisition for Photoelectrical Theodolite Based on Sliding Model Control* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, 2010. (in Chinese)

[4] 孙航，韩红霞，曹立华，等. 大型光电经纬仪速度环 PID 参数模糊自整定研究[J]. 仪器仪表学报，2013,(10):2388-2394.
SUN H, HAN H X, CAO L H, *et al*.. Study of fuzzy PID controller parameter self-tuning for velocity circuit of large theodolite [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2013, 34(10): 2388-2394. (in Chinese)

[5] 程国扬，曾佳福. 快速定位伺服系统的控制器设计[J]. 电机与控制学报，2009,(01):52-56.
CHENG G Y, ZENG J F. controller desigin for fast positioning servo systems [J]. *Electric Machines and Control*, 2009, 13(1):52-56. (in Chinese)

[6] ZHANG D Q, GUO G X. Discrete-time sliding mode proximate time optimal seek control of hard disk drives [J]. *IEE Proceedings-Control Theory and Applications*, 2000, 147(4):440-446.

[7] 邓永停，李洪文，王建立，等. 基于卡尔曼滤波器的交流伺服系统自适应滑模控制[J]. 光学 精密工程，2014,22(8):2088-2095.
DENG Y T, LI H W, WANG J L, *et al*.. Adaptive sliding mode control for AC servo system based on Kalman filter [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(8):2088-2095. (in Chinese)

[8] 常琳，金光，范国伟，等. 基于 terminal 滑模控制的小卫星机动方法[J]. 光学 精密工程，2015,23(2):485-496.
CHANG L, JIN G, FAN G W, *et al*.. Small satellite maneuver based on terminal sliding mode control [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(2):485-496. (in Chinese)

[9] JI Y J, LEE C W, CHUNG C C, *et al*.. A discrete-time modified sliding mode proximate time-optimal servomechanism for scanning-probe-microscope-based data storage [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2008, 44(11):3750-3753.

[10] JIN M, LEE J, AHN K K. Continuous nonsingular terminal sliding-mode control of shape memory alloy actuators using time delay estimation [J]. *Transactions on Mechatronics IEEE/ASME*, 2015, 20(2):899-909.

[11] 李洪文，邓永停，王建立. 永磁同步电机速度控制器的全数字化集成[J]. 光学 精密工程，2015,23(4):1105-1113.
LI H W, DENG Y T, WANG J L. Digital integration of PMSM speed controller based on FPGA

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(4): 1105-1113. (in Chinese)

[12] 王卫兵，王挺峰，郭劲. 星载光电捕获跟踪瞄准控制技术分析[J]. 中国光学，2014,7(6):879-888 WANG W B, WANG T F, GUO J. Analysis for opto-electrical acquisition tracking and pointing control technology on satellite [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(6):879-888. (in Chinese)

作者简介：

程 龙(1989—)，男，吉林四平人，硕士，主要从事电子学设计、伺服控制技术研究方面的研究。E-mail: longcheng201304011@163.com

导师简介：

陈 娟(1961—)，女，吉林长春人，研究员，博士生导师，2001年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位，主要从事光电跟踪与伺服控制技术研究。E-mail: chenjuan@mail.ccut.edu.cn

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net