

引用格式:张晨,薛文涛.新型幂次趋近律的无人艇航向的终端滑模控制方法[J].电光与控制,2017,24(8):29-32,60. ZHANG C, XUE W T. New power reaching law based terminal sliding mode control for unmanned surface vehicle course[J]. Electronics Optics & Control, 2017, 24(8):29-32, 60.

新型幂次趋近律的无人艇航向的终端滑模控制方法

张晨, 薛文涛

(江苏科技大学, 江苏 镇江 212003)

摘要: 针对传统滑模控制方法和传统滑模趋近律在喷水推进型水面无人艇的航向控制中存在收敛速度慢、耗时长和抖振严重等缺点,提出一种基于新型幂次趋近律的终端滑模控制方法。首先利用终端滑模控制思想在滑动超平面的设计中引入非线性函数,构造 Terminal 滑模面,在终端滑模控制提高动态响应速度的前提下,进而引入改进的新型幂次趋近律,充分结合终端滑模的控制理论和新型趋近律的思想设计了新型 Terminal 滑模控制器,最后进行了 Lyapunov 稳定性证明和仿真。仿真结果表明,设计的新控制器与传统幂次趋近律、指数趋近律相比,具有更快的收敛速度和更好的运动品质。

关键词: 无人艇; 终端滑模控制; 航向; 幂次趋近律; Terminal; 指数趋近律

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2017.08.007

New Power Reaching Law Based Terminal Sliding Mode Control for Unmanned Surface Vehicle Course

ZHANG Chen, XUE Wen-tao

(Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China)

Abstract: To solve the problems of the traditional Sliding Mode Control (SMC) and traditional sliding mode reaching law, such as slow convergence speed, long convergence time and severe chattering in the course control of Unmanned Surface Vehicle (USV), a new Terminal Sliding Mode Control (TSMC) based on new power reaching law is proposed. Firstly, the non-linear function is introduced in the design of sliding hyper-plane based on the idea of TSMC, and a Terminal sliding mode surface is constructed. Under the assumption of improving the dynamic response by the TSMC, a novel power reaching law based on traditional power reaching law is introduced. Then, a new Terminal sliding mode controller is designed based on new reaching law and the TSMC theories. Finally, the Lyapunov stability is proved for the designed control system. The simulation results indicate that: compared with the traditional power reaching law and the exponential reaching law, the designed controller has faster convergence speed and better movement quality.

Key words: unmanned surface vehicle; terminal sliding mode control; course; power reaching law; Terminal; exponential reaching law

0 引言

滑模变结构控制以其理想的鲁棒性能引起了控制界的极大关注^[1-4]。滑模控制器通过选择的线性滑模面可使系统轨迹在到达滑动模态后的运动渐近稳定,也可通过调节控制器参数来控制渐近稳定的速度,但无论如何,状态跟踪误差不会在有限时间内收敛到零^[5]。

近年来,日益发展的有限时间理论引起了许多学者的极大关注。为了使系统具有更快的动态响应速度且快速收敛到平衡点,文献[6]将神经网络中的 Terminal 吸引子概念引入滑模面设计中,即在滑模面中适当地引入非线性项;文献[7-8]也着重研究了终端滑模(Terminal Sliding Mode, TSM)的控制方法,证明了其的确具有动态响应速度快、稳态精度高等优点,解决了线性滑模条件下状态渐近收敛慢的问题。TSM 改善了系统的收敛特性,并且在一定程度上缩短了收敛时间,但仍然需要进一步改善收敛特性,而且在实际运用当中,控制输入可能在某个特定区域出现无穷大的奇异现象^[9-10],影响系统的响应能力,尤其是文献[11-13]无人艇航向

收稿日期:2016-07-27 修回日期:2016-09-01

基金项目:国家自然科学基金(61203024)

作者简介:张晨(1989—),男,江苏南京人,硕士生,研究方向为滑模控制,智能控制等。

控制的研究中,提高收敛时间更是势在必行,要求更高的控制精度和更快的收敛速度,提高几秒的时间都会使无人艇的轨迹路线更合理和更优化,能够提高系统的稳定性。为进一步消除系统的抖振和提高收敛速度,本文提出一种基于新型的改进幂次趋近律的 Terminal 滑动模态控制器的设计方法,该新型幂次趋近律无论在远离滑动模态还是在接近滑动模态的空间内均具有快速收敛能力。仿真结果表明:改进的新型趋近律与传统的幂次趋近律^[14-16]、指数趋近律^[17-18]相比较,系统到达平衡的趋近速度和运动品质很明显得到了提高。

1 无人艇航向系统模型

在操舵不是很频繁的条件下,当系统存在外部环境扰动等不确定因素时,可用如下一阶非线性船摇响应方程来描述船舶航向非线性操作系统,即

$$\begin{cases} \dot{\psi} = r \\ \dot{r} = -\frac{1}{T}r - \frac{\alpha}{T}r^3 + \frac{K}{T}\delta + d \end{cases} \quad (1)$$

式中: ψ 为无人艇艏向角(顺时针为正); r 为无人艇艏摇角速度; T 为时间常数; K 为回转性指数; δ 为控制舵角(右舵为正); α 为模型非线性项系数; d 为未知外部扰动的不确定性影响。

本文考虑喷水推进型水面无人艇,设舵角 δ 为喷水推进器喷嘴的转角,通过改变喷嘴角和喷水量来控制水面无人艇的航行方向和航行速度。

2 Terminal 滑模控制

由无人艇运动模型,设 $x_1 = \psi, x_2 = r, u = \delta$,则系统式(1)可写为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -\frac{1}{T}x_2 - \frac{\alpha}{T}x_2^3 + \frac{K}{T}u + d \end{cases} \quad (2)$$

令 $f(x) = -\frac{1}{T}x_2 - \frac{\alpha}{T}x_2^3, b(x) = \frac{K}{T}, d \leq D$,采用 TSM 控制确定滑模切换函数,为使它所确定的滑动模态渐近稳定,并具有良好的动态品质^[15],滑模切换函数设计为

$$s = \dot{x}_1 + \beta x_1^{q/p} = 0 \quad (3)$$

假设 1 系统不确定干扰有界,式中, $\beta > 0, 2q > p > q$ 且为正奇数。

控制器设计为

$$u(t) = -\frac{1}{b(x)}[f(x) + \beta \frac{q}{p} x_1^{q/p-1} x_2 + (D + \eta) \operatorname{sgn} s] \quad (4)$$

式中, $\eta > 0$ 。

2.1 控制器稳定性分析

由于 $\dot{x}_1 = x_2$,则

$$s = x_2 + \beta x_1^{q/p} = 0 \quad (5)$$

于是得到

$$\begin{aligned} \dot{s} &= \dot{x}_2 + \beta \frac{q}{p} x_1^{q/p-1} \dot{x}_1 = \\ &= f(x) + b(x)u + d(x,t) + \beta \frac{q}{p} x_1^{q/p-1} \dot{x}_1 = \\ &= f(x) - f(x) - \beta \frac{q}{p} x_1^{q/p-1} x_2 - (D + \eta) \operatorname{sgn} s + d(x,t) + \\ &\quad \beta \frac{q}{p} x_1^{q/p-1} \dot{x}_1 = d(x,t) - (D + \eta) \operatorname{sgn} s \end{aligned} \quad (6)$$

则

$$s\dot{s} = sd(x,t) - (D + \eta)|s| \leq -\eta|s| \quad (7)$$

由于 $\eta > 0, |s| \geq 0$,可得式(7)小于等于0,说明 Terminal 滑模控制器稳定。

2.2 有限到达时间分析

设从 $s(0) \neq 0$ 到 $s = 0$ 的时间为 t_r 。当 $t = t_r$ 时, $s = 0$,即 $s(t_r) = 0$ 且

$$\dot{s} = -\eta \frac{|s|}{s} = \pm \eta \quad (8)$$

$$\int_{s=s(0)}^{s=s(t_r)} ds = \int_{t=0}^{t=t_r} \pm \eta dt \quad (9)$$

即 $s(t_r) - s(0) = \pm \eta t_r, t_r = \left| \frac{s(0)}{\eta} \right| = \frac{|s(0)|}{\eta}$,设从 $x_1(t_r) \neq 0$ 到 $x_1(t_r + t_s) = 0$ 的时间为 t_s ,在此阶段, $s = 0$,即 $x_2 + \beta x_1^{q/p} = 0$,因此 $\dot{x}_1 = -\beta x_1^{q/p}$,对其积分得 $\int_{x_1(t_r)}^0 x_1^{-q/p} dx_1 = \int_{t_r}^{t_r+t_s} -\beta dt$,则 $-\frac{p}{p-q} x_1^{1-q/p}(t_r) = -\beta t_s$,从而在滑动模态上从任意初始状态 $x_1(0) \neq 0$ 收敛到平衡状态 $x_1 = 0$ 的时间为

$$t_s = \frac{p}{\beta(p-q)} |x_1(t_r)|^{1-q/p} \quad (10)$$

3 基于改进幂次趋近律的 Terminal 滑模控制

本文提出的新型幂次趋近律为

$$\dot{s} = -k_1 |s|^{\alpha_1} \operatorname{sgn} s - k_2 |s|^{\beta_1} \operatorname{sgn} s \quad (11)$$

式中: $k_1 > 0; k_2 > 0; \alpha_1 > 0; 0 < \beta_1 < 1$ 。

对新型幂次趋近律进行稳定性分析得

$$\begin{aligned} s\dot{s} &= s(-k_1 |s|^{\alpha_1} \operatorname{sgn} s - k_2 |s|^{\beta_1} \operatorname{sgn} s) = \\ &= -k_1 |s|^{1+\alpha_1} - k_2 |s|^{1+\beta_1} < 0 \end{aligned} \quad (12)$$

因此提出的新型趋近律稳定,当系统状态远离滑动模态($|\alpha_1| > 1$)时,式(11)中第一项起主导作用;当系统状态接近模态($|\alpha_1| < 1$)时,第二项起主要作用,两项结

合可以保证系统状态在趋近滑动模态过程中的运动品质。

由式(5)可知,滑模切换函数设计为

$$s = x_2 + \beta x_1^{q/p} = 0 \quad (13)$$

s 沿解的时间导数为 $\dot{s} = \dot{x}_2 + \beta \frac{q}{p} x_1^{q/p-1} \dot{x}_1 = f(x) + b(x)u + d(x,t) + \beta \frac{q}{p} x_1^{q/p-1} \dot{x}_1$,取新型的幂次趋近律式(11),并

且令 $\rho(x_1) = \beta \frac{q}{p} x_1^{q/p-1}$,则有

$$f(x) + b(x)u + d(x,t) + \rho(x_1)x_2 = -k_1 |s|^{\alpha_1} \text{sgn } s - k_2 |s|^{\beta_1} \text{sgn } s \quad (14)$$

经简化得到控制律为

$$u(t) = -\frac{1}{b(x)} [f(x) + \rho(x_1)x_2 + (D + \eta + k_1 |s|^{\alpha_1} + k_2 |s|^{\beta_1}) \text{sgn } s] \quad (15)$$

当建模不确定性和干扰较大时,需要切换项增益 η 较大,会造成较大的抖振。为了防止抖振,控制器中采用饱和函数 $\text{sat}(s)$ 代替符号函数 $\text{sgn } s$,即

$$\text{sat}(s) = \begin{cases} 1 & s > \Delta \\ ks & |s| \leq \Delta, k = 1/\Delta \\ -1 & s < -\Delta \end{cases} \quad (16)$$

式中, Δ 为边界层,且为较小的正常数。这样系统的运动轨迹被限制在理想滑动模态的某一个 Δ 邻域内,称为准滑模控制,此 Δ 邻域为滑动模态切换面的边界层。在边界层上进行结构变换,可以从根本上避免或削弱了抖振,在实际中得到广泛应用。

4 终端滑模控制方法仿真分析

为验证本文所设计控制器的有效性,下面进行仿真对比。对给出的非线性系统(1)在普通滑模控制(SMC)和终端滑模控制(TSMC)两种控制方法下进行仿真。

根据海试操纵性试验的结果,可选取如下模型参数: $K = -2.364, T = 5.489, \alpha = 0.94$ 。给定系统初始条件: $\psi_0 = 30^\circ, r_0 = 0$,设期望的航向为直航 $\psi_d = 0^\circ$ 。为避免舵角偏大或偏小,给出舵角饱和限制 $-30^\circ \leq \delta \leq 30^\circ$,外部扰动 $d = \cos \pi t$ 。采用终端滑模控制方法,设计的控制器参数取值 $\beta = 1, p = 5, q = 3, \eta = 0.5, D = 1 (d = \cos \pi t \leq 1)$ 。

图 1 为两种控制方法下水面无人艇航向控制的仿真对比。其中,图 1a、图 1b、图 1c 分别是航向设定值为直航 $\psi_d = 0^\circ$ 时的艏向角 ψ 、角速度 r 和控制舵角 δ 的响应曲线。

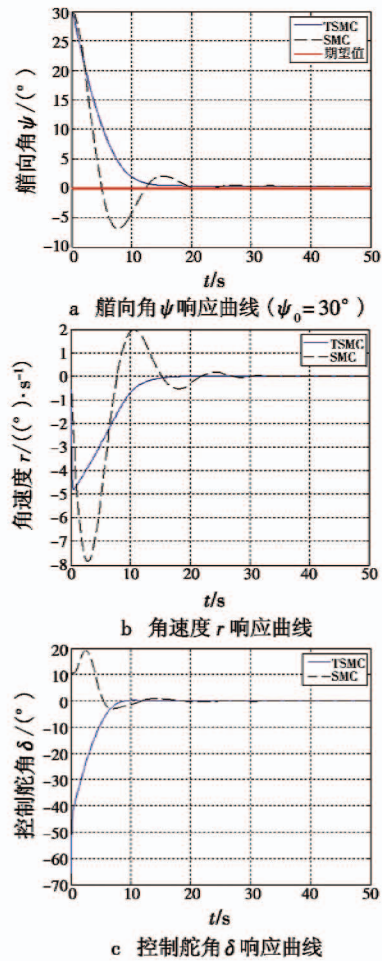


图 1 普通滑模控制和终端滑模控制仿真结果

Fig.1 Simulation result of SMC and TSMC

由仿真结果可以看出,TSMC 及 SMC 两种方法均能实现无人艇航向的准确跟踪控制,但很明显 TSMC 在消除抖振以及提高趋近速度方面有着更好的效果。

5 基于新型趋近律终端滑模控制方法仿真分析

在上文的分析结果中,终端滑模相比传统滑模有着更好的控制效果,但在收敛时间上仍然有待提高。在终端滑模控制的基础上,分别引入指数趋近律、幂次趋近律和新型的幂次趋近律,仿真结果见图 2,可以看出,在结合趋近律之后的控制器都提高了趋近平衡的收敛速度,相比单一的 TSMC 控制方法节省了收敛时间;图 2a 表明,基于新型趋近律的方法使无人艇系统艏向角大概在 9.6 s 达到收敛平衡,相比幂次趋近律、指数趋近律分别提高了 0.25 s 和 0.8 s;图 2b 表明,新型趋近律相比于幂次趋近律、指数趋近律,角速度的响应更加灵敏,只需 9.8 s 即达到稳态,分别加快了 0.2 s 和 0.4 s;图 2c 表明,系统的输入控制舵角在新型趋近律的作用下,响应

时间也有所提高,相比于另外两种传统趋近律分别提升了0.2 s和0.3 s;图3表明新型趋近律使系统滑模面 s 在有限时间内收敛,大概所需时间为0.25 s,分别加快了0.3 s和0.7 s,说明新型趋近律在收敛时间值方面有着良好的效果。

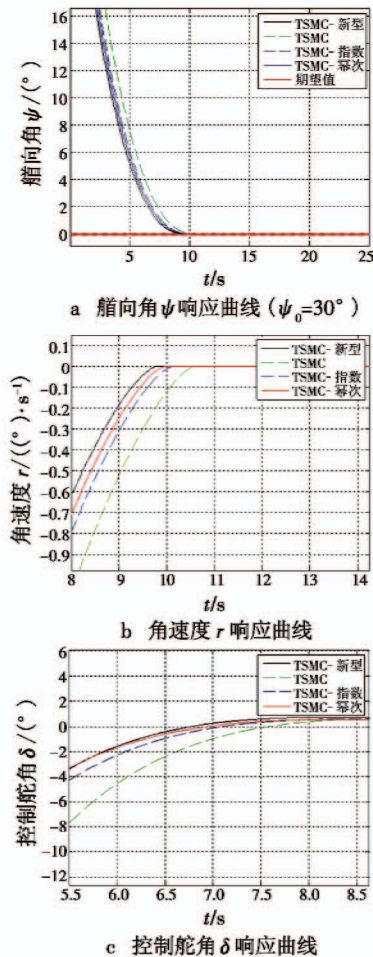


图2 基于新型趋近律终端滑模控制方法的仿真结果

Fig.2 Simulation result of TSMC based on new power reaching law

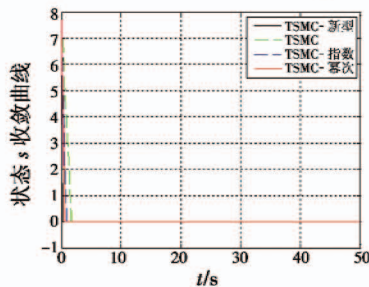


图3 状态 s 响应曲线

Fig.3 The response graph of state s

6 结论

本文提出了一种基于改进幂次趋近律的水面无人艇航向的终端滑模控制方案,对于无人艇系统,首先采用终端滑模控制方法控制无人艇,有效消除了控制抖

振,提高了收敛速度,说明终端滑模具有一定的固定时间收敛特性。然后在终端滑模控制方案的基础上,采用一种改进过的幂次趋近律,使系统的收敛特性进一步得到提高,减少收敛时间,并且通过仿真得到分析,结果验证了所提出的改进趋近律在收敛时间上的确有所提高,证明所提方法的有效性。

参考文献

- [1] EKER L, AKINAL S A. Sliding mode control with integral augmented sliding surface: design and experimental application to an electromechanical system [J]. *Electrical Engineering*, 2008, 90(3):189-197.
- [2] 刘金琨,孙富春. 滑模变结构控制理论及其算法研究与进展[J]. *控制理论与应用*, 2007, 24(3):407-418.
- [3] PLESTA N F, MOULAY E, GLUMINEAU A, et al. Robust output feedback sampling control based on second-order sliding mode [J]. *Automatica*, 2010, 46(6):1096-1100.
- [4] FRIDMAN L, LEVANT A. Higher order sliding modes as the natural phenomena of control theory [C]//*Proceedings of the Workshop Variable Structure and Lyapunov Technique*, Benevento, 2012:302-309.
- [5] 胡剑波,庄开宇. 高级变结构控制理论及应用[M]. 西安:西北工业大学出版社,2007:53-57.
- [6] ZAK M. Terminal attractors in neural networks [J]. *Neural Networks*, 1989, 2(4):259-274.
- [7] XIAN W, HUANGFU Y G. Second-order terminal sliding mode controller for a class of chaotic systems with unmatched uncertainties [J]. *Communication in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2011, 15(11):3241-3247.
- [8] ZHANG Q J, WEI Y B. Finite-time synchronization of complex networks with disturbances by terminal sliding mode control [J]. *Journal of Maths*, 2016(4):7-11.
- [9] WANG J, TSANG K M. Second-order sliding mode controllers for nonlinear singular perturbation systems [J]. *ISA Transaction*, 2005, 44(1):117-129.
- [10] FERNANDO C, LEONID F. Analysis and design of integral sliding manifolds for systems with unmatched perturbations [J]. *IEEE Transaction on Automatic Control*, 2006, 51(5):853-858.
- [11] 叶宝玉,王钦若,熊建斌,等. 船舶航向非线性 Backstepping 自适应鲁棒控制 [J]. *控制工程*, 2013, 20(4):607-610.
- [12] PAN C Z, LAI X Z, YANG S X, et al. A biologically inspired approach to tracking control of underactuated surface vessels subject to unknown dynamics [J]. *Expert Systems with Applications*, 2015, 42(4):2153-2161.

(下转第60页)

的部分时间,但两种算法要达到相同的滤波精度,本文所提算法所需粒子数远远小于 PE-CBMeMber 算法的粒子数,大大节省了运行时间。

3 结束语

为解决多扩展目标跟踪量测不精确问题,提出了一种基于区间分析的联合检测和跟踪的多伯努利多扩展目标滤波算法。实验分析表明,本文所提的算法由于采用了箱式粒子加权的方法,减少了算法的采样粒子数,有效降低了算法的运算量,并依据每个时刻的量测产生新生粒子,从而能够对多扩展目标进行稳定的跟踪。下一步将研究更加复杂外形的扩展目标的跟踪方法。

参 考 文 献

- [1] MAHLER R. Multitarget Bayes filtering via first-order multi target moments [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2003, 39(4):1152-1178.
- [2] MAHLER R. PHD filters for nonstandard targets, I: extended targets [C]//The 12th International Conference on Information Fusion, 2009:915-921.
- [3] GRANSTRÖM K, LUNDQUIST C, ORGUNER U. A Gaussian mixture PHD filter for extended target tracking [C]//The 13th International Conference on Information Fusion, 2010:1-8.
- [4] 连峰,韩崇昭,刘伟峰. 高斯混合扩展目标概率假设密度滤波器的收敛性分析[J]. 自动化学报,2012,38(8):1343-1352.
- [5] ORGUNER U, LUNDQUIST C, GRANSTRÖM K. Extended target tracking with a cardinalized probability hypothesis density filter [C]//The 14th International Conference on Information Fusion, 2011:1-8.
- [6] LI Y X, XIAO H T, SONG Z Y, et al. A new multiple extended target tracking algorithm using PHD filter[J]. Signal Processing, 2013, 93(12):3578-3588.
- [7] RISTIC B, SHERRAH J. Bernoulli filter for joint detection and tracking of an extended object in clutter [J]. IET Radar Sonar Navigating, 2013, 7(1):26-35.
- [8] 连峰,马东东,元向辉,等. 扩展目标 CBMeMber 滤波器及其高斯混合实现[J]. 控制与决策,2015,30(4):611-616.
- [9] GNING A, RISTIC B, MIHAYLOVA L. Bernoulli/box-particle filters for detection and tracking in the presence of triple measurement uncertainty[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2012, 60(5):2138-2151.
- [10] 孔云波,冯新喜,刘钊. 基于箱粒子滤波的扩展目标伯努利跟踪算法[J]. 华中科技大学学报:自然科学版,2015,43(11):63-67.
- [11] GILHOLM K, SALMOND D. Spatial distribution model for tracking extended objects [J]. IEE Proceedings-Radar, Sonar, Navigation, 2005, 152(5):364-371.
- [12] GNING A, MIHAYLOV L. Mixture of uniform probability density functions for non-linear state estimation using interval analysis [C]//The 13th International Conference on Information Fusion, 2010. doi:10.1109/ICIF.2010.57/2085.
- [13] JAULIN L, KIEFFER M, DIDRIT O, et al. Applied interval analysis, with examples in parameter and state estimation, robust control and robotics [M]. London: Springer, 2001.
- [14] ABDALLAH F, GNING A, BONNIFAIT B. Box particle filtering for nonlinear state estimation using interval analysis [J]. Automatica, 2008, 44:807-815.
- [15] ZHANG Y Q, JI H B. A novel fast partitioning algorithm for extended target tracking using a Gaussian mixture PHD filter [J]. Signal Processing, 2013, 93(11):2975-2985.
- [16] GRANSTROM K, LUNSKITST C, ORGUNER U. A Gaussian mixture PHD filter for extended target tracking [C]//The 13th International Conference on Information Fusion, 2010:1-8.
- (上接第 32 页)
- [13] 廖煜雷,庄佳园,庞永杰,等. 单喷泵无人滑翔艇航向的反步自适应滑模控制[J]. 智能系统学报,2012,7(3):246-250.
- [14] 李鹏,马建军,郑志强. 采用幂次趋近律的滑模控制稳态误差界[J]. 控制理论与应用,2011,28(5):619-624.
- [15] 姜君,陈庆伟,郭健,等. 基于新型趋近律的动中通系
- 统滑模稳定跟踪控制[J]. 控制与决策,2011,26(12):1904-1908.
- [16] 张瑶,马广富,郭延宁,等. 一种多幂次滑模趋近律设计与分析[J]. 自动化学报,2016,42(3):466-472.
- [17] 胡田文,吴庆宪,姜长生,等. 指数趋近律单向辅助面滑模控制[J]. 电光与控制,2013,20(7):36-41.
- [18] 张巍巍,王京. 基于指数趋近律的非奇异 Terminal 滑模控制[J]. 控制与决策,2012,27(6):909-913.