

快速二阶终端滑模控制及其在下肢外骨骼的应用

宋胜利, 陈文浩[†], 张兴龙, 曹宇轩

(陆军工程大学 野战工程学院, 南京 210007)

摘要: 为了提高传统二阶终端滑模控制的全局收敛性, 提出一种快速二阶终端滑模控制算法. 设计一种二阶趋近律, 将绝对值函数隐藏在积分项里, 并增加线性项以提高全局收敛性. 当系统状态未到达滑模面时, 采用二阶趋近律, 并通过调整参数避免奇异问题; 当系统状态到达滑模面时, 采用不含不连续符号项的指数趋近律, 以保证控制误差有限时间收敛. 采用Lyapunov直接法证明快速二阶终端滑模控制算法的稳定性, 及其比super twisting算法具有更优良的收敛特性. 以下肢外骨骼为研究对象, 建立动力学模型. 在考虑建模误差和外部干扰的情况下, 将该算法应用于下肢外骨骼的姿态控制. 仿真结果表明, 所提出的控制算法能够有效抑制抖振, 并且比super twisting算法具有更良好的跟踪性能, 验证了该算法的有效性.

关键词: 二阶终端滑模控制; 抖振; 收敛速度; 下肢外骨骼; super twisting算法; Lyapunov直接法

中图分类号: TP351

文献标志码: A

Fast second-order terminal sliding mode control and its application in exoskeleton of lower extremities

SONG Sheng-li, CHEN Wen-hao[†], ZHANG Xing-long, CAO Yu-xuan

(College of Field Engineering, PLA Army Engineering University, Nanjing 210007, China)

Abstract: In order to improve the global convergence rate of traditional second-order terminal sliding mode control, a fast second-order terminal sliding mode control algorithm is proposed in this paper. Compared to the traditional second-order terminal sliding mode control, a new second-order approximation law is designed with absolute value functions hidden in the integral term, also a linear term is included to improve the global convergence rate. A second-order approaching rule is initially used with the possibility to avoid singularity via parameter tuning until the state has reached the sliding manifold, then a continuous exponential approaching rule is adopted instead to guarantee finite time convergence. Lyapunov direct method is used to prove the stability of fast second-order terminal sliding mode control algorithm and has better convergence properties than that of the super twisting algorithm. A lower extremity exoskeleton is taken as the research object, and its dynamics model is established. The algorithm is applied to the attitude control of the lower extremity exoskeleton with modeling errors and additive disturbance. Simulation results show that the proposed control algorithm can effectively alleviate the chattering effect, and outperforms than that of the super twisting algorithm, which verifies the effectiveness of the proposed algorithm.

Keywords: second-order terminal sliding mode control; chattering; convergence rate; lower extremity exoskeleton; super twisting algorithm; Lyapunov direct method

0 引言

滑模变结构控制是一类特殊的非线性控制, 可以根据系统的当前状态动态地变化系统结构, 迫使系统按照预定的状态轨迹滑动. 由于滑动模态可以被设计且与对象参数及扰动无关, 使得变结构系统具有对参数及扰动不敏感、快速响应、鲁棒性强和物理实现简单等优点^[1-2]. 因此, 滑模控制被广泛应用于高速和

高精度控制系统^[3-7].

近年来, 终端滑模(Terminal sliding mode, TSM)因在滑模面中引入非线性项, 提高了系统的收敛速度而成为研究热点^[8]. 但是, TSM存在奇异性问题^[9], 对此, 文献[10]提出了一种非奇异终端滑模(Non-singular terminal sliding mode, NTSM)方法, 克服了奇异问题. NTSM越远离平衡状态, 其收敛速度越快, 而

收稿日期: 2017-07-20; 修回日期: 2017-11-23.

责任编辑: 吴立刚.

作者简介: 宋胜利(1966—), 男, 教授, 博士, 从事机器人智能控制技术等研究; 陈文浩(1993—), 男, 硕士生, 从事控制理论、外骨骼的研究.

[†]通讯作者. E-mail: cwh74320@foxmail.com.

当系统接近于平衡状态时,非线性滑模的收敛速度比线性滑模的收敛速度慢,因此NTSM的收敛时间未必是最优的.为了使收敛时间最优,文献[11]提出了一种非奇异快速终端滑模控制(Non-singular fast terminal sliding mode, NFTSM).控制律中始终包含不连续的符号函数切换项会引起抖振现象,在实际应用中,抖振现象可能引起高频响应,导致执行器损坏.为了抑制抖振,一些学者提出了高阶滑模控制的思想^[12-14].文献[12,15]提出了super twisting二阶滑模控制算法,将不连续符号函数隐藏在积分项里,可实现系统误差稳定收敛到零,并且有效地抑制了抖振;文献[16]在控制律中引入了等效控制来估计外界干扰;文献[17-18]基于相同的思想,提出了类super twisting算法的二阶滑模控制算法;文献[19-20]基于super twisting算法设计的二阶滑模观测器能够快速稳定地估计出外界干扰,从而削弱抖振;文献[21]采用Lyapunov方法对super twisting算法进行了稳定性研究,给出了算法收敛的参数取值范围和收敛时间,但二阶滑模控制算法的收敛速度还有进一步提高的潜力.

在液压外骨骼机器人的运动控制中,通常需要考虑系统结构参数摄动及外部干扰问题,主要表现为参数不确定性(摩擦参数变化和负载变化等)和非参数不确定性(建模误差和外界扰动等).对于存在干扰的外骨骼机器人控制问题,本文提出一种快速二阶终端滑模控制算法以提高二阶终端滑模算法的收敛速度.设计一种二阶趋近律,将绝对值函数隐藏在积分项里,并增加线性项以提高全局收敛性.采用Lyapunov理论证明快速二阶终端滑模控制算法比super twisting具有更优良的收敛特性.最后通过仿真实验验证本文提出的控制算法对抖振的有效抑制性,及其相对于super twisting算法的快速收敛性和强鲁棒性.

1 快速二阶滑模控制算法

由于传统的滑模控制律中始终包含不连续的符号函数切换项,会引起抖振现象,可能引起高频响应导致执行器损坏.本文提出一种快速二阶终端滑模控制算法以提高二阶终端滑模算法的收敛速度.

引理1^[4] 如果存在正定李雅普诺夫函数 $V(x)$ 及参数 $u_1 > 0, u_2 > 0$ 和 $0 < \theta < 1$,满足不等式

$$\dot{V}(t) + u_1 V(x) + u_2 V^\theta(x) \leq 0, \quad (1)$$

则系统状态能够在有限时间内收敛至零点,且收敛时间满足

$$T \leq \frac{1}{u_1(1-\theta)} \ln \left(1 + \frac{u_1}{u_2} V^{1-\theta}(0) \right). \quad (2)$$

对于受扰快速二阶滑模控制算法,有如下定理成立.

定理1 考虑如下受扰快速二阶滑模控制算法:

1) 当 $S_i \neq 0$ 时($i = 1, 2, \dots, n$),有

$$\begin{aligned} \dot{S}_i &= -K_{a,i} S_i - L_i(t) + D_i(t); \\ \dot{L}_i(t) &= \begin{cases} \lambda_i \left(-\frac{\varepsilon_{a,i}|S_i|}{L_i} + S_i - \frac{D_i(t)|S_i|}{L_i} - \varepsilon_{b,i} L_i - \frac{K_{b,i}}{L_i} \left| \frac{1}{2} \left(S_i^2 + \frac{L_i^2}{\lambda_i} \right) \right|^{0.5} \right), & L_i(t_*) \neq 0; \\ \lambda_i \left(-\frac{\varepsilon_{a,i}|S_i|}{L_i} + S_i - \frac{D_i(t)|S_i|}{L_i} - \varepsilon_{c,i} L_i - \frac{K_{b,i}}{L_i} \left| \frac{1}{2} \left(S_i^2 + \frac{L_i^2}{\lambda_i} \right) \right|^{0.5} \right), & L_i(t_*) = 0. \end{cases} \end{aligned} \quad (3)$$

其中: S_i 为 n 维滑模面向量分量, $S = [S_1, S_2, \dots, S_n]^T$; $L_i(t)$ 为 n 维时变函数向量分量; $D_i(t)$ 为 n 维复合干扰向量分量,且满足 $|D_i(t)| \leq D_{m,i}$; λ_i 、 $K_{a,i}$ 、 $K_{b,i}$ 、 $\varepsilon_{a,i}$ 、 $\varepsilon_{b,i}$ 和 $\varepsilon_{c,i}$ 为控制参数向量分量,都大于零,并且 $\varepsilon_{b,i} = k_{a,i}/\lambda_i$, $\varepsilon_{c,i} > \varepsilon_{b,i}$; t_* 为 t 的下一时刻.

2) 当 $S_i = 0$ 时($i = 1, 2, \dots, n$),有

$$\dot{S}_i = -K_{a,i} S_i + D_i, \quad (4)$$

则系统将在有限时间内到达终端滑模面,并使得跟踪误差在有限时间内收敛到0.

证明 1) 当 $S_i \neq 0$ 时($i = 1, 2, \dots, n$),有

$$V_i = \frac{1}{2} S_i^2 + \frac{1}{2\lambda_i} L_i^2. \quad (5)$$

对式(5)求导,可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_i &= S_i \dot{S}_i + \frac{1}{\lambda_i} L_i \dot{L}_i = \\ &= -K_{a,i} S_i^2 + D_i(t) S_i - D_{m,i} |S_i| - \varepsilon_{a,i} |S_i| - \\ &= \varepsilon_{d,i} L_i^2 - K_{b,i} \sqrt{\frac{1}{2} \left(S_i^2 + \frac{L_i^2}{\lambda_i} \right)}. \end{aligned} \quad (6)$$

其中

$$\varepsilon_{d,i} = \begin{cases} \varepsilon_{b,i}, & L_i(t_*) \neq 0; \\ \varepsilon_{c,i}, & L_i(t_*) = 0. \end{cases}$$

将式(5)代入(6),可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_i &= -2k_{a,i} V_i + D_i(t) S_i - D_{m,i} |S_i| - \varepsilon_{a,i} |S_i| - \\ &= \left(\varepsilon_{d,i} - \frac{k_{a,i}}{\lambda_i} \right) L_i^2 - K_{b,i} V_i^{0.5}. \end{aligned} \quad (7)$$

由于 $|D_i(t)| \leq D_{m,i}$ 且 $\varepsilon_{d,i} > k_{a,i}/\lambda_i$,可得

$$\dot{V}_i \leq -2k_{a,i} V_i - k_{b,i} V_i^{0.5}. \quad (8)$$

由于 $\dot{L}_i(t_*)$ 中包含 $(D_i + \varepsilon_{d,i})|s|/L_i(t_*)$ 项, 而 $L_i(t_*)$ 在控制过程中可能等于零, 将会产生奇异问题. 只要 $L_i(t)$ 的初值不取零, 当 $L_i(t_*) = 0$ 时, 将参数 $\varepsilon_{b,i}$ 变为 $\varepsilon_{c,i}$, 即可避免奇异问题.

2) 当 $S_i = 0$ 时 ($i = 1, 2, \dots, n$), 取李雅普诺夫函数

$$V_i = \frac{1}{2} S_i^2. \quad (9)$$

对式(9)求导, 可得

$$\dot{V}_i = S_i \dot{S}_i = -K_{a,i} S_i^2 + D_i(t) S_i. \quad (10)$$

由于 $S_i = 0$, 将式(9)代入(10), 仍然可得

$$\dot{V}_i \leq -2k_{a,i} V_i - k_{b,i} V_i^{0.5}. \quad (11)$$

由引理1可得系统能够在有限时间内收敛至零点, 且收敛时间满足

$$T_r \leq \frac{1}{k_{a,i}} \ln \left(1 + \frac{2k_{a,i}}{k_{b,i}} V_i^{0.5}(0) \right). \quad (12)$$

由此定理1得证. $\square$

当Lyapunov函数 V_i 距离平衡点较远时, 线性项 $2k_{a,i} V_i$ 大于非线性项 $k_{b,i} V_i^{0.5}$, 收敛速度主要由线性项决定, 为指数收敛; 当Lyapunov函数 V_i 距离平衡点较近时, 非线性项大于线性项, 收敛速度主要由非线性项决定. 线性项与非线性项的结合使得本文的快速二阶滑模控制算法具有较快的收敛速度.

注1 Levant提出的受扰的super twisting二阶滑模控制算法为

$$\dot{S}_i = -K_{a,i} |S_i|^{0.5} \text{sgn}(S_i) - \int_0^t K_{b,i} \text{sgn}(S_i(\tau)) + \Delta. \quad (13)$$

其中: 复合干扰 Δ 需要满足连续可微且一阶倒数有界的条件, 即 $|\dot{\Delta}| \leq \Psi$. 文献[21]证明了该算法的稳定性, 并且给出了其具体的推导过程, 最终得到的Lyapunov函数满足如下关系式:

$$\dot{V}_i \leq -\Lambda V_i^{0.5}, \quad (14)$$

其中 Λ 为与 $K_{a,i}$ 、 $K_{b,i}$ 和 Δ 相关的函数. 当Lyapunov函数 V_i 距离平衡点较远时, 非线性项 $\Lambda V_i^{0.5}$ 比线性项小, 使得系统收敛较慢; 当Lyapunov函数 V_i 距离平衡点较近时, 非线性项比线性项大, 使得系统收敛较快. 因此, 本文的快速二阶滑模控制算法, 通过增加线性项相比普通super twisting算法具有更快的收敛速度.

2 下肢外骨骼动力学模型

下肢外骨骼结构如图1所示, 外骨骼每条腿有7个自由度, 髋关节和踝关节均有3个自由度, 膝关节

有1个自由度. 膝关节的和踝关节的屈伸自由度为主动自由度, 其余为被动自由度.

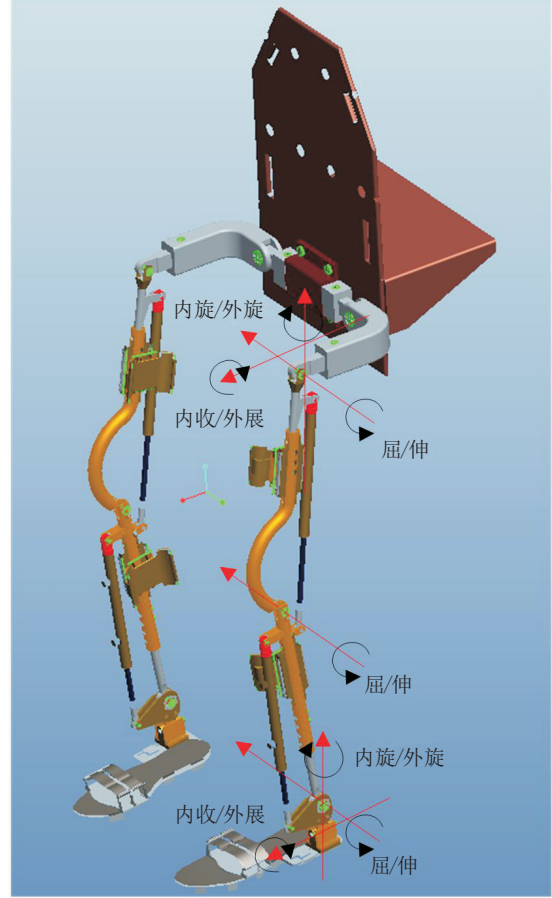


图1 下肢外骨骼模型

系统中单腿动力学方程为

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau + \tau_d. \quad (15)$$

其中: q 为 2×1 维关节角位移; τ 为 2×1 维控制力矩; τ_d 为干扰力矩; $M(q) = M_0(q) + \Delta M(q)$ 为 2×2 维对称正定惯量矩阵; $C(q, \dot{q}) = C_0(q, \dot{q}) + \Delta C(q, \dot{q})$ 为 2×1 维哥式力和离心力矩阵; $G(q) = G_0(q) + \Delta G(q)$ 为 2×1 维重力项矩阵; $M_0(q)$ 、 $C_0(q, \dot{q})$ 和 $G_0(q)$ 为名义模型参数矩阵; $\Delta M(q)$ 、 $\Delta C(q, \dot{q})$ 和 $\Delta G(q)$ 为模型误差. 动力学方程式(11)可写为

$$M_0(q)\ddot{q} + C_0(q, \dot{q})\dot{q} + G_0(q) + F(t) = \tau. \quad (16)$$

其中: $F(t) = \Delta M(q)\ddot{q} + \Delta C(q, \dot{q})\dot{q} + \Delta G(q) - \tau_d$, 且 $M_0^{-1}F$ 各分量有界, 即 $|(M_0^{-1}F)_i| \leq F_{d,i}$, $i = 1, 2$.

3 滑模控制器设计

控制目标是使得外骨骼跟踪预定义轨迹, 定义 q_d 和 q 分别是期望的和实际的角位移, 定义跟踪误差为

$$e = q_d - q. \quad (17)$$

设计终端滑模面为

$$S = \alpha e + \beta e^\gamma + \dot{e}. \quad (18)$$

其中: $\alpha = \text{diag}(\alpha_1, \alpha_2)$, 各分量大于0; $\beta = \text{diag}(\beta_1, \beta_2)$, 各分量大于0; $S = [S_1, S_2]^T$; $e^\gamma = [e^{\gamma_1}, e^{\gamma_2}]^T$, $\gamma_i = a_i/b_i$, 且 a_i, b_i 为奇数, $a_i > b_i$.

趋近律采用本文的快速二阶滑模算法, 由此可得外骨骼滑模控制律为

$$\tau = \begin{cases} M_0(\alpha \dot{e} + \beta \gamma e^{\gamma-1} \dot{e} + \ddot{q}_d + K_a S + L) + \\ C_0(q, \dot{q})\dot{q} + G_0(q), S \neq 0; \\ M_0(\alpha \dot{e} + \beta \gamma e^{\gamma-1} \dot{e} + \ddot{q}_d + K_a S) + \\ C_0(q, \dot{q})\dot{q} + G_0(q), S = 0. \end{cases} \quad (19)$$

其中: $\gamma = \text{diag}(\gamma_1, \gamma_2)$; $e^{\gamma-1} = \text{diag}(e^{\gamma_1-1}, e^{\gamma_2-1})$; $K_a = \text{diag}(K_{a,1}, K_{a,2})$.

4 仿真验证

为了验证本文快速二阶终端滑模控制(FSOSM)的效果, 在Matlab的Simulink环境下作仿真分析, 并采用所设计的FSOSM和传统的super twisting(ST)、NFTSM对下肢外骨骼进行随动控制. NFTSM使用的指数趋近律为

$$\dot{s}_z = -k_1 s_z - \varepsilon_a \text{sgn}(s_z). \quad (20)$$

3种控制采用相同的滑模面(18), 使用的各参数向量分量相等, 各参数如表1所示.

表1 系统参数

参数	值	参数	值
α	10	β	10
a	3	b	5
k_1	200	k_2	1400
K_a	200	K_b	1400
ε_a	100	ε_b	2
ε_c	2.5	λ	100
F_d	100		

目标状态变量设为 $q_d = 2 \sin(4\pi t)$, q 的初值取3, $\dot{q}$ 、 $\ddot{q}$ 的初值取0, L 的初值取-2, $\tau_d = 100 \sin(2\pi t)$. 外骨骼模型参数如下所示:

$$M_0 = \begin{bmatrix} 0.066 + 0.035 \cos q_2 & 0.015 + 0.02 \cos q_2 \\ 0.015 + 0.02 \cos q_2 & 0.015 \end{bmatrix},$$

$$C_0 = \begin{bmatrix} -0.02 \dot{q}_2 \sin q_2 & -0.02(\dot{q}_2 + \dot{q}_1) \cos q_2 \\ 0.02 \dot{q}_1 \sin q_2 & 0 \end{bmatrix},$$

$$G_0 = \begin{bmatrix} 2.82 \sin q_1 + 1.1 \sin(q_1 + q_2) \\ 1.1 \sin(q_1 + q_2) \end{bmatrix}.$$

踝关节仿真结果如图2~图4所示.

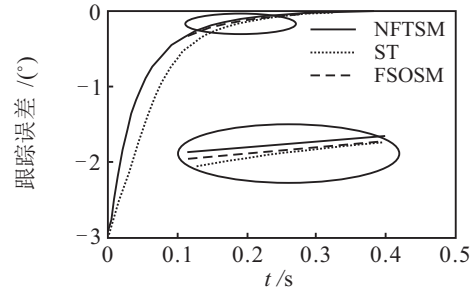


图2 跟踪效果

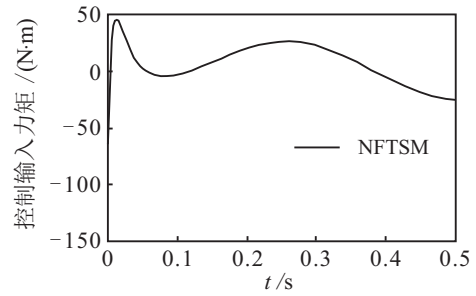


图3 滑模控制输入(NFTSM)

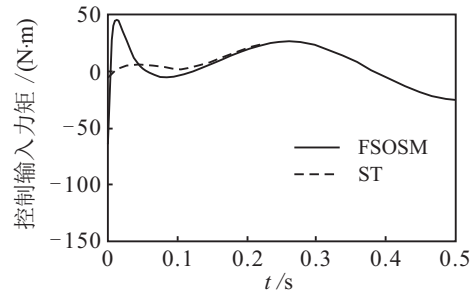


图4 滑模控制输入(ST、FSOSM)

从图2中可以看出, 系统在不确定性和外界干扰的情况下, NFTSM的收敛速度最快, FSOSM的收敛速度快于ST.

从图3中可以看出, NFTSM存在抖振, 不利于实际应用.

从图4中可以看出, FSOSM与ST的输出较为平滑, 能够有效地抑制抖振.

5 结 论

本文提出了一种快速二阶终端滑模控制算法, 并采用Lyapunov理论证明了快速二阶终端滑模控制算法比super twisting具有更优良的收敛特性. 将该算法应用于存在干扰的下肢外骨骼姿态控制, 仿真结果表明, 本文所提出的控制算法能够有效抑制抖振, 并且比super twisting具有更好的跟踪性能.

参考文献(References)

- [1] 黄健, 鲜斌. 一种基于自适应2阶终端滑模控制算法的理论和实验研究[J]. 信息与控制, 2016, 45(6): 660-665.
(Huang J, Xian B. Theoretical and experimental research of adaptive second-order terminal sliding-mode

- controller[J]. *Information and Control*, 2016, 45(6): 660-665.)
- [2] 江浩斌, 龚晓庆, 耿国庆, 等. P-ECHPS 自适应非奇异快速终端滑模控制器设计[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(9): 374-381.
(Jiang H B, Gong X Q, Geng G Q, et al. Design of adaptive nonsingular fast terminal sliding mode controller for P-ECHPS[J]. *Trans of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(9): 374-381.)
- [3] 谭健, 周洲, 祝小平, 等. 快速 super twisting 算法及其在飞翼布局无人机姿态控制上的应用[J]. *控制与决策*, 2016, 31(1): 143-148.
(Tan J, Zhou Z, Zhu X P, et al. Fast super twisting algorithm and its application to attitude control of flying wing UAV[J]. *Control and Decision*, 2016, 31(1): 143-148.)
- [4] 杨雅君, 廖瑛, 尹大伟, 等. 双层自适应快速 super twisting 控制算法[J]. *控制理论与应用*, 2016, 33(8): 1119-1127.
(Yang Y J, Liao Y, Yin D W, et al. Adaptive dual layer fast super twisting control algorithm[J]. *Control Theory & Applications*, 2016, 33(8): 1119-1127.)
- [5] Baek J, Jin M, Han S. A new adaptive sliding-mode control scheme for application to robot manipulators[J]. *IEEE Trans on Industrial Electronics*, 2016, 63(6): 3628-3637.
- [6] Ray A S, Bhattacharya A. Improved tracking of shunt active power filter by sliding mode control[J]. *Int J of Electrical Power & Energy Systems*, 2016, 78: 916-925.
- [7] Elmokadem T, Zribi M, Youcef-Toumi K. Trajectory tracking sliding mode control of underactuated AUVs[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2016, 84(2): 1079-1091.
- [8] 许波, 朱焜秋. 自适应非奇异终端滑模控制及其在 BPMSM 中的应用[J]. *控制与决策*, 2014, 29(5): 833-837.
(Xu B, Zhu H Q. Adaptive nonsingular terminal sliding model control and its application to BPMSM[J]. *Control and Decision*, 2014, 29(5): 833-837.)
- [9] 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, 17(2): 194-198.
(Feng Y, Bao S, Yu X H. Design method of non-singular terminal sliding mode control systems[J]. *Control and Decision*, 2002, 17(2): 194-198.)
- [10] 熊少锋, 王卫红, 王森. 带攻击角度约束的非奇异快速终端滑模制导律[J]. *控制理论与应用*, 2014, 31(3): 269-278.
(Xiong S F, Wang W H, Wang S. Nonsingular fast terminal sliding-mode guidance with intercept angle constraint[J]. *Control Theory & Applications*, 2014, 31(3): 269-278.)
- [11] 冉德超, 倪庆, 绳涛, 等. 基于自适应二阶终端滑模的航天器有限时间姿态机动算法[J]. *国防科技大学学报*, 2017, 39(1): 6-10.
(Ran D C, Ni Q, Shen T, et al. Spacecraft attitude maneuver algorithm design based on adaptive second-order terminal sliding mode[J]. *J of National University of Defense Technology*, 2017, 39(1): 6-10.)
- [12] Arie Levant. Sliding order and sliding accuracy in sliding mode control[J]. *Int J of Control*, 1993, 58(6): 1247-1263.
- [13] Shtessel Y B, Shkolnikov I A, Levant A. Smooth second-order sliding modes: Missile guidance application[J]. *Automatica*, 2007, 43(8): 1470-1476.
- [14] Levant A, Pavlov Y. Generalized homogeneous quasicontinuous controllers[J]. *Int J of Robust & Nonlinear Control*, 2010, 18(4/5): 385-398.
- [15] Levant A. Principles of 2-sliding mode design[J]. *Automatica*, 2007, 43(4): 576-586.
- [16] Utkin V I, Poznyak A S. Adaptive sliding mode control with application to super-twist algorithm: Equivalent control method[J]. *Automatica*, 2013, 49(1): 39-47.
- [17] Edwards C, Shtessel Y. Dual-layer adaptive sliding mode control[C]. *American Control Conf. Portland: IEEE*, 2014: 4524-4529.
- [18] Edwards C, Shtessel Y. Adaptive dual layer second-order sliding mode control and observation[C]. *American Control Conf. Chicago: IEEE*, 2015: 5853-5858.
- [19] Zhang C, Chen Z J, Wei C. Sliding mode disturbance observer-based backstepping control for a transport aircraft[J]. *Science China*, 2014, 57(5): 1-16.
- [20] 王首斌, 王新民, 谢蓉, 等. 基于干扰观测器的高超音速飞行器鲁棒反步控制[J]. *控制与决策*, 2013, 28(9): 1507-1512.
(Wang S B, Wang X M, Xie R, et al. Robust backstepping control based on disturbance observer for hypersonic vehicle[J]. *Control and Decision*, 2013, 28(9): 1507-1512.)
- [21] 胡正高, 赵国荣, 黄婧丽, 等. 基于二阶滑模观测器的连续系统故障估计[J]. *控制与决策*, 2014, 29(12): 2271-2276.
(Hu Z G, Zhao G R, Huang J L, et al. Fault estimation of continuous-time systems based on second order sliding mode observation[J]. *Control and Decision*, 2014, 29(12): 2271-2276.)

(责任编辑: 闫妍)