

文章编号: 1001-0920(2013)02-0289-05

一种新型滑模控制双幂次趋近律

张合新, 范金锁, 孟飞, 黄金峰

(第二炮兵工程大学 301 室, 西安 710025)

摘要: 针对滑模控制中传统趋近律存在收敛速度慢、时间长和抖振严重等不足, 提出一种利用双幂次趋近律提高系统状态收敛速度的设计方案. 该双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. 理论分析表明, 该双幂次趋近律具有二阶滑模特性, 当系统存在不确定性时, 系统状态及其导数可以快速收敛到平衡零点的邻域内. 仿真结果表明, 双幂次趋近律与传统幂次趋近律、指数趋近律、快速幂次趋近律相比, 具有更快的收敛速度和更好的运动品质.

关键词: 滑模控制; 双幂次趋近律; 二阶滑模; 指数趋近律; 快速幂次趋近律

中图分类号: TP113

文献标志码: A

A new double power reaching law for sliding mode control

ZHANG He-xin, FAN Jin-suo, MENG Fei, HUANG Jin-feng

(The 301 Section, The Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China. Correspondent: ZHANG He-xin, E-mail: Hexin_xa@tom.com)

Abstract: A double power reaching law is proposed which can solve the problems in the traditional reaching law of the sliding mode control such as low convergence speed, long convergence time and severe chattering. The double power reaching law proposed which can reduce chattering has a fast speed either away from or approach to the sliding surface. It is indicated through theoretical analysis that the reaching law has the characteristic of second-order sliding mode, and the system state and its derivative can converge to a neighborhood of the origin quickly. Simulation results show that the reaching law proposed is faster than other reaching laws such as the traditional power reaching law, the exponential reaching law and the fast power reaching law. It also shows a better movement quality of the proposed reaching law.

Key words: sliding mode control; double power reaching law; second-order sliding mode; exponential reaching law; fast power reaching law

0 引言

滑模控制能够实现系统解耦控制, 并对匹配不确定性具有不变性, 但是传统的滑模控制方法抖振严重. 现阶段解决此不足的主要手段有高阶滑模控制^[1-2]和非奇异终端滑模控制^[3-4]. 高阶滑模控制尽管去除抖振效果显著, 但往往不适用于一阶系统; 非奇异终端滑模控制能够有效去除系统控制量的抖振, 而且能够在有限时间内使系统状态收敛于平衡点, 但如果考虑趋近滑动模态的能力, 即便快速终端滑模控制在靠近滑动模态的空间位置时, 其趋近速度相对于指数趋近率也非常慢, 所以非奇异终端滑模的无抖振是以控制性能的降低为代价的. 滑模控制系统具有其优越鲁棒性的前提条件是系统状态运动在滑动模态上, 而在趋近阶段滑模控制系统仍对参数不确定性和外扰敏感,

因此如何最小化趋近阶段并在此过程中去除抖振仍是现今研究的热点之一.

高为炳教授提出采用等速趋近律、指数趋近律和幂次趋近律等实用的滑模趋近律来消除系统抖振并保证滑动模态的实现^[5], 通过选取适当参数保证系统在趋近运动阶段的运动特性, 保证了滑动模态的实现. 然而, 等速趋近律趋近速度很慢, 而且趋近速度单一; 指数趋近律是在等速趋近律基础上增加一指数项, 虽然趋近速度快, 但在接近滑动模态时系统抖振较大; 幂次趋近律采用幂次项技术使得系统接近滑动模态时趋近速度放缓, 有利于削弱抖振, 不足之处是在状态远离滑动模态的趋近阶段存在速度过小, 运动时间过长的问题. 文献[6]利用传统幂次趋近律与指数趋近律的线性组合提出一种快速幂次趋近律, 解

收稿日期: 2011-08-10; 修回日期: 2012-03-29.

作者简介: 张合新(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 从事飞行器制导与控制等研究; 范金锁(1982—), 男, 博士生, 从事滑模控制系统的研究.

决了传统幂次趋近律存在的问题. 李鹏等^[7]对此趋近律进行了细致分析并得出其具有二阶滑模特性. 文献^[8]提出了一种双幂次趋近律用以实现机器人控制中状态快速收敛问题, 但没有解决受扰时控制作用抖动问题, 而且对该趋近律的特性缺乏定性分析.

本文在以上文献的基础上对双幂次趋近律特性进行分析并提出解决系统有界不确定扰动影响的方案. 理论分析表明: 该趋近律不仅可以有效地去除抖振, 而且无论在远离还是接近滑动模态时均具有很快的趋近速度; 在有限的收敛时间后具有二阶滑模特性, 即 $\sigma = \dot{\sigma} = 0$; 当存在有界外扰时, σ 和 $\dot{\sigma}$ 分别收敛于平衡零点的有界邻域内. 仿真算例结果表明, 双幂次趋近律较之传统幂次趋近律、指数趋近律、快速幂次趋近律, 均具有更快的趋近速度和更好的运动品质.

1 双幂次趋近律及其特性分析

基于以上分析, 双幂次趋近律如下^[8]:

$$\dot{\sigma} = -k_1|\sigma|^\alpha \operatorname{sgn}(\sigma) - k_2|\sigma|^\beta \operatorname{sgn}(\sigma). \quad (1)$$

其中: $\alpha > 1, 0 < \beta < 1, k_1 > 0, k_2 > 0$. 当系统状态远离滑动模态 ($|\sigma| > 1$) 时, 式(1)中第1项起主导作用; 当系统状态接近滑动模态 ($|\sigma| < 1$) 时, 第2项起主导作用, 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.

1.1 双幂次趋近律的二阶滑模特性分析

定理 1 对于系统(1), 状态 σ 及 $\dot{\sigma}$ 在有限时间内收敛于平衡零点, 即在有限收敛时间后有 $\sigma = \dot{\sigma} = 0$.

证明 根据滑模可达性, 结合式(1)及条件 $\alpha > 1, 0 < \beta < 1, k_1 > 0, k_2 > 0$, 有

$$\begin{aligned} \sigma \dot{\sigma} &= \sigma[-k_1|\sigma|^\alpha \operatorname{sgn}(\sigma) - k_2|\sigma|^\beta \operatorname{sgn}(\sigma)] = \\ &= -k_1|\sigma|^{1+\alpha} - k_2|\sigma|^{1+\beta} < 0, \end{aligned} \quad (2)$$

因此滑动模态可在有限时间内到达平衡零点. 下面假设系统初始状态 $\sigma(0) > 1$, 分2个阶段进行有限时间 t 的计算.

1) $\sigma(0) \rightarrow \sigma = 1$. 此时, 因为 $\alpha > 1, 0 < \beta < 1$, 所以式(1)中第1项起主导作用, 远大于第2项的作用, 从而可以忽略第2项的影响. 由式(1)可得

$$\dot{\sigma} = -k_1|\sigma|^\alpha \operatorname{sgn}(\sigma). \quad (3)$$

对式(3)两边积分, 可得

$$\sigma^{1-\alpha} = -(1-\alpha)k_1 t + \sigma(0)^{1-\alpha}. \quad (4)$$

由此可计算得到 $\sigma(0) \rightarrow \sigma = 1$ 所需时间为

$$t_1 = \frac{1 - \sigma(0)^{1-\alpha}}{k_1(\alpha - 1)}. \quad (5)$$

2) $\sigma = 1 \rightarrow \sigma = 0$. 同样, 因为 $\alpha > 1, 0 < \beta < 1$, 所以式(1)中第2项起主导作用, 远大于第1项的作用, 从而可以忽略第1项的影响. 由式(1)可得

$$\dot{\sigma} = -k_2|\sigma|^\beta \operatorname{sgn}(\sigma). \quad (6)$$

对式(6)两边积分, 可得

$$\sigma^{1-\beta} = -(1-\beta)k_2 t + 1. \quad (7)$$

由此可计算得到 $\sigma = 1 \rightarrow \sigma = 0$ 所需时间为

$$t_2 = \frac{1}{k_2(1-\beta)}. \quad (8)$$

因此收敛时间为两个趋近阶段各收敛时间的总和, 即

$$t = t_1 + t_2 = \frac{1 - \sigma(0)^{1-\alpha}}{k_1(\alpha - 1)} + \frac{1}{k_2(1-\beta)}. \quad (9)$$

当 $\sigma(0) < -1$ 时, 同样可以分2个阶段进行收敛时间的研究. 此时, 系统状态收敛时间为

$$t = t_1 + t_2 = \frac{1 + \sigma(0)^{1-\alpha}}{k_1(\alpha - 1)} + \frac{1}{k_2(1-\beta)}. \quad (10)$$

进一步, 由式(1)可知, 当 $\sigma = 0$ 时 $\dot{\sigma} = 0$. \square

注 1 显然收敛时间 t 是系统初始状态的连续函数; 因为在求取收敛时间时忽略了次要因素, 所以实际收敛时间小于式(9)和(10).

注 2 当 $\sigma = 0$ 时 $\dot{\sigma} = 0$, 因此当状态达到滑动模态时速度减小为零, 与滑动模态实现了光滑过渡, 大大削弱了系统抖振. 适当增大参数 k_1 和 α 可以加快远离滑动模态时的趋近速度. 同理, 适当增大参数 k_2 和 β 可以加快接近滑动模态时的趋近速度.

1.2 双幂次趋近律的干扰稳态界分析

当系统存在不确定性有界外扰时, 状态 σ 和 $\dot{\sigma}$ 不能保证在有限时间内收敛到 $(0, 0)$, 而仅能收敛到 $(0, 0)$ 的一个邻域内. 为便于分析, 首先引入以下引理^[9].

引理 1 令 $x \in D \subset R^n, \dot{x} = f(x), f: R^n \rightarrow R^n$ 为定义在平衡零点邻域 D 内的连续函数. 假设存在连续函数 $V: D \rightarrow R$ 满足以下条件: 1) V 正定; 2) \dot{V} 除平衡零点外负定; 3) 存在实数 $k > 0, \alpha > 0$ 和一邻域 $N \subset D$ 使得 $\dot{V} + kV^\alpha \leq 0$. 则函数 $\dot{x} = f(x)$ 关于平衡零点有限时间收敛.

根据引理1, 考虑系统(1)存在不确定性外扰时状态的收敛特性, 可得如下定理.

定理 2 考虑存在不确定性的系统

$$\dot{\sigma} = -k_1|\sigma|^\alpha \operatorname{sgn}(\sigma) - k_2|\sigma|^\beta \operatorname{sgn}(\sigma) + d(t), \quad (11)$$

假设 $|d(t)| \leq \delta, \delta > 0$ 为正常数, 则系统(11)的状态 σ 和 $\dot{\sigma}$ 在有限时间内收敛到以下区域:

$$|\sigma| \leq \min\left(\left(\frac{\delta}{k_1}\right)^{1/\alpha}, \left(\frac{\delta}{k_2}\right)^{1/\beta}\right), \quad (12)$$

$$\begin{aligned} |\dot{\sigma}| &\leq \min\left(\delta, k_1\left(\frac{\delta}{k_2}\right)^{\alpha/\beta}\right) + \\ &\min\left(k_2\left(\frac{\delta}{k_1}\right)^{\beta/\alpha}, \delta\right) + \delta. \end{aligned} \quad (13)$$

证明 选取 Lyapunov 函数

$$V = 0.5\sigma^2. \quad (14)$$

式(14)两端对时间求导数并将式(11)代入, 得

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \sigma \dot{\sigma} = \\ \sigma[-k_1|\sigma|^\alpha \text{sgn}(\sigma) - k_2|\sigma|^\beta \text{sgn}(\sigma) + d(t)] &= \\ -k_1|\sigma|^{1+\alpha} - k_2|\sigma|^{1+\beta} + \sigma d(t) &\leq \\ -k_1|\sigma|^{1+\alpha} - k_2|\sigma|^{1+\beta} + |\sigma||d(t)|. \end{aligned} \quad (15)$$

式(15)经过变形可得

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq -k_1|\sigma|^{1+\alpha} - k_2|\sigma|^{1+\beta} + |\sigma||d(t)| = \\ -k_1|\sigma|^{1+\alpha} - |\sigma|(k_2|\sigma|^\beta - |d(t)|). \end{aligned} \quad (16)$$

如果满足 $k_2|\sigma|^\beta - \delta \geq 0$, 则

$$\dot{V} \leq -k_1|\sigma|^{1+\alpha} = -k_1V^{(1+\alpha)/2}. \quad (17)$$

由引理1可知, 系统关于平衡零点有限时间收敛, 因此区域

$$|\sigma| \leq \left(\frac{\delta}{k_2}\right)^{1/\beta} \quad (18)$$

能够保证有限时间的收敛性.

式(15)亦可变形为

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq -k_2|\sigma|^{1+\beta} - k_1|\sigma|^{1+\alpha} + |\sigma||d(t)| = \\ -k_2|\sigma|^{1+\beta} - |\sigma|(k_1|\sigma|^\alpha - |d(t)|). \end{aligned} \quad (19)$$

如果满足 $k_1|\sigma|^\alpha - \delta \geq 0$, 则

$$\dot{V} \leq -k_2|\sigma|^{1+\beta} = -k_2V^{(1+\beta)/2}. \quad (20)$$

由引理1可知, 系统关于平衡零点有限时间收敛, 因此区域

$$|\sigma| \leq \left(\frac{\delta}{k_1}\right)^{1/\alpha} \quad (21)$$

同样能够保证有限时间的收敛性. 综合式(18)和(21)可得 σ 在有限时间内收敛到区域

$$|\sigma| \leq \min\left(\left(\frac{\delta}{k_1}\right)^{1/\alpha}, \left(\frac{\delta}{k_2}\right)^{1/\beta}\right). \quad (22)$$

将上式代入式(11), 可得

$$\begin{aligned} |\dot{\sigma}| &\leq k_1|\sigma|^\alpha \text{sgn}(\sigma) + k_2|\sigma|^\beta \text{sgn}(\sigma) + d(t) \leq \\ k_1|\sigma|^\alpha + k_2|\sigma|^\beta + |d(t)| &\leq \\ k_1 \cdot \min\left(\left(\frac{\delta}{k_1}\right)^{1/\alpha}, \left(\frac{\delta}{k_2}\right)^{1/\beta}\right)^\alpha + \\ k_2 \cdot \min\left(\left(\frac{\delta}{k_1}\right)^{1/\alpha}, \left(\frac{\delta}{k_2}\right)^{1/\beta}\right)^\beta + \delta = \\ \min\left(\delta, k_1\left(\frac{\delta}{k_2}\right)^{\alpha/\beta}\right) + \min\left(k_2\left(\frac{\delta}{k_1}\right)^{\beta/\alpha}, \delta\right) + \delta. \end{aligned} \quad (23)$$

综上, 定理2得证. \square

注3 在实际控制系统应用中, 可通过设计干扰观测器在线估计不确定性以消除其影响, 保证二阶滑模特性 $\sigma = \dot{\sigma} = 0$ 的成立.

2 仿真算例及分析

考虑非线性单入单出系统

$$\dot{\sigma} = u + d(t), \quad (24)$$

其中 $d(t)$ 为系统存在的不确定性, 假设系统初始状态 $\sigma(0) = 6$. 当 $d(t) = 0$ 时, 分别利用指数趋近律、幂次

趋近律、快速幂次趋近律和本文提出的双幂次趋近律设计控制律 u 并进行仿真, 以检验本文算法的有效性; 当 $d(t) = 0.5 \sin(2t) + 0.3 \cos t$ 时, 检验本文提出的双幂次趋近律的稳态界是否正确.

2.1 各趋近律仿真对比

当系统不存在不确定性, 即 $d(t) = 0$ 时, 分别利用各趋近律设计的控制律如下:

1) 指数趋近律

$$u_1 = -k_z\sigma - \varepsilon \text{sgn}(\sigma); \quad (25)$$

2) 幂次趋近律

$$u_2 = -k_m|\sigma|^{\alpha_z} \text{sgn}(\sigma); \quad (26)$$

3) 快速幂次趋近律

$$u_3 = -k_{s1}\sigma - k_{s2}|\sigma|^{\alpha_s} \text{sgn}(\sigma); \quad (27)$$

4) 双幂次趋近律

$$u_4 = -k_1|\sigma|^\alpha \text{sgn}(\sigma) - k_2|\sigma|^\beta \text{sgn}(\sigma). \quad (28)$$

分别利用上述控制律进行仿真实验, 状态 σ 和 $\dot{\sigma}$ 的收敛情况如图1和图2所示.

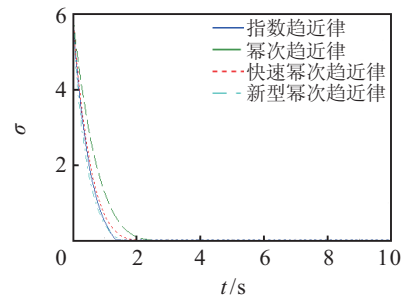


图1 σ 变化曲线

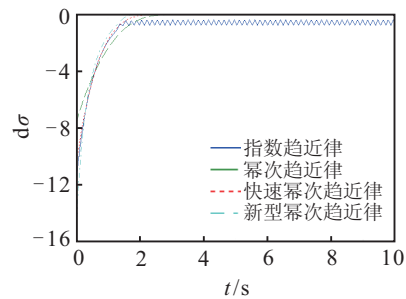


图2 $\dot{\sigma}$ 变化曲线

由图1和图2可见: 指数趋近律尽管收敛速度较快, 但含有常数项, 使得系统状态在接近滑动模态阶段出现较严重的抖振; 幂次趋近律尽管消除了抖振, 但在远离滑动模态阶段收敛速度过小, 导致收敛时间过长; 快速幂次趋近律和双幂次趋近律在消除抖振的同时, 趋近速度明显高于指数趋近律和幂次趋近律. 相比于快速幂次趋近律, 双幂次趋近律具有更好的运动品质: 系统状态远离滑动模态时, 双幂次趋近律的速度高于其他趋近律; 系统状态接近滑动模态时, 双幂次趋近律速度则低于其他趋近律, 实现了与滑动模

态的光滑过渡,有利于削弱系统抖振;初始误差越大,双幂次趋近律的速度优势越明显。

2.2 双幂次趋近律稳态误差界仿真

当不确定性 $d(t) = 0.5 \sin(2t) + 0.3 \cos t$ 时,利用式(28)进行系统仿真,以检验式(12)和(13)的正确性。在式(28)中,令 $k_1 = 0.7, k_2 = 2, \alpha = 1.5, \beta = 0.5$,代入式(12)和(13)可得 $|\sigma| \leq 1.4776$ 。仿真结果如图3和图4所示。

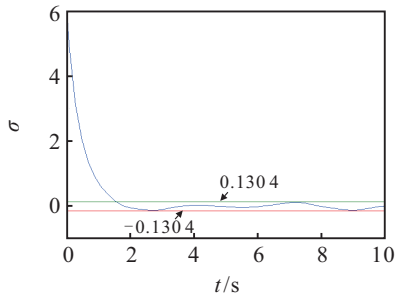


图3 受扰时 σ 收敛曲线

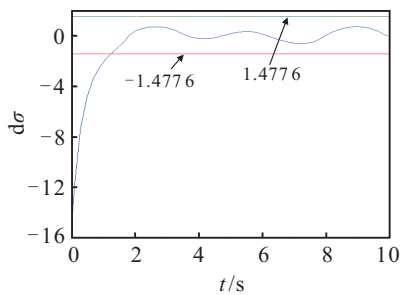


图4 受扰时 $\dot{\sigma}$ 收敛曲线

由图3和图4可见:在受扰情况下,系统状态 σ 和 $\dot{\sigma}$ 不会收敛至零点,而仅在有限时间内收敛至稳态界限内,其稳态误差不超过式(12)和(13)的计算结果;在参数相同的情况下,采用快速幂次趋近律的系统状态 σ 和 $\dot{\sigma}$ 稳态界^[7]的计算值为 $|\sigma| \leq 0.3612, |\dot{\sigma}| \leq 1.6040$,大于图3和图4中稳态误差值,因此即使在存在不确定性情况下,相比于快速幂次趋近律,双幂次趋近律仍具有更好的运动品质。

2.3 实际应用中扰动解决方案探讨

从仿真算例可以看出,当存在有界性外扰时,双幂次趋近律不能使系统状态收敛至平衡零点,仅能使其收敛至一稳态界限内。系统建模误差同样会对该趋近律的收敛性产生影响。针对系统建模误差与有界性外扰构成的有界性集总扰动,可以在实际系统中应用滑模干扰观测器进行消除,以保证系统状态的收敛性。

滑模干扰观测器技术能够在线估计有界性集总扰动,已被广泛应用于高精度运动控制系统。Shtessel等^[10-13]基于多时间尺度双回路控制的设计思想,利用SMDO技术、动态逆控制和滑模控制技术设计了一系列飞行器控制系统,内容涉及可重复使用航天器再

入、卫星编队飞行、刚体航天器等。然而, Shtessel等设计的SMDO是基于传统滑模设计思想并通过等效控制估计干扰,虽然其中包含的高频抖振通过低通滤波器予以消除,但其后果是干扰的估计精度较低。基于齐次高阶鲁棒精确微分器技术,文献[13]设计了一种齐次滑模干扰观测器,用于拦截器的自动驾驶仪设计,以估计来袭飞行器的加速度信息,它的不足是当系统初始误差较大时,系统状态收敛速度慢,这是由齐次系统所固有的性质决定的。基于Levant等^[14]提出的非齐次高阶鲁棒精确微分器技术,李鹏^[7]设计了一种非齐次干扰观测器来加快系统状态收敛速度,并应用于无尾飞行器姿控系统,结果表明,此观测器对于干扰的跟踪速度快、精度高,但计算略显复杂,且初始估计误差过大。

下一步可基于超螺旋算法设计高阶滑模干扰观测器来消除文献[10-13]中等效控制一阶滤波作用带来的抖振,同时解决文献[7]中滑模观测器初始估计误差较大的问题。对于超螺旋算法中需要集总扰动的导数上界的问题,基于自适应超螺旋算法研究如何减小系统的保守性具有重要的实际意义。

3 结论

本文提出了一种双幂次趋近律设计方案,旨在解决传统趋近律收敛速度过慢、收敛时间过长,或者抖振严重等缺陷。理论分析表明:所提出的趋近律不仅可以有效地去除抖振,而且无论在远离还是接近滑动模态时均具有很快的趋近速度;在有限的收敛时间后具有二阶滑模特性,即 $\sigma = \dot{\sigma} = 0$;当存在有界外扰时, σ 和 $\dot{\sigma}$ 分别收敛于平衡零点的有界邻域内。如何在实际控制系统中设计滑模干扰观测器来克服集总扰动的影响尚有待进一步研究。

参考文献(References)

- [1] Fridman L, Levant A. Higher order sliding modes as the natural phenomena of control theory[C]. Proc of the Workshop Variable Structure and Lyapunov Technique. Benevento, 1994: 302-309.
- [2] Levant A. Higher order sliding modes, differentiation and output-feedback control[J]. Int J of Control, 2003, 76(9/10): 924-941.
- [3] Feng Y, Yu X H, Man Z H. Non-singular adaptive terminal sliding mode control of rigid manipulators[J]. Automatica, 2002, 38(12): 2159-2167.
- [4] Yanmin Wang, Yong Feng, Xinghuo Yu. Higher-order nonsingular terminal sliding mode control of uncertain multivariable systems[C]. The 33rd Annual Conf of the IEEE Industrial Electronics Society. Taipei, 2007: 710-714.

- [5] 高为炳. 变结构控制的理论及设计方法[M]. 北京: 科学出版社, 1996: 241-254.
(Gao W B. Theory and design method for variable sliding mode control[M]. Beijing: Science Press, 1996: 241-254.)
- [6] Yu S, Yu X, Shirinzadeh B, et al. Continuous finite-time control for robotic manipulators with terminal sliding mode[J]. *Automatica*, 2005, 41(11): 1957-1964.
- [7] 李鹏. 传统和高阶滑模控制研究及其应用[D]. 长沙: 国防科技大学机电工程与自动化学院, 2011.
(Li P. Research and application of traditional and higher-order sliding mode control[D]. Changsha: College of Mechanic Engineering and Automation, National University of Defense Technology, 2011.)
- [8] 梅红, 王勇. 快速收敛的机器人滑模变结构控制[J]. *信息与控制*, 2009, 38(5): 552-557.
(Mei H, Wang Y. Fast convergent sliding mode variable structure control of robot[J]. *Information and Control*, 2009, 38(5): 552-557.)
- [9] Marks G M, Shtessel Y B, Gratt H. Effects of high order sliding mode guidance and observers on hit-to-kill Interceptions[C]. *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conf and Exhibit*. San Francisco, 2005: AIAA-2005-5967.
- [10] Shtessel Y B, Shkolnikov I A, Levant A. Guidance and control of missile interceptor using second-order sliding modes[J]. *IEEE Trans on Aerospace Electronic Systems*, 2009, 45(1): 110-123.
- [11] Shtessel Y B, Tournes C H. Integrated higher-order sliding mode guidance and autopilot for dual-control missiles[J]. *AIAA J of Guidance, Control, and Dynamics*, 2009, 32(1): 79-94.
- [12] Massey T, Shtessel Y B. Continuous traditional and high order sliding modes for satellite formation control[J]. *AIAA J on Guidance, Control, and Dynamics*, 2005, 28(4): 826-831.
- [13] Shtessel Y B, Buffington J, Banda S. Tailless aircraft flight control using multiple time scale re-configurable sliding modes[J]. *IEEE Trans on Control Systems Technology*, 2002, 10(2): 288-296.
- [14] Levant A. Non-homogeneous finite-time-convergent differentiator[C]. *Joint 48th IEEE Conf on Decision and Control and 28th Chinese Control Conf*. Shanghai, 2009: 1-14.

(上接第288页)

- [3] Hespanha J P, Naghshtabrizi P, Xu Y. A survey of recent results in networked control systems[J]. *Proc IEEE*, 2007, 95(1): 138-162.
- [4] Montestruque L A, Antsaklis P J. On the model-based control of networked systems[J]. *Automatica*, 2003, 39(10): 1837-1843.
- [5] Montestruque L A, Antsaklis P J. Stability of model-based of networked control systems with time-varying transmission times[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2004, 49(9): 1562-1572.
- [6] Wang G X, Wang Z M, Naidu D S. On model-based networked control of singularly perturbed systems[C]. *Proc of the 27th Chinese Control Conf*. New York: IEEE Press, 2008: 16-18.
- [7] Wang Z M, Liu W, Dai H H, et al. Robust stabilization of model-based uncertain singularly perturbed systems with networked time-delay[C]. *Proc of the 48th IEEE Conf on Decision and Control*. New York: IEEE Press, 2009: 7917-7922.
- [8] Fu M, Xie L. Finite-level quantized feedback control for linear systems[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2009, 54(5): 1165-1170.
- [9] Liberzon D. Hybrid feedback stabilization of systems with quantized signals[J]. *Automatica*, 2003, 39(9): 1543-1554.
- [10] Liberzon D. On stabilization of linear systems with limited information[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2003, 48(2): 304-307.
- [11] Savkin A V, Cheng T. Detectability and output feedback stabilizability of nonlinear networked control systems[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2007, 52(4): 730-735.
- [12] Wang Z M, Wang G X, Liu W. Stabilisation of two-time scale systems with a finite feedback data rate[J]. *IET Control Theory & Application*, 2010, 4(11): 2603-2612.