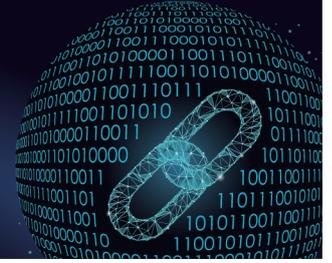




控制与决策

CONTROL AND DECISION



DoS攻击下的幂次趋近律滑模控制系统稳定性分析

都海波, 李申申, 陈维乐, 朱文武

引用本文:

都海波, 李申申, 陈维乐, 朱文武. DoS攻击下的幂次趋近律滑模控制系统稳定性分析[J]. *控制与决策*, 2024, 39(6): 1986–1994.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2022.1814>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

磁悬浮开关磁阻电机的自适应终端滑模控制

Adaptive terminal sliding mode control of bearingless switched reluctance motor

控制与决策. 2021, 36(6): 1449–1456 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1064>

直线同步电动机磁悬浮系统的自适应模糊滑模控制

Adaptive fuzzy sliding mode control for magnetic suspension system of linear synchronous motor

控制与决策. 2021, 36(3): 693–698 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0774>

考虑加速度约束的终端角度约束滑模制导律设计

Sliding-mode guidance law with acceleration and angle constraints

控制与决策. 2021, 36(10): 2511–2516 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0284>

基于变速趋近律的Buck型变换器抗扰动控制

Disturbance rejection control of Buck converters based on variable rate reaching law

控制与决策. 2021, 36(4): 893–900 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1073>

基于指数趋近律的车载复合储能系统全局滑模控制

Global sliding mode control of vehicle-mounted hybrid energy storage system based on exponential reaching law

控制与决策. 2021, 36(4): 885–892 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0478>

DoS 攻击下的幂次趋近律滑模控制系统稳定性分析

都海波^{1†}, 李申申¹, 陈维乐^{1,2}, 朱文武¹

(1. 合肥工业大学 电气与自动化工程学院, 合肥 230009; 2. 东南大学 自动化学院, 南京 210018)

摘要: 研究拒绝服务 (denial-of-service, DoS) 攻击下的 n 阶受扰系统基于幂次趋近律的滑模控制. 首先, 通过构造状态预测器重建攻击活跃期间丢失的系统状态, 基于预测器状态和非光滑函数, 设计能量受限型 DoS 攻击情况下的幂次趋近律滑模控制器, 进一步分析保持系统稳定性的充分条件; 其次, 当系统存在外部干扰情况下, 证明幂次趋近律滑模控制方法仍能保持非光滑控制器的强抗干扰能力; 最后, 通过数值仿真对所提出的理论证明结果进行验证.

关键词: 拒绝服务攻击; 滑模控制; 状态预测器; 幂次趋近律

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2022.1814

引用格式: 都海波, 李申申, 陈维乐, 等. DoS 攻击下的幂次趋近律滑模控制系统稳定性分析 [J]. 控制与决策, 2024, 39(6): 1986-1994.

Stability analysis of power reaching law sliding mode control system under DoS attacks

DU Hai-bo^{1†}, LI Shen-shen¹, CHEN Wei-le^{1,2}, ZHU Wen-wu¹

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. School of Automation, Southeast University, Nanjing 210018, China)

Abstract: In this paper, sliding mode control based on power reaching law for an n -order disturbance system under denial-of-service (DoS) attacks is studied. First, the states predictor is constructed to reconstruct the system states lost during the active periods of attacks. Based on the predictor states and non-smooth function, a power reaching law sliding mode controller under energy constrained DoS attacks is designed, and the sufficient conditions for the stability of the system are further analyzed. Then, it is proved that the power reaching law sliding mode control method still maintains the strong anti-interference ability of the non-smooth controller when the system has external disturbance. Finally, the results of the theoretical proof are verified by numerical simulation.

Keywords: denial-of-service attack; sliding mode control; state predictor; power reaching law

0 引言

近年来,随着工程系统与信息计算高度融合趋势的发展,这类与工业互联网密切联系的系统通常可以建模成信息物理系统 (cyber-physical systems, CPSs), 其特点是集计算组件和物理组件于一体,通过多功能传感器和执行器以及网络组件组成的有线或无线共享通信网络紧密连接在一起^[1]. 信息物理系统在医疗系统、能源系统以及电力网络等领域中得到了广泛的应用^[2-4]. 与传统控制系统不同的是, CPSs 系统在利用传感、联网和计算能力使其具备更强远程协调能力、实时交互能力和自治能力等优点的同时,其开

放的网络环境也不可避免地面临着干扰和威胁^[5-6].

文献[7]定义了针对信息物理系统的欺骗攻击和拒绝服务攻击:欺骗攻击是指通过操纵网络传输的数据包来影响数据的可信度,进而改变传感器和执行器的行为,破坏系统稳定性;而拒绝服务 (denial-of-service, DoS) 攻击的原理是通过特定方式干扰通信信道,造成数据包丢失,进而影响系统稳定性. 常见的拒绝服务攻击类型一般有能量受限型和周期型,前者一般是指采用脉宽调制信号形式的周期型 DoS 攻击来劫持信道,阻碍信息的正常传输^[8];后者没有对 DoS 攻击信号的结构形式进行明确的限制,只对攻击

收稿日期: 2022-10-19; 录用日期: 2023-04-03.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (62073113, 62003122); 安徽省自然科学基金项目 (2008085UD03).

责任编辑: 张维海.

[†]通讯作者. E-mail: haibo.du@hfut.edu.cn.

的频率和持续时间进行了限制性的假设,文献[9]引入了这种框架并在状态反馈控制下给出了稳定性的证明.

现有的文献中,人们的研究方向主要有两个:一是从攻击者的角度出发,在攻击能量有限的条件下优化调度攻击,以最大限度地提高对系统性能的破坏效果^[10];二是从被攻击者的角度出发,研究如何提高对攻击的忍受度.例如:文献[11]针对电力系统提出了一种基于迭代优化的方法来检测和恢复受攻击系统状态变量的攻击前值;文献[9, 12]研究了在某种特定拒绝服务攻击下系统稳定的条件以及其对攻击的最大忍受度(一般由攻击占空比或攻击频率以及持续时间来表征).其中,文献[9]考虑了一种通用的攻击模型,该模型只对DoS攻击的频率和持续时间进行限制,给出了在线性控制方法下拒绝服务攻击下系统稳定的显式条件,解决了单通道DoS攻击下CPSs的稳定性问题.

一方面,目前大部分研究都是针对满足利普希茨条件的受DoS攻击系统,如文献[9, 12].然而,对于不满足利普希茨条件的系统的研究并不充分.对实际系统而言,除了保证系统安全稳定之外,控制性能优劣也至关重要.随着有限时间齐次性理论和有限时间李雅普诺夫稳定性理论的提出与完善,非光滑控制方法因具有更快的收敛速度和更强的抗干扰能力而得到广泛应用^[13-14],如飞行器姿态控制系统^[15-16]以及机器人控制系统^[17].然而,与信息物理融合系统安全控制相结合的非光滑控制研究才刚刚起步,将非光滑控制方法具有的快速性和抗扰能力引入网络攻击下的信息物理系统的安全控制已成为当下研究的热点问题.对于满足利普希茨条件的受DoS攻击系统,其李雅普诺夫函数指数收敛和发散交替出现,可采用分段定量分析方法求解保持系统稳定的条件.而DoS攻击下非光滑控制系统的研究难点在于其不具备全局的利普希茨连续性,无法直接使用现有的方法进行研究,分析难度陡增.

另一方面,滑模控制(SMC)的强鲁棒性和强抗干扰能力以及在解决不确定/受扰非线性系统的巨大生命力,吸引着国内外学者在滑模控制领域不断取得新的成果^[18-19].然而,传统的滑模控制算法大多依赖于符号函数带来的干扰压制效果,其中非连续项所带来的控制器震颤是一个亟待解决的问题.文献[20]提出了一种无抖振离散滑模控制器,采用连续函数来代替传统滑模控制的非连续项.目前,运用滑模控制方法解决受DoS攻击系统稳定性问题的研究才刚刚开

始,文献[21]研究了一类非线性CPSs的动态事件触发无模型自适应控制问题,在节省网络资源的前提下验证了所提出的方法可以保证闭环系统在DoS攻击下具有良好的鲁棒性.文献[22]将事件触发方案与滑模控制算法相结合,应用于解决切换系统的指数稳定问题,但没有考虑控制器震颤带来的大量控制能量消耗以及对硬件设备的损害.如何将滑模控制方法运用于受DoS攻击系统的控制中需要更加深入的研究.

本文研究一类传感器侧受能量受限型DoS攻击的 n 阶受扰系统,采用基于幂次趋近律的滑模控制方法,避免控制信号震颤,同时设置状态预测器重建丢失的状态信息以克服攻击活跃期间的开环问题.通过理论分析得出受攻击系统具有实用稳定性的条件,最后给出数值仿真的结果.

1 问题描述与准备知识

1.1 系统描述

考虑以下受扰的 n 阶系统:

$$\dot{x} = Ax + B(u + d). \quad (1)$$

其中: $x \in \mathbb{R}^n$ 为系统状态; $u \in \mathbb{R}$ 为控制输入; $d \in \mathbb{R}$ 为系统控制输入端干扰,且满足 $|d| < d^*$; $n \geq 1$; A 、 B 为具有适当维度的系统矩阵.假设 (A, B) 可控,且 B 列满秩.

不失一般性,对系统(1)进行非奇异变换,可得

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = A_{11}x_1 + A_{12}x_2, \\ \dot{x}_2 = A_{21}x_1 + A_{22}x_2 + B_2(u + d). \end{cases} \quad (2)$$

其中: $x_1 \in \mathbb{R}^{n-1}$, $x_2 \in \mathbb{R}$, A_{11} 、 A_{12} 、 A_{21} 、 A_{22} 、 B_2 为合适的矩阵.

针对系统(2),将线性滑模函数选为

$$s = Cx = [C_1 \quad 1]x = C_1x_1 + x_2. \quad (3)$$

其中: $C \in \mathbb{R}^n$, $C_1 \in \mathbb{R}^{n-1}$, $s \in \mathbb{R}$.滑模面的设计需满足:在系统到达滑模面后,状态沿滑模面收敛到平衡点.因此,滑模面设计思路就是选取合适的矩阵 C ,保证状态在滑模面上向平衡点运动.

在状态到达滑模面后,有 $s = 0$,即 $C_1x_1 + x_2 = 0$,结合系统(2)可得

$$\dot{x}_1 = (A_{11} - A_{12}C_1)x_1. \quad (4)$$

为使状态在到达滑模面后是收敛的,只需保证 $A_{11} - A_{12}C_1$ 满足Hurwitz条件.

1.2 DoS模型

首先给出能量受限型DoS攻击模型,该模型仅对DoS攻击的频率和持续时间进行限制.

设 $\{h_n\}_{n \in N_0}$ 为 DoS 攻击关闭 \setminus 开启的序列, 其中 $h_0 \geq 0$, 令

$$H_n = \{h_n\} \cup \{h_n, h_n + \tau_n\} \quad (5)$$

代表第 n 次攻击间隔, 长度为 $\tau_n \in R_{\geq 0}$, 在此区间内通信不被允许. 特别地, 若 $\tau_n = 0$, 则代表第 n 个 DoS 攻击为一个发生在时刻 t_n 的脉冲信号.

给出以下定义:

$$\Xi(\tau, t) = \bigcup_{n \in N_0} H_n \cap [\tau, t], \quad (6)$$

$$\Theta(\tau, t) = [\tau, t] \setminus \Xi(\tau, t). \quad (7)$$

其中: $\Xi(\tau, t)$ 代表通信被拒绝的时间集合, $\Theta(\tau, t)$ 代表通信被允许的时间集合.

假设 1^[9] DoS 频率: 存在 $\eta \in R_{\geq 0}, \tau_D \in R_{> 0}$, 有

$$n(\tau, t) \leq \eta + \frac{t - \tau}{\tau_D}. \quad (8)$$

其中: $\tau \in R_{\geq 0}, t \geq \tau$.

假设 2^[9] DoS 持续时间: 存在 $\kappa \in R_{\geq 0}, T_D \in R_{> 1}$, 有

$$\Xi(\tau, t) \leq \kappa + \frac{t - \tau}{T_D}. \quad (9)$$

其中: $t \in R_{\geq 0}, t \geq \tau$.

假设 1 和假设 2 给出了本文所考虑 DoS 攻击的类型. 这两个假设只对 DoS 的频率和持续时间进行限制, 并未对攻击的结构形式做出规定, 从而使得本文的研究结果更具普遍性.

1.3 相关定义及引理

定义 1^[14] 考虑自治系统 $\dot{x} = g(x), x \in R$, 其中 g 连续且 $g(0) = 0$. 若满足以下两个条件, 则系统有限时间稳定:

1) 有限时间收敛, 即对于任意初始状态 $x(0) \in R$, 存在时间 $T: 0 < T < \infty$, 使得 $\lim_{t \rightarrow T} x(t) = 0$ 且 $x(t) = 0, \forall t > T$;

2) 李雅普诺夫稳定.

定义 2^[23] 对于矩阵 $M \in R^{n \times n}$, 若满足以下条件, 则称 μ_M 为矩阵 M 的对数范数:

$$\mu_M := \max \left\{ \lambda \mid \lambda \in \text{spectrum} \left\{ \frac{(M + M^T)}{2} \right\} \right\}, \quad (10)$$

其中 $\text{spectrum} \left\{ \frac{(M + M^T)}{2} \right\}$ 代表取 $\frac{(M + M^T)}{2}$ 的谱范数.

引理 1^[24] 若 $p = p_1/p_2 < 1$, 则有 $|x^p - y^p| \leq 2^{1-p}|x - y|^p$. 其中: $p_1 > 0, p_2 > 0$ 为正奇数.

引理 2^[14] 若 $x, y \in \mathbb{R}$, 且 c, d, γ 是正实数, 则存在如下关系:

$$|x|^c |y|^d \leq \frac{c}{c+d} \gamma |x|^{c+d} + \frac{d}{c+d} \gamma^{-c/d} |y|^{c+d}. \quad (11)$$

引理 3^[25] 对于任意 $g_i \in R, i = 1, 2, \dots, n$, 以及实数 $p \in (0, 1]$, 有下面不等式成立:

$$\begin{aligned} & (|g_1| + |g_2| + \dots + |g_n|)^p \leq \\ & (|g_1|^p + |g_2|^p + \dots + |g_n|^p). \end{aligned} \quad (12)$$

引理 4 对于一阶微分方程 $\dot{v}(t) = -k_1 v^\alpha(t)$, 且 $v(t_0) > 0, 0 < \alpha < 1, k_1 > 0$, 其解为

$$v(t) = \begin{cases} (a - b(t - t_0))^{\frac{1}{1-\alpha}}, & t_0 \leq t \leq \frac{a}{b} + t_0; \\ 0, & t \geq \frac{a}{b} + t_0. \end{cases} \quad (13)$$

其中: $a = v^{1-\alpha}(t_0), b = k_1(1 - \alpha)$.

证明 一阶微分方程 $\dot{v}(t) = -k_1 v^\alpha(t)$ 可转化为

$$\frac{dv}{v^\alpha(t)} = -k_1 dt,$$

积分可得

$$v^{1-\alpha}(t) = v^{1-\alpha}(t_0) - k_1(1 - \alpha)(t - t_0).$$

当 $t_0 < t < \frac{v^{1-\alpha}(t_0)}{k_1(1 - \alpha)}$ 时, 有

$$v = (v^{1-\alpha}(t_0) - k_1(t - t_0))^{\frac{1}{1-\alpha}};$$

当 $t \geq \frac{v^{1-\alpha}(t_0)}{k_1(1 - \alpha)}$ 时, 有

$$v = 0.$$

综上, 引理 4 得证. \square

引理 5 对于一阶微分方程 $\dot{v}(t) = k_2 v^\alpha(t)$, $v(t_0) > 0, 0 < \alpha < 1, k_2 > 0$, 其解为

$$v(t) = (v^{1-\alpha}(t_0) + k_2(1 - \alpha)(t - t_0))^{\frac{1}{1-\alpha}}. \quad (14)$$

证明过程与引理 4 相同, 此处略.

2 DoS 攻击下滑模控制系统稳定性分析

本节主要介绍基于幂次趋近律的滑模控制器设计思路以及优势, 并给出稳定性证明.

2.1 DoS 攻击下受攻击系统滑模控制器设计

对于系统 (1), 选取滑模面 (3), 传统滑模控制器一般设计为

$$u = -(CB)^{-1}(CAx + k \text{sign}(s)). \quad (15)$$

其中: $k > 0$ 为控制增益, $\text{sign}(\cdot)$ 为符号函数.

结合式 (1) 和 (3) 以及控制器 (15), 可得滑模控制系统

$$\dot{s} = -k \text{sign}(s) + CBd. \quad (16)$$

可以看出, 当控制增益 $k > |CB|d^*$ 时, 在控制器 (15) 作用下, 闭环系统状态将在有限时间内收敛到滑模

面,并沿滑模面渐近收敛到原点.

综上所述,为了解决因控制器存在开关项导致的控制器震颤,使用非光滑项代替原来的非连续项,针对如图1所示的受攻击系统,基于预测器的滑模控制器设置为

$$u = -(CB)^{-1}(CA\bar{x} + k\text{sig}^\alpha(\bar{s})). \quad (17)$$

其中: $\text{sig}^\alpha(\bar{s}) = |\bar{s}|^\alpha \text{sign}(\bar{s}), 0 < \alpha < 1, \bar{s} = C\bar{x}, \bar{x}$ 为预测器状态. 预测器设计如下:

$$\begin{cases} \dot{\bar{x}}(t) = A\bar{x}(t) + Bu(t), & t \in [h_i, h_i + \tau_i]; \\ \bar{x}(t) = x(t), & t \in [h_i + \tau_i, h_{i+1}]. \end{cases} \quad (18)$$

其中 $\{h_i\}_{i \in N_0}$ 为 DoS 攻击关闭\开启的时刻序列. 特别地,当 $h_0 = 0$ 时,设定 $u(0) = 0$,

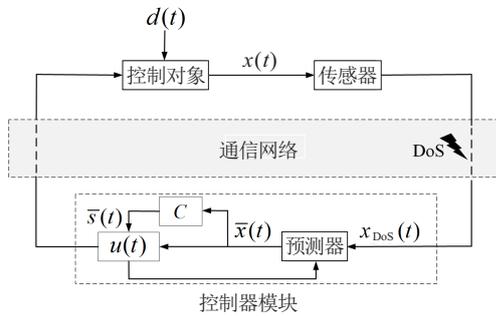


图1 传感器侧受DoS攻击系统结构框图

系统结构如图1所示,其中

$$x_{\text{DoS}}(t) = \begin{cases} x(t), & t \in [h_i + \tau_i, h_{i+1}); \\ x(h_i), & t \in [h_i, h_i + \tau_i]. \end{cases} \quad (19)$$

注1 由于传感器节点到控制器节点的通信网络遭到DoS攻击,在攻击活跃期间,状态信息无法传输,控制信号无法及时更新进而导致系统状态发散.为了最大程度保证系统在遭受攻击时的稳定性,提高系统对DoS攻击的忍受度,在控制器节点配置一个状态预测器,用以重建DoS攻击活跃期间丢失的状态.

结合式(1)和(3)以及控制器(17),可得

$$\dot{s} = -k\text{sig}^\alpha(\bar{s}) + CAe + CBd, \quad (20)$$

其中 $e = x - \bar{x}$ 定义为在攻击活跃期用于重建丢失状态信息的预测器预测误差.

2.2 DoS攻击下滑模控制系统稳定性分析

定理1 对于系统(1),滑模面选取为式(3),在滑模控制律(17)下,若

$$\frac{1}{T_D} < \frac{\gamma_1}{\gamma_1 + \gamma_2}, \quad (21)$$

则系统是实用稳定的^[26],即滑模状态将在有限时间内收敛到域

$$\Omega_1 = \left\{ s : |s| \leq \bar{c}_1 d^* + \bar{c}_2 \left(\frac{d^*}{k} \right)^{\frac{1}{\alpha}} \right\}, \quad (22)$$

其中 $\gamma_1, \gamma_2, \bar{c}_1, \bar{c}_2$ 为与系统参数相关的常数.

证明 分析在任一DoS周期内滑模状态的运动,将其分为收敛的阶段 $t \in [h_i + \tau_i, h_{i+1}]$ 以及可能发散的阶段 $t \in [h_i, h_i + \tau_i]$,寻找使得收敛运动相较于发散运动占据主导地位的条件.

设李雅普诺夫函数

$$V = s^2. \quad (23)$$

step 1: 状态收敛阶段.

当 $t \in [h_i + \tau_i, h_{i+1}]$ 时,由式(17)可得

$$\begin{aligned} \dot{V} &= 2s(-k\text{sig}^\alpha(s) + CBd) \leq \\ &= -2k|s|^{1+\alpha} + l_1|s|d^*, \end{aligned} \quad (24)$$

其中 $l_1 = 2|CB|$.

对式(24)中含扰动项 $l_1|s|d^*$ 运用引理2,可得

$$\begin{aligned} l_1|s|d^* &= l_1k|s|\frac{d^*}{k} = kl_1|s|\left(\left(\frac{d^*}{k}\right)^{\frac{1}{\alpha}}\right)^\alpha \leq \\ &= k|s|^{1+\alpha} + k\alpha\left(\frac{l_1}{1+\alpha}\right)^{1+\frac{1}{\alpha}}\left(\frac{d^*}{k}\right)^{1+\frac{1}{\alpha}}. \end{aligned} \quad (25)$$

将式(25)代入(24),得

$$\dot{V} \leq -k|s|^{1+\alpha} + k\mu_1\left(\frac{d^*}{k}\right)^{1+\frac{1}{\alpha}}, \quad (26)$$

其中 $\mu_1 = \alpha\left(\frac{l_1}{1+\alpha}\right)^{1+\frac{1}{\alpha}}$.

令 $\psi_1 = k\mu_1\left(\frac{d^*}{k}\right)^{1+\frac{1}{\alpha}}$,式(26)改写为

$$\dot{V} \leq -kV^{\frac{1+\alpha}{2}} + \psi_1. \quad (27)$$

当 $\psi_1 \leq \frac{k}{2}V^{\frac{1+\alpha}{2}}$,即 $V \geq \left(\frac{2\psi_1}{k}\right)^{\frac{2}{1+\alpha}}$ 时,有

$$\dot{V} \leq -k\gamma_1V^{\frac{1+\alpha}{2}}, \quad (28)$$

其中 $\gamma_1 = \frac{1}{2}$.

根据引理4可得

$$V(t) \leq \left(V^{\frac{1+\alpha}{2}}(h_i + \tau_i) - k\gamma_1(t - h_i - \tau_i) \right)^{\frac{2}{1+\alpha}}. \quad (29)$$

step 2: 状态发散阶段.

当 $t \in [h_i, h_i + \tau_i]$ 时,由预测误差 e 的定义可得

$$\dot{e}(t) = Ae(t) + Bd(t), \quad (30)$$

根据对数范数的定义可知 $\|e^{At}\| \leq e^{\mu_A t}$,且 $e(h_i) = 0$,对于任意 $t \in [h_i, h_i + \tau_i]$,有

$$\begin{aligned} \|e(t)\| &\leq \int_{h_i}^t e^{\mu_A(t-s)} \|B\| d^* dt \leq \\ &\begin{cases} \frac{l_2}{\mu_A} (e^{\mu_A(t-h_i)} - 1) d^*, & \mu_A > 0; \\ l_2(t - h_i) d^*, & \mu_A \leq 0. \end{cases} \end{aligned} \quad (31)$$

其中 $l_2 = \|B\|$.

定义 $\tau_m = \max_{i \in N} \{\tau_i\}$,考虑任意 $t \in [h_i, h_i + \tau_i]$,根

据式(31)可得

$$\|e\| \leq \beta d^*. \tag{32}$$

其中

$$\beta = \begin{cases} \frac{l_2}{\mu_A}(e^{\mu_A \tau_m} - 1), & \mu_A > 0; \\ l_2 \tau_m, & \mu_A \leq 0. \end{cases} \tag{33}$$

由式(17)得

$$\begin{aligned} \dot{V} &= 2s(-k\text{sig}^\alpha(\bar{s}) + CAe + CBd) = \\ &2s(-k\text{sig}^\alpha(\bar{s}) + k\text{sig}^\alpha(s) - k\text{sig}^\alpha(s)) + \\ &2CAse + 2CBsd. \end{aligned} \tag{34}$$

根据引理1可得

$$\dot{V} \leq -2k|s|^{1+\alpha} + kl_5|s| \|e\|^\alpha + l_3|s| \|e\| + l_1|s|d^*. \tag{35}$$

其中: $l_3 = 2\|CA\|, l_4 = \|C\|, l_5 = 2^{2-\alpha}l_4^\alpha$.

将式(32)代入(35),可得

$$\dot{V} \leq -2k|s|^{1+\alpha} + l_1|s|d^* + l_3\beta|s|d^* + kl_5\beta^\alpha|s|(d^*)^\alpha. \tag{36}$$

根据引理1,式(36)可改写为

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq -2k|s|^{1+\alpha} + k|s|^{1+\alpha} + k\mu_1\left(\frac{d^*}{k}\right)^{1+\frac{1}{\alpha}} + \\ &k\beta^{1+\alpha}|s|^{1+\alpha} + k\alpha\left(\frac{l_3}{1+\alpha}\right)^{1+\frac{1}{\alpha}}\left(\frac{d^*}{k}\right)^{1+\frac{1}{\alpha}} + \\ &k\beta^{\alpha+\alpha^2}|s|^{1+\alpha} + k\alpha\left(\frac{l_5}{1+\alpha}\right)^{1+\frac{1}{\alpha}}(d^*)^{1+\alpha} \leq \\ &k\mu_2|s|^{1+\alpha} + k\mu_3(d^*)^{1+\alpha} + k\mu_4\left(\frac{d^*}{k}\right)^{1+\frac{1}{\alpha}}. \end{aligned} \tag{37}$$

其中

$$\mu_2 = \beta^{\alpha+\alpha^2} + \beta^{1+\alpha} - 1 > 0, \mu_3 = \alpha\left(\frac{l_5}{1+\alpha}\right)^{1+\frac{1}{\alpha}},$$

$$\mu_4 = \alpha\left(\frac{l_1}{1+\alpha}\right)^{1+\frac{1}{\alpha}} + \alpha\left(\frac{l_3}{1+\alpha}\right)^{1+\frac{1}{\alpha}}.$$

令 $\psi_2 = k\mu_3(d^*)^{1+\alpha} + k\mu_4\left(\frac{d^*}{k}\right)^{1+\frac{1}{\alpha}}$, 式(37)可转化为

$$\dot{V} \leq k\mu_2 V^{\frac{1+\alpha}{2}} + \psi_2. \tag{38}$$

当 $\psi_2 < k\mu_2 V^{\frac{1+\alpha}{2}}$, 即 $V > \left(\frac{\psi_2}{k\mu_2}\right)^{\frac{2}{1+\alpha}}$ 时,有

$$\dot{V} \leq k\gamma_2 V^{\frac{1+\alpha}{2}}, \tag{39}$$

其中 $\gamma_2 = 2\mu_2$.

由引理5可得

$$V(t) \leq (V^{\frac{1-\alpha}{2}}(h_i) + k\gamma_2(t - h_i))^{\frac{2}{1-\alpha}}. \tag{40}$$

step 3: 将单个周期内的李雅普诺夫函数的收敛和发散情况推广到任意时间.

定义如下集合:

$$\Omega_2 = \left\{ |s| \leq \max \left\{ \left(\frac{2\psi_1}{k} \right)^{\frac{1}{1+\alpha}}, \left(\frac{\psi_2}{k\mu_2} \right)^{\frac{1}{1+\alpha}} \right\} \right\}, \tag{41}$$

接下来证明滑模状态将在有限时间内收敛到该集合.

如果滑模状态不在该集合内,则意味着李雅普诺夫函数在收敛阶段和发散阶段分别满足式(29)和(40). 推广到对于任意 $t \in R_{\geq 0}$,有

$$V(t) \leq (V^{\frac{1-\alpha}{2}}(0) - k\gamma_1|\Theta(0,t)| + k\gamma_2|\Xi(0,t)|)^{\frac{2}{1-\alpha}}. \tag{42}$$

由假设2可知 $\Xi(0,t) \leq \kappa + \frac{t}{T_D}$, 即 $\Theta(0,t) \geq t - \kappa - \frac{t}{T_D}$, 则有

$$V(t) \leq (V^{\frac{1-\alpha}{2}}(0) - k\mu_*t + k\beta_*)^{\frac{2}{1-\alpha}}. \tag{43}$$

其中

$$\mu_* = \frac{\gamma_1 T_D - \gamma_1 - \gamma_2}{T_D}, \beta_* = (\gamma_1 + \gamma_2)\kappa.$$

根据定理1可知 $\mu_* > 0$, 即滑模状态将在有限时间收敛到域 Ω_2 内.

对 $\left(\frac{2\psi_1}{k\mu_1}\right)^{\frac{1}{1+\alpha}}, \left(\frac{\psi_2}{k\mu_2}\right)^{\frac{1}{1+\alpha}}$ 分别使用引理3,可得

$$\left(\frac{2\psi_1}{k\mu_1}\right)^{\frac{1}{1+\alpha}} \leq (2\mu_1)^{\frac{1}{1+\alpha}} \left(\frac{d^*}{k}\right)^{\frac{1}{\alpha}}, \tag{44}$$

$$\left(\frac{\psi_2}{k\mu_2}\right)^{\frac{1}{1+\alpha}} = \frac{(\mu_3(d^*)^{1+\alpha} + \mu_4\left(\frac{d^*}{k}\right)^{1+\frac{1}{\alpha}})^{\frac{1}{1+\alpha}}}{\mu_2^{\frac{1}{1+\alpha}}} \leq$$

$$\left(\frac{\mu_3}{\mu_2}\right)^{\frac{1}{1+\alpha}} d^* + \left(\frac{\mu_4}{\mu_2}\right)^{\frac{1}{1+\alpha}} \left(\frac{d^*}{k}\right)^{\frac{1}{\alpha}}. \tag{45}$$

于是,域 Ω_2 进一步转化为 Ω_1 , 即

$$\Omega_1 = \left\{ s : |s| \leq \bar{c}_1 d^* + \bar{c}_2 \left(\frac{d^*}{k}\right)^{\frac{1}{\alpha}} \right\}. \tag{46}$$

其中

$$\bar{c}_1 = \left(\frac{\mu_3}{\mu_2}\right)^{\frac{1}{1+\alpha}}, \bar{c}_2 = \max \left\{ (2\mu_1)^{\frac{1}{1+\alpha}}, \left(\frac{\mu_4}{\mu_2}\right)^{\frac{1}{1+\alpha}} \right\}.$$

从而定理1得证. \square

注2 本文只讨论 $\mu_2 > 0$ 的情况,即系统进入攻击活跃期后会产生发散. 若 $\mu_2 < 0$,则意味着在攻击活跃期李雅普诺夫函数仍然是减小的,这种情况下系统一定是实用稳定的,故不予讨论.

注3 观察定理1可以看到,保证系统稳定的条件(21)左侧并不含有假设1中的 τ_D , 这意味着不需要对攻击频率进行限制. 这是因为在休眠期控制器可以实时得到系统的状态信息来更新控制信号,不受攻击频率的影响. 同理,由于在攻击活跃期系统的控制信号更新依赖的是预测器状态,自然不会受攻击频率的影响.

2.3 DoS攻击下滑模控制系统抗干扰性能分析

受DoS攻击系统实际可以看成稳定系统与不稳定系统的随机切换,本节首先给出描述系统抗扰性能的结论,并说明由于分数幂的引入使得系统状态在攻击休眠期内具有更快的收敛速度以及更小的稳态误差,且在攻击活跃期不会因为引入分数幂导致状态更快地发散。

定理2 对于系统(1),滑模面选取式(3),在滑模控制律(17)下,若

$$\frac{1}{T_D} < \frac{\gamma_1}{\gamma_1 + \gamma_2}, \quad (47)$$

则系统进入稳态后,以下结论成立:

1) 当 $t \in [h_i + \tau_i, h_{i+1})$ 时,存在 $t_1 \in (h_i + \tau_i, h_{i+1})$, 当 $t > t_1$ 时,滑模状态满足

$$\Omega_3 = \left\{ s : |s| \leq \left(\frac{l_1 d^* + \omega_1}{2k} \right)^{\frac{1}{\alpha}} \right\}, \quad (48)$$

其中 $\omega_1 > 0$ 是任意小的常数。

2) 当 $t \in [h_i, h_i + \tau_i)$ 时,滑模状态依然保持在域 Ω_1 内。

证明 对于任意 $t \in [h_i + \tau_i, h_{i+1})$, 由式(24)可得

$$\dot{V} \leq -(2k|s|^\alpha - l_1 d^*)|s|. \quad (49)$$

对于任意 $s \in \mathbb{R} - \Omega_3$, 有 $|s| > \left(\frac{l_1 d^* + \omega_1}{2k} \right)^{\frac{1}{\alpha}}$. 根据式(49),可以得到对于任意的 $s_1 \in \mathbb{R} - \Omega_3$, 有

$$\dot{V} \leq -\omega_1 \left(\frac{l_1 d^* + \omega_1}{2k} \right)^{\frac{1}{\alpha}} < 0. \quad (50)$$

滑模状态的初始状态只存在两种情形. 第1种情形是在上一次攻击活跃期内,滑模状态发散并超出该区域,即 $s(h_i) \in \mathbb{R} - \Omega_3$. 因为 $\dot{V} < 0$, 所以存在时刻 $t_1 > h_i$ 使得 $s(t_1) \in \text{bd}\Omega_3$, 定义 $\text{bd}\Omega_3$ 为 Ω_3 的边界. 第2种情形是在刚结束的上一次攻击活跃期内滑模状态并没有离开该区域 Ω_3 , 如果 s 一直处于集合内且不会逃离, 则无需证明. 因此只考虑滑模状态会离开集合的情形. 由于存在 $t_1 > 0$, 使得 $s(t_1) \in \text{bd}\Omega_3$, 只需证明对于任意 $t \in [t_1, h_{i+1})$, 满足 $s(t) \in \Omega_3$.

令 $z_1 = \inf_{s \in \text{bd}\Omega_3} |s|$, $h(s) = 2k|s|^{1+\alpha} - l_1|s|d^*$, 有

$$z_1 = \left(\frac{l_1 d^* + \omega_1}{2k} \right)^{\frac{1}{\alpha}}, \quad (51)$$

$$h(z_1) = \omega_1 \left(\frac{l_1 d^* + \omega_1}{2k} \right)^{\frac{1}{\alpha}}. \quad (52)$$

当 $s \in \text{bd}\Omega_3$ 时

$$\dot{V} \leq -h(z_1) < 0, \quad (53)$$

故存在 $r_1 > 0$ 满足当 $t \in [t_1, t_1 + r_1]$ 时有 $s(t) \in \Omega_3$.

利用反证法,假设存在 p_1 满足 $s(p_1) \notin \Omega_3$, 一定有时刻 $\delta_1 \in [t_1, p_1)$ 满足 $s(\delta_1) \in \text{bd}\Omega_3$, 且 $\dot{V}(\delta_1) \leq$

$-h(z_1) < 0$. 可知必存在 $r_2 > 0$ 满足当 $t \in [\delta_1 - r_2, \delta_1)$ 时有 $\dot{V} < 0$, 进而有 $z_1 = |s(\delta_1)| < |s(\delta_1 - r_2)| < z_1$, 显然这是不可能的. 即对于任意 $t \in [t_1, h_{i+1})$, 有

$$|s| \leq \left(\frac{l_1 d^* + \omega_1}{2k} \right)^{\frac{1}{\alpha}}, \quad (54)$$

定理2中的结论1)得证.

关于结论2), 由于能量受限型DoS攻击的不确定性,滑模状态在攻击休眠期进入域 Ω_3 后, 随机出现的攻击活跃期仍会导致滑模状态一定程度地发散, 且这种发散的程与每个攻击周期内活跃期长度相关. 根据定理1可知, 在系统进入域 Ω_1 后, 攻击活跃期导致的发散并不会让滑模状态离开该域. \square

注4 由定理2不难看出, 当 $d(t) = 0$ 时, 在本文采用的基于幂次趋近律的滑模控制器作用下, 滑模状态可在有限时间收敛到滑模面 $s = 0$. 若采用传统的线性控制器, 则滑模状态是指数稳定的, 因此在收敛时间上, 幂次趋近律控制器的优势在靠近平衡点附近将会更加明显, 赋予了系统在攻击活跃期结束后快速将状态镇定到平衡点附近的能力. 当 $d(t) \neq 0$ 时, 在线性控制器(即 $\alpha = 1$)作用下, 滑模状态将会在有限时间收敛到域

$$\Omega_4 = \left\{ s : |s| \leq \left(\frac{l_1 d^* + \omega_1}{2k} \right) \right\}. \quad (55)$$

选取 $2k > l_1 d^* + \omega_1$, 不难得到, 当 $\alpha \rightarrow 0$ 时, 有

$$\left(\frac{l_1 d^* + \omega_1}{2k} \right)^{\frac{1}{\alpha}} \ll \left(\frac{l_1 d^* + \omega_1}{2k} \right). \quad (56)$$

综上所述, 针对受DoS攻击的系统, 相较于传统的线性滑模控制器, 幂次趋近滑模控制器所具有的更强的抗干扰能力以及更快的收敛速度仍然得以保持, 并且对每次攻击活跃期结束后的快速稳定起到了至关重要的作用。

3 数值仿真

考虑一个受到DoS攻击的无人地面车辆(unmanned ground vehicle, UGV). UGV的部件动力学^[27]描述如下:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -b \\ 0 & M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ M \end{bmatrix} F + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} d(t). \quad (57)$$

其中: x_1 和 x_2 为UGV的状态, 分别对应于位置和线速度; M 为力学质量; b 为平动摩擦系数; u 为控制输入; $d(t)$ 为外部干扰. 选取 $M = 1, b = 0.5$, 系统(57)等价于以下模型:

$$\dot{x} = Ax + B(u + d). \quad (58)$$

其中: $A = [0 \ 1; 0 \ -0.5]$; $B = [0; 1]$; $C = [1 \ 1]$. 初始状态选取为 $x_1(0) = 2, x_2(0) = -1$, 预测器初始值选择为 $\bar{x}_1(0) = 1, \bar{x}_2(0) = -2$, 控制增益 $k = 2$.

首先考虑 $d(t) = 0$ 的情况, 分数幂 $\alpha = 0.3$. 系统的状态响应曲线如图2所示, 系统状态都在有限时间内到达了平衡点, 且不会在攻击活跃期产生发散. 图3为无外部扰动时滑模状态和控制信号的响应曲线.

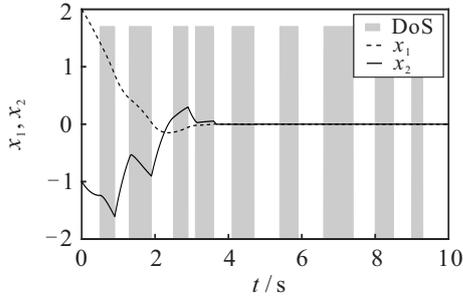


图2 状态响应曲线 ($d = 0$)

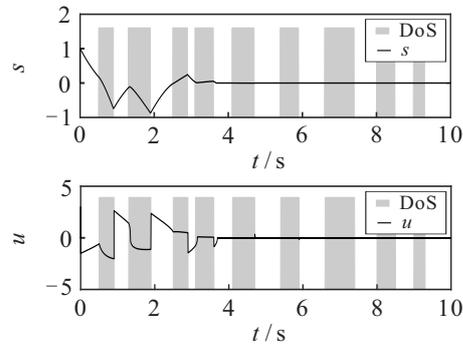


图3 滑模状态响应曲线以及控制信号 ($d = 0$)

下面考虑 $d(t) \neq 0$ 的情况, 取 $d(t) = 0.3\sin(10t)$. 为了验证本文采用的非光滑滑模控制器相较于线性控制器的优越性, 在 $\alpha = 0.3, 1$ 的情况下对比仿真结果.

当 $\alpha = 0.3$ 时, 根据定理1可得 $\gamma_1 = 1/2, \gamma_2 = 2.356$, 由定理1可知, 当 T_D 满足

$$\frac{1}{T_D} < \frac{\gamma_1}{\gamma_1 + \gamma_2} \approx 0.175 \quad (59)$$

时, 系统是实用稳定的.

仿真中的DoS攻击满足 $n(0, 10) = 9, \Xi(0, 10) = 4.2s$. 计算可得 $1/T_D = 0.42$, 不满足根据定理1得到的系统实用稳定的条件(59), 这意味着理论证明存在较大的保守性. 造成这种保守性的主要原因是, 在攻击活跃期间对李雅普诺夫函数增长速率偏大的保守估计.

如图4所示, 运动初始阶段系统状态迅速向平衡点附近运动, 并在攻击休眠期状态始终保持收敛.

图5中: 上侧图为滑模状态响应曲线, 由于攻击以及外部干扰的存在, 滑模状态不会在攻击休眠期收敛到0, 而是进入到域 Ω_2 内, 且在活跃期内不会超过

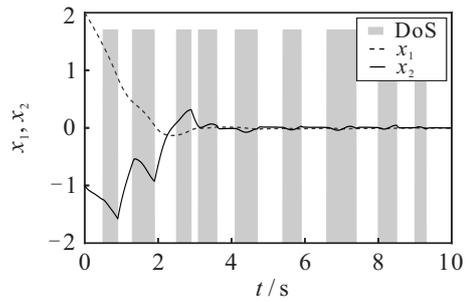


图4 状态响应曲线 ($\alpha = 0.3$)

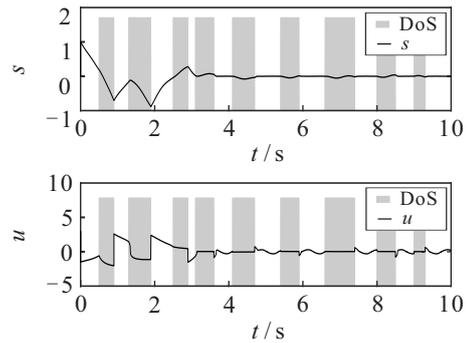


图5 滑模状态响应曲线以及控制信号 ($\alpha = 0.3$)

域 Ω_1 , 这与定理的结论一致; 下侧图为控制信号, 其产生突变的原因是, 采用预测器重建攻击活跃期的系统状态存在预测误差, 当攻击活跃期结束, 系统状态信息传输恢复正常时控制器将会迅速调整, 进而导致控制信号突变.

图6展示了本文基于幂次趋近律的滑模控制算法与传统趋近律 ($\alpha = 0$) 的控制信号响应曲线对比. 可以看出: 本文提出的控制算法所对应的控制输入没有产生高频震颤(上方曲线); 而传统趋近律下控制信号产生了幅值很大的高频震颤(下方曲线), 这将引起巨大的控制能量消耗甚至硬件的损坏, 在实际系统中是无法接受的.

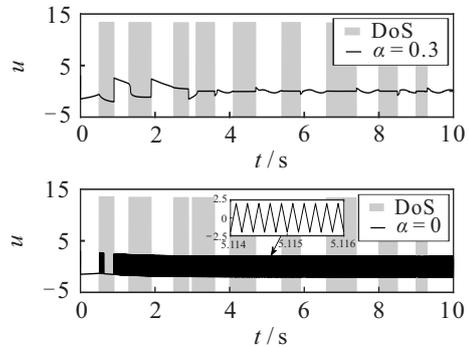


图6 不同分数幂下控制信号响应曲线 ($\alpha = 0, 0.3$)

图7显示, 在基于幂次趋近律的滑模控制器 ($\alpha = 0.3$) 作用下, 滑模状态具有更快的收敛速度. 在攻击活跃期结束后, 以明显快于线性控制算法 ($\alpha = 1$) 的速度快速将滑模状态再次镇定到滑模面附近, 且在滑

模状态运动的整个过程中,基于幂次趋近律的滑模控制器所对应的响应曲线更加接近于滑模面。综上验证了本文采用的基于幂次趋近律的滑模控制算法在应用于受攻击系统时仍能保持其优越的性能。

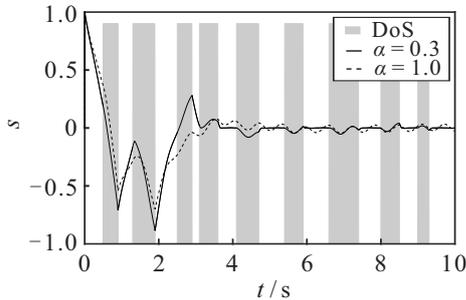


图7 不同分数幂下滑模状态响应曲线($\alpha = 0.3, 1$)

4 结论

本文研究了传感器节点到控制器节点受到能量受限型DoS攻击的 n 阶受扰系统的滑模控制,克服了传统滑模控制器因含有非连续项导致的控制信号高频抖振,同时设置预测器重建丢失的状态信息,提高了系统对DoS攻击的忍受度。通过理论分析给出了保证受攻击系统稳定的充分条件,并证明了在基于幂次趋近律的滑模控制器下,非光滑控制算法所具有的快速收敛性能和强抗干扰能力在受DoS攻击的系统中仍然得以保持。

参考文献(References)

- [1] Ding D R, Han Q L, Ge X H, et al. Secure state estimation and control of cyber-physical systems: A survey[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2021, 51(1): 176-190.
- [2] 廉胤东, 刘彦汝, 杨启帆, 等. 基于信息物理系统的多分拣移动机器人调度策略[J]. 控制与决策, 2023, 38(1): 281-288.
(Lian Y D, Liu Y R, Yang Q F, et al. Multi-sorting mobile robot scheduling strategy based on cyber-physical system[J]. Control and Decision, 2023, 38(1): 281-288.)
- [3] Ding L, Han Q L, Ning B D, et al. Distributed resilient finite-time secondary control for heterogeneous battery energy storage systems under denial-of-service attacks[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(7): 4909-4919.
- [4] Deng C, Wen C Y, Zou Y, et al. A hierarchical security control framework of nonlinear CPSs against DoS attacks with application to power sharing of AC microgrids[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2022, 52(6): 5255-5266.
- [5] 王轶楠, 林彦君, 李焕, 等. DoS攻击下电力网络控制系统脆弱性分析及防御[J]. 控制与决策, 2017, 32(3): 411-418.
(Wang Y N, Lin Y J, Li H, et al. Vulnerability analysis and countermeasures of electrical network control systems under DoS attacks[J]. Control and Decision, 2017, 32(3): 411-418.)
- [6] Ma L, Liu H Y, Zhou L N, et al. Security control for multi-time-scale CPSs under DoS attacks: An improved dynamic event-triggered mechanism[J]. IEEE Transactions on Network Science and Engineering, 2022, 9(3): 1813-1826.
- [7] Amin S, Cárdenas A A, Sastry S S. Safe and secure networked control systems under denial-of-service attacks[C]. International Workshop on Hybrid Systems: Computation and Control. Berlin: Springer, 2009: 31-45.
- [8] DeBruhl B, Tague P. Digital filter design for jamming mitigation in 802.15.4 communication[C]. Proceedings of the 20th International Conference on Computer Communications and Networks. Lahaina, 2011: 1-6.
- [9] De Persis C, Tesi P. Input-to-state stabilizing control under denial-of-service[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2015, 60(11): 2930-2944.
- [10] Liu R R, Hao F, Yu H. Optimal SINR-based DoS attack scheduling for remote state estimation via adaptive dynamic programming approach[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2021, 51(12): 7622-7632.
- [11] Jorjani M, Seifi H, Varjani A Y, et al. An optimization-based approach to recover the detected attacked grid variables after false data injection attack[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(6): 5322-5334.
- [12] De Persis C, Tesi P. Networked control of nonlinear systems under Denial-of-Service[J]. Systems & Control Letters, 2016, 96: 124-131.
- [13] Yu S H, Yu X H, Shirinzadeh B, et al. Continuous finite-time control for robotic manipulators with terminal sliding mode[J]. Automatica, 2005, 41(11): 1957-1964.
- [14] Qian C J, Lin W. A continuous feedback approach to global strong stabilization of nonlinear systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2001, 46(7): 1061-1079.
- [15] Du H B, Li S H, Qian C J. Finite-time attitude tracking control of spacecraft with application to attitude synchronization[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2011, 56(11): 2711-2717.
- [16] 俞波, 程盈盈, 金小峥, 等. 角速度约束下的刚体飞行器鲁棒有限时间姿态镇定[J]. 控制与决策, 2022, 37(12): 3314-3320.

- (Yu B, Cheng Y Y, Jin X Z, et al. Robust finite-time attitude stabilization of rigid aircraft under angular velocity constraints[J]. *Control and Decision*, 2022, 37(12): 3314-3320.)
- [17] Sarrafan N, Zarei J. Bounded observer-based consensus algorithm for robust finite-time tracking control of multiple nonholonomic chained-form systems[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2021, 66(10): 4933-4938.
- [18] Li S H, Du H B, Yu X H. Discrete-time terminal sliding mode control systems based on Euler's discretization[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2014, 59(2): 546-552.
- [19] 何舒平, 艾琦珑. 基于有限时间的一类时滞非线性切换系统滑模控制[J]. *控制与决策*, 2019, 34(3): 655-660.
(He S P, Ai Q L. Finite-time sliding mode control for a class of nonlinear and time-delayed switched systems[J]. *Control and Decision*, 2019, 34(3): 655-660.)
- [20] Du H B, Yu X H, Chen M Z Q, et al. Chattering-free discrete-time sliding mode control[J]. *Automatica*, 2016, 68: 87-91.
- [21] Ma Y S, Che W W, Deng C. Dynamic event-triggered model-free adaptive control for nonlinear CPSs under aperiodic DoS attacks[J]. *Information Sciences*, 2022, 589: 790-801.
- [22] Su X J, Liu X X, Shi P, et al. Sliding mode control of hybrid switched systems via an event-triggered mechanism[J]. *Automatica*, 2018, 90: 294-303.
- [23] Ström T. On logarithmic norms[J]. *SIAM Journal on Numerical Analysis*, 1975, 12(5): 741-753.
- [24] Li S H, Ding S H, Li Q. Global set stabilization of the spacecraft attitude control problem based on quaternion[J]. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2010, 20(1): 84-105.
- [25] Hardy G H. *Inequalities*[M]. The 2nd edition. Cambridge: University Press, 1952.
- [26] Du H B, Zhai J Y, Chen M Z Q, et al. Robustness analysis of a continuous higher order finite-time control system under sampled-data control[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2019, 64(6): 2488-2494.
- [27] Lu A Y, Yang G H. Input-to-state stabilizing control for cyber-physical systems with multiple transmission channels under denial of service[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2018, 63(6): 1813-1820.

作者简介

都海波(1982—), 男, 教授, 博士生导师, 从事非线性系统、信息物理系统等研究, E-mail: haibo.du@hfut.edu.cn;

李申申(1998—), 男, 硕士生, 从事非线性控制理论的研究, E-mail: shenshen.li@mail.hfut.edu.cn;

陈维乐(1997—), 男, 博士生, 从事非线性控制理论的研究, E-mail: chenweile1997@mail.hfut.edu.cn;

朱文武(1993—), 男, 讲师, 博士, 从事非线性系统控制理论及应用的研究, E-mail: zww@hfut.edu.cn.