

网络攻击下一类非线性切换多智能体系统的安全自适应控制

李占杰¹, 马亚静^{2,3}, 岳 东^{1†}

(1. 南京邮电大学 先进技术研究院, 江苏 南京 210003; 2. 南京邮电大学 物联网学院, 江苏 南京 210003;

3. 南京邮电大学 江苏省宽带无线通信和物联网重点实验室, 江苏 南京 210003)

摘要: 针对一类控制方向未知的非线性切换多智能体系统, 本文研究了在不确定网络攻击下的安全控制问题. 网络攻击破坏传感器真实数据, 导致系统真实信息无法获取且不能直接用于控制设计. 为此, 通过受攻击状态构建一组新颖辅助变量来消除网络攻击造成的影响. 此外, 所研究的系统包含更一般的不确定性, 即未知控制方向, 未知常值参数以及不确定攻击. 这些不确定性在设计过程中相互耦合. 利用Nussbaum型函数并设计自适应律补偿耦合后的不确定性, 极大降低了系统复杂性. 通过系统性地迭代构造出共同Lyapunov函数, 提出了一套安全自适应控制方法, 保证了受攻击系统在任意切换下达到渐近输出一致性. 最后, 数值仿真验证了该方法的有效性.

关键词: 非线性切换系统; 多智能体系统; 网络攻击; 安全自适应控制

引用格式: 李占杰, 马亚静, 岳东. 网络攻击下一类非线性切换多智能体系统的安全自适应控制. 控制理论与应用, 2022, 39(8): 1355 – 1362

DOI: 10.7641/CTA.2022.11028

Secure adaptive consensus control against cyber attacks for nonlinear switched multi-agent systems

LI Zhan-jie¹, MA Ya-jing^{2,3}, YUE Dong^{1†}

(1. Institute of Advanced Technology, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing Jiangsu 210003, China;

2. School of Internet of Things, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing Jiangsu 210003, China;

3. Jiangsu Key Laboratory of Broadband Wireless Communication and Internet of Things,
Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing Jiangsu 210003, China)

Abstract: In this paper, the secure adaptive consensus control problem is considered for a class of uncertain nonlinear multi-agent systems under unknown control direction against uncertain cyber attacks. Cyber attacks destroy the real data of sensors, so that the real information of the system cannot be obtained and cannot be directly used for control design. In this paper, a new set of auxiliary variables is constructed to eliminate the impact of cyber attacks. Furthermore, the considered systems include more general uncertainties, namely, the unknown control direction, the uncertain constant parameters and the uncertain cyber attacks. These uncertainties are coupled together during the control design process. To tackle the coupled uncertainties, Nussbaum-type functions are used and an adaptive law is designed, which immensely reduces the system complexity. By constructing a common Lyapunov function for all subsystems, a secure protocol is developed to guarantee that all the outputs of the multi-agent systems achieve the asymptotical consensus against cyber attacks under arbitrary switching. Finally, an example is presented to verify the effectiveness of the proposed method.

Key words: nonlinear switched systems; multi-agent systems; cyber attacks; secure adaptive control

Citation: LI Zhanjie, MA Yajing, YUE Dong. Secure adaptive consensus control against cyber attacks for nonlinear switched multi-agent systems. *Control Theory & Applications*, 2022, 39(8): 1355 – 1362

1 引言

由于多智能体系统相关理论在电力网络、无人驾驶汽车和智能交通等工程领域中被广泛应用, 近年来

多智能体系统的控制问题吸引了科研工作者的广泛关注, 并取得了许多重要研究成果^[1-4]. 在多智能体一致性控制研究中, 智能体之间需要进行通信信息传输,

收稿日期: 2021-10-26; 录用日期: 2022-02-23.

[†]通信作者. E-mail: medongy@vip.163.com.

本文责任编辑: 龙离军.

江苏省自然科学基金项目(BK20210590, BE2020001-4), 国家自然科学基金项目(62103199, 62103201), 江苏省前沿引领技术基础研究专项项目(BK20202011), 江苏省高等学校自然科学研究面上项目(21KJB510043)资助.

Supported by the Natural Science Foundation of Jiangsu Province (BK20210590, BE2020001-4), the National Natural Science Foundation of China (62103199, 62103201), the Leading Technology Foundation Research Project of Jiangsu Province (BK20202011) and the College Science Research Program of Jiangsu Province (21KJB510043).

并且信息的传输通常需要借助一些无线网络传播媒介^[5-7]. 众所周知, 网络信息传输容易受到恶意对手的攻击^[8-9]. 敌人可以监视系统状态信息并将假数据注入控制系统^[10-11]. 例如, 在电力传输系统中, 敌人可以通过入侵远程终端单元发动攻击. 因此, 对抗恶意攻击的多智能体安全一致性控制是一个重要且广受关注的研究课题. 文献[12-13]研究了在多种网路攻击下多智能体系统的领导-追随安全控制问题. 针对异构电池储能系统, 文献[14]解决了拒绝服务攻击发生时的分布式安全二次控制问题.

注意到上述安全控制结果基于一个共同假设, 即系统控制方向是已知的. 当研究控制方向未知的多智能体安全控制问题时, 这些控制方法将不再适用. 针对此问题, 一个有效的方法就是利用Nussbaum型函数方法^[15-16]. 文献[17-18]利用Nussbaum函数解决了具有未知方向的非线性多智能体系统一致性问题. 针对未知的状态反馈增益, 文献[19-20]借助Nussbaum函数研究了在传感器攻击下的非线性信息物理融合系统安全控制. 然而, 应当强调的是上述结果^[17-20]构造了多个自适应律以解决系统和攻击带来的不确定性, 但这些自适应律却依赖于智能体的个数和每个智能体的阶数, 这不可避免地增加了系统分析和设计复杂性. 另一方面, 众所周知许多自然或人造动态系统具有内在的切换特征, 例如: 网络控制系统、自动驾驶汽车等^[21-24]. 文献[25-26]表明即使所有子系统都是稳定的, 整个切换系统也可能是不稳定的. 此时, 前述非切换控制结果很难用于解决具有切换动态的非线性多智能体系统控制问题. 据作者所知, 由于未知控制方向、未知参数、不确定网络攻击和切换动态相互耦合带来的困难, 非线性切换多智能体的安全控制问题尚未得到充分研究.

针对一类非线性切换多智能体系统, 本文旨在提出自适应安全一致性协议, 保证智能体输出在网络攻击下达到渐近一致性, 其主要贡献可总结为: 1) 解决在网络攻击下具有未知控制方向的切换多智能体系统的安全控制问题. 在切换情形下, 提出一系列辅助变量处理网络攻击的影响; 2) 构造一个不依赖智能体个数和智能体阶数的自适应参数解决系统中耦合不确定因素. 与文献[17-20]智能体依赖多自适应参数相比, 所提出方法极大降低了系统的复杂性.

2 问题描述

考虑一类非线性切换多智能体系统, 其第 j 个智能体的数学模型描述如下:

$$\begin{cases} \dot{x}_{j,s} = x_{j,s+1} + h_{\sigma_j,j,s}(x_{j,1} \cdots x_{j,s})^T \theta_j, \\ s = 1, \cdots, n-1, \\ \dot{x}_{j,n} = b_j u_j + h_{\sigma_j,j,n}(x_j)^T \theta_j, \\ y_j = x_{j,1}, \end{cases} \quad (1)$$

其中: $x_j = (x_{j,1} \cdots x_{j,n})^T \in \mathbb{R}^n$, $y_j \in \mathbb{R}$ 和 $u_j \in \mathbb{R}$,

$j = 1, 2, \cdots, N$, 分别表示第 j 个智能体的状态、输出和输入. 系统的控制增益 b_j 以及其符号未知. 切换信号 $\sigma_j: [0, \infty) \rightarrow M = \{1, 2, \cdots, m\}$ 定义为分段连续函数, 其中 m 为每个智能体的子系统数目. 对于正整数 n_j , 系统参数 $\theta_j \in \mathbb{R}^{n_j}$ 为不确定常值向量. 对于 $i \in M$, $h_{i,j,s}: \mathbb{R}^s \rightarrow \mathbb{R}^{n_j}$ 是光滑函数, 并且满足 $h_{i,j,s}(0) = 0$. 考虑每个智能体的子系统遭受网络攻击. 具体地, 考虑如下欺骗信号攻击情形. 对于 $s = 1, 2, \cdots, n$, 传感器欺骗攻击 $\beta_j(x_{j,s}, t)$ 导致

$$\check{x}_{j,s} = x_{j,s} + \beta_j(x_{j,s}, t), \quad (2)$$

其中 $\check{x}_{j,s}$ 表示第 j 个智能体的第 s 个子系统实际状态.

为实现一致性控制的目标, 本文先介绍一些定义与假设, 再引入一些有用的引理.

令有向图 $G = (V, E, A)$ 表示智能体之间的信息传输. 在多智能体中, $V = \{V_1, V_2, \cdots, V_N\}$ 表示智能体(或节点)集合, $E \subseteq V \times V$ 表示有向边集合, $A = [a_{i,j}] \in \mathbb{R}^{N \times N}$ 为邻接矩阵. 当 $E_{j,i} = (V_j, V_i)$ 时, $a_{i,j}$ 为边的权重, $a_{i,j} > 0$ 表示智能体 j 可以获得智能体 i 的信息, 否则, $a_{i,j} = 0$. 定义 $L = D - A$ 为拉普拉斯矩阵, 其中 $D = \text{diag}\{d_1, \cdots, d_N\} \in \mathbb{R}^{N \times N}$ 是入度矩阵并且 $d_i = \sum_{j=1}^N a_{i,j}$. 定义智能体 i 的邻居集合为 $N_i = \{V_j | (V_j, V_i) \in E\}$. 如果存在一个根节点, 则称图具有有向生成树. 假设图 G 是强连通图.

假设 1 攻击信号 $\beta_j(x_{j,s}, t)$, $j = 1, 2, \cdots, n$ 是状态依赖的且被建模为 $\beta_j(x_{j,s}, t) = \delta_j x_{j,s}$, 其中 δ_j 未知, 并满足 $\delta_j \neq -1$.

方便起见, 令 $\lambda_j = 1 + \delta_j$. 结合式(2), 可以计算得到 $\check{x}_{j,s} = \lambda_j x_{j,s}$ 且

$$x_{j,s} = \lambda_j^{-1} \check{x}_{j,s}. \quad (3)$$

注 1 在传感器攻击的网络安全问题研究中, 依赖状态的攻击信号是一类典型的攻击形式, 如文献[11, 18-20]. 假设1要求 $\delta_j \neq -1$, 也就是, $\lambda_j \neq 0$. 此假设保证系统的可控性. 如果 $\delta_j = -1$, 可利用的测量信息 $\check{x}_{j,s} = 0$ 将无法用于反馈控制设计.

引理 1^[27] 对于具有合适维数的向量 x, y , 及实值连续函数 $f(x, y)$, 存在光滑函数 $\psi(x)$ 及 $\bar{f}(y)$ 使得 $|f(x, y)| \leq \psi(x)\bar{f}(y)$ 成立.

借助引理1可得到如下估计. 对于 $j = 1, 2, \cdots, N$, $s = 1, 2, \cdots, n$, $i \in M$, 由于 $x_{j,s} = \lambda_j^{-1} \check{x}_{j,s}$ 及 λ_j^{-1} 有界, 故存在函数 $\psi_{i,j,s}(\check{x}_{j,1}, \cdots, \check{x}_{j,s})$ 及常数 $\tilde{\omega}_{i,j,s}$ 使得

$$|h_{i,j,s}(x_{j,1}, \cdots, x_{j,s})| \leq \tilde{\omega}_{i,j,s} \psi_{i,j,s}(\check{x}_{j,1}, \cdots, \check{x}_{j,s}). \quad (4)$$

令

$$\psi_{j,s}(\check{x}_{j,1}, \cdots, \check{x}_{j,s}) \geq \max_{i \in M} \psi_{i,j,s}(\check{x}_{j,1}, \cdots, \check{x}_{j,s}),$$

$$\varpi \geq \max_{j=1, \cdots, N, s=1, \cdots, n, i \in M} \tilde{\omega}_{i,j,s}.$$

不等式(4)变为

$$|h_{i,j,s}(x_{j,1}, \dots, x_{j,s})| \leq \varpi \psi_{j,s}(\check{x}_{j,1}, \dots, \check{x}_{j,s}). \quad (5)$$

引理2^[18] 对于任意 $x_c \in \mathbb{R}$ 及常数 $a > 0$, 令 $\pi = e^{-at}$, $\text{sg}(x_c) = \frac{x_c}{\sqrt{x_c^2 + \pi^2}}$, 下列不等式成立:

$$0 < |x_c| - x_c \cdot \text{sg}(x_c) < \pi. \quad (6)$$

为处理未知控制方向, 引入Nussbaum函数

$$\mathcal{N}_j(\chi_j) = \cosh(g_1 \chi_j) \sin\left(\frac{\chi_j}{g_2}\right), \quad j = 1, 2, \dots, N, \quad (7)$$

其中 g_1 和 g_2 是两个满足如下条件的正常数:

$$g_1 \geq \max\left\{\sqrt{\frac{C^{2j} \cos(1/C)^2}{1 - \cos(1/C)^2}}, \frac{1}{g_3} \ln(2N)\right\}, \quad g_2 = \frac{1}{C}.$$

此处, $C > 4$ 为整数, $0 < g_3 < \frac{2}{C^N}$ 为常数.

引理3^[18-19] 如果 $W(t)$ 为正定且正向无界函数, 并满足如下不等式:

$$W(t) \leq \int_0^t \sum_{j=1}^N b_j \mathcal{N}_j(\chi_j) \dot{\chi}_j(\tau) d\tau - \int_0^t \sum_{j=1}^N \dot{\chi}_j(\tau) d\tau + c, \quad (8)$$

其中: $b_j \neq 0$ 未知且符号不定, c 是正常数, 那么, $W(t)$, $\chi_j(t)$ 以及 $\int_0^t \sum_{j=1}^N b_j \mathcal{N}_j(\chi_j) \dot{\chi}_j(\tau) d\tau$ 均有界.

3 主要结果

本节将首先设计自适应一致性协议并构造所有智能体的共同Lyapunov函数, 然后给出具体的一致性分析过程.

3.1 自适应一致性协议设计

设计过程包含 n 个步骤.

步骤1 首先, 构造以下辅助变量:

$$\eta_j = - \sum_{k=1}^N a_{j,k}(\check{y}_j - \check{y}_k), \quad j = 1, \dots, N, \quad (9)$$

其中: $\check{y}_j = \check{x}_{j,1}$, $\eta_j(0) = \check{x}_j(0)$, 并定义如下辅助变量:

$$e_{j,1} = \check{x}_{j,1} - \eta_j, \quad j = 1, \dots, N. \quad (10)$$

借助式(1)(3), 由 $e_{j,1}$ 定义可推导出 $e_{j,1}$ 的导数满足

$$\dot{e}_{j,1} = \check{x}_{j,2} + \lambda_j h_{i,j,1}(x_{j,1})^T \theta_j + \sum_{k=1}^N a_{j,k}(\check{x}_{j,1} - \check{x}_{k,1}). \quad (11)$$

记 $\vartheta = \bar{\lambda} \varpi \max_{j=1,2,\dots,N} |\theta_j|$, $\bar{\lambda} = \max_{j=1,2,\dots,N} |\lambda_j|$. 由式(5)和引理2可计算得

$$e_{j,1} \lambda_j h_{i,j,1}(x_{j,1})^T \theta_j \leq \bar{\lambda} \varpi |\theta_j| |e_{j,1} \psi_{j,1}| \leq \vartheta \pi + \vartheta \frac{(e_{j,1} \psi_{j,1})^2}{\sqrt{(e_{j,1} \psi_{j,1})^2 + \pi^2}}. \quad (12)$$

构造如下Lyapunov候选函数:

$$W_1 = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N e_{j,1}^2 + \frac{1}{2} \tilde{\vartheta}^2, \quad (13)$$

其中 $\tilde{\vartheta} = \vartheta - \hat{\vartheta}$, $\hat{\vartheta}$ 是参数 ϑ 的估计值. 简便起见, 定义

$$\bar{\tau}_{\theta,j,1} = \frac{e_{j,1} \psi_{j,1}^2}{\sqrt{(e_{j,1} \psi_{j,1})^2 + \pi^2}}. \quad (14)$$

利用式(11)-(12)及式(14), 可知 W_1 的导数满足

$$\dot{W}_1 \leq \sum_{j=1}^N e_{j,1}(\check{x}_{j,2} + \sum_{k=1}^N a_{j,k}(\check{x}_{j,1} - \check{x}_{k,1}) + \vartheta \bar{\tau}_{\theta,j,1}) - \hat{\vartheta} \dot{\hat{\vartheta}} + N \vartheta \pi. \quad (15)$$

现设计所需虚拟协议 $\check{x}_{j,2}^*$ 如下:

$$\check{x}_{j,2}^* = -\mu_{j,1} e_{j,1} - \sum_{k=1}^N a_{j,k}(\check{x}_{j,1} - \check{x}_{k,1}) - \hat{\vartheta} \bar{\tau}_{\theta,j,1}, \quad (16)$$

其中正常数 $\mu_{j,1}$ 是一个设计参数. 由式(15)及虚拟协议(16)可知

$$\dot{W}_1 \leq - \sum_{j=1}^N \mu_{j,1} e_{j,1}^2 + \sum_{j=1}^N e_{j,1}(\check{x}_{j,2} - \check{x}_{j,2}^*) - \hat{\vartheta}(\dot{\hat{\vartheta}} - \tau_{\theta,1}) + c_1, \quad (17)$$

其中: $\tau_{\theta,1} = \sum_{j=1}^N e_{j,1} \bar{\tau}_{\theta,j,1}$, $c_1 = N \vartheta \pi$.

步骤2 定义 $e_{j,2} = \check{x}_{j,2} - \check{x}_{j,2}^*$, 其导数满足

$$\dot{e}_{j,2} = \check{x}_{j,3} + \lambda_j h_{i,j,2}(x_{j,1}, x_{j,2})^T \theta_j - \dot{\check{x}}_{j,2}^*, \quad (18)$$

其中

$$\begin{aligned} \dot{\check{x}}_{j,2}^* = & \sum_{k=1}^N a_{j,k} \frac{\partial \check{x}_{j,2}^*}{\partial \check{x}_{k,1}} \check{x}_{k,2} + \frac{\partial \check{x}_{j,2}^*}{\partial \hat{\vartheta}} \dot{\hat{\vartheta}} + \frac{\partial \check{x}_{j,2}^*}{\partial \pi} \dot{\pi} + \\ & \frac{\partial \check{x}_{j,2}^*}{\partial \check{x}_{j,1}} \check{x}_{j,2} + \lambda_j \sum_{k=1}^N a_{j,k} \frac{\partial \check{x}_{j,2}^*}{\partial \check{x}_{k,1}} h_{i,k,1}(\check{x}_{k,1})^T \theta_k + \\ & \lambda_j \frac{\partial \check{x}_{j,2}^*}{\partial \check{x}_{j,1}} h_{i,j,1}(\check{x}_{j,1})^T \theta_j. \end{aligned}$$

利用式(5)及引理2, 可知如下不等式成立:

$$e_{j,2} \lambda_j h_{i,j,2}(x_{j,1}, x_{j,2})^T \theta_j \leq \vartheta \pi + \vartheta \frac{(e_{j,2} \psi_{j,2})^2}{\sqrt{(e_{j,2} \psi_{j,2})^2 + \pi^2}}. \quad (19)$$

与式(19)类似, 可以计算得到

$$\begin{aligned} e_{j,2} \dot{e}_{j,2} \leq & (N+2) \vartheta \pi + \vartheta e_{j,2} \bar{\tau}_{\theta,j,2} + \\ & e_{j,2}(\check{x}_{j,3} - \sum_{k=1}^N a_{j,k} \frac{\partial \check{x}_{j,2}^*}{\partial \check{x}_{k,1}} \check{x}_{k,2} - \\ & \frac{\partial \check{x}_{j,2}^*}{\partial \check{x}_{j,1}} \check{x}_{j,2} - \frac{\partial \check{x}_{j,2}^*}{\partial \hat{\vartheta}} \dot{\hat{\vartheta}} - \frac{\partial \check{x}_{j,2}^*}{\partial \pi} \dot{\pi}), \quad (20) \end{aligned}$$

其中

$$\begin{aligned} \bar{\tau}_{\theta,j,2} = & \frac{e_{j,2}\psi_{j,2}^2}{\sqrt{(e_{j,2}\psi_{j,2})^2 + \pi^2}} + \\ & \frac{e_{j,2}(\frac{\partial \check{x}_{j,2}^*}{\partial \check{x}_{j,1}}\psi_{j,1})^2}{\sqrt{(e_{j,2}\frac{\partial \check{x}_{j,2}^*}{\partial \check{x}_{j,1}}\psi_{j,1})^2 + \pi^2}} + \\ & \sum_{k=1}^N \frac{e_{j,2}(a_{j,k}\frac{\partial \check{x}_{j,2}^*}{\partial \check{x}_{k,1}}\psi_{k,1})^2}{\sqrt{(a_{j,k}e_{j,2}\frac{\partial \check{x}_{j,2}^*}{\partial \check{x}_{k,1}}\psi_{k,1})^2 + \pi^2}}. \end{aligned}$$

构造如下Lyapunov候选函数:

$$W_2 = W_1 + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N e_{j,2}^2. \quad (21)$$

利用式(17)(20), 计算可得

$$\begin{aligned} \dot{W}_2 = \dot{W}_1 + \sum_{j=1}^N e_{j,2}\dot{e}_{j,2} \leq & - \sum_{j=1}^N \mu_{j,1}e_{j,1}^2 + \sum_{j=1}^N e_{j,1}e_{j,2} - \tilde{\vartheta}(\dot{\vartheta} - \tau_{\theta,1}) + \\ & \sum_{j=1}^N e_{j,2}(\check{x}_{j,3} - \sum_{k=1}^N a_{j,k}\frac{\partial \check{x}_{j,2}^*}{\partial \check{x}_{k,1}}\check{x}_{k,2} - \\ & \frac{\partial \check{x}_{j,2}^*}{\partial \check{x}_{j,1}}\check{x}_{j,2} - \frac{\partial \check{x}_{j,2}^*}{\partial \hat{\vartheta}}\dot{\vartheta} - \frac{\partial \check{x}_{j,2}^*}{\partial \pi}\dot{\pi}) + \\ & \vartheta e_{j,2}\bar{\tau}_{\theta,j,2} + N(N+2)\vartheta\pi. \end{aligned} \quad (22)$$

现构造所需虚拟协议 $\check{x}_{j,3}^*$ 如下:

$$\begin{aligned} \check{x}_{j,3}^* = & -\mu_{j,2}e_{j,2} - e_{j,1} - \hat{\vartheta}\bar{\tau}_{\theta,j,2} + \\ & \sum_{k=1}^N a_{j,k}\frac{\partial \check{x}_{j,2}^*}{\partial \check{x}_{k,1}}\check{x}_{k,2} + \frac{\partial \check{x}_{j,2}^*}{\partial \check{x}_{j,1}}\check{x}_{j,2} + \\ & \frac{\partial \check{x}_{j,2}^*}{\partial \pi}\dot{\pi} + \frac{\partial \check{x}_{j,2}^*}{\partial \hat{\vartheta}}\tau_{\theta,2}, \end{aligned} \quad (23)$$

其中: $\tau_{\theta,2} = \sum_{j=1}^N e_{j,2}\bar{\tau}_{\theta,j,2} + \tau_{\theta,1}$, 正常数 $\mu_{j,2}$ 是一个设计参数. 把式(23)代入到式(22)可得

$$\begin{aligned} \dot{W}_2 \leq & - \sum_{j=1}^N (\mu_{j,1}e_{j,1}^2 + \mu_{j,2}e_{j,2}^2) + \\ & \sum_{j=1}^N e_{j,2}(\check{x}_{j,3} - \check{x}_{j,3}^*) - \tilde{\vartheta}(\dot{\vartheta} - \tau_{\theta,2}) - \\ & \sum_{j=1}^N e_{j,2}\frac{\partial \check{x}_{j,2}^*}{\partial \hat{\vartheta}}(\dot{\vartheta} - \tau_{\theta,2}) + c_2, \end{aligned} \quad (24)$$

其中 $c_2 = c_1 + N(N+2)\vartheta\pi$.

步骤s ($3 \leq s \leq n-1$) 定义 $e_{j,s} = \check{x}_{j,s} - \check{x}_{j,s}^*$, 其中 $\check{x}_{j,s}^*$ 是在 $s-1$ 步中构造的虚拟协议. 利用式(1)和式(3), 可知 $e_{j,s}$ 的导数满足

$$\dot{e}_{j,s} = \check{x}_{j,s+1} + \lambda_j h_{i,j,s}(x_{j,1} \cdots x_{j,s})^T \theta_j - \dot{\check{x}}_{j,s}^*, \quad (25)$$

其中 $\dot{\check{x}}_{j,s}^*$ 可类似 $\dot{\check{x}}_{j,s}^*$ 计算得到.

构造如下Lyapunov候选函数:

$$W_s = W_{s-1} + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N e_{j,s}^2, \quad (26)$$

其导数满足

$$\begin{aligned} \dot{W}_s \leq & - \sum_{j=1}^N (\mu_{j,1}e_{j,1}^2 + \cdots + \mu_{j,s-1}e_{j,s-1}^2) + \\ & \sum_{j=1}^N e_{j,s-1}e_{j,s} + \sum_{j=1}^N \vartheta e_{j,s}\bar{\tau}_{\theta,s,j} - \\ & \tilde{\vartheta}(\dot{\vartheta} - \tau_{\theta,s-1}) + c_{s-1} + N(N(s-1) + s)\vartheta\pi + \\ & \sum_{j=1}^N e_{j,s}(\check{x}_{j,s+1} - \sum_{l=1}^{s-1} \frac{\partial \check{x}_{j,s}^*}{\partial \check{x}_{j,l}}\check{x}_{j,l+1} - \frac{\partial \check{x}_{j,s}^*}{\partial \hat{\vartheta}}\dot{\vartheta} - \\ & \sum_{k=0}^{s-2} \frac{\partial \check{x}_{j,s}^*}{\partial \pi^{(k)}}\pi^{(k+1)} - \sum_{k=1}^N a_{j,k} \sum_{l=1}^{s-1} \frac{\partial \check{x}_{j,s}^*}{\partial \check{x}_{k,l}}\check{x}_{k,l+1}) - \\ & \sum_{j=1}^N \sum_{l=2}^{s-1} e_{j,l} \frac{\partial \check{x}_{j,l}^*}{\partial \hat{\vartheta}}(\dot{\vartheta} - \tau_{\theta,s-1}), \end{aligned} \quad (27)$$

其中定义 $\bar{\tau}_{\theta,s,j}$ 可由定义 $\bar{\tau}_{\theta,j,2}$ 类比得到. 现构造所需虚拟协议 $\check{x}_{j,s+1}^*$ 如下:

$$\begin{aligned} \check{x}_{j,s+1}^* = & -\mu_{j,s}e_{j,s} - e_{j,s-1} + \sum_{l=1}^{s-1} \frac{\partial \check{x}_{j,s}^*}{\partial \check{x}_{j,l}}\check{x}_{j,l+1} + \\ & \sum_{k=1}^N a_{j,k} \sum_{l=1}^{s-1} \frac{\partial \check{x}_{j,s}^*}{\partial \check{x}_{k,l}}\check{x}_{k,l+1} + \sum_{k=0}^{s-2} \frac{\partial \check{x}_{j,s}^*}{\partial \pi^{(k)}}\pi^{(k+1)} - \\ & \hat{\vartheta}\bar{\tau}_{\theta,s,j} + \sum_{l=2}^{s-1} e_{j,l} \frac{\partial \check{x}_{j,l}^*}{\partial \hat{\vartheta}}\tau_{\theta,s} + \frac{\partial \check{x}_{j,s}^*}{\partial \hat{\vartheta}}\tau_{\theta,s}, \end{aligned} \quad (28)$$

其中 $\tau_{\theta,s} = \sum_{j=1}^N e_{j,s}\bar{\tau}_{\theta,s,j} + \tau_{\theta,s-1}$, 正常数 $\mu_{j,s}$ 是一个设计参数. 由此, 式(27)变为

$$\begin{aligned} \dot{W}_s \leq & - \sum_{j=1}^N (\mu_{j,1}e_{j,1}^2 + \cdots + \mu_{j,s}e_{j,s}^2) + \\ & \sum_{j=1}^N e_{j,s}e_{j,s+1} - \tilde{\vartheta}(\dot{\vartheta} - \tau_{\theta,s}) - \\ & \sum_{j=1}^N \sum_{l=2}^s e_{j,l} \frac{\partial \check{x}_{j,l}^*}{\partial \hat{\vartheta}}(\dot{\vartheta} - \tau_{\theta,s}) + c_s, \end{aligned} \quad (29)$$

其中 $c_s = c_{s-1} + N(N(s-1) + s)\vartheta\pi$.

步骤n 在最后一步, 考虑如下Lyapunov候选函数:

$$W_n = W_{n-1} + \sum_{j=1}^N \frac{1}{2} e_{j,n}^2. \quad (30)$$

构造如下协议:

$$u_j = -\mathcal{N}_j(\chi_j)\check{x}_{j,n+1}^*, \quad \dot{\chi}_j = \check{x}_{j,n+1}^*e_{j,n}, \quad (31)$$

以及如下自适应律:

$$\dot{\hat{\theta}} = \tau_{\theta,n}, \quad (32)$$

并可以计算得到

$$\begin{aligned} \dot{W}_n \leq & - \sum_{j=1}^N \mu_{j,1} (e_{j,1}^2 + \cdots + e_{j,n}^2) + \\ & \sum_{j=1}^N (\lambda b_j \mathcal{N}_j(\chi_j) - 1) \dot{\chi}_j + c_n, \end{aligned} \quad (33)$$

其中 $\check{x}_{j,n+1}^*$, $\tau_{\lambda,n}$, $\tau_{\theta,n}$ 和先前步骤中的 $\check{x}_{j,s+1}^*$, $\tau_{\lambda,s}$, $\tau_{\theta,s}$ 结构相同. 那么, 常数 c_n 可以迭代获得.

注2 由于系统状态 $x_{j,s}$ 被传感器攻击损坏, 因此直接利用状态 $x_{j,s}$ 信息设计虚拟协议和真实协议将无法实现. 为了解决此问题, 在迭代过程中, 采用侵入状态 $\check{x}_{j,s}$ 构造一组辅助变量 η_j 和 $e_{j,s}$. 为了成功构造辅助变量, 每个智能体的所有的子系统共用一个虚拟协议. 由此, 可以处理未知的网络攻击和切换之间的耦合影响.

注3 未知系统参数 θ_j 以及未知攻击权重 δ_j 不可避免的导致一些未知参数. 在现有结果中, 针对非切换系统, 文献[17–20]引入了多个自适应参数来补偿这些未知量, 并且自适应参数的数目与智能体的数量和每个智能体的阶数相关. 显然, 智能体数量过多或每个智能体阶数过高将导致十分复杂的闭环系统. 本文设计过程中仅需要构造两个自适应律(32)就可以补偿未知参数, 从而大大降低了系统的复杂性.

3.2 一致性分析

本文的主要结果总结如下.

定理1 考虑在网络攻击(2)下的切换多智能体系统(1). 如果假设1成立, 且攻击权重相等, 那么一致性协议(31)以及自适应律(32)保证所有智能体的输出在任意切换下达到渐近一致性.

证 式(33)左右两边积分可以得到

$$\begin{aligned} W_n(t) \leq & W_n(0) - \int_0^t \sum_{j=1}^N \sum_{l=1}^n \mu_{j,1} e_{j,l} d\tau + \\ & \int_0^t \sum_{j=1}^N (\lambda b_j \mathcal{N}_j(\chi_j) - 1) \dot{\chi}_j d\tau + \int_0^t c_n d\tau \leq \\ & \int_0^t \sum_{j=1}^N (\lambda b_j \mathcal{N}_j(\chi_j) - 1) \dot{\chi}_j d\tau + c, \end{aligned} \quad (34)$$

其中根据 c_n 的定义知 $c = W_n(0) + \int_0^t c_n d\tau$ 是一个有界常数. 那么, 利用引理3可以推断出 $W_n(t)$, $\chi_j(t)$, $\int_0^t \sum_{j=1}^N \lambda b_j \mathcal{N}_j(\chi_j) \dot{\chi}_j(\tau) d\tau$ 均是有界的. 同时, 利用式(30)中 W_n 的定义可得到 $|e_{j,i}|$ 亦有界. 由式(34)可知 $|e_{j,s}|$ 是可积的. 此外, 容易验证 $|\dot{e}_{j,s}|$ 是有界的. 由Barbalat引理可以进一步推证 $\lim_{t \rightarrow \infty} e_{j,s}(t) = 0$. 通过定义 $\eta = (\eta_1 \cdots \eta_N)^T$, $e_1 = (e_{1,1} \cdots e_{N,1})$ 以及 $x_1 = (x_{1,1} \cdots x_{N,1})^T$, 可以得到

$$\dot{\eta} = -L_A \eta - L_A e_1. \quad (35)$$

因为图 G 具有有向生成树, 因此矩阵 L_A 具有一个零特征值, 其对应特征向量为 1_N , 并且矩阵 L_A 的其它 $n-1$ 个特征值 $v_2, \cdots, v_N$ 位于左半平面. 令 $P = [1_N \ v_2 \ \cdots \ v_N]$ 是一个正定矩阵, 其各列由矩阵 L_A 的特征向量组成. 由此可以得到

$$L_A = PJP^{-1}, \quad (36)$$

其中 $J = \text{diag}\{0, J_1\}$ 为Jordan标准型, J_1 是一个正定矩阵. 定义 $\varsigma = P^{-1}\eta$. 由式(35)–(36)可计算得

$$\dot{\varsigma} = -J\varsigma - JP^{-1}e_1. \quad (37)$$

因为 $J = \text{diag}\{0, J_1\}$, 因此, ς 的第1个元素 ς_1 满足 $\dot{\varsigma}_1 = 0$, 并且

$$JP^{-1} = [0_{1 \times N} \ \bar{J}_{(N-1) \times N}]. \quad (38)$$

令 $\bar{\varsigma} = (\varsigma_2, \cdots, \varsigma_N)$, $e = (e_{2,1}, \cdots, e_{N,1})$, 通过计算得到

$$\dot{\bar{\varsigma}} = -J_1 \bar{\varsigma} - \bar{J}_1 e. \quad (39)$$

由于 J_1 是正定矩阵且 $|e|$ 有界, 因此由式(39)可知 $|\bar{\varsigma}|$ 有界. 定义如下函数:

$$\bar{W} = \bar{\varsigma}^T Q \bar{\varsigma}, \quad (40)$$

其中 Q 满足 $J_1^T Q + Q J_1 = -2I_{N-1}$. 经过计算可得

$$\dot{\bar{W}} \leq -\bar{\varsigma}^T \bar{\varsigma} + 2|Q \bar{J}_1||e|^2. \quad (41)$$

对式(41)左右两边同时积分得到

$$\int_0^\infty \bar{\varsigma}^T \bar{\varsigma} d\tau \leq -\bar{W}(t) + \bar{W}(0) + \int_0^\infty 2|Q \bar{J}_1||e|^2 d\tau. \quad (42)$$

由于 $\int_0^\infty |e|^2 d\tau$ 有界, 因此由式(42)可得 $\int_0^\infty \bar{\varsigma}^T \bar{\varsigma} d\tau$ 有界. 利用Barbalat引理推证出 $\lim_{t \rightarrow \infty} |\bar{\varsigma}| = 0$. 令 p_1 为矩阵 P^{-1} 的第1行. 考虑到 $P = [1_N \ v_2 \ \cdots \ v_N]$, 可直接计算得到 $\lim_{t \rightarrow \infty} \check{x}_1(t) = 1_N p_1 \check{x}_1(0)$. 因此, 对于任意 $i, j = 1, 2, 3, \cdots, N$, 可以推测得知等式 $\lim_{t \rightarrow \infty} (\check{y}_i(t) - \check{y}_j(t)) = 0$ 成立. 因为攻击权重是相等的, 因此得到

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (y_i(t) - y_j(t)) = 0. \quad (43)$$

式(43)说明所有智能体的输出渐近达到一致.

注4 本文所设计的虚拟和真实协议并没有直接用到非线性动态 $h_{i,j,s}$ 的信息. 利用引理1, 只要获得 $h_{i,j,s}$ 已知上界, 设计方法对未知非线性动态依然有效. 针对无法获取准确上界情形, 可以根据非线性特性, 利用鲁棒控制技术、高增益技术、函数逼近技术等处理.

注5 切换多智能体系统(1)是标准的切换模型, 其中每个智能体的动态在不同子动态之间进行切换. 当 $M = \{1\}$ 时, 非线性函数 $h_{1,j,s}$ 简化为文献[17–19]中的函数. 此外, 文献[3–4]考虑了切换多智能体系统, 但是并没有考虑网络攻击并且需要事先已知控制方向. 本文提出的控制方法不仅同时考虑了未知的控制方向及不确定网络攻击, 而且解决了多种不确定性之间的耦合问题.

4 仿真例子

为了阐明所设计协议的有效性, 本小节给出一个数值仿真, 并且以文献[18]中的控制机制作为对比.

考虑一个由5个智能体组成的切换多智能体系统. 图1展示了智能体之间的通信图. 每个智能体的动态描述如下:

$$\begin{cases} \dot{x}_{j,1} = x_{j,2}, \\ \dot{x}_{j,2} = b_j u_j + h_{\sigma_j, j, 2}(x_{j,1}, x_{j,2}) \theta_j, \\ y_j = x_{j,1}, \end{cases} \quad (44)$$

其中: $j = 1, 2, 3, 4, 5$, $\sigma_j : [0, \infty) \rightarrow M = \{1, 2\}$, 各个智能体中的所有子动态取为

$$\begin{aligned} h_{1,1,2} &= \sin x_{1,2} x_{1,1}, \quad h_{2,1,2} = \frac{x_{1,1}}{10 + x_{1,1}^2}, \\ h_{1,2,2} &= \sin x_{2,1}, \quad h_{2,2,2} = x_{2,2}, \\ h_{1,3,2} &= x_{3,1} \sin x_{3,1}, \quad h_{2,3,2} = x_{3,1}^2, \\ h_{1,4,2} &= x_{4,2}, \quad h_{2,4,2} = 1 - \cos x_{4,2}^2, \\ h_{1,5,2} &= x_{5,1} \sin x_{5,2}, \quad h_{2,5,2} = x_{5,1}. \end{aligned}$$

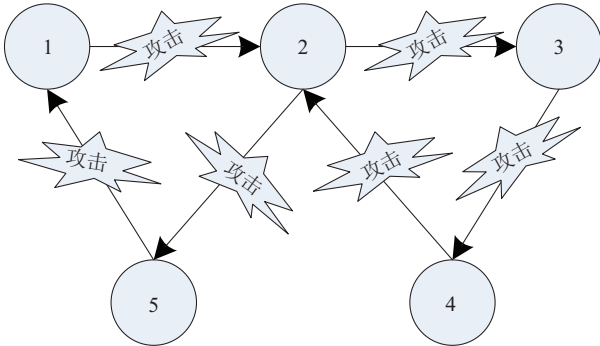


图1 智能体之间通信图

Fig. 1 Communication graph among agents

按照第3部分的设计过程, 设计如下一致性协议:

$$u_j = -\mathcal{N}_j(\chi_j) \ddot{x}_{j,3}^*, \quad \dot{\chi}_j = \ddot{x}_{j,3}^* e_{j,2} \quad (45)$$

与如下自适应律:

$$\dot{\hat{\vartheta}} = \tau_{\theta, 2}, \quad (46)$$

其中所涉及的相关变量和参数如下:

$$\begin{aligned} e_{j,1} &= \ddot{x}_{j,1} - \eta_j, \quad e_{j,2} = \ddot{x}_{j,2} - \ddot{x}_{j,2}^*, \\ \ddot{x}_{j,2}^* &= -\mu_{j,1} e_{j,1} + \dot{\eta}_j - \hat{\vartheta} \bar{\tau}_{\theta, j, 1}, \\ \ddot{x}_{j,3}^* &= -\mu_{j,2} e_{j,2} - e_{j,1} - \hat{\vartheta} \bar{\tau}_{\theta, j, 2} + \\ &\quad \sum_{k=1}^N a_{j,k} \frac{\partial \ddot{x}_{j,2}^*}{\partial \ddot{x}_{k,1}} \ddot{x}_{k,2} + \frac{\partial \ddot{x}_{j,2}^*}{\partial \ddot{x}_{j,1}} \ddot{x}_{j,2} + \\ &\quad \frac{\partial \ddot{x}_{j,2}^*}{\partial \pi} \dot{\pi} + \frac{\partial \ddot{x}_{j,2}^*}{\partial \hat{\vartheta}} \tau_{\theta, 2}, \\ \bar{\tau}_{\theta, j, 1} &= \tau_{\theta, 1} = 0, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tau_{\theta, 2} &= \sum_{j=1}^N e_{j,2} \bar{\tau}_{\theta, j, 2} + \tau_{\theta, 1}, \quad \bar{\tau}_{\theta, j, 2} = \\ &\quad \frac{e_{j,2} \psi_{j,2}^2}{\sqrt{(e_{j,2} \psi_{j,2})^2 + \pi^2}}, \end{aligned}$$

$$\psi_{1,2} = 2|\ddot{x}_{1,1}|, \quad \psi_{2,2} = |\ddot{x}_{2,1}|, \quad \psi_{3,2} = 2\ddot{x}_{3,1}^2,$$

$$\psi_{4,2} = |\ddot{x}_{4,2}| + 1, \quad \psi_{5,2} = 2|\ddot{x}_{5,1}|.$$

令

$$\theta_1 = \theta_2 = 0.2, \quad \theta_3 = 0.4, \quad \theta_4 = \theta_5 = 0.5,$$

$$b_1 = 0.9, \quad b_2 = b_3 = 0.6, \quad b_4 = b_5 = -0.5,$$

$$\mu_{1,1} = 2, \quad \mu_{2,1} = 5, \quad \mu_{3,1} = 2, \quad \mu_{4,1} = 4, \quad \mu_{5,1} = 2,$$

$$\mu_{1,2} = \mu_{2,2} = 10, \quad \mu_{3,2} = \mu_{4,2} = \mu_{5,2} = 8,$$

$$g_1 = 20, \quad g_2 = 0.26, \quad a = 1,$$

$$(x_{1,1}(0), x_{1,2}(0)) = (-0.2, 0.2),$$

$$(x_{2,1}(0), x_{2,2}(0)) = (0.5, 0.1),$$

$$(x_{3,1}(0), x_{3,2}) = (0.2, 0.1),$$

$$(x_{4,1}(0), x_{4,2}) = (0.1, -0.1),$$

$$(x_{5,1}(0), x_{5,2}) = (0.1, -0.1),$$

其它初始状态设选为0. 攻击参数选为 $\delta_j = 0.5$. 为了直观呈现一致性, 令 $e_y = (y_1 - y_2, y_2 - y_3, y_3 - y_4, y_4 - y_5)$. 本节将与文献[18]中的控制机制做对比.

仿真结果如图2-4所示. 如图2为切换信号, 每个智能体切换相同. 图3分别刻画了在本文提出方法下, 文献[18]方法下的一致性误差, 以及不考虑网络攻击下的一致性误差. 很明显, 本文方法下的一致性误差展现出了更好的收敛性, 具有更快的收敛时间 $t = 4$ s. 作为对比, 文献[18]方法中的一致性误差则具有更长的收敛时间和更大的幅值, 而不考虑网络攻击的方法误差则不收敛. 图4为自适应律. 文献[17-19]需要构造20个自适应参数消除未知变量影响, 本文方法只需要一个自适应参数. 结果表明本文提出的控制方法可以更好地解决网络攻击和切换的影响.

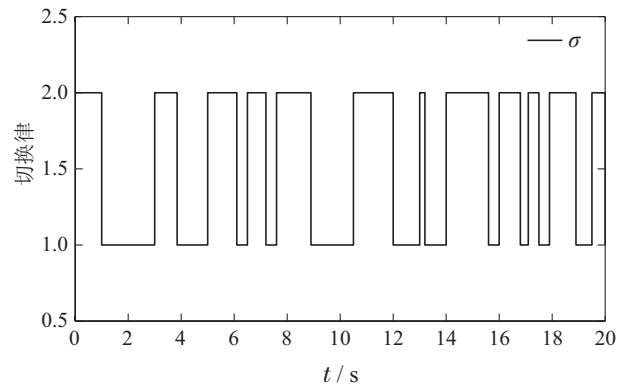


图2 切换律 σ 的演化

Fig. 2 The evolution of switching law σ

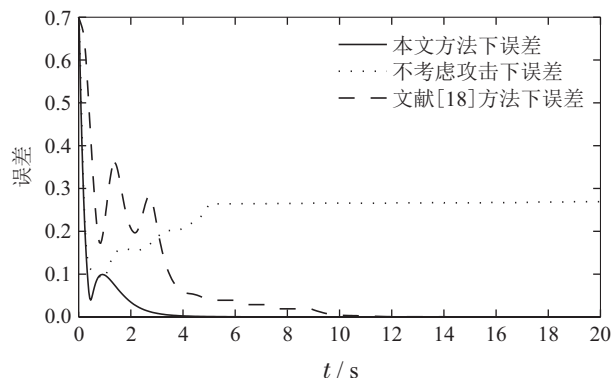
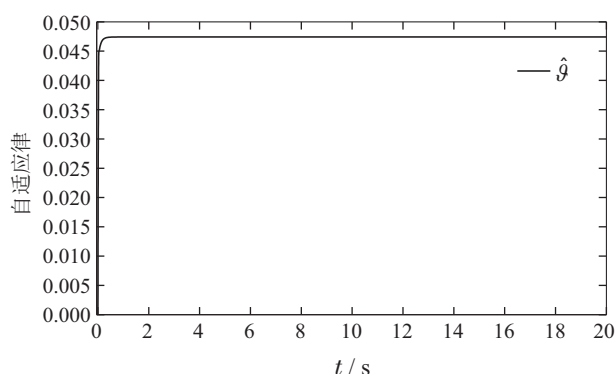


图3 智能体输出误差一致性

Fig. 3 The consensus error of outputs of the agents

图4 自适应律 $\hat{\nu}$ Fig. 4 The adaptive law $\hat{\nu}$

5 结论

针对网络攻击的切换多智能体系统, 本文建立了自适应安全控制协议. 在切换情形, 新颖的辅助变量和Nussbaum型函数用于处理网络攻击和未知的控制方向. 一个自适应律用于处理系统中的耦合不确定性, 极大降低了系统的复杂性. 值得进一步研究的问题包括把已设计控制策略拓展到在状态依赖切换网络攻击情况下的多智能体系统, 并考虑把所得结果推广到切换拓扑框架下.

参考文献:

- [1] GE X, HAN Q L, DING L, et al. Dynamic event-triggered distributed coordination control and its applications: A survey of trends and techniques. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2020, 50(9): 3112 – 3125.
- [2] CAO Y, REN W. Finite-time consensus for multi-agent networks with unknown inherent nonlinear dynamics. *Automatica*, 2014, 50(10): 2648 – 2656.
- [3] MA Y, ZHAO J. Distributed integral-based event-triggered scheme for cooperative output regulation of switched multi-agent systems. *Information Sciences*, 2018, 457: 208 – 221.
- [4] LIU Y, TANG R, ZHOU C, et al. Event-triggered leader-following consensus of multiple mechanical systems with switched dynamics. *International Journal of Systems Science*, 2020, DOI: 10.1080/00207721.2020.1818146.
- [5] YANG Yang, LIU Qidong, CHEN Didi, et al. Predictor-based neural dynamic surface output consensus control of a class of nonlinear multi-agent systems. *Control Theory & Applications*, 2021, 38(8): 1197 – 1212.
- (杨杨, 刘奇东, 陈笛笛, 等. 基于预估器的一类多智能体系统神经动态面输出一致控制. *控制理论与应用*, 2021, 38(8): 1197 – 1212.
- [6] ZHAO N, SHI P, XING W. Dynamic event-triggered approach for networked control systems under denial of service attacks. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2021, 31(5): 1774 – 1795.
- [7] YUE D, TIAN E, HAN Q L. A delay system method for designing event-triggered controllers of networked control systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2012, 58(2): 475 – 481.
- [8] HU S, YUAN P, YUE D, et al. Attack-resilient event-triggered controller design of DC microgrids under DoS attacks. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2019, 67(2): 699 – 710.
- [9] LAI Shaoyu, CHEN Bo, YU Li. Switching-Luenberger-observer-based redundant control under DoS attacks. *Control Theory & Applications*, 2020, 37(4): 758 – 766.
- (赖绍禹, 陈博, 俞立. DoS攻击下基于切换Luenberger观测器的冗余控制. *控制理论与应用*, 2020, 37(4): 758 – 766.)
- [10] ZHANG X M, HAN Q L, GE X, et al. Networked control systems: A survey of trends and techniques. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2020, 7(1): 1 – 17.
- [11] YOO S J. Neural-network-based adaptive resilient dynamic surface control against unknown deception attacks of uncertain nonlinear time-delay cyberphysical systems. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2020, 31(10): 4341 – 4353.
- [12] ZHA L, LIU J, CAO J. Resilient event-triggered consensus control for nonlinear multi-agent systems with dos attacks. *Journal of the Franklin Institute*, 2019, 356(13): 7071 – 7090.
- [13] LIU J, YIN T, YUE D, et al. Event-based secure leader-following consensus control for multiagent systems with multiple cyber attacks. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2020, 51(1): 162 – 173.
- [14] DING L, HAN Q L, NING B, et al. Distributed resilient finite-time secondary control for heterogeneous battery energy storage systems under denial-of-service attacks. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019, 16(7): 4909 – 4919.
- [15] LONG L, ZHAO J. Switched-observer-based adaptive neural control of MIMO switched nonlinear systems with unknown control gains. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2016, 28(7): 1696 – 1709.
- [16] GUO M, XU D, LIU L. Cooperative output regulation of heterogeneous nonlinear multi-agent systems with unknown control directions. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2016, 62(6): 3039 – 3045.
- [17] HUANG J, SONG Y, WANG W, et al. Fully distributed adaptive consensus control of a class of high-order nonlinear systems with a directed topology and unknown control directions. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2018, 48(8): 2349 – 2356.
- [18] GAO R, HUANG J, WANG L. Leaderless consensus control of uncertain multi-agents systems with sensor and actuator attacks. *Information Sciences*, 2019, 505: 144 – 156.
- [19] REN X X, YANG G H. Adaptive control for nonlinear cyber-physical systems under false data injection attacks through sensor networks. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2020, 30(1): 65 – 79.
- [20] JIN X, HADDAD W M, YUCELEN T. An adaptive control architecture for mitigating sensor and actuator attacks in cyber-physical systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2017, 62(11): 6058 – 6064.
- [21] LONG L. Multiple lyapunov functions-based small-gain theorems for switched interconnected nonlinear systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2017, 62(8): 3943 – 3958.

- [22] LI Z, ZHAO J. Co-design of controllers and a switching policy for nonstrict feedback switched nonlinear systems including first-order feedforward paths. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2019, 64(4): 1753 – 1760.
- [23] YANG D, ZONG G, KARIMI H R. H_∞ refined antidisturbance control of switched LPV systems with application to aero-engine. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, 67(4): 3180 – 3190.
- [24] SANG H, ZHAO J. Energy-to-peak state estimation for switched neutral-type neural networks with sector condition via sampled-data information. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2020, 32(3): 1339 – 1350.
- [25] SUN X M, WANG W. Integral input-to-state stability for hybrid delayed systems with unstable continuous dynamics. *Automatica*, 2012, 48(9): 2359 – 2364.
- [26] LONG L, ZHAO J. A small-gain theorem for switched interconnected nonlinear systems and its applications. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2013, 59(4): 1082 – 1088.
- [27] WEI L, QIAN C. Adaptive control of nonlinearly parameterized systems: The smooth feedback case. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2002, 47(8): 1249 – 1266.

作者简介:

李占杰 讲师, 硕士生导师, 目前研究方向为非线性切换系统控制设计, E-mail: zhanjie.lii@126.com;

马亚静 讲师, 硕士生导师, 目前研究方向为多智能体系统及切换系统控制, E-mail: myajing517@126.com;

岳东 教授, 博士生导师, 目前研究方向为网络化控制, E-mail: medongy@vip.163.com.