

## 特约论文



苏磊, 博士, 副教授, 硕士生导师, 中国指挥与控制学会青年工作委员会委员, 安徽工业大学青年拔尖人才, 《安徽工业大学学报(自然科学版)》青年编委。2020年获东北大学工学博士学位, 2023年9月在安徽天康集团股份有限公司从事博士后研究(在站)。主要从事工业自动化、基于PLC的智能控制以及随机信息物理系统安全控制等方面的研究, 主持国家自然科学基金项目、安徽省自然科学基金项目、安徽高校优秀青年基金项目及相关产学研项目等4项, 以第一参与人参与国家自然科学基金项目、安徽省科技重大专项及安徽省重点研发计划项目等3项, 参与完成安徽省科技成果1项(智能化型钢高质高效成排矫直机关键技术及装备研发)。在 *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers* 及 *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems* 等期刊发表SCI论文30余篇, 其中 *IEEE Transactions on Fuzzy Systems* 会刊论文6篇。

## 混合网络攻击下马尔可夫跳变神经网络的安全容错同步控制

汪威辰, 苏磊, 费习宏, 朱金民, 方田

(安徽工业大学 电气与信息工程学院, 安徽 马鞍山 243032)

**摘要:** 针对一类混合网络攻击下马尔可夫跳变神经网络安全容错同步控制问题, 提出1种确保神经网络主从系统安全容错同步控制器的设计方法。利用2个独立的伯努利分布对随机发生的欺骗攻击和拒绝服务(DoS)攻击进行建模, 将马尔可夫跳变神经网络和混合网络攻击置于同一框架中, 考虑到执行器可能发生的失效故障情况, 设计1种容错控制器; 引入1种自由矩阵方法, 构建李雅普诺夫(Lyapunov)函数, 采用线性矩阵不等式分析方法和特殊的积分不等式放缩技术, 推导出能够保证同步误差系统随机均方稳定且满足规定的 $H_\infty$ 性能指标的充分条件; 进一步使用1种有效的解耦方法对矩阵的耦合项进行分离解耦, 运用Matlab中的LMI工具箱得到控制器参数, 最后通过数值算例说明所提方法的可行性和有效性。结果表明: 当执行器故障失效60%~80%时, 以及遭受欺骗攻击概率为80%和DoS攻击概率为50%的混合网络攻击时, 所提方法仍然能实现神经网络主从系统的安全性和同步性。

**关键词:** 马尔可夫跳变; 神经网络; 主从系统; 安全控制; 容错控制; 混合网络攻击; 线性矩阵不等式

**中图分类号:** TP 20 **文献标志码:** A **doi:** 10.12415/j.issn.1671-7872.23189



收稿日期: 2023-12-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(62103005); 安徽高校优秀青年基金项目(2023AH030030); 安徽省自然科学基金项目(2108085QF276); 安徽省大学生创新创业训练项目(S202210360286)

作者简介: 汪威辰(2000—), 男, 安徽安庆人, 硕士生, 主要研究方向神经网络控制与同步。

通信作者: 苏磊(1989—), 男, 安徽安庆人, 博士, 副教授, 主要研究方向为Markov跳变系统的鲁棒容错控制及信息物理系统的攻防。

引文格式: 汪威辰, 苏磊, 费习宏, 等. 混合网络攻击下马尔可夫跳变神经网络的安全容错同步控制[J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2024, 41(5):490-498.

## Secure Fault-tolerant Synchronous Control of Markov Jumping Neural Networks under Hybrid Cyber Attacks

WANG Weichen, SU Lei, FEI Xihong, ZHU Jinmin, FANG Tian

(School of Electrical & Information Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan 243032, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of secure fault-tolerant synchronous control of Markov jumping neural networks under a class of hybrid cyber attacks, a design method of controller was proposed to ensure the secure fault-tolerant synchronization of neural network master-slave system. Two independent Bernoulli distributions were used to model randomly occurring deception attacks and denial of service (DoS) attacks. Markov jump neural networks and hybrid cyber attacks were placed in the same framework. Considering the possible failure of actuators, a fault-tolerant controller was designed. A free matrix method was introduced, and Lyapunov function was constructed. Linear matrix inequality analysis method and special integral inequality reduction techniques were used to derive the sufficient conditions that can ensure the random mean square stability of the synchronous error system and meet the specified  $H_\infty$  performance index. The coupling terms of the matrix were separated and decoupled by an effective decoupling method, and the controller parameters were obtained by the LMI toolbox of Matlab. Finally, a numerical example was given to illustrate the feasibility and effectiveness of the proposed method. The results show that the proposed method can still achieve the security and synchronization of neural network master-slave system when the actuator fails by 60% to 80%, and when subjected to at hybrid cyber attacks with deception attack probability of 80% and DoS attack probability of 50%.

**Keywords:** Markov jumping; neural network; master-slave system; secure control; fault-tolerant control; synchronous control; hybrid cyber attacks; linear matrix inequality

近年,人工智能技术得到飞速发展,且已成为当今社会发展的重要驱动力,其应用范围也越来越广泛,涵盖至医疗、金融、交通、机械制造等领域。神经网络(neural networks, NNs)作为人工智能的一部分也得到快速发展,广泛用于机器视觉、图像处理、语音识别等方面<sup>[1-3]</sup>。在神经网络的实际应用中,系统会因为环境参数的变化而发生物理故障,导致系统多种模态之间经常发生随机切换现象。有限模态的马尔可夫(Markov)模型可有效描述这一现象,且已得到学者们的广泛关注。钱学明<sup>[4]</sup>、董海玲等<sup>[5]</sup>研究了带有时滞耦合的 Markov 跳变神经网络的同步问题;田佳萍等<sup>[6]</sup>研究了 Markov 模型神经网络采样控制的主从同步问题;Zhang 等<sup>[7]</sup>研究了一类时变时滞的 Markov 跳变神经网络的弹性滤波问题,并得到了保证系统同步性能的充分条件。但是,实际系统的控制输入往往受到限制,仍然存在具有混合网络攻击和输入约束的 Markov 跳变神经网络同步控制的难点问题。因此,研究 Markov 跳变神经网络同步控制问题,对于提高系统的安全性和稳定性,以及应对复杂网络环境下的挑战具有不可忽视的重要意义。

另一方面,随着网络结构的日益复杂化和通信

技术的飞速发展,非法黑客行为越来越频繁,网络安全问题的重要性日益凸显<sup>[8]</sup>,通信网络中的数据运输安全问题面临重大挑战。常见的网络攻击主要分为欺骗攻击和拒绝服务(denial of service, DoS)攻击两大类<sup>[9]</sup>。欺骗攻击是通过虚假的信息进行网络访问或数据传输活动;DoS 攻击则是向网站服务器发送大量要求回复的信息,消耗网络带宽或系统资源,导致网站服务器不能正常服务,甚至于瘫痪而停止服务<sup>[10]</sup>。马超等<sup>[11]</sup>研究马尔可夫跳变信息物理系统(cyber physical systems, CPS)在模态依赖 DoS 攻击下的安全控制问题,建立闭环系统在 DoS 攻击下渐近一致有界的充分性条件;黄玲等<sup>[12]</sup>针对非线性网络控制系统存在的 DoS 攻击,设计 1 种具有动态事件触发策略的  $H_\infty$  安全控制器,推导出系统存在安全控制器的条件;王江宁等<sup>[13]</sup>研究触发的网络控制系统安全控制问题,推导出闭环系统以一定概率输入到状态稳定的充分条件。现有研究对于单一 DoS 攻击情况下系统安全控制取得了显著的成果,但较少关注 DoS 攻击中还夹杂着欺骗攻击的情况。现实网络攻击具有多样性和不确定性,研究混合网络攻击具有实际应用价值,这也是本文研究的主要动机。

此外,由于设备的老化或外部环境对设备的影响,执行器在运行过程中会出现意想不到的故障。为使系统在执行器发生故障时仍可稳定运行,引入主动或被动容错机制<sup>[14-18]</sup>。主动容错控制方案通过故障诊断确定故障类型,然而系统每次遇到不同类型的故障都需重新配置控制器;被动容错控制可避免这种情况,通过预先确定系统可能遭遇的故障类型,系统无需实时监控,也无法获取故障信息,且不存在错误的故障信息或遗漏。因此,近年被动容错引起大量关注。Hasan等<sup>[19]</sup>针对刚性航天器在运行过程中存在的外部环境干扰,提出1种固定时间鲁棒被动容错控制方法,使姿态误差轨迹在短时间内收敛到平衡点附近较小的区域,并渐近收敛到平衡点;Zhao等<sup>[20]</sup>针对自动驾驶电动汽车运行过程中执行器失效的问题,设计1种鲁棒被动容错控制方法,以提高自动驾驶电动汽车在不同环境下的性能。除考虑混合网络攻击外,考虑执行器可能遇到失效故障时如何响应是本文研究的另一动机。鉴于此,针对一类混合网络攻击下 Markov 跳变神经网络安全同步容错问题,提出1种确保神经网络主从系统安全容错同步的控制器的设计方法,以期有效保证神经网络主从系统的同步性和安全性。

## 1 问题描述

采用的数学符号说明:  $E\{\cdot\}$  表示数学期望;  $p\{\cdot\}$  表示概率;  $g(\cdot)$  表示非线性函数;  $\mathbf{R}^n$  表示  $n$  维实向量空间;  $\mathbf{A}^\top$  表示矩阵  $\mathbf{A}$  的转置矩阵;  $\mathbf{A} > 0$  表示矩阵  $\mathbf{A}$  是正定的;  $\text{diag}\{\cdot\}$  表示对角矩阵;  $\|\cdot\|$  表示向量的欧式范数;  $*$  表示矩阵中的对称元素;  $\mathbf{R}^{n \times m}$  表示实域  $\mathbf{R}$  上所有  $n \times m$  阶实矩阵集合;  $\text{sym}\{\mathbf{P}\}$  表示  $\mathbf{P} + \mathbf{P}^\top$ ;  $L_2[0, \infty)$  表示区间  $[0, \infty)$  上平方可积向量函数空间。

### 1.1 系统描述

构建的神经网络模型如下:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = -\mathbf{A}_\delta \mathbf{x}(t) + \mathbf{B}_\delta \mathbf{f}(\mathbf{x}(t)) + \mathbf{J}(t) \\ \mathbf{y}(t) = \mathbf{H}_\delta \mathbf{x}(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{x}(t) = [\mathbf{x}_1(t) \ \mathbf{x}_2(t) \ \dots \ \mathbf{x}_n(t)]^\top$ ;  $\mathbf{x}_i(t)$  表示  $t$  时刻第  $i$  个神经元的状态向量;  $\mathbf{A}_\delta = \text{diag}\{c_1, c_2, \dots, c_n\} > 0$ ;  $\mathbf{B}_\delta$  表示神经元之间连接的权重矩阵;  $\mathbf{f}(\mathbf{x}(t)) = [f_1(\mathbf{x}(t)) \ f_2(\mathbf{x}(t)) \ \dots \ f_n(\mathbf{x}(t))]^\top$ ,  $\mathbf{f}(\cdot)$  为神经元的激活函数;  $\mathbf{J}(t) = [\mathbf{J}_1(t) \ \mathbf{J}_2(t) \ \dots \ \mathbf{J}_n(t)]^\top$ , 表示额外的输入量;  $\mathbf{y}(t) \in \mathbf{R}^n$ , 表示输出量;  $\mathbf{H}_\delta$  表示已知且给定维数的矩阵。

假设随机过程  $\{\delta_i\}_{i \geq 0}$  为连续时间均匀马尔可夫过程,  $\delta_i$  在有限状态集合  $Q$  中取值, 其模式转换速率矩阵  $\{\pi_{\alpha q}\}$  可被定义为

$$p\{\delta_{t+\Delta t} = q | \delta_t = \alpha\} = \begin{cases} \pi_{\alpha q} \Delta t + o(\Delta t), & q \neq \alpha \\ 1 + \pi_{\alpha\alpha} \Delta t + o(\Delta t), & q = \alpha \end{cases} \quad (2)$$

其中:  $\Delta t > 0$ ,  $\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left( \frac{o(\Delta t)}{\Delta t} \right) = 0$ , 对于任意的  $q \neq \alpha$ ,  $\pi_{\alpha q} \geq 0$ ,  $\pi_{\alpha\alpha} = -\sum_{q \in Q, q \neq \alpha} \pi_{\alpha q}$  均成立。神经元激活函数  $f_i(\cdot)$  假定为属于 1 个向量空间  $[0, \Omega_i]$ , 且对于每个  $i = 1, 2, \dots, n$ , 激活函数满足下面的约束条件:

$$0 \leq \frac{f_i(\alpha) - f_i(\xi)}{\alpha - \xi} \leq \Omega_i, \quad \alpha \neq \xi \in \mathbf{R} \quad (3)$$

文中, 式 (1) 被视为神经网络的主系统, 相应的子系统描述如下:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}^*(t) = -\mathbf{A}_\delta \mathbf{x}^*(t) + \mathbf{B}_\delta \mathbf{f}(\mathbf{x}^*(t)) + \mathbf{J}(t) + \mathbf{D}_\delta \boldsymbol{\omega}(t) + \mathbf{E}_\delta \mathbf{u}(t) \\ \mathbf{y}^*(t) = \mathbf{H}_\delta \mathbf{x}^*(t) \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $\mathbf{x}^*(t)$  表示对应的状态向量;  $\mathbf{y}^*(t)$  表示实际的输出向量;  $\boldsymbol{\omega}(t) \in \mathbf{R}^{n_\omega}$ , 表示 1 个隶属于区间  $L_2[0, \infty)$  上的系统额外干扰信号;  $\mathbf{u}(t) \in \mathbf{R}^{n_u}$ , 表示待设计的控制输入;  $\mathbf{D}_\delta \in \mathbf{R}^{n_x \times n_\omega}$ ;  $\mathbf{E}_\delta \in \mathbf{R}^{n_x \times n_u}$ , 表示给定的具有适当维数的矩阵。

为了简便, 定义同步误差向量  $\mathbf{e}(t) \triangleq \mathbf{x}^*(t) - \mathbf{x}(t)$ ,  $\alpha \triangleq \delta_i$  以及  $\hat{\mathbf{f}}(\mathbf{e}(t)) = \mathbf{f}(\mathbf{e}(t) + \mathbf{x}(t)) - \mathbf{f}(\mathbf{x}(t))$ , 然后获得同步误差系统 (synchronization error system):

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{e}}(t) = -\mathbf{A}_\alpha \mathbf{e}(t) + \mathbf{B}_\alpha \hat{\mathbf{f}}(\mathbf{e}(t)) + \mathbf{D}_\alpha \boldsymbol{\omega}(t) + \mathbf{E}_\alpha \mathbf{u}(t) \\ \hat{\mathbf{y}}(t) = \mathbf{H}_\alpha \mathbf{e}(t) \end{cases} \quad (5)$$

则式 (5) 的控制输入  $\mathbf{u}(t)$  被设计为

$$\mathbf{u}(t) = \mathbf{K} \mathbf{e}(t) \quad (6)$$

其中  $\mathbf{K} \in \mathbf{R}^{n_u \times n_e}$ , 为待设计的控制器增益, 与待确定的模态无关。

**注 1** 多数同步控制通常只适用于系统的所有状态和模态均可充分访问的假设, 由于网络状态处于不可测的情况下, 为将本文的结论应用到这种情况, 提出 1 种独立于系统模态的控制器设计方法, 与传统的控制方法相比, 提出的控制方法更具现实意义和实用性。

### 1.2 混合网络攻击模型

考虑到通信网络中会发生随机攻击, 建立 1 种结合随机欺骗攻击和 DoS 攻击的混合网络攻击模型。欺骗攻击通过虚假的数据破坏系统的控制性能, 当系统发生欺骗攻击时, 式 (6) 写为

$$\mathbf{u}(t) = \mathbf{K} [\boldsymbol{\beta}_c(t) \mathbf{g}(\mathbf{e}(t)) + (1 - \boldsymbol{\beta}_c(t)) \mathbf{e}(t)] \quad (7)$$

与此同时, 当发生 DoS 攻击时, 直接阻断数据传输, 式 (7) 被重写为

$$\mathbf{u}(t) = \mathbf{K} \boldsymbol{\beta}_d(t) [\boldsymbol{\beta}_c(t) \mathbf{g}(\mathbf{e}(t)) + (1 - \boldsymbol{\beta}_c(t)) \mathbf{e}(t)] \quad (8)$$

式中:  $\boldsymbol{\beta}_c(t)$  和  $\boldsymbol{\beta}_d(t) \in \{0, 1\}$  分别描述欺骗攻击和 DoS

攻击发生状态, 假定两者相互独立。当 DoS 攻击发生时, 即  $\beta_d(t) = 0$ , 无论欺骗攻击是否发生, 通信网络通道都是阻塞的, 故  $u(t) = 0$ ; 否则, 信道是可以正常通信的, 但可能发生欺骗攻击; 当欺骗攻击发生时, 即  $\beta_c(t) = 1$ , 则  $u(t) = K g(e(t))$ ; 当  $\beta_d(t) = 1, \beta_c(t) = 0$ , 表示没有攻击发生, 则  $u(t) = K e(t)$ 。

**注 2** 值得注意的是, 欺骗攻击的信号往往无法检测到, 因为他们是攻击者有目的地发送的。假设欺骗攻击者可完全获得同步误差系统的完整信息, 通过采用 1 个非线性函数  $g(\cdot)$  来描述欺骗攻击信号。成功的网络攻击具有随机性和任意性, 故进一步假设 DoS 攻击与欺骗攻击是由 2 组满足伯努利分布的独立随机变量来保证随机性, 如  $E\{\beta_c(t)\} = p\{\beta_c(t) = 1\} = \bar{\beta}_c, E\{\beta_d(t)\} = p\{\beta_d(t) = 1\} = \bar{\beta}_d$ , 他们彼此是相互独立的。

### 1.3 容错控制器

在系统运行过程中, 控制器经常会出现故障, 可通过容错控制机制来解决。当控制器发生故障时, 采用以下模型

$$u_f(t) = F u(t) \quad (9)$$

式中:  $u_f(t)$  表示控制器发出的信号;  $F = \text{diag}\{f^1, f^2, \dots, f^n\}$ , 表示执行器容错矩阵函数, 并且满足关系式:

$$0 \leq f_-^i \leq f^i \leq f_+^i \leq 1, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

其中  $f_-^i$  和  $f_+^i$  是已知的常数, 具体形式如下

$$f_0^i = \frac{f_-^i + f_+^i}{2}, \quad l^i = \frac{f^i - f_0^i}{f_0^i}, \quad m^i = \frac{f_+^i - f^i}{f_+^i + f^i} \quad (10)$$

由式 (10) 可知

$$F = F_0(I + L), |L| \leq M \leq I \quad (11)$$

其中:  $F_0 = \text{diag}\{f_0^1, f_0^2, \dots, f_0^n\}; |L| = \text{diag}\{|l^1|, |l^2|, \dots, |l^n|\}$ 。

考虑到上述所有因素的影响, 综合式 (7) 和 (8) 重写式 (5) 得到同步误差系统:

$$\begin{cases} \dot{e}(t) = -A_\alpha e(t) + B_\alpha \hat{f}(e(t)) + D_\alpha \omega(t) + \\ E_\alpha F_{0\alpha}(I + L_\alpha) K \beta_d(t) [\beta_c(t) g(e(t)) + \\ (1 - \beta_c(t)) e(t)] \\ \hat{y}(t) = H_\alpha e(t) \end{cases} \quad (12)$$

此外, 文中期望的  $H_\infty$  性能指标参数用  $\gamma$  表示。为后续需要, 给出本文所需的引理及假设。

**假设 1<sup>[21]</sup>** 引入满足以下条件的非线性函数  $g(\cdot)$  约束欺骗攻击:

$$\|g(e(t))\|^2 \leq \|G e(t)\|^2 \quad (13)$$

其中  $G$  是 1 个表示非线性上界的常数矩阵。

**假设 2<sup>[21]</sup>** 对于任意矩阵, 下面的不等式总是成立的:

$$0 \leq 2e^T(t) D \Gamma \hat{f}(e(t)) - 2\hat{f}(e(t))^T \Gamma \hat{f}(e(t)) \quad (14)$$

其中:  $D = \text{diag}\{D_1, D_2, \dots, D_n\}; \Gamma = \text{diag}\{\Gamma_1, \Gamma_2, \dots, \Gamma_n\}$ 。

**引理 1(Schur 补引理)<sup>[23]</sup>** 对于给定的对称矩阵

$$S = S^T = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{12}^T & S_{22} \end{bmatrix}, \text{ 其中 } S_{11} \in \mathbf{R}^{r \times r}, \text{ 下面 3 个条件是等价的: } S < 0; S_{11} < 0, S_{22} - S_{12}^T S_{11}^{-1} S_{12} < 0; S_{22} < 0, S_{11} - S_{12} S_{22}^{-1} S_{12}^T < 0。$$

**引理 2<sup>[24]</sup>** 对于给定的具有适当维数的实矩阵  $A$  和  $B$ , 如果存在 1 个正的实标量  $\varepsilon$ , 则满足以下不等式

$$\text{sym}\{AB^T\} \leq \varepsilon AA^T + \varepsilon^{-1} BB^T \quad (15)$$

**引理 3<sup>[25]</sup>** 对于给定的具有适当维数的实矩阵  $Q_n$ , 如果存在 1 个可逆的矩阵  $K$ , 则满足以下不等式

$$-Q_n^T K^{-1} Q_n \leq K - Q_n - Q_n^T \quad (16)$$

**定义 1<sup>[26]</sup>** 如果下面条件 (式 (17)) 能够满足, 那么同步误差系统 (12) 在  $\omega(t) = 0$  的条件下是稳定的。

$$\lim_{t_p \rightarrow \infty} E \left\{ \int_0^{t_p} \|e(t)\|^2 dt \right\} < \infty \quad (17)$$

**定义 2<sup>[27-29]</sup>** 如果下面的 2 个条件同时满足, 那么同步误差系统 (12) 是随机均方稳定的, 并且满足 1 个规定的  $H_\infty$  性能指标  $\gamma$ 。

1) 根据定义 1, 同步误差系统 (12) 是稳定的;

2) 零初始条件下, 存在 1 个标量  $\gamma > 0$  使式 (18) 对  $\eta \geq 0$  以及任意非零的  $\omega(t) \in L_2[0, \infty)$  恒成立。

$$E \left\{ \int_0^\eta \hat{y}^T(t) \hat{y}(t) dt \right\} \leq \gamma^2 E \left\{ \int_0^\eta \omega^T(t) \omega(t) dt \right\} \quad (18)$$

## 2 主要结果

在混合网络攻击下, 为使神经网络主从系统同步, 设计满足条件的控制器, 主要结果如下:

**定理 1** 对于给定矩阵  $G$ , 对角矩阵  $\hat{\xi}_-, \hat{\xi}_+$ , 任意对角矩阵  $F_v, v > 0 \in \mathbf{R}^{n_r \times n_r}$  以及矩阵  $F_{0\alpha} > 0$  和标量  $\gamma > 0, \bar{\beta}_c > 0, \bar{\beta}_d > 0$ , 如果存在正定对称矩阵  $P_\alpha \in \mathbf{R}^{n_r \times n_r} > 0$ , 任意合适维数的自由权矩阵  $\Lambda$ , 使得下面的条件成立:

$$\psi = \begin{bmatrix} \psi_{11} & \psi_{12} & \psi_{13} & \psi_{14} & \Lambda^T D_\alpha \\ * & -2\Lambda^T & \Lambda^T B_\alpha & \psi_{24} & \Lambda^T D_\alpha \\ * & * & -F_v & 0 & 0 \\ * & * & * & -I & 0 \\ * & * & * & * & -\gamma^2 I \end{bmatrix} < 0 \quad (19)$$

其中:

$$\begin{aligned} \psi_{11} &= \sum_{q=1}^{\theta} \pi_{\alpha q} P_q - F_v \hat{\xi}_- - 2\Lambda^T A_\alpha + G^T G + \\ & 2\Lambda^T E_\alpha F_{0\alpha} (I + L_\alpha) K \bar{\beta}_d (1 - \bar{\beta}_c) + H_\alpha^T H_\alpha; \\ \psi_{12} &= P_\alpha - \Lambda^T - A_\alpha^T \Lambda + (1 - \bar{\beta}_c) \bar{\beta}_d^T K^T (I + L_\alpha)^T F_{0\alpha}^T E_\alpha^T \Lambda; \\ \psi_{13} &= F_v \hat{\xi}_+ + \Lambda^T B_\alpha; \quad \psi_{14} = \Lambda^T E_\alpha F_{0\alpha} (I + L_\alpha) K \bar{\beta}_d \bar{\beta}_c; \\ \psi_{24} &= \Lambda^T E_\alpha F_{0\alpha} (I + L_\alpha) K \bar{\beta}_d \bar{\beta}_c; \\ \hat{\xi}_- &= \text{diag}\{\xi_1^-, \xi_2^-, \dots, \xi_n^-\}; \\ \hat{\xi}_+ &= \text{diag}\left\{\frac{\xi_1^+ + \xi_1^-}{2}, \frac{\xi_2^+ + \xi_2^-}{2}, \dots, \frac{\xi_n^+ + \xi_n^-}{2}\right\}. \end{aligned}$$

则同步误差系统 (12) 是随机稳定的并且满足 1 个规定的  $H_\infty$  性能指标  $\gamma$ 。

**证明** 针对系统 (12) 考虑如下 Lyapunov 函数:

$$E\{v(t, \alpha)\} = E\{e^T(t)P_\alpha e(t)\} \quad (20)$$

沿着误差系统 (11) 对  $v(t, \alpha)$  应用无穷小算子<sup>[23]</sup>, 可得到

$$E\{\mathcal{L}v(t, \alpha)\} = E\left\{\text{sym}\{e^T(t)P_\alpha \dot{e}(t)\} + \sum_{q=1}^{\theta} \pi_{\alpha q} e^T(t)P_q e(t)\right\} \quad (21)$$

从式 (3) 和假设 1 中, 可得到以下条件:

$$\mathfrak{N}_1 = \begin{bmatrix} e(t) \\ \hat{f}(e(t)) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} -F_v \hat{\xi}_- & F_v \hat{\xi}_+ \\ * & -F_v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e(t) \\ \hat{f}(e(t)) \end{bmatrix} \geq 0 \quad (22)$$

$$\mathfrak{N}_2 = e^T(t)G^T G e(t) - g^T(e(t))g(e(t)) \geq 0 \quad (23)$$

其中  $F_v$  为 1 个具有适当维数的对角正定矩阵。此外, 对于任意合适维数的矩阵  $A_\alpha$ , 下面的等式显然恒成立:

$$0 = E\left\{\text{sym}\{\dot{e}^T(t) + e^T(t)\}A^T[-\dot{e}(t) - A_\alpha e(t) + B_\alpha \hat{f}(e(t)) + D_\alpha \omega(t) + E_\alpha F_{0\alpha}(I + L_\alpha)K\beta_d(t)]\beta_c(t)g(e(t)) + (1 - \beta_c(t))e(t)\right\} \quad (24)$$

然后, 由式 (21)~(23) 及式 (24) 的右半部分, 可得到:

$$E\{\mathcal{L}v(t, \alpha) - \gamma^2 \omega^T(t)\omega(t) + \hat{y}^T(t)\hat{y}(t)\} \leq E\{\lambda^T(t)\psi\lambda(t)\} \quad (25)$$

其中  $\lambda(t) = \text{col}\{e(t), \dot{e}(t), \hat{f}(e(t)), g(e(t)), \omega(t)\}$ 。如果满足条件 (19), 在零初始条件下, 可易得出:

$$E\left\{\int_0^{\eta} \hat{y}^T(t)\hat{y}(t)dt\right\} \leq \gamma^2 E\left\{\int_0^{\eta} \omega^T(t)\omega(t)dt\right\} \quad (26)$$

当  $\omega(t) \equiv 0$ , 有  $\mathcal{L}v(t, \alpha) \leq -\ell I$ ,  $\ell$  是 1 个很小的正数。可以得到:

$$\lim_{t_p \rightarrow \infty} E\left\{\int_0^{t_p} \|e(t)\|^2 dt\right\} < \infty \quad (27)$$

由定义 1 可知, 同步误差系统 (12) 在  $\omega(t) = 0$  的条件下是随机均方稳定的; 又由定义 2 可知, 同步误差系统 (12) 不仅是随机均方稳定的而且满足 1 个规定的  $H_\infty$  性能指标  $\gamma$ 。至此, 证明结束。

定理 1 证明完毕, 可发现在式 (19) 中存在耦合项  $L$  和  $K$ , 由于 MATLAB 中的 LMI 工具箱无法处理耦合变量, 需对式 (19) 中的耦合项进行解耦处理, 这就需要后续的定理 2。

**定理 2** 对于给定矩阵  $G$ , 对角矩阵  $\hat{\xi}_-, \hat{\xi}_+$ , 任意对角矩阵  $\bar{F}_v, > 0 \in \mathbf{R}^{n_\sigma \times n_\sigma}$  以及矩阵  $F_{0\alpha} > 0$  和标量  $\Omega > 0, \gamma > 0, \bar{\beta}_c > 0, \bar{\beta}_d > 0, \varepsilon > 0$ , 如果存在正定对称矩阵  $\bar{P}_\alpha \in \mathbf{R}^{n_\sigma \times n_\sigma} > 0, \bar{K}, \lambda$ , 使得下面的条件成立:

$$\Psi = \begin{bmatrix} \Psi_{11} & \Psi_{12} \\ * & \Psi_{22} \end{bmatrix} < 0 \quad (28)$$

这里:

$$\Psi_{11} \triangleq \begin{bmatrix} \Pi_{11} & \Pi_{12} & \Pi_{13} & \Pi_{14} & \Omega D_\alpha \\ * & -2\Omega\lambda & \Omega B_\alpha \lambda & \Pi_{24} & \Omega D_\alpha \\ * & * & -\bar{F}_v & 0 & 0 \\ * & * & * & I - 2\lambda & 0 \\ * & * & * & * & -\gamma^2 I \end{bmatrix},$$

$$\Psi_{12} \triangleq \begin{bmatrix} \Pi_{16} & \Pi_{17} & \lambda^T G^T & \lambda^T H_\alpha^T \\ \Pi_{26} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \Pi_{47} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\Psi_{22} \triangleq \text{diag}\{-\varepsilon I, -\varepsilon I, -I, -I\}$$

其中:

$$\Pi_{11} = \sum_{q=1}^{\theta} \pi_{\alpha q} \bar{P}_q - \bar{F}_v \hat{\xi}_- - 2\Omega A_\alpha \lambda + 2\bar{\beta}_d(1 - \bar{\beta}_c)\Omega E_\alpha F_{0\alpha} \bar{K};$$

$$\Pi_{12} = \bar{P}_\alpha - \Omega\lambda - \lambda^T A_\alpha^T \Omega + \bar{\beta}_d(1 - \bar{\beta}_c)\bar{K}^T F_{0\alpha}^T E_\alpha^T \Omega;$$

$$\Pi_{13} = \bar{F}_v \hat{\xi}_+ + \Omega B_\alpha \lambda; \quad \Pi_{14} = \Pi_{24} = \bar{\beta}_d \bar{\beta}_c \Omega E_\alpha F_{0\alpha} \bar{K};$$

$$\Pi_{16} = \Pi_{26} = \varepsilon \Omega E_\alpha F_{0\alpha}; \quad \Pi_{17} = \bar{\beta}_d(1 - \bar{\beta}_c)\bar{K}^T M_\alpha^T;$$

$$\Pi_{47} = \bar{\beta}_d \bar{\beta}_c \bar{K}^T M_\alpha^T.$$

这样, 系统 (12) 对应的轨迹渐进收敛, 即神经网络主系统 (1) 和子系统 (4) 是渐进同步的, 且控制器增益可由  $K = \bar{K}\lambda^{-1}$  求出。

**证明** 定义变量  $\bar{K} = K\lambda, \bar{F}_v = \lambda^T F_v \lambda, \bar{P}_\alpha = \lambda^T P_\alpha \lambda$  及对角矩阵  $A = \text{diag}\{\lambda, \lambda, \lambda, \lambda, I\}$ , 易证明如果将式 (19) 分别左乘  $A^T$  和右乘  $A$  以及利用不等式  $-\lambda^T I \lambda \leq I - 2\lambda$ , 可进一步得到:

$$\begin{bmatrix} \Pi_{11}^\alpha & \Pi_{12} & \Pi_{13} & \Pi_{14} & \Omega D_\alpha \\ * & -2\Omega\lambda & \Omega B_\alpha \lambda & \Pi_{24} & \Omega D_\alpha \\ * & * & -\bar{F}_v & 0 & 0 \\ * & * & * & I - 2\lambda & 0 \\ * & * & * & * & -\gamma^2 I \end{bmatrix} + \quad (29)$$

$$UL_\alpha N^T + NL_\alpha^T U^T < 0$$

其中:

$$\Pi_{11}^\alpha \triangleq \Pi_{11} + \lambda^T G^T G \lambda + \lambda^T H_\alpha^T H_\alpha \lambda$$

$$U = [\Omega F_{0\alpha}^T E_\alpha^T \quad \Omega F_{0\alpha}^T E_\alpha^T \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T$$

$$N = [\bar{\beta}_d(1 - \bar{\beta}_c)\bar{K} \quad 0 \quad 0 \quad \bar{\beta}_d \bar{\beta}_c \bar{K} \quad 0]^T$$

另外, 利用引理 2, 可推导出

$$UL_\alpha N^T + NL_\alpha^T U^T \leq \varepsilon U U^T + \varepsilon^{-1} N M_\alpha^T M_\alpha N^T \quad (30)$$

**注 3** 值得注意的是, 利用同余变换的方法解决耦合, 将控制器增益  $K$  与容错控制器中的未知项  $L$  进行分离, 且利用公式  $L^T L = \|L\|^2 \leq \|M\|^2 = M^T M$  处理未知项  $L$ , 控制器增益可由  $K = \bar{K}\lambda^{-1}$  求出。最后, 对式 (30) 运用引理 1, 得到式 (28)。至此, 完成证明。

### 3 数值仿真

通过 1 个数值例子验证定理 2 的可行性。选择

$Q = \{1, 2\}$  为 Markov 过程的状态空间, 设双模态转移矩阵概率 =  $\begin{bmatrix} -0.85 & 0.85 \\ 0.6 & -0.6 \end{bmatrix}$ 。其中, Markov 过程如图 1。

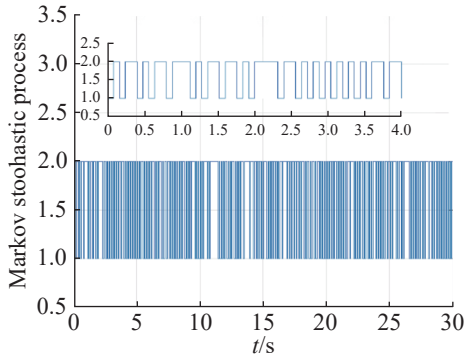


图1 马尔可夫随机过程

Fig. 1 Markov stochastic process

考虑到 Markov 跳变神经网络受到随机欺骗攻击和 DoS 攻击的混合网络攻击, 取  $\bar{\beta}_d = 0.5, \bar{\beta}_c = 0.8$ 。神经网络的激活函数  $\hat{f}(e(t)) = 0.5(|e(t) + 1| - |e(t) - 1|)$ , 外部输入取  $J(t) = 0.15 \sin t$ , 非线性激活函数为  $g(e(t)) = -3 \tanh(e(t))$ , 绘制 DoS 攻击序列和欺骗攻击序列, 即  $\bar{\beta}_d = 0.5$  的 DoS 攻击序列和  $\bar{\beta}_c = 0.8$  的欺骗攻击序列, 如图 2, 3。当  $\bar{\beta}_d = 0.5$  时, 不同欺骗攻击概率  $\bar{\beta}_c$  下  $\gamma$  的最小允许值如表 1。

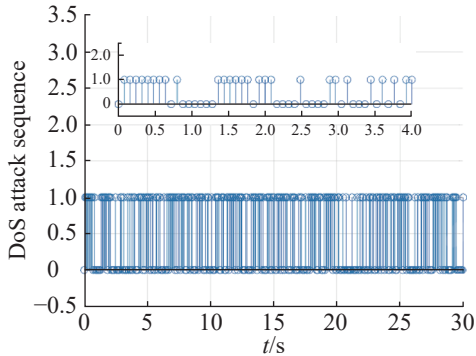


图2 DoS 攻击序列

Fig. 2 DoS attack sequence

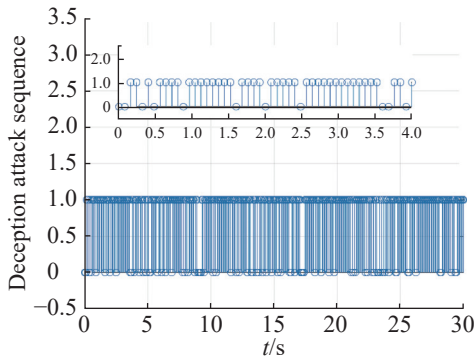


图3 欺骗攻击序列

Fig. 3 Deception attack sequence

图 1 表明: 随着时间的变化, Markov 跳跃信号也会相应切换。图 2, 3 表明: 发生 DoS 攻击和欺骗

攻击时且随着时间的变化, 相应的 DoS 攻击或欺骗攻击是否发生。更进一步, 由表 1 可知: 在 DoS 攻击概率  $\bar{\beta}_d = 0.5$  固定的情况下, 欺骗攻击概率  $\bar{\beta}_c$  越大, 性能指标  $\gamma$  的最小允许值也越大, 说明欺骗攻击发生的概率对系统的性能水平具有重要影响。值得注意的是,  $\gamma_{\min}$  表示干扰的衰减能力。因此, 研究  $\bar{\beta}_c$  和  $\gamma$  之间的关系是合理的, 攻击越频繁, 系统的控制性能越差。

表 1 当  $\bar{\beta}_d = 0.5$  时, 不同欺骗攻击概率  $\bar{\beta}_c$  下  $\gamma$  的最小允许值  
Tab. 1 Minimum allowable value of  $\gamma$  under different probabilities of deception attack  $\bar{\beta}_c$  with  $\bar{\beta}_d = 0.5$

$\bar{\beta}_c$	0.1	0.4	0.5	0.7	1.0
$\gamma_{\min}$	0.070 0	0.093 4	0.102 1	0.117 0	0.125 8

其他参数如下:

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0.22 & 0 & 0 \\ 0 & 0.50 & 0 \\ 0 & 0 & 0.28 \end{bmatrix}$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} -0.50 & -0.20 & -0.30 \\ -0.30 & -0.45 & -0.10 \\ -0.40 & -0.10 & -0.65 \end{bmatrix}$$

$$D_1 = \begin{bmatrix} 0.10 \\ 0.05 \\ 0.10 \end{bmatrix}$$

$$E_1 = \begin{bmatrix} 0.20 & 0 & 0 \\ 0 & 0.30 & 0 \\ 0 & 0 & 0.20 \end{bmatrix}, H_1 = \begin{bmatrix} 0.40 & 0 & 0 \\ 0 & 0.40 & 0 \\ 0 & 0 & 0.30 \end{bmatrix}$$

$$F_{01} = \text{diag}\{0.25, 0.30, 0.25\}, M_1 = \text{diag}\{0.60, 1/3, 1/7\}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} 0.16 & 0 & 0 \\ 0 & 0.30 & 0 \\ 0 & 0 & 0.26 \end{bmatrix}$$

$$B_2 = \begin{bmatrix} -0.60 & -0.20 & -0.10 \\ -0.60 & -0.45 & -0.40 \\ -0.20 & -0.30 & -0.35 \end{bmatrix}$$

$$D_2 = \begin{bmatrix} 0.15 \\ 0.05 \\ 0.10 \end{bmatrix}$$

$$E_2 = \begin{bmatrix} 0.30 & 0 & 0 \\ 0 & 0.20 & 0 \\ 0 & 0 & 0.20 \end{bmatrix}$$

$$H_2 = \begin{bmatrix} 0.30 & 0 & 0 \\ 0 & 0.30 & 0 \\ 0 & 0 & 0.40 \end{bmatrix}$$

$$F_{02} = \text{diag}\{0.20, 0.30, 0.40\}, M_2 = \text{diag}\{0.50, 2/3, 0.50\}$$

$$\hat{\xi}_- = \text{diag}\{0, 0, 0\}, \hat{\xi}_+ = \text{diag}\{1.50, 1.50, 1.50\}$$

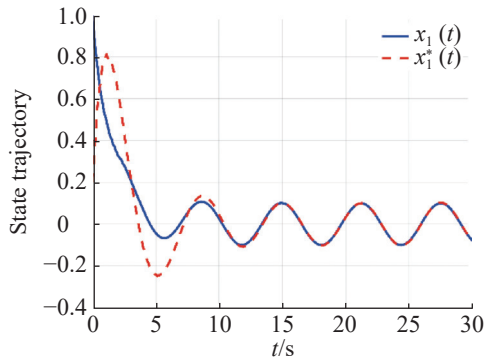
根据定理 2, 对于性能指标  $\gamma = 5, \Omega = 0.8, \omega(t) = 10.5 \cos(\frac{\pi}{4}t)e^{-0.4t}$ , 使用 LMI 工具箱计算得到控制器

增益:

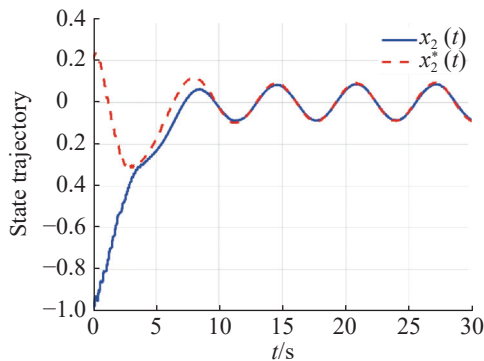
$$K = \begin{bmatrix} -0.5383 & 0.1341 & 0.0564 \\ 0.2191 & -0.4797 & 0.2259 \\ -0.0765 & 0.0900 & -1.2987 \end{bmatrix}$$

利用得到的增益 $K$ 绘制系统仿真图,结果如

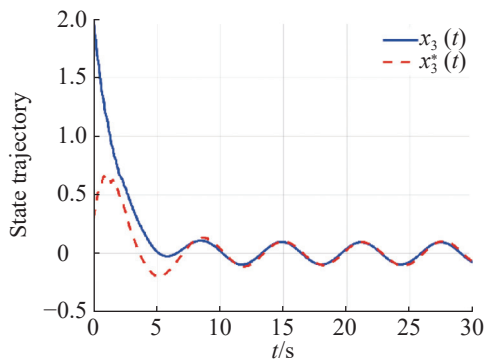
图 4~6。



(a) 状态轨迹 1



(b) 状态轨迹 2



(c) 状态轨迹 3

图4 主从神经网络系统的状态轨迹

Fig. 4 State trajectory of master and slave NNs

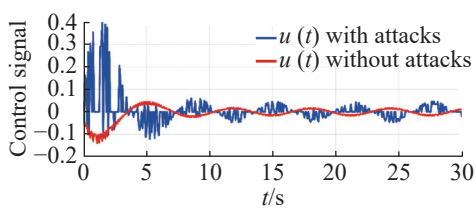


图5 控制信号

Fig. 5 Control signal

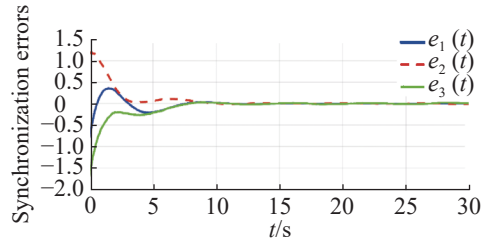


图6 有容错控制系统的状态轨迹

Fig. 6 State trajectory with fault-tolerant control system

此外,从系统(12)中去除容错控制,但允许执行器故障,绘制没有容错控制系统的状态轨迹,如图 7。

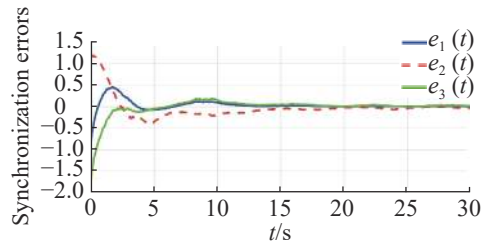


图7 没有容错控制系统的状态轨迹

Fig. 7 State trajectory without fault-tolerant control system

从图 4 可看出:在应用设计的控制器时,不同状态变量的状态轨迹均趋向同步。从图 5, 6 可看出:神经网络系统在受到混合网络攻击后,其控制信号开始产生波动,但是随着时间的延长,最终还是趋向收敛。表明在控制器的作用下,神经网络系统在一定程度上能够抵抗混合网络攻击;随着时间的延长,在混合网络攻击下,同步误差系统的同步误差信号最终收敛,即神经网络主从系统达到同步。对比图 6, 7 可看出:当系统去除容错控制后,系统的状态轨迹出现起伏,并不能很好地趋向同步,表明设计的控制器在一定程度上可抵抗执行器的故障。因此,本文设计的控制器能够确保神经网络主从系统的安全性和同步性。

## 4 结论

针对一类混合网络攻击下 Markov 跳变神经网络的安全容错同步控制问题,提出 1 种确保神经网络主从系统安全容错同步控制器的设计方法。借助 2 组满足伯努利分布的独立随机变量,建立 1 种结合随机欺骗攻击和 DoS 攻击的混合网络攻击模型;考虑执行器可能发生的失效故障情况,设计 1 种容错控制器;利用李雅普诺夫函数和线性矩阵不等式分析方法以及特殊的积分不等式放缩技术,得到确保闭环系统满足规定  $H_\infty$  性能指标的充分条件,同

时设计使主从系统同步的控制器。最后,通过1个数值算例验证本文提出方法的有效性。结果表明:当执行器故障失效60%~80%时,以及遭受欺骗攻击概率为80%和DoS攻击概率为50%的混合网络攻击时,本文提出的方法仍然能够实现神经网络主从系统的安全性和同步性。在目前的网络环境下,由于带宽资源有限,过多的数据传输会导致传输通道堵塞,而事件触发控制机制可有效缓解传输通道堵塞,故结合事件触发控制策略的混合网络攻击下Markov跳变神经网络安全容错同步控制问题是下一步研究的方向。

#### 参考文献:

- [1] DONG Y, SONG Y, WEI G. Efficient model-predictive control for networked interval type-2 T-S fuzzy system with stochastic communication protocol[J]. *IEEE Trans Fuzzy Syst*, 2021, 29(2):286–297.
- [2] 张仁磊, 董东兵, 陈巧玉, 等. 事件触发下带有Lévy噪声的神经网络指数同步[J/OL]. *控制工程*, [2023–12–08]. <https://doi.org/10.14107/j.cnki.kzgc.20220359>.
- [3] 邓伟伟, 高燕, 王春媛. 基于事件触发控制的中立型神经网络簇同步[J/OL]. *控制工程*, [2023–12–08]. <https://doi.org/10.14107/j.cnki.kzgc.20210921>.
- [4] 钱学明. 带马尔可夫跳变和脉冲的时滞耦合神经网络的同步[J]. *扬州大学学报(自然科学版)*, 2011, 14(1): 21–26.
- [5] 董海玲, 唐娟. 带马尔可夫跳和可变迟滞的非线性耦合神经网络同步问题[J]. *应用概率统计*, 2022, 38(6): 836–846.
- [6] 田佳萍, 谢立典, 王春柱, 等. 基于马尔可夫跳变神经网络的采样同步控制研究[J]. *现代计算机*, 2021(2):8–13.
- [7] ZHANG L, ZHU Y, SHI P, et al. Resilient asynchronous  $H_\infty$  filtering for Markov jump neural networks with unideal measurements and multiplicative noises[J]. *IEEE Trans Cybern*, 2015, 45(12):2840–2852.
- [8] MOUSAVINEJAD E, YANG F, HAN Q L, et al. A novel cyber attack detection method in network control systems[J]. *IEEE Trans Cybern*, 2018, 48(11):3254–3264.
- [9] 祝超群, 张永川. 拒绝服务攻击下网络化控制系统的安全研究[J]. *控制工程*, 2021, 28(10):2070–2077.
- [10] LIU J, GU Y, ZHA L, et al. Event-triggered  $H_\infty$  load frequency control for multiarea power systems under hybrid cyber attacks[J]. *IEEE Trans Syst Man Cybern*, 2019, 49(8):1665–1678.
- [11] 马超, 吴伟. 马尔可夫信息物理系统(CPS)拒绝服务攻击安全控制[J]. *软件学报*, 2020, 31(6):1672–1680.
- [12] 黄玲, 孙晓宇, 蔺小娜, 等. 具有DoS攻击非线性网络的动态事件触发控制[J]. *控制理论与应用*, 2022, 39(6): 1033–1042.
- [13] 王江宁, 严怀成, 李郅辰, 等. 具有DoS攻击的网络控制系统事件触发安全控制[J]. *南京信息工程大学学报(自然科学版)*, 2018, 10(6):716–722.
- [14] FU L, SHI J, LI F. Passive fault-tolerant control for NCSs using event-triggered approach[J]. *IEEE Access*, 2023(11): 3653–3661.
- [15] WANG B, JAHANSHAHI H, VOLOS C, et al. A new RBF neural network-based fault-tolerant active control for fractional time-delayed systems[J]. *Electronics*, 2021, 10(12):1501.
- [16] LI X J, YANG G H. Neural-network-based adaptive decentral-ized fault-tolerant control for a class of interconnected nonlinear systems[J]. *IEEE Trans Neural Netw Learn Syst*, 2018, 29(1):144–155.
- [17] ZHANG R, QIAO J, LI T, et al. Robust fault-tolerant control for flexible spacecraft against partial actuator failures[J]. *Nonlinear Dyn*, 2014, 76:1753–1760.
- [18] HASAN M N, HARIS M, QIN S. Flexible spacecraft's active fault-tolerant and anti-unwinding attitude control with vibration suppression[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2022, 122:107397.
- [19] HASAN M N, HARIS M, PIRZADA S J H, et al. Simple robust fixed-time fault-tolerant attitude control for a class of rigid spacecrafts[C]// *International Symposium on Recent Advances in Electrical Engineering & Computer Sciences (RAEE & CS)*. Islamabad, Pakistan: IEEE, 2020:1–6.
- [20] ZHAO J, WANG X, LIANG Z, et al. Adaptive event-based robust passive fault tolerant control for nonlinear lateral stability of autonomous electric vehicles with asynchronous constraints[J]. *ISA Trans*, 2022, 127:310–323.
- [21] LIU J, GU Y, XIE X, et al. Hybrid-driven-based Hoo control for networked cascade control systems with actuator saturations and stochastic cyber attacks[J]. *IEEE Trans Syst Man, Cybern*, 2019, 49(12):2452–2463.
- [22] YANG X, SONG Q, CAO J, et al. Synchronization of coupled Markovian reaction-diffusion neural networks with

- proportional delays via quantized control[J]. *IEEE Trans Neural Netw Learn Syst*, 2019, 30(3):951–958.
- [23] 钟尔杰, 黄廷祝. 一类舒尔补矩阵的条件数分析[J]. *数值计算与计算机应用*, 2008(2):89–95.
- [24] LI J, MA Y, FU L. Fault-tolerant passive synchronization for complex dynamical networks with markovian jump based on sampled-data control[J]. *Neurocomputing*, 2019, 350:20–32.
- [25] WANG X, PARK J H, YANG H L, et al. An improved impulsive control approach for cluster synchronization of complex networks with parameter mismatches[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2021, 51(4):2561–2570.
- [26] CHEN W H, XU J X, GUAN Z H. Guaranteed cost control for uncertain Markovian jump systems with mode-dependent time-delays[J]. *IEEE Trans Autom Control*, 2003, 48(12):2270–2277.
- [27] SU L, YE D. Mixed  $H_\infty$  and passive event-triggered reliable control for T–S fuzzy Markov jump systems[J]. *Neurocomputing*, 2018, 281:96–105.
- [28] WANG J, HUANG Z, WU Z, et al. Extended dissipative control for singularly perturbed PDT switched systems and its application[J]. *IEEE Trans Circuits Syst I*, 2020, 67(12):5281–5289.
- [29] QI W, GAO W L. control for positive Markovian jump systems with partly known transition rates[J]. *Int J Control Autom*, 2017, 15(1):274–280.

责任编辑:何莉