

文章编号 1672-6634(2024)04-0043-14

DOI 10.19728/j.issn1672-6634.2023120013

欺骗攻击下奇异跳变系统状态感知事件触发 H_{∞} -脉冲混杂反馈控制

逢钰婧, 吴一凡, 朱静娟, 孟亚楠, 庄光明

(聊城大学 数学科学学院, 山东 聊城 252059)

摘要 本文研究了在欺骗攻击下奇异马尔可夫跳变系统的状态感知事件触发 H_{∞} -脉冲混杂反馈控制问题。为了进一步权衡控制性能和通信效率,提出了一种可根据当前系统状态自适应地调整事件触发阈值的基于周期采样的模态相关状态感知事件触发机制。基于所提出的事件触发机制,建立了一种模态相关的脉冲混杂反馈控制器。通过构造脉冲时间相关和马尔可夫跳变模态相关的 Lyapunov-Krasovskii(L-K)泛函并结合奇异值分解技术,获得了奇异马尔可夫跳变系统在欺骗攻击下的 H_{∞} 随机容许性准则。在线性矩阵不等式框架下实现了状态感知事件触发器和 H_{∞} -脉冲混杂反馈控制器协同设计。直流电机驱动负载的仿真实例验证了本文方法的有效性。

关键词 奇异马尔可夫跳变系统;欺骗攻击;状态感知事件触发机制; H_{∞} -脉冲混杂反馈控制

中图分类号 O231

文献标志码 A

开放科学(资源服务)标识码(OSID)



State-Sensitive Event-Triggered H_{∞} -Impulse Hybrid Feedback Control for Singular Jump Systems under Spoofing Attacks

PANG Yujing, WU Yifan, ZHU Jingjuan,
MENG Yanan, ZHUANG Guangming

(School of Mathematical Sciences, Liaocheng University, Liaocheng 252059, China)

Abstract This paper investigates state-sensitive event-triggered H_{∞} -impulse hybrid feedback control for singular Markovian jump systems under spoofing attacks. In order to further trade-off between control performance and communication efficiency, a modal-dependent state-sensitive event-triggered mechanism, which can adjust the event triggering threshold in real time according to the current system state, is proposed on the basis of periodic sampling. And based on the proposed event-triggered mechanism, a mode-

收稿日期: 2023-12-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(62173174, 61773191); 山东省高校青创科技支持计划项目(2019LJ1010); 山东省研究生教育优质课程项目(SDYKC20185); 聊城大学校级教改面上项目(G2023023)资助

通信作者: 庄光明, 男, 汉族, 博士, 教授, 山东省自然科学基金优秀青年基金获得者, 研究方向: 奇异混杂系统分析与控制, E-mail: zgms@126.com.

dependent impulse hybrid feedback controller is established. The H_∞ stochastic admissibility of singular Markovian jump systems under spoofing attacks is realized by constructing an impulse time-dependent and Markovian jump mode-dependent Lyapunov-Krasovskii (L-K) functional and exploiting singular value decomposition technique. The state-sensitive event-triggered mechanism and H_∞ -impulse hybrid feedback controller co-design are realized via a set of linear matrix inequalities (LMIs). The simulation instance of DC motor driven load confirms the validity of the suggested methodology.

Key words singular Markovian jump systems; spoofing attacks; state-sensitive event-triggered mechanism; H_∞ -impulse hybrid feedback control

0 引言

近几十年来,奇异系统(也称广义系统,隐式系统,描述系统)由于其广泛的适用度而备受学者们的关注^[1]。相比于仅有动态约束的正则系统,奇异系统同时具有动态约束和静态约束,能够更好地描述真实系统^[2]。目前,奇异系统已被普遍应用于电力系统、决策系统、计算生物学、机器人等多个领域^[3]。然而,由于奇异系统需要同时考虑稳定性、正则性和无脉冲性(或因果性),因此奇异系统的研究比正则系统的研究更具挑战性^[4]。一些适用于正则系统的理论已被很好地推广到奇异系统中,如容错控制、鲁棒控制、滑模控制等^[5]。此外,在实际应用中,奇异系统的参数或/和结构的突变是不可忽视的,而马尔可夫跳变系统可以有效地表征上述现象^[6-8]。鉴于此,具有参数或/和结构随机突变的奇异马尔可夫跳变系统值得深入研究^[9-11]。

另一方面,网络化控制系统在近年来引起了广大学者们的研究兴趣^[12]。不同于传统的点对点控制方法,网络化控制系统中的传感器、控制器和执行器可以通过网络传输信息而不考虑其位置,因此网络化控制系统具有低成本、高可靠性、资源共享、易于扩展等优势^[12-14]。网络化控制系统的众多优点使其在智能电网、远程医疗系统、交通运输等领域得到了广泛的应用^[15,16]。再则,由于通信网络的日益开放,网络攻击问题已成为主要挑战^[17]。欺骗攻击等常见的网络攻击破坏了信号的完整性,拒绝服务攻击阻断了传输到控制器的信号,从而降低了系统性能^[18,19]。同时,有限的通信带宽也会引起网络拥塞、时延、丢包等问题,从而导致网络系统的不稳定^[20,21]。因此,研究人员致力于探索高效的控制方案以确保网络化控制系统在遭受网络攻击时保持稳定和预期的性能^[22-25]。

事件触发控制作为一种新型的数字控制,由于能够同时实现理想的系统性能和提高资源利用率,近年来越来越受到控制工程研究者的关注^[26,27]。目前各种改进的事件触发控制策略已被相继提出应用于不同系统,如非线性脉冲系统^[28]、离散马尔可夫跳变系统^[29]、多智能体系统^[30,31]。与传统的时间触发方案不同,事件触发方案中采样数据的传输与否取决于特定的触发条件,因此在保持理想控制性能的同时,有效减少了在通信网络中传输的数据包^[32,33]。此外,在系统控制中适当的脉冲控制注入可以大幅降低系统状态的波动,从而有效节省通信成本和资源^[34,35]。因此,结合了事件触发控制和脉冲控制优势的事件触发脉冲控制最近受到了学者们的关注^[36,37]。

然而,现有文献中的事件触发脉冲控制大多只考虑触发时刻的纯脉冲控制,在下一个触发时刻之前不进行任何额外的控制,无法保证控制信号平滑^[38]。同时,在许多实际情况中需要以更灵活的方式实现动态触发思想,例如在系统演化的早期阶段或系统在受到外界干扰时希望释放更多的数据包以寻求快速的瞬态响应和控制,而在系统接近稳态且没有任何干扰作用于它时,则会释放较少的数据包以减轻网络负担^[39]。考虑到网络化环境以及系统的稳定性和性能需求,有必要针对欺骗攻击下的奇异马尔可夫跳变系统设计一种模态相关的状态感知事件触发机制和脉冲混杂反馈控制器,以平衡系统的控制性能和通信效率。据作者所知,关于欺骗攻击下奇异马尔可夫跳变系统的状态感知事件触发 H_∞ -脉冲混杂反馈控制的文献极少,这也为本文的研究提供了动力。

受上述问题的启发,本文将重点研究奇异马尔可夫跳变系统在欺骗攻击和状态感知事件触发机制下的

H_∞ -脉冲混杂反馈控制问题。因此,本文的主要贡献有三个方面:

(1) 通过设计状态相关的阈值函数并利用模态相关的自由权矩阵,基于周期采样设计一种模态相关的状态感知事件触发机制,该机制可根据当前系统状态自适应地调整事件触发阈值,从而进一步权衡系统的控制性能和通信效率;

(2) 设计模态相关的脉冲混杂反馈控制器以保证具有欺骗攻击的奇异马尔可夫跳变系统的 H_∞ 随机容许性,该脉冲混杂反馈控制器同时包含脉冲控制和状态反馈控制两部分,其中脉冲控制有利于大幅降低系统状态的波动,从而有效节省通信成本和资源,而两个相邻脉冲时刻之间的状态反馈控制可以看作是连接相邻两次脉冲注入的桥梁,能够克服极端跳跃和减轻在脉冲瞬间可能发生的颤振,从而使控制信号平缓。

(3) 结合奇异值分解技术和随机 L-K 泛函方法,构造马尔可夫跳变模态相关和脉冲时间相关的 L-K 泛函,从而获得欺骗攻击下奇异马尔可夫跳变系统基于 LMI 框架的 H_∞ 随机容许性准则和脉冲混杂反馈控制条件。

符号说明: $E\{\cdot\}$ 表示期望算子, $\text{sym}(\cdot)$ 表示 $\mathbf{A} + \mathbf{A}^T$, $*$ 表示矩阵中的一个对称项, $\|\cdot\|$ 表示向量的欧几里得范数或矩阵的谱范数, $L_2[0, \infty)$ 表示定义在区间 $[0, \infty)$ 中的平方可积向量函数的空间, $\mathbf{N}^*$ 是正整数的集合, $J(\tau_1, \tau_2)$ 代表一族满足 $\tau_1 \leq t_{k+1}h - t_k h \leq \tau_2 (k \in \mathbf{N})$ 的脉冲时间序列 $\{t_k h\}$ 。

1 问题描述

本文研究在随机欺骗攻击下奇异马尔可夫跳变系统基于状态感知事件触发机制的 H_∞ -脉冲混杂反馈控制,奇异马尔可夫跳变系统模型表示为:

$$\begin{cases} E\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{R}(a_t)\mathbf{x}(t) + \mathbf{Q}(a_t)\mathbf{u}_f(t) + \mathbf{W}(a_t)\boldsymbol{\varphi}(t), \\ \mathbf{z}(t) = \mathbf{G}(a_t)\mathbf{x}(t), \end{cases} \quad (1)$$

式中 $E \in \mathbf{R}^{n \times n}$ 是奇异的且 $\text{rank}(E) = r < n$, $\mathbf{x} \in \mathbf{R}^n$ 为状态向量, $\mathbf{z}(t) \in \mathbf{R}^n$ 为控制输出,外部扰动输入 $\boldsymbol{\varphi}(t) \in \mathbf{R}^{n_\varphi}$ 且 $\boldsymbol{\varphi}(t) \in L_2[0, \infty)$, $\mathbf{R}(a_t)$ 、 $\mathbf{Q}(a_t)$ 、 $\mathbf{W}(a_t)$ 和 $\mathbf{G}(a_t)$ 为已知常数矩阵, $\{a_t\}$ 是在有限集合 $\hat{C} = \{1, 2, \dots, C\}$ 中取值的右连续马尔可夫过程,转移率矩阵 $\Pi := [v_{ij}]_{C \times C}$ 的具体定义及其性质详见参考文献[6-10]。 $\mathbf{u}_f(t)$ 为受欺骗攻击影响的控制输入,具体表述为

$$\mathbf{u}_f(t) = \mathbf{u}(t) + \mathbf{f}(\mathbf{x}(t), t), \quad (2)$$

$\mathbf{u}(t)$ 是没有攻击的控制输入, $\mathbf{f}(\mathbf{x}(t), t)$ 表示一种欺骗攻击, $\|\mathbf{f}(\mathbf{x}(t), t)\| \leq \|\mathbf{P}(t)\mathbf{x}(t)\|$, $\mathbf{P}(t)$ 表示一个未指定的时变权重矩阵且 $\|\mathbf{P}(t)\|$ 代表了攻击信号 $\mathbf{f}(\mathbf{x}(t), t)$ 的上界。不失一般性,考虑 $\|\mathbf{P}(t)\| \leq \partial$, $\partial > 0$ 为常数。为了表示方便,在后续表达中记 $\mathbf{f}(\mathbf{x}(t), t)$ 为 $\mathbf{f}(t)$ 。

考虑如下可根据当前系统状态调整事件触发阈值的模态相关状态感知事件触发机制

$$t_{k+1}h = t_k h + \inf\{\lambda h \mid \mathbf{e}^T(t_{k\lambda}h)\Theta(a_t)\mathbf{e}(t_{k\lambda}h) \geq \rho(\mathbf{x}(t_{k\lambda}h))\mathbf{x}^T(t_{k\lambda}h)\Theta(a_t)\mathbf{x}(t_{k\lambda}h)\}, \quad (3)$$

式中 h 为采样器的采样周期,记采样序列为 $\mathfrak{S}_1 = \{0, h, 2h, 3h, \dots, lh, \dots\}$ 。 $t_k h (k \in \mathbf{N}^+)$ 表示事件触发器的触发时刻,也是脉冲控制的脉冲瞬间,记触发序列为 $\mathfrak{S}_2 = \{t_1 h, t_2 h, t_3 h, \dots, t_k h, \dots\}$ 。采样数据 $\mathbf{x}(lh)$ 被传输到事件触发器并由事件触发机制决定其是否应该释放到网络中,因此事件触发器两次相邻的事件触发时刻之间的时间间隔是采样器的采样周期的正整数倍,从而 $\mathfrak{S}_1 \subseteq \mathfrak{S}_2$ 。 $\mathbf{x}(t_k h)$ 为事件触发器释放的最新的系统状态,令 $t_{k\lambda}h = t_k h + \lambda h (\lambda \in \mathbf{N}^+)$, 则 $\mathbf{x}(t_{k\lambda}h)$ 表示事件触发器从采样器接收到的当前系统状态。误差函数 $\mathbf{e}(t_{k\lambda}h) = \mathbf{x}(t_{k\lambda}h) - \mathbf{x}(t_k h)$ 。阈值函数 $\rho(\mathbf{x}(t_{k\lambda}h)) = \rho_0 + \rho_1 e^{-\rho_2 \|\mathbf{x}(t_{k\lambda}h)\|}$, 其中 $\rho_i (i=0, 1, 2)$ 为正常数。 $\Theta(a_t) (a_t \in \hat{C})$ 是待设计的正定矩阵。显然, $\rho_0 \leq \rho(\mathbf{x}(t_{k\lambda}h)) \leq \rho_0 + \rho_1 = \rho$ 。

注1 注意到,当 $\rho(t)$ 为固定常数 $\tilde{\rho}$ 时,状态感知事件触发机制(3)变为以下传统静态事件触发机制

$$t_{k+1}h = t_k h + \inf\{\lambda h \mid \mathbf{e}^T(t_{k\lambda}h)\Theta(a_t)\mathbf{e}(t_{k\lambda}h) \geq \tilde{\rho}\mathbf{x}^T(t_{k\lambda}h)\Theta(a_t)\mathbf{x}(t_{k\lambda}h)\}. \quad (4)$$

注2 相比于传统的静态事件触发机制(4),本文所提出的状态感知事件触发机制(3)采用了与状态相关的阈值函数 $\rho(\mathbf{x}(t_{k\lambda}h))$, 因此事件触发阈值将根据系统状态进行调整。例如,根据阈值函数 $\rho(\mathbf{x}(t_{k\lambda}h))$

的表达式可知,系统状态的范数 $\|\mathbf{x}(t_{k\lambda}h)\|$ 越大阈值参数 $\rho(\mathbf{x}(t_{k\lambda}h))$ 越小,换言之,如果系统状态远离稳态,状态感知事件触发机制(3)会选择较小的事件触发阈值参数来设置较高的通信频率。相反,事件触发参数越大,传输频率越低。

注 3 本文设计了一种基于周期采样的状态感知事件触发机制,该机制考虑了系统的模式信息,并且只与最近成功传输的数据和当前采样数据相关联。由于所提出的事件触发机制是基于周期采样的,采样周期为 h 且采样序列 $\mathfrak{S}_1$ 与触发序列 $\mathfrak{S}_2$ 的关系为 $\mathfrak{S}_1 \subseteq \mathfrak{S}_2$,因此所提出的事件触发机制必存在最小释放间隔 $h > 0$,从而避免了 Zeno 现象,也不需要连续检测系统的状态。

将间隔 $\mathfrak{S} = [t_k h + \tau_{t_k}, t_{k+1} h + \tau_{t_{k+1}})$ 划分为子集 $\mathfrak{S}_\lambda = [t_{k\lambda} h + \tau_{t_{k\lambda}}, t_{k\lambda} h + h + \tau_{t_{k\lambda}+1})$ 的集合,其中 τ_{t_k} 表示网络诱导的状态 $\mathbf{x}(t_{k\lambda}h)$ 的传输时滞, $\mathfrak{S} = \bigcup \mathfrak{S}_\lambda, \lambda = 0, 1, 2, \dots, t_{k+1} - t_k - 1$ 。如果 $\lambda = t_{k+1} - t_k - 1$, 则 $\tau_{t_{k\lambda}+1} = \tau_{t_{k+1}}$, 否则 $\tau_{t_{k\lambda}} = \tau_{t_k}$ 。设

$$\tau(t) = t - t_{k\lambda}h, t \in \mathfrak{S}_\lambda. \quad (5)$$

显然, $\tau(t)$ 是一个分段连续函数,且 $0 < \tau_m \leq \tau(t) \leq \bar{\tau} + h \leq \tau_M < \infty, \dot{\tau}(t) = 1$, 其中 $\tau_m = \inf\{\tau_{t_k}\}, \bar{\tau} = \sup\{\tau_{t_k}\}$ 。

基于状态感知事件触发机制(3),为奇异马尔可夫跳变系统(1)设计如下模态相关的状态感知事件触发脉冲混杂反馈控制器:

$$\mathbf{u}(t) = \mathbf{K}(a_t)\mathbf{x}(t_k h) + \sum_{k=1}^{\infty} \delta(t - t_k h) \mathbf{A}(a_t)\mathbf{x}(t_k h^-), \quad (6)$$

式中 $\mathbf{K}(a_t)$ 和 $\mathbf{A}(a_t)$ 是待设计的模态相关的控制器增益, $\delta(t)$ 表示狄拉克函数。脉冲序列 $\{t_k h\}_{k=1}^{\infty}$ 由状态感知事件触发机制(3)决定。

注 4 本文设计的状态感知事件触发脉冲混杂反馈控制器,同时包含了状态反馈控制部分和脉冲控制部分。脉冲控制部分在触发时刻工作,而状态反馈控制部分在两个相邻脉冲时刻之间的时间区间工作。脉冲控制有利于大幅降低系统状态的波动,从而有效节省通信成本和资源,状态反馈控制可以看作是连接相邻两次脉冲注入的桥梁,能够克服极端跳跃和减轻在脉冲瞬间可能发生的颤振,从而使控制信号平缓^[38]。

在本文的其余部分,对于每一个 $a_t = i \in \dot{C}$, 矩阵 $\mathbf{R}(a_t), \mathbf{Q}(a_t), \mathbf{W}(a_t), \mathbf{G}(a_t), \mathbf{K}(a_t), \mathbf{A}(a_t)$ 将分别用 $\mathbf{R}_i, \mathbf{Q}_i, \mathbf{W}_i, \mathbf{G}_i, \mathbf{K}_i, \mathbf{A}_i$ 表示。为了书写简便,后续将 $\rho(\mathbf{x}(t_{k\lambda}h))$ 写作 $\rho(t)$ 。

将式(2)代入式(1)并结合式(5)和式(6),得到如下闭环奇异马尔可夫跳变混杂控制系统:

$$\begin{aligned} E\dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{R}_i\mathbf{x}(t) + \mathbf{Q}_i\mathbf{K}_i\mathbf{x}(t - \tau(t)) - \mathbf{Q}_i\mathbf{K}_i e(t_{k\lambda}h) + \mathbf{Q}_i\mathbf{f}(t) + \mathbf{W}_i\boldsymbol{\varphi}(t), \quad t \neq t_k h, \\ E\Delta\mathbf{x}(t_k h) &= \mathbf{Q}_i\mathbf{A}_i\mathbf{x}(t_k h^-), \quad t = t_k h, k \in \mathbb{N}^*, \\ \mathbf{z}(t) &= \mathbf{G}_i\mathbf{x}(t), \end{aligned} \quad (7)$$

式中 $\mathbf{x}(t)$ 的初始条件是 $\mathbf{x}(t) = \boldsymbol{\varphi}(t), t \in [-\tau_M, 0], \boldsymbol{\varphi}(t)$ 是一个连续函数, $\mathbf{x}(t_0) = \boldsymbol{\varphi}(t_0), \Delta\mathbf{x}(t) = \mathbf{x}(t^+) - \mathbf{x}(t^-), \mathbf{x}(t^-) = \lim_{b \rightarrow 0^+} \mathbf{x}(t - b), \mathbf{x}(t) = \mathbf{x}(t^+) = \lim_{b \rightarrow 0^+} \mathbf{x}(t + b)$ 。

图 1 为欺骗攻击下奇异马尔可夫跳变系统基于状态感知事件触发机制的 H_∞ -脉冲混杂反馈控制框架。

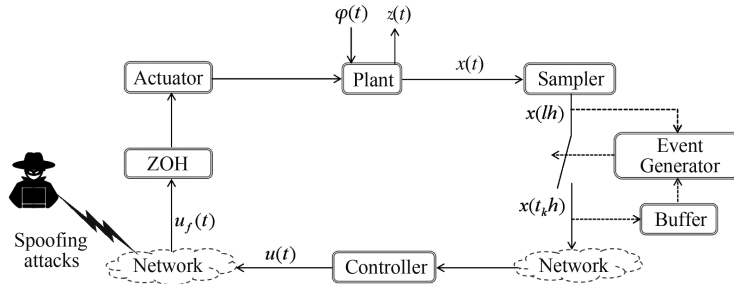


图 1 欺骗攻击下奇异马尔可夫跳变系统状态感知事件触发 H_∞ -脉冲混杂反馈控制框架

Fig. 1 The state-sensitive event-triggered H_∞ -impulse hybrid feedback control framework for singular Markovian jump systems under spoofing attacks

定义 1^[1] 如果对于每一个 $a_i = i \in \hat{C}$, 有 $\deg(\det(\tilde{\lambda}E - Q_i)) = \text{rank}(E)$ 且 $\det(\tilde{\lambda}E - Q_i) \neq 0$, 则称 (E, Q_i) 是正则的和无脉冲的, 从而称闭环奇异马尔可夫跳变混杂控制系统(7)在 $\varphi(t)=0$ 时是正则的和无脉冲的。如果存在一个标量 $S(a_0, x_0)$ 使得

$$E \left\{ \int_0^\infty \|x(t)\|^2 dt \mid a_0, x_0 \right\} < S(a_0, x_0), \quad (8)$$

那么称闭环奇异马尔可夫跳变混杂控制系统(7)在 $\varphi(t)=0$ 时是随机稳定的。如果上述所有条件都成立, 则称闭环奇异马尔可夫跳变混杂控制系统(7)在 $\varphi(t)=0$ 时是随机容许的。

引理 1^[1] (E, Q_i) 是随机容许的当且仅当 (E^T, Q_i^T) 是随机容许的。

定义 2^[5] 如果在零初始条件下对于任一非零的 $\varphi(t) \in L_2[0, \infty)$, 不等式

$$E \left\{ \int_0^\infty (\|z(t)\|^2 - \gamma^2 \|\varphi(t)\|^2) dt \right\} < 0. \quad (9)$$

成立, 则称闭环奇异马尔可夫跳变混杂控制系统(7)满足 H_∞ 性能指标 γ 。

2 主要结果

在得出正式结论之前, 对于 $t \in [t_k h, t_{k+1} h)$, $\{t_k h\} \in J(\tau_1, \tau_2)$, 引入以下与脉冲时间序列相关的辅助函数, 以便后续建立脉冲时间相关的 L-K 泛函:

$$\chi(t) = \frac{1}{t_{k+1}h - t_k h}, \quad \bar{\chi}_1(t) = (t - t_k h)\chi(t), \quad t \in [t_k h, t_{k+1} h), \quad k \in \mathbf{N}.$$

因此, 对于 $t \geq 0$, 有

$$\chi(t) \in \left[\frac{1}{\tau_2}, \frac{1}{\tau_1} \right], \quad \bar{\chi}_1(t) \in [0, 1).$$

进而存在函数 $\chi_1(t): \mathbf{R}_{\geq 0} \rightarrow [0, 1]$, 使得 $\chi(t) = \frac{\chi_1(t)}{\tau_1} + \frac{\chi_2(t)}{\tau_2}$ 。设 $\bar{\chi}_2(t) = 1 - \bar{\chi}_1(t)$, $\chi_2(t) = 1 - \chi_1(t)$, $\omega(t) = p^{\bar{\chi}_1(t)}$, 显然 $\bar{\chi}_2(t) \in [0, 1)$, $\chi_2(t) \in [0, 1)$, $\omega(t)$ 在 p_1 和 p_2 之间取值, 其中 $p_1 = \min\{1, p\}$, $p_2 = \max\{1, p\}$ 。

定理 1 闭环奇异马尔可夫跳变混杂控制系统(7)是随机容许的并满足 H_∞ 性能指标 v , 如果对于任意满足 $E^T B = 0$ 的列满秩矩阵 $B \in \mathbf{R}^{n \times (n-r)}$, $J(\tau_1, \tau_2)$, 正常数 $\partial, \tau_m, \tau_M (\tau_m < \tau_M)$, $\rho, p, p_1 = \min\{1, p\}$, $p_2 = \max\{1, p\}$, 对于 $\forall a_i = i \in \hat{C}$, 存在矩阵 $\bar{G}, M_i$ 以及对称正定矩阵 $D_i, F_1, F_2, G_{V1}, G_{V2}$ 和 Θ_i , 使得以下矩阵不等式成立:

$$\begin{bmatrix} E^T G_{V1} E & \bar{G} \\ * & E^T G_{V2} E \end{bmatrix} \geq 0, \quad (10)$$

$$(E + Q_i A_i)^T D_i (E + Q_i A_i) \leq p E^T D_i E, \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} \Omega_{01i} & F_i \\ * & \Omega_{02i} \end{bmatrix} < 0, \quad (12)$$

式中

$$\Omega_{01i} = \begin{bmatrix} \Omega_{1i} & \Omega_{2i} & \Omega_{3i} \\ * & \Omega_{4i} & 0 \\ * & * & \Omega_{5i} \end{bmatrix}, \quad l_2 = 1, 2, \quad \Omega_{4i} = \begin{bmatrix} -\frac{p_1}{p_2} F_1 - \frac{1}{p_2} E^T G_{V1} E & 0 & 0 \\ * & \widehat{\Omega}_{4i} & \frac{1}{p_2} E^T G_{V2} E - \frac{1}{p_2} \bar{G} \\ * & * & -\frac{p_1}{p_2} F_2 - \frac{1}{p_2} E^T G_{V2} E \end{bmatrix},$$

$$\begin{aligned}
\boldsymbol{\Omega}_{1i} &= \frac{\ln p}{\tau_{l_2}} \mathbf{E}^T \mathbf{D}_i \mathbf{E} + \sum_{j=1}^C v_{ij} \mathbf{E}^T \mathbf{D}_j \mathbf{E} + \text{sym}(\mathbf{R}_i^T (\mathbf{D}_i \mathbf{E} + \mathbf{B} \mathbf{M}_i)) + \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 + \frac{\partial^2}{\partial_1} \mathbf{I} - \frac{\mathbf{E}^T \mathbf{G}_{V1} \mathbf{E}}{\partial_2} - \frac{\mathbf{E}^T \mathbf{G}_{V2} \mathbf{E}}{\partial_2}, \\
\boldsymbol{\Omega}_{2i} &= \begin{bmatrix} \frac{1}{\partial_2} \mathbf{E}^T \mathbf{G}_{V1} \mathbf{E} & (\mathbf{D}_i \mathbf{E} + \mathbf{B} \mathbf{M}_i)^T \mathbf{Q}_i \mathbf{K}_i + \frac{1}{\partial_2} \mathbf{E}^T \mathbf{G}_{V2} \mathbf{E} - \frac{1}{\partial_2} \bar{\mathbf{G}} & \frac{1}{\partial_2} \bar{\mathbf{G}} \end{bmatrix}, \\
\boldsymbol{\Omega}_{3i} &= [-(\mathbf{D}_i \mathbf{E} + \mathbf{B} \mathbf{M}_i)^T \mathbf{Q}_i \mathbf{K}_i \quad (\mathbf{D}_i \mathbf{E} + \mathbf{B} \mathbf{M}_i)^T \mathbf{Q}_i \quad (\mathbf{D}_i \mathbf{E} + \mathbf{B} \mathbf{M}_i)^T \mathbf{W}_i], \\
\boldsymbol{\Omega}_{5i} &= \text{diag} \left\{ -\frac{1}{\partial_2} \Theta_i, \quad -\frac{1}{\partial_2} \mathbf{I}, \quad -\frac{\partial_1}{\partial_2} v^2 \mathbf{I} \right\}, \quad \hat{\boldsymbol{\Omega}}_{4i} = \frac{\rho}{\partial_1} \Theta_i - \frac{2}{\partial_2} \mathbf{E}^T \mathbf{G}_{V2} \mathbf{E} + \frac{1}{\partial_2} \bar{\mathbf{G}} + \frac{1}{\partial_2} \bar{\mathbf{G}}^T, \\
\boldsymbol{\Omega}_{02} &= \text{diag} \left\{ -\left(\frac{\tau_m^2}{\partial_1} \mathbf{G}_{V1} + \frac{\tau_M^2}{\partial_1} \mathbf{G}_{V2} \right)^{-1}, \quad -\mathbf{I} \right\}, \quad \mathbf{F}_i = [\mathbf{F}_{0i}^T \quad \mathbf{F}_{2i}^T], \\
\mathbf{F}_{0i} &= [\mathbf{R}_i \quad 0 \quad \mathbf{Q}_i \mathbf{K}_i \quad 0 \quad -\mathbf{Q}_i \mathbf{K}_i \quad \mathbf{Q}_i \quad \mathbf{W}_i], \quad \mathbf{F}_{2i} = [\mathbf{G}_i \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0].
\end{aligned}$$

证明 根据奇异值分解技术,存在非奇异矩阵 $\mathbf{H}_1$ 和 $\mathbf{H}_2$,使得

$$\mathbf{H}_1 \mathbf{E} \mathbf{H}_2 = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_r & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{H}_1 \mathbf{R}_i \mathbf{H}_2 = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{i1} & \mathbf{R}_{i2} \\ \mathbf{R}_{i3} & \mathbf{R}_{i4} \end{bmatrix}.$$

选取 $\tilde{\mathbf{M}} = [0, \mathbf{I}_{n-r}]$, 则 $\mathbf{E} \mathbf{H}_2 \tilde{\mathbf{M}}^T = \mathbf{H}_1^{-1} (\mathbf{H}_1 \mathbf{E} \mathbf{H}_2) \tilde{\mathbf{M}}^T = 0$ 。考虑到 $\mathbf{F}_1 > 0, \mathbf{F}_2 > 0, \partial_1 > 0$, 因此

$$\tilde{\mathbf{M}} \mathbf{H}_2^T \boldsymbol{\Omega}_{1i} \mathbf{H}_2 \tilde{\mathbf{M}}^T \geq \tilde{\mathbf{M}} \mathbf{H}_2^T (\mathbf{R}_i^T \mathbf{B} \mathbf{M}_i + \mathbf{M}_i^T \mathbf{B}^T \mathbf{R}_i) \mathbf{H}_2 \tilde{\mathbf{M}}^T.$$

由式(12)可知 $\boldsymbol{\Omega}_{1i} < 0$, 因此 $\tilde{\mathbf{M}} \mathbf{H}_2^T \boldsymbol{\Omega}_{1i} \mathbf{H}_2 \tilde{\mathbf{M}}^T < 0$, 进而 $\tilde{\mathbf{M}} \mathbf{H}_2^T \mathbf{M}_i^T \mathbf{B}^T \mathbf{R}_i \mathbf{H}_2 \tilde{\mathbf{M}}^T$ 是非奇异的。

注意到 $\mathbf{H}_1 \mathbf{E} \mathbf{H}_2 + \tilde{\mathbf{M}}^T \tilde{\mathbf{M}} = \mathbf{I}_n$, 从而

$$\tilde{\mathbf{M}} \mathbf{H}_2^T \mathbf{M}_i^T \mathbf{B}^T \mathbf{R}_i \mathbf{H}_2 \tilde{\mathbf{M}}^T = \tilde{\mathbf{M}} \mathbf{H}_2^T \mathbf{M}_i^T \mathbf{B}^T \mathbf{H}_1^{-1} (\mathbf{H}_1 \mathbf{E} \mathbf{H}_2 + \tilde{\mathbf{M}}^T \tilde{\mathbf{M}}) \mathbf{H}_1 \mathbf{R}_i \mathbf{H}_2 \tilde{\mathbf{M}}^T. \quad (13)$$

由于 $\mathbf{B} \in \mathbf{R}^{n \times (n-r)}$ 是列满秩矩阵且 $\mathbf{E}^T \mathbf{B} = 0$, 因此式(13)可写作:

$$\tilde{\mathbf{M}} \mathbf{H}_2^T \mathbf{M}_i^T \mathbf{B}^T \mathbf{R}_i \mathbf{H}_2 \tilde{\mathbf{M}}^T = (\tilde{\mathbf{M}} \mathbf{H}_2^T \mathbf{M}_i^T \mathbf{B}^T \mathbf{H}_1^{-1} \tilde{\mathbf{M}}^T) (\tilde{\mathbf{M}} \mathbf{H}_1 \mathbf{R}_i \mathbf{H}_2 \tilde{\mathbf{M}}^T).$$

因为 $\tilde{\mathbf{M}} \mathbf{H}_2^T \mathbf{M}_i^T \mathbf{B}^T \mathbf{H}_1^{-1} \tilde{\mathbf{M}}^T$ 是非奇异的, 所以 $\tilde{\mathbf{M}} \mathbf{H}_1 \mathbf{R}_i \mathbf{H}_2 \tilde{\mathbf{M}}^T$ 是非奇异的。根据定义 1, 闭环奇异马尔可夫跳变混杂控制系统(7)是无脉冲的、正则的。

对于闭环奇异马尔可夫跳变混杂控制系统(7), 创建 L-K 泛函

$$V(\mathbf{x}_t, a_t, t) = V_1(\mathbf{x}_t, a_t, t) + \sum_{\mathfrak{Z}=2}^3 V_{\mathfrak{Z}}(\mathbf{x}_t, t), \quad (14)$$

式中

$$\begin{aligned}
V_1(\mathbf{x}_t, a_t, t) &= \boldsymbol{\omega}(t) \sum_{l_1=1}^2 \bar{\chi}_{l_1}(t) \mathbf{x}^T(t) \mathbf{E}^T \mathbf{D}(a_t) \mathbf{E} \mathbf{x}(t), \\
V_2(\mathbf{x}_t, t) &= \int_{t-\tau_m}^t \boldsymbol{\omega}(\alpha) \mathbf{x}^T(\alpha) \mathbf{F}_1 \mathbf{x}(\alpha) d\alpha + \int_{t-\tau_M}^t \boldsymbol{\omega}(\alpha) \mathbf{x}^T(\alpha) \mathbf{F}_2 \mathbf{x}(\alpha) d\alpha, \\
V_3(\mathbf{x}_t, t) &= \tau_m \int_{-\tau_m}^0 \int_{t+s}^t \dot{\mathbf{x}}^T(\alpha) \mathbf{E}^T \mathbf{G}_{V1} \mathbf{E} \dot{\mathbf{x}}(\alpha) d\alpha ds + \tau_M \int_{-\tau_M}^0 \int_{t+s}^t \dot{\mathbf{x}}^T(\alpha) \mathbf{E}^T \mathbf{G}_{V2} \mathbf{E} \dot{\mathbf{x}}(\alpha) d\alpha ds.
\end{aligned}$$

LV 表示作用于 $V(\mathbf{x}_t, a_t, t)$ 上的弱无穷小算子。注意到 $\mathbf{E}^T \mathbf{B} = 0$, 因此 $\mathbf{E}^T \mathbf{D}_i \mathbf{E} = \mathbf{E}^T (\mathbf{D}_i \mathbf{E} + \mathbf{B} \mathbf{M}_i)$ 。从而可以得到

$$\begin{aligned}
E\{LV_1(\mathbf{x}_t, a_t = i, t)\} &= \left[\dot{\boldsymbol{\omega}}(t) \sum_{l_1=1}^2 \bar{\chi}_{l_1}(t) + \boldsymbol{\omega}(t) \sum_{l_1=1}^2 \dot{\bar{\chi}}_{l_1}(t) \right] \mathbf{x}^T(t) \mathbf{E}^T \mathbf{D}_i \mathbf{E} \mathbf{x}(t) + \boldsymbol{\omega}(t) \sum_{l_1=1}^2 \bar{\chi}_{l_1}(t) \\
&\quad \left[\mathbf{x}^T(t) \left(\sum_{j=1}^C v_{ij} \mathbf{E}^T \mathbf{D}_j \mathbf{E} \right) \mathbf{x}(t) + E\{\dot{\mathbf{x}}^T(t) \mathbf{E}^T \mathbf{D}_i \mathbf{E} \mathbf{x}(t) + \mathbf{x}^T(t) \mathbf{E}^T \mathbf{D}_i \dot{\mathbf{x}}(t)\} \right] \\
&= \boldsymbol{\omega}(t) \left[\mathbf{x}^T(t) \left(\sum_{l_2=1}^2 \bar{\chi}_{l_2}(t) \frac{\ln p}{\tau_{l_2}} \mathbf{E}^T \mathbf{D}_i \mathbf{E} + \sum_{j=1}^C v_{ij} \mathbf{E}^T \mathbf{D}_j \mathbf{E} \right) \mathbf{x}(t) \right. \\
&\quad \left. + \zeta^T(t) \mathbf{F}_{0i}^T (\mathbf{D}_i \mathbf{E} + \mathbf{B} \mathbf{M}_i) \mathbf{x}(t) + \mathbf{x}^T(t) (\mathbf{D}_i \mathbf{E} + \mathbf{B} \mathbf{M}_i)^T \mathbf{F}_{0i} \zeta(t) \right], \quad (15)
\end{aligned}$$

式中 $\zeta(t) = [\mathbf{x}^T(t) \quad \mathbf{x}^T(t - \tau_m) \quad \mathbf{x}^T(t - \tau(t)) \quad \mathbf{x}^T(t - \tau_M) \quad \mathbf{e}^T(t_{k\lambda}h) \quad \mathbf{f}^T(t) \quad \boldsymbol{\varphi}^T(t)]^T$ 。

$$\begin{aligned} \mathbb{E}\{LV_2(\mathbf{x}_t, t)\} &= \boldsymbol{\omega}(t) \mathbf{x}^T(t) (\mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2) \mathbf{x}(t) - \boldsymbol{\omega}(t - \tau_m) \mathbf{x}^T(t - \tau_m) \mathbf{F}_1 \mathbf{x}(t - \tau_m) \\ &\quad - \boldsymbol{\omega}(t - \tau_M) \mathbf{x}^T(t - \tau_M) \mathbf{F}_2 \mathbf{x}(t - \tau_M) \\ &\leq \boldsymbol{\omega}(t) \left[\mathbf{x}^T(t) (\mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2) \mathbf{x}(t) - \frac{p_1}{p_2} \mathbf{x}^T(t - \tau_m) \mathbf{F}_1 \mathbf{x}(t - \tau_m) \right. \\ &\quad \left. - \frac{p_1}{p_2} \mathbf{x}^T(t - \tau_M) \mathbf{F}_1 \mathbf{x}(t - \tau_M) \right]. \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \mathbb{E}\{LV_3(\mathbf{x}_t, t)\} &= \mathbb{E}\{\dot{\mathbf{x}}^T(t) \mathbf{E}^T (\tau_m^2 \mathbf{G}_{V1} + \tau_M^2 \mathbf{G}_{V2}) \dot{\mathbf{E}} \mathbf{x}(t)\} - \tau_m \int_{t-\tau_m}^t \dot{\mathbf{x}}^T(\alpha) \mathbf{E}^T \mathbf{G}_{V1} \dot{\mathbf{E}} \mathbf{x}(\alpha) d\alpha \\ &\quad - \tau_M \int_{t-\tau_M}^t \dot{\mathbf{x}}^T(\alpha) \mathbf{E}^T \mathbf{G}_{V2} \dot{\mathbf{E}} \mathbf{x}(\alpha) d\alpha \leq \boldsymbol{\omega}(t) \left\{ \frac{1}{p_1} \mathbb{E}\{\dot{\mathbf{x}}^T(t) \mathbf{E}^T [\tau_m^2 \mathbf{G}_{V1} + \tau_M^2 \mathbf{G}_{V2}] \dot{\mathbf{E}} \mathbf{x}(t)\} \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{p_2} \tau_m \int_{t-\tau_m}^t \dot{\mathbf{x}}^T(\alpha) \mathbf{E}^T \mathbf{G}_{V1} \dot{\mathbf{E}} \mathbf{x}(\alpha) d\alpha - \frac{1}{p_2} \tau_M \int_{t-\tau_M}^t \dot{\mathbf{x}}^T(\alpha) \mathbf{E}^T \mathbf{G}_{V2} \dot{\mathbf{E}} \mathbf{x}(\alpha) d\alpha \right\}. \end{aligned} \quad (17)$$

对于式(17),有

$$\mathbb{E}\{\dot{\mathbf{x}}^T(t) \mathbf{E}^T [\tau_m^2 \mathbf{G}_{V1} + \tau_M^2 \mathbf{G}_{V2}] \dot{\mathbf{E}} \mathbf{x}(t)\} = \zeta^T(t) \mathbf{F}_{0i}^T [\tau_m^2 \mathbf{G}_{V1} + \tau_M^2 \mathbf{G}_{V2}] \mathbf{F}_{0i} \zeta(t). \quad (18)$$

将 Jensen 不等式应用于式(17)的第一个积分项得到

$$-\tau_m \int_{t-\tau_m}^t \dot{\mathbf{x}}^T(\alpha) \mathbf{E}^T \mathbf{G}_{V1} \dot{\mathbf{E}} \mathbf{x}(\alpha) d\alpha \leq [\mathbf{x}^T(t) \quad \mathbf{x}^T(t - \tau_m)] \begin{bmatrix} -\mathbf{E}^T \mathbf{G}_{V1} \mathbf{E} & \mathbf{E}^T \mathbf{G}_{V1} \mathbf{E} \\ * & \mathbf{E}^T \mathbf{G}_{V1} \mathbf{E} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}(t) \\ \mathbf{x}(t - \tau_m) \end{bmatrix}. \quad (19)$$

对于式(17)的第二个积分项,根据式(10)和交互凸方法,可以得到

$$-\tau_M \int_{t-\tau_M}^t \dot{\mathbf{x}}^T(\alpha) \mathbf{E}^T \mathbf{G}_{V2} \dot{\mathbf{E}} \mathbf{x}(\alpha) d\alpha \leq \zeta_1^T(t) \tilde{\boldsymbol{\Omega}} \zeta_1(t), \quad (20)$$

式中

$$\tilde{\boldsymbol{\Omega}} = \begin{bmatrix} -\mathbf{E}^T \mathbf{G}_{V2} \mathbf{E} & \mathbf{E}^T \mathbf{G}_{V2} \mathbf{E} - \bar{\mathbf{G}} & \bar{\mathbf{G}} \\ * & -2\mathbf{E}^T \mathbf{G}_{V2} \mathbf{E} + \bar{\mathbf{G}} + \bar{\mathbf{G}}^T & \mathbf{E}^T \mathbf{G}_{V2} \mathbf{E} - \bar{\mathbf{G}} \\ * & * & -\mathbf{E}^T \mathbf{G}_{V2} \mathbf{E} \end{bmatrix}, \quad \zeta_1(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{x}(t) \\ \mathbf{x}(t - \tau(t)) \\ \mathbf{x}(t - \tau_M) \end{bmatrix}.$$

结合式(18)~(20),可以得到

$$\begin{aligned} \mathbb{E}\{LV_3(\mathbf{x}_t, t)\} &\leq \boldsymbol{\omega}(t) \left\{ \frac{1}{p_2} [\mathbf{x}^T(t) \quad \mathbf{x}^T(t - \tau_m)] \begin{bmatrix} -\mathbf{E}^T \mathbf{G}_{V1} \mathbf{E} & \mathbf{E}^T \mathbf{G}_{V1} \mathbf{E} \\ * & -\mathbf{E}^T \mathbf{G}_{V1} \mathbf{E} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}(t) \\ \mathbf{x}(t - \tau_m) \end{bmatrix} \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{p_2} \zeta_1^T(t) \tilde{\boldsymbol{\Omega}} \zeta_1(t) + \zeta^T(t) \left[\mathbf{F}_{0i}^T \left(\frac{\tau_m^2}{p_1} \mathbf{G}_{V1} + \frac{\tau_M^2}{p_1} \mathbf{G}_{V2} \right) \mathbf{F}_{0i} \right] \zeta(t) \right\}. \end{aligned} \quad (21)$$

由式(15)~(21)可知

$$\begin{aligned} \mathbb{E}\{LV(\mathbf{x}_t, a_t = i, t)\} &= \mathbb{E}\{LV(\mathbf{x}_t, a_t = i, t)\} + \mathbf{e}^T(t_{k\lambda}h) \Theta_i \mathbf{e}(t_{k\lambda}h) - \mathbf{e}^T(t_{k\lambda}h) \Theta_i \mathbf{e}(t_{k\lambda}h) \\ &\quad + \mathbf{f}^T(t) \mathbf{f}(t) - \mathbf{f}^T(t) \mathbf{f}(t) \leq \boldsymbol{\omega}(t) \sum_{l_2=1}^2 \chi_{l_2}(t) \zeta^T(t) \bar{\boldsymbol{\Omega}}_i \zeta(t), \end{aligned}$$

式中

$$\bar{\boldsymbol{\Omega}}_i = \bar{\boldsymbol{\Omega}}_{01i} + \mathbf{F}_{0i}^T \left(\frac{\tau_m^2}{p_1} \mathbf{G}_{V1} + \frac{\tau_M^2}{p_1} \mathbf{G}_{V2} \right) \mathbf{F}_{0i}, \quad \bar{\boldsymbol{\Omega}}_{01i} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\Omega}_{1i} & \boldsymbol{\Omega}_{2i} & \boldsymbol{\Omega}_{3i} \\ * & \boldsymbol{\Omega}_{4i} & 0 \\ * & * & \bar{\boldsymbol{\Omega}}_{5i} \end{bmatrix}, \quad \bar{\boldsymbol{\Omega}}_{5i} = \text{diag} \left(\frac{-1}{p_2} \Theta_i, \frac{1}{p_2} \mathbf{I}, 0 \right).$$

当 $\boldsymbol{\varphi}(t) = 0$ 时,有

$$\mathbb{E}\{LV(\mathbf{x}_t, a_t = i, t)\} \leq \boldsymbol{\omega}(t) \sum_{l_2=1}^2 \chi_{l_2}(t) \zeta_1^T(t) \bar{\bar{\boldsymbol{\Omega}}}_i \zeta_1(t),$$

式中 $\zeta_1(t) = [\mathbf{x}^T(t) \quad \mathbf{x}^T(t - \tau_m) \quad \mathbf{x}^T(t - \tau(t)) \quad \mathbf{x}^T(t - \tau_M) \quad \mathbf{e}^T(t_k h) \quad \mathbf{f}^T(t)]^T$, $\bar{\bar{\boldsymbol{\Omega}}}_i = \bar{\bar{\boldsymbol{\Omega}}}_{01} +$

$$\bar{\mathbf{F}}_{0i}^T \left(\frac{\tau_m^2}{p_1} \mathbf{G}_{V1} + \frac{\tau_M^2}{p_1} \mathbf{G}_{V2} \right) \bar{\mathbf{F}}_{0i}, \quad \bar{\bar{\boldsymbol{\Omega}}}_{01i} = \begin{bmatrix} \bar{\boldsymbol{\Omega}}_{1i} & \bar{\boldsymbol{\Omega}}_{2i} & \bar{\bar{\boldsymbol{\Omega}}}_{3i} \\ * & \bar{\boldsymbol{\Omega}}_{4i} & 0 \\ * & * & \bar{\bar{\boldsymbol{\Omega}}}_{5i} \end{bmatrix}, \quad \bar{\bar{\boldsymbol{\Omega}}}_{3i} = [-(\mathbf{D}_i \mathbf{E} + \mathbf{B} \mathbf{M}_i)^T \mathbf{Q}_i \mathbf{K}_i \quad (\mathbf{D}_i \mathbf{E} + \mathbf{B} \mathbf{M}_i)^T \mathbf{Q}_i],$$

$$\bar{\mathbf{F}}_{0i} = [\mathbf{R}_i \quad 0 \quad \mathbf{Q}_i \mathbf{K}_i \quad 0 \quad -\mathbf{Q}_i \mathbf{K}_i \quad \mathbf{Q}_i], \quad \bar{\bar{\boldsymbol{\Omega}}}_{5i} = \text{diag} \left\{ \frac{-1}{p_2} \Theta_i \quad \frac{1}{p_2} \mathbf{I} \right\}.$$

根据式(12), 当 $t \neq t_k h$ 时, $\bar{\bar{\boldsymbol{\Omega}}}_i < 0$, 从而 $LV(\mathbf{x}_t, a_t = i, t) < 0$ 。

当 $t = t_k h$ 时, 有

$$\begin{aligned} & V(\mathbf{x}_{t_k h}, a_{t_k h} = i, t_k h) - V(\mathbf{x}_{t_k h^-}, a_{t_k h^-} = j, t_k h^-) \\ &= \boldsymbol{\omega}(t_k h) \sum_{l_1=1}^2 \bar{\chi}_{l_1}(t_k h) \mathbf{x}^T(t_k h) \mathbf{E}^T \mathbf{D}_i \mathbf{E} \mathbf{x}(t_k h) \\ &\quad - \boldsymbol{\omega}(t_k h^-) \sum_{l_1=1}^2 \bar{\chi}_{l_1}(t_k h^-) \mathbf{x}^T(t_k h^-) \mathbf{E}^T \mathbf{D}_j \mathbf{E} \mathbf{x}(t_k h^-) \\ &\leq \mathbf{x}^T(t_k h^-) [(\mathbf{E} + \mathbf{Q}_i \mathbf{A}_i)^T \mathbf{D}_i (\mathbf{E} + \mathbf{Q}_i \mathbf{A}_i) - p \mathbf{E}^T \mathbf{D}_j \mathbf{E}] \mathbf{x}(t_k h^-) \\ &\leq 0. \end{aligned}$$

因此, $V(\mathbf{x}_t, a_t = i, t)$ 在 $t_k h$ 处是非增的。从而, 总存在一个常数 $\epsilon > 0$, 使得

$$\mathbf{E}\{LV(\mathbf{x}_t, a_t = i, t)\} \leq \epsilon \mathbf{E}\{\mathbf{x}^T(t) \mathbf{x}(t)\}.$$

利用 Dynkin 公式, 可以得到 $\mathbf{E}\left\{\int_0^\infty \|\mathbf{x}(t)\|^2 dt \mid \mathbf{x}_0, a_0\right\} \leq \epsilon^{-1} V(\mathbf{x}_0, a_0, 0)$ 。

根据定义 1, 当 $\boldsymbol{\varphi}(t) = 0$ 时, 闭环奇异马尔可夫跳变混杂控制系统(7)满足随机稳定性。结合上述分析, 闭环奇异马尔可夫跳变混杂控制系统(7)是随机容许的。

接下来, 引入如下辅助函数来帮助证明 $\mathbf{z}(t)$ 在零初始条件下满足式(9),

$$\boldsymbol{\Gamma}(t) = \int_0^t \boldsymbol{\omega}(\alpha) \left(\|\mathbf{z}(\alpha)\|^2 - \frac{p_1}{p_2} \gamma^2 \|\boldsymbol{\varphi}(\alpha)\|^2 \right) d\alpha.$$

对于 $t \in [t_k h, t_{k+1} h)$, 在零初始条件下, 有

$$\begin{aligned} \int_0^t \mathbf{E}\{LV(\mathbf{x}_\alpha, a_\alpha, \alpha)\} d\alpha &= \sum_{l_3=0}^{k-1} \int_{t_{l_3} h}^{t_{l_3+1} h} \mathbf{E}\{LV(\mathbf{x}_\alpha, a_\alpha, \alpha)\} d\alpha + \int_{t_k h}^t \mathbf{E}\{LV(\mathbf{x}_\alpha, a_\alpha, \alpha)\} d\alpha \\ &= \sum_{l_3=0}^{k-1} \mathbf{E}\{LV(\mathbf{x}_{t_{l_3+1} h^-}, a_{t_{l_3+1} h^-}, t_{l_3+1} h^-)\} - \mathbf{E}\{LV(\mathbf{x}_{t_{l_3} h}, a_{t_{l_3} h}, t_{l_3} h)\} \\ &\quad + \mathbf{E}\{LV(\mathbf{x}_t, a_t, t)\} - \mathbf{E}\{LV(\mathbf{x}_{t_k h}, a_{t_k h}, t_k h)\} \\ &\geq \left[\sum_{l_3=0}^k \mathbf{E}\{LV(\mathbf{x}_{t_{l_3} h^-}, a_{t_{l_3} h^-}, t_{l_3} h^-)\} - \mathbf{E}\{LV(\mathbf{x}_{t_{l_3} h}, a_{t_{l_3} h}, t_{l_3} h)\} \right] \geq 0. \end{aligned}$$

因此

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\Gamma}(t) &= \int_0^t \left[\boldsymbol{\omega}(\alpha) \left(\|\mathbf{z}(\alpha)\|^2 - \frac{p_1}{p_2} \gamma^2 \|\boldsymbol{\varphi}(\alpha)\|^2 \right) + \mathbf{E}\{LV(\mathbf{x}_\alpha, a_\alpha)\} \right] d\alpha - \int_0^t \mathbf{E}\{LV(\mathbf{x}_\alpha, a_\alpha)\} d\alpha \\ &\leq \int_0^t \left[\boldsymbol{\omega}(\alpha) \left(\|\mathbf{z}(\alpha)\|^2 - \frac{p_1}{p_2} \gamma^2 \|\boldsymbol{\varphi}(\alpha)\|^2 \right) + \mathbf{E}\{LV(\mathbf{x}_\alpha, a_\alpha)\} \right] d\alpha. \end{aligned}$$

又因为

$$\boldsymbol{\omega}(t) \left(\|\mathbf{z}(t)\|^2 - \frac{p_1}{p_2} \gamma^2 \|\boldsymbol{\varphi}(t)\|^2 \right) + \mathbf{E}\{LV(\mathbf{x}_t, a_t, t)\} \leq \boldsymbol{\omega}(t) \sum_{l_2=1}^2 \chi_{l_2}(t) \zeta^T(t) \dot{\boldsymbol{\Omega}}_i \zeta(t),$$

式中 $\dot{\boldsymbol{\Omega}}_i = \bar{\boldsymbol{\Omega}}_{01i} + \bar{\mathbf{F}}_{0i}^T \left(\frac{\tau_m^2}{p_1} \mathbf{G}_{V1} + \frac{\tau_M^2}{p_1} \mathbf{G}_{V2} \right) \bar{\mathbf{F}}_{0i} + \bar{\mathbf{F}}_{2i}^T \bar{\mathbf{F}}_{2i}$ 。

根据 Schur 补引理可知,式(12)保证了 $\dot{\Omega}_i < 0$ 。结合 $p_1 \leq \omega(t) \leq p_2$,式(9)成立。

因此,闭环奇异马尔可夫跳变混杂控制系统(7)满足 H_∞ 性能指标 γ 。至此,定理1得证。

注5 相对于已有的 L-K 泛函,本文针对欺骗攻击下的奇异马尔可夫跳变系统构造了一个脉冲时刻相关和模态相关的 L-K 泛函,更好地捕捉了马尔可夫跳变模态和瞬时脉冲信息,从而在 LMI 框架下给出了奇异马尔可夫跳变系统 H_∞ 随机容许性条件。

定理2 闭环奇异马尔可夫跳变混杂控制系统(7)满足随机容许性和 H_∞ 性能指标 γ ,如果对于任意满足 $EB=0$ 的列满秩矩阵 $B \in \mathbf{R}^{n \times (n-r)}$,给定 $J(\tau_1, \tau_2)$ 和正常数 $\partial, \tau_m, \tau_M (\tau_m < \tau_M), \rho, p_1 = \min\{1, p\}, p_2 = \max\{1, p\}$,对于 $\forall a_i = i \in \hat{C}$,存在矩阵 $\bar{G}, M_i, \tilde{K}_i$ 以及对称正定矩阵 $D_i, F_1, F_2, G_{V1}, G_{V2}, \tilde{\Theta}_i$,使得下列线性矩阵不等式成立

$$\begin{bmatrix} EG_{V2}E^T & \bar{G} \\ * & EG_{V2}E^T \end{bmatrix} \geq 0, \quad (22)$$

$$\begin{bmatrix} -pED_jE^T & E+Q_iA_i \\ * & -2I+D_i \end{bmatrix} \leq 0, \quad (23)$$

$$\begin{bmatrix} \tilde{\Omega}_{01i} & \tilde{F}_i \\ * & \tilde{\Omega}_{02i} \end{bmatrix} < 0, \quad (24)$$

式中

$$\begin{aligned} \tilde{\Omega}_{01i} &= \begin{bmatrix} \tilde{\Omega}_{1i} & \tilde{\Omega}_{2i} & \tilde{\Omega}_{3i} \\ * & \tilde{\Omega}_{4i} & 0 \\ * & * & \tilde{\Omega}_{5i} \end{bmatrix}, \tilde{\Omega}_{4i} = \begin{bmatrix} -\frac{p_1}{p_2}F_1 - \frac{1}{p_2}EG_{V1}E^T & 0 & 0 \\ * & \tilde{\Omega}_{4i} & \frac{1}{p_2}EG_{V2}E^T - \frac{1}{p_2}\bar{G} \\ * & * & -\frac{p_1}{p_2}F_2 - \frac{1}{p_2}EG_{V2}E^T \end{bmatrix}, \\ \tilde{\Omega}_{1i} &= \frac{\ln p}{\tau_{l_2}}ED_iE^T + \sum_{j=1}^C v_{ij}ED_jE^T + \Lambda_i^T R_i^T + R_i \Lambda_i + F_1 + F_2 + \frac{\partial^2}{p_1}I - \frac{1}{p_2}EG_{V1}E^T - \frac{1}{p_2}EG_{V2}E^T, \\ l_2 &= 1, 2, \Lambda_i = D_iE^T + BM_i, \tilde{\Omega}_{2i} = \left[\frac{1}{p_2}EG_{V1}E^T \quad \tilde{K}_i^T Q_i^T + \frac{1}{p_2}EG_{V2}E^T - \frac{1}{p_2}\bar{G} \quad \frac{1}{p_2}\bar{G} \right], \\ \tilde{\Omega}_{3i} &= [-\tilde{K}_i^T Q_i^T \quad \Lambda_i^T Q_i \quad \Lambda_i^T W_i], \tilde{\Omega}_{4i} = \frac{\rho}{p_1}\Theta_i - \frac{2}{p_2}EG_{V2}E^T + \frac{1}{p_2}\bar{G}^T + \frac{1}{p_2}\bar{G}, \\ \tilde{\Omega}_{5i} &= \text{diag}\left\{\frac{-1}{p_2}\Theta_i, \frac{-1}{p_2}I, -\frac{p_1}{p_2}\gamma^2 I\right\}, F_i = [\tilde{F}_{0i}^T, \tilde{F}_{2i}^T], \tilde{\Omega}_{02i} = \text{diag}\{\tilde{\Omega}_{02i}^1, -I\}, \\ \tilde{F}_{0i}^T &= \text{col}\{R_i \Lambda_i, 0, Q_i \tilde{K}_i, 0, -Q_i \tilde{K}_i, Q_i^T \Lambda_i, W_i^T \Lambda_i\}, \tilde{F}_{2i} = [G_i \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0], \\ \tilde{\Omega}_{02i}^1 &= \frac{\tau_m^2}{p_1}G_{V1} + \frac{\tau_M^2}{p_1}G_{V1} - \Lambda_i^T - \Lambda_i. \end{aligned}$$

此时,状态感知事件触发脉冲混杂反馈控制器(6)的增益和状态感知事件触发机制(3)的权重矩阵分别为 $K_i = \tilde{K}_i \Lambda_i^{-1}, A_i = \Lambda_i, \Theta_i = \Theta_i$ 。

证明 根据引理1,定理1中的式(11)可以转化为

$$(E+Q_iA_i)D_i(E+Q_iA_i)^T \leq pED_jE^T. \quad (25)$$

根据舒尔补引理,式(25)可以写作

$$\begin{bmatrix} -pED_jE^T & E+Q_iA_i \\ * & -D_i^{-1} \end{bmatrix} \leq 0. \quad (26)$$

由 $(\mathbf{I} - \mathbf{D}_i)^T \mathbf{D}_i^{-1} (\mathbf{I} - \mathbf{D}_i) \geq 0$ 可得 $-\mathbf{D}_i^{-1} \leq -2\mathbf{I} + \mathbf{D}_i$, 因此, 式(23)保证了式(26), 即式(25)可由式(23)推得。

对于任意矩阵 $\Phi_2 > 0$, 有 $(\Phi_{1i} - \Phi_2) \Phi_2^{-1} (\Phi_{1i} - \Phi_2)^T \geq 0$, 即 $-\Phi_{1i} \Phi_2^{-1} \Phi_{1i}^T \leq \Phi_2 - \Phi_{1i} - \Phi_{1i}^T$ 。因此 $-\mathbf{A}_i^T \left(\frac{\tau_m^2}{p_1} \mathbf{G}_{V1} + \frac{\tau_M^2}{p_1} \mathbf{G}_{V2} \right)^{-1} \mathbf{A}_i \leq \frac{\tau_m^2}{p_1} \mathbf{G}_{V1} + \frac{\tau_M^2}{p_1} \mathbf{G}_{V2} - \mathbf{A}_i^T - \mathbf{A}_i$ 。定义 $\tilde{\mathbf{K}}_i = \mathbf{K}_i \mathbf{A}_i$, 利用引理1并应用舒尔补引理, 定理2中的式(22)和式(24)分别保证了定理1中的式(10)和式(12)。至此, 定理得证。

3 仿真例子

考虑如图2所示的直流电机驱动负载模型, 建模方程为^[26]

$$\begin{cases} \dot{\omega}(t) = \frac{b_i}{J_i} \omega(t) + \frac{\mathbf{K}_t}{J_i} i(t), \\ \mathbf{u}(t) = \mathbf{K}_\omega \omega(t) + \mathbf{R} i(t), \end{cases}$$

式中 $\mathbf{u}(t)$ 、 $\omega(t)$ 、 $i(t)$ 、 $\mathbf{K}_t$ 、 $\mathbf{K}_\omega$ 、 $\mathbf{R}$ 分别为输入电压、轴速度、电流、转矩常数、电动势和电阻器, $b_i = b_m + \frac{b_{ci}}{n^2}$, $J_i = J_m + \frac{J_{ci}}{n^2}$, b_m 和 b_{ci} 是具有齿轮比 n 的阻尼比, J_m 和 J_{ci} 分别为电机和负载 i 的力矩。

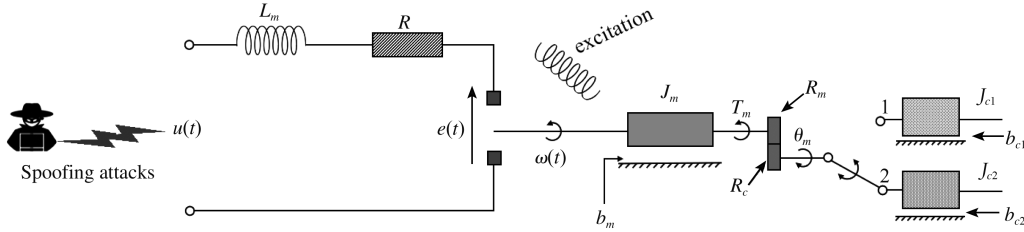


图2 欺骗攻击下直流电机驱动模型简图

Fig. 2 The sketch of DC motor drive model under spoofing attacks

令 $\mathbf{x}(t) = \begin{bmatrix} \omega(t) \\ i(t) \end{bmatrix}$, 同时考虑外部扰动项 $\boldsymbol{\varphi}(t) = 3e^{-0.2t} \sin(3t)$ 和欺骗攻击 $\mathbf{f}(t) = 0.2e^{-0.1t} \sin(t)$, 直流

电机驱动负载模型可重新表述为 $\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \dot{\mathbf{x}}(t) = \begin{bmatrix} -\frac{b_i}{J_i} & \frac{\mathbf{K}_t}{J_i} \\ \mathbf{K}_\omega & \mathbf{R} \end{bmatrix} \mathbf{x}(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix} (\mathbf{u}(t) + \mathbf{f}(t)) + \mathbf{W}_i \boldsymbol{\varphi}(t)$ 。系统

输出为 $\mathbf{z}(t) = \mathbf{G}_i \mathbf{x}(t)$, 其中 $\mathbf{G}_1 = [0.1 \ 0.1]^T$, $\mathbf{G}_2 = [0.1 \ 0.1]^T$ 。

令 $\mathbf{W}_1 = [0.1 \ 0.1]$, $\mathbf{W}_2 = [0.1 \ 0.1]$, $b_m = 1$, $b_{c1} = 100$, $b_{c2} = 240$, $J_m = 0.5$, $J_{c1} = 50$, $J_{c2} = 150$, $n = 10$, $\mathbf{K}_t = 3$, $\mathbf{K}_\omega = 1$, $\mathbf{R} = 1$, $\tau_m = 0.05$, $\tau_M = 0.15$, $\rho_0 = 0.1$, $\rho_1 = 0.7$, $\rho_2 = 0.8$, $p = 1$, $\tau_1 = 0.1$, $\tau_2 = 1$, $h = 0.1$, 转移率矩阵 $\boldsymbol{\Pi} = \begin{bmatrix} -0.8 & 0.8 \\ 1.2 & -1.2 \end{bmatrix}$ 。

设 $\mathbf{x}_0 = [-0.3 \ 0.2]^T$, 解定理2中的线性矩阵不等式(22)~(24), 得到 H_∞ 性能指标 $\gamma = 3$, 状态感知事件触发脉冲混杂反馈控制器(6)的增益和状态感知事件触发机制(3)的权重矩阵为:

$$\begin{aligned} \mathbf{K}_1 &= [-0.030 \ 6 \quad -0.081 \ 2], \mathbf{A}_1 = [-0.287 \ 8 \quad -0.278 \ 9], \boldsymbol{\Theta}_1 = \begin{bmatrix} 0.009 \ 5 & 0.002 \ 0 \\ 0.00 \ 20 & 0.001 \ 5 \end{bmatrix}, \\ \mathbf{K}_2 &= [-0.000 \ 6 \quad -0.003 \ 4], \mathbf{A}_2 = [-0.013 \ 8 \quad -0.339 \ 3], \boldsymbol{\Theta}_2 = \begin{bmatrix} 0.106 \ 7 & 0.002 \ 5 \\ 0.002 \ 5 & 0.001 \ 3 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

欺骗攻击下基于状态感知事件触发机制(3)的闭环奇异马尔可夫跳变混杂控制系统的状态轨迹、对应的数据释放瞬间和间隔分别如图3(a)和图3(b)所示。图4(a)显示了事件触发阈值 $\rho(t)$ 的演化, 从图中可以看出事件触发阈值 $\rho(t)$ 的大小可根据当前系统状态调整。图4(b)为对应的系统控制输入。

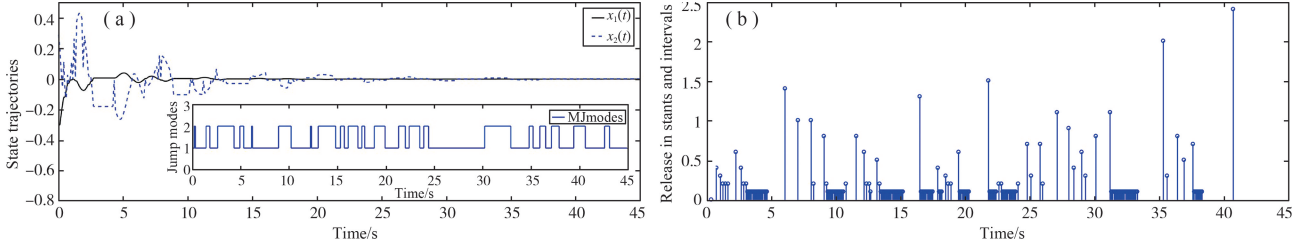


图3 状态感知事件触发机制下的闭环系统状态轨迹与数据释放瞬间和间隔图:(a) 状态轨迹;(b) 数据释放瞬间和间隔
Fig. 3 State trajectories of the closed-loop system and data release instants and intervals under state-sensitive event-triggered mechanism: (a) State trajectories; (b) Release instants and intervals of data

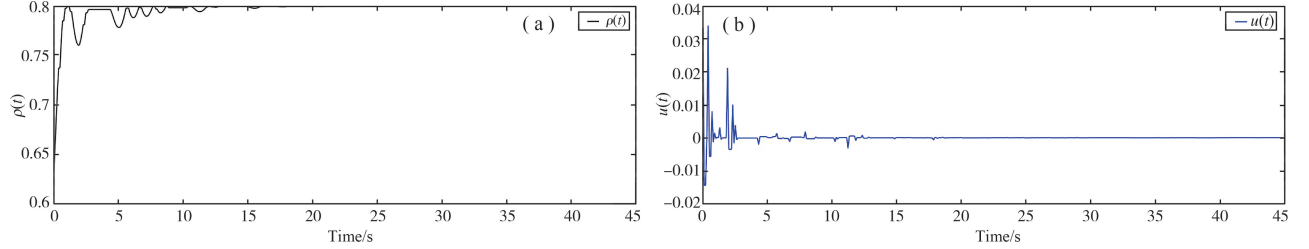


图4 状态感知事件触发机制(3)下的仿真结果:(a) 事件触发阈值的演化;(b) 控制输入
Fig. 4 Simulation results under the state-aware event-triggering mechanism (3): (a) Evolution of event-triggering threshold; (b) Control inputs

图5~8分别展示了阈值固定为0.8、0.6、0.4、0.2的静态触发机制下闭环奇异马尔可夫跳变混杂控制系统的状态轨迹与数据释放瞬间和间隔。图9(a~d)分别展示了阈值固定为0.8、0.6、0.4、0.2的静态触发机制下系统的控制输入。对比图3以及图5~8可以看出,达到相同的控制性能要求时,可根据当前系统状态调整事件触发阈值的模态相关状态感知事件触发机制比具有固定阈值的传统静态事件触发机制更加灵活。对比图3和图5发现,相比于具有较大固定阈值的事件触发器,状态感知事件触发器在系统演化的早期阶段或系统在受到外界干扰时可释放更多的数据包以寻求快速的瞬态响应和控制;而对比图3和图6~8发现,相比于具有较小固定阈值的事件触发器,状态感知事件触发器在系统接近稳态且没有任何干扰作用时将释放较少的数据包以减轻网络负担。

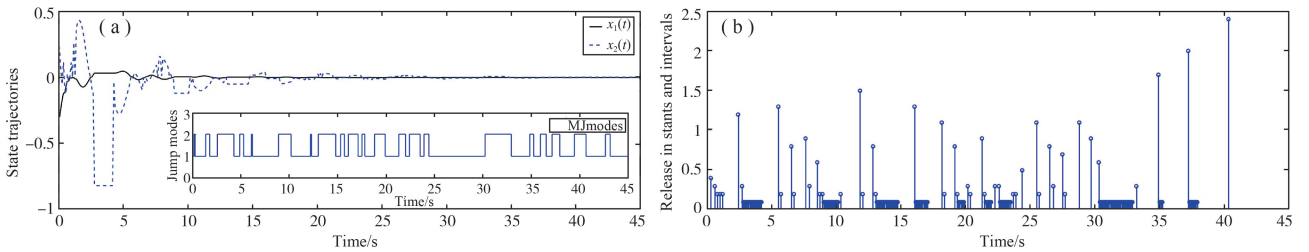


图5 $\tilde{\rho} = 0.8$ 的事件触发机制下的闭环系统状态轨迹与数据释放瞬间和间隔图:(a) 状态轨迹;(b) 数据释放瞬间和间隔
Fig. 5 State trajectories of closed-loop system and release instants and intervals of data under the event-triggered mechanism with $\tilde{\rho} = 0.8$: (a) State trajectories; (b) Release instants and intervals of data

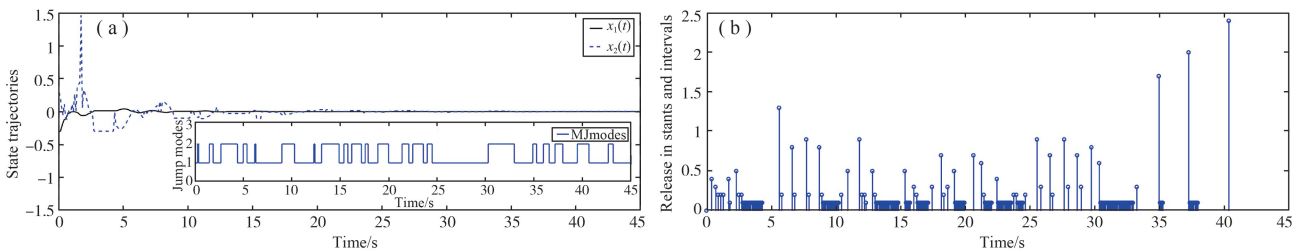


图6 $\tilde{\rho} = 0.6$ 的事件触发机制下的闭环系统状态轨迹与数据释放瞬间和间隔图:(a) 状态轨迹;(b) 数据释放瞬间和间隔
Fig. 6 State trajectories of closed-loop system and release instants and intervals of data under the event-triggered mechanism with $\tilde{\rho} = 0.6$: (a) State trajectories; (b) Release instants and intervals of data

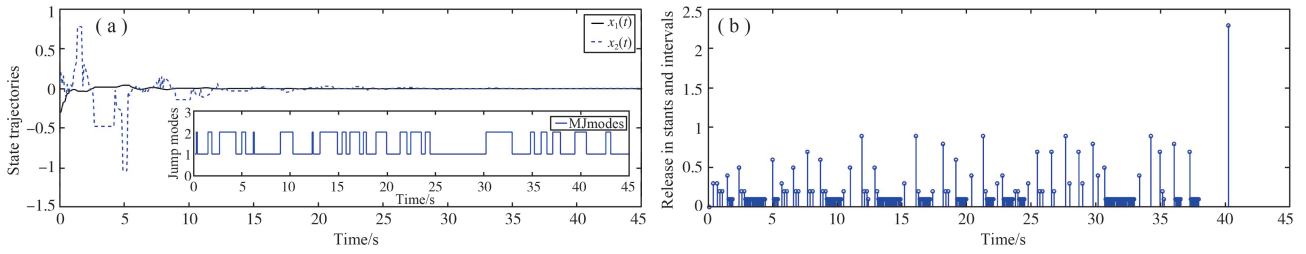


图 7 $\tilde{\rho} = 0.4$ 的事件触发机制下的闭环系统状态轨迹与数据释放瞬间和间隔图:(a) 状态轨迹;(b) 数据释放瞬间和间隔

Fig. 7 State trajectories of closed-loop system and release instants and intervals of data under the event-triggered mechanism with $\tilde{\rho} = 0.4$: (a) State trajectories; (b) Release instants and intervals of data

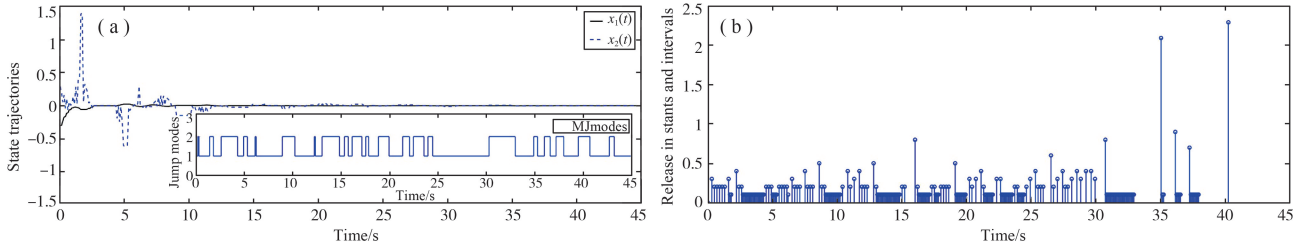


图 8 $\tilde{\rho} = 0.2$ 的事件触发机制下的闭环系统状态轨迹与数据释放瞬间和间隔图:(a) 状态轨迹;(b) 数据释放瞬间和间隔

Fig. 8 State trajectories of closed-loop system and release instants and intervals of data under the event-triggered mechanism with $\tilde{\rho} = 0.2$: (a) State trajectories; (b) Release instants and intervals of data

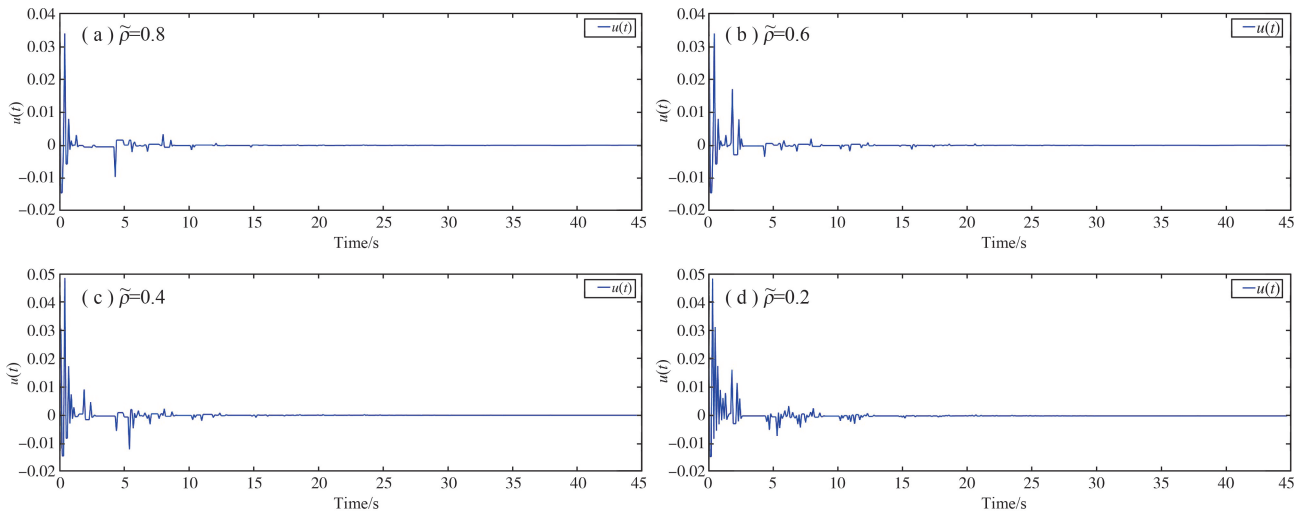


图 9 不同固定阈值事件触发机制下的控制输入

Fig. 9 Control inputs under event-triggered mechanisms with different fixed-threshold

表 1 不同阈值的事件触发机制下对应的数据传输的数量

Table 1 Number of data transferred corresponding to event-triggered mechanisms with different thresholds

Number of trials	1	2	3	4	5	6
$\rho(t)$	163	156	182	131	189	125
$\tilde{\rho} = 0.8$	157	156	182	131	185	25
$\tilde{\rho} = 0.6$	181	173	183	150	200	155
$\tilde{\rho} = 0.4$	190	185	197	160	214	180
$\tilde{\rho} = 0.2$	211	215	214	180	228	195

表 1 展示了 6 次实验中状态感知事件触发机制以及具有固定阈值 $\tilde{\rho}=0.8$ 、 $\tilde{\rho}=0.6$ 、 $\tilde{\rho}=0.4$ 和 $\tilde{\rho}=0.2$ 的

事件触发机制下对应的数据传输的数量,从表中可以看出,本文所提出的状态感知事件触发机制比具有固定阈值的传统静态事件触发机制更加灵活,相比于固定阈值较小的事件触发机制可以减少数据传输数量,从而节约通信资源。

4 结论

本文研究了奇异马尔可夫跳变系统在欺骗攻击和状态感知事件触发机制下的 H_∞ -脉冲混杂反馈控制问题。首先,基于周期采样提出了一种根据当前系统状态自适应地调整事件触发阈值的模态相关状态感知事件触发机制,进一步权衡了控制性能和通信效率。其次,通过构造脉冲时间相关和马尔可夫跳变模态相关的 L-K 泛函,基于奇异值分解技术,获得了奇异马尔可夫跳变系统在欺骗攻击下的 H_∞ 随机容许性准则。接着,在 LMI 框架下实现了状态感知事件触发器和 H_∞ -脉冲混杂反馈控制器的协同设计。最后通过直流电机驱动负载的仿真实例验证了本文方法的有效性。

参 考 文 献

- [1] XU S, LAM J. Robust control and filtering of singular systems[M]. Berlin: Springer-Verlag, 2006.
- [2] CHEN W H, ZHENG W X, LU X. Impulsive stabilization of a class of singular systems with time-delays[J]. Automatica, 2017, 83: 28-36.
- [3] ZHUANG G, XIA J, FENG J E, et al. Admissibilization for implicit jump systems with mixed retarded delays based on reciprocally convex integral inequality and Barbalat's lemma[J]. IEEE Trans Syst Man Cybern Syst, 2021, 51 (11): 6808-6818.
- [4] 赵勇, 张维海. 奇异 Itô 随机系统几个重要基础问题的研究进展[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2017, 9(3): 237-245.
- [5] ZHANG B, ZHUANG G. Extended dissipative control and filtering for singular time-delay systems with Markovian jumping parameters [C]. // Stability, Control and Application of Time-Delay Systems, 2019.
- [6] XING M, WANG Y, ZHUANG G, et al. Dynamic event-based dissipative asynchronous control for T-S fuzzy singular Markov jump LPV systems against deception attacks[J]. Nonlinear Dyn, 2021, 103 : 1709-1731.
- [7] 任乘乘, 宋军, 何舒平. 基于扩展状态观测器的随机隐 Markov 正跳变系统有限时间异步控制[J]. 控制理论与应用, 2021, 38(11): 1891-1900.
- [8] 陈国梁. 马尔科夫跳变系统时滞相关无源性分析[J]. 聊城大学学报(自然科学版), 2015, 28(1): 15-18.
- [9] 林玉倩, 尹月霞, 孙梦, 等. 时变时滞随机马尔科夫跳变系统非脆弱动态输出反馈控制器设计[J]. 聊城大学学报(自然科学版), 2021, 34(3): 1-11.
- [10] WU Z G, SHI P, SHU Z, et al. Passivity-based asynchronous control for Markov jump systems[J]. IEEE Trans Autom Control, 2017, 62 (4): 2020-2025.
- [11] 庄光明, 张化生, 赵军圣, 等. 中立随机马尔科夫跳变系统延迟反馈控制器设计[J]. 聊城大学学报(自然科学版), 2018, 31(4): 65-71.
- [12] PENG C, SUN H. Switching-like event-triggered control for networked control systems under malicious denial of service attacks[J]. IEEE Trans Autom Control, 2020, 65 (9): 3943-3949.
- [13] 彭高丰, 蒋伟进. 具有积分二次约束属性的网络控制系统 H_∞ 容错控制[J]. 控制理论与应用, 2016, 33(3): 406-412.
- [14] ZHANG H, ZHAO N, WANG S, et al. Improved event-triggered dynamic output feedback control for networked T-S fuzzy systems with actuator failure and deception attacks[J]. IEEE Trans Cybern, 2023, 53(12): 7989-7999.
- [15] SUN H, PENG C, WANG Y, et al. Output-based resilient event-triggered control for networked control systems under denial of service attacks[J]. IET Control Theory Appl, 2019, 13 (16): 2521-2528.
- [16] HU J, ZHANG H, LIU H, et al. A survey on sliding mode control for networked control systems[J]. Int J Syst Sci, 2021, 52 (6): 1129-1147.
- [17] XING M, WU Y, ZHUANG G, et al. Dynamic event-based sliding mode security control for singular Semi-Markov jump LPV systems against deception attacks[J]. ISA Trans, 2023, 133: 116-133.
- [18] ZHENG S, SHU S, Lin F. Modeling and control of discrete event systems under joint sensor-actuator cyber attacks[C]. //2021 6th International Confereuce on Automatiem, Control and Robotics Engineering, Dalian, China, 2021.

- [19] 张岱峰, 段海滨. 恶意攻击下基于分布式稀疏优化的安全状态估计[J]. 自动化学报, 2021, 47(4): 813-824.
- [20] CHENG J, XIE L, ZHANG D, et al. Novel event-triggered protocol to sliding mode control for singular semi-Markov jump systems[J]. Automatica, 2023, 151: 110906.
- [21] CAO Z, NIU Y, ZOU Y. Adaptive neural sliding mode control for singular semi-Markovian jump systems against actuator attacks[J]. IEEE Trans Syst Man Cybern Syst, 2021, 51 (3): 1523-1533.
- [22] WANG K, TIAN E, LIU J, et al. Resilient control of networked control systems under deception attacks: a memory-event-triggered communication scheme[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2020, 30(4): 1534-1548.
- [23] ZHANG N, ZHAO N, WANG S, et al. Improved event-triggered dynamic output feedback control for networked T-S fuzzy systems with actuator failure and deception attacks[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2023, 53(12): 7989-7999.
- [24] CAO J, DING D, LIU J, et al. Hybrid-triggered-based security controller design for networked control system under multiple cyber attacks[J]. Information Sciences, 2021, 548: 69-84.
- [25] NING Z, WANG T, ZHANG K. Dynamic event-triggered security control and fault detection for nonlinear systems with quantization and deception attack[J]. Information Sciences, 2022, 594: 43-59.
- [26] JIANG B, LU J, LI X, et al. Event-triggered impulsive stabilization of systems with external disturbances[J]. IEEE Trans Autom Control, 2022, 67 (4): 2116-2122.
- [27] 赵光同, 曹亮, 周琪, 等. 具有未建模动态的互联大系统事件触发自适应模糊控制[J]. 自动化学报, 2021, 47(8): 1932-1942.
- [28] LIU H, LI X. Exponential stabilization of nonlinear impulsive systems via output-based event-triggered control[J]. IEEE Trans Syst Man Cybern Syst, 2023, 53 (5): 2594-2603.
- [29] 陈惠英, 刘仁伟, 夏卫锋, 等. Markov 跳变系统的非同步事件触发耗散容错控制[J]. 控制理论与应用, 2023, 40(05): 874-882.
- [30] YU Z, ZHANG W, MA L. Finite-time consensus for the second-order leader-following nonlinear multi-agent system with event-triggered communication[J]. Journal of the Franklin Institute, 2022, 359(12): 6486-6502.
- [31] YU Z, ZHANG W. Almost sure consensus of stochastic nonlinear multi-agent systems via event-triggered control[J]. Nonlinear Dynamics, 2023, 111(4): 3469-3478.
- [32] SUN H T, ZHANG P, PENG C. Output-sensitive event-triggered path following control of autonomous ground vehicles under stochastic FDI attacks[J]. Journal of the Franklin Institute, 2023, 360 (3): 2307-2325.
- [33] JIANG B, WU Z, KARIMI H R. A distributed dynamic event-triggered mechanism to HMM-based observer design for H_∞ sliding mode control of Markov jump systems[J]. Automatica, 2022, 142: 110357.
- [34] LI X, ZHANG T, WU J. Input-to-state stability of impulsive systems via event-triggered impulsive control[J]. IEEE Trans Cybern, 2022, 52 (7): 7187-7195.
- [35] CHEN W H, JIANG R, LU X, et al. H_∞ control of linear singular time-delay systems subject to impulsive perturbations[J]. IET Control Theory Applications, 2017, 11(3): 420-428.
- [36] LI X, ENG D, CAO J. Lyapunov stability for impulsive systems via event-triggered impulsive control[J]. IEEE Trans Autom Control, 2020, 65 (11): 4908-4913.
- [37] LI X, LI P. Input-to-state stability of nonlinear systems: event-triggered impulsive control[J]. IEEE Trans. Autom. Control, 2022, 67 (3): 1460-1465.
- [38] RONG N, WANG Z. Event-based impulsive control of IT2 T-S fuzzy interconnected system under deception attacks[J]. IEEE Trans Fuzzy Syst, 2021, 29 (6): 1615-1628.
- [39] GE X, HAN Q L, ZHANG X M, et al. Dynamic event-triggered control and estimation: a survey[J]. International Journal of Automation and Computing, 2021, 18 (6): 857-886.

(责任编辑:刘庆松)