

切换LPV系统的抗攻击无扰切换控制

齐义文[†], 唐意雯

(沈阳航空航天大学 自动化学院, 辽宁 沈阳 110136)

摘要: 本文针对遭受切换冲击和网络数据注入攻击影响的切换线性变参(LPV)系统, 给出保护网络信息安全传输的抗攻击机制, 提出一种无扰切换控制方法. 首先, 设计一种新颖的基于编码/解码器的抗攻击机制, 可抵御恶意注入攻击信号对系统反馈通信的干扰. 基于此, 建立切换LPV系统的抗攻击动态输出反馈闭环控制模型. 考虑到模式之间的无扰过渡问题, 给出与动态输出反馈控制设计互为补充的, 满足无扰切换设计需求和 H_∞ 性能指标的控制增益可行条件. 在本文提出的控制律下, 进一步获取了能保证切换LPV系统指数稳定性的充分条件. 最后, 通过数值仿真验证所提出抗攻击无扰切换控制方法的有效性.

关键词: 切换LPV系统; 切换控制器; 无扰切换控制; 抗攻击; 编码/解码器

引用格式: 齐义文, 唐意雯. 切换LPV系统的抗攻击无扰切换控制. 控制理论与应用, 2023, 40(2): 283–290

DOI: 10.7641/CTA.2022.20180

Anti-attack bumpless switching control for switched LPV systems

QI Yi-wen[†], TANG Yi-wen

(School of Automation, Shenyang Aerospace University, Shenyang Liaoning 110136, China)

Abstract: This paper considers the switched linear parameter varying (LPV) systems that suffer from switching bump and network data injection attack. An anti-attack mechanism is proposed to ensure the safe transmission of network information, and a switching bumpless control method is given. First, a novel anti-attack mechanism based on the encoder/decoder is designed to resist the impact of malicious injection signals on system feedback communication. Then, a closed-loop control model of anti-attack dynamic output feedback for the switched LPV systems is established. Considering the problem of bumpless transition between different modes, the controller gain design condition that satisfies the requirements of bumpless switching and the H_∞ performance is given. The above condition is a complementary design to dynamic output feedback control. Under the proposed control law, sufficient conditions to ensure the exponential stability of the switched LPV systems are derived. Finally, numerical simulations are given to verify the effectiveness of the proposed anti-attack bumpless switching control method.

Key words: switched LPV systems; switch controller; bumpless switching control; anti-attack; encoder/decoder

Citation: QI Yiwen, TANG Yiwen. Anti-attack bumpless switching control for switched LPV systems. *Control Theory & Applications*, 2023, 40(2): 283–290

1 引言

线性变参(linear parameter varying, LPV)系统本质是一种基于增益调度的非线性动态系统, 具有广泛的应用背景. 在文献[1]中, LPV系统第1次被提出用来描述控制器增益与系统参数动态变化的因果关系. LPV系统的提出解决了传统插值法逼近时变增益的困难问题. 此外, LPV系统的增益调度由时变参数来实现^[2], 即调度变量, 能根据在线可测的外部参数动态调整系统矩阵. 由于LPV系统可更简便、更贴近描述复杂系统的非线性特征, 被应用于许多工业场景中^[3].

然而, 对于参数变化范围大的复杂系统, 若在整个参数空间只采用一个LPV系统来描述, 仍比较保守, 无法达到所需的高模型精度和控制水平. 切换系统能够为此类情况下的建模提供一个良好选择^[4–5]. 对此, 由多个LPV子系统构成, 且具有混杂特性的切换LPV系统在文献[6]中被提出. 文献[7]利用多李雅普诺夫函数对切换LPV系统开展了研究, 建立了切换LPV系统的稳定性分析框架. 此外, H_∞ 控制是受外部扰动影响下保证系统鲁棒性的一种有效方法. 文献[8]采用了 H_∞ 控制方法, 使切换LPV系统获得了内部的稳定

收稿日期: 2022–03–13; 录用日期: 2022–07–19.

[†]通信作者. E-mail: qiyiwen@gmail.com.

本文责任编辑: 龙离军.

国家自然科学基金项目(61873172, 61811530036), 中央引导地方科技发展专项项目(2021JH6/10500162)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (61873172, 61811530036) and the Special Fund for Central Government Guides Local Science and Technology Development of China (2021JH6/10500162).

性和外部的相容性,保证了切换系统在遭受扰动时的稳定能力.

由于切换LPV系统的模式变换依靠所设计的切换律,会不可避免出现切换冲击(不连续)问题.控制器的任意切换是发生切换冲击的主要原因^[9].当前,切换控制理论的研究大都考虑理想情况,即为了获得最优切换控制器,对控制信号切换时的振幅不施加限制.但这会导致严重的控制不连续现象,模式切换时控制信号会阶跃式上升或下降,令被控系统产生不理想的瞬态响应,影响系统性能和控制效果,这对很多实际系统是绝对不可接受的^[10].为了解决此问题,Arehart和Wolovich^[11]首次提出了无扰切换概念,在他们设计的慢切换律下,切换冲击问题得以减轻.文献[12]给出了一个控制约束条件来抑制切换冲击造成的影响.对于切换LPV系统,由于调度变量的时变特性,切换冲击现象会更加频繁地发生,对其开展无扰切换控制研究极具理论和应用意义^[13].

目前,工业系统的数字化、网络化、智能化水平快速提升,许多实际信息物理系统依赖于网络传输^[14].在网络化背景下,控制系统的网络安全和通讯高效性面临严峻挑战.攻击者为达到某种恶意目的,采取欺骗、虚假数据注入和DoS等攻击方式,对网络传输数据进行窥探、干扰、截取和替换^[15-16].其中,数据注入攻击是网络控制系统面临的重要威胁之一,攻击者能够篡改系统正常数据,注入恶意数据,即使是小信号的注入攻击,经过多步累积也会对系统稳定性造成不可逆的影响^[17-18].然而,文献中,对切换LPV系统抗注入攻击问题的研究仍为空白.针对通讯能力有限的信息物理网络,提出了静态和动态编码/解码器结构,二者根据量化器参数是否可以动态调整来区分^[19-20].其中动态编码方法应用较广泛,文献[21-22]分别提出了两种动态量化编码方法,二者分别利用差分量化编码技术和“放大/缩小”量化编码技术,大大减少了信息量.

基于以上考虑,针对切换冲击和数据注入攻击问题,本文提出一种基于编码/解码器的抗攻击无扰切换控制方法.根据编码器对系统输出的编码,解码器在解码过程中能够通过伸缩因子有效防御恶意攻击信号.针对切换LPV系统参数摄动问题,本文采用一种基于调度变量的动态输出反馈控制器和无扰控制增益限制条件.针对参数摄动下切换LPV系统的稳定性分析问题,本文构造了一种参数依赖的多Lyapunov函数,得到了保证切换LPV系统指数稳定和无扰切换性能的充分条件,获得了抗攻击无扰切换控制增益设计方法.

2 问题描述

2.1 切换LPV系统模型

考虑如下切换线性LPV系统:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A_{\sigma(t)}(\rho(t))x(t) + B_{\sigma(t)}(\rho(t))u(t) + \\ \quad E_{\sigma(t)}(\rho(t))\omega(t), \\ y(t) = C_{\sigma(t)}(\rho(t))x(t), \\ z(t) = D_{\sigma(t)}(\rho(t))x(t) + G_{\sigma(t)}(\rho(t))\omega(t), \end{cases} \quad (1)$$

其中: $x(t) \in \mathbb{R}^{n_x}$ 是系统状态, $u(t) \in \mathbb{R}^{n_u}$ 是系统的控制输入, $\omega(t) \in \mathbb{R}^{n_\omega} \in L_2[0, \infty)$ 是满足条件 $\|\omega(t)\| \leq W\|x(t)\|$ 的外部扰动, W 是非负常数, $y(t) \in \mathbb{R}^{n_y}$ 是系统输出, $z(t) \in \mathbb{R}^{n_z}$ 是控制输出, 切换信号用分段右连续函数 $\sigma(t): [0, +\infty) \rightarrow N = \{1, 2, \dots, N\}$ 来表示. 并且, $A_{\sigma(t)}(\rho(t))$, $B_{\sigma(t)}(\rho(t))$, $C_{\sigma(t)}(\rho(t))$, $D_{\sigma(t)}(\rho(t))$, $E_{\sigma(t)}(\rho(t))$ 和 $G_{\sigma(t)}(\rho(t))$ 是关于调度变量 $\rho(t) = \{\rho_1(t), \rho_2(t), \dots, \rho_m(t)\} (m = 1, 2, \dots)$ 的参数依赖矩阵, 具体表达形式为

$$\begin{aligned} A_{\sigma(t)}(\rho(t)) &= A_{\sigma(t)0} + \sum_{s=1}^m \rho_s(t) A_{\sigma(t)s}, \\ B_{\sigma(t)}(\rho(t)) &= B_{\sigma(t)0} + \sum_{s=1}^m \rho_s(t) B_{\sigma(t)s}, \\ C_{\sigma(t)}(\rho(t)) &= C_{\sigma(t)0} + \sum_{s=1}^m \rho_s(t) C_{\sigma(t)s}, \\ D_{\sigma(t)}(\rho(t)) &= D_{\sigma(t)0} + \sum_{s=1}^m \rho_s(t) D_{\sigma(t)s}, \\ E_{\sigma(t)}(\rho(t)) &= E_{\sigma(t)0} + \sum_{s=1}^m \rho_s(t) E_{\sigma(t)s}, \\ G_{\sigma(t)}(\rho(t)) &= G_{\sigma(t)0} + \sum_{s=1}^m \rho_s(t) G_{\sigma(t)s}. \end{aligned}$$

假设 1 假设 $\rho(t) \in \wp$, $\dot{\rho}(t) \in \Im$ 且满足

$$\begin{cases} \wp = \{\rho_s \in \mathbb{R}^m : \underline{\rho}_s \leq \rho_s \leq \bar{\rho}_s, s = \{1, 2, \dots, m\}\}, \\ \Im = \{\dot{\rho}_s \in \mathbb{R}^m : \underline{\dot{\rho}}_s \leq \dot{\rho}_s \leq \bar{\dot{\rho}}_s, s = \{1, 2, \dots, m\}\}, \end{cases} \quad (2)$$

其中 $\dot{\rho}(t)$ 是 $\rho(t)$ 的导数.

注 1 调度变量 $\rho(t)$ 用来模拟系统内部的参数摄动, 过大或过快的摄动会导致系统不稳定, 甚至不可控, 使控制设计失去意义. 假设1中的条件可合理限制摄动的幅值和频率, 采用的是文献[23]中的描述方法. 为了简洁和便于阅读, $\rho(t)$ 和 ρ 将在下文中混用.

本文采用采样控制方式, 具体为 $y(t) = y(t_k)$, $\forall t \in [t_k, t_{k+1})$, 其中 $t_k = kh$, t_k 表示采样点, h 是采样周期, $k = 1, 2, \dots$.

假设 2 系统输出 $y(t)$ 只在采样时刻可测量.

注 2 实际系统常存在状态 $x(t)$ 不完全可测问题, 因此相比于状态反馈, 利用可测输出 $y(t)$ 来进行控制设计, 保守性更低, 可应用性更好.

图1给出了切换LPV系统的抗攻击无扰切换控制框架. 首先, 系统输出 $y(t)$ 被采样为 $y(t_k)$. 然后, 对量化器输出的 $Q(y(t_k))$ 进行编码. 编码后的数据通过受到数据注入攻击 $f(t)$ 的网络传输给解码器. 最后, 解码后的数据传送给动态输出反馈控制器. 在该框架中, 每个切换LPV子系统和动态输出反馈子控制器的工

作顺序均由切换信号 $\sigma(t)$ 管理。

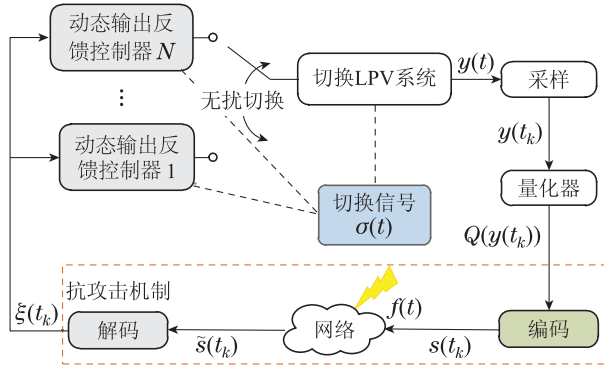


图1 数据注入攻击下切换LPV系统的抗攻击无扰切换控制

Fig. 1 Framework of anti-attack bumpless switching control of switched LPV systems under data injection attack

下面, 逐一描述本文所考虑的网络资源受限模型(量化、编码)、攻击模型和无扰切换性能定义。

2.2 量化模型

考虑到现实中通信带宽有限和通讯成本的限制, 本文采用基于编码方案的量化技术对节点之间的通讯信息进行预处理. 给定 n 维量化器 $Q(y(t_k)) = [Q(y^1(t_k)) \ Q(y^2(t_k)) \ \cdots \ Q(y^n(t_k))]^T$, 对于系统输出 $y(t_k)$ 的任意分量 $y^p(t_k)$ ($p = 1, 2, \dots, n$), 其量化函数 $Q(y(t_k)) : R \rightarrow \Lambda = -v, -v+1, \dots, 0, 1, 2, \dots, v$ 的定义如下:

$$Q(y^p(t_k)) = \begin{cases} 0, & -\frac{1}{2} \leq y^p(t_k) < \frac{1}{2}, \\ l, & -\frac{2l-1}{2} \leq y^p(t_k) < \frac{2l+1}{2}, \\ v, & y^p(t_k) \geq \frac{2v+1}{2}, \\ -Q(y^p(t_k))y^p(t_k) < -\frac{1}{2}. \end{cases} \quad (3)$$

上述量化器能将 $y(t_k)$ 转换成整数, 从而降低信息传输所需比特数. 该量化器的量化水平为 $2v+1$, 在此水平下信息传输所需比特数为 $n \log_2^{2v+1}$. 此外, 还可通过降低量化水平 $2v+1$ 来达到进一步减少比特数和节约带宽占用的目的。

2.3 编码器

为节省网络资源, 量化水平的选取非常重要. 通常, 较小的量化水平能达到较高的通讯效率, 但需要解决小量化水平导致的量化器饱和问题. 动态编码器能够在降低量化水平的同时确保量化器不饱和. 因此, 本文采用动态编码方案. 在区间 $[t_k, t_{k+1})$ 内, 设计通讯通道内编码器如下:

$$\begin{cases} \hat{y}_0(t_0) = 0, \\ s(t_k) = Q\left(\frac{y(t_k) - \hat{y}(t_k)}{b(t_k)}\right), \\ \hat{y}(t_k) = b(t_{k-1})s(t_k) + \hat{y}(t_{k-1}), \end{cases} \quad (4)$$

其中: $\hat{y}(t_k)$ 是编码器内部变量; $y(t_k)$ 和 $s(t_k)$ 分别是

编码器的输入和输出; $b(t_k)$ 是伸缩因子, 用于放大或缩小 $y(t_k) - \hat{y}(t_k)$. 当 $y(t_k) - \hat{y}(t_k)$ 的变化较大时, 伸缩因子保证了 $\frac{y(t_k) - \hat{y}(t_k)}{b(t_k)}$ 的变化不会太大, 避免了较大振幅引起比特数变多的现象, 可有效减少不必要的网络带宽利用。

2.4 数据注入攻击模型

数据注入攻击通过向网络通讯通道注入恶意信号使系统数据发生偏差, 达到破坏系统性能的目的. 定义注入到网络传输数据 $s(t)$ 中的恶意信号为

$$f(t) = [f^1(t) \ f^2(t) \ \cdots \ f^n(t)]^T, \quad (5)$$

其中 n 表示系统状态的维数. 则可建立受到注入攻击影响的数据数学模型为

$$\tilde{s}(t) = s(t) + f(t). \quad (6)$$

假设3 对于恶意数据注入攻击, 为了达到所期望的目标, 如隐身和持续攻击, 必须限制攻击信号的大小, 即

$$f^T(t)f(t) \leq \varepsilon x^T(t)x(t).$$

注3 对于假设3, 本文采用文献[24]中的描述方式来合理限制攻击信号的大小. 该条件表征的是系统性能和攻击信号之间的关系, 攻击者拥有状态变量的信息越多, 就可更有针对性地影响系统性能. 同时, 恶意攻击的能量是有限的, 为了实现隐身性, 也必须限制攻击信号强度。

从遭受到恶意数据注入攻击的LPV系统安全性角度考虑, 攻击防御策略是必不可少的. 在本文设计的编码和解码器协同作用下(见图2), 切换LPV系统能够实现防御数据注入攻击的功能。

2.5 解码器

信息接收端解码器设计如下:

$$\begin{cases} \hat{\xi}_0(t_0) = 0, \\ \xi(t_k) = b(t_k)s(t_k) + \xi(t_{k-1}), \end{cases} \quad (7)$$

其中: $\xi(t_k)$ 是解码器内部变量, $s(t_k)$ 和 $\xi(t_k)$ 分别是解码器的输入和输出。

如图2所示, 在编码和解码器协同作用下, 系统输出 $y(t_k)$ 先由编码器进行编码, 编码后的数据 $s(t_k)$ 通过网络传输至解码器. 在此过程中, 数据可能遭受网络攻击 $f(t_k)$. 对此, 本文考虑两种情况:

情况1 有攻击时,

$$\xi(t_k) = b(t_k)f(t_k) + b(t_k)\eta(t_k) + y(t_k).$$

情况2 无攻击时,

$$\xi(t_k) = b(t_k)\eta(t_k) + y(t_k).$$

其中 $\eta(t_k)$ 是 t_k 时刻的量化误差, 表示为

$$\eta(t_k) = Q\left(\frac{y(t_k) - \hat{y}(t_k)}{b(t_k)}\right) - y(t_k) + \hat{y}(t_k).$$

由上式可知, 当没有注入攻击时, 实际输出 $\xi(t_k)$ 与系统输出 $y(t_k)$ 的差值是伸缩因子 $b(t_k)$ (图2中表示为 b_k)与量化误差 $\eta(t_k)$ 的乘积. 为保证实际输出 $\xi(t_k)$ 与系统输出 $y(t_k)$ 的差值收敛到0, 即两者保持一致, 需要选择一个合适的伸缩因子满足 $b(t_k) \rightarrow 0$. 由此, 使得实际输出带有连续衰减的传输误差 $y(t_k) - \xi(t_k)$, 保证了良好的精确性. 而且, 在 $b(t_k) \rightarrow 0$ 约束下, 数据注入攻击 $f(t_k)$ 与 $b(t_k)$ 的乘积将趋于0, 以此来抵御注入攻击对切换LPV系统性能的影响.

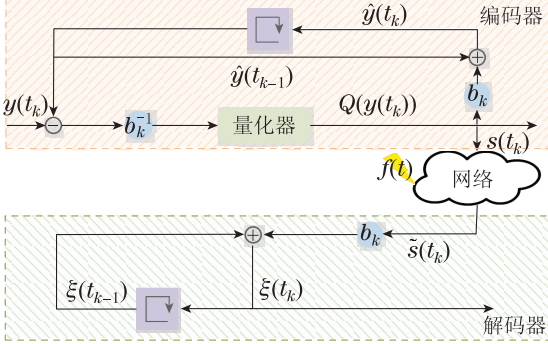


图2 基于编码器/解码器的抗攻击框架

Fig. 2 Framework of anti-attack based on encoder/decoder

2.6 动态输出反馈控制器

本文考虑如下动态输出反馈控制器结构:

$$\begin{cases} \dot{x}_c(t) = A_{c\sigma(t)}(\rho(t))x_c(t) + B_{c\sigma(t)}(\rho(t))\xi(t), \\ u(t) = K_{c\sigma(t)}(\rho(t))x_c(t), \end{cases} \quad (8)$$

其中: $x_c(t)$ 为反馈控制器状态, $A_{c\sigma(t)}(\rho(t))$, $B_{c\sigma(t)}(\rho(t))$ 和 $K_{c\sigma(t)}(\rho(t))$ 是依赖调度变量 $\rho(t)$ 且维数相容的待定矩阵.

2.7 无扰切换性能的定义

控制信号在切换点处可能发生巨大跳变, 这种跳变被称为切换控制冲击. 为了实现控制的平稳切换, 需要控制器(8)具备无扰切换能力, 这等价于使控制输入 $K_{ci}(\rho(t))x_c(t)$ 和 $K_{cj}(\rho(t))x_c(t)$ 之间的差异足够小, 参考文献[25], 给出如下无扰切换性能的定义:

$$\| [K^*(\rho(t)) - K_{ci}(\rho(t))]x_c(t) \| \leq \theta_i \| x_c(t) \|, \quad (9)$$

其中: $K^*(\rho(t))$ 是用于实现控制振幅限制的控制增益, 若所有子控制器的增益 $K_{ci}(\rho(t))$ 与 $K^*(\rho(t))$ 足够接近, 那么切换点两侧的控制冲击就会被抑制在很小的范围, 达到无扰切换的目的.

注4 $u^*(t) = K^*(\rho(t))x_c(t)$ 是一个没有实际作用于系统(1)的虚拟控制器. 由此, 在条件(9)的限制下, 任意离线和在线控制器输出间的差值都是有限的.

2.8 闭环系统模型

将控制器(8)代入到系统(1)中, 得到如下闭环切换系统:

$$\dot{\bar{x}}(t) = \bar{A}_{\sigma(t)}(\rho(t))\bar{x}(t) + \bar{B}_{\sigma(t)}(\rho(t))v(t), \quad (10)$$

其中: $\bar{x}(t) = [x^T(t) \ x_c^T(t)]^T$, $v(t) = [\omega^T(t) \ \eta^T(t)]^T$,

$$\bar{A}_{\sigma(t)} = \begin{bmatrix} A_{\sigma(t)} & B_{\sigma(t)}C_{c\sigma(t)} \\ B_{c\sigma(t)}C_{\sigma(t)} & A_{c\sigma(t)} \end{bmatrix},$$

$$\bar{B}_{\sigma(t)} = \begin{bmatrix} E_{\sigma(t)} & 0 \\ 0 & B_{c\sigma(t)}b(t_k) \end{bmatrix}.$$

3 可行性与 H_∞ 性能分析

本文研究的主要问题是切换LPV系统的抗攻击无扰切换 H_∞ 控制. H_∞ 性能定义如下:

定义1 对给定的 $\gamma > 0$, 称切换LPV系统(10)

具有 H_∞ 性能, 若其满足

1) 当 $\omega(t) = 0$ 时, 系统是指数稳定的;

2) 当 $\omega(t) \neq 0$ 时, 系统具有不超过 γ 的有限 H_∞ 增益, 即在零初始条件下, 对于任意 $\omega(t) \in L_2[0, \infty)$ 有

$$\int_0^\infty e^{-ct} z^T(t)z(t)dt \leq \gamma^2 \int_0^\infty \omega^T(t)\omega(t)dt. \quad (11)$$

定理1 对于任意 $i, j \in N$, 给定正常数 γ 和常数 θ_i, ε , 存在对称正定矩阵 $P_{1i}(\rho)$ 和 $P_{2i}(\rho)$, 满足

$$\Psi_{1i} = \begin{bmatrix} \Sigma_{1i} & \Sigma_{2i} & P_{1i}(\rho)E_i(\rho) & 0 & D_i(\rho) \\ * & \Sigma_{3i} & 0 & \Sigma_{4i} & 0 \\ * & * & -\gamma^2 I & 0 & G_i(\rho) \\ * & * & * & \varepsilon I & 0 \\ * & * & * & * & I \end{bmatrix} < 0, \quad (12)$$

$$\Psi_{2i} = \begin{bmatrix} I & K^*(\rho) - K_{ci}(\rho) \\ * & -\theta_i I \end{bmatrix} < 0, \quad (13)$$

$$P_{1i}(\rho) \leq \mu P_{1j}(\rho), \quad P_{2i}(\rho) \leq \mu P_{2j}(\rho), \quad (14)$$

其中:

$$\Sigma_{1i} = A_i^T(\rho)P_{1i}(\rho) + P_{1i}(\rho)A_i(\rho) + \dot{\rho} \frac{\partial P_{1i}(\rho)}{\partial \rho},$$

$$\Sigma_{2i} = P_{1i}(\rho)B_i(\rho)K_{ci}(\rho) + C_i^T(\rho)B_{ci}^T(\rho)P_{2i}(\rho),$$

$$\Sigma_{3i} = A_{ci}^T(\rho)P_{2i}(\rho) + P_{2i}(\rho)A_{ci}(\rho) + \dot{\rho} \frac{\partial P_{2i}(\rho)}{\partial \rho},$$

$$\Sigma_{4i} = P_{2i}(\rho)B_{ci}(\rho)b(t_k),$$

切换信号满足平均驻留时间条件

$$\tau_a^* = \frac{\ln \mu}{\alpha} < \tau_a, \quad (15)$$

则闭环切换LPV系统(10)具有 H_∞ 性能, 且满足无扰切换性能(9).

3.1 Lyapunov函数设计

为了分析切换LPV系统的稳定性, 本文采用参数依赖的多Lyapunov函数, 定义如下:

$$V_{\sigma(t)}(\bar{x}(t)) = \bar{x}^T(t)P_{\sigma(t)}(\rho)\bar{x}(t) = x^T(t)P_{1\sigma(t)}(\rho)x(t) + x_c^T(t)P_{2\sigma(t)}(\rho)x_c(t), \quad (16)$$

其中 $P_{\sigma(t)} = \text{diag}\{P_{1\sigma(t)}, P_{2\sigma(t)}\}$.

对Lyapunov函数(16)求导, 可得

$$\begin{aligned}
\dot{V}_i(\bar{x}(t)) = & \dot{x}^T(t)P_{1i}(\rho)x(t) + x^T(t)P_{1i}(\rho)\dot{x}(t) + \\
& x^T(t)\dot{P}_{1i}(\rho)x(t) + x_c^T(t)P_{2i}(\rho)x_c(t) + \\
& x_c^T(t)P_{2i}(\rho)\dot{x}_c(t) + \dot{x}_c^T(t)P_{2i}(\rho)x_c(t) = \\
& x^T(t)[A_i^T(\rho)P_{1i}(\rho) + P_{1i}(\rho)A_i(\rho)]x(t) + \\
& x^T(t)[P_{1i}(\rho)B_i(\rho)K_{ci}(\rho) + \\
& C_i^T(\rho)B_{ci}^T(\rho)P_{2i}(\rho)]x_c(t) + \\
& x^T(t)E_i^T(\rho)P_{1i}(\rho)\omega(t) + \\
& \omega^T(t)P_{1i}(\rho)E_i(\rho)x(t) + \\
& x_c^T(t)[A_{ci}^T(\rho)P_{2i}(\rho) + P_{2i}(\rho)A_{ci}(\rho)]x_c(t) + \\
& x_c^T(t)[K_{ci}^T(\rho)B_i^T(\rho)P_{1i}(\rho) + \\
& P_{2i}(\rho)B_{ci}(\rho)C_i(\rho)]x(t) + \\
& x_c^T(t)P_{2i}(\rho)B_{ci}(\rho)b(t_k)\eta(t) + \\
& \eta^T(t)b(t_k)^TB_{ci}^T(\rho)P_{2i}(\rho)x_c(t) + \\
& x^T(t)\dot{\rho}\frac{\partial P_{1i}(\rho)}{\partial \rho}x(t) + \\
& x_c^T(t)\dot{\rho}\frac{\partial P_{2i}(\rho)}{\partial \rho}x_c(t). \quad (17)
\end{aligned}$$

同时, 存在常数 a 使得

$$V(x(t)) \leq aG(t), \quad (18)$$

其中:

$$\begin{aligned}
G(t) &= \max\{\|x(t)\|^2, \|x_c(t)\|^2\}, \\
a &= \max_{i \in \bar{N}}\{\lambda_{\max}(P_i(\rho))\}.
\end{aligned}$$

进一步, 由式(12)可得到

$$\begin{aligned}
\dot{V}_i(\bar{x}(t)) \leq & -z^T(t)z(t) + \gamma^2\omega^T(t)\omega(t) + \\
& \eta^T(t)\eta(t) - \varepsilon^2x_c^T(t)x_c(t). \quad (19)
\end{aligned}$$

最后, 通过定义 $\zeta(t) = [x^T(t) \ x_c^T(t) \ \omega^T(t) \ f^T(t) \ \eta^T(t)]^T$, 采用Schur补引理, 由不等式(19)可得

$$\begin{aligned}
\dot{V}_i(\bar{x}(t)) + z^T(t)z(t) - \gamma^2\omega^T(t)\omega(t) - \\
\eta^T(t)\eta(t) + \varepsilon^2x_c^T(t)x_c(t) = \\
\zeta^T(t)\Psi_{1i}\zeta(t) < -\alpha V_i(\bar{x}(t)). \quad (20)
\end{aligned}$$

注5 本文采用参数依赖的多Lyapunov函数方法证明系统的稳定性. 对于 N 个子系统, 该函数设计了 N 个正定矩阵 $P_{\sigma(t)}(\rho)$. 具体地, 对于第 i 个子系统, 该函数设计了依赖于调度变量的对称正定矩阵 $P_i(\rho)$. 与只求解一个对称正定矩阵 P 的公共Lyapunov函数方法相比, 该方法提高了搜索到可行解的成功率. 针对切换系统, 文献[26]采用了多Lyapunov函数方法保证了切换系统的稳定性, 并指出若各子系统对应的Lyapunov函数相对切换序列满足一定的递减条件 $P_i \leq \mu P_j$, 则切换系统是稳定的. 进一步, 针对切换LPV系统, 本文采用了文献[27]中“参数依赖的多Lyapunov函数方法”, 相比于文献[26]中所采用的“多Lyapunov函数方法”, 降低了控制设计的保守性.

3.2 H_∞ 性能分析

假设 $0 = t_0 < t_1 < t_2 < \dots < t_i < \dots < t_p = t_{N_\sigma(0,t)} < t$, 其中 $\{t_0, t_1, \dots, t_i, \dots, t_p\}$ 是切换时刻. 由此, 系统的全运行周期 $[0, T]$ 可表示为 $\bigcup_{i=1}^p [t_{i-1}, t_i) \cap [0, T]$.

对于任意 $t \in [t_i, t_{i+1})$, Lyapunov函数(16)是连续且不发生跳变的, 通过采用文献[28]中的比较引理, 由条件(20)进一步得到

$$V_i(\bar{x}(t)) \leq e^{-\alpha(t-t_i)}V_i(\bar{x}(t_i)) - \int_0^T Y(v)dv, \quad (21)$$

其中 $Y(v) = e^{-\alpha(t-v)}[z^T(v)z(v) - \gamma^2\omega^T(s)\omega(s)]$. 然后, 根据条件(14), 能够得到在任意切换时刻, 都满足

$$V_{\sigma(t_i)}(\bar{x}(t_i)) \leq \mu V_{\sigma(t_i^-)}(\bar{x}(t_i^-)). \quad (22)$$

根据条件(21)–(22), 可得到

$$\begin{aligned}
V(\bar{x}(t)) \leq & \mu e^{-\alpha(t-t_p)}V_{\sigma(t_p^-)}(\bar{x}(t_p^-)) - \int_{t_p}^t Y(v)dv \leq \\
& \mu e^{-\alpha(t-t_p)}[e^{-\alpha(t_p-t_{p-1})}V_{\sigma(t_{p-1})}(\bar{x}(t_{p-1})) - \\
& \mu \int_{t_{p-1}}^{t_p} Y(v)dv] - \mu \int_{t_p}^t Y(v)dv \leq \\
& \mu^2 e^{-\alpha(t_p-t_{p-1})}V_{\sigma(t_{p-1})}(\bar{x}(t_{p-1})) - \\
& \mu^2 \int_{t_{p-1}}^{t_p} Y(v)dv \dots \leq \\
& \mu^{N_\sigma(t_0,t)} e^{-\alpha(t-t_0)}V_{\sigma(t_0)}(\bar{x}(t_0)) - \\
& \mu^{N_\sigma(t_0,t)} \int_{t_0}^{t_1} Y(v)dv - \\
& \mu^{N_\sigma(t_0,t)-1} \int_{t_1}^{t_2} Y(v)dv - \dots - \\
& \mu^0 \int_{t_q}^t Y(v)dv = \\
& e^{-\alpha(t-t_0)+N_\sigma(t_0,t)\ln \mu} V_{\sigma(t_0)}(\bar{x}(t_0)) - \\
& \int_{t_0}^t e^{N_\sigma(t,v)\ln \mu} Y(v)dv \leq \\
& e^{-\alpha t + (N_0 + \frac{t}{\tau_a})\ln \mu} V_{\sigma(0)}(\bar{x}(0)) - \\
& \int_0^t e^{N_\sigma(t,v)\ln \mu} Y(v)dv. \quad (23)
\end{aligned}$$

进一步, 通过定义 $\|\bar{x}(0)\|_{c1} = \sup_{-\tau_M \leq s \leq 0} \|\bar{x}(s)\|$, 根据条件(18)–(23)可得到

$$\begin{aligned}
\|\bar{x}(t)\| \leq & \sqrt{\frac{1}{a}} e^{\frac{1}{2}N_0 \ln \mu} e^{-\frac{1}{2}(\alpha - \frac{\ln \mu}{\tau_a})t} \|\bar{x}(0)\| \leq \\
& \sqrt{\frac{1}{a}} e^{\frac{1}{2}N_0 \ln \mu} e^{-\frac{1}{2}(\alpha - \frac{\ln \mu}{\tau_a})t} \|\bar{x}(0)\|_{c1}. \quad (24)
\end{aligned}$$

令 $\kappa = \sqrt{\frac{1}{a}} e^{\frac{1}{2}N_0 \ln \mu}$, $\nu = -\frac{1}{2}(\alpha_1 - \frac{\ln \mu}{\tau_a})$, 根据文献[29]中指数稳定定义, 在条件(15)–(23)下, 闭环切换LPV系统(10)在外部扰动 $\omega(t) = 0$ 时是指数稳定的.

在扰动 $\omega(t) \neq 0$ 时, 对式(23)的左右两侧同乘

$e^{-(N_0 + \frac{t}{\tau_a}) \ln \mu}$, 可得到

$$e^{-(N_0 + \frac{t}{\tau_a}) \ln \mu} V(\bar{x}(t)) \leq e^{-\alpha t} V_{\sigma(0)}(\bar{x}(0)) - \int_0^t e^{N_\sigma(t, v) \ln \mu} Y(v) dv. \quad (25)$$

根据 $V(\bar{x}(t)) \geq 0$, 式(15)–(25), 可得到

$$\int_0^t e^{-\alpha(t-v) - (N_0 \ln \mu + \alpha v)} z^T(v) z(v) dv \leq \int_0^t e^{-\alpha(t-v)} \gamma^2 \omega^T(t) \omega(t) dt. \quad (26)$$

将式(26)左右两侧积分上限 t 推广到 ∞ , 可得

$$\int_0^\infty e^{-\alpha t} z^T(v) z(v) dv \leq e^{N_0 \ln \mu} \gamma^2 \int_0^\infty \omega^T(t) \omega(t) dt. \quad (27)$$

令 $c = \alpha$, $\bar{\gamma} = \sqrt{e^{N_0 \ln \mu}} \gamma$, 根据定义1, 由式(27), 闭环切换系统(10)具有 H_∞ 性能, 性能指标为 $(\theta, \sqrt{e^{N_0 \ln \mu}} \gamma)$.

4 控制器设计与求解

定理2 对于任意 $i, j \in N$, 给定正常数 γ 和常数 θ_i, ε , 存在对称正定矩阵 $X_{1i}(\rho)$, $X_{2i}(\rho)$, 正定矩阵 $Y_i(\rho)$ 和矩阵 $K^*(\rho)$, 满足

$$\Psi'_{1i} = \begin{bmatrix} \Sigma'_{1i} & \Sigma'_{2i} & E_i(\rho) & 0 & \Sigma'_{5i} & X_{1i}(\rho) \\ * & \Sigma'_{3i} & 0 & \Sigma'_{4i} & 0 & 0 \\ * & * & -\gamma^2 I & 0 & G_i(\rho) & 0 \\ * & * & * & \varepsilon I & 0 & 0 \\ * & * & * & * & I & 0 \\ * & * & * & * & * & -I \end{bmatrix} < 0, \quad (28)$$

$$\Psi'_{2i} = \begin{bmatrix} I & K^*(\rho) X_{2i}(\rho) - Y_i(\rho) \\ * & -\theta_i X_{2i}(\rho) \end{bmatrix} < 0, \quad (29)$$

$$X_{1i}(\rho) \leq \mu X_{1j}(\rho), \quad X_{2i}(\rho) \leq \mu X_{2j}(\rho), \quad (30)$$

其中:

$$\Sigma'_{1i} = X_{1i}(\rho) A_i^T(\rho) + A_i(\rho) X_{1i}(\rho) + \sum_{s=1}^m \dot{\rho} \frac{\partial X_{1i}(\rho)}{\partial \rho},$$

$$\Sigma'_{2i} = B_i(\rho) Y_i(\rho) + A_{2i}^T(\rho),$$

$$\Sigma'_{3i} = A_{1i}^T(\rho) + A_{1i}(\rho) + \sum_{s=1}^m \dot{\rho} \frac{\partial X_{2i}(\rho)}{\partial \rho},$$

$$\Sigma'_{4i} = B_{ci}(\rho) b(t_k), \quad \Sigma'_{5i} = X_{1i}(\rho) D_i(\rho).$$

且在切换过程中, 每个子模式的驻留时间都满足条件(15), 则遭受到切换冲击和数据注入攻击的闭环切换LPV系统(10)具有 H_∞ 性能, 且满足无扰切换性能(9). 进一步, 可得动态输出反馈控制器增益为

$$A_{ci}(\rho) = A_{1i}(\rho) X_{2i}(\rho),$$

$$B_{ci}(\rho) = (X_{1i}(\rho) C_i^{-1}(\rho) A_{2i}(\rho))^T,$$

$$K_{ci}(\rho) = Y_i(\rho) X_{2i}(\rho).$$

证 对式(12)左右同乘 $\text{diag}\{X_{1i}(\rho), X_{1i}(\rho), I, I, I\}$, 并对式(13)左右同乘 $\text{diag}\{I, X_{2i}(\rho)\}$, 可得

$$\begin{bmatrix} \Sigma''_{1i} & \Sigma''_{2i} & E_i(\rho) & 0 & X_{1i}(\rho) D_i(\rho) \\ * & \Sigma''_{3i} & 0 & \Sigma''_{4i} & 0 \\ * & * & -\gamma^2 I & 0 & G_i(\rho) \\ * & * & * & \varepsilon I & 0 \\ * & * & * & * & I \end{bmatrix} < 0, \quad (31)$$

$$\begin{bmatrix} I & K^*(\rho) X_{2i}(\rho) - K_{ci}(\rho) X_{2i}(\rho) \\ * & -\theta_i X_{2i}(\rho) \end{bmatrix} < 0, \quad (32)$$

其中:

$$\Sigma''_{1i} = X_{1i}(\rho) A_i^T(\rho) + A_i(\rho) X_{1i}(\rho) + \sum_{s=1}^m \dot{\rho} \frac{\partial X_{1i}(\rho)}{\partial \rho},$$

$$\Sigma''_{2i} = B_i(\rho) Y_i(\rho) + X_{1i}(\rho) C_i^T(\rho) B_{ci}^T(\rho),$$

$$\Sigma''_{3i} = X_{2i}(\rho) A_{ci}^T(\rho) + A_{ci}(\rho) X_{2i}(\rho) + \sum_{s=1}^m \dot{\rho} \frac{\partial X_{2i}(\rho)}{\partial \rho},$$

$$\Sigma''_{4i} = B_{ci}(\rho) b(t_k),$$

为便于求解, 令

$$A_{1i}(\rho) = A_{ci}(\rho) X_{2i}(\rho),$$

$$Y_i(\rho) = K_{ci}(\rho) X_{2i}(\rho),$$

$$A_{2i}(\rho) = X_{1i}(\rho) C_i^T(\rho) B_{ci}^T(\rho),$$

可得到不等式(29), 进一步采用Schur补引理对不等式(31)进行放缩可得到不等式(28). 另外, 对不等式(14)两边分别同时乘以 X_{1i} 和 X_{2i} , 条件(30)可保证式(14)成立.

综上, 根据定理1, 如果条件(28)–(30)成立, 则切换LPV系统(10)在所设计的参数依赖控制器(8)和无扰切换条件(9)的限制下具有 H_∞ 性能.

注6 求解控制器参数 $A_{ci}(\rho)$, $B_{ci}(\rho)$ 和 $K_{ci}(\rho)$ 的步骤为: 首先, 给定参数 $\rho, \bar{\rho}, \underline{\rho}, \bar{\rho}, \varepsilon, x_0, K^*(\rho)$, 调度变量 $\rho(t)$, 外部扰动 $\omega(t)$, 系统矩阵 $A_{10}, A_{11}, A_{20}, A_{21}, B_{10}, B_{11}, B_{20}$ 和 B_{21} ; 然后, 调试参数 $\theta_1, \theta_2, \mu, \gamma$ 和 $b(t)$; 最后, 通过LMI工具箱方法求解不等式(28)–(30), 找到一组可行的解 $\{X_{1i}(\rho), X_{2i}(\rho), Y_i(\rho), A_{1i}(\rho), A_{2i}(\rho)\}$.

5 仿真

本节通过数值仿真算例来验证本文提出的切换LPV系统抗攻击无扰切换控制方法的有效性.

初始系统状态 x_0 为 $[-1 \ 1]^T$. 系统参数选择如下:

$$A_1(\rho) = A_{10} + \rho(t) A_{11}, \quad A_2(\rho) = A_{20} + \rho(t) A_{21},$$

$$B_1(\rho) = B_{10} + \rho(t) B_{11}, \quad B_2(\rho) = B_{20} + \rho(t) B_{21},$$

$$K_1(\rho) = K_{10} + \rho(t) K_{11}, \quad K_2(\rho) = K_{20} + \rho(t) K_{21},$$

$$A_{10} = \begin{bmatrix} -8 & 2 \\ 2 & -1 \end{bmatrix}, \quad A_{11} = \begin{bmatrix} -1 & -1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix},$$

$$A_{20} = \begin{bmatrix} -3 & 0 \\ 2 & -4 \end{bmatrix}, \quad A_{21} = \begin{bmatrix} -3 & 0 \\ 1 & -0.8 \end{bmatrix},$$

$$B_{10} = \begin{bmatrix} -3 & -2 \\ -2 & -1 \end{bmatrix}, \quad B_{11} = \begin{bmatrix} 5 & 9 \\ -1 & -1 \end{bmatrix},$$

$$B_{20} = \begin{bmatrix} -3 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}, B_{21} = \begin{bmatrix} -3 & 6 \\ -3 & -2 \end{bmatrix}.$$

数据注入攻击的阈值为 $\varepsilon = 4.2$. 无扰切换控制信号限幅参数为 $\theta_1 = 2, \theta_2 = 2$. 其他参数设置为 $\mu = 1, \gamma = 2.1, b(t) = e^{-t}, \rho(t) = \frac{\sin(x_2(t))}{x_2(t)}, \underline{\rho} = 0.2, \bar{\rho} = 1, \dot{\rho} = 0, \bar{\rho} = 20$, 限幅控制增益为 $K^*(\rho) = \text{diag}\{0.8, 1\}$. 根据平均驻留时间条件(15), 可得到 $\tau_a^* = 0.407$ s. 因此, 本文的切换信号采用的最小驻留时间间隔为 $\tau_a = 0.5$ s.

求解式(28)–(30), 可得到如下控制器参数:

$$\begin{aligned} A_{c10} &= \begin{bmatrix} 0.30 & -0.11 \\ -0.11 & 0.41 \end{bmatrix}, A_{c11} = \begin{bmatrix} -0.25 & 0.07 \\ 0.07 & -0.27 \end{bmatrix}, \\ A_{c20} &= \begin{bmatrix} 0.41 & 0.14 \\ 0.12 & 0.33 \end{bmatrix}, A_{c21} = \begin{bmatrix} -0.38 & -0.03 \\ -0.05 & -0.69 \end{bmatrix}, \\ B_{c10} &= \begin{bmatrix} -10.4 & -27.0 \\ 15.2 & 21.4 \end{bmatrix}, B_{c11} = \begin{bmatrix} 7.71 & 6.62 \\ -9.62 & -10.0 \end{bmatrix}, \\ B_{c20} &= \begin{bmatrix} -0.01 & 0.14 \\ 0.04 & 0.10 \end{bmatrix}, B_{c21} = \begin{bmatrix} -0.77 & -0.51 \\ -0.47 & -0.15 \end{bmatrix}, \\ K_{c10} &= \begin{bmatrix} 0.53 & -0.09 \\ -0.09 & 0.66 \end{bmatrix}, K_{c11} = \begin{bmatrix} 0.67 & -0.10 \\ -0.10 & 0.66 \end{bmatrix}, \\ K_{c20} &= \begin{bmatrix} 0.65 & 0.06 \\ 0.01 & 1.08 \end{bmatrix}, K_{c21} = \begin{bmatrix} -1.26 & -0.04 \\ -0.06 & -0.10 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

图3给出的是所施加的数据注入网络攻击信号 $f(t)$. 在本文设计的抗攻击机制作用下, 图4给出了切换LPV系统在无扰切换和非无扰切换下的状态响应 $x(t)$. 图5给出了对应的控制输入响应 $u(t)$. 图6和图7给出了在没有采用本文设计的抗攻击机制时, 系统遭受数据注入攻击的状态响应和控制输入. 由图可见, 采用本文所提出的抗攻击无扰切换控制方法, 可保证系统状态和控制输入均实现平滑切换, 能有效显著地抵御网络攻击影响, 保证了切换LPV系统的 H_∞ 性能.

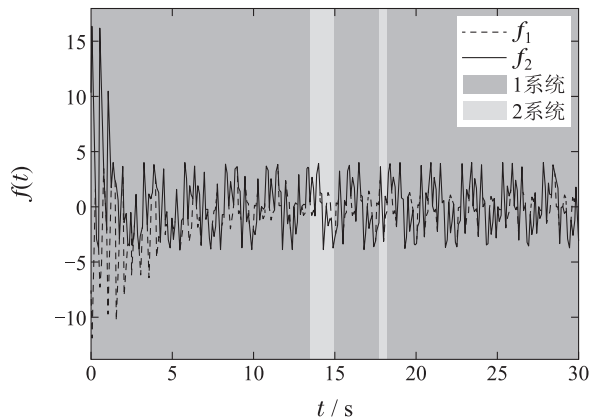


图3 数据注入网络攻击信号

Fig. 3 Data injection network attack signal

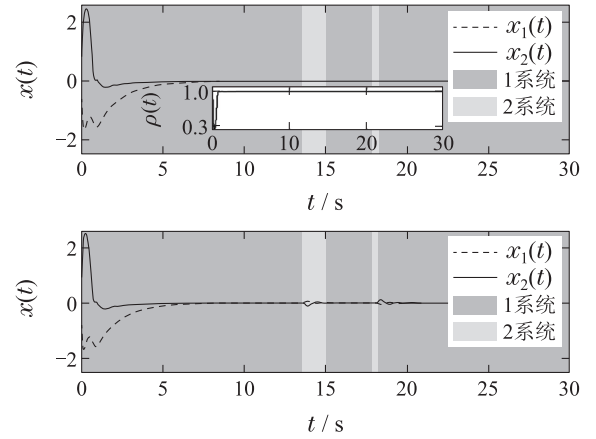


图4 无扰切换(上)和硬切换(下)系统的抗攻击状态响应
Fig. 4 State response of anti-attack with and without bumpless switching (upper and lower)

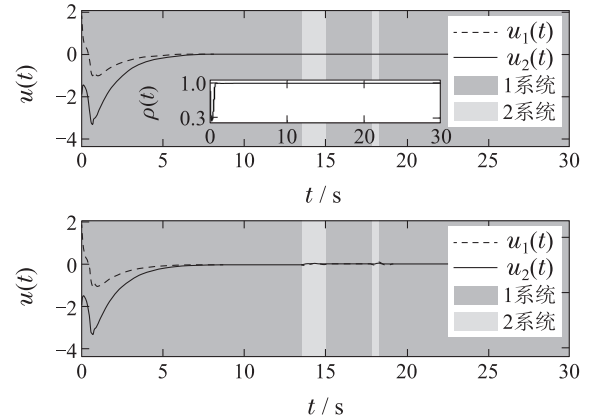


图5 无扰切换(上)和硬切换(下)的抗攻击控制输入

Fig. 5 Control input of anti-attack with and without bumpless switching (upper and lower)

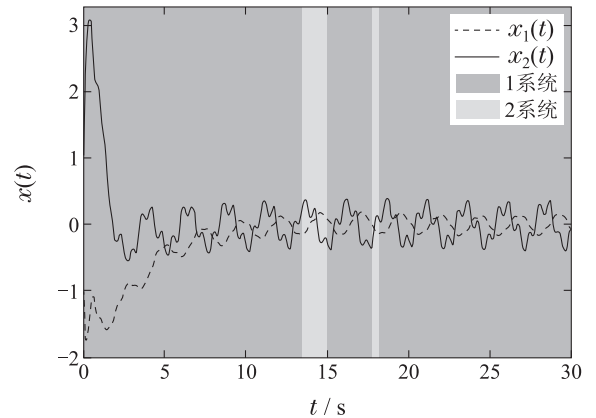


图6 网络攻击下系统状态响应(无抗攻击机制)

Fig. 6 State response under attack without anti-attack mechanism

6 结论

本文研究了切换LPV系统的抗攻击无扰切换控制. 针对系统受数据注入攻击问题, 提出了一种基于编码/解码器的抗攻击机制来抵御恶意攻击影响. 采用了无扰切换性能定义来描述切换冲击. 进一步, 综合考虑网络攻击、切换冲击和外部干扰问题, 采用李雅普

诺夫稳定性理论和平均驻留时间技术,证明了切换LPV系统具有 H_∞ 性能,并给出了抗攻击无扰切换控制增益的求解方法.最后,数值仿真验证了所提出控制方法的有效性,给出的设计成功地抵御了网络数据注入攻击,并实现了控制器之间的无扰切换.

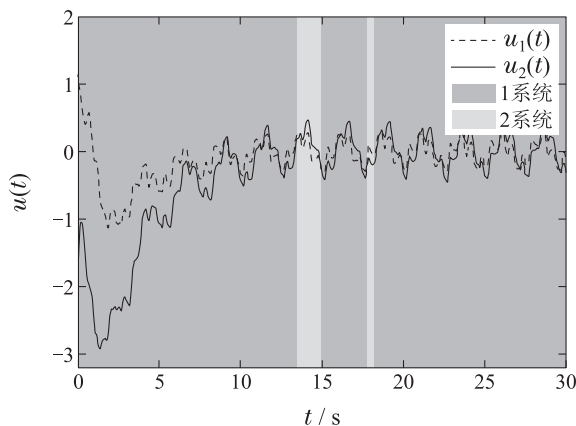


图7 网络攻击下控制输入(无抗攻击机制)

Fig. 7 Control input under attack without anti-attack mechanism

参考文献:

- [1] SHAMMA J S. Analysis of gain scheduled control for nonlinear plants. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1990, 35(8): 898 – 907.
- [2] DOGRUEL M, OZGUNZER U. Stability of hybrid systems. *Proceedings of IEEE International Symposium on Intelligent Control*. New York: IEEE, 1994, 8: 129 – 134.
- [3] HE Yong, ZHANG Weiguo, WANG Minwen, et al. Switching linear-parameter-varying controller for morphing aircraft based on multi-objective. *Control Theory & Applications*, 2015, 32(11): 1518 – 1525.
(何涌, 章卫国, 王敏文, 等. 基于多目标控制的变体飞行器切换线性变参数控制器. 控制理论与应用, 2015, 32(11): 1518 – 1525.)
- [4] YUAN Huali, SUN Zhendong. Deadbeat control for a class of discrete-time switched linear systems. *Control Theory & Applications*, 2019, 36(11): 1844 – 1849.
(原华丽, 孙振东. 一类离散时间切换线性系统的无差拍控制. 控制理论与应用, 2019, 36(11): 1844 – 1849.)
- [5] QI Y W, ZHAO X J, FU J, et al. Event-triggered control for switched systems under multi-asynchronous switching. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2022, 52(7): 4685 – 4696.
- [6] LIM S. *Analysis and control of linear-parameter-varying systems*. Ann Arbor: Stanford University, 1999.
- [7] LU B, WU F. Control design of switched LPV systems using multiple parameter-dependent Lyapunov functions. *Proceedings of the American Control Conference*. Boston, MA: ACC, 2004: 3875 – 3880.
- [8] HE X, ZHAO J. Switching stabilization and H_∞ performance of a class of discrete switched LPV system with unstable subsystems. *Nonlinear Dynamics*, 2014, 76(2): 1069 – 1077.
- [9] ZONG G D, YANG D, LAM J, et al. Fault-tolerant control of switched LPV systems: A bumpless transfer approach. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2022, 27(3): 1436 – 1446.
- [10] YANG D, ZONG G D, NGUANG S K, et al. Bumpless transfer H_∞ anti-disturbance control of switching markovian LPV systems under the hybrid switching. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2022, 52(5): 2833 – 2845.
- [11] AREHART A B, WOLOVICH W A. Bumpless switching in hybrid systems. *Lecture Notes in Computer Science*. Berlin-Heidelberg: Springer, 1997.
- [12] DAAFOUZ J, GEROMEL J C, DEACTO G S. A simple approach for switched control design with control bumps limitation. *Systems & Control Letters*, 2012, 61(12): 1215 – 1220.
- [13] YANG D, ZONG G D, NGUANG S K, et al. H_∞ bumpless transfer reliable control of markovian switching LPV systems subject to actuator failures. *Information Sciences*, 2020, 512: 431 – 445.
- [14] SHANMUGAM L, MANI P, JOO Y H. Stabilisation of event-triggered-based neural network control system and its application to wind power generation systems. *IET Control Theory & Applications*, 2020, 14(10): 1321 – 1333.
- [15] QI Y W, YUAN S, NIU B. Asynchronous control for switched T-S fuzzy systems subject to data injection attacks via adaptive event-triggering schemes. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2022, 52(7): 4658 – 4670.
- [16] YILDIRIM M, DEMIROGLU U, SENOL B. An in-depth exam of iot, iot core components, iot layers, and attack types. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 2021, 28: 665 – 669.
- [17] ZHANG T Y, YE D. False data injection attacks with complete stealthiness in cyber-physical systems: A self-generated approach. *Automatica*, 2020, 120: 109117.
- [18] WU G Y, SUN J, CHEN J. Optimal data injection attacks in cyber-physical systems. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2018, 48(12): 3302 – 3312.
- [19] LI T, FU M Y, XIE L H, et al. Distributed consensus with limited communication data rate. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2011, 56(2): 279 – 292.
- [20] LI T, XIE L H. Distributed coordination of multi-agent systems with quantized-observer based encoding-decoding. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2012, 57(12): 3023 – 3037.
- [21] SAVKIN A V, CHENG T. Detectability and output feedback stabilizability of nonlinear networked control systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2007, 52(4): 730 – 735.
- [22] WONG W S, BROCKETT R W. Systems with finite communication bandwidth constraints-II: Stabilization with limited information feedback. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1999, 44(5): 1049 – 1053.
- [23] BARA G I, DAAFOUZ J, KRATZ F, et al. Parameter-dependent state observer design for affine LPV systems. *International Journal of Control*, 2001, 74(16): 1601 – 1611.
- [24] BAI C Z, PASQUALETTI F, GUPTA V. Data-injection attacks in stochastic control systems: Detectability and performance tradeoffs. *Automatica*, 2017, 82: 251 – 260.
- [25] ZHAO Y, ZHAO J. H_∞ reliable bumpless transfer control for switched systems with state and rate constraints. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2020, 50(10): 3925 – 3935.
- [26] BRANICKY M S. Multiple Lyapunov functions and other analysis tools for switched and hybrid systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1998, 43(4): 475 – 482.
- [27] ZHANG L X, SHI P. L_2 - L_∞ model reduction for switched LPV systems with average dwell time. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2008, 53(10): 2443 – 2448.
- [28] KHALIL H. *Nonlinear Systems*. New Jersey: Prentice Hall, 2002.
- [29] SUN X M, ZHAO J, HILL D J. Stability and L_2 -gain analysis for switched delay systems: A delay-dependent method. *Automatica*, 2006, 42(10): 1769 – 1774.

作者简介:

齐义文 教授, 博士生导师, 目前研究方向为切换系统理论、人工智能、动力系统应用, E-mail: qiyiwen@gmail.com;

唐意雯 硕士研究生, 目前研究方向为切换系统理论、网络化控制、安全控制, E-mail: tangyiwen1205@163.com.