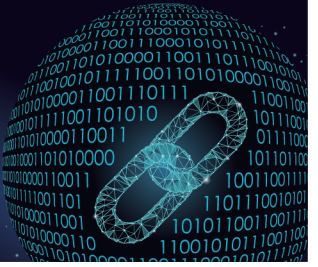




中国科技期刊卓越行动计划项目入选期刊

控制与决策

CONTROL AND DECISION



基于CNF的饱和切换系统的事件触发控制

王娟, 朱帅东, 朱全民

引用本文:

王娟, 朱帅东, 朱全民. 基于CNF的饱和切换系统的事件触发控制[J]. 控制与决策, 2024, 39(8): 2631–2636.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2023.0404>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于周期动态事件触发的网络化切换系统的分析与控制

The analysis and control for networked switched systems based on periodic event-trigger

控制与决策. 2021, 36(10): 2467–2474 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0281>

基于反馈无源化的切换非线性系统 H_∞ 跟踪控制

Passification-based H_∞ tracking control for a class of switched nonlinear systems

控制与决策. 2021, 36(11): 2729–2734 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0798>

基于T-S模糊模型的多时滞非线性网络切换控制系统非脆弱 H_∞ 控制

Non-fragile H_∞ control for multi-delay nonlinear network switching control system based on T-S model

控制与决策. 2021, 36(5): 1087–1094 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1098>

有向切换拓扑条件下多航天器分组姿态协同控制

Group attitude coordinated control of multi-spacecraft with directed switching topologies

控制与决策. 2021, 36(10): 2389–2398 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0311>

基于模型依赖驻留时间的异步切换控制

Asynchronous switching control based on mode-dependent average dwell time

控制与决策. 2021, 36(3): 609–618 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0645>

基于 CNF 的饱和切换系统的事件触发控制

王娟^{1†}, 朱帅东¹, 朱全民²

(1. 沈阳建筑大学 电气与控制工程学院, 沈阳 110168;

2. 西英格兰大学 工程设计与数学系, 布鲁斯托尔 BS16 1QY)

摘要: 针对一类具有执行器饱和的切换系统, 提出一种基于组合非线性反馈控制 (CNF) 的事件触发控制方法, 以达到在保证系统性能的同时减少网络带宽占用的目的. 首先, 为了降低系统资源成本, 构造事件触发机制来判断是否对系统当前状态进行采样, 设计组合非线性反馈控制来提高系统的暂态性能; 然后, 利用多 Lyapunov 函数方法得到饱和切换系统在驻留时间切换信号下渐近跟踪问题的充分条件, 同时证明事件触发最小的时间间隔大于零, 从而避免芝诺 (Zeno) 行为; 最后, 通过仿真实例验证所提出方法的有效性.

关键词: 饱和切换系统; 事件触发控制; 组合非线性反馈; 驻留时间; 渐近跟踪

中图分类号: TP13

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2023.0404

引用格式: 王娟, 朱帅东, 朱全民. 基于 CNF 的饱和切换系统的事件触发控制 [J]. 控制与决策, 2024, 39(8): 2631-2636.

Event-triggered control for saturated switched system based on composite nonlinear feedback

WANG Juan^{1†}, ZHU Shuai-dong¹, ZHU Quan-min²

(1. School of Electrical and Control Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China;

2. Department of Engineering Design and Mathematics, University of the West of the England, Bristol BS16 1QY, UK)

Abstract: For a class of switched systems with actuator saturation, the event-triggered control method with composite nonlinear feedback (CNF) controllers is proposed to ensure system performance while reducing network bandwidth consumption. Firstly, in order to reduce the cost of system resources, event-triggered conditions are constructed to determine whether to sample the current state of the system, and a composite nonlinear feedback control is designed to improve the transient performance of the system. Then, using the multi-Lyapunov function method sufficient conditions for the practical stability of switched saturated systems under switching signals satisfying dwell time are derived, and it is proved that the minimum time interval for event triggering is greater than zero, avoiding the Zeno behaviour. Finally, a simulation example is given to illustrate the effectiveness of the proposed method.

Keywords: saturated switched systems; event-triggered control; composite nonlinear feedback; dwell time; asymptotic tracking

0 引言

作为一类重要的混杂系统, 切换系统是由一组连续或离散时间子系统和切换规则^[1]组成. 在过去的几十年中, 切换系统因其具有重要的理论意义而备受关注, 很多系统都可以建模为切换系统, 例如电力系统^[2]、飞行控制系统^[3]和网络化控制系统^[4]等. 与此同时, 切换系统的稳定性也得到了广泛研究, 其研究方法主要有共同 Lyapunov 函数法^[5]、单 Lyapunov 函数法^[1]和多 Lyapunov 函数法^[6]等. 关于切换系统的

许多问题得到了很好的解决, 如切换正性化^[5]、 H_∞ 控制^[6]和事件触发控制^[7]等.

通常, 在时间触发下的控制系统中, 信号采样和控制器执行是周期进行的. 传感器、控制器和执行器之间存在着大量的信息交互, 可能会导致信息负载和资源浪费. 为了克服传统周期采样控制方法的不足, 事件触发控制应运而生. 事件触发的基本思想是, 只有在满足预先设定好的触发条件时系统才进行采样和控制输入更新. 一些学者将事件触发机制运用到

收稿日期: 2023-04-02; 录用日期: 2023-08-02.

基金项目: 辽宁省自然科学基金项目 (2023-MS-224); 辽宁省教育厅基本科研项目 (LJKMZ20220941).

责任编辑: 王燕舞.

[†]通讯作者. E-mail: wangjuan@sjzu.edu.cn.

网络化控制系统^[8]中,单一模态系统的事件触发机制设计已有很多研究结果,如非线性系统^[9]、多智能体系统^[10]等.近年来,多模态切换系统的事件触发控制问题也得到了广泛的研究,如异步切换系统的事件触发控制^[11]、切换仿射系统的事件触发控制^[12]等.

为了保证系统具有较快响应速度的同时产生较小的超调量,一种组合非线性反馈(CNF)控制方法被首先应用于二阶线性系统的跟踪控制研究中.在此之后,经过不断地发展和探索,CNF控制方法被应用于更一般的系统,如无人直升机飞行系统^[13]、无人驾驶车辆控制系统^[14]等.文献[15]将CNF控制方法应用到饱和非线性系统中,以实现饱和系统的渐近跟踪.文献[16]基于CNF控制方法研究了切换系统的跟踪控制问题.然而,由于事件触发时刻和切换时刻耦合不清等特点,基于CNF控制方法的切换系统事件触发控制具有很大难度,至今尚未见到相关报道.

基于上述分析,本文考虑基于CNF的饱和切换系统事件触发控制问题.本文的主要贡献如下:1)首次提出基于CNF的多模态切换系统事件触发控制,通过计算事件触发间隔的最小正下界,避免芝诺行为;2)基于事件触发机制设计子系统的CNF控制器;3)利用多Lyapunov函数方法在满足驻留时间的一类切换信号下,提出保证饱和切换系统渐近跟踪的充分条件,且具有良好的暂态性能;4)通过涡扇发动机的仿真实例验证本文方法的有效性.

1 问题描述

考虑以下具有执行器饱和约束的切换系统:

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= A_\sigma x(t) + B_\sigma \text{sat}(u(t)), \\ y(t) &= Cx(t).\end{aligned}\quad (1)$$

其中: $x(t) \in R^n$ 和 $u(t) \in R$ 分别是系统状态和控制输入; $y(t) \in R$ 是控制输出; A 、 B 、 C 是合适维度的矩阵;饱和函数 $\text{sat}(u(t))$ 可定义为

$$\text{sat}(u(t)) = \text{sgn}(u(t)) \min\{u_{\max}, |u(t)|\}, \quad (2)$$

$u_{\max}$ 表示控制输入的最大阈值.切换信号是关于时间的右连续分段函数 $\sigma(t): [0, \infty) \rightarrow I_m = \{1, 2, \dots, m\}$, 可通过以下切换序列来表示:

$$\Sigma = \{x_0; (i_0, l_0), \dots, (i_q, l_q), \dots, | i_q \in I_m, l \in N\}.\quad (3)$$

其中: l_0 是初始时间, x_0 是初始状态, N 是非负整数集合, (i_q, l_q) 表示在 $[l_q, l_{q+1})$ 区间内第 i_q 个子系统运行.本文假设切换系统的状态不会在切换时刻发生跳变.

假设1 (A_i, B_i) 是可控的.

假设2 (A_i, B_i, C) 是右可逆的且在虚轴上没有不变零点.

定义1^[17] 对于任意切换信号 $\sigma(t)$, $t > \tau > 0$, $N_\sigma(\tau, t)$ 定义为 $\sigma(t)$ 在时间区间 (τ, t) 上的切换次数,如果存在正常数 $\tau_\alpha > 0$, 满足不等式

$$N_\sigma(\tau, t) \leq \frac{t - \tau}{\tau_\alpha}, \quad (4)$$

则称正常数 $\tau_\alpha > 0$ 为驻留时间.

引理1^[15] 定义 $\phi(u) = \text{sat}(u) - u$ 为死区函数.如果向量 u 和 v 属于集合 $\Psi(\|u - v\|, u_{\max}) = \{u, v \in R^m, \|u - v\| \leq u_{\max}\}$, 则对于任意对角正定矩阵 $T \in R^{m \times m}$ 使得以下不等式成立:

$$\phi^T(u)T(\phi(u) + v) \leq 0. \quad (5)$$

引理2^[18] 假设存在正定对称矩阵 P 、正标量 c , 定义 $\varepsilon(P, c) = \{x \in R^n; x^T P x \leq c\}$, 如果定义域为 D 的函数 $\dot{x}(t) = f(x(t))$ 满足

$$\begin{aligned}f^T(x(t))Px(t) + x^T(t)Pf(x(t)) &< 0, \\ \varepsilon(P, c) &\subset D,\end{aligned}\quad (6)$$

则 $\varepsilon(P, c)$ 是函数 $\dot{x}(t) = f(x(t))$ 的渐近稳定域.

本文的控制目标是构造CNF事件触发控制器,使得控制输出 y 渐近跟踪阶跃参考输入 r , 且保证系统具有较快的响应速度和较小的超调.

2 主要结果

本节首先设计CNF控制器,使得控制输出 y 渐近跟踪参考输入 r ; 其次,利用多Lyapunov函数方法得到闭环系统在满足驻留时间的一类切换信号 $\sigma(t)$ 下,渐近跟踪参考输入 r 的充分条件;最后,计算事件触发时间间隔的正下界,避免Zeno行为.

2.1 CNF控制器设计

为了更好地跟踪参考输入 r , 本文设计CNF控制器如下:

$$u(t) = F_i x + G_i r - \rho(r, y(t)) B_i^T P_i (x(t) - x_e). \quad (7)$$

其中: CNF控制器 $u(t) = u_L + u_N$ 由线性控制器和非线性控制器组成,线性控制器 $u_L = F_i x(t) + G_i r$ 可以提高系统的响应速度,非线性控制器 $u_N = -\rho(r, y(t)) B_i^T (x(t) - x_e)$ 具有较大的阻尼比,并且可以减少由线性控制器引起的超调; r 是参考输入; x_e 是系统的平衡状态; F_i 和 G_i 分别是合适维度的矩阵.选择状态反馈增益矩阵 F_i 使得下面条件成立:

1) $A_i + B_i F_i$ 是Hurwitz的;

2) $C(sI - A_i - B_i F_i)^{-1} B_i$ 具有特定的期望性质,即有一个小的阻尼率.

合适维度的矩阵 G_i 和 H_i 可分别由以下公式计算得到:

$$G_i = -[C(A_i + B_i F_i)^{-1} B_i]^{-1}, \quad (8)$$

$$H_i = [1 - F_i(A_i + B_i F_i)^{-1} B_i] G_i. \quad (9)$$

向量 G_{ei} 由下式给出:

$$G_{ei} = -(A_i + B_i F_i)^{-1} B_i G_i. \quad (10)$$

假设3 令 $x_e = G_{ei} r = G_{ej} r, \forall i, j \in I_m$, 即本文假设每个子系统都有一个共同的平衡点.

注1 $\rho(r, y(t))$ 是关于 y 局部Lipschitz的任意非负函数, $\rho(r, y(t)) \in [0, \rho^*]$ 且 ρ^* 是正标量. 本文选择如下形式的 $\rho(r, y(t))$:

$$\rho(r, y(t)) = \beta |e^{-\alpha|y(t)-r|} - e^{-\alpha|y(0)-r|}|, \quad (11)$$

其中 $\beta > 0$ 和 $\alpha > 0$ 为可调参数. 当 $\rho(r, y(t)) = 0$ 时, CNF控制器变成线性反馈控制部分 $u_L = F_i x(t) + G_i r$, 在这种情况下, 闭环系统的控制输出仍能渐近跟踪参考输入 r . 然而, 其暂态性能要逊色于在CNF控制器下闭环系统的暂态性能, 详细内容参见文献[16].

为了节省通信资源, 缓解信道拥塞, 本文基于CNF控制设计事件触发条件为

$$\delta(x(t) - x_e)^T P_i(x(t) - x_e) \leq e^T(t) P_i e(t). \quad (12)$$

其中: δ 是正标量; P_i 是正定对称矩阵; ρ 是 $\rho(h(t), r)$ 的简写; 误差 $e(t) = x(t_k) - x(t)$, $x(t_k)$ 表示触发时刻 t_k 的系统状态, $k = 0, 1, \dots$; $t_0 = 0$. 系统在 t_k 时刻保持控制输入 $u(t_k)$ 不变, 直到下一个触发器更新控制输入. 因此, 事件触发策略总是满足

$$t_{k+1} = \inf\{t > t_k | \delta(x(t) - x_e)^T P_i(x(t) - x_e) = e(t)^T P_i e(t)\}.$$

令 $\varphi = \varphi(u(t_k)) = \text{sat}(u(t_k)) - u(t_k)$ 和状态误差变量 $\tilde{x}(t) = x(t) - x_e$, 可得闭环系统

$$\dot{\tilde{x}}(t) = (A_i + \tilde{B}_i) \tilde{x}(t) + \tilde{B}_i e(t) + B \varphi, \quad (13)$$

事件触发机制下的CNF控制器

$$u(t_k) = \tilde{F}_i e(t) + \tilde{F}_i \tilde{x}(t) + H_i r. \quad (14)$$

其中: $\tilde{B}_i = B_i F_i - \rho B_i B_i^T$, $\tilde{F}_i = -\rho B_i^T + F_i$.

2.2 事件触发跟踪控制

下面利用多Lyapunov函数方法得到控制输出 y 渐近跟踪参考输入 r 的充分条件.

定理1 考虑在事件触发策略(12)下, 具有CNF控制器的闭环系统(13). 对于任意 $\delta_i \in (0, 1)$, 令 $c_{\delta_i} > 0$ 是满足 $|F_i x| \leq u_{\max}(1 - \delta_i)$ 的最大正标量, 对于所有 $x \in X_{\delta_i}$, $X_{\delta_i} = \{x : x^T P_i x \leq c_{\delta_i}\}$, 给定正标量 ρ^* 和 $\bar{\sigma}$, 存在正定对称矩阵 $W_i \in R^{n \times n}$, 矩阵 $Y_i \in R^{m \times n}$, 对角矩阵 $S_i \in R^{m \times m}$ 满足以下不等式:

$$\begin{bmatrix} X_i & B_i Y_i - \rho^* B_i B_i^T W_i & B_i S_i + \rho^* W_i B_i - Y_i^T \\ * & -W_i & \rho^* W_i B_i - Y_i^T \\ * & * & -2S_i \end{bmatrix} < 0, \quad (15)$$

$$P_i \leq \mu P_j, \quad i \neq j, \quad \forall i, j \in I_m. \quad (16)$$

阶跃输入 r 和初始状态 x_0 分别满足

$$\tilde{x}_0 := (x_0 - x_e) \in \bigcap_{i=1}^m X_{\delta_i}, \quad |H_i r| \leq u_{\max}.$$

其中: $X_i = (A_i - \rho^* B_i B_i^T) W_i + W_i (A_i - \rho^* B_i B_i^T)^T + B_i Y_i + Y_i^T B_i^T + \bar{\sigma} W_i$, $W_i = P_i^{-1}$. 则闭环系统(13)在满足驻留时间 $\tau_a \geq \tau_a^* = \ln \mu / \lambda_E$ 的切换信号下, 控制输出 y 可以渐近跟踪参考输入 r .

证明 选取如下形式的多Lyapunov函数:

$$V(t) = V_i(t) = \tilde{x}(t)^T P_i \tilde{x}(t). \quad (17)$$

考虑到事件触发时刻与切换时刻之间可能存在耦合, 本文分以下两种情况进行讨论.

情况1 在切换间隔内没有事件触发发生, 即 $t_k \leq l_q < l_{q+1} \leq t_{k+1}$.

定义 $e_{ET}(t)$ 为在任何相邻的执行间隔处最新采样状态与当前采样状态之间的误差, 即 $e_{ET}(t) \triangleq e_{t_k}(t)$, $t \in [l_q, l_{q+1})$. 令 $v(t_k) = (-\rho B_i^T + F_i) \tilde{x}(t) + (-\rho B_i^T + F_i) e_{ET}(t)$, 则 $\tilde{x}(t)$ 属于 $\Psi(u - v, u_{\max})$. 根据引理1, 可得

$$\phi^T T_i [\phi + \tilde{F}_i \tilde{x}(t) + \tilde{F}_i e_{ET}(t)] \leq 0. \quad (18)$$

然后, 对 $V_i(t)$ 求导, 有

$$\begin{aligned} \dot{V}_i(t) &= 2\tilde{x}(t)^T P_i (A_i + B_i F_i - \rho B_i B_i^T) \tilde{x}(t) + \\ &2\tilde{x}(t)^T P_i (B_i F_i - \rho B_i B_i^T) e_{ET}(t) + 2\tilde{x}(t)^T P_i B_i \varphi. \end{aligned}$$

将式(13)与(18)结合, 可得以下不等式:

$$\begin{aligned} \dot{V}_i(t) &\leq \\ &2\tilde{x}^T(t) P_i (A_i + B_i F_i - \rho B_i B_i^T) \tilde{x}(t) + \\ &(\tilde{x}(t) P_i B_i \phi)^T + \tilde{x}(t) P_i (B_i F_i - \rho B_i B_i^T) e_{ET}(t) + \\ &\tilde{x}(t) P_i B_i \phi + [\tilde{x}(t) P_i (B_i F_i - \rho B_i B_i^T) e_{ET}(t)]^T - \\ &2\phi^T T_i \phi^T T_i - 2\phi^T T_i (-\rho B_i^T + F_i) \tilde{x}(t) - \\ &2\phi^T T_i (-\rho B_i^T + F_i) e_{ET}(t). \end{aligned}$$

其中

$$\Omega_i = \begin{bmatrix} P_i \tilde{A}_i + \tilde{A}_i^T P_i + \bar{\sigma} P_i & P_i \Xi_i & P_i B_i + \Gamma_i \\ * & -P_i & \Gamma_i \\ * & * & -2T_i \end{bmatrix},$$

$$\Xi_i = B_i F_i - \rho B_i B_i^T, \quad \Gamma_i = (\rho B_i - F_i^T) T_i,$$

$$\tilde{A}_i = A_i + B_i F_i - \rho B_i B_i^T.$$

为了方便使用线性矩阵不等式求解 Ω_i , 令 $W_i =$

$P_i^{-1}, S_i = T_i^{-1}, Y_i = F_i W_i$; 将 Ω_i 右乘对角正定矩阵 $\text{diag}\{W_i, W_i, S_i\}$, 得到定理1中的式(15).

对于第 i 个子系统, 令 $\lambda_{\Omega_i} = \lambda_{\min}(-\Omega_i), \lambda_{P_i} = \lambda_{\max}(P_i), \zeta(t) = [\tilde{x}(t)^T \quad e_{\text{ET}}(t) \quad \phi]^T$, 可得以下不等式:

$$\begin{aligned} \dot{V}_i(t) &\leq \lambda_{\Omega_i} \zeta(t)^T \zeta(t) \leq \\ &- \frac{\lambda_{\Omega_i}}{\lambda_{P_i}} \tilde{x}(t)^T P_i \tilde{x}(t) \leq - \frac{\lambda_{\Omega_i}}{\lambda_{P_i}} V_i(t). \end{aligned}$$

令 $\lambda_E = \min \left\{ \frac{\lambda_{\Omega_i}}{\lambda_{P_i}} \right\}, \forall i \in I_m$ 可得

$$\dot{V}_i(t) \leq -\lambda_E V_i(t). \quad (19)$$

情况2 在切换间隔内有事件触发发生, $t_k \leq l_q < t_{k+1} < \dots < t_{k+m'} \leq l_{q+1}$, 其中 $t_k, t_{k+1}, \dots, t_{k+m'}$ ($m' \in N^+$) 代表切换时刻. 误差 $e_{\text{ET}}(t)$ 可分段表示为

$$e_{\text{ET}}(t) = \begin{cases} e_{t_k}(t), & t \in [l_q, t_{k+1}]; \\ \vdots \\ e_{t_{k+m'}}(t), & t \in [t_{k+m'}, l_{q+1}]. \end{cases}$$

根据式(12)、(16)和(19), 也可以在各子区间上建立以下不等式:

$$V_i(t) \leq \begin{cases} e^{-\lambda_E(t-l_q)} V_i(l_q), & t \in [l_q, t_{k+1}]; \\ e^{-\lambda_E(t-t_{k+1})} V_i(t_{k+1}), & t \in [t_{k+1}, t_{k+2}]; \\ \vdots \\ e^{-\lambda_E(t-t_{k+m'})} V_i(t_{k+m'}), & t \in [t_{k+m'}, l_{q+1}]. \end{cases} \quad (20)$$

因误差变量 $e_{\text{ET}}(t)$ 是分段连续且有界的, 故 $V_i(t)$ 在区间 $[l_q, l_{q+1}]$ 上是连续的. 在区间 $[l_q, l_{q+1}]$ 上, 式(19)可由(20)得到.

此外, 由式(16)可得

$$V_i(l_q) \leq \mu V_i(l_{q-1}^-), \quad (21)$$

因此, 由式(20)和(21)可得

$$\begin{aligned} V_i(t) &\leq \mu e^{-\lambda_E(t-l_q)} V_i(l_q^-) \leq \\ &\mu e^{-\lambda_E(t-l_q)} e^{-\lambda_E(l_q-l_{q-1})} V_i(l_{q-1}) \leq \\ &\mu^2 e^{-\lambda_E(t-l_{q-1})} V_i(l_{q-1}^-) \leq \\ &\vdots \\ &\mu^{N_\sigma(l_0, t)} e^{-\lambda_E(t-l_0)} V_i(l_0) \leq \\ &e^{-\lambda_E(t-l_0) + \frac{t-l_0}{\tau_a} \ln \mu} V_i(l_0) \leq \\ &e^{-a(t-l_0)} V_i(l_0), \end{aligned} \quad (22)$$

其中 $a = \lambda_E - \frac{\ln \mu}{\tau_a} > 0$.

由式(17)可知, 显然容易找到常数 b_1 和 b_2 , 使得

$b_1 \tilde{x}(t) \leq V_i(t) \leq b_2 \tilde{x}(t)$ 成立. 通过计算可得

$$\tilde{x}(t) \leq \sqrt{\frac{b_2}{b_1}} e^{-\frac{a}{2}(t-l_0)} \|\tilde{x}_0(t)\|. \quad (23)$$

显然, 由式(23)可知闭环系统(13)是指数稳定的. 因此, 可得 $\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{x}(t) = 0, \lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = x_e, \lim_{t \rightarrow \infty} y(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} Cx_e = -C(A_i + B_i F_i)^{-1} B_i G_i r = r$. 即系统控制输出 $y(t)$ 能够渐近跟踪参考输入 r . $\square$

2.3 排除Zeno行为

本节通过计算事件触发间隔的最小正下界来避免Zeno行为的发生.

定理2 考虑在事件触发策略(12)下, 具有CNF控制器的闭环系统(13), 事件触发间隔 $t_{k+1} - t_k$ 的最小下界 T 为

$$T = \begin{cases} \frac{1}{\gamma} \ln \left(\frac{\gamma}{\theta} \cdot \frac{-\delta b_2 \|\hat{x}(t_k)\| + \Lambda(t_k)}{b_1 - \delta b_2} + 1 \right), & a \neq 0; \\ \frac{-\delta b_2 \|\hat{x}(t_k)\| + \Lambda(t_k)}{\theta(b_1 - \delta b_2)}, & a = 0. \end{cases} \quad (24)$$

其中

$$\begin{aligned} \gamma &= \|A_i\|, \theta = \|A_i\| \|x(t_k)\| + \|B_i\| u_{\max}, \\ \Lambda(t_k) &= \sqrt{\delta^2 b_2^2 \|\hat{x}(t_k)\|^2 + (b_1 - \delta b_2) \kappa(t_k)}, \\ \kappa(t_k) &= -\delta b_2 \|\hat{x}(t_k)\|^2 \|\hat{x}(t_k)\| = \|x(t_k) - x_e\|, \\ 0 < \delta < b_1/b_2, \quad T &= t_{k+1} - t_k. \end{aligned}$$

证明 假设子系统 i 在区间 $[l_q, l_{q+1}]$ 上被激活, 对误差 $e(t)$ 求导, 可得

$$\frac{d}{dt} e(t) \leq \dot{e}(t) \leq \|A_i x(t) + B_i \text{sat}(u)\| \leq$$

$$\|A_i x(t)\| + \|B_i \text{sat}(u)\| \leq$$

$$\|A_i\| \|x(t_k) - e(t)\| + \|B_i\| u_{\max}.$$

令 $\gamma = \|A_i\|, \theta = \|A_i\| \|x(t_k)\| + \|B_i\| u_{\max}$, 则微分方程的解 $\frac{d}{dt} e(t) = \gamma e(t) + \theta$ 为

$$e(t) = \begin{cases} \frac{\theta}{\gamma} (e^{\gamma(t-t_k)} - 1), & a \neq 0; \\ \theta(t - t_k), & a = 0. \end{cases} \quad (25)$$

如果触发条件(12)成立, 则系统的状态将被采样, 触发器的输出被更新, 并且误差 $e(t)$ 变为零; 否则, 系统的采样状态保持不变. 令 $\|\hat{x}(t_k)\| = \|x(t_k) - x_e\|$, 因此, 误差 $e(t)$ 总能满足以下不等式:

$$e(t) \leq \sqrt{\delta \frac{b_2}{b_1}} \tilde{x}(t)^2. \quad (26)$$

令 $\kappa(t_k) = -\delta b_2 \|\hat{x}(t_k)\|^2$. 当 $t \rightarrow \infty$ 时, $\kappa(t_k)$ 趋近于零, 因此 $\kappa(t_k)$ 在有限时间内大于零. 令 $\Lambda(t_k) = \sqrt{\delta^2 b_2^2 \|\hat{x}(t_k)\|^2 + (b_1 - \delta b_2) \kappa(t_k)}$, 则有

$$e(t) \leq \frac{-\delta b_2 \|\hat{x}(t_k)\| + \Lambda(t_k)}{b_1 - \delta b_2}. \quad (27)$$

由式(25)和(27)可得时间间隔 $T = t_{k+1} - t_k$. 若 $a \neq 0$, 则

$$T = \frac{1}{\gamma} \ln \left(\frac{\gamma}{\theta} \cdot \frac{-\delta b_2 \|\hat{x}(t_k)\| + \Lambda(t_k)}{b_1 - \delta b_2} + 1 \right);$$

若 $a = 0$, 则

$$T = \frac{-\delta b_2 \|\hat{x}(t_k)\| + \Lambda(t_k)}{\theta(b_1 - \delta b_2)}.$$

因此, 由条件 $0 < \delta < b_1/b_2$, 可以获得事件触发间隔的最小下界 $T > 0$, 从而避免了 Zeno 行为.

本文提出的结果是在闭环系统实现输出跟踪性能条件下的事件触发机制, 在实现跟踪的前提下, 通过触发控制达到了节约网络通信资源的目的. $\square$

注2 与单模态系统相比, 切换系统的各子系统具有一个共同的平衡状态 x_e , 对多模态 CNF 控制问题的研究具有更大的挑战性. 本文采用多 Lyapunov 函数方法, 给出一类满足驻留时间的切换信号, 并且对控制器和切换信号进行联合设计, 当系统中只存在一个子系统时, 本文方法可以退化成文献[15]单模态的情况.

注3 文献[16]给出的是时间驱动的 CNF 切换控制方法, 而本文所提出的是基于事件驱动的 CNF 切换控制方法. 与文献[16]相比, 本文方法能够减少一些不必要的信息传输, 从而达到节约通讯资源的目的.

3 仿真实例

下面给出一个涡扇发动机模型^[19]来验证本文所提出方法的有效性.

文献[19]考虑燃料流量饱和和波动和马尔可夫参数跳变过程 δ_i 取 $I_m = \{1, 2\}$. 涡扇发动机的模型可以描述为系统(1). 其中: $x = [\Delta N_f, \Delta N_c]^T = [N_f - N_{fe}, N_c - N_{ce}]^T$ 是系统状态; $u = \Delta W_f = W_f - W_{fe}$ 是控制输入, 与风扇速度 N_f 和核心速度 N_c 有关; N_{fe} 和 N_{ce} 是两种不同飞行条件 FC05 和 FC06 的平衡点. 参数矩阵为

$$A_1 = \begin{bmatrix} -3.7301 & 1.4001 \\ 0.4752 & -4.5586 \end{bmatrix}, B_1 = \begin{bmatrix} 0.0231 \\ 0.0657 \end{bmatrix},$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} -2.9130 & 1.3062 \\ 0.7871 & -3.4452 \end{bmatrix}, B_2 = \begin{bmatrix} 0.0239 \\ 0.0723 \end{bmatrix},$$

$$C = [1 \ 0].$$

给定各子系统参数 $\mu = 1.2, \delta = 0.3, \alpha = 1, \beta = 1$, 参考输入阶跃信号 $r = 1$, 系统的平衡状态为 $x_e = [1 \ 2.978]^T$. 通过计算可得 $\tau_a^* = \ln \mu / \lambda_E = 0.3610$. 通过求解定理1中的式(15), 可得

$$W_1 = \begin{bmatrix} 0.20 & 0.05 \\ 0.05 & 0.38 \end{bmatrix}, W_2 = \begin{bmatrix} 0.19 & 0.06 \\ 0.06 & 0.36 \end{bmatrix},$$

$$Y_1 = [0.06 \ 0.23], Y_2 = [0.06 \ 0.24],$$

$$S_1 = 0.52, S_2 = 0.57.$$

显然, 定理1的条件满足, 因此, 在满足驻留时间 $\tau_a^* = \ln \mu / \lambda_E = 0.3610$ 切换信号下, 控制输出 y 可以渐近跟踪参考输入 r . 图1~图4分别显示了仿真模拟的结果. 图1显示了切换信号, 每个子系统的激活时间都大于最小驻留时间 τ_a^* . 从图2中可以看出, 控制输出 y 能较快地渐近跟踪参考输入 r , 且具有较小的超调量.

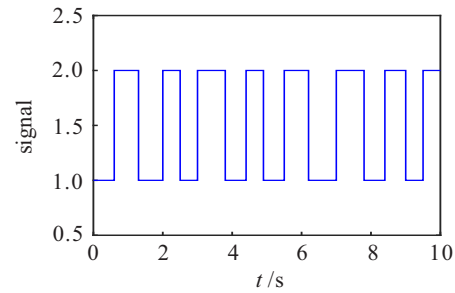


图1 切换信号

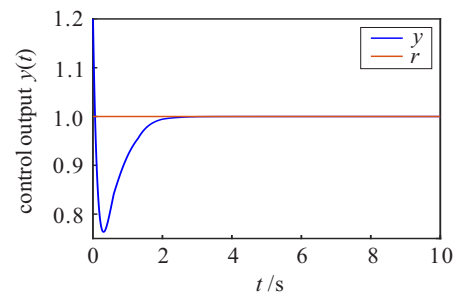


图2 输出跟踪

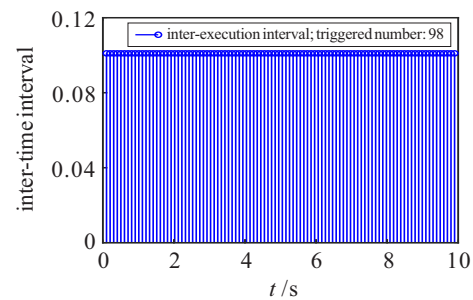


图3 时间触发时刻与间隔

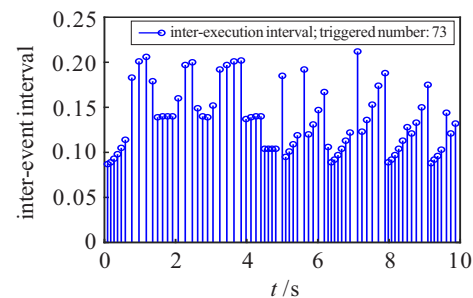


图4 事件触发时刻与间隔

图3和图4分别表示时间触发机制和事件触发机制下的触发次数和触发阈值. 在时间触发机制下,

在 $[0,10]$ s内有98个采样时刻,而在同一时间间隔内,事件触发机制只有73个采样时刻.相比之下,事件触发可以更好地节约通信资源,表明式(12)中所设计的事件触发方案是可行的.

4 结 论

本文基于组合非线性反馈控制器,研究了饱和切换系统的事件触发控制.采用多Lyapunov函数方法,在满足驻留时间的一类切换信号下,得到了控制输出渐近跟踪参考输入的充分条件.此外,通过计算获得了事件触发的最小正下界,避免了芝诺行为.未来的研究将继续探讨网络化切换系统的事件触发安全问题.

参考文献(References)

- [1] Lin H, Antsaklis P J. Stability and stabilizability of switched linear systems: A survey of recent results[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2009, 54(2): 308-322.
- [2] Wu M, Yang X, Chen W J, et al. A dual-sided control strategy based on mode switching for efficiency optimization in wireless power transfer system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(8): 8835-8848.
- [3] Lian J, Li C, Xia B. Sampled-data control of switched linear systems with application to an F-18 aircraft[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(2): 1332-1340.
- [4] Ma D, Zhao J. Stabilization of networked switched linear systems: An asynchronous switching delay system approach[J]. Systems & Control Letters, 2015, 77: 46-54.
- [5] Wang J, Ma R C, Fu J. Positivation with stability of switched linear systems by logic-based switchings[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2023, 53(3): 2010-2015.
- [6] 董潇潇, 张西, 张静. 基于反馈无源化的切换非线性系统 H_∞ 跟踪控制[J]. 控制与决策, 2021, 36(11): 2729-2734.
(Dong X X, Zhang X, Zhang J. Passification-based H_∞ tracking control for a class of switched nonlinear systems[J]. Control and Decision, 2021, 36(11): 2729-2734.)
- [7] Fu J, Qi Y W, Xing N, et al. A new switching law for event-triggered switched systems under DoS attacks[J]. Automatica, 2022, 142: 110373.
- [8] Qi Y W, Yu W K, Zhao X D, et al. Event-triggered control for network-based switched systems with switching signals subject to dual-terminal DoS attacks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2022, 30(3): 1283-1293.
- [9] 牛宏, 陶金梅, 张亚军. 一种新的数据驱动的非线性自适应切换控制方法[J]. 自动化学报, 2020, 46(11): 2359-2366.
- (Niu H, Tao J M, Zhang Y J. A new nonlinear adaptive switching control method based on data driven[J]. Acta Automatica Sinica, 2020, 46(11): 2359-2366.)
- [10] Zhao G L, Hua C C, Guan X P. A hybrid event-triggered approach to consensus of multiagent systems with disturbances[J]. IEEE Transactions on Control of Network Systems, 2020, 7(3): 1259-1271.
- [11] Fei Z Y, Guan C X, Zhao X D. Event-triggered dynamic output feedback control for switched systems with frequent asynchronism[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2020, 65(7): 3120-3127.
- [12] Long L J, Wang F L, Chen Z Y. Robust adaptive dynamic event-triggered control of switched nonlinear systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2023, 68(8): 4873-4887.
- [13] Femi T, Mija S J. Output feedback based adaptive composite nonlinear flight control design for a small-scale un-crewed helicopter[J]. ISA Transactions, 2022, 126: 190-202.
- [14] Wang H Y, Zuo Z Q, Wang Y J, et al. Composite nonlinear path-following control for unmanned ground vehicles with anti-windup ESO[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2022, 52(9): 5865-5876.
- [15] Zuo Z Q, Cheng H R, Xie P F, et al. Composite nonlinear feedback with dynamic event-triggered mechanism for control systems in the presence of saturation nonlinearity[J]. Asian Journal of Control, 2021, 23(3): 1503-1511.
- [16] Wang J, Zhao J. On improving transient performance in tracking control for switched systems with input saturation via composite nonlinear feedback[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2016, 26(3): 509-518.
- [17] Allerhand L I, Shaked U. Robust estimation of linear switched systems with dwell time[J]. International Journal of Control, 2013, 86(11): 2067-2074.
- [18] Henrion D, Peaucelle D, Arzelier D, et al. Ellipsoidal approximation of the stability domain of a polynomial[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2003, 48(12): 2255-2259.
- [19] Ma R C, Chen Q, Zhao S Z, et al. Dwell-time-based exponential stabilization of switched positive systems with actuator saturation[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2021, 51(12): 7685-7691.

作者简介

王娟(1984—),女,副教授,博士,从事切换系统、智能控制等研究, E-mail: wangjuan@sjzu.edu.cn;

朱帅东(1999—),男,硕士生,从事切换系统事件触发的研究, E-mail: m1310417851@163.com;

朱全民(1955—),男,教授,博士,从事非线性系统的分析和辨识、无模型U控制等研究, E-mail: quan.zhu@uwe.ac.uk.