

切换非线性系统采样控制的研究现状与进展

何文敏, 李实, 向峥嵘

南京理工大学自动化学院, 江苏 南京 210094

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61873128)

通信作者: 向峥嵘, xiangzr@njust.edu.cn 收稿/录用/修回: 2019-10-09/2020-03-02/2020-03-11

摘要

切换非线性系统由于其广泛的工程应用背景以及重要的理论研究价值引起各行业学者的广泛关注. 近年来, 随着计算机技术的快速发展, 切换非线性系统采样控制问题成为研究热点. 对目前切换非线性系统采样控制领域的研究现状进行综述. 首先介绍了切换非线性系统的基本问题, 并梳理了切换非线性系统几个常用控制方法的基本思想. 然后从时间触发采样控制和事件触发采样控制两个方面对切换非线性系统采样控制的国内外研究现状进行了论述. 最后进行了总结并提出切换非线性系统采样控制领域未来值得关注的研究方向.

关键词

切换系统
非线性系统
采样控制
异步切换
事件触发控制
中图分类号: TP18
文献标识码: A

Research Status and Progress in Sampled-data Control for Switched Nonlinear Systems

HE Wenmin, LI Shi, XIANG Zhengrong

School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China

Abstract

The switched system has received considerable attention of scholars from all fields because of its wide engineering application background and important theoretical research value. In recent years, the problem of switched nonlinear systems based on sampled-data control has become a research hotspot with the rapid development of computer technology. In this study, the current research status of sampled-data control for switched nonlinear systems is reviewed. First, the basic problems of switched nonlinear systems are introduced, and the fundamental ideas of various control methods of switched nonlinear systems are sorted out. Then, the research status of sampled-data control for switched nonlinear systems at home and abroad is discussed from two aspects: time-triggered sampled-data control and event-triggered sampled-data control. Finally, the existing research results are summarized, suggesting future research directions in the field of sampled-data control for switched nonlinear systems.

Keywords

switched system;
nonlinear system;
sampled-data control;
asynchronous switching;
event-triggered control

0 引言

随着现代化生产和工业过程日益复杂, 存在许多系统是无法用简单的差分方程或微分方程描述的. 针对此类系统, “混杂系统”的概念应运而生^[1-2]. 混杂系统被定义为一类由多种动态子系统(例如离散动态子系统、连续动态子系统、跳跃突变子系统)组合而成的统一动态系统^[3]. 处于混杂系统中的动态子系统之间存在互相作用并且统一的关系. 由于混杂系统复杂的结构, 导致其具有较大的不确定性以及强时变性, 这使得对混杂系统进行稳定性分析更加复杂和困难^[4].

而切换系统作为一类重要而特殊的混杂系统, 它是由有限个数的子系统和控制子系统切换次序的切换律(切换信号)构成的^[5]. 其中, 切换系统切换律决定了每个时刻子系统的激活状态, 并且在每个时刻有且仅有一个子系统被激活. 图1给出了切换系统的基本结构示意图.

切换系统被广泛应用于现代工业控制系统中, 例如变电站控制系统^[6]、化学反应器控制系统^[7]、飞行器导航控制系统^[8]及智能交通控制系统^[9]等领域. 并且, 其切换控制思想与变结构控制^[10-11]、Bang-Bang控制^[12]及多模型自适应控制^[13-14]等智能控制思想相统一. 这些控制方案的基本思想均是当被控对象改变或者时间推移时, 所设计

的控制器会切换相应的模式. 除此之外, 相较于非切换系统, 切换系统具有更强的鲁棒性以及更高的灵活性, 可改善系统的动态性能以及克服单个控制器的不足. 因此, 对采样系统的研究具有重要的理论和实际意义.

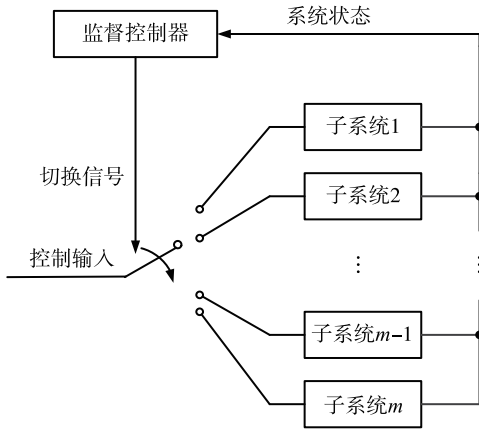


图1 切换系统基本结构示意图

Fig.1 Illustrator of basic structure of switched system

与此同时, 随着计算机技术的快速发展, 对控制领域产生了重要的作用和影响. 目前, 很大一部分系统都是由计算机来实现控制的. 在这种情况下, 控制输入只能利用离散的采样时刻数据设计, 并且其只在离散的采样时刻更新. 所以当采样频率低于某一数值时, 原有的控制器已经达不到期望的控制效果, 系统的性能会变差, 甚至于最终导致系统不稳定. 从而, 控制器的重新设计是非常必要的, 采样控制的研究受到越来越多国内外学者的欢迎.

在采用控制系统中, 采样器执行采样任务, 它具有多种采样的形式, 比如采样周期固定的等周期采样, 以及采样周期不固定的变周期采样等. 与具有连续时间控制器的连续系统相比, 基于采样控制的连续系统具有以下优势:

- 1) 基于采样时刻数据的采样控制器具有更好的控制精确度以及稳定性;
- 2) 采样控制器在实际应用中是更易于实现的;
- 3) 连续的控制信号对网络带宽要求很高, 并且在大部分情形下, 连续的信号在许多实际的工程应用中是无法实现的, 而基于采样数据的采样控制器能够很好地避免这些问题.

因此, 研究切换非线性系统的采样控制问题是非常有必要的. 为此, 本文对目前切换非线性系统采样控制领域的研究现状进行综述, 并指出该领域未来值得关注的研究方向.

1 基本问题及分析方法

考虑一类切换非线性系统模型:

$$\dot{x}(t) = f_{\sigma(t)}(x(t)), t \geq t_0 \quad (1)$$

其中, $x(t)$ 为系统的状态变量, $\sigma(t): [t_0, +\infty) \rightarrow N = \{1, \dots, N\}$ 是非线性系统的切换信号, t_0 指代系统的初始时刻, N 为系统子系统的个数. $f_h(x(t)), \forall h \in N$ 为非线

性函数. 当 $\sigma(t) = h, \forall h \in N$, 意味着第 h 个子系统处于激活状态.

对于非任意切换信号下的切换系统而言, 在 t 时刻的系统模式不仅仅只与当前时刻 t 有关, 还可能取决于系统当前的状态 $x(t)$. 由此, 切换信号可以被分为时间依赖切换信号以及状态依赖切换信号, 相应地, 可将系统划分为时间依赖型切换系统以及状态依赖型切换系统^[15]. 时间依赖型切换系统, 指的是切换发生在时间变量达到预设条件时. 而状态依赖型切换系统, 会对系统状态进行监测, 通过设计切换面, 其状态空间被划分为多个区域, 相应的区域对应着唯一确定的子系统, 当系统状态轨迹到达切换面时, 相应的子系统之间发生切换. 在文[16]中指出, 好的切换信号应满足如下的性质:

- 1) 能保证切换系统的稳定;
- 2) 应避免快速切换, 切换频率不应过高;
- 3) 具有较好的鲁棒性;
- 4) 仅可以利用系统可量测的信息来设计.

在文[17]中将切换系统的控制问题归纳为以下 3 个问题:

- 1) 系统在任意切换信号下的控制问题;
- 2) 系统在受限切换信号下的控制问题;
- 3) 通过设计合适的切换信号保证系统满足期望的性能.

对于切换系统, 由于其受到切换信号的影响, 其属性不单单是其子系统属性的叠加, 即使所有的子系统都是稳定的, 但整个切换系统不一定是稳定的; 或者, 即使所有子系统都是不稳定的, 也有可能通过设计合适的切换律使得此切换系统是稳定的^[17]. 切换系统主要的研究方法可分为: 公共李亚普诺夫函数法、多李亚普诺夫函数法以及驻留时间方法.

1) 公共李亚普诺夫函数法

公共李亚普诺夫函数法一般是用来解决系统在任意切换信号下的稳定问题. 对于切换非线性系统(1), 其所有子系统存在一个公共李亚普诺夫函数 $V(x)$ 使得所有子系统在该李亚普诺夫函数 $V(x)$ 下都能渐近稳定是保证切换系统(1)在任意切换信号下渐近稳定的充分条件. 其中, $V(x)$ 则被称为系统(1)的公共李亚普诺夫函数^[18].

需要指出的是, 公共李亚普诺夫函数方法导出的稳定性条件仅仅是一个充分条件, 对于一个切换系统而言, 当找不到公共李亚普诺夫函数时, 并不意味着它是不能在任意切换信号下被稳定的. 并且, 公共李亚普诺夫函数方法需要针对所有子系统找到一个共同的李亚普诺夫函数, 这对系统的要求较高, 所得到的结果具有较强的保守性.

2) 多李亚普诺夫函数法

在多李亚普诺夫函数方法中, 切换系统中的每个子系统分别对应着一个李亚普诺夫函数, 最终得到的多李亚普诺夫函数由每个切换区间内处于激活状态子系统对应的李亚普诺夫函数组成^[19]. 因此, 这个多李亚普诺夫函数未必是连续的, 其沿着系统的轨迹可能也不是单调递减的, 但

它是分段可微的.

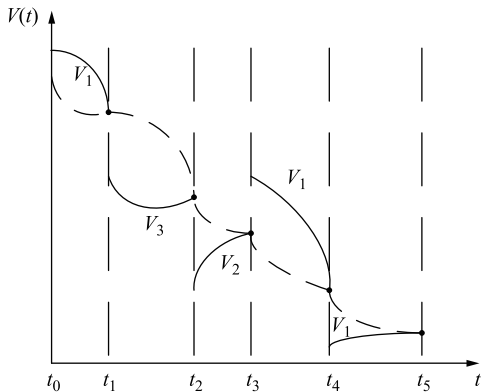


图2 多李亚普诺夫函数法第1种情况示意图

Fig.2 Illustrator of the first state of multi-Lyapunov function

在文[20]中指出, 如果能够找到一个多李亚普诺夫函数使得在每个切换区间内处于激活状态子系统对应的李亚普诺夫函数是递减的, 并且其值在切换时刻是非增的(如图2所示), 则此切换系统是渐近稳定的.

随着研究的深入, 文[21]提出关于多李亚普诺夫方法的保守性更弱结论. 其中指出若同一个子系统每次被激活时刻的李亚普诺夫函数值小于上一次被激活时刻的值, 整个系统的能量处于非增的趋势(如图3所示), 此时, 切换系统也能得到渐近稳定的结果.

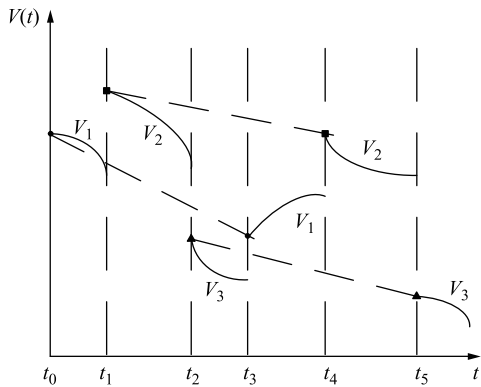


图3 多李亚普诺夫函数法第2种情况示意图

Fig.3 Illustrator of the second state of multi-Lyapunov function

文[22-23]利用多李亚普诺夫函数方法设计状态依赖切换信号保证了在存在不稳定子系统情形下切换系统的稳定性.

3) 驻留时间方法

对于一个切换系统而言, 即便每个子系统都能渐近稳定, 但如果子系统运行时衰减的能量不够抵消切换时所增加的能量, 此切换系统仍是不稳定的. 但如果我们设计切换律使在一个子系统中停留时间足够长, 此时, 子系统衰减的能量已能抵消切换时所增加的能量, 系统整体的能量是衰减的, 那么系统就能达到稳定^[24].

基于此思想, 文[25]提出驻留时间方法来解决切换系

统的稳定性问题. 在任意两次切换的间隔需存在确定的一个时间下界, 此时间下界被定义为驻留时间. 此后, 作者又进一步提出了保守性更弱的平均驻留时间概念^[26]. 文[26]指出只要所有子系统的平均驻留时间存在确定下界, 系统的稳定性也是可以保证的.

值得注意的是, 上述两篇文献所提方法均需要满足所有子系统是稳定的. 而文[27-28]将平均驻留时间方法推广到了具有不稳定子系统的切换系统中, 如果在不稳定的子系统中停留时间很短, 切换系统依旧可以是稳定的. 近几年来, 平均驻留时间方法得到进一步的推广, 在文[29-30]中, 作者提出基于模态的平均驻留时间方法解决了一类切换线性系统的稳定性问题.

2 切换系统采样控制面临的问题

随着计算机技术、控制理论和通信工程的发展和融合, 采样控制吸引了众多学者的目光. 不同于连续时间控制系统, 在采样控制系统中被控对象的系统模型往往是连续的, 但其控制器却是利用离散信息构造的. 在采样控制系统中, 用来判断采样机制是否触发的事件被称为触发条件(触发规则). 当触发条件满足时, 在采样时刻对系统的可测状态进行采样, 并同时更新系统控制器. 随后, 利用零阶保持器将离散的控制信号在采样间隔内保持为连续的常值信号. 最后, 经过保持器输出的连续信号作为被控对象的输入. 采样控制的结构框图如图4所示.

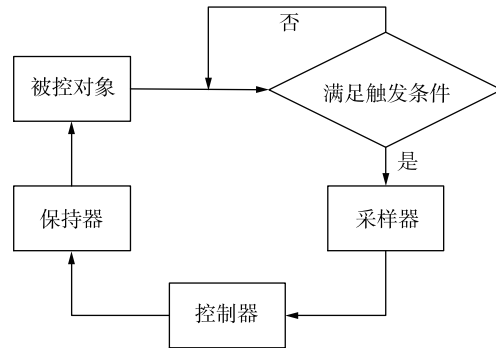


图4 采样控制结构框图

Fig.4 Diagram of sampled-data control scheme

采样控制系统的触发条件一般被分为两类, 一类是基于时间的触发条件, 另一类是基于事件的触发条件.

早期的采样控制依赖于时间而执行, 即所谓的时间触发采样控制, 其具有可预测性以及易于实现等优点^[31]. 在时间触发采样控制中又可分为等周期采样和变周期采样. 等周期采样中, 采样周期是固定的; 变周期采样意味着采样周期是时变的. 但这两种时间采样机制的设计关键均是寻找一个可允许的最大采样周期.

但当采样周期选择比较小时, 基于时间触发的采样控制方案会产生大量冗余的采样信息, 并没有真正意义上减少通信负担. 1999年, 在IFAC会议上提出了事件触发采样的概念^[32-33]. 不同于时间触发采样机制, 事件触发采样机制是在特定的事件满足的情况下才会被执行一次, 它

是依赖事件的^[32]. 事件触发采样控制是在满足系统控制性能的基础上, 根据被控对象状态的变化, 合理选择采样时刻并更新控制信号. 当系统状态变化量较小时, 事件触发采样控制相比于时间触发采样控制, 可有效减少采样和控制的次数, 从而可降低计算资源的消耗以及通信负担^[32-33].

基于事件触发采样的控制律设计一般需要包含两方面^[34]:

- 1) 利用采样时刻状态信息设计的系统输入控制律;
- 2) 决定何时触发采样的触发规则.

事件触发采样控制设计的关键是如何选择合适的触发规则, 使得在节约资源的前提下仍能保证系统的稳定^[35]. 所设计的触发规则一般与系统的状态、输出或者输入有关. 当采样值与真值之间的差无法满足设计的指标时, 采样器执行采样任务并且控制器更新.

在事件触发采样控制中, 触发规则设计的合理性, 往往取决于该触发机制是否能有效地避免 Zeno 现象. Zeno 现象指的是两次触发时间间隔无限小, 使得一个在有限时间区间内发生无限次触发的现象. 在实际工程领域, 是有一个触发机制能触发如此频繁以及没有一个控制器能更新如此频繁, 因此, 在事件触发采样控制器的设计时, Zeno 现象的排除是非常重要的. 现在排除 Zeno 现象的主要方法是采用通过证明在两次触发时刻之间存在一个正的时间下界.

虽然对切换非线性系统在连续时间框架下的控制问题已经进行了深入的研究, 但是针对切换非线性系统采样控制问题的研究仍具有较大的挑战性, 主要体现在 3 个方面:

1) 如何仅仅利用采样时刻信息构造采样控制器, 抵消采样间隔之间时变的不确定动态是切换非线性系统采样控制中需要面临的基本问题.

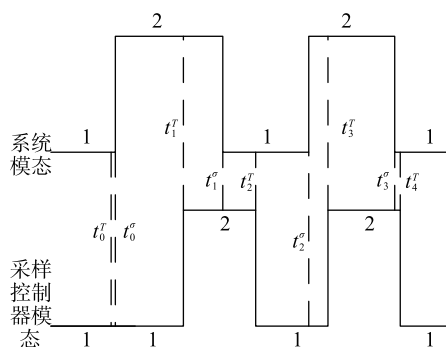


图5 异步现象示意图

Fig.5 Illustrator of asynchronous phenomenon

2) 在采样间隔内, 子系统可能会发生切换, 而此时控制器并不能更新, 进而导致系统产生了异步现象^[36], 即切换系统的模态发生改变而控制器模态并未改变(如图5所示, 其中, $t_0^c - t_4^c$ 表示采样时刻, $t_0^s - t_3^s$ 表示系统切换时刻, $[t_0^c, t_1^c]$, $[t_1^c, t_2^c]$, $[t_2^c, t_3^c]$ 以及 $[t_3^c, t_4^c]$ 区间内发生

异步现象). 在控制器设计和系统稳定性分析时, 如何分析及处理此类模态不匹配情形是切换非线性系统采样控制中需要面临的关键问题.

3) 在受限切换信号下, 如何建立采样机制与切换系统各子系统驻留时间的关系, 仍保证切换非线性系统的稳定性是切换非线性系统采样控制中需要面临的核心问题.

3 基于时间触发的采样控制

近年来, 基于时间触发的采样控制在切换非线性系统中得到了广泛的应用. 接下来, 本节将从输入时延方法和连续域—离散化方法两个方面来介绍其研究进展.

3.1 输入时延方法

输入时延方法将系统的采样输入看成一种时滞输入, 原系统即转化为连续的时滞系统^[37-38], 进而可利用时滞系统的处理方法分析系统稳定性.

3.1.1 任意切换信号情形

文[39]研究了一类具有采样输入的不确定切换时滞系统的鲁棒 H_∞ 控制问题. 其中, 利用输入时延方法将采样输入转化为时变时滞, 设计了采样的状态反馈控制器, 最后利用线性矩阵不等式(LMI)方法, 得到能保证系统在任意切换信号下仍能稳定的采样周期上界. 文[40-41]同样考虑了具有时滞的切换非线性系统, 并设计变采样周期控制器得到了全局稳定的结果.

针对具有切换拓扑的非线性多智能系统, 基于时间触发的采样控制也有广泛的应用. 在文[42]中研究了具有随机切换网络拓扑和通信时延的非线性多智能体系统的基于采样控制领导跟随一致性问题. 通过利用一个马尔可夫过程对切换的网络拓扑进行建模, 以及提出了一种具有可变采样周期的一致性采样控制协议. 进而, 将领导跟随一致性问题转化为一类具有时变时滞的马尔可夫跳系统的稳定性问题. 利用 Lyapunov-Krasovskii 泛函方法和弱无穷小运算, 导出了依赖于时滞的稳定性准则, 该准则能保证此多智能体系统在均方意义下的全局指数领导跟随一致性. 最后, 通过解一组 LMI 得到控制器的增益.

在实际工程控制中, 有些系统本身并不是切换的系统, 但可能因为其具有变化的模态, 可将其建模成切换系统, 用切换系统的理论分析其稳定性. 比如, 文[43]考虑了一类具有丢包的时滞混沌神经网络(DCNNs)的指数同步问题. 其中, 将存在丢包的系统和无丢包系统建模成一个切换系统的两个模态, 从而, 具有丢包的神经网络系统的同步问题被转化为切换的神经网络系统的同步问题, 是否丢包成为新切换系统的切换信号. 通过设计采样控制器, 保证了在随机丢包情况下具有时滞的混沌神经网络的指数同步性.

3.1.2 受限切换信号情形

文[44]提出了基于离散度的稳定性分析和鲁棒混合非脆弱的可靠控制设计方法. 考虑的切换非线性系统具有执行器故障和具有已知上界的采样时滞. 利用输入时滞方法, 将采样系统转化成时滞系统, 并构造了利用实际采样模态和时变时滞信息的 Lyapunov-Krasovskii 泛函, 最后以

LMI 的形式给出了稳定性条件和控制器的设计过程. 文[45]研究了一类基于采样的切换随机时滞系统的可靠控制问题, 所考虑的系统同时具有执行器故障和非线性扰动. 利用多李亚普诺夫泛函和平均驻留时间方法, 导出了异步切换情形下该切换随机时滞系统均方指数稳定的充分条件.

文[46-48]将切换系统采样控制理论应用到了 T-S 模糊控制系统中. 在文[46]中研究了针对切换 T-S 模糊系统的有限时间采样控制问题. 通过利用输入时滞的方法, 有着变采样周期的切换 T-S 模糊系统被转化成有着状态时滞的连续时间切换 T-S 模糊系统. 基于最小驻留时间方法, 导出了有限时间稳定条件. 文[47]研究了一类具有采样控制输入的切换非线性系统的稳定性问题. 利用输入时滞方法, 将相应的闭环系统建模为具有时变时滞的异步切换 T-S 模糊系统. 在异步切换方法的基础上, 利用一个 LMI 设计了状态反馈控制器. 此外, 还给出了能保证系统指数稳定性的切换策略. 相比于文[47], 文[48]在其基础上, 进一步减少了通信负担, 考虑了一类在异步切换下具有执行器故障的 T-S 模糊切换非线性系统的量化控制问题.

文[49]考虑了一类带有量化输入的切换非线性中立系统的采样控制问题. 该文献将切换非线性采样控制方法推广到了在异步切换下的切换中立系统输入状态稳定问题. 利用扇形界限法分析了量化现象, 并给出了保证输入状态稳定的 LMI 条件.

针对具有时变时滞的切换神经网络系统, 文[50]研究了其基于平均驻留时间方法的采样同步控制问题. 通过构造合适的 Lyapunov-Krasovskii 泛函和自由加权矩阵, 导出了平均驻留时间与最大采样间隔之间需满足的关系, 并设计了模态依赖控制器, 保证了相应的切换神经网络的指数同步. 在该文献中假设切换仅发生在采样时刻, 故所考虑的切换系统不会发生异步现象.

在文[51-53]中考虑了基于时间触发采样控制的切换神经网络系统同步问题. 文[51]研究了一类切换非线性神经网络系统的主从同步问题. 其思想是利用测量输出和切换信号在采样点的信息, 设计具有同步增益的反馈控制律. 首先, 基于输入时滞方法, 将同步误差系统建模为具有状态时滞和异步切换信号的切换系统, 新的切换信号由原始切换信号与其在采样点的信息复合而成. 然后, 利用李亚普诺夫函数法和平均驻留时间方法分析了存在异步切换的情况下同步误差系统的指数稳定性, 并通过求解一组 LMI 给出了输出反馈控制器的设计方案. 文[52]在文[51]的基础上, 考虑了一类具有量化输入的切换非线性神经网络系统同步问题. 文[53]则考虑了更为一般的切换神经网络系统, 该系统同时具有离散时滞和分布式时滞. 该文献考虑到系统切换可能发生在采样间隔内, 分析了可能产生的异步现象. 利用多李亚普诺夫函数和平均驻留时间方法, 给出了保证主从神经网络之间的误差能指数稳定的充分条件. 并在此基础上, 进一步设计了采样数据控制器, 使主从系统能按照规定的性能指标同步.

文[54-55]将具有网络故障的非线性系统建模成切

换的非线性系统, 并利用切换系统理论的分析方法分析建模后的新系统. 文[54]考虑了一类具有丢包的采样 T-S 模糊系统的指数稳定问题. 采用输入时滞方法对具有时滞控制输入的采样保持行为进行了建模, 并采用切换系统的方法对丢包现象进行建模. 因此, 将具有丢包的采样 T-S 模糊系统建模为具有时变时滞的切换 T-S 模糊控制系统. 文[55]研究一类受网络攻击的非线性多智能体系统的采样一致性问题. 所考虑的攻击被认为是可恢复的, 它破坏了具有向生成树的网络拓扑结构的连接性. 在该文献中利用切换系统的理论对网络攻击现象进行建模, 使得受到网络攻击的原系统转化成一类特殊的切换系统. 进而, 利用切换系统理论里平均驻留时间方法, 导出了攻击频率和采样周期之间需满足的关系, 并设计了采样控制协议. 最终保证该非线性多智能体系统在受攻击的情况下仍能指数一致性.

3.2 连续域—离散化方法

连续域—离散化方法的思想是首先针对连续时间系统设计连续时间控制器, 然后将控制器在采样点离散化得到离散时间控制器^[56]. 进而分析离散时间状态与连续时间状态差值, 选取一个可允许的采样周期, 从而保证系统的稳定.

3.2.1 任意切换信号情形

文[57]利用连续域—离散化方法研究了一类切换非线性系统基于采样输出反馈控制的全局跟踪问题. 为了减少通信负担, 该文献对输入信号和输出信号都进行了量化. 采用 Filippov 解和微分包含方法对产生的不连续系统进行分析, 并设计了观测器估计不可测的系统状态, 进而设计了线性采样输出反馈控制器. 当合理选择采样周期、量化参数和设计参数, 能保证相应的闭环系统在任意切换信号下跟踪误差是有界的. 文[58]在此基础上, 进一步考虑了一类具有未知输出增益和量化控制输入的不确定切换随机非线性系统, 并保证相应的闭环系统在任意切换下能达到均方指数稳定. 文[59]研究了一类非严格反馈形式的不确定切换非线性系统的时间触发采样输出反馈稳定问题. 通过对利用动态面方法构造的虚拟连续控制器进行离散化, 得到了一个采样控制器. 并证明了所设计的采样控制器能够使闭环系统的所有状态在任意切换信号下收敛到原点附近, 同时给出了允许的采样周期. 文[60]研究了在任意切换信号下的具有状态时滞以及执行器故障的大系统采样稳定性问题. 文[61]研究了一类具有 p 规范型的切换非线性系统在任意切换信号下的采样输出反馈稳定问题. 文[62]在此基础上, 进一步考虑了同时具有随机干扰的 p 规范型的切换非线性系统. 基于加幂积分和齐次理论的方法, 设计了采样输出反馈控制器, 并得到在概率意义下全局渐近稳定的结果. 文[63]考虑了具有 p 规范型的切换非线性系统的实用跟踪问题. 文[64]设计采样输出反馈控制策略解决了一类高阶切换非线性系统的全局有限时间镇定问题.

文[65]研究了在有向任意切换拓扑下的一组谐振子的分布一致性问题. 所设计的采样协议只要求在采样时刻

切换通信拓扑的并集具有一棵生成树,不需要在采样间隔内交换信息,也不需要每个采样时刻保证通信拓扑的连接性.并且与现有的基于采样的算法相比,采样周期、通信拓扑和控制增益是解耦的,故可以单独设计,从而放松了控制器设计中的许多限制.

3.2.2 受限切换信号情形

针对具有不稳定子系统的非严格反馈切换非线性系统,文[66]通过设计采样控制器以及合理的切换信号,能够保证相应的闭环系统在合理采样周期下的全局稳定性.在文[67]中,考虑了在异步切换的情况下切换非线性系统的采样控制全局稳定问题.其中,采用反步设计方法构造了状态反馈采样数据控制器,并推导了采样周期与平均驻留时间之间的关系,保证了闭环系统是全局渐近稳定的.文[68]在该基础上,进一步讨论了切换非线性系统的输出反馈稳定性问题.随着研究的深入,在文[69]中考虑了一类具有异步切换情形的切换随机非线性系统的全局采样输出反馈问题,该类系统的输出和系统模式都是仅在采样时刻可用的.在文[70]中,针对一类切换随机非线性大系统设计了采样控制律,得到了均方意义下全局渐近稳定的结果.文[71]研究了存在异步现象和未知死区的切换非线性大系统的采样输出反馈控制问题.在文[72]中研究了更一般的切换系统在异步切换下的稳定性问题,所考虑的系统是完全未知的,采用模糊逻辑系统的方法,设计了自适应采样控制律,保证了系统的稳定性.

4 基于事件触发的采样控制

针对切换非线性系统的事件触发采样控制逐渐受到国内外学者的广泛关注.与此同时,该领域涌现了丰硕的研究成果.本节将以几个主要的触发机制来分类,介绍目前切换非线性系统事件触发采样控制的研究进展.

4.1 连续事件触发

在连续事件触发采样控制方案中,对事件触发条件进行实时的监测,当触发条件满足时,更新控制器.因此,需要利用特殊的硬件装置对系统状态进行实时的测量^[73].

文[74]研究了具有输出反馈的切换非线性系统的采样控制问题,其中控制输入和输出测量的采样时间是由事件触发策略所确定的.在该文献中将闭环系统看作是由两个渐近稳定系统级联而成,从而可以针对新的闭环混杂系统构造李亚普诺夫函数以及设计合适的采样算法,最终证明了具有采样控制的闭环系统是全局渐近稳定的.文[75]采用连续事件触发控制方案,研究了一类级联切换系统的输入状态稳定问题.

文[76]研究了一类具有切换动力学模型的智能体系统的事件触发自适应领导跟随一致性控制问题.该文献中考虑的系统包含完全未知的互联项和任意的智能体间不同步的切换.该系统研究的非线性系统是更一般的,其中设计的自适应模糊控制策略,保证多智能体系统的输出跟踪误差收敛到原点的小邻域内.

文[77]研究了一类具有随机切换有向拓扑和时变传输时滞的网络控制系统的事件触发一致性控制问题.文

[78]研究了一类非线性随机耦合网络的指数同步问题.该文献引入伯努利随机变量来描述随机的结构耦合,采用均值为正的随机变量对耦合强度进行了建模,并且采用连续时间齐次马尔可夫链描述了耦合结构和固定节点集的动态切换过程.所提出的网络模型能够捕捉到网络运行过程中外部环境的各种随机效应.文[79]考虑了一类具有未知参数的离散非线性随机系统在切换拓扑下的分布式状态估计问题.基于输入状态稳定的框架,导出了保证估计误差在均方意义下有界的平均驻留时间充分条件.

针对具有切换拓扑的多智能体系统,事件触发采样控制也是该领域的研究热点^[80-87].文[80-81]研究了具有任意切换拓扑的多智能体系统基于事件触发采样控制平均一致问题.文[82-83]分别针对具有未知控制方向和外部扰动的多智能体系统,得到领导跟随输出一致性结果以及固定时间平均一致性结果.文[84]研究了有向切换拓扑下多Lur'e非线性系统的分布式事件触发一致性问题.而文[85]所研究的多智能体系统的拓扑切换满足马尔可夫跳性质,拓扑间的切换满足一定的概率.文[86]同样考虑了马尔可夫切换拓扑,其针对的是一类多欧拉-拉格朗日系统,研究了该系统在事件触发采样控制协议下的有限时间一致性问题.文[87]所研究的具有切换拓扑的多智能体系统中,各跟随智能体之间的拓扑切换不是同时的,每个智能体存在自身的切换序列.该文献中采用指数加常数的触发条件,可直接排除Zeno现象.

4.2 离散事件触发

与上面所提的连续事件触发采样方案不同,离散事件触发采样方案每隔一个固定的采样周期才会对触发条件进行判断^[88-91].因此,离散事件触发控制也被称为周期性事件触发控制.离散事件触发采样机制将传统的等周期时间触发机制与事件触发机制相结合,使得通信负担进一步减少.

在文[92]中,作者研究了具有切换约束的连续时间切换系统的事件触发稳定问题,并进一步研究了两个具有不同初始值的连续时间切换非线性系统的切换同步问题.文[93]研究了一类基于离散事件触发采样控制的具有通信时滞的切换神经网络的同步问题.该文献所设计的控制律能有效地减少处理器的控制更新次数,所设计的触发规则依赖测量误差以及当前采样的状态值.并采用输入时滞的方法将模型转化成具有时滞的误差网络模型,进而利用Lyapunov-Krasovskii泛函和自由加权矩阵法,导出了切换神经网络事件触发采样控制同步的准则.其中,该文献假设当前切换系统的模式是实时可得可用的.在文[93]基础上,文[94]进一步考虑了一类具有通信时滞和伯努利分布的不确定切换神经网络的非脆弱离散事件触发采样控制问题.该切换系统模型中参数具有随机不确定性,并且控制器具有随机的增益扰动.

4.3 自触发

自触发控制策略的基本思想是根据已有的信息,提前计算出下一次的采样时刻,仍可保证系统达到期望的性能^[95].

文[96]考虑了具有切换动力学模型的非线性多智能体系统的领导跟随一致性问题. 在该文献中分别设计了集中式和分布式事件触发规则, 并将结论分别推广到了自触发控制的情形. 最后证明了系统的 Zeno 现象是可以被排除的.

4.4 基于模型事件触发

在基于模型的事件触发采样方案中, 通过设计一个模型去重构两采样间隔之间的系统状态, 并利用重构得到的系统状态进行控制器的设计^[97]. 基于模型的事件触发方案可以更有效地减少事件触发次数以及传输次数^[98].

文[99]研究了一类具有切换动力学模型的随机多智能体系统基于模型事件触发一致性跟踪问题. 该文献中构造了一个新的协议设计框架, 解决了在随机系统中 Zeno 现象不易排除的问题. 最终保证跟随多智能体能在有界的误差内几乎处处跟踪给定的领导信号.

5 展望

本文主要围绕着切换非线性系统采样控制的研究现状进行了综述. 一方面, 在实际工程中, 许多系统可以被建模成切换系统, 用非切换的方法无法对它们进行很好的分析. 另一方面, 采样控制是一种先进的工程控制技术并能有效地减少通信资源和计算负担. 因此, 针对切换非线性系统的采样控制研究是具有重大理论与实际意义的. 目前, 切换非线性系统采样控制的研究正处于一个蓬勃发展的上升阶段, 尚有许多问题有待研究与解决. 结合本文之前的讨论与总结, 基于作者的思考与理解, 提出一些切换非线性系统采样控制领域未来值得关注的研究方向.

1) 更一般的切换非线性系统采样控制分析

现有采样研究结果考虑的切换非线性模型中, 非线性函数大部分都假设其满足 Lipschitz 条件、类 Lipschitz 条件或者线性增长条件等. 然而, 在实际应用中, 许多系统是不满足这些假设的. 因此, 针对更一般的切换非线性系统的采样控制问题成为现阶段的一个重要研究方向.

2) 具有异步的切换非线性系统事件触发采样控制

在现有关于事件触发采样控制的研究结果中, 均未考虑异步现象, 但异步现象在切换系统中是十分常见的. 如何分析具有异步现象的切换非线性系统事件触发采样控制问题是未来值得关注的方向.

3) 资源更节约的采样控制

本文中所述文献的采样控制方案大多比较单一, 研究时间触发采样控制与事件触发采样控制相结合的采样控制策略, 可在保证系统性能的前提下进一步减少通信负担.

4) 理论结果的实际应用研究

目前对切换非线性系统采样控制的研究成果侧重于理论分析, 而具体如何优化设计采样周期、触发规则以及驻留时间等相关问题的结果较少. 并且, 如何将理论研究成果更好的应用于实际工程实践中还需要进一步的研究.

综上所述, 切换非线性系统采样控制的研究虽然还未成熟, 还存在着一些不足, 但随着其理论研究的不断深入, 以及非线性理论等方法的进一步发展. 切换非线性系统采样控制必然会得到进一步的完善, 也必然会在实际领域得到更多的应用.

参考文献

- [1] Witsenhausen H. A class of hybrid-state continuous-time dynamic systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1966, 11(2): 161-167.
- [2] Athans M. Command and control theory: A challenge to control science[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1986, 32(4): 286-293.
- [3] Schaft A V D, Schumacher H. An introduction to hybrid dynamical systems[M]. London, UK: Springer-Verlag, 2000.
- [4] 张雅平. 切换系统的采样控制[D]. 曲阜: 曲阜师范大学, 2017.
Zhang Y P. Sampled-data control for switched systems[D]. Qufu: Qufu Normal University, 2017.
- [5] Antsaklis P J, Nerode A. Hybrid control systems: An introductory discussion to the special issue[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1998, 43(4): 457-459.
- [6] Bernardon D, Sperandio M, Garcia V, et al. Methodology for allocation of remotely controlled switches in distribution networks based on a fuzzy multi-criteria decision making algorithm[J]. Electric Power Systems Research, 2011, 81(2): 414-420.
- [7] Putyrski M, Schultz C. Switching heterotrimeric G protein subunits with a chemical dimerizer[J]. Chemistry and Biology, 2011, 18(9): 1126-1133.
- [8] Oishi M, Mitchell I, Bayen A, et al. Hybrid verification of an interface for an automatic[C]//41st IEEE Conference on Decision and Control. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2002: 1607-1613.
- [9] Varaiya P. Smart cars on smart roads: Problems of control[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1993, 8(2): 195-207.
- [10] Decarlo R A, Zak S H, Matthews G P. Variable structure control of nonlinear multivariable systems: A tutorial[J]. Proceedings of the IEEE, 1988, 76(3): 212-232.
- [11] Utkin V I. Variable structure systems with sliding mode: A survey[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1977, 22(2): 212-222.
- [12] Bizon N, Oproescu M, Raducu M. Fuzzy bang-bang control of a switching voltage regulator[C]//IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008, 192-197.
- [13] Anderson B D O, Brinsmead T S, De Bruyne F, et al. Multiple model adaptive control, Part 1: Finite controller coverings[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2000, 10(11/12): 909-929.
- [14] Hespanha J P, Liberzon D, Morse A S, et al. Multiple model adaptive control, Part 2: Switching[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2001, 11(5): 479-496.

- [15] Liberzon D. Switching in systems and control[M]. Boston, USA: Birkhäuser, 2003.
- [16] Sun Z, Ge S S. Switched linear systems: Control and design[M]. London, UK: Springer-Verlag, 2005.
- [17] Liberzon D, Morse A S. Basic problems in stability and design of switched systems[J]. IEEE Control Systems, 1999, 19(5): 59–70.
- [18] Liberzon D, Tempo R. Common Lyapunov functions and gradient algorithms[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2004, 49(6): 990–994.
- [19] Peleties P, Decarlo R. Asymptotic stability of m-switched systems using Lyapunov functions[C]//31st IEEE Conference on Decision and Control. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1992: 3438–3439.
- [20] Decarlo R A, Branicky M S, Pettersson S, et al. Perspectives and results on the stability and stabilizability of hybrid systems[J]. Proceedings of the IEEE, 2000, 88(7): 1069–1082.
- [21] Michel A N. Recent trends in the stability analysis of hybrid dynamical systems[J]. IEEE Transactions on Circuits Systems, 1999, 46(1): 120–134.
- [22] Long L J, Zhao J. Adaptive disturbance rejection for strict-feedback switched nonlinear systems using multiple Lyapunov functions[J]. International Journal of Robust Nonlinear Control, 2014, 24: 1887–1902.
- [23] Long L J, Zhao J. Adaptive fuzzy tracking control of switched uncertain nonlinear systems with unstable subsystems[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2015, 273: 49–67.
- [24] 黄世沛. 几类切换非线性系统的有限时间控制问题研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2016.
Huang S P. On finite-time control of several classes of switched nonlinear systems[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2016.
- [25] Morse A S. Supervisory control of families of linear set-point controllers, Part 1: Exact matching[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1996, 41(10): 1413–1431.
- [26] Hespanha J P, Morse A S. Stability of switched systems with average dwell time[C]//38th IEEE Conference on Decision and Control. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1999: 2655–2660.
- [27] Zhai G S, Hu B, Yasuda K, Michel A N. Disturbance attenuation properties of time-controlled switched systems[J]. Journal of the Franklin Institute, 2001, 338(7): 765–779.
- [28] Zhai G S, Hu B, Yasuda K, Michel A N. Stability analysis of switched systems with stable and unstable subsystems: An average dwell time approach[C]//Proceedings of the 2000 American Control Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2000: 200–204.
- [29] Zhao X, Zhang L, Shi P, et al. Stability and stabilization of switched linear systems with model-dependent average dwell time[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2012, 57(7): 1809–1815.
- [30] Zhao X, Liu X, Yin S, Li H. Improved results on stability of continuous-time switched positive linear systems[J]. Automatica, 2014, 50(2): 614–621.
- [31] Astrom K J, Wittenmark B. Computer controlled systems[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002: 23–39.
- [32] Arzén K E. A simple event-based PID controller[C]//Proceedings of the 14th IFAC World Congress. Oxford, UK: Elsevier, 1999: 423–428.
- [33] Åström K J, Bo B. Comparison of periodic and event-based sampling for first order stochastic systems[C]//14th IFAC World Congress. Oxford, UK: Elsevier, 1999: 301–306.
- [34] 高永峰. 非线性控制系统的时间触发机制设计[D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
Gao Y F. Design of event-triggering mechanisms for nonlinear control systems[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017.
- [35] 张志强, 王龙. 多智能体系统的事件驱动控制[J]. 控制理论与应用, 2018, 35(8): 1051–1065.
Zhang Z Q, Wang L. Event-triggered control for multi-agent systems[J]. Control Theory and Applications, 2018, 35(8): 1051–1065.
- [36] Fu J, Li T F, Chai T Y, et al. Sampled-data-based stabilization of switched linear neutral systems[J]. Automatica, 2016, 72: 92–99.
- [37] Fridman E. A refined input delay approach to sampled-data control[J]. Automatica, 2010, 46(2): 421–427.
- [38] Mirkin L. Some remarks on the use of time-varying delay to model sample-and-hold circuits[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2007, 52(6): 1109–1112.
- [39] Lien C H, Chen J D, Yu K W, et al. Robust delay-dependent control for uncertain switched time-delay systems via sampled-data state feedback input[J]. Computers and Mathematics with Applications, 2012, 64(5): 1187–1196.
- [40] Wang Z C, Sun J, Chen G L, et al. Stability analysis of switched nonlinear delay systems with sampled-data inputs[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2019, 29: 4700–4715.
- [41] Wang Z C, Chen G L, Ba H Z. Stability analysis of nonlinear switched systems with sampled-data controllers[J]. Applied Mathematics and Computation, 2019, 357: 297–309.
- [42] Ding L, Guo G. Sampled-data leader-following consensus for nonlinear multi-agent systems with Markovian switching topologies and communication delay[J]. Journal of the Franklin Institute, 2015, 352(1): 369–383.
- [43] Wang J, Shi K B, Huang Q Z, et al. Stochastic switched sampled-data control for synchronization of delayed chaotic neural networks with packet dropout[J]. Applied Mathematics and Computation, 2018, 335: 211–230.
- [44] Sakhthivel R, Wang C, Santra S, et al. Non-fragile reliable sampled-data controller for nonlinear switched time-varying systems[J]. Nonlinear Analysis: Hybrid Systems, 2018, 27: 62–76.
- [45] Zhao J, Liu W. Sampled-data based reliable control for switched stochastic delay systems with actuator failures under asynchronous switching[C]//2017 Chinese Automation Congress(CAC). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2017: 1069–1074.
- [46] Liu H, Zhou G P. Finite-time sampled-data control for switching T-S fuzzy systems[J]. Neurocomputing, 2015, 166: 294–300.
- [47] He H F, Gao X W, Qi W H. Sampled-data control of asynchronously switched non-linear systems via T-S fuzzy model approach[J]. IET Con-

- trol Theory and Applications, 2017, 11(16): 2817–2823.
- [48] Zhao J R, Liu W, Zhuang G M, et al. Sampled-data based quantization control for T-S fuzzy switched systems with actuator failures dependent on an improved Lyapunov functional method[J]. IET Control Theory and Applications, 2018, 12(17): 2368–2379.
- [49] Zhao J R, Liu W. Sampled-data control for switched neutral systems with quantization input under asynchronous switching[J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2018, 40(16): 4287–4297.
- [50] Han Y C, Lian J. Synchronization of switched neural networks with time-varying delays via sampled-data control[J]. Asian Journal of Control, 2019, 21(3): 1260–1269.
- [51] Rui P, Lei Z. Synchronization of nonlinear switched systems based on sampled-data[C]//36th Chinese Control Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2017: 2449–2454.
- [52] Zhou L, Pan R, Xiao X Q. Synchronization of a class of switched nonlinear systems based on quantized sampled-data[J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2019, 70: 170–180.
- [53] Guan C X, Sun D, Fei Z Y, Ren C. Synchronization for switched neural networks via variable sampled-data control method[J]. Neurocomputing, 2018, 311: 325–332.
- [54] Wang M, Qiu J B, Chadli M, et al. A switched system approach to exponential stabilization of sampled-data T-S fuzzy systems with packet dropouts[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2015, 46(12): 3145–3156.
- [55] Zhang W, Wang Z D, Liu Y R, et al. Sampled-data consensus of nonlinear multi-agent systems subject to cyber attacks[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2018, 28: 53–67.
- [56] Owen D, Zheng Y, Billings S. Fast sampling and stability of nonlinear sampled-data systems: Part I: Existence theorems[J]. IMA Journal of Mathematics Information, 1990, 7(1): 1–11.
- [57] Jiang Y, Zhai J Y. Global practical tracking for a class of switched nonlinear systems with quantized input and output via sampled-data control[J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2019, 17(5): 1264–1271.
- [58] Jiang Y, Zhai J Y. Global sampled-data output feedback stabilization for a class of switched stochastic nonlinear systems with quantized input and unknown output gain[J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2019, 41(16): 4511–4520.
- [59] Mao J, Guo J, Xiang Z R. Sampled-data control of a class of uncertain switched nonlinear systems in nonstrict-feedback form[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2018, 28(3): 918–939.
- [60] He W M, Ahn C K, Xiang Z R. Global fault-tolerant sampled-data control for large-scale switched time-delay nonlinear systems[J]. IEEE Systems Journal, 2019, DOI: 10.1109/JSYST.2019.2919767.
- [61] Li S, Ahn C K, Guo J, Xiang Z R. Global output feedback sampled-data stabilization of a class of switched nonlinear systems in the p-normal form[J/OL]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics: Systems, 2019, DOI: 10.1109/TSMC.2019.2894978. (2019–02–12)[2019–09–28]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8640842>.
- [62] Jiang Y, Zhai J Y, Ye H. Sampled-data output feedback stabilization for a class of p-norm switched stochastic nonlinear systems[J]. Asian Journal of Control, 2019, DOI: 10.1002/asjc.2139.
- [63] Jiang Y, Zhai J Y. Practical tracking for a class of P-norm switched nonlinear systems via sampled-data control[C]//38th Chinese Control Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2019: 1766–1771.
- [64] Jiang Y, Zhai J Y. Global finite-time stabilization for a class of high-order switched nonlinear systems via sampled-data control[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2020, 30(1): 302–320.
- [65] Liu Y F, Zhao Y, Shi Z K. Sampled-data based consensus for multiple harmonic oscillators with directed switching topology[J]. Journal of the Franklin Institute, 2017, 354(8): 3519–3539.
- [66] Mao J, Xiang Z R, Zhai G S. Global practical stabilization of a class of switched nonlinear systems via sampled-data control[J/OL]. International Journal of Control, 2018, DOI: 10.1080/00207179.2018.1536832. (2018–06–01)[2019–09–28]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8370790>.
- [67] Li S, Guo J, Xiang Z R. Global stabilization of a class of switched nonlinear systems under sampled-data control[J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics: Systems, 2019, 49(9): 1912–1919.
- [68] Mao J, Xiang Z R, Zhai G S. Sampled-data control of a class of switched nonlinear systems under asynchronous switching[J]. Journal of the Franklin Institute, 2019, 356(4): 1924–1943.
- [69] Mao J, Xiang Z R, Zhai G S. Sampled-data output feedback stabilization for a class of switched stochastic nonlinear systems[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2019, 29(10): 2844–2861.
- [70] Li S, Xiang Z R. Sampled-data decentralized output feedback control for a class of switched large-scale stochastic nonlinear systems[J/OL]. IEEE Systems Journal, 2019, DOI: 10.1109/JSYST.2019.2934512. (2019–09–30)[2019–10–07]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8852711>.
- [71] Li S, Ahn C K, Xiang Z R. Decentralized stabilization for switched large-scale nonlinear systems via sampled-data output feedback[J]. IEEE Systems Journal, 2019, 13(4): 4335–4343.
- [72] Li S, Ahn C K, Xiang Z R. Sampled-data adaptive output feedback fuzzy stabilization for switched nonlinear systems with asynchronous switching[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2019, 27(1): 200–205.
- [73] Mazo M, Tabuada P. Decentralized event-triggered control over wireless sensor/actuator networks[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2011, 56(10): 2456–2461.
- [74] Zhang G X, Tanwani A. Stabilization of switched nonlinear systems with dynamic output feedback and event-based sampling[C]//2018 Annual American Control Conference(ACC). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2018: 2198–2203.
- [75] Zhang G X, Tanwan A. ISS Lyapunov functions for cascade switched systems and sampled-data control[J]. Automatica, 2019, 105: 216–

227.

- [76] Zheng S Q, Shi P, Wang S Y, et al. Event triggered adaptive fuzzy consensus for interconnected switched multi-agent systems[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2019, 27(1): 144 – 158.
- [77] Li H Q, Wang Y Q, Chen G, et al. Consensus in networked dynamical systems with event-triggered control inputs and random switching topologies[J]. Neural Computing and Applications, 2017, 28(5): 1095 – 1108.
- [78] Dong H L, Zhou J M, Wang B C, et al. Synchronization of nonlinearly and stochastically coupled Markovian switching networks via event-triggered sampling[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2018, 29(11): 5691 – 5700.
- [79] Ding D R, Wang Z D, Han Q L. A scalable algorithm for event-triggered state estimation with unknown parameters and switching topologies over sensor networks[J/OL]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2019, DOI: 10.1109/TCYB.2019.2917543. (2019 – 06 – 11) [2019 – 10 – 07]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8734853>.
- [80] Xie D S, Xu S Y, Chu Y M, et al. Event-triggered average consensus for multi-agent systems with nonlinear dynamics and switching topology[J]. Journal of the Franklin Institute, 2015, 352(3): 1080 – 1098.
- [81] Chen X, Liao X F, Gao L, et al. Event-triggered consensus for multi-agent networks with switching topology under quantized communication[J]. Neurocomputing, 2017, 230: 294 – 301.
- [82] Wang Y W, Lei Y, Bian T, et al. Distributed control of nonlinear multi-agent systems with unknown and nonidentical control directions via event-triggered communication[J/OL]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2019, DOI: 10.1109/TCYB.2019.2908874. (2019 – 04 – 22) [2019 – 09 – 20]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8694845>.
- [83] Liu J, Chai X F, Zhang Y L, et al. Fixed-time event-triggered average consensus of nonlinear mass with external disturbances and switching topologies[C]//38th Chinese Control Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2019: 6007 – 6012.
- [84] Sun J J, Liu H K, Du C K, et al. Distributed consensus control of multiple Lur'e nonlinear systems with event-triggered transmission strategy under directed switching topologies[C]//38th Chinese Control Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2019: 5859 – 5864.
- [85] Liu L, Shan J J. Event-triggered consensus of nonlinear multi-agent systems with stochastic switching topology[J]. Journal of the Franklin Institute, 2017, 354: 5350 – 5373.
- [86] Zhou Z, Wang H B, Hu Z Q, et al. Event-triggered finite-time consensus of multiple Euler Lagrange systems under Markovian switching topologies[J]. International Journal of Systems Science, 2018, 49(8): 1641 – 1653.
- [87] Liu K X, Duan P H, Duan Z S, et al. Leader-following consensus of multi-agent systems with switching networks and event-triggered control[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2018, 65(5): 1696 – 1706.
- [88] Heemels W, Donkers M, Teel A R. Periodic event-triggered control based on state feedback[C]//50th IEEE CDC/ECC. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2011: 2571 – 2576.
- [89] Heemels W, Donkers M, Teel A R. Periodic event-triggered control for linear systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2013, 58(4): 847 – 861.
- [90] Heemels W, Donkers M. Model-based periodic event-triggered control for linear systems[J]. Automatica, 2013, 49(3): 698 – 711.
- [91] Verhaegh J, Gommans T, Heemels W. Extension and evaluation of model-based periodic event-triggered control[C]//Proceedings of ECC. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2012: 1138 – 1144.
- [92] Peng L H, Ai Z D. Event-triggered stabilisation for continuous-time switched non-linear systems under switching constraints[J]. IET Control Theory and Applications, 2019, 13(8): 1182 – 1186.
- [93] Wen S P, Zeng Z G, Chen M Z Q, et al. Synchronization of switched neural networks with communication delays via the event-triggered control[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2017, 28(10): 2334 – 2343.
- [94] Luo J N, Tian W H, Zhong S M, et al. Non-fragile asynchronous event-triggered control for uncertain delayed switched neural networks[J]. Nonlinear Analysis: Hybrid Systems, 2018, 29: 54 – 73.
- [95] 杨飞生, 汪璟, 潘泉. 基于事件触发机制的网络控制研究综述[J]. 控制与决策, 2018, 33(6): 969 – 977.
Yang F S, Wang J, Pan Q. A survey of networked event-triggered control[J]. Control and Decision, 2018, 33(6): 969 – 977.
- [96] Zou W C, Xiang Z R. Event-triggered leader-following consensus of non-linear multi-agent systems with switched dynamics[J]. IET Control Theory and Applications, 2019, 13(9): 1222 – 1228.
- [97] Garcia E, Antsaklis P J. Model-based event-triggered control for systems with quantization and time-varying network delays[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2013, 58(2): 422 – 434.
- [98] Li Y X, Yang G H. Model-based adaptive event-triggered control of strict-feedback nonlinear systems[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2018, 29(4): 1033 – 1045.
- [99] Zou W C, Shi P, Xiang Z R, et al. Consensus tracking control of switched stochastic nonlinear multi-agent systems via event-triggered strategy[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2020, 31(3): 1036 – 1045.

作者简介

何文敏(1994 –), 女, 博士生. 研究领域为切换系统, 非线性系统, 采样控制, 自适应控制.

李 实(1991 –), 男, 博士生. 研究领域为切换系统, 非线性系统, 采样控制, 自适应控制.

向峥嵘(1969 –), 男, 博士, 教授, 博士生导师. 研究领域为切换系统, 非线性系统, 采样控制, 鲁棒控制, 网络控制系统.