

Survey of Switched Systems Based on Networked Control Systems

Yiwei Feng, Yudan Cai

College of Electrical and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou Gansu
Email: ywfeng@yeah.net, yudanc@yeah.net

Received: May 9th, 2017; accepted: May 22nd, 2017; published: May 25th, 2017

Abstract

This paper briefly reviews the development of the Networked Switch Control Systems (NSCS). The NSCS are combined to analyze and study its structure and characteristics; some problems in the network switching system are described, and the corresponding solutions are summarized. Furthermore, the paper also considers the development prospect of NSCS.

Keywords

NSCS, Lyapunov Function, Dwell time

基于网络的切换系统综述

冯宜伟, 蔡玉丹

电气工程与信息工程学院, 兰州理工大学, 甘肃 兰州
Email: ywfeng@yeah.net, yudanc@yeah.net

收稿日期: 2017年5月9日; 录用日期: 2017年5月22日; 发布日期: 2017年5月25日

摘要

本文首先简明扼要地回顾了网络控制系统和切换系统的发展, 将网络控制与切换控制相结合, 对其结构和特征进行分析和研究, 描述了网络切换系统面临的一些问题, 并总结了相应的解决方法, 并进一步展望了基于网络的切换系统的前景。

关键词

网络切换控制系统, Lyapunov函数, 驻留时间

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

网络技术已经在全球范围内广泛应用并渗透至社会的各个方面。在控制领域,网络的介入不仅仅引领着控制结构进行悄悄的变革,同时,也预示着控制模式的革新。这种通过网络链接而成的控制框架与传统的点对点的控制结构相比,其优势非常明显,具有成本低、功耗小、安装与维护简便、可实现资源共享、能进行远程操作等优点。如此多的优点使其在远程医疗、智能交通、航空航天、智能制造以及国防等领域得到了日益广泛的应用。近年来,针对网络切换系统的研究得到了来自控制领域、信号处理领域、以及通讯领域研究人员的共同关注,相关文献层出不穷[1] [2]。随着现代工业控制系统越来越复杂,对控制节点的可移动性要求越来越高,系统各元件分布的地域范围越来越广,通信网络引入控制系统,正得到更加深入的关注和推进。自20世纪80年代末Ray等人探讨研究集成通信控制系统问题,随后,G. C. Walsh等人总结并提出了网络控制系统这一名词,之后近20年以来各类网络控制框架及控制方法种类繁多,极大地丰富了这种新的控制理论。加拿大Alberta大学中的ART实验室针对数据包丢失和时延对远程控制系统的影响进行了研究,并取得了一定的成果,学者Lian [3]对网络控制系统中的延时进行了详细的分析和讨论。Boey D.和Ken T.等人针对远程网络控制机器人,给出了最优规划及最优控制等各种不同的控制方法,取得了明显的成果[4]。然而,网络并不是一种可靠的通信介质。由于网络带宽和服务能力的物理限制,数据包在网络传输中不可避免地存在时延、丢包以及时序错乱等问题。这些问题是恶化系统性能以及导致这类人造系统不稳定的重要原因,并且这些问题的存在使传统控制理论很难直接应用于这类系统的分析和设计,尤其是具有非线性、耦合性强的混杂型切换类控制系统[5]。为保证这类系统的稳定并具有满意的控制性能,必须深入研究网络控制系统,尤其是网络与切换控制系统的深度融合,探讨其发展及相适应的分析和设计理论。一些研究人员提出了用混杂系统理论的方法去解决网络控制的问题,切换系统作为混杂系统的一个重要分支,在解决网络控制的问题上起到了重要作用。

从控制系统的角度来看,切换机制给控制器设计带来了另外的自由度。切换可以被人为地引入处理高度复杂的非线性系统和大型不确定性系统的建模。Peleties和Decarlo在1991年研究了线性切换系统的稳定性问题,以二次型形式的类李雅普诺夫函数(Lyapunov-Like Functions)为研究工具,给出系统渐进稳定的充分条件[6]。Reza Olfati-Saber和Richard M. Murray [7]讨论了网络固定的动态代理与交换拓扑结构的一致性问题。1999年Liberzon和Morse [8]描述了有关切换系统稳定和切换律设计方面的三个问题:任意切换序列的稳定;某些有用类的切换序列的稳定;设计稳定的切换序列,标志着切换系统的研究进入了实质性发展阶段[9]。文献[10]研究了一类网络时变时滞的非线性切换控制系统的问题。文献[11]研究了奇异摄动类连续时间切换线性系统的稳定性,指出在任意的切换规则下,相应的两个时间尺度切换系统在缓慢和快速切换子系统的稳定性条件不成立,给出了基于LMI条件设计的状态反馈控制律,使得连续时间线性切换系统趋于稳定。文献[12]研究了具有不确定开关信号的离散时间切换系统的稳定性问题,指出不确定开关信号使得切换系统不稳定,同时给出了这类系统新的稳定性条件,该方法适用于具有时变时滞特点的网络切换控制系统。由于切换系统在许多实际控制系统中广泛应用,可以被用来模拟受已知或未知参数突然变化的系统,诸如同步线性切换系统,以周期性变化的网络切换系统,这种系统在多速率采样系统的研究中自然产生,人们对网络切换系统的研究受到越来越多的关注[13] [14]。文献[15] [16]研究了由电流控制和电压控制的两种控制模式间切换,来实现并网/孤网切换,实现了切换控制在电网

系统中的应用。文献[17]则利用相平面控制以及准滑模切换控制方法, 给出了角度反馈切换控制律, 来增强拦截器姿态控制系统的鲁棒性。文献[18]针对含有多个子系统线性时不变的系统, 使用平均驻留时间和多 Lyapunov 函数法来改善整体的干扰衰减性能。

本文力图回顾近年来这一领域的重要成果, 总结并指出这一领域下一步的发展方向和有待解决的新课题。

2. 问题描述

2.1. 网络控制系统中的基本问题

一方面, 网络控制系统带来了一些不错的优势, 如低成本, 控制系统设计灵活性强, 线路易于安装和维护, 信息交流更加可靠, 并且已经发现在工业领域成功的应用。如远程控制机器人、无人作战指挥系统、远程外科手术、智能楼宇与智能交通等。另一方面, 在反馈回路中引入了网络也会引起一些负面影响。第一, 由于网络带宽有限, 大量节点同时传输数据时会造成时延, 进而降低系统的性能或者甚至引起不稳定的问题; 第二, 由于网络传输中的各种不确定的干扰, 容易发生传输数据出错或丢失的情况, 即网络丢包问题。按照导致数据包丢失的诱因来分, 中数据包丢失可以分为如下三大类: 第一类是数据传输路径的不可靠性、网络自身故障等引起的数据包丢失, 第二类是因多个网络节点争用有限网络资源引发的数据包丢失, 第三类则是为了改善网络负载状况和防止系统进一步恶化, 系统主动丢弃某些陈旧或者次要数据包。第三, 一个数据包只能携带有限的信息, 但如果数据量较大, 就只能分成几个不同数据包分别传送, 即多包传输。第四, 在网络环境下, 被传输的数据流经众多计算机和通讯设备且路径不唯一, 这必然会导致数据包的时序错乱, 即指原来有一定先后次序的多个完整数据在从源结点出发到达目标节点时, 其到达的时序与原来的时序不同。

2.2. 切换系统中的问题

从理论和实践的角度来看, 研究切换系统是有益的, 但是它也面临着许多挑战。例如, 因为它有可能通过渐近稳定系统之间进行切换或通过切换来稳定不稳定的系统出现不稳定, 所以多个线性时不变 (LTI) 装置的切换控制已被认为是一个值得正视的问题。基于此, 目前已有的研究主要从以下两个大的方向提出问题进行讨论。

2.2.1. 任意切换信号下, 保证一个切换系统渐进稳定的条件

在任意切换下, 多个稳定的子系统构成的切换系统的稳定性条件由共同 Lyapunov 函数提供。因此寻找合适的 Lyapunov 函数成为研究任意切换系统稳定性的研究重点。文献[19]中依据切换系统的 Lyapunov 逆定理, 即一个切换系统的一致渐近稳定意味着存在一个共同的 Lyapunov 函数。文献[20]描述了共同 Lyapunov 函数的存在提供了由多个稳定子系统组成的切换系统的稳定性条件。在任意切换下开关补偿器的存在性在文献[21]讨论了。文献[22]利用 Lyapunov 函数法, 给出了确保由微分方程和差分方程描述的切换系统渐近稳定的充分条件, 在此基础上给出了不受切换条件限制, 但能使切换系统渐近稳定的镇定控制器设计方法。另外李代数方法的使用对任意切换下系统稳定问题的研究也起到了重要的作用。文献[23]中 Liberzon 等人运用李代数理论, 将系统在任意切换策略下共同二次 Lyapunov 函数的存在性问题转化为由系统矩阵产生的李代数可解的问题。文献[24]提出了保证共同 Lyapunov 函数存在一对非交换系统的两个条件。文献[25]中作者以不同系数矩阵的 Lyapunov 不等式可存在共同的解决方案, 提出了一个足够充分的条件。在此条件下, 相互关联矩阵的大小等于其系数矩阵的数目。文献[26]中的逆 Lyapunov 定理表明, 拟二次型或分段二次型形式的公共函数可以用于在任意切换信号下均是渐近稳定的线性切换系统。

2.2.2. 切换系统在受限的切换规律下的稳定性及切换系统设计问题

假设每个子系统都是稳定的, 尽可能慢的切换下, 就可保证切换系统的特性。尽管有些子系统不稳定, 只要这些不稳定的子系统被激活的时间相对短, 仍能得到使系统稳定的切换律, 即采用平均驻留时间的方案。研究该问题多数采用多 Lyapunov 函数的方法。文献[27]将平均驻留时间方法与多 Lyapunov 函数方法相结合, 分别就所有子系统全是稳定的和不全全是稳定的两种情形, 对线性切换系统的加权扰动衰减问题进行了研究。文献[28]提出基于存在一对正 LTI 系统的共同双正线性 Lyapunov 函数的可验证条件的方法, 来确定一个给定的切换正连续时间线性系统是否是指数稳定。未来的工作是将这一结果扩展到任意有限集合, 例如 LTI 系统, 并开发综合程序, 利用我们的结果, 稳定的设计转到正面的系统。此外, 它已经从平均时间切换, 滑模控制和有限时间切换控制这几个方面对凸组合进行了解释。文献[29]表明, 对于一族信号, 人们可以将问题减少到在特定 R^n 子空间下对不受控系统发现一个共同的二次 Lyapunov 函数。文献[30]利用矩阵约束条件给出了仅含两个子系统的线性切换系统存在公共的二次型函数的充分必要条件。可是, 它无法处理所有子系统都不稳定的情况。

文献[31]讨论了离散时间线性切换系统的切换镇定问题。基于抽象-聚合方法, 学者提出了一种状态反馈路径转换法。通过研究证明了状态反馈路径切换律在这个意义上是普遍的, 任何镇定切换线性系统稳定的切换律都承认这一方法。建议切换法则对稳定问题生成的是通用切换信号, 可是这种方法很难适用于性能标准和处理控制性能问题。

文献[32]用解线性矩阵不等式的方法来寻找 Lyapunov 函数和进行反馈控制设计。文献[33]给出了线性切换系统在各个子系统都能控且能观的条件下, 渐近可镇定性和输出可镇定性的联系, 并且设计了基于观测器的可镇定控制器。文献[34]给出反例来显示具有控制开关的线性切换系统, 可以通过合适的切换法则而并不一定给出凸 Lyapunov 函数来使系统稳定。文献[21]中, 切换装置存在一个稳定与二次稳定切换线性补偿的开关装置给予必要充分镇定条件, 如果满足这些条件, 无论一族补偿器与一族开关装置怎样相关联, 则存在真实的量使闭环系统切换是稳定的, 并且该文献已经展示了如何获得这些的实现。

2.3. 执行器饱和的网络切换系统的问题

关于切换控制的稳定性分析和控制综合条件问题采用双线性矩阵不等式(BMIs)。可是这种方法并不能保证系统收敛, 甚至不能实现局部最优解。基于以上的研究, 一些学者开始研究开发切换控制的设计框架, 来解决诸如限制和非线性饱和, 如执行器饱和的重要实际问题。

2.3.1. 执行器饱和的切换线性系统的分析与控制

作为一个状态依赖的切换策略, 最小切换逻辑是在[35]中被提及。该策略不需要每个子系统是稳定的, 并包含一个特殊的情况下的二次稳定条件。通过这种方法, 文献[36]将状态反馈和动态输出反馈的 H_∞ 控制器设计做出了进一步的发展。最近的一项研究结果证明, 最小切换策略能保证 H_2 性能要比一个单独的子系统产生的效果要好[37]。这使得它不仅对所有不稳定的切换系统的子系统, 而且也对一些或所有稳定的子系统是一个可行的方法。此外, 在文献[38]中放宽了最小切换规则来避免高频开关带来的进一步影响。

另一方面, 对所有动态系统执行器饱和是一个固有的非线性。执行器饱和问题在科研界已经有了深入研究, 如[39] [40]和其中的参考文献。在文献中涉及饱和控制的课题很广泛, 包括稳定性, 输出调节和干扰抑制。近来, 重点转移到指数不稳定的开环系统, 因为许多执行器饱和的控制系统, 如飞行控制, 是指数不稳定的。由于只有在部分的状态空间中执行器饱和的系统是零可控的, 所以这里的目标是表征的零可控区域[40], 并设计反馈法则使得执行器饱和的系统能够工作在整个或大部分零可控区域。通过不同的框架, 提出了基于严格理论分析的不同的设计程序。然而, 大多数文献上的指数不稳定系统是关于

状态反馈。只有很少数的文献涉及到输出反馈。

2.3.2. 连续/离散切换线性系统的分析和切换控制问题

所有基于观测稳定的控制器都在装置配置具有确切知识背景的假设下进行的参数设置。然而, 这种确保稳定性的方法太过保守, 特别是在特定的切换规则下。自从在实践中多个系统不能由一个共同 Lyapunov 函数来控制, 在一些正确选择的切换逻辑下, 研究者把更多的注意力转向了稳定性, 而多 Lyapunov 函数已被证明是用于稳定性分析非常有用的工具[41]。因此, 我们将关注点集中在了使用多 Lyapunov 函数作为工具的控制切换系统上。为此, 对于切换系统提出的多种切换规则, 它们大体上可以分为状态依赖和时间驱动两类。文献[42]讨论了一个系统组成的一组两个不稳定的线性自治状态模型。通过选择要激活的系统来实现控制。控制目标是由两个不稳定系统间切换的状态轨迹的二次稳定。假设存在一个稳定凸组合包含两个不稳定的系统矩阵, 对三个稳定控制策略进行了讨论: 时间平均控制, 变结构控制, 和一个混合反馈控制。文献[43]讨论了稳定的线性多模态系统的控制律, 选择一个特定的系统模式, 所考虑的系统是相似的跳跃线性系统。在一个跳变线性系统中, 主动模式是由一个随机过程选择的。在这里, 控制器使用一个分段二次李型函数来选择系统模式来激活。该文涉及一个稳定的控制律的一对耦合的 Lyapunov 方程的解的存在性。这些方程的解决方案进行了讨论, 并涉及到来自组件系统矩阵和耦合参数的某些矩阵算子的特征值的位置。这些条件并不要求每一个子系统都稳定并且包含一种特殊的条件——二次稳定性条件。

底层最小切换策略是一个特殊的方法, 它满足难以检查的多 Lyapunov 函数的非增加条件并且它很容易利用。一个特殊的切换策略遇到多 Lyapunov 函数的非增条件, 我们可以选择最小切换策略。然而这种最小切换有其潜在的缺点, 抖动现象。

2.3.3. 通过最小切换及驻留时间的切换时切换线性系统的分析与控制

假设每个子系统都是稳定的, 在尽可能慢的切换下, 就可保证切换系统的特性, 即使用平均驻留时间的方案, 尽管有些子系统不稳定, 只要这些不稳定的子系统被激活的时间相对短, 仍能得到使系统稳定的切换律[21]。文献[44]展示了用于切换系统的 Lyapunov 函数构造。这种方法需要寻找系统矩阵的稳定凸组合。文献[27]将平均驻留时间方法与多 Lyapunov 函数方法相结合, 分别就所有子系统全是稳定的和不全是稳定的两种情形, 对线性切换系统的加权扰动衰减问题进行了研究。

在驻留时间约束下的线性切换不稳定系统的研究仍然有缺失。在稳定切换系统中平均驻留时间这一概念是建立在允许在切换时有短暂振荡的慢切换上。换句话说, Lyapunov 函数中的停留时间的递减补偿在切换实例的 Lyapunov 函数可能增加。分段函数用 $v_\sigma(x)$ 表示, 限制 Lyapunov 函数增加的已知条件是当 $\mu > 1$ 时, $v_i(x) \leq \mu v_j(x)$, i, j 是系统切换前后的指数[45]。当分段二次 Lyapunov 函数被采用, 条件就可以简化为 $\frac{1}{\mu} P_j \leq P_i \leq \mu P_j$ [46]。如果可能的话, 在切换瞬间使用减量的 Lyapunov 函数来补偿在驻留时间 Lyapunov 函数的潜在增加。为了解决驻留时间约束下的不稳定子系统的切换线性系统的分析和控制, 可以结合驻留时间, 然后通过修改后的最小切换逻辑, 从而给出一个新的切换策略。

3. 研究方法

3.1. 范数有界微分包含(NDI)法

通过建立一个通用的框架, 可以来分析和控制设计切换线性系统的执行器饱和。两类线性微分包含(LDI)描述饱和切换系统, 即多面体微分包含(PDI)和范数有界微分包含(NDI)的研究。结合一个状态相关的最小切换策略, 稳定性分析和控制器的合成条件可以得到。一套切换输出反馈控制器的设计是为了尽量减少基于一类能量有界扰动增益区域定义的扰动衰减水平。多项学术研究表明范数有界微分包含(NDI)

的方法更好。当与基于 PDI 获得的那些相比控制输入数量的增加是更可扩展的。这是基于在优化变量和矩阵不等式的数目方面的计算成本的比较。

使用多面体微分包含(PDI)描述执行器饱和的方法[47], 设计一个输出反馈法则使饱和系统在一个大的吸引域内是稳定的。增益调度饱和控制器的输出反馈的形式已经在[41]中实现, 它获得了局部稳定性和减少干扰对系统输出的影响。因此, 控制合成条件以线性矩阵不等式(LMI)的形式制定。使用范数有界微分包含(NDI)描述执行器饱和, 在[48]提出构建一个内部死区回路输出反馈控制器是饱和和控制合成方法。这种控制器的合成条件可以转化为线性矩阵不等式形式。

3.2. Lyapunov-Metzler 不等式法

我们增强了状态依赖的最小切换策略, 以减轻其固有的抖动行为。每当一个不同的子系统获得最小 Lyapunov 函数, 一个放松的最小切换策略是基于切换发展而不是被迫的, 但一直保持到 Lyapunov 函数的最低值小于通过一定幅度的主动子系统的 Lyapunov 函数。一类特殊的矩阵不等式, 即所谓的 Lyapunov-Metzler 不等式, 将在一个松弛最小切换策略下进行修改, 以提供输出反馈控制合成和稳定性分析的条件。切换规则结合切换输出反馈控制器的设计, 将保证切换系统的稳定, 并满足一个预先指定的二级增益性能。所提出的分析和开关控制方法可以避免频繁切换, 通常遵守以设计为基础的最小切换。相应的将 Lyapunov-Metzler 不等式推广, 并包含它原来的状态作为一种特殊情况。文献[35]讨论了切换线性系统两种策略连续时间的稳定性问题。第一个是开环的性质(轨迹独立), 是基于簇二次 Lyapunov 函数的最小停留时间的确定。驻留时间计算的相关点是, 建议的稳定性条件是不需要在每一个切换时间 Lyapunov 函数减少一致。二是闭环性质(路径依赖)和设计解决方案, 我们称之为 Lyapunov-Metzler 不等式的稳定性条件(包括抖动)表示。一个非凸的, 虽更保守但简单解决的 Lyapunov-Metzler 不等式版提供。松弛的最小切换策略可以实现在不理想的干扰衰减性能下闭环切换系统的稳定。通过一个可调参数, 使用最小切换策略人们可以很容易的减少抖动。

3.3. 改进的平均驻留时间法

从不同角度分析切换线性系统的分析和切换控制问题。从而提出了一种混合时间驱动和状态依赖切换策略, 即使在所有子系统都不稳定的情况下, 也保证了平均驻留时间。切换规则及其相关的切换输出反馈控制器的设计, 可以使切换系统稳定, 并满足一个预先指定的二级增益性能。

文献[49]中设计了一种服从驻留时间约束的状态依赖切换律, 保证了切换线性系统的稳定性。得到了切换系统稳定性时, 切换法则应用于多种类型参数不确定性存在的充分条件。一个二次形式 Lyapunov 函数分配给各子系统, 这样它在切换瞬间是非增的。在驻留时间, 该函数随时间分段线性变化。提出的方法也适用于通过状态反馈的鲁棒镇定。它进一步扩展, 以保证一个绑定的切换系统的二级增益, 它也被用于导出状态反馈控制律, 使得鲁棒性达到规定的二级增益约束。我们对切换系统中所有不稳定的子系统提出了一种新的混合状态依赖和时间驱动的切换策略。与已经众所周知的平均驻留时间不同的是, 要求在切换的瞬间降低 Lyapunov 函数, 这样就可以保证一些或是全部的不具有稳定性能的子系统有一个平均驻留时间。通过引入状态依赖的切换规则, 为确保在一定的状态空间区域的 Lyapunov 函数的下降提供了解决方案。它提供了一个更一般的框架分析切换线性系统, 在驻留时间并不特殊的情况下, 采用包含了最小切换和改进的最小切换策略的特殊方法。

3.4. 网络切换控制系统的仿真研究

网络切换系统的稳定性以及加入一些网络诱导因素后的相关控制性能的研究与验证都需要通过仿真

来进行, 因此, 仿真实验也成为了研究的热点。Jitterbug 工具箱是由瑞典 Lund 学院基于 Matlab 开发的一个工具箱。该工具箱提供了一个分析网络控制系统时延的平台, 可以对各种时延情况下的线性闭环控制系统提供静态的性能预估分析。

在 Jitterbug 中, 一个网络控制系统是通过两个并行的模型描述的: 信号模型和时间模型。信号模型是有一系列线性的、连续/离散的时间系统组成; 时间模型是由一系列时间结点组成。

网络切换系统结合了网络传输与切换系统的一个复杂系统, 虽然 Jitterbug 工具箱为网络切换系统的仿真提供了有效、方便的技术支持, 但是它的适用范围有限, 所以未来对于仿真技术与仿真工具的渴求将会成为控制与计算机研究领域的一大热点。

4. 展望

综上所述, 目前网络控制和切换控制系统都得到了广泛的研究, 但是关于网络与切换相结合的研究有待进一步的拓展。

在文章上面提到的切换规则中选择一个可调的、正的参数来减少抖动, 并且得到的结果和名义上的最小切换相比切换的数量有所减少。然而, 在加入网络因素后, 一些诱导时延或是通信受限等网络因素的出现, 会导致该参数的获得更加困难。在未来, 怎样获得这样一个理想的参数有待我们继续研究。

不同于著名的平均驻留时间的方法, 所提出的方法是确定一个最大的平均停留时间, 但对子系统的稳定性没有要求。此外, 状态依赖的切换规则保证了在开关瞬间的 Lyapunov 函数的下降。这项工作还提供了一个更一般的框架来分析切换线性系统, 因为它包含了最小的切换和修改后的最小切换作为特殊情况。目前, 实施状态依赖的切换规则需要装置的状态信息。在加入网络因素后, 对切换规则的研究, 并放宽这一限制将是我们未来研究的一个主题。

目前大多数的研究是针对线性定常系统, 然而, 在实际中, 许多子系统并不能被建模为线性定常系统。因此, 有必要将切换控制理论扩展到其他类型的系统。例如, 线性参数变化(LVP)系统经常被用在航空和过程控制工业中。可以设计一些适合特殊参数子区域的 LVP 控制器, 它们中的切换能够使其获得更好的参数。另外我们也可以在一种理论中加上时延或其他约束条件。

我们现在研究学习的大多是确定的切换系统, 也就是说在不同的模式之间的转换是确定的。如果在不同的模型之间的转换是任意的, 我们可以转化为任意切换系统。

参考文献 (References)

- [1] 林相泽, 都海波, 李世华. 离散线性切换系统的一致有限时间稳定分析和反馈控制及其在网络控制系统中的应用[J]. 控制与决策, 2011, 26(6): 841-846.
- [2] 郭仕德, 汪海明, 赵建业, 余道衡. 细胞神经网络在通信信号处理中的研究进展[J]. 电讯技术, 2003, 43(2), 1-5.
- [3] Lian, F., Moyne, J.R. and Tilbury, D.M. (2001) Performance Evaluation of Control Networks: Ethernet, ControlNet, and DeviceNet. *IEEE Control Systems*, **21**, 66-83. <https://doi.org/10.1109/37.898793>
- [4] Hristu-Varakelis, D. and Levine, W.S. (2005) An Undergraduate Laboratory for Networked Digital Control Systems. *IEEE Control Systems*, **25**, 60-62.
- [5] 胡柯. 切换系统稳定性及时滞相关问题研究[D]: [博士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2008.
- [6] Peleties, P. and DeCarlo, R. (1991) Asymptotic Stability of m-Switched Systems Using Lyapunov-Like Functions. *Proceedings of the American Control Conference*, Boston, MA, 26-28 June 1991, 1679-1684.
- [7] Olfati-Saber, R. and Murray, R.M. (2004) Consensus Problems in Networks of Agents with Switching Topology and Time-Delays. *IEEE Transactions on Automatic Control*, **49**, 1520-1533. <https://doi.org/10.1109/TAC.2004.834113>
- [8] Liberzon, D. and Morse, A.S. (1999) Basic Problems in Stability and Design of Switched Systems. *IEEE Control Systems*, **19**, 59-70. <https://doi.org/10.1109/37.793443>
- [9] 邵振明. 基于切换的一类网络控制系统的分析与设计[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 东北大学, 2006.

- [10] McCourt, M.J. and Antsaklis, P.J. (2010) Stability of Networked Passive Switched Systems. *49th IEEE Conference on Decision and Control*, Atlanta, 15-17 December 2010, 1263-1268. <https://doi.org/10.1109/cdc.2010.5717941>
- [11] Mallocci, I., Daafouz, J. and Jung, C. (2009) Stabilization of Continuous Time Singularly Perturbed Switched Systems. *Proceedings of the 48th IEEE Conference on Decision and Control*, Shanghai, 15-18 December 2009, 6371-6376. <https://doi.org/10.1109/cdc.2009.5399876>
- [12] Hetel, L., Jung, C. and Daafouz, J. (2007) Stability Analysis for Discrete Time Switched Systems with Temporary Uncertain Switching Signal. *IEEE Conference on Decision and Control*, **46**, 5623-5628.
- [13] Antsaklis, P.J. and Nerode, A. (1998) Hybrid Control Systems: An Introductory Discussion to the Special Issue. *IEEE Transactions on Automatic Control*, **43**, 457-460. <https://doi.org/10.1109/TAC.1998.664148>
- [14] Rabello, A. and Bhaya, A. (2002) Stability of Asynchronous Dynamical Systems with Rate Constraints and Application. *Proceedings of the American Control Conference*, Anchorage, AK, 8-10 May 2002, 1284-1289. <https://doi.org/10.1109/acc.2002.1023197>
- [15] Yao, Z., Xiao, L. and Yan, Y. (2010) Seamless Transfer of Single-Phase Grid-Interactive Inverters between Grid-Connected and Stand-Alone Modes. *IEEE Transactions on Power Electronics*, **25**, 1597-1603. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2009.2039357>
- [16] Guo, Z., Sha, D. and Liao, X. (2014) Voltage Magnitude and Frequency Control of Three-Phase Voltage Source Inverter for Seamless Transfer. *IET Power Electronics*, **7**, 200-208. <https://doi.org/10.1049/iet-pel.2012.0723>
- [17] 魏明英, 宋明军. 拦截器姿态控制系统切换控制方法研究[J]. 系统工程与电子技术, 2007, 29(1): 118-120.
- [18] Zhai, G., Hu, B., Yasuda, K., et al. (2000) Disturbance Attenuation Properties of Time-Controlled Switched Systems. *Journal of the Franklin Institute*, **338**, 765-779.
- [19] Dayawansa, W.P. and Martin, C. (1999) A Converse Lyapunov Theorem for a Class of Dynamical Systems Which Undergo Switching. *IEEE Transactions on Automatic Control*, **44**, 751-760. <https://doi.org/10.1109/9.754812>
- [20] Liberzon, D. (2003) *Switching in Systems and Control*. Birkhauser, Boston, MA. <https://doi.org/10.1007/978-1-4612-0017-8>
- [21] Blanchini, F. (2009) A Separation Principle for Linear Switching Systems and Parametrization of All Stabilizing Controllers. *IEEE Transactions on Automatic Control*, **54**, 279-292. <https://doi.org/10.1109/TAC.2008.2010896>
- [22] 翟长连. 混合动态系统的稳定性理论及控制[D]: [博士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 1999.
- [23] Liberzon, D., Hespanha, J.P. and Morse, A.S. (1999) Stability of Switched Linear Systems: A Lie-Algebraic Condition. *Systems & Control Letters*, **37**, 117-122.
- [24] Mccourt, M.J. and Antsaklis, P.J. (2010) Stability of Networked Passive Switched Systems. *49th IEEE Conference on Decision and Control*, Atlanta, GA, 15-17 December 2010, 1263-1268. <https://doi.org/10.1109/cdc.2010.5717941>
- [25] Ooba, Y.F.T. (1997) On a Common Quadratic Lyapunov Functions for Widely Distant Systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, **42**, 1697-1699. <https://doi.org/10.1109/9.650019>
- [26] Chase, C., Serrano, J. and Ramadge, P.J. (1993) Periodicity and Chaos from Switched Flow Systems: Contrasting Examples of Discretely Controlled Continuous Systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, **38**, 70-83. <https://doi.org/10.1109/9.186313>
- [27] Michel, A.N. (1999) Recent Trends in the Stability Analysis of Hybrid Dynamical Systems. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, **46**, 120-134. <https://doi.org/10.1109/81.739260>
- [28] Mason, O. and Shorten, R. (2007) On Linear Copositive Lyapunov Functions and the Stability of Switched Positive Linear Systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, **52**, 1346-1349. <https://doi.org/10.1109/TAC.2007.900857>
- [29] Gu, K., Zohdy, M.A. and Loh, N.K. (1990) Necessary and Sufficient Conditions for Quadratic Stability of Uncertain Systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, **35**, 601-604. <https://doi.org/10.1109/9.53534>
- [30] 赵军, 聂宏. 切换系统输入对状态稳定性的充分条件[J]. 自动化学报, 2003, 29(2): 252-257.
- [31] Sun, Z. (2009) Stabilizing Switching Design for Switched Linear Systems: A State-Feedback Path-Wise Switching Approach. *Automatica*, **45**, 1708-1714.
- [32] Petterson, L.S. (1996) Stability and Robustness for Hybrid Systems. *IEEE Conference on Decision and Control*, **35**, 1202-1207.
- [33] Xie, D., Xu, N. and Chen, X. (2008) Stabilisability and Observer-Based Switched Control Design for Switched Linear Systems. *IET Control Theory & Applications*, **2**, 192-199.
- [34] Blanchini, C.S. (2008) Stabilizability of Switched Linear Systems Does Not Imply the Existence of Convex Lyapunov Functions. *Automatica*, **44**, 1166-1170.
- [35] Geromel, J.C. and Colaneri, P. (2006) Stability and Stabilization of Continuous-Time Switched Linear Systems. *SIAM*

- Journal on Control and Optimization*, **45**, 1915-1930. <https://doi.org/10.1137/050646366>
- [36] Geromel, J.C., Colaneri, P. and Bolzern, P. (2008) Dynamic Output Feedback Control of Switched Linear Systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, **53**, 720-733. <https://doi.org/10.1109/TAC.2008.919860>
- [37] Geromel, J.C., Deaecto, G.S. and Daafouz, J. (2013) Suboptimal Switching Control Consistency Analysis for Switched Linear Systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, **58**, 1857-1861. <https://doi.org/10.1109/TAC.2013.2238992>
- [38] Duan, C. and Wu, F. (2014) Analysis and Control of Switched Linear Systems via Modified Lyapunov-Metzler Inequalities. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, **24**, 276-294.
- [39] Bernstein, D.S. and Michel, A.N. (1995) A Chronological Bibliography on Saturating Actuators. *International Journal of Robust & Nonlinear Control*, **5**, 375-380. <https://doi.org/10.1002/rnc.4590050502>
- [40] Hu, T. and Lin, Z. (2001) Control Systems with Actuator Saturation. Birkhauser, Switzerland. <https://doi.org/10.1007/978-1-4612-0205-9>
- [41] Wu, F., Zheng, Q. and Lin, Z. (2009) Disturbance Attenuation by Output Feedback for Linear Systems Subject to Actuator Saturation. *International Journal of Robust & Nonlinear Control*, **19**, 168-184. <https://doi.org/10.1002/rnc.1306>
- [42] Wicks, M.A., Peleties, P. and DeCarlo, R.A. (1998) Switched Controller Synthesis for the Quadratic Stabilization of a Pair of Unstable Linear Systems. *European Journal of Control*, **4**, 140-147.
- [43] Wicks, M. and DeCarlo, R. (1997) Solution of Coupled Lyapunov Equations for the Stabilization of Multimodal Linear Systems. *American Control Conference*, **3**, 1709-1713.
- [44] Wicks, M.A., Peleties, P. and DeCarlo, R.A. (1994) Construction of Piecewise Lyapunov Functions for Stabilizing Switched Systems. *33rd IEEE Conference on Decision & Control*, **4**, 3492-3497. <https://doi.org/10.1109/cdc.1994.411687>
- [45] Liberzon, D. (2012) Switching in Systems and Control. Springer Science & Business Media, Berlin, Heidelberg.
- [46] Lu, B. and Wu, F. (2004) Switching LPV Control Designs Using Multiple Parameter-Dependent Lyapunov Functions. *Automatica*, **40**, 1973-1980.
- [47] Wu, F., Lin, Z. and Zheng, Q. (2007) Output Feedback Stabilization of Linear Systems with Actuator Saturation. *IEEE Transactions on Automatic Control*, **52**, 122-128. <https://doi.org/10.1109/TAC.2006.886498>
- [48] Dai, D., Hu, T., Teel, A.R., et al. (2009) Output Feedback Design for Saturated Linear Plants Using Deadzone Loops. *Automatica*, **45**, 2917-2924.
- [49] Allerhand, L.I. and Shaked, U. (2013) Robust State-Dependent Switching of Linear Systems with Dwell Time. *IEEE Transactions on Automatic Control*, **58**, 994-1001. <https://doi.org/10.1109/TAC.2012.2218146>

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: airr@hanspub.org