

Survey of Networked Control Systems Based on Switched Systems*

Yiwei Feng, Jian Luo

College of Electrical and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou
Email: ywfeng@yeah.net, fighterjian@aliyun.com

Received: Jun. 13th, 2013; revised: Jul. 2nd, 2013; accepted: Jul. 17th, 2013

Copyright © 2013 Yiwei Feng, Jian Luo. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract: In this paper, the past and current development of Networked Switched Control Systems (NSCS) is summarized briefly, and the related problems and main characteristics of the NSCS are introduced. And then, formation, development and the typical approaches for NSCS are discussed. Based on the current state of the NSCS, we also analyze the structure, characteristics of NSCS, especially the constrained and unconstrained switched systems. This paper aims to elaborate the present situation and control methods from various aspects of the NSCS. Finally, the paper discusses the future development of the NSCS.

Keywords: NSCS; Stability; Lyapunov Function

基于网络的切换控制系统研究综述*

冯宜伟, 雒 健

兰州理工大学, 兰州
Email: ywfeng@yeah.net, fighterjian@aliyun.com

收稿日期: 2013年6月13日; 修回日期: 2013年7月2日; 录用日期: 2013年7月17日

摘 要: 本文综述了网络切换控制系统的发展历史及研究现状, 首先扼要回顾了切换控制系统相关问题和现状, 其次介绍网络控制系统的主要特点和存在的问题, 最终阐述了网络切换控制系统的产生、发展以及典型控制方法。通过对当前的网络切换控制系统的结构和特征进行分析研究, 特别是对受控和非受控网络切换控制系统进行了重点分析。论文旨在从不同侧面探讨网络切换控制系统发展现状, 并展望了其未来的发展前景。

关键词: 网络切换控制系统; 稳定性; Lyapunov 函数

1. 引言

随着计算机技术, 网络通信技术和控制科学的飞速发展以及学科间的交叉渗透, 网络控制系统 (Networked Control Systems, 简记为 NCS)^[1-3]应运而生。不同于传统的点对点控制系统, NCS 具有布线少、成本低、易于扩展和维护、可实现信息资源共享及远程操作等优点, 是传统控制系统所不能媲美的。然而

*资助信息: 甘肃省自然科学基金(03-0311)资助。

网络的引入给工业控制应用带来极大便利的同时不可靠的网络传输方式也带来了网络诱导时延、数据包丢失、单包/多包传输等问题, 这些问题会降低系统的性能和稳定性。因此, 针对网络化控制系统的研究引起了广大科技人员的浓厚兴趣。在切换控制方面, 切换系统的研究可以追溯到 20 世纪 90 年代后期 Liberzon 和 Decarlo 等人的工作^[4,5], 在过去的几十年, 针对切换控制系统的研究也是一个热门的话题, 如果

你用 Google 在网上搜索“Switched Systems”会发现 有 104,000,000 条相关条目, 在 IEEEExplore 上可以检索到近十几年超过 160,000 篇关于切换系统的文章, 这反应了控制界对切换系统建模、分析、综合与控制的研究兴趣不断升高。而将这两大研究热点综合起来进行研究分析还比较少见, 有实际应用意义的结论也比较少。

近年来, 研究人员在解决 NCS 问题时常采用切换控制的思想, 并借助切换理论对 NCS 也展开了一些研究^[8,9]。此外国内外的《Automatica》、《International Journal of Control》、《自动化学报》等知名期刊也有少量的关于网络切换控制系统的研究。将网络融入到切换控制系统组合成一类新的系统—网络切换控制系统(Networked Switched Control Systems, 简记为 NSCS), 不少研究者针对这类系统展开了广泛的探索研究^[11-13]。到目前为止, 基于网络的切换控制系统作为一个新兴的研究领域, 逐渐成为国内外学者的研究热点和前沿方向^[8-14]。本文扼要分析了 NSCS 在国内外发展现状, 重点关注 NSCS 在稳定性和能控性等方面的研究进展, 最后对未来 NSCS 的发展趋势进行了展望。

2. 切换系统的基本概念

切换系统是由多个子系统组成, 并通过适当的切换策略按照不同时间或不同状态切换到相应的子系统下, 进而保证整个系统达到期望的特性(图 1 所示)。和一般的系统相比, 按照切换律组成的整个控制系统具有结构复杂、子系统间的相互关联性强、复杂的动态特性、存在实时性及多模块性等特点。切换的引入使每个子系统变得简单, 特别是对完全解耦的系统而言, 控制将变得非常便捷。

针对切换系统的研究之所以得到广泛的重视, 是因为:

- 1) 切换系统在实际生活中被广泛使用, 如电力电子技术^[15], 飞行控制系统^[16]和网络控制系统^[17]均可用切换系统描述。
- 2) 在一般混合系统中, 切换系统结构形式相对简单, 便于理解分析和实际应用。
- 3) 作为混杂系统的简化模型, 切换系统的分析和设计方法容易推广到一般混杂系统。

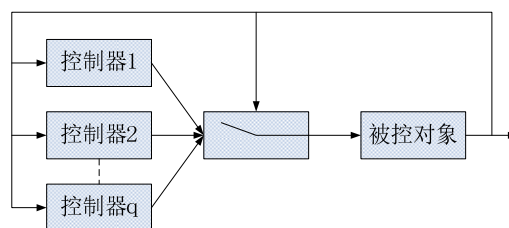


Figure 1. Diagram of switching control systems
图 1. 切换控制系统示意图

2.1. 切换系统的分类

按照切换系统所包含的时间状态变量类型, 切换系统可以分为以下两类:

- 1) 连续切换系统, 是指由切换信号与连续时间系统构成的切换系统。
- 2) 离散切换系统, 是指由切换信号与离散时间系统构成的切换系统。

按照切换系统是否含有非线性连续时间(或离散时间)动态, 切换系统可以分为:

- 1) 线性切换系统, 是指由切换信号和线性连续(或离散)时间系统构成的切换系统。
- 2) 非线性切换系统, 是指由切换信号和非线性连续(或离散)时间系统构成的切换系统。

按照切换信号的设定方式, 切换系统可分为:

- 1) 任意切换, 这类切换系统的切换信号是没有任何限制的, 可任意变化的。
- 2) 设计切换, 这类切换系统的切换信号必须按照某些要求或规则来设计, 在子系统的切换过程中随时判断切换条件, 根据检验结果切换到相应的子系统上。
- 3) 周期切换, 切换系统按照固定的周期进行切换, 在一个周期内切换规则严格按照子系统的先后顺序做定时切换。这种切换可以看成设计切换中的一种特例, 也称为常切换。

按照有无外部输入量, 切换系统可分为:

- 1) 当切换系统没有任何外部输入时, 称为自治切换系统。
- 2) 当切换系统有外部输入时, 称为非自治切换系统。

3. 网络控制系统基本概念

网络控制系统是指通过网络将分布于不同地理

位置的传感器，执行器和控制器连接起来，形成闭环的一种全分布式的实时反馈控制系统。NCS 的基本结构图如图 2 所示。

3.1. 网络控制系统中的基本问题

(1) 网络诱导时延

NCS 的各个节点都要通过网络传输信息，但由于网络带宽的限制，各个节点要分时共享网络通信信道。当多个节点通过网络交换数据时会不可避免的出现数据碰撞、多路径传输、连接中断、网络拥塞等现象，因而出现信息交换时间的延迟，即网络诱导时延。

受网络拓扑结构、网络所采用的通信协议、路由算法、网络的负载状况、网络的传输速率和数据包的大小等因素的影响，网络诱导时延呈现或固定、或随机时变、或不确定时变的特征。

1) 确定时延，当被控过程中的时间远远大于网络诱导时延时，将网络诱导时延建模成常数是一种方便而有效的方法，并用时延的均值和极大值进行系统分析。一定条件下，在源节点和目标节点分别设置一定长度的缓冲区可以将网络中的随机时延转化为确定性时延。

2) 随机时延，在 NCS 中假设网络诱导时延服从某种随机分布规律，以便估计下一采样时刻的时延值。

3) 不确定时延，对于许多实际的系统，网络诱导时延呈现时变不确定的特性。因此不确定时延网络控制系统比固定时延和随机时延网络控制系统更具一般性和实际性，不过，由于时延的变化无规律可循，加大了系统建模的难度。

(2) 数据包丢失

网络拥塞、连接中断、发送权竞争失败是导致数据包丢失的主要原因。此外数据信息在网络传输过程中可能会发生错误而被要求重发，如果某节点在规定的重发时间内仍没有成功发送数据信息，则该数据包被丢弃。在实时控制系统中，往往将一定时间内未到达的数据包主动丢弃，接着发送新数据以保证信号的及时更新和采样数据的有效性。丢包受网络协议、负载状况等因素的综合影响，通常具有随机性和突发性等特点。一个稳定运行的 NCS 容许有一定量的数据包丢失，但数据包丢失率超过一定值时将使系统失稳。

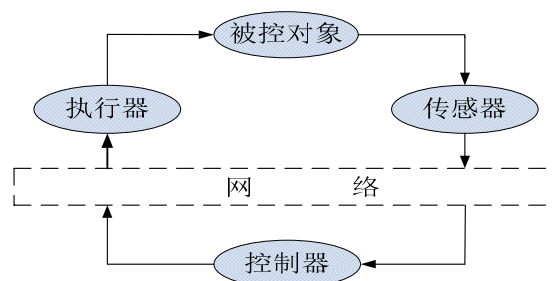


Figure 2. Diagram of networked control systems
图 2. 网络控制系统示意图

(3) 数据包时序错乱

由于多路传输机制的存在，系统节点发送的数据包会经过不同的网络传输路径到达目的节点，且数据包在中继环节(包括交换机、路由器、网关等)队列中的等待时间不相同，就会导致数据包时序错乱。此外节点冲突、网络拥塞、连接中断等因素也有可能造成数据包的时序错乱，数据包的时序错乱会导致数据传输率低，间接的增加网络时延。

(4) 单包/多包传输

单包传输是指传感器或控制器发送的数据被集中到一个网络数据包中，这样它们就会在同一时间传送。多包传输是指数据被分放在几个不同的数据包中进行传输，这样他们就不能同时到达控制器或被控对象。多包传输的原因之一是数据包大小的限制，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。另一个原因是 NCS 的许多传感器或执行器经常分布在一个很大的物理空间内，这样就不可能把所有数据放到一个数据包中。

4. 基于网络的切换系统的研究方法

4.1. 基于网络的切换控制系统的建模

近年来，越来越多的学者借助切换系统的理论对网络控制系统进行分析与设计。对于连续网络控制系统，文献[9]研究了一类带有丢包的网络控制系统的建模和控制问题，在系统建模时引入了时滞小于一个采样周期的假设后利用切换控制思想中的平均驻留时间概念和异步动态方法得到了系统稳定的充分条件。文献[13]将网络控制系统中的延迟和丢包现象视作系统运行出错，研究设计了一个开环和一个闭环的观测器，使得系统可以通过在两个观测器间切换来消除系

统出错的影响。对于离散网络控制系统，文献[12]在设定最大延迟步数的前提下，总结出系统可能发生的所有延迟情况，进而使每一种情况对应一个子系统构造出切换系统模型，最终得到系统在任意可能发生延迟的情况下保持稳定的条件。文献[10,11]通过系统离散化的过程构造一系列离散的子系统，不同的子系统描述各种不同的网络延迟和丢包现象，接着利用切换系统的研究成果对其进行分析，得到系统在一定平均驻留时间下保持稳定性的充分条件。

然而上述网络控制系统在建模切换系统时分别引入了方便作者建模的假设条件，这些假设的引入限制了所得结论应用的广泛性。到目前为止，利用切换方法对 NCS 的建模和研究不具有普遍性。通常情况下，切换系统可以用一组微分方程来描述：

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

其中 $\sigma(t)$ 为切换信号，记 $\Lambda = \{1, \dots, q\}$ 表示子系统顺序对应的序号集合， $\sigma(t)$ 为时间变量的分段常值函数，为研究问题的方便起见，通常假设 $\sigma(t)$ 是右连续的。对于离散时间切换系统，则相应描述为一组差分方程。通常网络切换控制系统定义为

$$\dot{x} = f_{\sigma(t)}(x) + \sum_{i=1}^m g_{\sigma(t)}(x)u_i \quad (2)$$

为便于系统建模及处理，大部分文献对系统(2)做了一定假设条件，特别地当 $f(x)$ 为线性及 $g_i(x)$ 为定长，则有网络切换线性系统

$$\dot{x} = A_{\sigma(t)}(x) \quad (3)$$

及网络切换线性控制系统

$$\dot{x} = A_{\sigma(t)}(x) + \sum_{i=1}^m b_{\sigma(t)}u_i \quad (4)$$

在过去的几十年，切换系统在控制领域特别是网络控制的应用需求不断升高，近年来主要的研究成果集中于网络切换系统的稳定性和能控性等问题，目前关于切换线性系统稳定性的研究最多^[19-30]。本文主要综述网络切换线性系统的相关问题。

4.2. 网络切换线性系统的稳定性分析

网络切换系统的稳定性有一个显著的特点是，其子系统的稳定性不等于整个系统的稳定性，即可能存

在这样的情形，网络切换系统的每个子系统的是稳定的，但是在按照规则进行切换时，会导致整个系统不稳定。与此相对，也可能存在这样的情形，尽管每个子系统是不稳定的，但是可以通过某种切换规则使整个系统稳定。网络切换系统是非线性系统，即使每个子系统都是线性定常系统。关于切换系统的稳定性，早期的研究成果可参考文献[7,18]。不同类别切换信号的网络切换系统稳定问题一直是最热门的话题，而切换信号的类别可以分为非受控(任意)切换和受控切换。目前关于网络切换系统稳定性的研究包括三类基本问题：a) 非受控(任意)切换下的稳定性，b) 判断某类受控切换下的稳定性，c) 设计切换使系统稳定，其中第三个问题没有解决，尚无一般方法。

4.2.1. 任意网络切换系统稳定性

实际中的网络切换系统会不可避免的切换失灵或者遇到特殊情况时需要随时进行切换，这就需要研究系统对于任意切换是否稳定，即任意网络切换线性系统稳定性分析。研究这类问题时根据上文提到的网络切换系统的稳定性特点，一般考虑系统各个子系统都是稳定的情况。

(1) 共同二次 Lyapunov 函数法

对系统(1)如果存在一个 Lyapunov 函数 $v(x) > 0$ ，使得对所有的切换模态

$$\dot{V}(x) = \frac{\partial V(x)}{\partial x} f_i(x) \leq 0, \forall i \in \Lambda \quad (5)$$

那么显然系统是稳定(渐近稳定)的。因此，这样一个 Lyapunov 函数称为共同 Lyapunov 函数(CQLF)。文献[20]提出将切换线性系统是否存在 CQLF 的问题转换为是否存在如下线性矩阵不等式(LMIs)的问题。即是否存在正定对称矩阵 $P \in R^{n \times n}$ 使得下式成立：

$$PA_i + A_i^T P < 0, \forall i \in [1, N] \quad (6)$$

其中 A 是切换系统的 Hurwitz 矩阵。文献[21]引入交互梯度下降算法，使得计算更为简便，但当线性切换系统的子系统数目较多时这种方法就不是很有效。文献[22,23]对于二阶切换线性系统且具有两个子系统的情况给出了将 CQLF 存在的问题等价于系统矩阵是否满足代数条件的充要条件，即如下定理：

定理 1^[22,23]：若 A_1, A_2 为 Hurwitz 矩阵，则下列条件等价：

1) 以 A_1 和 A_2 为子系统矩阵的切换系统, 存在共同二次 Lyapunov 函数;

2) $\gamma_\delta(A_1, A_2)$ 和 $\gamma_\delta(A_1, A_2^{-1})$ 是 Hurwitz 矩阵, 它们满足条件:

$$\gamma_\delta(A_1, A_2) = \delta A_1 + (1 - \delta)A_2, \delta \in [0, 1] \quad (7)$$

3) $A_1 A_2$ 和 $A_1 A_2^{-1}$ 不具有负特征值。

但对于包含多个子系统的网络线性切换系统, 很难应用上述结论。文献[24][25]提出对于有两个连续稳定子系统的二阶正切换系统, CQLF 的存在等价于任意线性切换系统的指数稳定性。文献[26]中 Liberzon 等人运用 Lie - 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系统矩阵产生的 Lie - 代数的可解性, 即如下定理:

定理 2^[26]: 设由 $A_i, i \in \Lambda$ 生成的 Lie - 代数 $\{A_i, i \in \Lambda\}_{LA}$ 可解, 那么 $A_i, i \in \Lambda$ 有共同二次 Lyapunov 函数。

近年的文献[27]提出了对于包含有限个 n 阶线性时不变子系统的切换系统, 共同二次 Lyapunov 函数存在的必要条件。然而对于考虑系统各个子系统都是稳定情况的网络切换线性系统, 系统稳定的充分必要条件仍然没有解决。

(2) 分片线性李亚普诺夫函数法

如果系统稳定, 则该系统是否存在 Lyapunov 函数就是逆 Lyapunov 定理研究的问题。文献[28]中提出若切换系统全局一致渐近稳定, 则系统具有共同 Lyapunov 函数。文献[29]将逆 Lyapunov 函数定理推广, 为此特别考虑了非二次 Lyapunov 函数。由逆 Lyapunov 定理可知, 对于任意切换下渐近稳定的切换系统, 存在一个共同分片二次或一个共同分片线性的 Lyapunov 函数, 分片线性 Lyapunov 函数(PLLF)具有如下形式:

$$V(x) = \max_{1 \leq i \leq N} \{\omega_i^T x\}, \omega_i \in R^n \quad (8)$$

近年来 Yfoulis 和 Shorten^[30]在算法方面有突破, 将一种称为 Ray-Gridding 的算法引入切换线性系统稳定性分析中, 能有效地求解任意切换系统的共同 Lyapunov 函数。

(3) 复合二次 Lyapunov 函数法

最初 Hu 在文献[31]中研究带饱和制动器以及带状态约束的控制系统时, 遇到了估计吸引域以及扩大

吸引域的控制设计等问题, 提出了如下复合二次 Lyapunov 函数:

设 J 为一正整数, 记

$$\Gamma^J = \left\{ \gamma \in R^J : \sum_{j=1}^J \gamma_j = 1, \gamma_j \geq 0 \right\} \quad (9)$$

$P_j = P_j^T > 0, j \in I[1, J], Q_j = P_j^{-1}$, 通过 P_j 可以建立以下三类复合二次 Lyapunov 函数

$$V_{\min}(x) = \min \{x^T P_j x : j \in I[1, J]\} \quad (10)$$

$$V_{\max}(x) = \max \{x^T P_j x : j \in I[1, J]\} \quad (11)$$

$$V_c(x) = \min_{\gamma \in \Gamma^J} x^T \left[\sum_{j=1}^J \gamma_j Q_j \right]^{-1} x \quad (12)$$

随后在文献[32]中提出了复合二次 Lyapunov 函数及其水平集的更多性质。实践表明, 复合二次李亚普诺夫函数是处理更广泛的网络非线性系统的一个有力工具。

4.2.2. 受控网络切换系统稳定性

实践中在切换瞬间经常会遇到一系列有限的受控切换信号, 切换信号的限制可以分为状态空间限制和时间域限制。状态空间限制主要研究由状态向量的演化产生的切换行为约束, 时间域限制主要研究为保证系统稳定而施加在连续子系统间切换速度的限制。它们在系统的稳定性分析上有很大的不同而且在这一类我们称为慢切换的切换类型有很多的研究^[6,7,17]。一个标定慢切换的方法是引入一个标量来限制切换信号的属性, 这个标量定义为驻留时间。

(1) 多 Lyapunov 函数法

早在 1992 年, 就有 Peleties 和 Decarlo 在文献[4]中提出了多 Lyapunov 函数的思想, 1994 年 Michael Branicky 在其发表的文献[5]中提出系统的指数稳定性分析可使用多个 Lyapunov 函数, 而不是单个 Lyapunov 函数, 并将其应用于非线性系统分析。后来 Brankicky 在文献[33]中指出, 如果每个子系统都满足在切换进入该子系统时对应的类 Lyapunov 函数值形成的序列单调递减, 则切换系统是渐近稳定的。文献[34]提出类 Lyapunov 函数的值在一个时间间隔的增加是以某种连续函数为界即可。

通过应用多 Lyapunov 函数, 文献[35]中证明了对于有稳定子系统的切换线性系统如果驻留时间充分大, 则系统加倍稳定。保证系统稳定时计算驻留时间

的下界也有相关研究^[6]，但许多情况下研究驻留时间的切换是有限制的。在文献[36]中驻留时间的概念被拓展为平均驻留时间(ADT)的概念。在文献[37]中研究发现平均驻留时间应用在系统稳定分析时更加灵活和高效，因为平均驻留时间的切换方法可能偶尔包含有被小于驻留时间的常数分开的连续分段信号。相应的，对于平均驻留时间的切换线性系统的稳定性分析和控制综合性都有相关研究[38]。

(2) 分片二次 Lyapunov 函数法

文献[39]提出系统存在二次类 Lyapunov 函数的条件，鉴于分片二次 Lyapunov 函数的保守性，文献[40]给出了多项式 Lyapunov 函数。文献[41]提出了可以分析切换系统稳定性的凸优化方法。文献[42]通过转移有向图的方法分析了分段线性系统的稳定性，文献[43]用多 Storage 函数给出了关于切换系统的耗散性研究，而耗散性与稳定性有密切的关系。

4.2.3. 网络切换系统的能控性分析

网络切换系统的能控性是很重要的性质，目前的研究成果主要集中于线性系统，考虑网络切换系统的能控性时切换律总假定是能控的。关于网络切换线性系统能控性的一个重要结果是：

定理 3：对线性切换系统，记包含 B 且 A 不变的最小子空间为 $\{A|B\}$ ，若能控子空间为

$$C = \{A_1 \dots A_N | B_1 \dots B_N\} \quad (13)$$

则切换系统能控当且仅当 $\dim(C) = n$ 。文献[44]提出了能控系统控制器的设计，文献[45]讨论了切换线性系统的能控子流形，文献[46,49]为线性切换系统的能控性和能达性提供了完整的几何标准，关于线性切换系统能控性的其它研究参考文献[47,48]。

非线性系统的能控性研究是一个难题，它的基本工具是 Chow 定理^[18]。在非线性系统中，双线性系统有非常重要的作用，考虑切换线性与切换双线性系统，它们比起一般非线性系统较为好处理，因为双线性系统的系统是分段解析的，因此可以简化 Chow 定理的应用。利用这两个优点，文献[50]给出了双线性切换系统的一些充分条件，然而关于网络切换系统能控性的研究，目前依然是个难点。

4.3. 网络切换系统的仿真研究

目前网络切换系统的稳定性和能控性研究及验证

技术都是靠计算机仿真实现的，所以 NSCS 计算机仿真也是研究的热点并与系统建模、系统稳定设计和验证过程密切相关。TrueTime 是瑞典隆德大学(Lund University)自动控制系的 Martin Ohlin, Dan Henriksson 等人开发的一个基于 MATLAB/Simulink 的网络化控制仿真工具箱，该工具箱填补了 MATLAB/Simulink 在新兴的网络化控制领域仿真方面存在的空白。TrueTime 工具箱可以同时支持控制与实时调度，通过使用该工具箱可以对基于网络的时延、丢包、单包/多包等问题的切换控制系统进行综合仿真分析。NSCS 系统仿真使用 TrueTime 1.5 工具箱，其中包含实时内核模块、发送消息模块、接收消息模块、有线网络模块、无线网络模块和电池模块 6 个功能模块组成。

NSCS 系统是涉及切换控制与网络通信的复杂系统，尽管 TrueTime 可以仿真研究网络切换系统，但是为了更好的研究网络切换系统的性能，工程界对于网络切换系统控制器的验证仿真技术以及仿真分析工具需求强烈，这是控制界和计算机科学共同的研究热点。

5. 结语

本文综述了基于网络的切换控制系统的发展及研究现状，主要介绍了近年来网络切换控制线性系统在任意切换和受控切换下的稳定性研究进展以及能控性的分析，最后介绍了 NSCS 的仿真软件。

现有的基于网络的切换控制系统的研究文献对于线性系统的研究较多，对非线性的研究较少；对单包传输的研究较多，对多包传输的研究较少；对仅存在时延或仅存在丢包的研究较多，综合考虑时延、丢包以及时序错乱等因素的研究相对较少；对采样速率，数据滤除和空采样的研究相对更少。因此，对基于网络的切换控制系统的分析与设计的综合性与普遍性有待加强。总之，基于网络的切换控制系统的研究是一个很活跃的研究领域并具有广泛的应用性，随着网络应用的不断发展，这方面的研究拥有广阔的前景。

6. 致谢

感谢甘肃省自然科学基金(03-0311)项目对本文的资助，感谢给予本文转载和引用权的资料、图片、文献、研究思想和设想的所有者，同时还要感谢给我

极大关心和支持的各位老师以及关心我的同学和朋友。

参考文献 (References)

- [1] W. Zhang, M. S. Branicky and S. M. Phillips. Stability of networked control systems. *IEEE Control Systems Magazine*, 2001, 21(2): 84-99.
- [2] G. Pin, T. Parisini. Networked predictive control of constrained nonlinear systems: Recursive feasibility and input-to-state stability analysis. 2009 American Control Conference, Piscataway: IEEE, 2009: 2327-2334.
- [3] A. F. Khalil, J. H. Wang. A new stability and time-delay tolerance analysis approach for networked control systems. The 49th IEEE Conference on Decision and Control, Piscataway: IEEE, 2010: 4753-4758.
- [4] P. Peleties, R. A. DeCarlo. Asymptotic stability of M-switched systems using Lyapunov functions. Proceedings of 31st IEEE Conference on Decision and Control, Tuscon, 1992: 3438-3439.
- [5] M. S. Branicky. Stability of switched and hybrid systems. Proceedings of 33rd IEEE Conference on Decision and Control, Lake Buena Vista, 1994: 3349-3503.
- [6] D. Liberzon. *Switching in systems and control*. Berlin: Birkhauser, 2003.
- [7] H. Lin, P. Antsaklis. Stability and stabilizability of switched linear systems: A short survey of recent results. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2009, 54(2): 308-322.
- [8] Y. Z. Liu, H. B. Yu. Stability of network control systems based on switched technique. Proceedings of the 42nd IEEE Conference on Decision and Control, Hawaii, 2003: 1110-1113.
- [9] W. A. Zhang, L. Yu. Output feedback stabilization of network control systems with packet dropouts. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2007, 52(9): 1705-1710.
- [10] H. Lin and P. J. Antsaklis. Stability and persistent disturbance attenuation properties for a class of networked control systems: Switched system approach. *Control Theory and Applications*, 2005, 78(8): 1447-1458.
- [11] H. Lin, G. Zhai and P. J. Antsaklis. Asymptotic stability and disturbance attenuation properties for a class of networked control systems. *Control Theory and Applications*, 2006, 4(1): 76-85.
- [12] J. Yu, L. Wang and G. Xie. A switched system approach to stabilization of networked control systems. *Journal of Control Theory and Applications*, 2006, 4(1): 86-95.
- [13] D. Ma and J. Zhao. Exponential stabilization of networked control systems and design of switching controller. *Journal of Control Theory and Applications*, 2006, 4(1): 96-101.
- [14] D. Ma, Z. F. Guo, G. M. Dimirovski, et al. Passive control for networked switched systems with network-induced delays and packet dropout. Joint 48th IEEE Conference on Decision and Control and 28th Chinese Control Conference, Shanghai, 2009: 4258-4263.
- [15] C. K. Tse, M. D. Bernardo. Complex behavior in switching power converters. Proceedings of IEEE, 2002, 90(5): 768-781.
- [16] P. Pellanda, P. Apkarian and H. Tuan. Missile autopilot design via a multi-channel LFT/LPV control method. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2002, 12(1): 1-20.
- [17] Z. D. Sun and S. S. Ge. *Switched linear system-control and design*. Berlin: Springer, 2004.
- [18] 程代展, 郭宇骞. 切换系统进[J]. *控制理论与应用*, 2005, 22(6): 954-960.
- [19] 张霞, 高岩等. 切换线性系统稳定性研究进展[J]. *控制与决策*, 2010, 25(10): 1441-1450.
- [20] S. Boyd, L. El Ghaoui, E. Feron, et al. *Linear matrix inequalities in system and control theory*. Philadelphia: SIAM, 1994.
- [21] D. Liberzon, R. Tempo. Common Lyapunov functions and gradient algorithms. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2004, 49(6): 990-994.
- [22] R. Shorten, K. Narendra. Necessary and sufficient conditions for the existence of a common quadratic Lyapunov function for a finite number of stable second order linear time-invariant system. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 2003, 16(10): 709-728.
- [23] R. Shorten, K. Narendra and O. Mason. A result on common quadratic Lyapunov functions. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2003, 48(1): 110-113
- [24] L. Gurvits, R. Shorten and O. Mason. On the stability of switched positive linear systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2007, 52(6): 1099-1103.
- [25] O. Mason, R. Shorten. Some results in the stability of positive switched linear systems. Proceedings of 43rd IEEE Conference on Decision and Control, Nassau, 2004: 4601-4606.
- [26] D. Liberzon, J. P. Hespanha and A. S. Morse. Stability of switched linear systems: A lie-algebraic condition. *Systems and Control Letters*, 1999, 37(3): 117-122.
- [27] T. Laffey, H. Smigoc. Tensor conditions for the existence of a common solution to the Lyapunov equation. *Linear Algebra and Its Applications*, 2007, 420(2-3): 672-685.
- [28] W. Dayawansa, C. F. Martin. A converse Lyapunov theorem for a class of dynamical systems which undergo switching. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1999, 44(4): 751-760.
- [29] J. L. Mancilla-Aguilar, R. A. Garcia. A converse Lyapunov theorem for nonlinear switched system. *Systems and Control Letters*, 2000, 41(1): 67-71.
- [30] C. Yfoulis, R. Shorten. A numerical technique for stability analysis of linear switched systems. *International Journal of Control*, 2004, 77(11): 1019-1039.
- [31] T. Hu, Z. Lin. Composite quadratic Lyapunov functions for constrained control system. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2003, 48(3): 440-450.
- [32] T. Hu, Z. Lin. Properties of the composite quadratic Lyapunov functions. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2004, 49(7): 1162-1167.
- [33] M. S. Branicky. Multiple Lyapunov functions and other analysis tools for switched and hybrid systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1998, 43(4): 475-482.
- [34] H. Ye, A. N. Micheal and L. Hou. Stability theory for hybrid dynamical systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1998, 43(4): 461-474.
- [35] A. S. Morse. Supervisory control of families of linear setpoint controllers Part I: Exact matching. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1996, 41(10): 1413-1431.
- [36] J. P. Hespanha and A. S. Morse. Stability of switched systems with average dwell time. *IEEE Decision and Control*, 1999: 2655-2660.
- [37] D. Wang, W. Wang and P. Shi. Exponential H_∞ filtering for switched linear systems with interval time-varying delay. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2009, 41(5): 532-551.
- [38] L. Zhang and H. Gao. Asynchronously switched control of switched linear systems with average dwell time. *Automatica*, 2010, 46(5): 953-958.
- [39] S. Pettersson and B. Lennartson. Stabilization of hybrid systems using a min-projection strategy. Proceedings of the 2001 American Control Conference, Arlington, 2001: 223-228.
- [40] A. Papachristodoulou, S. A. Prajna. Tutorial on sum of squares techniques for systems analysis. Proceedings of the 2005 American Control Conference, Portland, 2005: 2686-2700.
- [41] S. Prajna, A. Papachristodoulou. Analysis of switched and hybrid systems-beyond piecewise quadratic methods. Proceedings of the 2003 American Control Conference, Denver, 2003: 2779-2784.
- [42] Z. Sun. A graphic approach for stability of piecewise linear systems. Proceedings of Chinese Conference on Decision and Control, Shanghai, 2009: 1016-1019.
- [43] J. Zhao, D. J. Hill. Dissipativity theory for switched systems.

- IEEE Transactions on Automatic Control, 2008, 53(4): 941-953.
- [44] R. K. Tedavallied. Conditions for the existence of a common quadratic Lyapunov function via stability analysis of matrix families. Proceedings of American Control Conference. Anchorage: AACC Press, 2002: 1296-1301.
- [45] D. Cheng, H. Cheng. Accessibility of switched linear systems. Proceedings of the 42nd IEEE Conference on Decision and Control, Maui: IEEE Press, 2003: 5759-5764.
- [46] R. N. Shorten, K. S. Narendra. On common quadratic Lyapunov functions for pairs of stable LTI systems whose system matrices are in companion form. IEEE Transactions on Automatic Control, 2003, 48(1): 110-113.
- [47] S. S. Ge, Z. Sun and T. H. Lee. Reachability and controllability of switched linear discrete-time system. IEEE Transactions on Automatic Control, 2001, 46(9): 1437-1441.
- [48] Z. Sun, D. Zheng. On reachability and stabilization of switched linear systems. IEEE Transactions on Automatic Control, 2001, 46(2): 291-295.
- [49] G. Xie, L. Wang. Controllability and stabilization of switched linear-systems. Systems and Control Letters, 2003, 48(2): 135-155.
- [50] D. Cheng. Controllability of switched bilinear systems. IEEE Transactions on Automatic Control, 2005, 50(4): 505-511.