

Review of Quantitative Feedback Control System Based on Network

Yiwei Feng, Fangjie Ren, Dandan Yang

College of Electrical and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou Gansu
Email: ywfeng@yeah.net, fangjieren@yeah.net, 15680459648@163.com

Received: Jun. 5th, 2018; accepted: Jul. 2nd, 2018; published: Jul. 9th, 2018

Abstract

Firstly, the development of network control theory and quantitative control theory were briefly reviewed in this article. Network control was combined with quantitative control whose structures and characteristics were analyzed and studied. The development status and research achievements of stability analysis, quantizer design, controller design, robustness analysis and so on based on the quantization feedback control system considering the delay, pack loss, quantization, network bandwidth and other factors were focused on and reviewed. Finally, the research status of network quantization control system was given some more all-sided description; at the same time, some problems to be solved were presented which give the guidance meaning for the further research work in the future.

Keywords

Network Control, Quantitative Control, Quantizer, Stability Analysis

基于网络的量化反馈控制系统综述

冯宜伟, 任方杰, 杨丹丹

兰州理工大学电气工程与信息工程学院, 甘肃 兰州
Email: ywfeng@yeah.net, fangjieren@yeah.net, 15680459648@163.com

收稿日期: 2018年6月5日; 录用日期: 2018年7月2日; 发布日期: 2018年7月9日

摘要

本文首先扼要地回顾了网络控制理论和量化控制理论的发展, 将网络控制与量化控制相结合, 对其结构和特征进行分析和研究, 重点探讨和回顾了基于网络的量化反馈控制系统在考虑时延、丢包、量化以及

网络带宽等因素下的稳定性分析、量化器设计、控制器设计、鲁棒性分析等的研究成果和发展现状,最后对基于网络的量化控制系统的研究现状给出了一些较为全面的描述,同时也提出了一些尚未解决的问题,就未来进一步的研究工作有一定的指导意义。

关键词

网络控制, 量化控制, 量化器, 稳定性分析

Copyright © 2018 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

网络控制系统(Network Control Systems, NCSs)是指反馈控制回路通过各种网络信道连接而形成的闭环控制系统,同时也是一种全分布、网络化、集成化和节点智能化的实时反馈控制系统。在 NCSs 中,传感器、控制器、执行器及被控对象和通讯网络连接在一起,设备之间的数据通过一个共享的网络通道进行传输,从而实现设备之间资源共享和协调操作,其典型的 NCSs 基本结构如图 1 所示。

NCSs 是计算机网络技术和控制技术的交叉学科,作为一门新兴学科,它已经历了近 20 年的发展。与传统的点对点控制系统相比,NCSs 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,因而广泛应用于工业控制、机器人遥控操作、飞行器设计远程教学和实验、智能微网、基于 Internet 的远程过程控制、直流控制系统、武器兵工系统、智能交通、远程医疗、航空航天、楼宇自动化领域等。但时至今日,网络仍然是一种不太可靠的通信介质,广大科技工作者还没有形成统一的理论体系。由于网络信道带宽和服务能力的物理限制,数字信息在网络传输中会出现数据量化损失、有限信道带宽约束、数据传输时延、丢包以及错序等问题。这些问题经常会导致系统性能变差,影响系统的稳定性,最终导致难以应用于实践中。另一方面,由于 NCSs 中的各控制节点大都是数字形式的处理器,需要将模拟信号转化成数字信号以及将数字信号转化成模拟信号。在转化过程中必然存在一个精度问题,由于传感器自身的精度限制以及成本的要求,这种转换不可能以无限的精度进行,所以数据量化不可或缺。

1956 年 Kalman 在研究量化的采样信号时指出如何减少和降低量化误差是量化反馈研究工作的重点。同年, Kalman 指出当采样系统中引入有限步长的量化器,控制系统中会出现混沌现象[1],其中的混沌现象便是由量化误差造成的。针对量化反馈控制系统的研究方法主要有两类,第一种方法考虑了静态均匀量化器,假定信号在当前时刻的量化值只与当前时刻的数据有关,在此规定下设计的编码和解码方案结构就较为简单,但控制效果不太理想。另外一种方法是综合考虑量化反馈控制器与系统性能,并采用时变的且动态可调的对数量化器,该方法能够根据网络环境和控制信号的变化实时调整量化级数,使得系统的极限环减小,稳定性增强。关于系统稳定性的研究, Delchamps [2]最早研究了线性不稳定系统的量化反馈控制镇定问题。随后, Brockett 及 Liberzon 等人[3] [4] [5] [6]进一步研究了数据量化对系统的影响,提出赋予量化信号一个固定优先级关系,这样随着系统的摄动变化可以在线调整量化参数,考虑了系统的时延,量化以及非线性特征,首次将这三者统一在一个框架下进行系统研究,并基于 Lyapunov 函数给出系统控制器的设计方法。但是,以上研究中都没有充分考虑量化误差的影响,传统的做法是认为量化误差较小以至于可以忽略或者可以使用较小的常数 k 替代,但这样设计出来的控制器保守性比较强。关

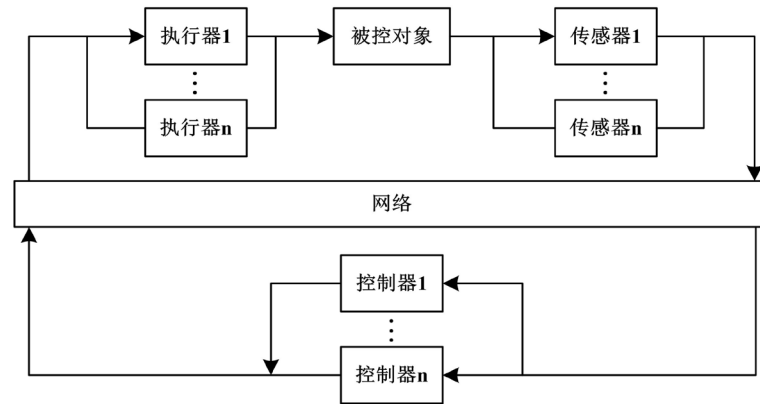


Figure 1. The structure of a typical network control system
图 1. 典型网络控制系统的结构示意图

于通信信道, Shannon [7]最早提出了失真率理论, 给出了通信信道传输的上界约束, 指出了在保证错误概率为零时通过信道传输的最大信息速率, 这也为量化器的研究与应用提供了理论基础。在 NCSs 研究中, 为了使得量化误差尽可能的小, 以至于不影响系统的稳定性, 最早在文献[8]中, Oliver 等人得出了一个步长为 Δ 且步长数较多的线性量化器, 它的平均误差是 $D(q) = \Delta^2/12$ 。随后, Bennett [9]发现在高精度和密度函数是光滑的情况下, 量化误差呈现随机噪声的特点, 它与信号的关系很小, 几乎等于白噪声。后来 Widrow 等人[10]对该结果进行了研究和推广。除了线性量化器, 还有非线性量化器。在 2000 年, Elia 在文献[11]中指出在离散单输入单输出线性时不变系统中对数量化器是密度最小的量化器, 在考虑了量化系统的最大采样周期的条件下, 得出了系统稳定的最小量化密度跟系统本身的不稳定极点有关。随后, Elia 和 Mitter [12]则证明了在单输入单输出情况下, 系统采用对数形式的量化器, 系统的二次稳定性性能指标量化级水平也是对数线性化的, 指出了状态反馈下使得 NCSs 稳定的对数量化器量化密度的上限值, 同时得到了最优量化取值密度, 提出量化是有益于 NCSs 设计的这一新观点。在 2005 年, Fu 和 Xie [13]用上行界的方法得到了同样的结果, 并把结论推广到了离散多输入多输出线性时不变系统, 同时得到了满足保性能和 H_∞ 性能的充分条件。后来, Gao 在文献[14]中利用量化相关的函数得到了量化反馈控制系统中量化密度更小的充分必要条件。针对 NCSs 中关于资源受限问题, K.J. Astrom 和 B. Bo [15]最早提出了事件触发机制, 即采样信号只有在满足事件触发条件时才被传输, 有效地降低了网络通信负担。近些年来, 在资源受限离散时间的 NCSs 中, 马巧力等人[16]通过事件触发降低网络带宽占用, 采用带有缩放因子的动态量化器降低量化误差的影响, 并将该 NCSs 建模成具有不确定参数的离散时间切换系统。针对存在状态和控制信号量化的离散时间线性系统, 王权等人[17]提出了事件触发预测控制与量化相结合的方法。随后在针对信道约束和网络拥塞系统中, Ramirez 等人[18]研究了一类事件触发的动态量化器, 使系统性能下降到最小化的同时, 满足信道数据率约束, 并降低系统网络利用率。但缺点是量化器的设计方法是针对特定的输入信号 $u(k)$ 进行的, 而找到与 $u(k)$ 无关的性能指标 $E(QS)$ 的表达式任务还有待进一步研究。在无线传感器网络中为了降低传输能耗, Rago 等人[19]最早针对低传输速率环境, 提出了仅当传感器判决有事件发生时才向融合中心发送信息的筛选传输策略。近些年, Yingyue Xu 等人[20]研究了并行计算在传感器网络决策融合中的应用, 介绍了协同式信号与信息处理方法; Israfil 等人[21]研究了基于似然比判决的分布式一位决策融合规则, 采用穷尽搜索方法计算最优阈值; Makarenko 等人[22]详细讨论了在基于贝叶斯方法下服从各种不同分布信道下的信息融合算法, 并介绍了一个目标追踪实例; Niu 等人[23]研究了网络中大规模传感器的分布式决策算法, 介绍了传感器节点及决策中心的决策门限值解决方法; Shorey [24]研究了理想信道下 WSN 的集中式、分布式和量化式决策融合算法, 并讨论了各

种算法的能耗与鲁棒性问题。以上研究工作是基于瑞利衰落信道模型进行的，瑞利衰落信道模型适用于传感器与融合中心之间只有散射，不存在视距传播的情形。如果存在视距传播，则可以建模为莱斯衰落信道。随后，Cheng 等人[25]进一步研究提出了三级量化的传输策略，并与传统的传输策略进行了比较。同年，Wang 等人[26]对传感器个数未知条件下的决策融合问题进行了研究，并给出了最优筛选概率的选取方法。考虑到信道实时状态信息往往难以获得，刘守军等人[27]在莱斯衰落信道模型下，对使用三级量化筛选策略的传感器网络决策融合问题进行了研究。在三级量化筛选策略下，可以通过改变筛选概率值，得到不同的检测错误概率。当检测错误概率最小时，筛选概率值达到最优。根据检测错误概率随筛选概率变化的关系曲线，可以比较不同融合算法的性能，并获得最优的筛选概率值。然后分别在低信噪比和高信噪比条件下给出了两种融合规则的简化形式。结果表明，三级量化筛选策略不仅可以降低系统传输能耗，而且可以改善系统检测性能。

本文首先讨论 NCSs 中存在的量化问题，随后再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. 网络化控制系统中的量化器设计

NCSs 的显著特点是控制器与被控对象之间的信息传输是通过通信网络实现的。由于通信网络单次传输的比特值为有限个数，因此系统状态 x_k 在传输前必须进行离散化。在系统回路中，量化编码器 $Q_k: R^n \rightarrow S_k$ 的作用是把系统状态 x_k 映射到集合 S_k 中的单个元素，单个元素被编码成可用于通信传输的二进制序列。在信道的另一端，解码器接收信道输出并生成状态估计 \hat{x}_k 。在上述过程中，由于编码/解码器的存在将系统状态 x_k 离散化后从而产生了量化误差，即 $x_k - \hat{x}_k \neq 0$ ，而如何刻画量化误差对系统的影响是需要解决的一个基本问题。直观地分析，如果通信数率越低，则 S_k 的元素数量越少，量化误差越大；反之亦然，如果量化误差太大，则控制器获得的系统信息越少，以至它可能无法使该系统稳定。因此，减少和量化误差对系统控制性能和稳定性的影响成为网络控制研究的一个热点课题。根据对量化问题的研究分析，总结出两条主线：第一，在量化器的选择问题上，不同的量化器不仅具有不同的量化误差，而且对系统稳定性也有不同的影响；第二，在量化密度的设计问题上，不同的量化器具有不同的量化密度特性，并且随着外界条件的变化，量化密度也一直保持或变化，这对 NCSs 的稳定性和控制性能均有较大影响。现有关于 NCSs 量化状态反馈控制的研究主要集中在如图 2 所示的系统结构，考虑 n 维离散时间系统：

$$x_{k+1} = Ax_k + Bu_k \quad (1)$$

式中， $x_k \in R^n$ 是系统状态， $u_k \in R^m$ 是控制输入，且 (A, B) 是可镇定的。

量化器可根据结构不同分为线性量化器和非线性量化器，如图 3 表示步长为 Δ 的线性量化器且通常可以用以下数学形式表示：

$$q_l(x) = \sum_i y_i L_{s_i}(x) \quad (2)$$

式中

$$L_{s_i}(x) = \begin{cases} 1, & x \in S \\ 0, & x \notin S \end{cases}$$

由于量化误差的出现，量化研究的核心问题就是如何在步数和平均误差之间做出平衡。文献[8]中，Oliver 等人在分析通信中的脉冲编码调节器时指出一个步长为 Δ 的线性量化器，它的平均误差是 $D(q) = \Delta^2/12$ 。Bennett 发现，在高精度和密度函数光滑的情况下，量化误差类似于具有均匀分布和几乎

与输入信号无关的白噪声[28]; 随后 Widroz 等人进一步研究和推广了该结果[10]。文献[2]中, Delchamps 研究了离散时不变系统中的量化反馈镇定问题, 文中指出在传统意义上通过状态量化去控制系统并不能达到渐进稳定效果, 但对于可镇定控制系统, 通过量化反馈则可以使系统轨迹长时间趋向于任意小区间。

非线性量化器是根据信号的大小制定量化等级的, 量化步长均不相等, 对数量化器是一类比较特殊的非线性量化器。对数量化器中采集信号越小步长越小, 则量化误差也越小。因此对于小信号量化, 采用对数量化器比较适合。图 4 描述的是对数量化器, 常规的对数量化器数学表达式为:

$$q(y) = \begin{cases} v_i, & \frac{v_i}{1+\delta} < y < \frac{v_i}{1-\delta}, y > 0 \\ 0, & y = 0 \\ -q(-y), & y < 0 \end{cases} \quad (3)$$

其中: $U = \{\pm v_i = \rho^i v_0, i = \pm 1, \pm 2, \dots\} \cup \{0\}$ ($0 < \rho < 1, v_0 > 0$) 为量化值的集合。从量化器的密度分析, 可知线性量化器的密度是无限的, 而对数量化器的密度是 $2/\ln(1/\rho)$ 。因此, 在解决无线 NCSs 带宽有限问题时对数量化器具有一定优势。

由于对数量化器具有密度小等优点, 近些年来得到了很多学者的关注。2001 年 Elia 和 Mitter 在文献

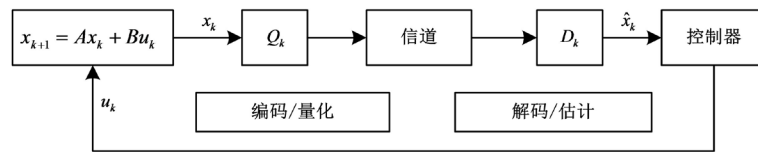


Figure 2. Quantization feedback control system

图 2. 量化反馈控制系统

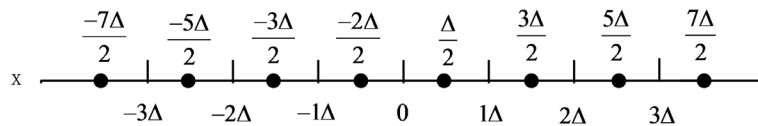


Figure 3. Linear Quantizer

图 3. 线性量化器

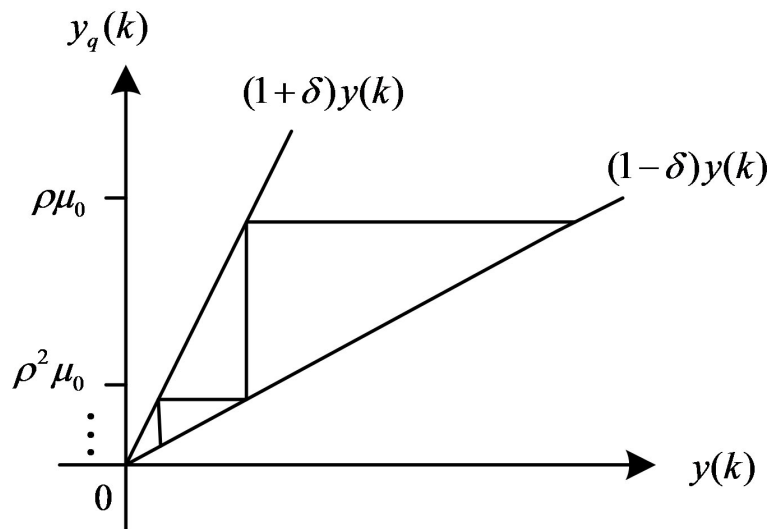


Figure 4. Quantizer

图 4. 对数量化器

[12]中首次提出对数量化器,他们证明了对数量化器是最粗糙(即密度最小)的量化器,同时讨论了量化状态反馈下,单输入单输出(Single-Input Single-Output, SISO)系统的二次镇定性问题。文献[13]将文献[12]的结果推广到多输入多输出(Multiple-Input Multiple-Output, MIMO)系统,并指出对数量化反馈问题可以转化为鲁棒控制问题来研究,这对对数量化器的研究起到至关重要的作用。

为了进一步分析量化器,我们分析量化器的当前状态,即静态量化器和动态量化器。静态量化策略的量化范围是常数,并且每个比特通过固定(静态)方法被映射到量化范围的特定子集。这种方法易与实现,但想保证一个无噪声控制系统的稳定性,量化比特数需要满足 $R \rightarrow \infty$ 要求,而量化比特数为有限个数时,最终只能达到状态变量的界。相对于静态量化策略,动态量化策略可以选择一个可变的量化范围,并且量化比特数与量化范围的子集之间的映射关系也可以是时变的,虽然量化过程相对复杂,但是动态量化策略可以通过有限个量化比特数来保证无线噪声线性系统的渐进稳定性。最终控制结果表明在带宽约束的情况下动态量化策略比静态量化策略具有更多优势。

3. 存在时延、丢包的量化控制

NCSs 中存在的两个主要问题是时延和丢包,其产生的原因主要是由有限通信资源和较低传输速率导致的信息拥挤和信道堵塞造成。下面将主要讨论基于不同时延和丢包的建模思路和处理方法,来论述 NCSs 的稳定性分析和控制器设计。

3.1. 确定性建模和处理方法

对于确定性时延,它常常被建模为恒定时间延迟[29] (时延的大小是固定值)和时变时延[30] [31] (时延的大小是变量,但规律遵循确定性时间变化)。文献[32]主要研究了具有长恒定长时延的 NCSs,设计出一个基于状态反馈的随机最优控制器来保证闭环系统的随机稳定和均方指数稳定。基于异步动态系统理论,文献[33]研究了具有时变时滞的多包传输网络控制系统的指标稳定性和控制器设计,给出其指数稳定的半负定矩阵条件(半负定矩阵包含有负定矩阵情形)和控制器设计。文献[34]研究了具有长时延和丢包的 NCSs 保性能控制,限定了两个采样周期之间的网络时延,使系统具有保守性,并利用状态增广方法,将 NCSs 建模为 Markov 跳变系统,利用 Markov 跳变系统理论,以线性矩阵不等式(LMI)的形式给出了 NCSs 保性能控制器存在的条件及其设计方法。而文献[35]中,考虑时延存在于传感器到控制器及控制器到执行器之间,且通道被建模为两个独立的 Markov 链,而对于丢包则视为一种特殊的时延,取丢包数对应的时延值为无穷大,利用 H_∞ 控制方法对 NCSs 进行了研究,给出了 H_∞ 输出反馈控制器设计问题的 NCSs 稳定性和可解性的充分条件。文献[36]研究了在传感器和控制器端考虑量化时变时延 NCSs 的量化控制问题,并在考虑网络时延和量化的情况下提出了系统稳定性条件和量化控制器的设计方法。首先基于网络传输环境建立了一类包含时延和量化信息的新的闭环 NCSs 模型,在传感器与控制器之间设置对数量化器,控制器使用量化后产生的信息进行计算,计算所得控制输入经后向反馈网络传输到执行器,并作用于被控对象。然后,运用 Lyapunov 稳定性理论和 LMI 方法,给出系统稳定性条件和对数量化控制器的设计方法,最终达到理想效果的有效性和可行性。

3.2. 不确定性建模和处理方法

将时延或丢包建模为大小遵循 Bernoulli 随机分布[37]或者 Markov 跳变规律[38]变化的随机时延或丢包。F.W. Yang 和 Q.L. Han 在文献[37]中研究了多数据丢包,其中 NCSs 被建模为一个随机参数系统,且双通道的丢包数分别遵循两个独立同分布的白序列变化规律变化,文中利用 H_∞ 控制方法实现了闭环系统均方意义下的指数稳定。而 J.H. Zhang 等人[38]则根据 Markov 链的变化规律进行时延或丢包建模,最终 NCSs 被建模为一个 Markov 跳变线性系统,并基于 Markov 跳变系统理论对稳定性进行了分析。文献[39]

针对传感器与控制器之间以及从控制器与执行器之间存在网络诱发的随机延迟, 基于观测的控制器设计为使得系统指数均方稳定。在同时考虑量化和随机时延的情况下, 文献[40]研究了由无线连接部件和无线节点移动引起的具有随机延迟的一类无线 NCSs 的稳定性, 控制器的设计方法是通过求解双线性矩阵不等式给出的。文献[41]通过使用动态观测器给出了 H_∞ 控制器的设计方法, 将非凸问题转化为线性矩阵不等式问题, 使得闭环系统稳定且在量化范围下具有指定的 H_∞ 性能指标。周颖等人[42]研究了具有时延和丢包的网络控制系统的 H_∞ 控制, 同时考虑传感器与控制器以及控制器到执行器之间的时变时延, 将时变时延处理成系统参数的不确定性, 由 Bernoulli 随机序列描述数据丢失, 通过 LMI 和 Lyapunov 函数给出 H_∞ 控制器存在的充分条件。

然而建模方法不管采用哪种, 从众多研究结果发现, 控制器的稳定性分析和设计更适合 NCSs 双通道的实际情况, 控制器设计更多结合实际情形, 也即更具有实际可行性意义。

4. 带宽约束下网络化控制系统的量化反馈研究

在通信网络中, 带宽约束是 NCSs 的一个重要特征。考虑带宽约束的情况下, NCSs 解决的关键问题之一是研究出适当的量化算法, 以最小的量化比特数来确保 NCSs 的稳定性。以下将从线性系统和非线性系统两个方面对现有的量化方面结果加以综述。

4.1. 带宽约束下线性系统的量化反馈研究

1990 年, 在学者 Delchamps 的研究基础上, Wong 和 Brockett 在带宽约束条件下研究了状态估计问题, 并提出了稳定性的一个弱概念: 包含性。在一定条件下, 平均编码估计序列(该序列是一个 n -bit 序列)的概念由状态观测器的设计来定义, 它可以保证估计误差的收敛性和系统的包含性。在针对噪声干扰量化反馈的研究中, 对于线性标量系统, 文献[43]从二进制控制(Binary Control)角度出发, 分别定义了控制区域(Control Region)和工作区域(Working Region), 对于控制区域中的每个控制量, 都必须使状态变量的轨迹落入工作区域内。在给定控制级数组 N (N 关于零对称)的条件下, 可得到数据率的最低要求为:

$$R_m = 2L/h_m, L = \lceil \log_2 N + 1 \rceil \quad (4)$$

式中, h_m 为采样间隔的最低上限。对于标量系统, Li 和 Baillieul 证明了二进制控制是用时变带宽约束来控制鲁棒性的最佳方法, 同时并介绍了一种基于二进制控制的综合控制方法, 即在原始信道的基础上增加另一条信道(Side Channel, 信道的带宽可以是无限小), 以调整二进制控制的幅度, 使系统满足渐进稳定性时保证任何数据数率都大于最低要求。随后, Li 和 Baillieul 还把这一结果推广到多维线性系统[44], 即在带宽有限的情况下, 通过时隙来分配带宽, 使用二进制控制来保证系统鲁棒性。之后, Ling 和 Lemmon 通过动态 bit 分配的方法研究了含有界噪声量化线性系统的稳定性[45], 并获得了最小恒定数据数率以确保系统稳定性。

4.2. 带宽约束下非线性系统的量化反馈研究

在实际系统中除线性系统外, 绝大多数都是非线性系统。因此, 研究非线性系统在带宽约束条件下的量化反馈策略将更具有实际意义。在文献[46]中, Liberzon 最初对于非线性系统带宽约束进行了研究, 同时他提出 4 条假设:

假设 1: 零输入系统 $\dot{x} = f(x, 0)$ 是一个 Forward Complete 系统。即对每个初始状态 $x = (0)$, 存在 $\dot{x} = f(x, 0)$ 的解定义在所有的 $t \geq 0$ 上, 记作 $\xi = (x(0), \cdot)$ 。

假设 2: 系统 $\dot{x} = f(x, u)$ 存在一个局部 Lipschitz 反馈律 $u = k(x)$, 定律满足 $k(0) = 0$, 且考虑测量误差的情况下, 可以确保闭环系统输入到达状态稳定。

假设 3: 数值 $N^{1/n}$ 是一个奇数, 其中 n 为系统的尺寸, N 为控制器接收的数字序列, 且都为固定的正整数。

假设 4: $\Lambda < N^{1/n}$, 其中, $\Lambda = \exp(L\tau) \geq 1$, τ 为采样周期。

如果系统满足上述 4 条假设, 可以通过量化反馈使系统渐近稳定[46]。之后, Liberzon 和 Hespanda 再次研究这个问题, 将原始的第二个假设从状态变量 x 放宽到状态估计 \hat{x} 以满足 ISS 条件, 系统的渐进稳定性依然可以保证[47]。Nair 和 Evans 则通过定义 TFE-Topological Feed Back Entropy 的概念, 分析非线性系统的稳定性, 并证明了保证状态量收敛到紧致集的反馈数据速率的边界严格等于该集合中被控制对象的 TFE。对于一个固定点, 当且仅当其数据率高于 TFE 点处控制对象的数据率时, 才能得到局部一致渐近稳定的结果[48]。虽然该方法通过量化反馈获得保证系统稳定性结果, 但其缺点是当系统为线性系统时, 计算系统的 TFE 和所需的最小比特数方法有多种, 然而非线性系统是多重而复杂的, 没有统一的方法来计算系统的 TFE 以及镇定一个非线性系统的最小 bit 数。所以, 具有特殊结构的非线性前馈系统 (Nonlinear Feedforward System) 是近年来的重点研究对象。De Persis [49] 首先对这类系统考虑量化情况下进行稳定性分析, 得出在部分 Lipschitz 条件下, 对于一个 n 维系统, 如果满足一定假设条件, 用 n -bit 可以保证系统的半全局稳定性, $(n + 1)$ -bit 可以保证系统的全局稳定性。文献[50]在文献[49]基础上进行推广, Lemmon 证明在全局 Lipschitz 条件下, 仅用 1-bit 就可以镇定 n 维非线性前馈系统。随后, 文献[51]将文献[50]中的结果推广到局部 Lipschitz 条件, 并指出仅用 1-bit 仍然可以保证系统的渐进稳定性。

5. 具有鲁棒稳定性分析的网络量化控制

在实际工业生产过程中, 由于外部干扰和状态变化的存在使得系统模型难以准确获得, 并且系统本身也可能存在各种故障, 这也导致了模型的不确定性, 而模型的不确定性在控制系统中普遍存在, 所以如何设计一个控制器来保证不确定对象模型能达到期望指标便是鲁棒控制重点研究的问题。2006 年 Jiang [52] 研究了带有时变时滞不确定线性系统的鲁棒稳定性问题, 定义了时变时滞的变化区间, 基于 Lyapunov-Krasovskii 泛函方法, 引入自由矩阵来降低结果的保守性, 得到相关鲁棒稳定性判据。2013 年 Tian 等人[53]在研究不确定 NCSs 的鲁棒 H_∞ 控制问题时, 不仅考虑网络诱导时延, 还考虑通信约束的不确定性以及系统的动态特性和访问率, 采用 Lyapunov-Krasovskii 泛函方法设计鲁棒 H_∞ 控制器, 得到系统均方稳定的充分条件。同年 Hu 等人[54]将模糊控制方法引入到非线性离散 NCSs 的鲁棒稳定研究中, 考虑到近似误差, 数据丢包和网络诱导时延, 将非线性离散 NCSs 模型转化为 T-S 模糊模型, 并利用 Lyapunov-Krasovskii 泛函方法得到模糊控制器。随后, Chae 等人[55] [56]也研究了基于 T-S 模糊模型的非线性离散 NCSs 的鲁棒 H_∞ 控制问题, 将网络诱导时延建模为有限状态 Markov 过程, 基于 Sum of Square(SOS)方法, 设计了一个时延相位 H_∞ 模糊控制器。而近年来除了模糊控制外, 学者们通过对鲁棒控制问题的研究, 逐渐将量化问题、同步问题和鲁棒控制问题相结合。文献[57]针对具有量化作用和不确定性情况的网络化系统, 研究了系统的稳定性及鲁棒预测控制器的设计问题, 通过将量化控制问题转化为鲁棒控制问题, 获得系统稳定性的条件, 提出了鲁棒预测控制器的设计方法。但是, 关于网络化不确定线性系统的鲁棒 H_∞ 性能分析和预测控制仍是一个有待解决的问题。Chuan Zhang 等人[58]研究了具有参数干扰和混合时变时延的两个非线性复杂网络化系统之间的鲁棒外同步问题, 文献中为了实现驱动响应网络之间的外部同步, 提出了一种线性矩阵控制方法。首先建立一个复杂的系统模型, 除了线性耦合外, 系统模型还具有参数扰动、内部时变时延、离散时变时延和分布时变时延; 然后根据鲁棒控制策略、线性矩阵不等式和 Lyapunov 稳定性理论, 得到鲁棒外同步的充分条件, 根据这些条件可以得到矩阵控制器的设计。但是, 文献中关于交换复杂网络和随机复杂网络等其他重要网络模型的同步问题还未考虑, 因此这类问题还需有待进一步研究。

6. 展望

综上所述,通过对国内外网络控制系统的回顾,了解到目前 NCSs 和量化控制理论都得到了广泛的研究与应用,但是关于网络与量化相结合的研究有待进一步的拓展和延伸。

第一,本文提到的由于网络并不是一种可靠的通信介质,数据包在网络传输中不可避免地存在时延、丢包、网络带宽以及时序错乱等问题,往往会导致系统性能变差,甚至会影响系统的稳定性。而量化是把经过采样得到的信号进行幅度离散,由于量化的影响,系统行为会出现饱和及平衡点附近的性能恶化两种现象,同时量化误差的存在必然导致系统不可能达到渐近稳定。这些问题在传统控制系统中广泛应用的一些方法在 NCSs 中不再适用,因此如何对现有的方法进行改造或者提出新的研究方法来分析 NCSs 的量化问题也有待研究。

第二,关于数据率的研究结果大部分只涉及稳定性的问题,然而在网络控制领域,对控制系统性能的研究也是非常必要的。由于控制系统的性能取决于通信网络和控制器的设计,研究数据率与控制性能的关系时,除了控制器和通信网络设计以外,如何建立一种高效易于实现的控制编码/解码和控制策略也具有重要的理论和实际意义。因此如何全面设计通信网络和控制器的设计需要进一步研究。

第三,针对一类资源有限的离散 NCSs,研究了使系统渐近稳定且具有最小二次性能指标的事件触发器和控制器的协同设计方法。根据量化特征和事件触发机制,使用具有缩放因子的动态量化器将系统建模为具有不确定参数的离散时间切换系统;基于分段 Lyapunov 函数和线性矩阵不等式,将性能指标的最优问题转化为线性矩阵不等式约束的优化问题,并给出了最优事件触发参数、控制器增益和量化器的参数调整范围。但是,进一步研究如何实现事件触发参数的自适应在线动态调整策略也是有待解决的问题之一。

7. 总结

本文针对网络量化反馈控制系统研究了基于量化的 NCSs 控制问题,主要介绍了近年来网络量化控制系统的研究进展。考虑到 NCSs 中存在的量化、带宽约束、时延、丢包以及系统未建模动态等主要问题,以网络控制的稳定性为基础,重点探讨了 NCSs 的建模、量化器设计、信道模型、鲁棒稳定性分析等问题。为近一步的深入研究奠定了理论基础,并且丰富了 NCSs 的研究内涵。

参考文献

- [1] Kalman, R.E. (1956) Nonlinear Aspects of Sampled-Data Control Systems. In: *Nonlinear Circuit Theory Symposium*, 273-313.
- [2] Delchamps, D.F. (1990) Stabilizing a Linear System with Quantized State Feedback. *IEEE Transactions on Automatic Control*, **35**, 916-924. <https://doi.org/10.1109/9.58500>
- [3] Brockett, R.W. and Liberzon, D. (2015) Quantized Feedback Stabilization of Linear Systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, **45**, 1279-1289. <https://doi.org/10.1109/9.867021>
- [4] Liberzon, D. (2003) Hybrid Feedback Stabilization of Systems with Quantized Signals. Pergamon Press, Vol. 39, 1543-1554.
- [5] Liberzon, D. and Nesic, D. (2005) Input-to-State Stabilization of Linear Systems with Quantized Feedback. *Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control*, Seville, 15 December 2005, 8197-8202. <https://doi.org/10.1109/CDC.2005.1583489>
- [6] Liberzon, D. and Nesic, D. (2007) Input-to-State Stabilization of Linear Systems with Quantized State Measurements. *IEEE Transactions on Automatic Control*, **52**, 767-781. <https://doi.org/10.1109/TAC.2007.895850>
- [7] Shannon, C.E. (1948) A Mathematical Theory of Communications. *Bell System Technical Journal*, **27**, 379-423. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x>
- [8] Oliver, B.M. and Pierce, J.R. (1948) The Philosophy of PCM. *Proceedings of the IRE*, **36**, 1324-1331. <https://doi.org/10.1109/JRPROC.1948.231941>

- [9] Bennett, W.R. (1948) Spectra of Quantized Signals. *Bell Labs Technical Journal*, **27**, 446-472. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01340.x>
- [10] Widrow, B., Kollar, I. and Liu, M.C. (1996) Statistical Theory of Quantization. *IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement*, **45**, 353-361. <https://doi.org/10.1109/19.492748>
- [11] Nair, G.N. and Evans, R.J. (2000) Stabilization with Data-Rate-Limited Feedback: Tightest Attainable Bounds. *Systems & Control Letters*, **41**, 49-56. [https://doi.org/10.1016/S0167-6911\(00\)00037-2](https://doi.org/10.1016/S0167-6911(00)00037-2)
- [12] Elia, N. and Mitter, S.K. (2002) Stabilization of Linear Systems with Limited Information. *IEEE Transactions on Automatic Control*, **46**, 1384-1400. <https://doi.org/10.1109/9.948466>
- [13] Fu, M. and Xie, L. (2005) The Sector Bound Approach to Quantized Feedback Control. *IEEE Transactions on Automatic Control*, **50**, 1698-1711. <https://doi.org/10.1109/TAC.2005.858689>
- [14] Gao, H. and Chen, T. (2008) A New Approach to Quantized Feedback Control Systems. *Automatica*, **44**, 534-542. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2007.06.015>
- [15] Åström, K.J. and Bo, B. (1999) Comparison of Periodic and Event Based Sampling for First Order Stochastic Systems. *IFAC Proceedings Volumes*, **32**, 5006-5011. [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)56852-4](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)56852-4)
- [16] 马巧利, 周川, 陈兰浪. 网络控制系统的事件触发与量化控制协同设计[J]. 系统工程与电子技术, 2016, 38(3): 652-657.
- [17] 王权, 邹媛媛, 牛玉刚. 带有量化的事件触发预测控制[J]. 华东理工大学学报(自然科学版), 2016, 42(2): 240-246.
- [18] Ramirez, J.R. and Sugimoto, K.J. (2017) Event-Triggered Dynamic Quantizers for Networked Control Systems. *IFAC PapersOnLine*, **50**, 5190-5195. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.450>
- [19] Rago, C., Willett, P. and Barshalom, Y. (1996) Censoring Sensors: A Low-Communication-Rate Scheme for Distributed Detection. *IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems*, **32**, 554-568. <https://doi.org/10.1109/7.489500>
- [20] Xu, Y. and Qi, H. (2004) Distributed Computing Paradigms for Collaborative Signal and Information Processing in Sensor Networks. *Journal of Parallel & Distributed Computing*, **64**, 945-959. <https://doi.org/10.1016/j.jpdc.2004.04.002>
- [21] Bahceci, I., Al-Regib, G. and Altunbasak, Y. (2005) Parallel Distributed Detection for Wireless Sensor Networks: Performance Analysis and Design. *Global Telecommunications Conference*, St. Louis, 5. <https://doi.org/10.1109/GLOCOM.2005.1578097>
- [22] Makarenko, A. and Durrant-Whyte, H. (2006) Decentralized Bayesian Algorithms for Active Sensor Networks. *Information Fusion*, **7**, 418-433. <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2005.09.010>
- [23] Niu, R., Varshney, P.K. and Cheng, Q. (2006) Distributed Detection in a Large Wireless Sensor Network. *Information Fusion*, **7**, 380-394. <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2005.06.003>
- [24] Shorey, R., Ananda, A., Chan, M. and Ooi, W. (2006) Mobile, Wireless, and Sensor Networks: Technology, Applications, and Future Directions. IEEE Press, Wiley-Interscience, Hoboken.
- [25] Cheng, V.W. and Wang, T.Y. (2010) Performance Analysis of Distributed Decision Fusion Using a Censoring Scheme in Wireless Sensor Networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, **59**, 2845-2851. <https://doi.org/10.1109/TVT.2010.2047738>
- [26] Wang, T.Y. and Wu, J.Y. (2012) Does More Transmitting Sensors Always Mean Better Decision Fusion in Censoring Sensor Networks with an Unknown Size. *IEEE Transactions on Communications*, **60**, 2313-2325. <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2012.060112.110078>
- [27] 刘守军, 刘克中, 陈伟. 莱斯衰落信道下的筛选传感器网络决策融合[J]. 北京邮电大学学报, 2015, 38(5): 81-85.
- [28] Bennett, W.R. (1948) Spectra of Quantized Signals. *Bell Labs Technical Journal*, **27**, 446-472. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01340.x>
- [29] Jiang, S. and Fang, H. (2013) H^∞ Static Output Feedback Control for Nonlinear Networked Control Systems with Time Delays and Packet Dropouts. *Isa Transactions*, **52**, 215-222. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2012.10.006>
- [30] Wang, W., Zhong, S., Nguang, S.K. and Liu, F. (2013) Novel Delay-Dependent Stability Criterion for Uncertain Genetic Regulatory Networks with Interval Time-Varying Delays. *Neurocomputing*, **121**, 170-178. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2013.04.034>
- [31] Du, B., Lam, J. and Shu, Z. (2010) Stabilization for State/Input Delay Systems via Static and Integral Output Feedback. *Automatica*, **46**, 2000-2007. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2010.08.005>
- [32] 朱其新, 胡寿松, 侯霞. 长时滞网络控制系统的随机稳定性研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2003, 33(3): 368-371.
- [33] 党向东, 张庆灵. 时变时延多包传输网络控制系统的稳定性[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2009, 13(S1): 158-163.

- [34] 于宝琦, 王军义, 王燕锋. 长时延和丢包的神经网络控制系统保性能控制[J]. 控制工程, 2013, 20(1): 7-10.
- [35] Chen, H., Gao, J., Shi, T. and Lu, R. (2016) H^∞ Control for Networked Control Systems with Time Delay, Data Packet Dropout and Disorder. *Neurocomputing*, **179**, 211-218. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2015.11.092>
- [36] 宋娟. 具有时变时延的网络控制系统的量化控制[J]. 航天控制, 2017(5): 15-18.
- [37] Yang, F. and Han, Q.L. (2013) H^∞ Control for Networked Systems with Multiple Packet Dropouts. *Information Sciences*, **252**, 106-117. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2013.06.043>
- [38] Zhang, J., Lam, J. and Xia, Y. (2014) Output Feedback Delay Compensation Control for Networked Control Systems with Random Delays. *Information Sciences*, **265**, 154-166. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2013.12.021>
- [39] Yang, F., Wang, Z., Hung, Y.S. and Gani, M. (2006) H^∞ Control for Networked Systems with Random Communication Delays. *IEEE Transactions on Automatic Control*, **51**, 511-518. <https://doi.org/10.1109/TAC.2005.864207>
- [40] Min, K.S., Jin, B.P., Joo, Y.H. and Jin, K.K. (2009) State Feedback Fuzzy-Model-Based Control for Discrete-Time Markovian Jump Nonlinear Systems with Time-Varying Delays. *IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, Jeju Island, 2105-2108.
- [41] 温丹丽, 刘春雨, 曹晟熙. 具有随机时延和信号量化的 H^∞ 控制[J]. 控制工程, 2017, 24(4): 775-780.
- [42] 周颖, 郑凤, 何磊. 具有时变时延和丢包的神经网络 H^∞ 控制[J]. 计算机技术与发展, 2017, 27(5): 164-169.
- [43] Li, K. and Baillieul, J. (2004) Robust Quantization for Digital Finite Communication Bandwidth (DFCB) Control. *IEEE Transactions on Automatic Control*, **49**, 1573-1584. <https://doi.org/10.1109/TAC.2004.834106>
- [44] Li, K. and Baillieul, J. (2004) Robust Quantization and Coding for Multidimensional Linear Systems under Data Rate Constraints. *Decision and Control*, Shenyang, 14-17 December 2004, 1920-1925.
- [45] Ling, Q. and Lemmon, M.D. (2004) Stability of Quantized Linear Systems with Bounded Noise under Dynamic Bit Assignment. *IEEE Conference on Decision and Control*, Nassau, 14-17 December 2004, 1454-1459.
- [46] Liberzon, D. (2004) Stabilizing a Nonlinear System with Limited Information. *International Symposium on Control, Communications and Signal Processing*, Hammamet, 21-24 March 2004, 7-9. <https://doi.org/10.1109/ISCCSP.2004.1296205>
- [47] Liberzon, D. and Hespanha, J.P. (2005) Stabilization of Nonlinear Systems with Limited Information Feedback. *IEEE Transactions on Automatic Control*, **50**, 910-915. <https://doi.org/10.1109/TAC.2005.849258>
- [48] Nair, G.N., Evans, R.J., Mareels, I.M.Y. and Moran, W. (2004) Topological Feedback Entropy and Nonlinear Stabilization. *IEEE Transactions on Automatic Control*, **49**, 1585-1597. <https://doi.org/10.1109/TAC.2004.834105>
- [49] Persis, C.D. (2005) N-Bit Stabilization of N-Dimensional Nonlinear Systems in Feedforward Form. *IEEE Transactions on Automatic Control*, **50**, 299-311. <https://doi.org/10.1109/TAC.2005.843847>
- [50] Lemmon, M.D. (2010) Asymptotic Stabilization of Dynamically Quantized Nonlinear Systems in Feedforward Form. *Control Theory and Technology*, **8**, 27-33.
- [51] Ling, Q., Lemmon, M.D. and Lin, H. (2009) Stabilize an N-Dimensional Quantized Nonlinear Feedforward System with 1 Bit. *Decision and Control*, Shanghai, 15-18 December 2009, 1986-1991. <https://doi.org/10.1109/CDC.2009.5400795>
- [52] Jiang, X. and Han, Q.L. (2006) Delay-Dependent Robust Stability for Uncertain Linear Systems with Interval Time-Varying Delay. *Automatica*, **42**, 1059-1065. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2006.02.019>
- [53] Tian, E. and Zhao, X. (2013) Robust H^∞ Control for Uncertain Networked Systems with Communication Constraints. *Journal of the Franklin Institute*, **350**, 1926-1943. <https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2013.02.010>
- [54] Hu, S., Zhang, Y., Yin, X. and Du, Z. (2013) T-S Fuzzy-Model-Based Robust Stabilization for a Class of Nonlinear Discrete-Time Networked Control Systems. *Nonlinear Analysis Hybrid Systems*, **8**, 69-82. <https://doi.org/10.1016/j.nahs.2012.11.001>
- [55] Chae, S., Nguang, S.K. and Wang, W. (2014) Robust H^∞ Fuzzy Control of Discrete Nonlinear Networked Control Systems: A SOS Approach. *Journal of the Franklin Institute*, **351**, 4065-4083. <https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2014.04.013>
- [56] Chae, S. and Nguang, S.K. (2014) SOS Based Robust H^∞ Fuzzy Dynamic Output Feedback Control of Nonlinear Networked Control Systems. *IEEE Transactions on Cybernetics*, **44**, 1204. <https://doi.org/10.1109/TCYB.2013.2281458>
- [57] 欧洋, 薛斌强, 董心壮, 高祯. 具有量化的网络不确定系统鲁棒预测控制研究[J]. 青岛大学学报:工程技术版, 2017, 32(3): 31-38.
- [58] Zhang, C., Wang, X., Luo, C., Li, J. and Wang, C. (2018) Robust Outer Synchronization between Two Nonlinear Complex Networks with Parametric Disturbances and Mixed Time-Varying Delays. *Physica A Statistical Mechanics & Its Applications*, **494**, 251-264. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2017.12.047>

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2325-677X，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

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

期刊邮箱：dsc@hanspub.org