

网络控制系统研究进展

孙业国, 秦世引

北京航空航天大学自动化与电气工程学院, 北京 100191

摘要 对网络控制系统领域的主要研究成果和将来可能遇到的挑战进行阐述。网络控制系统主要分为网络控制、基于网络的控制和多智能体系统 3 个研究领域。网络控制是针对网络自身的控制, 主要是对通信网络的网络路由、网络流量等的调度与控制; 基于网络的控制是对被控系统的控制, 网络只是作为一种传输通道, 研究时考虑网络自身存在的问题对系统的影响, 对整个闭环系统进行建模、性能分析以及控制器的设计等; 多智能体系统主要是研究网络的拓扑结构和多智能体之间相互作用对整个系统行为的影响。本文主要针对基于网络的控制系统中的时延、丢包、多包传输问题, 介绍近年来网络控制系统分析与综合方面的研究成果和最新进展。最后, 论述了网络控制系统研究中尚待解决的问题, 展望了网络控制系统未来的发展前景。

关键词 网络控制系统; 网络时延; 网络丢包; 单包传输; 多包传输

中图分类号 TP273

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2010)02-0109-07

Progress of Networked Control Systems

SUN Yeguo, QIN Shiyin

School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China

Abstract The paper reviews the major contributions and the possible future challenges in the emerging area of Networked Control Systems (NCSs). Activities in this field can be categorized as the control of networks, the control over networks, and the multi-agent system. The control of networks is mainly concerned with providing a certain level of performance to a network data flow, to efficiently use network resources. The control over networks deals with the design of feedback strategies for control systems in which control data are exchanged through unreliable communication links. The multi-agent system deals with the study of how the network architecture and the interactions between network components influence the global control goal. More precisely, the problem here is to understand how the local laws describing the behavior of the individual agents influence the global behavior of the networked system. Focusing on network delays, network packet dropout, and multiple-packet transmission in the area of control over networks, this paper reviews the research achievements and advances of analysis and synthesis in NCS. The problems in NCS and the future directions in NCS are pointed out.

Keywords networked control systems; network delay; network packet dropout; single-packet transmission; multiple-packet transmission

0 引言

随着计算机技术、网络通信技术和控制科学的日益发展与交叉渗透, 控制系统的结构变得越来越复杂, 空间分布越来越广, 对系统控制性能的要求也越来越高。控制系统已由封闭集中体系逐渐向开放分布式体系发展。集中式控制系统和集散式控制系统都有一些共同的缺点, 即随着现场设备的增加, 系统的布线十分复杂, 成本大大提高, 抗干扰性较差、灵活性不够、扩展不方便等。为了从根本上解决这些问题, 必

须采用分布式控制系统来取代独立控制系统。分布式控制系统将控制功能下放到现场节点, 不需要中央控制单元集中控制和操作, 而是通过智能现场设备来完成控制和通信任务。将计算机网络系统应用于控制系统中代替传统的点对点式的连线, 使得众多的传感器、执行器和控制器等主要功能部件通过网络相连接, 相关的信号和数据通过通信网络进行传输和交换, 避免了彼此间专线的敷设, 可有效减少系统的重量和体积, 方便系统的安装与维护, 提高系统的诊断能力, 并

收稿日期: 2009-12-07

基金项目: 国家自然科学基金项目 (60875072)

作者简介: 孙业国, 博士研究生, 研究方向为网络控制, 电子信箱: yeguosun@asee.buaa.edu.cn; 秦世引 (通信作者), 教授, 研究方向为图像处理与模式识别、大规模复杂系统、多机器人混杂系统, 电子信箱: qsy@buaa.edu.cn

可实现资源共享、远程操作和控制。这种传感器、控制器、执行器等通过实时网络构成的闭环反馈控制系统称为网络控制系统,是目前控制科学与飞速发展的计算机网络、通信技术相结合的产物。

关于网络控制系统的研究可以追溯到 20 世纪中后期, Ray 等^[1-3]对集成通信控制系统(Integrated Communication and Control Systems, ICCS)做了大量的早期研究工作, ICCS 可以看作是现在网络控制系统的雏形。网络控制系统(Networked Control Systems, NCS)最早出现于 Walsh^[4]的论著中,当时只是用图示方法说明了网络控制系统的结构,未给出明确的定义。顾洪军等^[5]给出了如下的定义:利用通信网络实现地域上分布的现场传感器、控制器及执行器之间的信息相互交换,以达到被控对象的实时反馈控制,这样的一类控制系统称为网络控制系统。NCS 强调在通信网络上建立闭环控制回路,因此 NCS 中的网络是一个广义的范畴,包括现场总线、工业以太网、无线通信网络,甚至因特网。NCS 最主要的结构特点是系统的反馈通过网络构成闭环,其一般结构如图 1 所示。

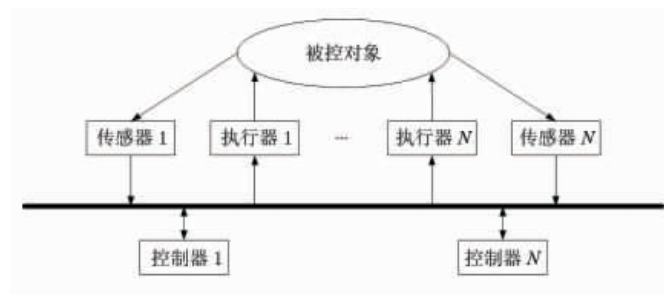


图 1 网络控制系统的一般结构

Fig. 1 General networked control system architecture

NCS 通常有两种理解:①网络控制(Control of Network),指对网络路由、网络数据流量等的调度与控制^[6],这是对网络自身的控制,可以利用运筹学和控制理论等方法来实现;②通过网络传输信息的控制系统(Control through Network),指控制系统各节点(传感器、控制器和执行器)之间的数据通过网络来传输,系统为分布式控制系统,通过建立数学模型,用控制理论等方法进行研究^[7-11]。这两种系统都离不开控制和网络,只是侧重点不同。近 10 年来,网络控制问题受到国际控制理论界和计算机科学界的广泛关注。目前,很多复杂的控制系统如无线网络机器人、运输工具、远程遥控操作、基于 Internet 的远程教学和实验、远程医疗、制造业设备、兵器系统,以及现场总线(Fieldbus)和工业以太网(Industrial Ethernet)技术等^[12-16],本质上都可归结为基于网络的控制系统。此外, NCS 在航空航天领域以及复杂、危险的工业控制领域也具有广阔的应用前景。随着 NCS 在工业中广泛应用,已成为国际控制理论界的一个学术热点问题。IEEE、IFAC 系列刊和 *Automatica* 等相继出版了 NCS 研究方面的专刊。国内的《自动化学报》等期刊和重要的学术会议也有大量网络控制方面的研究

报告^[17-21],关于 NCS 方面的专著也很多^[22-26]。

在对 NCS 的研究中,涉及控制论、计算机科学、信息论、机械电子工程、软件工程、可靠性理论等多种学科领域。控制论、计算机科学和信息论是系统分析的理论基础;机械电子工程、软件工程和可靠性理论在工程现实中为设计方法提供指导。NCS 综合了数字通信技术、计算机技术、自动控制技术、网络通信技术和智能仪表等多种技术手段,从根本上突破了传统的“点对点”式信号控制的局限性,构成一种全分散、全数字化、智能、双向、互连、多变量、多接点通信与控制的实时反馈控制系统。NCS 的研究是一个多学科研究领域,其分析与设计不仅涉及控制理论中离散、连续及混合等所有分析方法和控制技术,还要考虑通信网络中的信息传输技术。NCS 的性能不仅依赖于控制算法,还依赖于对网络资源的调度。NCS 的研究目标为:①设计和应用通信协议以保证通信网络的服务质量;②设计先进的控制器以满足系统的性能指标。因此, NCS 的研究是复杂、富含挑战性的研究课题。

1 目前存在的问题

NCS 是通过网络形成的反馈控制系统。该类系统中,被控对象与控制器以及控制器与执行器之间是通过共享的通信网络相互连接的。这种网络化的控制模式具有信息资源共享、连接线路数少、易于扩展、易于维护、高效率、高可靠性及灵活性等优点,是未来控制系统的发展模式。尽管 NCS 与传统控制系统相比有许多优点,但由于网络的介入,信息在通信网络传输过程中出现一些不同的特点,因此在网络控制系统中存在一些不同于传统控制系统的基本问题,如节点的驱动方式、数据采样、网络诱导时延、单包及多包传输、数据包的丢失及时序错乱、网络调度等。

1.1 网络诱导时延

网络中的信息源很多,当系统的各个节点通过网络传输信息时,要分时共享网络通信通道。由于网络带宽有限且网络中的数据流量变化不规则,当多个节点通过网络交换数据时,常会出现数据碰撞、多路径传输、连接中断、网络拥塞等现象,因而不可避免地出现信息交换时间延迟,这种由网络引起的时间延迟称为网络诱导时延(Network Induced Delay)^[27]。网络诱导时延由以下几部分组成:传感器节点采集数据及处理数据所花费的时间、传感器节点竞争发送权等待时间及传感器数据在网络中的传输时间、控制器节点计算控制量及处理数据所花费的时间、控制器节点竞争发送权等待时间及控制量在网络中的传输时间和执行器节点处理数据所花费的时间。其中,节点采集、计算、处理数据所花费的时间称为器件时延,取决于所采用的软、硬件,若采用的处理器速度足够快,可将其视为常数甚至忽略不计。节点竞争发送权等待的时间和数据包在网络中传输的时间称为网络时延,取决于网络自身的特点,如采用的介质访问协议、数据传输速率和数据包长度等。为研究方便,通常将器件时延和网络时延合并考虑,标记为传感器-控制器时延和控制器-执行器时延。受网络拓扑结

构、网络所采用的通信协议、路由算法、网络负载状况、网络传输速率和数据包大小等因素的影响,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。如以太网采用的是介质访问控制机制,节点发送信息之前,首先侦听网络是否空闲,若空闲,则立即发送信息,否则处于等待状态直至网络空闲再尝试发送。若多个节点同时侦听到网络空闲并同时发送信息时,信息发生“碰撞”,则网络立即停止发送信息,等待一个随机长度的时间段后再尝试重新传输信息,时延呈现随机时变的特性。在令牌网、令牌环网中,令牌在网络节点间依次传输,节点获得令牌时才能发送数据。节点等待发送所需要的时间由网络的节点数以及自身的优先级决定,一旦这些因素确定,节点等待发送数据的时间即可确定,因此在令牌网、令牌环网中,网络时延呈现固定的特征。总之,根据不同的网络协议,可将网络诱导时延建模为固定时延、随机时延和不确定时延^[28]。

1.2 数据包的丢失

在控制系统中引入网络用于数据传输后,除了不可避免地带来时延影响外,数据包的丢失(Packet Dropout,或称数据丢包)也可能时常发生。其原因主要有以下几点。

1) 网络节点偶尔发生通信故障。尽管现代芯片技术取得巨大而长足的进步,但作为网络节点的核心,微处理器不可能无时无刻保证能够正常工作,偶尔会发生故障;虽然一些保护措施(如软件狗技术)能够使发生故障的节点尽快恢复正常,使系统长期保持较可靠的工作状态,但故障不可能完全避免。当节点故障时,显然通信任务会失败,造成数据包丢失。

2) 频繁的通信冲突。在随机访问形式的网络中,冲突是无法避免的。发生冲突后,虽然多数网络通信协议(如TCP)可以实现冲突-重传机制,但信息重传都设置了时限,一旦超时则放弃此次通信任务,导致丢包。

3) 信道的干扰。网络信道是信息传递的桥梁,在实际系统中,外界的环境将不可避免地影响到信道中数据传输的质量。外界干扰造成物理信号错位、丢失等,使实际数据到达目的节点后失真。比较完善的通信协议均有检错或纠错机制,出错的数据包一般会被目的节点丢弃。同样,虽然很多通信协议中具备失败-重传机制,但这种机制也设置了时限,一旦超时则放弃此次通信任务,导致丢包。

另外,对于实时NCS而言,放弃旧的重传数据,利用新的数据可能更为有利。关于数据丢包的描述通常有3种方式:

① 采用统计方法,给出数据包的概率分布以及丢包比率;
② 给出2个采样时刻间的数据丢包总额;
③ 将数据包丢失发生的时段等效成数据传输通道连接的中断。第1种涉及的研究方法有随机系统理论、切换系统理论及稳定性理论等;第2种采用基于变时滞系统理论的分析方法;第3种将具有数据包丢失的网络控制系统等效为一个动态开关切换系统。在一定条件下,可以用切换系统理论分析NCS的特性。研究^[10,27]表明,一个稳定运行的NCS容许有一定数量的数据包

丢失,但数据包丢失率超过一定值时系统会失稳。因此,数据包丢失也是NCS分析与设计时不可忽略的重要因素之一。

1.3 单包传输与多包传输

网络控制系统中,传感器数据、控制量是以数据包的形式在网络中传输和交换的。在通信网络中,数据交换的数据帧大小是有约束的,不同的网络有其数据帧大小限制,超大的数据量必须分成许多小数据帧来传输。如Ethernet,每帧最大能够容纳1500个字节,凡小于1500个字节的传感器测量数据,均可将其封装成一个数据包发送出去。而对于CAN来说,每一帧最多只能容纳8个字节,凡超过8个字节的传感器测量数据,必须将其封装成多个数据包进行传输。因此,在NCS中,单包传输通常是指系统中传感器或控制器输出的数据被封装在一个数据包中进行传输;多包传输是指NCS中传感器或控制器输出的数据被封装在多个数据包中进行传输。系统是单包传输还是多包传输,取决于NCS所采用的控制网络的类型。例如,以太网的单个数据包容量大,通常是单包传输方式;CAN则由于其数据包所容纳数据量较小,通常是多包传输。另外,对于物理位置上分布的多输入多输出控制系统或由多个子系统耦合而成的大系统,其信息的获取和发送客观上仅能通过多个数据包传输来实现。传输方式不同,NCS的数学模型不同,具有的特性不同,系统分析与设计的复杂程度也不同。由于网络是分时复用的,同时产生的多个数据包不可能同时发送,也不可能同时到达目标节点,导致控制系统仅能利用部分对象信息计算控制量或利用部分控制量信息更新系统状态,给系统的建模、分析和设计带来新的问题。

2 时延网络控制系统研究方法

对于不同的NCS,其建模方法也不尽相同,各种建模方法都有其一定的优缺点。NCS的建模方法主要取决于网络传输特性和网络节点的工作方式,而控制器设计方法取决于具体的NCS模型。国内外很多学者在NCS的建模方面已经做了深入的研究。针对不同的网络传输特性和网络控制策略,NCS的建模及控制方法主要有以下几类。

2.1 基于确定性系统的建模及控制方法

在Luck等^[29]的研究中,传感器节点、控制器节点和执行器节点都采用时间驱动方式,通过时钟同步方式,使网络中所有节点都是等周期同步采样。然后分别在控制器节点和执行器节点的接收端设置消息缓冲(Message Buffers),并保证各自的缓冲长度比相应的网络延时大。通过采用缓冲的方法,将基于网络的闭环控制系统变为一个线性时不变离散控制系统,使NCS的设计问题转化为一般的数据采样控制问题;然后基于LQG(Linear Quadratic Gaussian)方法设计NCS的最优控制器。这种确定性系统设计方法的优点是其也能适用于网络时延长于一个采样周期的情况,能够应用已有的线性系统理论设计NCS;缺点是由于网络节点以时间驱动方式工作,人为地增加了网络延时,且还需在网络中实现各节点的

时钟同步,增加了系统设计的难度。

2.2 基于离散切换系统的建模及控制方法

Krotolica 等^[30]和 Xiao 等^[31]以离散系统方法研究 NCS,由于没有采用文献[29]中的排队缓冲策略,网络节点以时间驱动方式工作,网络延时为采样周期 T 的整数倍;假定网络时延满足 $\tau(k) \in (T, 2T, \dots, mT)$,且具有 Markov 随机分布特性。这种离散跳变线性系统的建模及控制方法,适用于时滞长于一个采样周期的 NCS,且由于该方法摒弃了排队缓冲策略,消除了网络延时中的等待延时。

2.3 基于变采样周期的网络化控制系统建模及控制方法

在 Walsh 等^[32]的研究中,为了消除控制器和执行器采用时间驱动方式时带来的人为时滞,控制器节点和执行器节点采用事件驱动方式,并假定网络传输速率足够快,采样时间和网络规划时间忽略不计,认为网络通信中只存在由于节点竞争而导致的节点访问延时,反馈信息的延时忽略不计。引入最大允许传递间隔(Maximum Allowable Transfer Interval)的概念,并在此基础上提出了保证系统稳定的网络传输调度算法:基于 Token-Ring 的静态节点规划和基于网络节点规划(Try Once Discard, TOD)的动态规划算法。TOD 是指每个网络智能节点将当前数据值和上次传送的数据值进行比较,计算权误差值,具有最大权误差值的节点获得网络的使用权,以尽可能减小网络负载。然后基于 Bellman-Gronwall 不等式和误差摄动理论,分别得到单包传输和多包传输条件下,NCS 指数稳定的充分条件。由于 Bellman-Gronwall 不等式的保守性,所得的结论十分保守,难以用于实际工程设计。Zhang 等^[33-34]采用类似的建模方法将这类网络控制建模为变采样周期控制系统(时变离散系统);为了减小结论的保守性,将网络对控制系统的影响视为系统扰动,基于误差摄动理论得到保守性较小的稳定性定理。

2.4 基于随机控制理论的建模及控制

对于具有随机干扰的 NCS,Nilsson 等^[35-36]采用基于随机最优控制理论的方法,研究时滞 τ 小于采样周期 T 的情况,将 NCS 转化为 LQG 问题,然后基于随机控制理论求解 NCS 的最优控制器。Hu 等^[37]进一步研究了时滞 τ 大于采样周期 T 的情况,并分别针对全部状态反馈和部分状态反馈给出使得系统指数均方稳定的控制器设计。

2.5 基于模型的网络化控制系统建模及控制

Montestruque 等^[38-40]基于对象模型研究 NCS,目的是通过使用对象模型信息减少网络通信负载,提高网络传输的实时性。以连续对象控制器为研究对象,考虑仅在传感器和控制器间存在网络通信的一类 NCS。此外,还进一步研究了输出反馈控制问题,以及网络时滞不可忽略时的控制问题,并取得了一些重要结论。

2.6 基于时滞理论的网络化控制系统建模及控制

Yu 等^[41]将 NCS 建模为时滞系统,进而运用时滞系统理论对 NCS 进行稳定性分析与控制器设计。对于连续时间系统,运用 Lyapunov-Razumikhin 函数方法;对于离散时间系统,运

用基于 Lyapunov-Krasovskii 的方法。Yue^[42]也将 NCS 建模为时滞系统,运用时滞系统理论与自由权矩阵方法对 NCS 进行稳定性分析与控制器设计。由于运用了自由权矩阵的方法,所得到的结果具有更小的保守性。文献[41]、[42]仅考虑了单通道 NCS(传感器到控制器之间存在网络),但现实的 NCS 往往是双通道的(传感器到控制器以及控制器到执行器都存在网络),文献[43]将双通道 NCS 建模为时滞系统,进而运用时滞系统理论进行稳定性分析与控制器设计。

2.7 基于鲁棒控制理论的网络化控制系统建模及控制

Goktas^[44]基于频域理论设计了 NCS 的鲁棒控制器,从控制器到执行器的时延 τ^c 和从传感器到控制器的时延 τ^s 可以被看成是同步施加的倍乘扰动,从而将不定延时问题转化为标准的 H_∞ 控制器设计问题。于之训等^[45]将鲁棒控制中的 H_∞ 和 μ 综合方法引入控制器设计中,针对转化后的系统设计了鲁棒控制器,该控制器对在一定范围内变化的时延都能保持稳定。鲁棒控制理论是针对实际工程中模型不确定性发展起来的,因此可以尝试用鲁棒控制器的设计方法来解决 NCS 中不确定性的问题。其优点在于不需要有关时延分布特性的先验知识。该法关键是要将时延环节转化为系统的一个不确定块,同时考虑被控对象本身的不确定性,然后针对转化后的系统设计鲁棒控制器,这样设计出的控制器能同时保证 NCS 的鲁棒稳定性和鲁棒性能指标,这里的性能指标是确定性的,而不是概率意义上的。

2.8 网络控制系统的其他研究方法

以上介绍的 NCS 研究方法是几种典型的研究方法,在国内还有很多其他的研究方法。如邱占芝等^[46]对基于广义系统的 NCS 进行了研究,熊远生等^[47]采用滑模预估控制方法,黄剑^[48]采用脉冲控制方法,田仲等^[49]基于预测的控制方法等。

3 丢包网络控制系统研究方法

数据包丢失是引起 NCS 性能下降、失稳的重要原因。丢包主要分为两种:一种是被动丢包,是由于网络链路故障以及传输错误等因素造成的;另一种是主动丢包,如传输节点在高负载时,为了使 NCS 能够正常运行或者为了保证控制系统仍然具有期望的性能而主动丢弃一些数据包等。在对 NCS 的传输延时问题的研究取得一系列成果的同时,越来越多的专家学者关注、研究数据包丢失问题,并取得了令人瞩目的成果。主要代表性控制策略和方法如下。

3.1 基于异步动态系统理论的丢包 NCS 控制

Zhang^[33]针对网络传输丢包的情况,将丢包 NCS 建模成一个有事件率约束的异步动态系统,应用异步动态系统理论分析了丢包 NCS 指数稳定性问题。这类异步动态系统模型可看成是一种特殊的切换系统模型。但它仅考虑了传感器和控制器之间存在网络连接的情况,而在实际 NCS 中,传感器与控制器以及控制器与执行器之间同时存在网络连接,这种情况更加复杂,需要进一步研究。

针对这一点,Sun 等^[50]建立了双边网络闭环控制系统模

型,给出了保证系统指数稳定性的信号传输成功率的范围,解决了在保证系统稳定前提下允许多大程度数据包丢失的问题;基于异步动态系统理论对具有双边网络的闭环系统进行多包传输建模,并进一步提出了判定 NCS 指数稳定性的充分条件。

Zhang 和 Sun 等只考虑了系统为状态反馈的情况,而在实际系统中还存在输出反馈的情况。针对这点,刘振安等^[51]在 Zhang 的基础上,利用异步动态理论对具有输出反馈的 NCS 进行了稳定性分析。

上述研究者只对 NCS 进行了稳定性分析,然而仅分析系统的稳定性是不够的,还要考虑如何设计控制器来保证系统在丢包情况下的性能。

3.2 基于切换系统理论的丢包 NCS 控制

Yu 等^[52]将丢包 NCS 建模为切换系统,运用切换系统理论提出丢包 NCS 的稳定性分析以及状态反馈控制器的设计方法;进一步考虑静态输出反馈控制稳定性问题,并提出静态反馈控制器的设计方法。

然而,Yu 等只考虑传感器到控制器之间存在网络的情况,而实际上传感器到控制器、控制器到执行器都存在网络。Xiong 等^[53]考虑传感器到控制器、控制器到执行器都存在网络的丢包 NCS,并针对有界任意丢包和 Markov 丢包 2 种丢包过程,分别给出稳定性分析和控制器设计。

3.3 基于 Markov 跳变系统理论丢包 NCS 控制

实际 NCS 中,网络时延和数据包丢失往往是一个随机事件,因此一部分研究者从随机控制领域对 NCS 进行研究。Ling 等^[54]将丢包过程建模为一个 Markov 过程,从而将 NCS 转化为一个 Markov 跳变系统;导出 NCS 的系性能与丢包过程之间的关系,基于 Markov 链的状态转移矩阵计算出系统输出的能量;最后,对于给定的平均丢包率,优化系统的输出能量。Seiler 等^[55]将 NCS 描述为一个 Markov 跳变系统,并给出闭环系统的均方稳定性分析和动态输出反馈控制器的设计。Sadjiadi^[56]假定所有的传感器、执行器和控制器都通过通信网络连接在一起,仅考虑了由于网络拥塞策略带来的网络丢包对系统稳定性的影响,将无干扰的 NCS 转化为一 Markov 跳变系统,最后将系统的均方稳定性条件归结为一系列 LMI 可行解问题。

4 多包传输网络控制系统的研究方法

针对 NCS 多包传输问题,国内外许多学者做了相关研究。文献[34]将 NCS 建模为混杂系统,特别针对多包传输情形,基于异步动态系统(Asynchronous Dynamic System,ADS)理论得到多包传输 NCS 的稳定性判据。文献[57]研究了一类只考虑数据包丢失的连续多包传输 NCS 的模型及其状态反馈控制器设计问题。文献[58]、[59]利用与文献[34]相似方法分别研究了考虑时延和节点采样时间差的多包传输 NCS 的建模与稳定性分析问题。文献[60]将文献[34]中 2 个数据包传输情况推广到多个数据包传输情形,并给出相关证明。文献[61]

将多包传输 NCS 建模成具有一定切换规则的线性切换系统。利用切换系统稳定性理论和鲁棒稳定性理论,针对网络诱导短时延为常数和随机两种情形,得到较为简明的多包 NCS 渐近稳定判据,并给出周期动态输出反馈镇定控制器的设计方法。

5 网络控制系统的未来研究方向与前景

NCS 作为一种新的研究课题,从提出至今已经取得了一定的成果,但还有许多问题需要进一步研究和解决。首先,NCS 以网络为基础,网络的性能直接影响 NCS 的应用,如网络延时、网络拥塞、误码和丢包等;各种通信协议没有统一,与广泛采用的 TCP/IP 协议不兼容,其间需要复杂的转换。另外,作为一种控制系统,控制性能同样非常重要,现有的 NCS 模型和控制技术有其各自的优点,但一般只适用于特定的网络类型和控制对象。部分方法采用一些理想假设,在实际应用中遇到很多问题。如何实现对基于网络的非线性动态系统建模和控制,分析网络时延随机分布特性对控制系统性能的影响等是今后研究的重点;NCS 和 Internet 实现信息和控制的无缝集成,还需进一步深入研究;安全机制及防范技术还不成熟,有待进一步完善。

总之,无论是从控制策略的设计还是从网络资源的调度来看,NCS 的研究还远远不够,理论研究的进展仍然不能与技术应用现状和迫切需求相适应。针对 NCS 的特点,进一步探索适合 NCS 的研究方法和技术是基于网络的控制系统理论研究方向之一。NCS 存在的问题为今后控制领域的发展提供了新的机遇与挑战。NCS 是综合了网络和通信技术发展起来的,因而相关技术的发展也将是今后研究的重点,如网络的体系结构、通信协议、网络调度、传输延迟,网络的实时性、安全性、操作性等。

6 结论

本文首先介绍了网络控制系统的研究背景,并分别对网络控制系统中由于网络的介入而引发的一些基本问题:网络诱导时延、数据包的丢失、单包传输与多包传输等进行了总结与阐述。介绍了近年来网络控制系统分析与设计方面的研究成果和最新进展,论述了网络控制系统研究中尚待解决的问题,展望了网络控制系统的未来发展前景。

参考文献 (References)

- [1] Halevi Y, Ray A. Integrated communication and control systems. Part I – Analysis [J]. *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Transactions ASME*, 1988, 110: 367–373.
- [2] Ray A, Halevi Y. Integrated communication and control systems. Part II – Design considerations [J]. *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Transactions ASME*, 1988, 110: 374–381.
- [3] Liou L W, Ray A. Integrated communication and control systems. Part III – Nonidentical sensor and controller sampling [J]. *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Transactions ASME*, 1990, 112:

- 357–364.
- [4] Walsh G C, Ye H, Bushnell L. Stability analysis of networked control systems [C]//Proceedings of the American Control Conference, San Diego, CA, 1999.
- [5] 顾红军, 张佐, 吴秋峰. 网络控制系统的实时特性分析及数据传输技术[J]. 计算机工程与应用, 2001, 37(6): 38–40.
Gu Hongjun, Zhang Zuo, Wu Qiufeng. *Computer Engineering and Applications*, 2001, 37(6): 38–40.
- [6] Hong S H, Kim W H. Bandwidth allocation scheme in CAN protocol[J]. *IEEE Proceedings: Control Theory and Applications*, 2000, 147 (1): 37–44.
- [7] Liu X, Goldsmith A. Wireless medium access control in networked control systems[C]//Proceedings of the American Control Conference, Massachusetts, USA, 2004: 3605–3610.
- [8] Ye H, Walsh G C, Bushnell L. Wireless local area networks in the manufacturing industry [C]//proceedings of the American Control Conference, Illinois, USA, 2000: 2363–2367.
- [9] Eker J, Cervin A, Horjel A. Distributed wireless control using bluetooth [C]//Proceedings of IFAC Conference on New Technologies for Computer Control, Hong Kong, 2001.
- [10] 王岩, 孙增圻. 网络控制系统分析与设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.
Wang Yan, Sun Zengqi. Analysis and design for networked control systems[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009.
- [11] Montestruque L A, Antsaklis P. Stability of model-based networked control systems with time-varying transmission times [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2004, 49(9): 1562–1572.
- [12] Yang S H, Chen X, Alty J L. Design issues and implementation of Internet-based process control systems[J]. *Control Engineering Practice*, 2003, 11(6): 709–720.
- [13] Jamahl W O, Anthony T. An internet-based real-time control engineering laboratory[J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 1999, 19(5): 320–336.
- [14] 王庆鹏, 谈大龙, 陈宁. 基于 Internet 的机器人控制中的网络延时测试及分析[J]. 机器人, 2001, 23(4): 316–321.
Wang Qingpeng, Tan Dalong, Chen Ning. *Robot*, 2001, 23(4): 316–321.
- [15] 彭刚, 黄心汉, 蒋毅. 网络延时和负荷变化对基于网络的遥操作机器人系统的影响和解决方法[J]. 计算机工程与应用, 2002, 11: 12–15.
Peng Gang, Huang Xinhan, Jiang Yi. *Computer Engineering and Applications*, 2002, 11: 12–15.
- [16] Yodyium T. Gain scheduling for networked control system [D]. Raleigh: Department of Electrical and Computer Engineering, North Carolina State University, 2003.
- [17] Murray R M, Astrom K J, Boyd S P, *et al.* Future directions in control in an information-rich world[J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2003, 23: 20–33.
- [18] Tipsuwan Y, Chow M Y. Control methodologies in networked control systems[J]. *Control Engineering Practice*, 2003, 11: 1099–1111.
- [19] Zhang W, Branicky M S, Phillips S M. Output feedback stabilization of networked control systems with packet dropouts [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2007, 52(2): 1705–1710.
- [20] Zhivoglyadov P V, Middleton R H. Networked control design for linear systems[J]. *Automatica*, 2003, 39: 743–750.
- [21] Huo Z H, Fang H J. Fault-tolerant control research for networked control system under communication constraints [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2006, 32: 659–666.
- [22] 王志良. 信息社会中的自动化新技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
Wang Zhiliang. New technologies for automation in the information society[M]. Beijing: China Machine Press, 2007.
- [23] 周祖德. 基于网络环境的智能控制[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.
Zhou Zude. Intelligent control based on network environment [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2004.
- [24] 汪小帆, 李翔, 陈关荣. 复杂网络理论及其应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
Wang Xiaofan, Li Xiang, Chen Guanrong. Complex network theory and its application[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006.
- [25] 郑文波. 网络控制技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.
Zheng Wenbo. Networked control technique [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2001.
- [26] 谢希仁. 计算机网络[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.
Xie Xiren. Computer network [M]. Beijing: Electronics Industry Press, 2003.
- [27] 张庆灵, 邱占芝. 网络控制系统[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
Zhang Qingling, Qiu Zhanzhi. Networked control systems [M]. Beijing: Science Press, 2007.
- [28] Hespanha J P, Naghshtabrizi P, Xu Y G. A survey of recent results in networked control systems [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2007, 95(1): 138–162.
- [29] Luck R, Ray A. An observer based compensation for distributed delays [J]. *Automatica*, 1990, 26(5): 903–908.
- [30] Krotolica R, Ozguner U, Chen H, *et al.* Stability of linear feedback system with random communication delays [J]. *International Journal of Control*, 1994, 59(4): 925–953.
- [31] Xiao L, Hassibi A, How J P. Control with Random Communication Delays via a discrete-time jump system approach[C]//Proceedings of the American Control Conference, Illinois, USA, 2000: 2199–2204.
- [32] Walsh G C, Ye H, Bushnell L. Stability analysis of networked control systems [J]. *IEEE Transaction on Control System Technology*, 2002, 10 (3): 438–446.
- [33] Zhang W. Stability analysis of networked control system [D]. Cleveland: Department of Electrical Engineering and Computer Science, Case Western Reserve University, 2001.
- [34] Zhang W, Branicky M S, Phillips S M. Stability of networked control systems[J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2001, 21(1): 84–99.
- [35] Nilsson J. Real time control systems with delays [D]. Lund: Department of Automatic Control, Lund Institute of Technology, 1998.
- [36] Nilsson J, Bernhardsson B, Wittenmark B. Stochastic analysis and control of real-time systems with random time delays [J]. *Automatica*, 1998, 34(1): 57–64.
- [37] Hu S S, Zhu Q X. Stochastic optimal control and analysis of stability of networked control systems with long delay[J]. *Automatica*, 2003, 39(11): 1877–1884.
- [38] Montestruque L A, Antsaklis P J. On the model-based control of networked systems[J]. *Automatica*, 2003, 39(9): 1837–1843.



- [39] Montestruque L A, Antsaklis P J. State and output feedback control in model-based networked control system[C]//Proceedings of IEEE Conference on decision and control, Las Vegas, Nevada, USA, 2002.
- [40] Montestruque L A, Antsaklis P J. Stability of model-based networked control systems with time-varying transmission times [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2004, 49(9): 1562-1572.
- [41] Yu M, Wang L, Chu T, *et al.* An LMI approach to networked control systems with data packet dropout and transmission delays continuous-time case[J]. *European Journal of Control*, 2005, 11: 40-49.
- [42] Yue D, Han Q L, Peng C. State feedback controller design for networked control systems[J]. *IEEE Trans Circ Sys*, 2004, 51(11): 640-644.
- [43] Naghshtabrizi P, Hespanha J. Designing observer-based controller for network control system[C]//Proceedings of IEEE Conference on Decision and Control, 2005, 4: 2876-2880.
- [44] Goktas F. Distributed control of systems over communication networks [D]. Philadelphia: Department of Computer and Information Science, University of Pennsylvania, 2000.
- [45] 于之训, 陈辉堂, 王月娟. 基于 H_∞ 和 μ 综合的闭环网络控制系统的设计[J]. *同济大学学报*, 2001, 29(3): 307-311.
Yu Zhixun, Chen Huitang, Wang Yuejuan. *Journal of Tongji University*, 2001, 29(3): 307-311.
- [46] 邱占芝, 张庆灵, 杨春雨. 基于广义系统的网络控制系统的分析与建模[J]. *东北大学学报*, 2005, 26(5): 409-412.
Qiu Zhanzhi, Zhang Qingling, Yang Chunyu. *Journal of Northeastern University*, 2005, 26(5): 409-412.
- [47] 熊远生, 俞立, 余世明. 网络控制系统的滑模多步预估控制 [J]. *控制理论与应用*, 2005, 22(2): 301-306.
Xiong Yuansheng, Yu Li, Yu Shiming. *Journal of Control Theory and Application*, 2005, 22(2): 301-306.
- [48] 黄剑. 网络化控制系统的建模、稳定与控制研究[D]. 武汉: 华中科技大学控制科学与工程系, 2005.
Huang Jian. Modeling, stability and control of networked control systems [D]. Wuhan: Department of Automation Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, 2005.
- [49] 田仲, 岳继光, 李永东. DMC 在网络控制系统中的应用[J]. *控制工程*, 2004, 11(2): 121-123.
Tian Zhong, Yue Jiguang, Li Yongdong. *Control Engineering*, 2004, 11(2): 121-123.
- [50] 孙海燕, 侯朝桢. 具有数据包丢失及多包传输的网络控制系统稳定性[J]. *控制与决策*, 2005, 20(5): 511-515.
Sun Haiyan, HouChaozhen. *Control and Decision*, 2005, 20(5): 511-515.
- [51] 刘振安, 葛愿. 基于数据包丢失的网络控制系统的稳定性分析[J]. *工业控制计算机*, 2005, 18(6): 11-12.
Liu Zhen'an, Ge Yuan. *Industrial Control Computer*, 2005, 18(6): 11-12.
- [52] Yu M, Wang L, Chu T G, *et al.* Stabilization of networked control systems with data packet dropout and networked delays via switching system approach [C]//Proceedings of IEEE Conference on Decision and Control, Paradise Island, Bahamas, December 14-17, 2004.
- [53] Xiong J L, Lam J. Stabilization of linear systems over networks with bounded packet loss[J]. *Automatica*, 2007, 43: 80-87.
- [54] Ling Q, Lemmon M D. Soft real-time scheduling of networked control systems with dropouts governed by a Markov chain [C]//Proceedings of the American Control Conference, 2003: 4845-4850.
- [55] Seiler P, Sengupta R. An approach to networked control[J]. *IEEE Trans Autom Control*, 2005, 50(3): 356-364.
- [56] Sadjadi A. Stability of networked control systems in the presence of packet losses [C]//Proceedings of IEEE Conference on Decision and Control, 2003, 1: 676-681.
- [57] Yu M, Wang L, Chu T G, *et al.* An LMI approach to networked control systems with data packet dropout and transmission delays[C]//Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control, 2004: 3545-3550.
- [58] Sun Z G, Li X, Zhu D S. Analysis of networked control systems with multi-packet transmission [C]//Proceedings of the World Congress on Intelligent Control and Automation, 2004, 1357-1360.
- [59] 杨业, 王永骥. 一类多包传输网络控制系统的设计及稳定性分析[J]. *信息与控制*, 2005, 34(2): 129-132.
Yang Ye, Wang Yongji. *Information and Control*, 2005, 34(2): 129-132.
- [60] 刘振安, 葛愿. 基于多包传输的网络控制系统的稳定性分析[J]. *计算机仿真*, 2006, 23(3): 92-94.
Liu Zhen'an, Ge Yuan. *Computer Simulation*, 2006, 23(3): 92-94.
- [61] 郑萌, 张庆灵, 宋敏, 等. 短时延多包传输网络控制系统的稳定性分析[J]. *信息与控制*, 2007, 36(3): 293-301.
Zheng Meng, Zhang Qingling, Song Min, *et al.* *Information and Control*, 2007, 36(3): 293-301.

(责任编辑 刘志远)

·学术动态·



“钙信号前沿 国际研讨会”征文

由中国生物物理学会、北京大学和美国生物物理学会主办的“钙信号前沿国际研讨会”将于2010年10月10-13日在北京举行。现征集相关内容的论文: Ca^{2+} and cell migration; TRP and other Ca^{2+} -permeable channels; Ca^{2+} signaling and secretion; Ca^{2+} signaling in neurons; Ca^{2+} signaling in cardaces; Skeletal and smooth muscl. 论文摘要截止日期: 2010年7月15日。

联系方式: 北京朝阳区大屯路15号中国生物物理学会(100101), 王悦; 电话: 010-64889894; 传真: 010-64889892; 电子信箱: wangyue@sun5.ibp.ac.cn。

