

网络控制系统的发展现状及展望

李洪波, 孙增圻, 孙富春

(清华大学 计算机科学与技术系, 北京 100084)

摘要: 探讨了网络控制系统存在的基本问题, 介绍了网络控制系统的代表性应用实例, 并从控制理论研究、网络调度协议研究以及兼顾二者的综合研究3个方面重点综述了网络控制系统的研究成果. 最后, 讨论并指出了这一领域下一步的发展方向和有待解决的新课题.

关键词: 网络控制系统; 控制理论; 调度协议; 时延; 丢包

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Networked control systems: an overview of state-of-the-art and the prospect in future research

LI Hong-bo, SUN Zeng-qi, SUN Fu-chun

(Department of Computer Science & Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: This paper presents a comprehensive overview of the state-of-the-art and the prospect of networked control systems(NCSs), including a brief summary of recent research achievements and applications of NCSs. Open topics in research of NCSs are also discussed, in order to spark new research interest in this field.

Key words: networked control systems(NCSs); control theory; scheduling protocol; time delay; packet dropout

1 引言(Introduction)

计算机技术和通信技术的飞速发展, 使网络应用在全球范围内日益普及, 并渗透到社会生活的各个领域. 在控制领域, 网络已逐渐进入人们的视野, 并引领控制系统的结构发生着变化. 通过公用或专用的通信网络来代替传统控制系统中的点对点结构已越来越普遍. 这种通过网络形成闭环的反馈控制系统称为网络控制系统(networked control systems, 简记为NCSs). 与传统点对点结构的控制系统相比, NCSs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^[1~6]. 若采用无线网络, NCSs还可以实现某些特殊用途的控制系统, 这是传统的点对点结构的控制系统所无法实现的. NCSs的诸多优点使其在远程医疗、智能交通、航空航天、制造过程以及国防等领域得到了日益广泛的应用.

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NCSs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NCSs的分析和设计. 为保证NCSs稳定并具有满意的控制性能, 必须深入研究NCSs并发展与其相适应的分析和设计理论.

近年来, NCSs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. 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 网络控制系统中的基本问题(Fundamental issues in NCSs)

NCSs是一个源于控制工程实践的新兴研究领域, 其系统结构较传统控制系统更为复杂. 本节将介绍NCSs中的基本问题和固有特性, 以加深对NCSs的理解和认识.

2.1 时延(Time delay)

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. 网络时延受网络协议、负载状况、网络传输速率以及数据包大小等

因素的综合影响,其数值变化可呈现随机、时变等特性.在NCSs的研究中,时延的数学描述主要采用以下3类模型:固定时延模型^[7,8]、具有上下界的随机时延模型^[9~11]以及符合某种概率分布的概率时延模型(如有限状态的Markov过程^[12~14]、Bernoulli分布^[15]等).

2.2 丢包(Packet dropout)

由于网络节点的缓冲区溢出、路由器拥塞、连接中断等原因,数据包在网络传输中会出现丢失现象;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、突发性等特点.在NCSs的研究中,丢包的数学描述主要有以下两种方法:

1) 确定性方法:该方法通常采用平均丢包率^[8,16]或最大连续丢包量^[17]来描述丢包;

2) 概率方法:该方法假设丢包满足某种概率分布,如有限状态的Markov过程^[17]、Bernoulli分布^[18,19]等,并采用相应的概率模型来描述丢包.

2.3 时序错乱(Packet out-of-order)

由于数据包传输路径不唯一、且不同路径的传输时延亦不尽相同(每条路径的传输时延由各自路径的当前负载状态、路由器队列长度等因素综合决定),数据包到达目的节点的时序可能发生错乱.数据包的时序错乱是随机性网络时延的衍生现象,因而时序错乱亦能恶化NCSs的控制性能甚至造成系统不稳定.

2.4 单包传输和多包传输(Single-packet & multiple-packet)

以数据包形式传输信息是NCSs有别于传统控制系统的重要特点之一.根据传输策略不同,NCSs的数据传输分为单包传输^[20]和多包传输^[21,22]两种情况.单包传输是指:传感器和控制将每次待发送信息封装成一个数据包进行传输.多包传输是指:传感器将每次待发送的采样信号封装成多个数据包进行传输,或者控制器将每次待发送的控制信号封装成多个数据包进行传输.NCSs之所以采用多包传输策略,一方面可能因为网络数据包的数据位太少,不能承载每次待发送的采样信号或控制信号;另一方面可能因为NCSs具有多个空间分布较广泛的传感器或执行器,必须采用分布传输方式.

此外,NCSs中的基本问题还包括量化效应、执行器饱和、变采样周期等问题.这些问题已在传统的点对点结构的控制系统中有所涉及并为人们所熟悉,这里不再赘述.

3 网络控制系统的研究现状(The overview of the current-state-of-the-art of NCSs)

NCSs研究的起源可以追溯到20世纪80年代后期Luck等人^[23]的工作.自此之后,NCSs的研究逐渐展开.1999年,Walsh^[24]提出了“networked control system”这一概念,很快被国内外学者所接受并沿用至今.IEEE汇刊于2001年、2004年和2007年相继出版了有关NCSs的专刊,这引起了国内外学者对NCSs的广泛关注,并掀起了NCSs的研究热潮.到目前为止,NCSs作为一个新兴的研究领域,已成为国内外学术界的前沿方向和研究热点,并取得了一系列研究成果.

3.1 面向控制理论的NCSs研究(Control-theory-oriented NCSs study)

根据研究思路的不同,面向控制理论的NCSs研究可分为被动分析方法和主动综合方法.

3.1.1 被动分析方法(Analysis-oriented method)

被动分析方法首先在不考虑网络情况下对控制器进行设计,然后进一步考虑网络影响来分析闭环NCSs的系统性能.

1) 网络摄动法.

网络摄动法最早由美国学者Walsh^[25]提出,其基本思想是:将网络对控制系统的影响视为系统摄动,在考虑摄动误差基础上建立NCSs的模型并分析闭环系统的稳定性,最终计算出保证NCSs稳定的最大允许传输间隔和最大允许时延上界.网络摄动法既可用于线性NCSs,又可用于非线性NCSs.然而,该方法通常假设网络仅存在于传感器和控制器之间,并且所得结果往往非常保守,最终导致该方法未被广泛采用.

2) Lyapunov-Krasovskii方法.

该方法的基本思想是:将具有时延和(或)丢包的NCSs表示为时滞系统,进而利用时滞系统理论中的Lyapunov-Krasovskii方法来分析系统的稳定性,从而确定保证NCSs稳定的网络条件.例如,Kim^[26]基于Lyapunov-Krasovskii方法给出了一种求取最大允许时延上界的方法.与网络摄动法相比,Lyapunov-Krasovskii方法具有较强的普适性(即网络同时存在于传感器和控制器之间以及控制器和执行器之间)和较低的保守性.

3) 其他方法.

除上述两类方法外,文献[27]利用Lyapunov第2方法分析了具有时延和丢包的NCSs的稳定性,并将NCSs的稳定条件归结为一组线性矩阵不等式

(linear matrix inequality, LMI). 文献[8]建立了NCSs的混杂模型, 分析了时延、丢包以及多包传输策略对系统稳定性的影响. 文献[28]提出了一类保证NCSs大范围一致渐近稳定的协议(uniformly globally asymptotically stable, UGAS), 并证明了如下特性: 在不考虑网络条件下设计保证系统“输入-状态稳定”(input-to-state stability, ISS)的控制器, 该控制器在使用UGAS后, 可以保证NCSs“半全局实用输入-状态稳定”(semiglobal practical input-to-state stability). 文献[29]针对多输入多输出NCSs, 研究了系统建模和稳定性分析问题.

3.1.2 主动设计方法(Synthesis-oriented method)

主动设计方法在考虑网络对NCSs影响基础上进行控制器设计, 进而讨论相应的建模、分析以及系统综合等问题. 显然, 与较被动分析方法相比, 主动设计方法在控制器设计以及系统分析过程中有效利用了网络信息, 所得分析结果的保守性更低, 所得控制策略也更为合理. 因此, 主动设计方法备受众多学者的青睐, 相关成果层出不穷.

1) 时延整形法.

时延整形法最早由Luck^[7]提出, 其基本思想是: 通过在数据接受端安装缓冲区, 使网络时延通过“整形”转化为常值时延, 从而将具有时变时延的NCSs简化为具有常值时延的NCSs. 显然, 该类方法大大简化了NCSs的分析和设计. 然而, 这类方法人为地扩大了时延, 所得结果往往具有一定的保守性. 因此, 时延整形法从1990年Luck提出后, 只有少数学者进行研究, 没有得到广泛的推广和应用.

2) 模型控制法.

模型控制法(model-based control)^[30~32]的基本思想是: 当被控对象的采样信号可获得时, 控制器利用采样信号来计算控制信号进而控制被控对象(此情形可被视为闭环控制); 当被控对象的采样信号不可获得时, 控制器则根据被控对象的模型信息和以往的采样信号来估计被控对象的状态, 利用估计的被控对象状态来计算控制信号进而控制被控对象(此情形可视为开环控制). 不难看出, 模型控制方法的本质是一种在开环控制和闭环控制之间进行切换的控制方法. 这类方法一般假设网络仅存在于传感器和控制器之间, 因而具有一定的局限性.

3) 随机控制方法.

随机控制方法假设时延或丢包服从某种分布, 然后将闭环NCSs建模成一个随机系统, 进而利用随机系统理论对NCSs进行研究. 其中有代表性的工作包括有关ICCS的早期工作^[23]、Nilsson^[33]和Hu^[34]提出的随机最优控制方法、Wu^[35]提出的随机镇定方

法、Yang^[15]提出的 H_∞ 控制方法和Huang^[36]提出的状态反馈控制方法.

4) Lyapunov-Krasovskii方法.

该方法的基本思想是: 将具有时延和(或)丢包的NCSs表示为时滞系统, 然后利用时滞系统理论中的Lyapunov-Krasovskii方法对闭环NCSs进行分析并给出控制器设计方法. 其中有代表性的工作包括Yue^[20]提出的状态反馈控制方法、Gao^[10]提出的 H_∞ 输出跟踪控制方法以及Jiang^[37]提出的 H_∞ 状态反馈镇定方法.

5) 切换控制方法.

切换控制方法的基本思想是: 将NCSs表示为切换系统, 然后利用切换系统的理论对闭环NCSs进行分析并给出控制器设计方法. 其中有代表性的工作包括Zhang^[16]提出的输出反馈镇定控制方法和Wang^[38]提出的 H_∞ 控制方法.

6) 预测控制方法.

预测控制的基本思想是: 控制器利用被控对象的模型信息和以往的采样信号来估计当前和将来的被控对象的状态信息或输出信息, 然后利用估计的信息来控制被控对象, 从而达到补偿时延和(或)丢包对NCSs的影响. 其中有代表性的工作包括Zhang^[8]和Chen^[39]提出的基于Smith预估器的控制方法、Liu^[40, 41]提出的网络化预测控制方法和Tang^[42]提出的变时域预测控制(variable-horizon predictive control)方法.

7) 模糊控制方法.

鉴于模糊逻辑控制在处理复杂、不确定系统具有独特的优越性, 很多学者将模糊逻辑控制应用于NCSs, 并取得了一系列研究成果. 其中有代表性的研究工作包括Jiang^[43]提出的模糊镇定控制方法和Zhang^[44]提出的模糊鲁棒 H_∞ 控制方法.

8) 其他控制算法.

除上述方法外, 还有一些其他控制方法, 如基于网络服务质量(quality of service, 简记为QoS)的增益调度控制方法^[45, 46]、基于遗传算法的远程控制器设计方法^[47]等. 但这些方法大都缺乏理论支持或尚未形成理论体系.

3.2 面向调度协议的研究(Scheduling-protocol-oriented NCSs study)

NCSs调度协议研究源于通信技术, 通过赋予数据包不同优先级来合理配置网络带宽, 从而保证NCSs所期望的网络QoS. 根据调度协议性质的不同, NCSs的调度协议研究可分为静态调度协议研究和动态调度协议研究.

1) 静态调度协议研究.

静态调度协议是指在完全已知调度任务全集及其约束信息情况下设计得到的调度协议. 其中有代表性的工作包括速率单调(rate monotonic, RM)算法^[48]及其改进算法^[49]. RM算法^[48]为每一个周期任务指定一个优先级, 该优先级按照任务周期的长短顺序排列, 任务周期越短, 优先级越高. Zhang^[49]提出了改进的RM算法, 并将其应用到NCSs中. 相关研究可参见文献[48~52]及其参考文献.

2) 动态调度协议研究.

在动态调度协议中, 调度任务全集及其约束信息并非完全已知. 动态调度协议需要根据调度任务信息来动态调整调度策略. 其中有代表性的工作包括EDF(earliest deadline first)算法^[53]和FCS(feedback control scheduling)调度算法^[54]. EDF算法将待发数据按其Deadline来分配优先级, 拥有最近截止期限的任务具有最高的优先级. FCS算法则将反馈控制理论与实时调度理论相结合, 通过构造基于反馈控制的调度体系结构来解决不可预测环境下的实时调度问题. 相关研究可参见文献[53,54]及其参考文献.

3.3 兼顾控制和网络的NCSs综合研究(Control and network co-design for NCSs)

近年来, 兼顾控制和网络的NCSs综合研究亦受到了研究者的广泛关注, 并取得了一定的研究成果. 美国学者Walsh^[55]提出了TOD/MEF(try-once-discard/maximum-error-first)介质访问控制策略, 并分析了采用TOD-MEF协议的NCSs的稳定性. TOD-MEF协议的基本思想是: 当多个节点竞争网络拥有权时, 当前误差最大的节点优先传输数据, 而所有竞争失败的节点将丢弃本时刻未传数据包. Ye^[56]基于IEEE 802.11无线网标准提出了用于无线NCSs的优先级载波侦听多路存取/冲突避免(P-CSMA/CA)协议来确保数据的实时传输, 并进一步分析了采用P-CSMA/CA协议的NCSs的稳定性. 针对具有周期数据、偶发数据和信息数据混合传输的NCSs, Park^[57]提出了一种调度算法来合理分配网络带宽, 并根据最大允许时延上界这一参数来保证NCSs的稳定性.

3.4 NCSs的应用(The applications of NCSs)

目前, NCSs在远程医疗、制造过程、机器人以及国防等领域已得到日益广泛的应用. 下面重点回顾近年来具有代表性的NCSs应用实例.

1) 远程手术.

远程手术是NCSs在远程医疗领域的重要应用之一. 从2002年开始, 加拿大学者Anvari^[58]开始尝试通过IP/CPN网络进行机器人辅助的远程手术. 2003年

至2005年期间, Anvari等人成功完成了22例基于网络机器人的远程手术.

2) 基于网络的电机伺服控制.

众所周知, 直流电机被广泛应用于汽车、家用电器、工业控制等领域. 因而基于网络的直流电机控制引起了许多学者的关注和广泛研究. 例如, Chow^[45]采用增益调度控制方法完成了基于网络的直流电机速度伺服控制. Liu^[40]采用网络化预测控制方法完成了基于网络的直流电机位置伺服控制.

3) 基于网络的机器人遥操作.

NCSs的另一个典型应用是基于网络的机器人遥操作. Boukhifir^[59]对一个由双指微夹钳(two-fingered microgripper)构成的机器人进行了研究, 采用 H_∞ 控制方法完成了基于网络的机器人遥微操作(tele-micromanipulation). Chow^[46]对基于网络的轮式机器人进行研究, 采用增益调度控制方法对其进行遥操作, 使之跟踪预定轨迹.

除上述应用实例外, NCSs的应用还包括球体磁悬浮系统^[60]、液体位置控制系统等^[42]. 限于篇幅, 这里不再对其他NCSs应用实例进行一一列举.

4 结论(Conclusions)

通过近年来对NCSs本质问题的研究和对NCSs设计问题的探索, 学术界^[1,4,6]已经形成了基本共识: NCSs作为一个新兴的研究领域, 其研究仍处于发展阶段, 目前尚未形成一套完整的适合NCSs的理论体系. 随着控制技术和通信技术交叉、融合和发展的逐步深入, NCSs必将发挥越来越大的作用, 而以下问题则可能成为NCSs领域下一步研究的重点:

1) 继续深化兼顾控制和网络的NCSs综合研究. 这类研究综合考虑了网络和控制两方面因素, 使NCSs成为一个有机整体并具有更好的综合性能. 然而这类研究仍处于起步阶段, 有待进一步深入的研究和探讨.

2) 进一步增强NCSs分析方法和设计方法的普适性. 现有文献对线性NCSs的研究较多, 对非线性NCSs的研究较少; 对单包传输的NCSs研究较多, 对多包传输的NCSs研究较少; 对仅存在时延或仅存在丢包的NCSs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. 因此, NCSs分析和设计方法的普适性还有待进一步深入研究.

3) 到目前为止, NCSs更多的是作为一个理论课题进行研究. 将NCSs的理论研究与工程实践紧密结合以及将理论成果切实转化为有效的工程方法还需要深入研究和探索, 相关工作可谓任重而道远. 这一问题已成为我们现阶段的一个重要研究方向^[61~63].

参考文献(References):

- [1] ANTSAKLIS P, BAILLIEUL J. Guest editorial special issue on networked control systems[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2004, 49(9): 1421 – 1423.
- [2] ANTSAKLIS P, BAILLIEUL J. Special issue on technology of networked control systems[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2007, 95(1): 5 – 8.
- [3] BUSHNELL L G. Networks and control[J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2001, 21(1): 22 – 23.
- [4] 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.
- [5] TIPSUWAN Y, CHOW M Y. Control methodologies in networked control systems[J]. *Control Engineering Practice*, 2003, 11(10): 1099 – 1111.
- [6] YANG T C. Networked control system: a brief survey[J]. *IET Control Theory & Applications*, 2006, 153(4): 403 – 412.
- [7] LUCK R, RAY A. An observer-based compensator for distributed delays[J]. *Automatica*, 1990, 26(5): 903 – 908.
- [8] ZHANG W, BRANICKY M S, PHILLIPS S M. Stability of networked control systems[J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2001, 21(1): 84 – 99.
- [9] GAO H J, CHEN T W. New results on stability of discrete-time systems with time-varying state delay[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2007, 52(2): 328 – 334.
- [10] GAO H J, CHEN T W. Network-based H_∞ output tracking control[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2008, 53(3): 655 – 667.
- [11] GAO H J, MENG X Y, CHEN T W. Stabilization of networked control systems with a new delay characterization[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2008, 53(9): 2142 – 2148.
- [12] 谢林柏, 方华京, 纪志成, 等. 时延网络化控制系统的 H_2/H_∞ 混合控制[J]. 控制理论与应用, 2004, 21(6): 1020 – 1024.
(XIE Linbo, FANG Huajing, JI Zhicheng, et al. Mixed H_2/H_∞ control of networked control systems with delay[J]. *Control Theory & Applications*, 2004, 21(6): 1020 – 1024.)
- [13] 于之训, 陈辉堂, 王月娟. 基于Markov延迟特性的闭环网络控制系统研究[J]. 控制理论与应用, 2002, 19(2): 263 – 267.
(YU Zhixun, CHEN Huitang, WANG Yuejuan. Research on Markov delay characteristic-based closed loop network control system[J]. *Control Theory & Applications*, 2002, 19(2): 263 – 267.)
- [14] ZHANG L, SHI Y, CHEN T, et al. A new method for stabilization of networked control systems with random delays[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2005, 50(8): 1177 – 1181.
- [15] YANG F W, WANG Z D, HO D W, et al. Robust H_2/H_∞ control with missing measurements and time delays[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2007, 52(9): 1666 – 1672.
- [16] ZHANG W A, YU L. Output feedback stabilization of networked control systems with packet dropouts[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2007, 52(9): 1705 – 1710.
- [17] XIONG J L, LAM J. Stabilization of linear systems over networks with bounded packet loss[J]. *Automatica*, 2007, 43(1): 80 – 87.
- [18] 王武, 詹耀清, 杨富文. 一类网络控制系统的 H_2 方法[J]. 自动化学报, 2008, 34(2): 219 – 224.
(WANG Wu, ZHAN Yaoqing, YANG Fuwen. An H_2 approach to networked control system[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2008, 34(2): 219 – 224.)
- [19] WANG Z D, HO D W, LIU X H. Variance-constrained filtering for uncertain stochastic systems with missing measurements[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2003, 48(7): 1254 – 1258.
- [20] YUE D, HAN Q L, PENG C. State feedback controller design of networked control systems[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II*, 2004, 51(11): 640 – 644.
- [21] HU S, YAN W Y. Stability of networked control systems under a multiple-packet transmission policy[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2008, 53(7): 1706 – 1711.
- [22] POLUSHIN L, MARQUEZ H J, TAYEBI A, et al. A multichannel small gain theorem for systems with multiple time-varying communication delays[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2009, 54(2): 404 – 409.
- [23] YORAM H, ASOK R. Integrated communication and control systems: part i-analysis[J]. *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, 1988, 110(4): 367 – 373.
- [24] WALSH G C, YE H, BUSHNELL L. Stability analysis of networked control systems[C] // *Proceedings of the American Control Conference*. San Diego, CA, USA: IEEE, 1999: 2876 – 2880.
- [25] WALSH G C, BELDIMAN O, BUSHNELL L. Asymptotic behavior of nonlinear networked control systems[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2001, 46(7): 1093 – 1097.
- [26] KIM D S, LEE Y S, KWON W H, et al. Maximum allowable delay bounds of networked control systems[J]. *Control Engineering Practice*, 2003, 11(11): 1301 – 1313.
- [27] GARCA-RÍVERA M, BARREIRO A. Analysis of networked control systems with drops and variable delays[J]. *Automatica*, 2007, 43(12): 2054 – 2059.
- [28] NEŠIĆ D, TEEL A R. Input-to-state stability of networked control systems[J]. *Automatica*, 2004, 40(12): 2121 – 2128.
- [29] 樊卫华, 蔡骅, 周川, 等. MIMO网络控制系统的建模与分析[J]. 控制理论与应用, 2005, 22(3): 487 – 490.
(FAN Weihua, CAI Hua, ZHOU Chuan, et al. Modeling and analysis of MIMO networked control systems[J]. *Control Theory & Applications*, 2005, 22(3): 487 – 490.)
- [30] MONTESTRUQUE L A, ANTSAKLIS P J. On the model-based control of networked systems[J]. *Automatica*, 2003, 39(10): 1837 – 1843.
- [31] 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.
- [32] ZHIVOGLYADOV P V, MIDDLETON R H. Networked control design for linear systems[J]. *Automatica*, 2003, 39(4): 743 – 750.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] WU J, CHEN T W. Design of networked control systems with packet dropouts[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2007, 52(7): 1314 – 1319.
- [36] HUANG D, NGUANG S K. State feedback control of uncertain networked control systems with random time delays[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2008, 53(3): 829 – 834.
- [37] JIANG X F, HAN Q L, LIU S R, et al. A new H_∞ stabilization criterion for networked control systems[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2008, 53(4): 1025 – 1032.
- [38] WANG Y L, YANG G H. H_∞ control of networked control systems with time delay and packet disordering[J]. *IET Control Theory & Applications*, 2007, 1(5): 1344 – 1354.
- [39] CHEN C H, LIN C L, HWANG T S. Stability of networked control systems with time-varying delays[J]. *IEEE Communications Letters*, 2007, 11(3): 270 – 272.

- [40] LIU G P, XIA Y Q, REES D, et al. Design and stability criteria of networked predictive control systems with random network delay in the feedback channel[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Part C*, 2007, 37(2): 173 – 184.
- [41] ZHAO Y B, LIU G P, REES D. Improved predictive control approach to networked control systems[J]. *IET Control Theory & Applications*, 2008, 2(8): 675 – 681.
- [42] TANG P L, SILVA C W. Compensation for transmission delays in an ethernet-based control network using variable-horizon predictive control[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2006, 14(4): 707 – 718.
- [43] JIANG X F, HAN Q L. On designing fuzzy controllers for a class of nonlinear networked control systems[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2008, 16(4): 1050 – 1060.
- [44] ZHANG H G, YANG J, SU C Y. T-s fuzzy-model-based robust H_∞ design for networked control systems with uncertainties[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2007, 3(4): 289 – 301.
- [45] CHOW M Y, TIPSUWAN Y. Gain adaptation of networked dc motor controllers based on QoS variations[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2003, 50(5): 936 – 943.
- [46] TIPSUWAN Y, CHOW M Y. Gain scheduler middleware: a methodology to enable existing controllers for networked control and teleoperation-part i: networked control[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2004, 51(6): 1228 – 1237.
- [47] LEE K H, LEE S, LEE M H. Qos-based remote control of networked control systems via profibus token passing protocol[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2005, 1(3): 183 – 191.
- [48] LIU C L, LAYLAND J M. Scheduling algorithms for multiprogramming in a hard-real-time environment[J]. *Journal of the Association for Computing Machinery*, 1973, 20(1): 46 – 61.
- [49] ZHANG W. *Stability analysis of networked control systems*[D]. Cleveland, OH, USA: Case Western Reserve University, 2001.
- [50] 李祖欣, 王万良, 雷必成, 等. 网络控制系统中基于模糊反馈的消息调度[J]. 自动化学报, 2007, 33(11): 1229 – 1232.
(LI Zuxin, WANG Wanliang, LEI Bicheng, et al. Message scheduling based on fuzzy feedback in networked control systems[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2007, 33(11): 1229 – 1232.)
- [51] 白涛, 吴智铭, 杨根科. 网络化的控制系统[J]. 控制理论与应用, 2004, 21(4): 584 – 590.
(BAI Tao, WU Zhiming, YANG Genke. Networked control systems(NCSs)[J]. *Control Theory & Applications*, 2004, 21(4): 584 – 590.)
- [52] 白涛, 吴智铭, 杨根科. 网络化控制系统带宽配置的一种新策略[J]. 自动化学报, 2004, 30(6): 961 – 967.
(BAI Tao, WU Zhiming, YANG Genke. A new scheme of bandwidth allocation for networked control systems[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2004, 30(6): 961 – 967.)
- [53] STANKOVIC J A, SPURI M, RAMAMRITHAM K, et al. *Deadline Scheduling for Real-Time Systems: EDF and Related Algorithms*[M]. 1st edition. Reading, MA: Kluwer Academic Publishers, 1998.
- [54] LU C Y, STANKOVIC J A, SON S H, et al. Feedback control real-time scheduling: framework, modeling, and algorithms[J]. *Real-Time Systems*, 2002, 23(1): 85 – 126.
- [55] WALSH G C, YE H. Scheduling of networked control systems[J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2001, 21(1): 57 – 65.
- [56] YE H, WALSH G C, BUSHNELL L G. Real-time mixed-traffic wireless networks[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2001, 48(5): 883 – 890.
- [57] PARK H S, KIM Y H, KIM D S, et al. A scheduling method for network-based control systems[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2002, 10(3): 318 – 330.
- [58] ANVARI M. Telesurgery: remote knowledge translation in clinical surgery[J]. *World Journal of Surgery*, 2007, 31(8): 1545 – 1550.
- [59] BOUKHNIFER M, FERREIRA A. H_∞ loop shaping bilateral controller for a two-fingered tele-micromanipulation system[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2007, 15(5): 891 – 905.
- [60] KIM W J, JI K, SRIVASTAVA A. Network-based control with real-time prediction of delayed/lost sensor data[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2006, 14(1): 182 – 185.
- [61] LI H B, CHOW M Y, SUN Z Q. EDA-based speed control of a networked dc motor system[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, 56(5): 1727 – 1735.
- [62] LI H B, CHOW M Y, SUN Z Q. Optimal stabilizing gain selection for networked control systems with time delays and packet losses[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2009, 17(5): 1154 – 1162.
- [63] LI H B, CHOW M Y, SUN Z Q. State feedback stabilization of networked control systems[J]. *IET Control Theory & Applications*, 2009, 3(7): 929 – 940.

作者简介:

李洪波 (1980—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为网络控制系统的建模与控制, E-mail: hb-li04@mails.tsinghua.edu.cn;

孙增圻 (1943—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为智能控制、机器人、模糊控制以及网络控制系统等, E-mail: szq-dcs@tsinghua.edu.cn;

孙富春 (1964—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究领域包括智能系统理论、神经网络、机器人、网络控制系统以及模糊控制等, E-mail: fcsun@mail.tsinghua.edu.cn.