

文章编号: 1001-0920(2009)01-0001-06

网络化控制系统中的延时问题: 分析与展望

郭 戈, 贾二娜

(大连海事大学 信息科学技术学院, 辽宁 大连 116026)

摘 要: 网络诱导延时是引起网络化控制系统性能下降甚至不稳定的主要因素之一, 如何减小延时或降低其不确定性以克服延时的不利影响, 一直是网络化控制系统研究领域的一个关键问题. 对此, 从控制和通讯网络两方面出发, 对目前关于延时问题的研究结果进行了详细的论述和总结; 通过系统地分析和对比, 指出现有理论成果中存在的问题和不足; 最后, 指出该领域今后的主要任务和发展方向, 并给出了一些有益的建议.

关键词: 网络化控制系统; 延时; 调度; 协同设计

中图分类号: TP13 **文献标识码:** A

Delays in networked control systems: Analysis and preview

GUO Ge, JIA Er-na

(School of Information Science and Technology, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China. Correspondent: GUO Ge, E-mail: geguo@yeah.net)

Abstract: Network-induced delay is one of the most important sources resulting in degradation of control performance or even instability of networked control systems (NCS). How to overcome such disadvantages owing to delay, by diminishing it or reducing its uncertainty, is one of the key problems in the area of NCS ever since. A detailed description and summarization of the existing research results concerning network-induced delays are made in two basic aspects: control and communication network. Some essential problems and shortage of these theoretical results are presented by systematically analysing and comparing. Finally, several important topics and potential directions for future research are outlined, together with beneficial advices.

Key words: Networked control systems; Delay; Scheduling; Co-design

1 引 言

反馈环通过网络连接的实时分布式控制系统称为网络控制系统(NCS)^[1]. 这种系统在大型工业过程控制系统、楼宇自动化、智能车辆系统、航天器、舰船以及远程操作机器人等领域正在或将要得到应用.

NCS 可实现资源共享和远程操作与控制, 具有较高的诊断能力, 安装与维护简便, 能有效减少系统的重量和体积, 提高系统的灵活性和可靠性, 因此越来越受到人们的重视, 并已取得不少的研究成果. 文献[2-4]对目前 NCS 的最新研究现状进行了总结. 但是, NCS 在通过共享网络资源给控制系统带来各种便利的同时, 也给系统和控制理论的研究带来了新的挑战. 网络时延、丢包与多包传输问题使得网络

控制系统的分析变得更加复杂. 其中控制器、执行器和传感器之间的延时是由信道竞争、物理信号编码和通信协议处理等带来的额外开销. 通常, 从传感器发出信号到执行器接收信号之间的总延时可分为 3 个部分^[5], 即传感器到控制器的延时、控制器计算延时和控制器到执行器的延时. 根据所采用的网络协议和设备不同, 网络时延可能是固定的、有界时变的或随机的, 它们在不同程度上降低了系统的控制性能, 甚至造成系统的不稳定. 尤其当网络上存在多个控制回路时, 网络时延会使各回路之间产生耦合, 从而使网络控制系统的分析和设计更加复杂^[6]. 因此, 网络时延是 NCS 分析与设计的关键因素之一, 必须尽量减小延时, 降低其不确定性, 以克服其对控制系统的不良影响.

收稿日期: 2007-10-10; 修回日期: 2008-03-27.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60504017); 新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-04-0982); 霍英东教育基金项目(111006).

作者简介: 郭戈(1972—), 男, 甘肃庄浪人, 教授, 从事网络化控制系统分析、移动机器人等研究; 贾二娜(1984—), 女, 河北保定人, 硕士生, 从事网络化控制系统延时分析与处理的研究.

本文就网络控制系统中的时延问题进行了详细分析,通过对现有方法的深入对比研究,指出该领域尚待解决的问题及其可能的解决办法。

2 研究进展分析

NCS是通讯网络和控制系统的有机结合,所以研究NCS的时延问题也应从两方面进行。从控制角度出发,基本思想是将网络协议、拓扑结构、信道负载和网络时延等作为已知条件,将NCS视为带有时延的复杂系统进行分析并设计相适应的控制器。从通讯网络角度出发,基本思想是从拓扑结构、任务调度算法和介质访问控制层协议等方面提出解决方案。另外,将控制和通信两方面结合起来进行研究已成为必然趋势,可以说是目前最切实可行的研究方向。

2.1 控制方面的研究

由于网络硬件和软件的不同,以及受网络负载、调度策略及节点和网络故障等影响,网络延时具有不同的特性。本文将按常数延时、独立随机延时和马尔可夫链随机延时3种情况来讨论^[5]。

2.1.1 常数延时

在传感器、执行器与控制器之间均存在延时的NCS中,当数据包丢失率一定、网络诱导时延为恒定且小于等于一个采样周期时,NCS是一个由系统结构事件率约束的异步动态切换系统,系统的稳定性主要由网络数据包丢失率决定。文献[7]给出了系统结构事件率和数据包丢失率之间的关系,确定出系统指数稳定的充分条件和容许数据丢包率,以及开环系统状态和闭环系统结构的关系。文献[8]通过带有常数延时的无记忆信道研究了一类非线性系统的控制问题。

上述是针对单一延时情况的研究。对于多重延时的情况,文献[9]分析并建模了带有多重延时的MIMO NCS。传感器到控制器之间的延时,控制器到执行器之间的延时以及不同设备的采样时间抖动都得到考虑并包括在离散时间MIMO模型之中,因此,控制系统和网络系统设计者都可用该模型来设计NCS并优化其全局性能。鉴于延时和系统的不确定性,可设计鲁棒控制器,但如果不确定性不能精确描述,则随机或鲁棒控制器设计相对比较保守。多重延时大多运用线性矩阵不等式(LMI)技术或功能方法来研究。在功能方法中,控制器的设计采用鲁棒或随机控制方法,但这些方法在现实的网络中不易实现^[5]。文献[10]提出一种解决网络诱导延时的方法,讨论了一个数字控制器和多个控制对象通过一个共用的带有延时的计算机网络连接在一起的网络化控制系统的设计问题。网络诱导延时假定为未知常数,

并指出网络诱导延时可允许的范围取决于NCS中的采样时间和控制对象的动态。

2.1.2 独立随机延时

Luck和Ray^[11]针对带有随机延时的NCS提出了队列预报延时补偿方法,在控制器和执行器节点端分别设立接收缓冲区,将随机的时变延时转化为固定延时。该方法的优点是可利用现有的确定性系统的设计方法设计控制器;缺点是缓冲区将所有时延都转化成了最大延时,相当于人为地将时延扩大化,因此降低了系统的性能。

Chan^[12]考虑了一个通过多路通信链接进行控制的带有通信队列的系统,队列设在传感器位置。该文提出用一个状态预报装置来估计未延迟的状态值,并证明了该策略改进了系统的性能。进一步的研究工作将集中在传感器位于系统的不同位置,此时,控制器从不同的传感器接收到信号产生的延时是不同的。

文献[13]基于一种新的网络预报控制策略,提出带有任意延时的通信网络预报控制系统的稳定性判据。该控制策略主要由一个控制预报发生器和一个网络延时补偿器组成。文献[14]运用基于切换的延时方法,将带有时变大延时的NCS建模为切换系统,在网络诱导延时和数据包乱序共存的条件下,用LMI方法设计了 H_∞ 鲁棒控制器,并设计了预报器以补偿网络延时和数据包的乱序问题。

文献[15]在全状态或部分状态信息已知的条件下,设计了网络诱导延时大于采样周期的NCS的随机最优控制器,使得NCS指数均方稳定。

文献[16]基于状态中包含多重连续延时成分的延时模型,针对NCS提出一种新的延时系统论方法。首先,采用新的Lyapunov-Krasovskii方法和延时系统技术,对带有两个延时成分的系统给出了稳定性和 H_∞ 性能方面的新结果;然后用新模型研究了网络控制问题。这对控制界具有重大意义。

网络延时的估计或辨识是另一个值得研究的重要问题。文献[17]针对随机延时,提出了延时估计和在线获得延时数据的两种方法。先利用 z 变换处理延时,由等价关系产生残差;再通过参数设计解耦干扰向量,从而对网络化系统的控制故障进行了有效诊断。文献[18]也介绍了NCS的故障诊断问题。首先将NCS看成一个具有输出时延的采样控制系统,构造故障观测器,产生了系统故障的指示器残差;然后介绍了一种故障检测和分离(FDI)的方法,总结了FDI观测器的设计算法。

目前,对于带有延时的离散时间控制系统方面的研究也较多。文献[19]给出了广义被控对象的离

散模型, 利用 Lyapunov 方法给出了闭环系统渐近稳定的充分条件, 并基于 LMI 求解状态反馈控制律. [20, 21] 在问题的描述中没有考虑输入延时, 简化了鲁棒稳定控制器的设计. [22] 深入研究了在离散时间领域, 控制输入中存在未知延时的远程控制的稳定性问题. [23] 考虑了时变延时离散系统的静态或动态反馈控制, 基于切换系统理论, 提出了简单的控制器设计方法, 并运用 LMI 方法, 得到了保证系统稳定的充分条件, 进而设计出静态反馈控制增益. [24] 将延时视为不确定参数, 用一个具有延时输入的离散时间参数不确定系统来描述系统, 利用时域的鲁棒控制理论, 得到了 NCS 渐近稳定的充分条件. 该方法的另一个优点是它无需知道网络诱导延时的可能分布情况.

文献[25]设计了史密斯预报器以补偿延时的影响, 并指出闭环系统的鲁棒稳定性与最大的往返延时是密切相关的. [26] 讨论了 NCS 的 H 状态反馈控制问题. 对于带有未知、时变、有界延时的 NCS, 基于不受约束的加权矩阵方法, 提出了满足指定的 H 标准界限的延时依赖的稳定性判据. 该理论可扩展到解决 NCS 的鲁棒 H 控制问题.

以上是针对线性系统的研究. 文献[27]讨论了一类严格反馈非线性系统的自适应模糊控制问题. 对于离散化后得到的不确定系统, 利用基于 LMI 的 H 鲁棒控制方法, 设计了状态的静态反馈控制器, 使得系统在没有外界干扰的情况下, 闭环系统是二次稳定的; 而且当系统存在外界未知扰动时, 闭环系统仍具有较好的干扰抑制率. [28] 研究了一类带有非线性干扰的随机延时间隔系统的鲁棒稳定性问题, 采用一种延时依赖的 LMI 方法得到使得控制系统均方渐近稳定的充分条件, 该充分条件由延时的长短来确定.

2.1.3 马尔可夫随机延时

文献[5]分析了离散时间域的 NCS, 把网络延时建模为独立随机马尔可夫模型, 解决了 LQG 最优控制问题, 但其控制器的设计需要知道马尔可夫链在任意时刻的分布或状态. 同时还考虑了多重延时问题, 但仅限于总延时小于一个采样周期的情况.

文献[29]利用迭代方法将带有任意但有限数据包丢失的线性 NCS 建模为切换系统. [30] 将[29]的结果扩展到随机系统中, 介绍了具有网络诱导延时和传送数据包丢失的线性时不变 NCS 的随机稳定性. 假定传送间隔的序列由两个模型来描述: 独立同一分布序列和有穷状态马尔可夫链. 对于每一种情况都设计了稳定反馈控制器, 并提供了均方稳定的条件.

文献[31]考虑了离散时间域内带有随机延时的 NCS 的稳定性问题. 闭环系统为带有两个模式的跳跃线性系统, 在每个采样周期内, 当前状态、当前传感器到控制器的延时以及上一个状态控制器到执行器的延时都可通过时间戳方法得到. 该文设计了一个依赖于延时的状态反馈控制器, 并给出了稳定控制器存在的充要条件.

在随机方法中, 随机 Riccati 迭代方程很难凑效, 而 LMI 方法则能提供有效的数学策略用于分析和设计控制系统. 文献[32]首次将带有马尔可夫延时的 NCS 用一个标准界限不确定的离散时间马尔可夫跳跃系统来描述, 并根据 LMI 技术设计控制规律. [33] 引进一种 V-K 迭代算法, 专门用于跳跃系统的控制器设计.

文献[34]考虑了不确定马尔可夫跳跃线性系统的鲁棒指数稳定问题. 稳定的充分条件以 LMI 的形式表示. 同时又设计了存储控制器, 使得闭环系统对于所有可容许的不确定性, 都是指数均方稳定的.

2.2 通信方面的研究

从网络角度出发, 网络时延受协议参数和调度算法等的影响. 下面将从这两方面讨论解决方案.

2.2.1 拓扑结构和介质访问控制层协议

文献[35]从 NCS 的实际应用背景出发, 在不附加网络同步时钟和对时延特征离线假设的情况下, 运用通讯技术中的网络协议对网络时延进行在线估计. 在此基础上, 设计最优控制器.

作为远程控制的一种方法, Suk Lee 等^[36]将问题主要集中在 NCS 通过 profibus 标记传送协议上, 基于远程控制策略来保证控制质量 (Qoc). 由于标记传送过程中的不确定性, 在传送过程中会产生随机的网络延时. 但由于协议本身设有内在的延时上下限, 因此为了确保控制性能, 网络延时应保持在允许的延时范围内. 同时网络时延受目标循环时间等协议参数的影响, 该文提出一种遗传算法来选择目标循环时间, 以此来保证控制信息的 Qoc.

2.2.2 任务调度算法

任务调度算法是指对网络中的信息传输进行有效的调度, 避免信息的阻塞, 同时尽可能地提高网络资源的利用率. Walsh^[37] 针对 MIMO NCS 研究了两种调度策略: TOD (Try-once-Discard) 和 token-ring-type 静态调度策略, 首次在多包传送条件下得到了 NCS 全局稳定的条件. 但 TOD 不能保证所有节点在每 p 次传输中都能传输. Walsh 等人^[38, 39] 在后续的研究中对该方法做了较大改进. 文献[40]提出的 mixed traffic scheduler (MTS) 调度策略具有很高的可调度性, 并且很容易在 CAN 上执行. 在性

能上远优于 DM (deadline-monotonic), 稍稍差于动态的 earliest-deadline (ED) 调度. 但这些方法在 NCS 的应用中都是一些限制.

文献[41]中的调度算法可同时决定传感器数据的采样时间, 适用于 polling 系统的集中访问控制和 token passing 系统的分布式访问控制. 但[41]中的系统为 SISO 系统, 仅考虑了周期性的数据, 且最大允许延时界限并没有解析得到. [42]中的调度算法考虑了 MIMO 系统中 3 种数据情况, 运用最大允许延时界限为网络中的每个节点分配带宽, 决定了传感器数据的采样周期, 并保证了数据的实时传送. Hong^[43]提出一种适用于循环服务 fieldbus 网络的带宽分配方案, 该方案一旦得到服务器便发送数据. 数据的传送是预订的, 延时不会超过所允许的最大界限. 该方案不仅满足了实时传送的要求, 而且充分利用了 fieldbus 网络的带宽资源. [44]提出了动态共享时间窗的带宽配置策略, 在满足系统实时性和稳定性的同时, 降低了系统对于非紧急数据缓冲容量的要求, 并具有较高的网络资源利用率.

2.3 控制与通信协同设计的研究

文献[45]提出一种使 NCS 指数稳定的设计方法, 即首先设计出保持原系统可观与可达性的通信序列, 然后设计基于观测器的反馈控制器. [46]是[45]中描述的镇定 NCS 问题的延续, 在其基础上考虑了延时问题, 但仅限于延时为常数延时的情况. 对于带有传输延时的 NCS, 先前的研究都假定控制器预先已设计好, 只需研究延时对于闭环稳定性的影响, 没有考虑通信受限的问题. [46]提出一种同时设计控制器和通信策略的方法, 共同镇定一个线性 NCS, 将延时和通信受限同时存在的线性 NCS 建模为等价的线性时变系统. 文中利用的通信协议可将稳定性问题和通信问题进行分离, 即通信策略可以不依赖于控制器来选择. 该文的方法是将通信策略化简为一组能保持 NCS 系统可观性和可控性的通信序列, 把先前的结论扩展到同时处理通信限制和延时两个问题, 同时运用通信序列的概念作为基本的建模工具. 当然, 还可将该结论扩展到另具有随机传送延时和丢包的问题上.

文献[47]结合控制技术和通信技术, 针对带有时变延时的 NCS, 建立了一个新的延时状态变量模型, 并设计出 LQR 控制器. 鉴于时变延时 NCS 设计 LQR 控制器的困难性, 给出一种延时在线估计的方法, 设计出一种模糊逻辑的 LQR 控制器, 并通过仿真验证了此方法的有效性.

3 总结与展望

随着控制网络应用的日益广泛, 关于控制系统

时延问题的分析与设计越来越受到人们的重视, 并已取得了不少的研究成果. 但无论从控制策略角度, 还是从通讯网络角度来看, 还有很多问题需要进行深入研究. 其中包括以下几个方面:

1) 在已有的关于延迟控制的文献中, 只有文献[48]考虑了系统中的噪声, [28]考虑了非线性干扰. 在实际系统中, 噪声和外部扰动必然存在, 所以能够同时克服随机时延、系统噪声和外界干扰的 NCS 控制方法非常值得研究.

2) 目前, 关于时延问题的分析与设计方法大都是基于线性被控对象的, 当被控对象为非线性对象时, 怎样设计网络控制器将更富挑战性.

3) 网络协议和调度作为影响网络延时的两个重要方面, 如何结合网络协议和调度, 设计延时补偿控制方法, 是从根本上解决延时问题的途径之一.

4) 设计支持某种特定网络协议的控制器, 或寻求面向特定控制方法(如自适应控制^[27]、模糊逻辑控制^[49]等)的通信协议. 这种同时兼顾网络服务质量(QoS)和控制性能质量(QoP)的控制与通信协议设计研究虽然刚刚起步^[45-47], 但其重要性和意义更为突出.

5) 网络延时的估计或辨识^[17,36,47]是另一个值得研究的重要问题.

参考文献(References)

- [1] Lian F L. Analysis, design, modeling, and control of networked control systems[D]. Michigan: University of Michigan, 2001.
- [2] Yang T C. Networked control system: A brief survey [J]. IEE Proc of Control Theory and Application, 2006, 153(4): 403-412.
- [3] Antsaklis P, Baillieul J. Guest editorial special issue on networked control systems [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2004, 49(9): 1421-1423.
- [4] Antsaklis P, Baillieul J. Special issue on technology of networked control systems[J]. Proc of the IEEE, 2007, 95(1): 5-8.
- [5] Nilsson J. Real-time control systems with delays[M]. Sweden: Lund Institute of Technology, 1998.
- [6] Zhang W, Michael S B, Stephen M P. Stability of networked control systems[J]. IEEE Control Systems Magazine, 2001, 21(1): 84-99.
- [7] 邱占芝, 张庆灵, 连志春, 等. 存在时延和数据包丢失情况下状态反馈网络控制系统的指数稳定性[J]. 信息与控制, 2005, 34(5): 567-575.
(Qiu Z Z, Zhang Q L, Lian Z C, et al. Exponential stability of state feedback networked control system with time-delay and data packet dropout[J]. Information and

- Control, 2005, 34(5): 567-575.)
- [8] Battilotti S. Control over a communication channel with random noise and delays[J]. Automatica, 2008, 44(2): 348-360.
- [9] Feng L L, James M, Dawn T. Optimal controller design and evaluation for a class of networked control systems with distributed constant delay [C]. Proc of American Control Conf. Anchorage, 2002: 3009-3014.
- [10] Park B I, Kwon O K. Networked control system design accounting for delay information [M]. Berlin: Springer, 2004, 3314: 130-135.
- [11] Luck R, Ray A. An observer-based compensator for distributed delays[J]. Automatica, 1990, 26(5): 903-908.
- [12] Chan H, Oguner U. Closed-loop control of systems over a communication network with queues[J]. Int J of Control, 1995, 62(3): 493-510.
- [13] Liu G P, Rees D. Stability criteria of networked predictive control systems with random network delay [C]. Proc of the 44th IEEE Conf on Decision and Control, and the European Control Conf 2005 [C]. Spain, 2005: 203-208.
- [14] Wang Y L, Yang G H. H control of networked control systems with time delay and packet disordering [J]. IET Control Theory and Applications, 2007, 1(5): 1344-1354.
- [15] Hu S S, Zhu Q X. Stochastic optimal control and analysis of networked control systems with long delay [J]. Automatica, 2003, 39(11): 1877-1884.
- [16] Gao H J, Chen T W, Lam J. A new delay system approach to network-based control [J]. Automatica, 2008, 44(1): 39-52.
- [17] 郑英, 方华京, 谢林柏, 等. 具有随机时延的网络化控制系统基于等价空间的故障诊断[J]. 信息与控制, 2003, 32(2): 156-159.
(Zheng Y, Fang H J, Xie L B, et al. Parity space based fault diagnosis of networked control system with random delay[J]. Information and Control, 2003, 32(2): 156-159.)
- [18] 郑英, 方华京, 王华. 带有输出传输时延的网络化控制系统基于观测器的 FDI 设计[J]. 控制理论与应用, 2003, 20(5): 2-5, 12.
(Zheng Y, Fang H J, Wang H. Observer-based FDI design of networked control system with output transfer delay [J]. Control Theory and Application, 2003, 20(5): 2-5, 12.)
- [19] 樊卫华, 蔡骅, 陈庆伟, 等. 时延网络控制系统的稳定性[J]. 控制理论与应用, 2004, 21(6): 33-37.
(Fan W H, Cai H, Chen Q W, et al. Stability of networked control systems with time-delay) [J]. Control Theory and Applications, 2004, 21(6): 33-37.)
- [20] Xu S, Lam J, Chen T. Robust H control for uncertain discrete stochastic time delay systems [J]. Systems and Control Letters, 2004, 51(3/4): 203-215.
- [21] Song S H, Kim J K, Yim C H, et al. H control of discrete time linear systems with time varying delays in state[J]. Automatica, 1999, 35(9): 1587-1591.
- [22] Pan Y J, Horacio J M, Chen T W. Remote stabilization of networked control systems with unknown time varying delays by LMI techniques [C]. Proc of IEEE Conf on Decision and Control. Spain, 2005: 1589-1594.
- [23] Xia Y Q, Shi P, Liu G P, et al. Output feedback control of discrete systems with time-varying delay[J]. J of Guidance, Control and Dynamics, 1994, 17(4): 701-711.
- [24] Xie G M, Wang L. Stabilization of networked control systems with time-varying network-induced delay [C]. Proc of IEEE Conf on Decision and Control. Bahamas, 2004: 3551-3556.
- [25] 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.
- [26] Zhao H, Wu H, Liu G P, et al. H control for networked control system with time-varying delays[J]. J of Control Theory and Applications, 2005, 2(12): 157-162.
- [27] 姜培刚, 姜偕富, 李春文, 等. 基于 LMI 方法的网络化控制系统的 H 鲁棒控制[J]. 控制与决策, 2004, 29(1): 17-21.
(Jiang P G, Jiang X F, Li C W, et al. Robust H control for the networked control systems based on LMI[J]. Control and Decision, 2004, 29(1): 17-21.)
- [28] Guo L W, Wang Z D, Shu H S, et al. A delay-dependent stabilization of stochastic interval delay systems with nonlinear disturbances[J]. Systems and Control Letters, 2007, 56(9/10): 623-633.
- [29] Yu M, Wang L, Chu T, et al. Stabilization of networked control systems with data packet dropout and network delays via switching system approach [C]. Proc of the 43rd IEEE Conf on Decision and Control. Bahamas, 2004: 3539-3544.
- [30] Zhang X M, Zheng Y F, Lu G P. Stochastic stability

- of networked control systems with network-induced delay and data dropout [C]. Proc of the 45th IEEE Conf on Decision and Control. San Diego, 2006: 5006-5011.
- [31] Zhang L Q, Shi Y, Chen T W, et al. A new method for stabilization of networked control systems with random delays [C]. 2005 American Control Conf. Oregon, 2005: 633-637.
- [32] Costa O L V, Fragoso M D. Stability results for discrete-time linear systems with markovian jumping parameters [J]. J of Mathematical Analysis and Applications, 1993, 179(2): 154-178.
- [33] Lin X, Arash H, Jonathan P H. Control with random communication delays via a discrete-time jump system approach [C]. Proc of the American Control Conf. Chicago, 2000: 2199-2204.
- [34] Sun M H, Lam J, Xu Sh Y, et al. Robust exponential stabilization for markovian jump systems with mode-dependent input delay [J]. Automatica, 2007, 43(10): 1799-1807.
- [35] 魏震, 李长虹, 谢剑英. 网络控制系统在线时延估计控制 [J]. 控制与决策, 2003, 18(5): 545-549.
(Wei Z, Li C H, Xie J Y. Online delay-evaluation control for networked control systems [J]. Control and Decision, 2003, 18(5): 545-549.)
- [36] Lee Sue, Lee Kyung Chang, Kim Hyun Lee, et al. Remote control for guaranteeing QoC of networked control system via profibus token passing protocol [C]. The 29th Annual Conf of the IEEE. Berlin, 2003: 1425-1430.
- [37] Walsh G C, Ye H, Bushnell L. Stability analysis of networked control system [C]. Proc of the American Control Conf. California, 1999: 2876-2880.
- [38] Walsh G C, Ye H, Bushnell L. Scheduling of networked control system [J]. IEEE Control Systems Magazine, 2001, 21(1): 57-65.
- [39] Walsh G C, Beldiman, Bushnell L. Asymptotic behavior of nonlinear networked control systems [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2001, 46(7): 1093-1097.
- [40] Zuberi K M, Shin K G. Scheduling messages on controller area network for real-time CIM applications [J]. IEEE Trans on Control System Technology, 1997, 3(2): 310-314.
- [41] Hong S H. Scheduling algorithm of data sampling times in the integrated communication and control systems [J]. IEEE Trans on Control System Technology, 1995, 3(2): 225-231.
- [42] Kim Y H, Kwon W H, Park H S. Stability and a scheduling method for network-based control systems [C]. Proc of the Int Conf on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation. Las Vegas, 1996: 934-939.
- [43] Hong S H. Bandwidth allocation scheme for cyclic-service field bus networks [J]. IEEE Trans on Mechatronics, 2001, 6(2): 197-204.
- [44] 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 T, Wu Z M, Yang G K. A new scheme of bandwidth allocation for networked control systems [J]. Acta Automatica Sinica, 2004, 30(6): 961-967.)
- [45] Hristu Varsakelis D. Stabilization of networked control systems with access constraints and delays [A]. Proc of the 45th IEEE Conf on Decision and Control. San Diego, 2006: 1123-1128.
- [46] Zhang L, Hristu Varsakelis D. Communication and control co-design for networked control systems [J]. Automatica, 2006, 42(6): 953-958.
- [47] Li Z, Fang H J. A novel controller design and evaluation for networked control systems with time-variant delays [J]. J of the Franklin Institute, 2006, 343(2): 161-167.
- [48] 于之训, 陈辉堂, 王月娟. 具有随机通讯延迟和噪声干扰的网络控制系统 [J]. 控制与决策, 2000, 15(5): 518-521.
(Yu Z X, Chen H T, Wang Y J. Control of network system with random communication delay and noise disturbance [J]. Control and Decision, 2000, 15(5): 518-521.)
- [49] Yin F J, Jing Y W, Gong Y J. Congestion control algorithm in large-delay uncertain networks [J]. J of Control Theory and Applications, 2007, 5(1): 67-70.