

网络化的控制系统

白涛^{1,2}, 吴智铭¹, 杨根科¹

(1. 上海交通大学 自动化系, 上海 200030; 2. 太原重型机械学院 自动化系, 山西 太原 030024)

摘要: 通过比较的方式研究了网络化控制系统的特点、网络因素与控制系统性能间的关系, 分类介绍了当前网络化控制系统的研究方法、分析角度及策略, 最后在评述当前研究现状的基础上, 提出了以兼顾控制性能质量 (QoP) 和网络服务质量 (QoS) 为目标的网络化控制系统综合性能优化的新的研究观点。

关键词: 网络化控制系统; 性能优化; 时延; 控制性能质量 (QoP); 服务质量 (QoS)

中图分类号: TP393.1, TP202

文献标识码: A

Networked control systems (NCSs)

BAI Tao^{1,2}, WU Zhi-ming¹, YANG Gen-ke¹

(1. Department of automation, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 20030, China;

2. Department of automation, Tai Yuan Heavy Machinery Institute, Taiyuan Shanxi 030024, China)

Abstract: The characteristics of the networked control systems (NCSs) are introduced by comparison and the relationship between the network and the control system performance is discussed. Recent networked control techniques and strategies are presented and their state-of-arts are discussed separately. Aiming at the disadvantages of existing studies, some suggestions of new research trends are given that may improve the whole system performance, including the quality of control performance (QoP) and quality of network service (QoS) by synthesizing both control and scheduling schemes.

Key words: networked control systems (NCSs); performance optimization; network-induced delay; quality of control performance (QoP); quality of service (QoS)

1 引言 (Introduction)

网络化控制是复杂控制系统和远程控制系统的客观需求^[1], 传感器、执行机构和驱动装置等现场设备的智能化为通信网络在控制系统更深层次的应用提供了必要的物质基础^[2,3], 而高速以太网^[4]和现场总线技术^[5,6]的发展和成熟解决了网络化控制系统自身的可靠性和开放性问题, 使之成为现实。将通信网络引入控制系统, 连接智能现场设备和自动化系统, 实现现场设备控制的分布化和网络化, 同时也加强了现场控制和上层管理的联系 (见图 1)。与传统的点对点控制模式相比, 这种网络化的控制模式具有信息资源能够共享、连接数大大减少、易于扩展、易于维护、高效、可靠和灵活等优点^[7], 但同时由于网络通信带宽、承载能力和服务能力的限制, 使数据的传输不可避免地存在时延、丢包、多包传输及抖动等诸多问题, 导致控制系统性能的下降甚至不稳定^[1,7~11], 同时也给控制系统的分析、设计带来了很大困难。因此对这个问题的研究和探索是极为必要的, 近年来国内外许多学者积极地投入了该领域的研究。

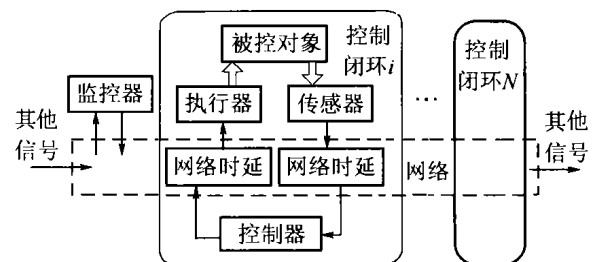


图 1 NCSs 的系统结构图

Fig. 1 System structure of NCSs

本文首先通过比较的方式研究网络化控制系统的特点, 分析网络因素与控制系统性能间的关系, 而后介绍当前网络化控制系统的研究方法、分析的角度及策略, 最后作者对当前的研究现状进行了分析和评述, 提出以兼顾控制性能质量 (QoP) 和网络服务质量 (QoS) 为目标的网络化控制系统综合性能优化的新的研究观点。

2 NCSs 的特点 (Characteristics of NCSs)

NCSs 是网络技术与工业应用相结合的产物, 是计算机

控制系统更深层次的发展.与分层控制系统相比,NCSs 具有如下特点^[2,12]:

1) 与分层控制系统的递阶结构相比,NCSs 支持总线型、星型和树型等多种拓扑结构,其结构层次少,而且系统更加稳定;

2) 分层控制系统的控制功能由中央控制器完成,其他设备只是信号的提供者和执行者,不具有直接控制功能;而 NCSs 的各节点都是智能体,具有计算、分析、处理和通信能力,既可实现分散的局部控制又可通过网络通信完成各节点间的协调.

NCSs 与一般的数据网有着许多相似之处,如存在多种拓扑结构、不同业务数据有不同服务质量要求等,但也存在差别.从两者的比较可以看出 NCSs 还具有如下特点^[13,14]:

1° 数据网的数据传输突发性大、实时性要求随业务数据类型及其服务要求的不同而不同,通常无硬实时性要求,且数据包相对较大;而 NCSs 的数据传输突发性小、频繁、具有硬实时性要求,数据包相对较小,且其有效数据所占比重小(相对头开销而言),故而传输效率较低.

2° 在数据网的数据传输研究中,注重的是数据量的大小、数据的传输速率及传输效率,而在 NCSs 的数据传输研究中,更为注重的是 Bit 流承载的控制信号而非 Bit 流本身.

3° 数据网中传输的数据可以排队和重传,而 NCSs 中传输的数据应是最新的,能及时反映系统当前的实际运行情况,因此其数据不排队、不重传.

3 网络与控制系统性能间的关系(Relationship between network and control performance)

网络有限的通信带宽、承载能力和服务能力使数据的传输可能经历时延、丢包、抖动和多包传输等诸多问题,其中时延是造成系统性能下降的最基本因素,其主要表现是使系统的稳定时间和超调量增大,震荡加剧;同时减小了系统的相角稳定裕度甚至导致系统不稳定^[7-9,11].

时延是客观存在不可避免的.数据在传输线路上传输必然存在传输时延,数据接受交换设备的路由选择、复用/解复用等处理必然存在计算时延(见图1).传输时延和计算时延共同构成了网络时延.网络时延受到网络拓扑结构、网络所采用的通信协议、路由算法、网络当时的负载状况、网络的传输速率和信息包的大小等诸多因素的影响而呈现出或固定或随机、或有界或无界的特征.如:以太网采用的是 CSMA/CD 介质存取控制(MAC)机制,其不确定性使网络时延呈现出随机、无界的特征;ControlNet 网采用的是循环服务机制,其网络时延具有固定或有界的特征;而 DeviceNet 网采用的优先级仲裁 MAC 机制可保证高优先级数据有界的网络时延,而低优先级数据则可能经历无界的网络时延^[4-6,14,15].

在 NCSs 的设计过程中,当采用的网络选定后,相应的网络通信协议、网络的传输速率、带宽及相应的数据包结构也就确定了,此时网络的运行性能直接受到网络负荷状况和数据包长度的影响.如前所述,NCSs 的数据包小而琐碎,相对于固定的数据包头开销而言进一步减小有效数据的长度并

不能明显降低网络负荷以达到减小网络时延、降低丢包和抖动的发生从而提高网络运行性能的效果,相反地还会造成网络利用率的降低,甚至影响控制精度.因此,NCSs 的网络负荷状况是影响网络运行性能乃至控制系统性能的关键因素,而网络负荷是与控制系统的采样周期直接相关的.通过与连续控制(CC)和数字控制(DC)方式下采样周期对系统性能影响的比较^[17](如图2所示),可定性地建立网络控制(NC)方式下采样周期、网络运行性能和控制系统性能三者间的关系.在 NC 方式下,控制系统性能不仅受到采样周期的影响,而且受到网络运行性能的限制,为实现与 DC 方式下相同的控制系统性能,需减小采样周期以克服网络因素对系统性能的影响,如图2中采样周期 T_B 小于 T_A .随着采样周期的减小,网络负荷虽然增大但网络运行性能不变,故系统性能逐步提高,但是当采样周期减小到一定程度后,网络负荷超过网络有限的承载能力,使网络时延增大,甚至引起抖动、丢包等问题,此时不但不能保证原有的系统性能,反而会导致系统性能的下降(C点)和恶化.

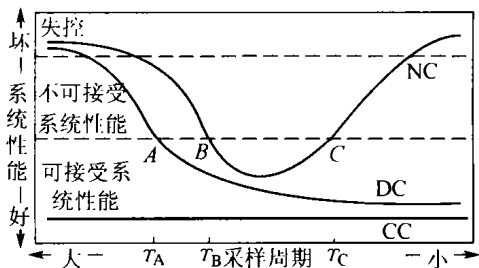


图2 系统性能比较(CC,DC,NC)

Fig. 2 Control performance comparison of CC,DC and NC

4 网络化控制技术及策略(Recent networked control techniques and strategies)

NCSs 是网络技术与工业应用相结合的产物,因此源于自动控制技术以满足系统稳定及动态性能(quality of performance, QoP)为目标的分析手段和源于计算机网络技术以保证多媒体信息传输和远程通信服务质量(quality of service, QoS)的分析手段必然在 NCSs 研究中得到延伸和发展,形成当前 NCSs 研究领域的两大主流研究方向,而从兼顾 QoS 和 QoP 入手研究 NCSs 的综合策略正初露锋芒.

4.1 从保证 QoP 的角度归为控制问题(Control Scheme to Guarantee QoP)

在网络传输无错、数据长度相同、计算时延定长、时钟同步且偏差定长等假定条件下,将网络时延(定长、随机)、丢包等因素作为已知条件,建立 NCSs 的连续/离散时间系统模型或混合系统模型,进而研究其稳定性、动态性能及系统控制律或控制器的设计策略.

4.1.1 稳定性研究(Researches on stability)

4.1.1.1 扰动控制分析方法(Perturbation control method)

Walsh^[11]把网络时延的影响视为扰动并描述为传感器输出与控制器输入间的误差形式.借助 Lyapunov 稳定性定理,给出网络扰动作用下保持 NCSs 系统稳定的最大时延上界,分析地证明了在循环服务和优先级竞争两种不同的

MAC 机制下线性连续定常 NCSs 指数稳定的充分条件,进而又对非线性连续时变 NCSs 在不同优先级调度策略下的稳定性能进行了研究^[18~20].该研究虽然给出最大时延和系统参数间的显式表达形式,但理论分析与仿真实验结果相差近4个数量级,其结果相当保守^[15],而扰动控制方法不能处理控制器与传感器间的时延是最大的不足.

4.1.1.2 随机控制分析方法(Stochastic control method)

Krtolica^[21]将随机时延引入状态空间,得到离散时变增广状态空间的系统模型,进而将其描述为能在所有可能的定常系统结构间转换的混合系统模型,并以 Markov 链来刻画其转换过程.在此基础上,作者运用随机 Lyapunov 函数和确定性结构扰动两种方法导出具有随机网络时延的线性定常系统均方稳定的充分必要条件.Ling^[22]将系统输出功率谱表达为丢包概率的函数,得到了系统随机均方稳定的充分条件及其丢包概率的上界,但作者没有考虑时延因素.

4.1.1.3 混合系统分析方法(Hybrid system method)

Zhang^[15,16]将离散时间定常 NCSs 建模为采样点与采样点间的切换系统模型,进而研究该模型下系统稳定的充分条件,由于在稳定性证明中仅限定 Lyapunov 函数在采样点的递减特性,所以得到了比文献^[11]松弛的结果,但与实际情况相比仍较保守.进一步地,作者对离散时间定常 NCSs 在丢包和多包传输的网络环境下的稳定性进行了研究,将这两种情况下的 NCSs 建模为具有一定切换速率限制的异步动态系统(ADS),分析了 ADS 模型下 NCSs 系统稳定的充分条件.但对于时延和丢包、多包传输共存的情况没有进行研究.

4.1.2 动态性能研究(Researches on dynamic control performance)

4.1.2.1 随机控制分析方法(Stochastic control method)

Lincoln^[23]将服从高斯分布的随机长时延(时延大于一个采样周期)引入线性系统状态方程,得到系统增广状态方程及含有增广状态的 LQR 代价函数,实现了全维最优状态控制器的设计.Nilsson^[24]研究了具有独立随机分布特性和 Markov 特性的网络时延下离散时间 NCSs 的 LQG 最优控制问题,其网络时延限定在一个采样周期内;Yu^[25]将其推广到多步随机时延情况,得到在传感器和执行器采用时间驱动方式,在控制器采用事件驱动方式策略下,给定性能指标下的随机最优控制律和保证闭环系统终态均方稳定的必要条件.基于文献^[22],Ling^[26]将系统输出功率谱表达为丢包概率及其补偿策略的函数,建立等价的线性时不变系统模型,从而将丢包补偿器的设计转化为受限的一般补偿器优化设计问题.

4.1.2.2 最优控制分析方法(Optimal control method)

Brockett^[27]引入 Minimum Attention Control 以减小控制律对于时间和系统状态的依赖,这是一种开环控制与闭环控制折衷的最优控制策略.其目标函数定义为开环控制 $\|\frac{\partial u}{\partial t}\|$ 和闭环控制 $\|\frac{\partial u}{\partial x}\|$ 的组合,最优控制律 u 具有较低的频率更新和对数据改变较强的鲁棒性^[28].在传感器和控制器采

样频率相同、各传感器间采取具有不同时间偏差的异步采样机制、执行器采取事件驱动方式工作等基本假定条件下,Lian^[29]对多步时延下多输入多输出单闭环 NCSs 建立延迟可变系统状态模型,并将优化控制器的设计归结为 LQR 最优控制问题^[30].Stubbs^[31]对具有空间参数的线性时变 NCSs 在 l^2 范数下控制器设计应满足的充分凸条件进行了分析.

4.1.2.3 智能控制分析方法(Intelligent control method)

Lee^[32]和 Lee S.^[33]分别应用遗传算法和模糊逻辑对 Profibus-DP 网络下 NCSs 系统的控制器进行了设计和仿真实验,证明两种控制器对于网络时延的鲁棒性.

4.1.2.4 排队论分析方法(Queueing method)

Chan^[34~36]根据传感器和预测器输入端的 FIFO 缓冲队列长度估计随机时延的变化,建立基于概率的状态预测策略,使预测器的性能提高.但由于缓冲队列的引入而使数据的时延增大.

其他的研究还有给定控制律下网络拓扑结构对系统性能的影响^[37]、在线时延测定方法及其控制器优化^[38]和 NCSs 的等价 Witsenhausen 型混合系统模型^[39]等.

4.2 从保证 QoS 的角度归为调度问题(Scheduling scheme to guarantee QoS)

在有限带宽条件下合理调度 NCSs 的各种业务数据、充分配置网络带宽、有效控制网络负荷以限制网络时延的范围和减少丢包、抖动的发生,从而确保 NCSs 预期的控制性能.

4.2.1 设计网络通信协议(Communication protocol design)

文献^[3]提出了基于持续竞争的载波监听多路访问/冲突检测(PT-CSMA/CD)实时介质访问控制方法,以保证在信道存在竞争冲突时高优先级实时数据的传输有确定的时延上界.同时,针对 NCSs 的可靠性问题,提出了基于自适应思想的混合表决/变冗余度编码(VS/VRC)的网络差错控制方法,利用表决策略从已有出错信息中尝试正确解码以提高传输正确率,利用变冗余度编码策略改变编码冗余度以提高网络的可靠性和实时性.Walsh^[11]提出 TOD(Try-Once-Discard)/MEF(Maximum-Error-First)介质访问控制策略,使具有最大权误差的节点优先传输数据,其他竞争失败的节点丢弃其未传数据.进而结合 CAN2.0 和 CAN 1.0 的工业应用实际,提出连续优先级、离散优先级(线性分区/对数分区和自动分区)TOD 调度策略^[18~20].Ye 等^[40]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,以优先级划分时段确保数据的实时传输.

4.2.2 配置网络带宽(Bandwidth allocation)

Raja 和 Ulloa^[41]从保证周期数据实时性及提高带宽利用率的角度提出优先级循环服务和动态时间窗的带宽配置策略,将一个基本循环周期分为周期时间窗和非周期时间窗两部分,数据传输占用相应的时间窗.通过动态地交替扩展周期时间窗和非周期时间窗,使在周期时间窗内未被服务的周期数据可以占用非周期时间窗内的时间而达到数据实时传输、减少带宽资源浪费的目的.其周期数据的传输顺序由

RM 或 EDF 优先级调度策略决定.类似的研究包括^[42-44].以优先级策略配置带宽的研究包括:Zuber^[45]采取 MTS(Mixed Traffic Scheduler)分级调度机制对不同频率和不同实时要求的数据设定相应优先级以提高 CAN 网中实时数据可调度性;Natale^[46]借助相对死限的对数编码方式实现 CAN 网中的 EDF 调度机制,获得比 MTS 更高的实时数据可调度性.Cena^[47]借助循环服务机制实现 CAN 网中同优先级数据间的带宽平均划分,避免了因优先级的设定和更新造成^[45, 46]的优先级倒置现象.

4.2.3 整形业务量(Traffic shaping)

Montestruque^[28]提出利用“更新时间”的调节来控制网络通信流量以达到保证系统稳定目的,这是在开环与闭环控制间进行折衷的一种策略.通过在控制器端加被控对象模型实现控制器对实际对象和模型的同步控制,限定实际对象输出与模型输出间的误差超过一定门限时才对模型状态进行更新.Kweon^[48, 49]提出了业务平滑概念(类似于“漏桶”机制),在 Ethernet 网的 UDP(或 TCP/IP)层和 MAC 层插入“定速率业务平滑器”和“自适应业务平滑器”以限定 MAC 层信息包的到达速率,获取有界的网络时延.Otanez^[50, 51]建立了以网络利用率与系统误差为目标的“死区”(状态误差限)优化算法.通过为每个网络节点设置最优死区范围限定采样数据的传输,达到确保系统性能的同时减少网络通信流量的目的.J. K. Yook^[52]提出了一种在每个网络节点附加状态估计器的网络结构,通过牺牲计算代价来换取网络带宽的节省.这些都是通过控制局部节点业务流量以获取系统全局性能的调度策略.

无论是时延、丢包还是抖动问题,其出现或产生的最直接原因就是网络中的业务流量过大,超出网络的承载能力.因此,尽管上述几种研究方法各有侧重,但从最终实现的效果来看,都是通过直接或间接地控制网络流量达到减小网络时延、保证系统稳定的目的.

4.3 兼顾 QoS 和 QoP 的控制与调度综合研究(Synthesizing control and scheduling to guarantee QoP and QoS)

基于 RM(Rate Monotonic)静态调度算法,Zhang^[16]研究了在满足网络资源可调度性和系统稳定性双重约束条件下,使 NCSs 系统动态性能达到最优的采样周期优化问题.当系统无法满足网络资源可调度条件时,作者提出在保证系统稳定条件下,可通过人为丢包的方式满足网络资源可调度条件,但作者没有实现该方式的自动算法.

借助“窗口”的概念,Hong^[53]提出基于循环服务的多控制闭环 NCSs 采样周期调度算法,建立了 NCSs 控制系统性能与网络性能间的约束关系.在满足系统最大允许闭环时延限制(保证系统稳定性)和避免空采样和数据丢弃(保证动态性能)^[7]条件下,确定各控制闭环的采样周期为 $T_1 = (\phi_1 + L)/3$ 和 $T_i = 2^k T_1 \leq \phi_i, k = 0, 1, 2, \dots$,并将带宽资源表达为 T_1 时段内的最大允许服务窗口个数 $r = \lfloor ((\phi_1 + L)/3 - N\sigma)/L \rfloor$ (其中 σ 为头开销, N 为网络节点数, L 为数据传输时间),进而 Hong 将该算法应用到 CAN 网中^[54].该算法虽然

在保证系统性能的同时提高了带宽资源利用率,却没有从优化的角度对带宽资源的使用加以考虑^[55].

Tipsuwan^[57]认为终端用户无法控制网络 QoS,但可以通过网络中间件获取当前网络的 QoS(如网络的吞吐率,网络时延)状况,基于此提出了根据当前网络的 QoS(如网络的吞吐率,网络时延)状况决定控制系统采样周期,并通过调节控制器的增益以获得可能的最优系统性能的方法.

5 结论与展望(Conclusion and future work)

网络化控制系统是控制、网络和计算机多种技术交叉融合的产物,其设计与实现又受到实际被控系统的需求、网络环境因素、经济效益等多方面因素的影响,因此,网络化控制系统的研究必然具有多层次、多样性的特点.已有的研究成果虽然在研究方法、分析角度及策略上展现了丰富的多样性,却更多的是单层次、单目标的研究并且为便于分析,对网络承载能力、网络运行性能和控制系统性能三者之间的交叉耦合关系进行了不同程度的简化.从 QoP 角度出发的控制策略忽略了网络复杂的动态行为,简单地将网络对系统性能的影响抽象为具有各种不同特性的时延、丢包等因素,侧重于 NCSs 中控制系统稳定性的保证和动态性能的提高;从 QoS 角度出发的调度策略侧重于保证网络时延的有界性、数据传输的安全可靠性和带宽资源利用率的提高,而将控制系统的性能要求简单地抽象为数据传输的实时性、可靠性要求,欠缺对 NCSs 控制系统性能确切影响的研究,更没有考虑基于优化的调度问题.总之,这两种策略虽然降低了 NCSs 控制系统设计和网络实现两个阶段工作的复杂性,但割裂了彼此的联系而无法保证系统良好的总体性能.从兼顾 QoS 和 QoP 的角度出发的综合控制与调度的研究策略将网络运行性能、带宽资源限制等更多的网络因素融入控制系统设计和性能优化中,在控制系统设计的同时考虑网络实现的问题,利于系统的总体性能优化,因此,这种策略必将成为最终的研究主流.这种策略下已有的研究成果虽然考虑了更多的网络因素,但网络因素只是作为限定条件,其研究仍是单目标、单层次的,忽视了控制系统参数的选择对网络运行性能的影响,欠缺对网络性能的优化.

总结上述的分析,作者认为未来的工作可从以下几方面展开:

1) 从较高层次的综合经济效益与系统性能优化的角度出发,采用将其映射为较低层次的系统参数优化、网络参数选取、带宽资源调度问题的研究方式,力求达到系统设计与网络实现的总体性能优化的目标.作者在这方面做了初步的工作,通过控制系统采样周期的选取寻求网络运行性能和控制系统性能间的折衷策略^[55]、对有不同服务质量要求的数据优化带宽配置策略.引入新的、更多的反映系统性能的优化指标、寻求新的融合网络与控制系统的其他结合点将是未来的发展方向.

2) 已有的研究成果假定控制系统的采样周期是固定不变的,其传感器、控制器以时间驱动方式同步工作,其负面影响是使数据时延增大导致系统的性能下降或使系统多度占

用带宽资源导致网络性能下降,而基于上述假定的控制、调度策略多是静态的、非在线的,而控制系统和网络的运行状况是多变的,故缺乏灵活性和适应性.因此以事件驱动的异步、多速率采样及其基于此的动态的、在线的特别是优化控制以及调度算法有待于研究.

3) 多数研究成果,特别是从 QoP 角度出发的控制策略的研究成果只是针对一般意义下的网络的研究,缺乏与具体网络的结合,使分析结果远离实际.因此,根据实际应用领域需求,结合具体网络及其运行性能的研究有待于拓展.

4) 多数研究都是基于简单的总线型拓扑结构的,对于基于其他网络拓扑结构的 NCSs 的系统性能分析有待于研究.

参考文献(References):

- [1] CHOW M Y, TIPSUWAN Y. Network-based control systems: a tutorial [C]// *Proc of the 27th Annual Conf of IEEE Industrial Electronics Society*. Denver, CO, USA: IEEE Press, 2001: 257 – 261.
- [2] 顾洪军, 张佐, 吴秋峰. 网络控制系统的机理描述模型[J]. 控制与决策, 2000, 15(5): 633 – 636.
(GU Hongjun, ZHANG Zhuo, WU Qiufeng. The mechanism description model of networked control systems [J]. *Control and Decision*, 2000, 15(5): 633 – 636.)
- [3] 沈钢. 网络控制系统实时介质访问控制的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2002.
(SHEN Gang. *Research on real-time medium access control for networked control systems* [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2002.)
- [4] SKEIE T, JOHANNESSEN S, BRUNER C. Ethernet in substation automation [J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2002, 22(3): 43 – 51.
- [5] GLANZER D A. *Foundation fieldbus technical overview* [EB/OL]. <http://www.fieldbus.org/generalassembly/techoverview.pdf>, 2003.
- [6] *Industrial automation tutorial* [EB/OL]. <http://www.raunvis.hi.is/~rol/Vefur/%E9r%20Instrupedia/CIATUTO.pdf>, Apr 27, 1997.
- [7] RAY A, HALEVI Y. Integrated communication and control systems: part I—analysis and part II—design consideration [J]. *ASME J of Dynamic System Measurement & Control*, 1988, 110: 367 – 381.
- [8] SANFRIDSON M. *Survey of techniques for handling timing problems in distributed control* [EB/OL]. <http://www.damek.kth.se/~mis/personal/documents/SNART99.pdf>, May 14, 2000.
- [9] STOTHERT A, MACLEOD I M. Effect of timing jitter on distributed computer control system performance [C]// *Proc of the 15th IFAC Workshop on Distributed Computer Control Systems*. Villa Olmo, Como, Italy: Pergamon Press, 1998: 20 – 25.
- [10] LI S B, WANG Z, SUN Y X. Fundamental problem of networked control systems from the view of control and scheduling [C]// *Proc of IEEE 28th Annual Conf of IEEE Industrial Electronics Society*. Sevilla, Spain: IEEE Press, 2002, 3: 2503 – 2508.
- [11] WALSH G C, BELDIMAN O, BUSHNELL L G. Stability analysis of networked control system [C]// *Proc of American Control Conference*. San Diego, CA, USA: IEEE Press, 1999: 2876 – 2880.
- [12] WU F G, SUN F C, XUE D Q, et al. Problems and strategies of networked control systems [C]// *Proc of IEEE 28th Annual Conf of IEEE Industrial Electronics Society*. Sevilla, Spain: IEEE Press, 2002, 3: 1692 – 1695.
- [13] WALSH G C, YE H. Scheduling of networked control systems [J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2001, 21(1): 57 – 65.
- [14] LIAN F L, MOYNE J R, TILBURY D M. Performance evaluation of control networks: Ethernet, ControlNet and DeviceNet [J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2001, 21(1): 66 – 83.
- [15] ZHANG W, BRANICKY M S, PHILIPS S M. Stability of networked control system [J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2001, 21(1): 84 – 99.
- [16] ZHANG W. *Stability analysis of networked control systems* [EB/OL]. <http://dora.cwru.edu/msb/pubs/wxzPHD.pdf>, Oct 4, 2001.
- [17] LIAN F L, MOYNE J R, TILBURY D M. Network design consideration for distributed control systems [J]. *IEEE Trans on Control System Technology*, 2002, 10(2): 297 – 307.
- [18] WALSH G C, BELDIMAN O, BUSHNELL L G. Asymptotic behavior of nonlinear networked control systems [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2001, 46(7): 1093 – 1097.
- [19] WALSH G C, BELDIMAN O, BUSHNELL L G. Asymptotic behavior of networked control systems [C]// *Proc of IEEE Int Conf on Control Applications*. Hawaii, USA: IEEE Press, 1999: 1448 – 1453.
- [20] WALSH G C, BELDIMAN O, BUSHNELL L G. Error encoding algorithms for networked control systems [C]// *Proc of the 38th Conf on Decision & Control*. Phoenix, Arizona, USA: IEEE Press, 1999: 4933 – 4938.
- [21] KRTOLICA R, ÖZGÜNER Ü, CHAN H, et al. Stability of feedback systems with random communication delays [J]. *Int J Control*, 1994, 59(4): 925 – 953.
- [22] LING Q, LEMMON M D. Robust performance of soft real-time networked control systems with data dropouts [C]// *Proc of the 41st IEEE Conf on Decision and Control*. Las Vegas, Nevada, USA: IEEE Press, 2002: 225 – 1230.
- [23] LINCOLN B, BERNHARDSSON B. *Optimal control over networks with long random delays* [EB/OL]. <http://www.control.lth.se/~lincoln/research/doc/optctrlongtime.pdf>, Jan 29, 2001.
- [24] NILSSON J. *Real-time control systems with delays* [D]. Lund, Sweden: Lund Institute of Technology. <http://citeseer.nj.nec.com/nilsson98realtime.html>, 1998.
- [25] YU Z X, CHEN H T, WANG Y J. Research on control of network system with Markov delay characteristic [C]// *Proc of the 3rd World Congress on Intelligent Control and Automation*. Hefei, China: IEEE Press, 2000: 3636 – 3640.
- [26] LING Q, LEMMON M D. *Optimal dropout compensation in networked control systems* [EB/OL]. <http://www.nd.edu/~lemmon/filter5.pdf>, Dec, 2003.

- [27] BROCKETT R. Minimum attention control [C]// *Proc of the 36th Conf on Decision and Control*. San Diego, CA, USA: IEEE Press, 1997:2628 – 2632.
- [28] MONTESTRUQUE L A, ANTSAKLIS P J. *Model-based networked control system-stability* [EB/OL]. <http://www.nd.edu/~isis/techreports/isis-2002-001.pdf>, Oct 20, 2003.
- [29] LIAN F L, MOYNE J R, TILBURY D M. Analysis and modeling of networked control systems: MIMO case with multiple time delays [C]// *Proc of American Control Conference*. Arlington, VA, USA: IEEE Press, 2001:4306 – 4312.
- [30] LIAN F L, MOYNE J R, TILBURY D M. Optimal controller design and evaluation for a class of networked control systems with distributed constant delays [C]// *Proc of American Control Conference*. Anchorage, Alaska, USA: IEEE Press, 2002:4306 – 4312.
- [31] STUBBS A, DULLERUD G E. Networked control of distributed system [C]// *Proc of the 40th IEEE Conf on Decision and Control*. Orlando, Florida, USA: IEEE Press, 2001:203 – 204.
- [32] LEE K C, LEE S. Remote controller design of networked control system using genetic algorithm [C]// *Proc of IEEE Int Symposium on Industrial Electronics*. Pusan, Korea: IEEE Press, 2001, 3: 1845 – 1850.
- [33] LEE S, LEE S H, LEE K C. Remote fuzzy logic control for networked control system [C]// *Proc of the 27th Annual Conf of the IEEE Industrial Electronics Society*. Denver, CO, USA: IEEE Press, 2001, 3: 1822 – 1827.
- [34] CHAN H, ÖZGÜNER Ü. Closed-loop control systems over a communication network with queues [C]// *Proc of American Control Conference*. Baltimore, MA, USA: IEEE Press, 1994:811 – 815.
- [35] CHAN H, ÖZGÜNER Ü. Control of interconnected systems over a communication network with queues [C]// *Proc of the 33rd Conf on Decision and Control*. Lake Buena Vista, FL, USA: IEEE Press, 1994:4104 – 4109.
- [36] CHANG H, ÖZGÜNER Ü. Optimal control of systems over a communication network with queues via a jump system approach [C]// *Proc of the 4th IEEE Conf on Control Applications*. Albany, New York, USA: IEEE Press, 1995:1148 – 1153.
- [37] YOOK J K, TILBURY D M, SOPARKAR N R. A design methodology for distributed control systems to optimize performance in the presence of time delays [C]// *Proc of American Control Conference*. Chicago, IL, USA: IEEE Press, 2000, 3: 1959 – 1964.
- [38] 魏震. 网络化控制系统在线时延估计及其控制的综合研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2002.
(WEI Zhen. *The synthetic research on online delay evaluation and control for networked control systems* [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2002.)
- [39] BUSHNELL L, BELDIMAN O, WALSH G. *An equivalence between a control network and a switch hybrid system* [EB/OL]. www.enme.umd.edu/ice-lab/papers/ps/LECCS98.ps, Jan 10, 2000.
- [40] YE H, WALSH G C, BUSHNELL L G. Real-time mixed-traffic wireless networks [J]. *IEEE Trans on Industrial Electronics*, 2001, 48(5):883 – 890.
- [41] RAJA P, ULLOA G. Priority polling and dynamic time-window mechanisms in a multi-cycle Fieldbus [C]// *Proc of the Computers in Design, Manufacturing, and Production*. Paris, France: IEEE Computer Science Press, 1993:452 – 460.
- [42] HONG S H. Bandwidth allocation scheme for cyclic-service fieldbus networks [J]. *IEEE/ASME Trans on Mechatronics*, 2001, 6(2): 197 – 204.
- [43] HONG S H, KIM Y C. Implementation of a bandwidth allocation scheme in a token-passing fieldbus network [J]. *IEEE Trans on Industry and Measurement*, 2002, 51(2):246 – 251.
- [44] PARK H S, KIM Y H, KIM D S, et al. A scheduling method for network-based control systems [J]. *IEEE Trans on Control Systems Technology*, 2002, 10(3):318 – 330.
- [45] ZUBERI K M, SHIN K G. Design and implementation of efficient message scheduling for controller area network [J]. *IEEE Trans on Computers*, 2000, 49(2):182 – 188.
- [46] NATALE M D. Scheduling the CAN bus with earliest deadline techniques [C]// *Proc of the 21st IEEE Real-Time Systems Symposium*. Orlando, FL, USA: IEEE Press, 2000:259 – 268.
- [47] CENA G, VALENZANO A. Achieving round-robin access in controller area networks [J]. *IEEE Trans on Industrial Electronics*, 2002, 9(6):1202 – 1213.
- [48] KWEON S K, SHIN K G, ZHENG Z. Statistical real-time communication over Ethernet for manufacturing automation systems [C]// *Proc of the 15th IEEE Real-Time Technology and Applications Symposium*. Vancouver, British Columbia, Canada: IEEE Press, 1999: 192 – 202.
- [49] KWEON S K, SHIN K G. Achieving real-time communication over Ethernet with adaptive traffic smoothing [C]// *Proc of the 16th IEEE Real-Time Technology and Applications Symposium*. Washington, DC, USA: IEEE Press, 2000, 90 – 100.
- [50] OTANEZ P G, MOYNE J R, TILBURY D M. Using deadbands to reduce communication in networked control systems [C]// *Proc of American Control Conference*. Anchorage, Alaska, USA: IEEE Press, 2002, 4:3015 – 3020.
- [51] OTANEZ P G. *Performance optimization of networked control systems* [EB/OL]. <http://www.eecs.umich.edu/~impact/Publications/otanez-performance-2002.pdf>, Jun 07, 2002.
- [52] YOOK J K, TILBURY D M, SOPARKAR N R. Trading computation for bandwidth: reducing communication in distributed control systems using state estimators [J]. *IEEE Trans on Control Systems Technology*, 2002, 10(4):503 – 518.
- [53] 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.
- [54] HONG S H, KIM W H. *Bandwidth allocation scheme in CAN protocol* [EB/OL]. <http://fieldbus.hanyang.ac.kr/paper/1-5.pdf>, 2000.
- [55] 白涛, 吴智铭, 杨根科. 网络化控制系统中的抖动优化调度算法 [J]. *控制与决策*, 2004, 19(4):297 – 401.

- (BAI Tao, Wu Zhiming, YANG Genke. Optimal scheduling algorithm to reduce jitter in networked control systems (NCSs) [J]. *Control and Decision*, 2004, 19(4): 279 - 401.)
- [56] TIPSUWAN Y, CHOW M Y, Network-based controller adaptation for network QoS negotiation and deterioration [C] // *Proc of the 27th Annual Conf of IEEE Industrial Electronics Society*. Denver, CO, USA: IEEE Press, 2001: 1794 - 1799.

作者简介:

白 涛 (1975 —), 女, 博士研究生, 研究方向为网络化控制系统、系统仿真, E-mail: zhaobait@sjtu.cdu.cn;

吴智铭 (1936 —), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为离散事件系统和混合动态系统、分布实时嵌入式系统及信息集成;

杨根科 (1963 —), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为复杂系统、通讯网络控制和供应链管理等.

(上接第 583 页)

- [11] 王耀南. 智能控制系统——模糊逻辑·专家系统·神经网络控制[M]. 长沙: 湖南大学出版社, 1996: 102 - 106.
(WANG Yaonan. *Intelligence Control System - Fuzzy Logic, Expertness System, Neural Network Controllability* [M]. Changsha: HuNan University Press, 1996: 102 - 106.)
- [12] 段玉倩, 贺家李, 贺继红. 基于人工神经网络方法的微机变压器保护[J]. 中国电机工程学报, 1998, 18(3): 190 - 194.
(DUAN Yuqian, HE Jiali, HE Jihong. Computerized transfofmer protection based on artificial neural network [J]. *Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering*, 1998, 18(3): 190 - 194.)

作者简介:

童 桦 (1959 —), 女, 副教授, 湖南大学科技处副处长, 1989 年湖南大学电气工程系研究生毕业, 研究方向为自动控制理论与应用、人工智能, 发表论文多篇;

刘一江 (1955 —), 男, 湖南大学土木工程学院教授, 发表论文 70 余篇, 主持完成省部级科研项目 12 个, 获新技术新产品金奖及国家实用新型专利 1 项, 研究方向为电力系统自动化、自动控制理论与应用、人工智能;

易理刚 (1970 —), 男, 1998 年湖南大学电气工程系研究生毕业, 研究方向为电力系统自动化、自动控制理论与应用、人工智能.