

文章编号: 1001-0920(2009)02-0181-06

网络化控制系统综合控制方法研究

康 军, 戴冠中

(西北工业大学 自动化学院, 西安 710072)

摘 要: 在阐明网络化控制系统采用兼顾控制系统性能质量(QoP)和网络服务质量(QoS)的控制方法的必要性和可行性的基础上,提出了一种能够兼顾控制系统 QoP 和网络 QoS 的网络化控制系统综合控制方法,并对其工作机理进行分析.在对目前相关的研究工作进行分析总结的基础上,提出了一种基于网络化控制系统综合控制方法的控制模型,最后通过一个数字仿真实例说明了该模型的有效性.

关键词: 网络化控制系统; 综合控制; 控制系统性能质量; 服务质量

中图分类号: TP393; TP202 **文献标识码:** A

Research on synthesizing control of networked control systems

KANG Jun, DAI Guanzhong

(College of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China. Correspondent: KANG Jun, E-mail: kangjun_1@263.net)

Abstract: The paper explains the necessity and the feasibility of the control methodology of networked control system (NCS) using the control method which guarantees the quality of control performance (QoP) and quality of network service (QoS). Then a kind of synthesizing control method of NCS to guarantee QoP and QoS is proposed, and its mechanism is discussed. Moreover, recent related NCS control techniques and strategies are presented and their state-of-arts are discussed. Aiming at the disadvantages of existing studies, a control model based on the synthesizing control method of NCS is presented. Finally, simulation results show the effectiveness of the proposed model.

Key words: Networked control system; Synthesizing control; Quality of performance; Quality of service

1 引 言

网络化控制系统(NCS)近年来已成为控制领域中的一个新的研究方向,在先进飞行器、机器人、过程控制、军事指挥等诸多领域中均有成功的应用^[1]. NCS是由控制系统与网络系统共同构成的复杂系统,NCS中的控制系统 QoP 和网络 QoS 之间存在相互制约关系.传统的 NCS 的研究方法为了降低控制系统设计和网络实现两个阶段工作的复杂性,一般将网络性能和控制系统性能之间的交叉耦合关系进行简化,如 Zhang 等^[2]的研究方法.但这种简化割裂了 NCS 中控制系统 QoP 和网络 QoS 的联系,从而也就很难保证系统良好的总体性能.目前,针对兼顾控制系统 QoP 和网络 QoS 的设计方法的研究已成为一个新的热点.兼顾控制系统 QoP 和网络 QoS 的 NCS 设计方法是指^[3]:以优化 NCS 总体性能为目标,将网络性能、带宽资源限制等更多的网络因素融入网络化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.

目前,针对兼顾控制系统 QoP 和网络 QoS 的 NCS 控制与综合方法的具有代表性的相关研究成果主要包括:彭晨等^[4]利用离散 LQR (Linear quadratic regulator) 方法来设计 NCS 控制系统控制器,并提出了网络控制器与网络的交互设计方法,利用该方法还可获得保证控制系统的综合性能指标最优条件下的网络传输延迟上界.但该方法仅考虑了控制系统控制器的设计问题,而没有考虑网络资源的调度问题. Hong 等^[5]借助“窗口”的概念,提出了针对循环服务的 NCS 多控制闭环采样周期调度算法,并建立了 NCS 控制系统性能与网络性能间的约束关系.在满足系统稳定性和避免“空采样”及“数据滤除”(保证动态性能)^[6]条件下,确定各控制闭环的采样周期,并将带宽资源表达为各控制闭环的采样周期时段内的最大允许服务窗口个数.在文献[7-9]中, Hong 进一步研究了针对周期数据、随机

收稿日期: 2007-12-07; 修回日期: 2008-03-25.

作者简介: 康军(1975—),男,陕西咸阳人,博士生,从事基于网络环境的复杂控制系统的研究;戴冠中(1937—),男,上海人,教授,博士生导师,从事现代控制理论、计算机控制技术等研究.

实时数据和普通数据等 3 类数据的带宽配置策略, 该算法虽然在保证系统性能的同时提高了带宽利用率, 却没有从优化的角度对带宽资源的使用加以考虑. 白涛等^[10]基于周期数据的窗口模型, 对循环服务型 NCS 提出了以网络节点划分时段, 非周期数据动态共享时间窗的带宽资源配置策略. 该配置策略在满足系统实时性和网络稳定性的同时, 有效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. 然而, Hong 和白涛的研究成果中均没有控制系统的设计问题. Tipsuwan 等^[11,12]提出了由当前网络的 QoS 状况决定控制系统采样周期, 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. Tipsuwan 还进一步研究了在网络 QoS 变化的情况下, 直流电机控制器的增益自适应控制问题. 但该方法使 NCS 系统以降低控制系统 QoS 为代价来获得对网络 QoS 变化的适应性, 因此该方法很难保证 NCS 总体性能的优化.

通过以上分析可知, 目前针对兼顾控制系统 QoS 和网络 QoS 的 NCS 控制与综合方法的研究仍然比较片面, 并没有真正将 NCS 控制系统的设计与其网络实现联系起来. 本文在阐明了采用兼顾控制系统 QoS 和网络 QoS 的 NCS 控制方法的必要性和可行性的基础上, 提出了 NCS 综合控制方法, 即一种将控制系统控制器的设计和网络资源调度算法联系起来从而兼顾控制系统 QoS 和网络 QoS 的 NCS 设计方法; 然后对 NCS 综合控制方法的工作机理进行分析, 提出了一种基于该综合控制方法的控制模型, 并给出了数值仿真实例.

2 NCS 综合控制方法

NCS 的体系结构分为直接控制结构与分级控制结构两大类^[13]. 在直接控制结构中, NCS 的闭环控制回路由控制器和远端被控单元组成, 其中远端被控单元包括执行器件、传感器件和被控对象. 在分级控制结构中, NCS 由一个主控制器和多个远端节点构成, 其中远端节点是由远端控制器、执行器、传感器和被控对象组成的一个本地闭环控制系统. 在 NCS 分析设计的过程中, 对于分级控制结构中的远端节点通常可用一个状态空间方程或传递函数表示, 从而可将其近似看作一个远端被控单元, 因此可以统一针对直接控制结构进行 NCS 的分析设计^[1].

本文对 NCS 的分析主要针对的是直接控制结构, 如图 1 所示. 在此只给出第 j 条闭环控制回路的结构, 并设定被控对象为连续时间系统. 其中: R_k^j 表示该控制回路的参考输入 (上标 j 表示任意一个控制回路, 下标 k 表示第 k 周期的数字量, 后同), $Y^j(t)$ 表示控制回路连续型输出量, Y_k^j 表示采样量

化后的数字型输出量, \tilde{Y}_k^j 表示通过网络传输到控制器端的数字型输出量, U_k^j 表示控制器给出的控制量, \bar{U}_k^j 表示通过网络传输到远端被控单元的数字型控制量. 系统中存在两类网络传输延迟: t_{ca}^j 即 Y_k^j 信号的网络传输延迟; t_{ca}^j 即 U_k^j 信号的网络传输延迟. 另外, 定义控制器计算时间为 t_c^j , 在应用中通常将 t_c^j 归入 t_{ca}^j . 由此定义 NCS 的第 j 条控制回路的闭环传输延迟 D_j , 为从远端被控单元数据 Y_k^j 准备就绪时刻到控制器数据 U_k^j 被完全接收时刻的时间间隔 (忽略了执行器的响应时间). 设该回路在采样周期为 T_j , 其传感器为时间驱动, 控制器与执行器为事件驱动的条件下, 闭环传输延迟可表示为

$$D_j^i = t_{ca}^j + t_{ca}^j. \quad (1)$$

第 j 条控制回路的 QoS 直接依赖于闭环传输延迟 D_j^i ^[5]. Kim 等^[14]基于线性矩阵不等式 (LMI) 相关理论, 提出了获得保证控制系统稳定的闭环传输延迟 D 的上界的方法, 其中 D 的上界称为 MADB (Maximum Allowable Delay Bounds), 即当 $D < \text{MADB}$ 时, 能够保证控制系统稳定性.

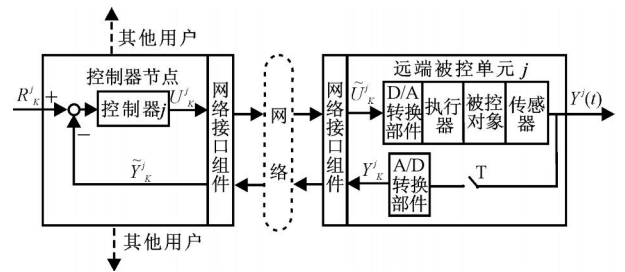


图 1 NCS 直接控制型体系结构

丢包是另一个影响 NCS 控制系统 QoS 的因素, 如图 2 所示. 丢包会使控制系统闭环延迟 $\bar{D}_j = D_j + kT_j, k = 0, 1, \dots$, 其中 k 取决于连续丢包的数量. 可见, 丢包会增加控制系统的闭环延迟, 进而影响控制系统 QoS, 甚至造成系统的不稳定. 网络中的多包传输方式也会影响到控制系统的 QoS. 在多包传输情况下, 由于增加了数据的分片与重组的处理时间, 会使网络传输延迟增加; 同时多包传输增加了网络负载, 也可能使网络传输延迟增加. 网络延迟的增加, 进一步会导致系统闭环延迟的增加, 从而降低控制系统 QoS. 在实际应用中, 对于单类型网络, 可定义传感数据或控制数据为定长的单包传输方式, 以避免多包传输对控制系统 QoS 的影响.

由上述分析可知, NCS 中的网络延迟和丢包率的增加, 均会导致控制系统闭环延迟的增加, 从而影响控制系统 QoS. 而网络延迟 t_b 和丢包率 L 是表征网络 QoS 的主要参数指标. 在 NCS 设计过程中, 当网络选定后, 它们主要受网络负载的影响. 由网络

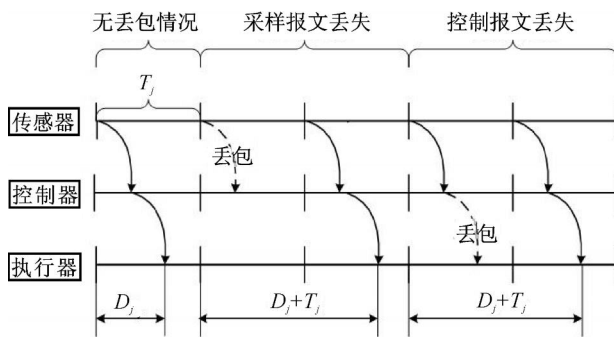


图 2 丢包对闭环延迟的影响

Power 曲线^[15]可知,随着网络负载的增加,网络 QoS 逐渐提高(即网络延迟 t_d 和丢包率 L 减小),当到达最佳负载点时,网络 QoS 性能达到最优,当网络负载继续升高超过最佳负载点时,将出现网络过载而导致 QoS 迅速下降.因此,网络 QoS 存在着最佳性能点.

实际的 NCS 通常是由多节点、多类型数据共享网络带宽的,而网络的带宽资源及其服务和承载能力是有限的,因此如果对 NCS 的网络带宽资源不进行合理调度控制,将会导致系统不能满足闭环传输延迟约束,从而难以保证控制系统的 QoP. 网络系统在满足网络资源可调度性条件下,网络 QoS 将会直接依赖于网络资源调度策略.其中,网络资源调度策略是在满足网络资源可调度性条件下,通过给网络用户合理分配网络资源进而控制网络负载,通过使网络负载达到最佳进而使网络满足所需的网络 QoS 性能约束.因此,可通过网络资源调度机制来控制网络负载,使网络达到最佳负载从而获得最佳网络 QoS 性能,同时在满足其约束条件的前提下,也使控制系统闭环延迟取得最佳值.

总之,控制系统的 QoP 需求决定了各个控制回路的闭环延迟约束,只有满足 NCS 所有控制回路的闭环延迟约束才能满足控制系统 QoP 需求.而控制回路的闭环延迟约束又是网络 QoS 指标的函数(如式(1)所示),从而由控制回路的闭环延迟约束又可以获得 NCS 系统对网络 QoS 的需求,因此要满足控制系统 QoP 需求就必须满足相应的网络 QoS 需求.而网络 QoS 需求是通过网络资源调度机制来保障的,网络资源调度机制通过对各个网络节点合理分配网络带宽,依此控制网络负载,从而获得所需的网络 QoS.因此兼顾控制系统 QoP 和网络 QoS 的 NCS 控制方法,理论上也是可实现的.

NCS 同时包含控制系统和网络系统两个动态系统,所以 NCS 控制系统的设计与综合也必然与传统控制系统的设计有所区别.NCS 控制系统的设计与综合不仅应包含对控制系统控制器的设计,同时

也应该包括对网络资源调度策略的选配.因此本文所提出的 NCS 综合控制方法就是在控制系统 QoP 与网络 QoS 的双重约束条件下,设计控制系统控制器并同时选配网络资源调度策略,从而当系统存在最佳解时必定会使该系统同时满足控制系统 QoP 与网络 QoS 的双重约束,进而实现使 NCS 总体性能优化的设计目标.

3 NCS 综合控制模型

NCS 综合控制方法的工作机理:在 NCS 的各个控制回路的被控对象模型中包含表征网络性能的参数(一般指网络延迟),这里是在某一区间上的任意取值,设计控制器时仅代入其上界值 $\sup(\cdot)$,同时假设当代入 $\sup(\cdot)$ 时如果所设计的控制系统满足其 QoP 要求,则当在其取值区间上任意变化时,控制系统依然满足控制系统 QoP 要求.如果令各个控制回路的 $\sup(\cdot)$ 在一个合理范围变化时(在这里 i 表示控制回路编号, j 表示相应的 取样编号),在满足该控制回路 QoP 约束 i 的条件下,会得到一个控制器集合 $\{c_{ij}\}$. 设集合 $N = \{n_1, n_2, \dots, n_n\}$, 其中 $n_{ij} = \{(i_j, c_{ij})\}$, 下标 n 表示控制回路数目, i_j 表示所取的网络性能参数的上限样本, c_{ij} 表示取样 i_j 时所设计的满足 i 约束的控制器.从各个 n_i 中任选一个 n_{ij} 构成一个组合,验证其中各个控制回路的 i_j 组合是否满足网络资源(带宽)的可调度性条件(依网络资源调度策略而定),将所有满足可调度性条件的组合构成一个新的集合 $NS = \{ns_m\}$, $ns_m = \{(c_{1j}, c_{1j}), (c_{2j}, c_{2j}), \dots, (c_{nj}, c_{nj})\}$. 其中,如果 $NS = \emptyset$, 则说明网络不可调度即网络过载,此时应该返回对控制系统进行调整(如减少节点数,降低 QoP 约束等等).对 NS 中各个元素分别计算其能产生的理论负载,找到与网络最佳负载最接近的一个组合,即该 NCS 的最佳性能解 ns^* . 采用最佳性能解中各个回路对应的控制器 c_{ij}^* , 并以最佳性能解中各个回路对应的 i_j^* 为网络资源调度的约束条件.因为满足网络资源的可调度性条件,所以通过网络资源调度策略可以保证满足这些约束条件.因此可知该最佳性能解 ns^* 在满足控制系统 QoP 约束条件下也使网络性能最佳,即做到了同时兼顾控制系统 QoP 和网络 QoS. 其中网络最佳负载在实际中可通过网络性能测试仪测量获得,如使用 Spirent 的 SmartBits R 6000B 网络性能测试仪.

根据上述 NCS 综合控制方法的工作机理,在此提出了一种 NCS 综合控制模型,如图 4 所示.在该控制模型中主要包括两类网络节点:网络化控制器节点(NC)与网络化被控对象节点(NP),其中 NC 中包含各个控制回路的逻辑控制器单元(LCU),NC

通常是一个高性能的网络物理节点. NCS 的各控制回路分别包括一个 LCU 和一个 NP 节点,所有节点共享网络信道. NC 主要包括 LCU 集模块、QoS 约束生成模块、主 QoS 控制模块和网络接口模块;NP 则由被控对象. QoS 协控制器模块与网络接口模块组成.

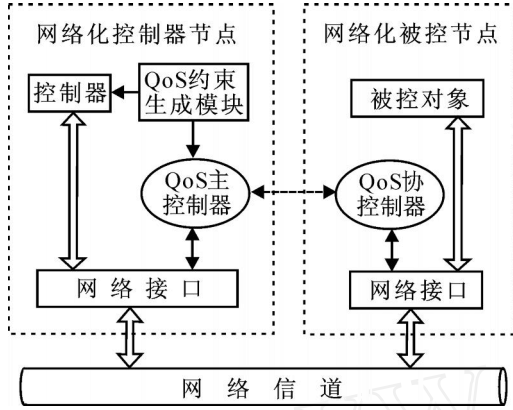


图 3 网络化控制综合控制模型

NCS 综合控制模型的工作流程如下:

- 1) 已知网络最佳负载,确定所采用的网络带宽调度策略所对应的可调度性条件.
- 2) 合理制定各个控制回路闭环延迟样本域及取样步长,一般可以假设控制回路闭环延迟样本域为 $(2l, T_j]$. 其中: l 为每个数据包的传输时间长度, $l = \text{size}/B$ (size 为各控制回路均采用的固定长度,传输带宽为 B), T_j 为该回路的采样周期(根据相关的经验法则确定),取样步长为网络带宽资源调度方法所采用的基本时间颗粒(l 的整数倍).
- 3) 设第 i 条控制回路的 QoS 约束为 τ_i . 令各个控制回路的 $\sup(\tau_{ij})$ 在 $(2l, T_j]$ 上以一定的取样步长取样,并将取样值代入被控对象模型,选择控制系统控制算法,设计各个控制回路控制器,会得到一个控制器集合 $\{c_{ij}\}$. 设集合 $N = \{n_1, n_2, \dots, n_n\}$, 其中 $n_{ij} = \{(\tau_{ij}, c_{ij})\}$, 下标 n 表示控制回路数目, τ_{ij} 表示所取的网络性能参数的上限样本, c_{ij} 表示取样 τ_{ij} 时所设计的满足 τ_i 约束的控制器.
- 4) 分别从各个 n_i 中选一个 n_{ij} 构成一个组合(选择时需要遵循网络带宽调度策略中对各控制回路延迟界的协调性约定),验证其中各个控制回路的 τ_{ij} 组合是否满足网络资源(带宽)的可调度性条件(由网络带宽调度策略而定),将所有满足可调度性条件的组合构成一个新的集合 $NS = \{ns_m\}$, 其中 $ns_m = \{(1., c_{1.}), (2., c_{2.}), \dots, (n., c_{n.})\}$. 如果 $NS = \emptyset$, 则网络不可调度即网络过载,此时应该返回对控制系统进行调整(如减少节点数,降低 QoS 约束等等);
- 5) 对 NS 中各个元素分别计算其能产生的理论

负载,找到与网络最佳负载最接近的一个组合,即该 NCS 的最佳性能解 ns^* . 采用最佳性能解中各个回路对应的控制器 c_{ij}^* 为相应的 LCU,并以最佳性能解中各个回路对应的 τ_{ij}^* 为网络资源调度的约束条件,将其提交给 NC 中的 QoS 主控制器.

6) NC 中的 QoS 主控制器根据网络带宽调度策略来决定在各个超周期(Hyperperiod)内各个控制回路占用带宽的频率与相位,并生成调度表;然后将调度表通知各个 NP 中的 QoS 协控制器,各个 QoS 协控制器确认之后系统开始按照次调度表运行. 至此 NCS 综合控制模型就完成了初始协商过程. 初始协商过程可通过脱机方式进行计算,然后将结果提交给系统相应模块. 这样不仅可以提高系统的运行效率,而且可以在不影响系统运行效率的前提下应用更复杂的控制与调度算法. 同时该模型是可重配置的,当被控对象发生变化时,只需重新启动协商过程即可.

4 数字仿真实例

为了进一步说明 NCS 综合控制模型,本文给出一个数字仿真实例,在 NCS 控制系统建模时仅考虑网络时延因素. 设该 NCS 有 3 条控制回路即 6 个节点,其中控制回路 1,2,3 分别表示成(1,2),(3,4)和(5,6),节点 1,3,5 指 LCU 并包含在 NC 中,所有回路控制器设计均采用文献[9]中所使用的 DLQR(Discrete Linear Quadratic Regulator)方法,控制系统性能指标如下:

$$J(kh) = \text{sum}(x^T Qx + u^T Ru + 2x^T Nu), \quad (2)$$

其中 Q, R, N 分别是给定的控制系统性能参数. 表 1 中给出了该 NCS 相关的参数条件.

表 1 NCS 相关参数与条件

		带宽 B	500 Kbps	
网络参数		数据包长度 L	1000 bits	
		网络最大负载 LM	400 Kbps($B * 80\%$)	
		The 1 st loop	The 2 nd loop	The 3 rd loop
控制回路参数	采样周期 T_i	0.1 s		
	控制性能指标	3		
性能参数		$P = I, Q = I, N = 0$		

各个控制回路的被控对象状态空间模型如下所示:

1 号回路

$$\dot{x}^1(t) = \begin{bmatrix} 1.3 & 1.1 \\ 0.3 & 1.2 \end{bmatrix} x^1(t) + \begin{bmatrix} 1 \\ 6 \end{bmatrix} u^1(t); \quad (3)$$

2 号回路

$$\dot{x}^2(t) = \begin{bmatrix} 1.2 & 1.0 \\ 0.4 & 1.1 \end{bmatrix} x^2(t) + \begin{bmatrix} 1 \\ 6 \end{bmatrix} u^2(t); \quad (4)$$

3 号回路

$$\dot{x}^3(t) = \begin{bmatrix} 1.3 & 1.1 \\ 0.5 & 1.4 \end{bmatrix} x^3(t) + \begin{bmatrix} 1 \\ 6 \end{bmatrix} u^3(t). \quad (5)$$

应用文献[2]提出的NCS被控对象状态空间模型离散化方法将其离散化,其中离散化状态空间模型中仅引入了传输时延参数,同时引入被控对象广义状态向量 $Z(kh) = (X^T(kh), U^T((k-1)h))^T$,其中 h 表示采样周期. 设传输延迟即闭环延迟的变化区间为 $(0.004\text{ s}, 0.1\text{ s})$, 取样步长为 0.005 s . 根据文献[10, 14]中所提出的网络带宽调度算法,可归纳网络带宽可调度性条件为:单位时间内网络实际负载小于网络能承受的最大负载. 因此可提出网络带宽的可调度性条件如下:

$$\text{load} = 2L \prod_{i=1}^m \frac{1}{i} LM. \quad (6)$$

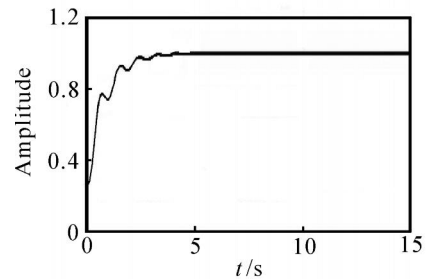
其中:load表示网络的实际负载, m 表示控制回路数, i 表示控制回路的取样延迟. 即网络带宽的可调

表 2 集合 N 的仿真结果

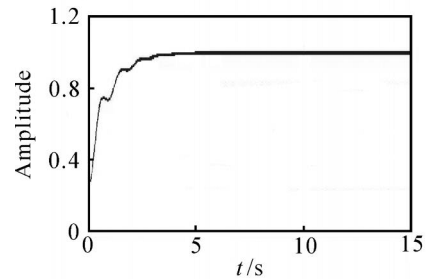
序号	延迟 样本/s	实际性能 指标	控制增益阵 K
第 1 循环 n_1	1	2.9662	[1.8675 0.9751 0.3593]
	2	2.9246	[1.8539 0.9591 0.3209]
	3	2.8841	[1.8399 0.9430 0.2831]
	4	2.8448	[1.8255 0.9270 0.2458]
	5	2.8067	[1.8107 0.9111 0.2090]
	6	2.7697	[1.7956 0.8952 0.1727]
	7	2.7338	[1.7800 0.8793 0.1370]
	8	2.6990	[1.7641 0.8635 0.1019]
	9	2.6652	[1.7479 0.8478 0.0673]
	10	2.6352	[1.7312 0.8322 0.0334]
第 2 循环 n_2	1	2.9889	[1.8304 0.8919 0.2721]
	2	2.9511	[1.8166 0.8776 0.2364]
	3	2.9144	[1.8024 0.8634 0.2011]
	4	2.8788	[1.7878 0.8491 0.1663]
	5	2.8442	[1.7728 0.8349 0.1320]
	6	2.8107	[1.7574 0.8207 0.0982]
	7	2.7782	[1.7417 0.8065 0.0649]
	8	2.7466	[1.7256 0.7924 0.0322]
第 3 循环 n_3	1	2.9813	[1.8609 0.9600 0.2529]
	2	2.9410	[1.8449 0.9427 0.2149]
	3	2.9020	[1.8285 0.9255 0.1776]
	4	2.8641	[1.8118 0.9084 0.1408]
	5	2.8275	[1.7948 0.8913 0.1047]
	6	2.7920	[1.7774 0.8744 0.0692]
	7	2.7576	[1.7596 0.8576 0.0343]

度性条件为:当网络系统满足式(6)时,网络带宽可调度. 经过仿真可以得到 N , 如表 2 所示.

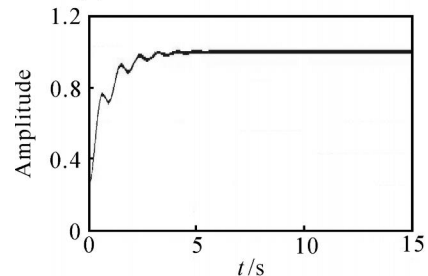
从各个 n_i 中任选一个 n_{ij} 构成一个组合(组合中的延迟样本必须满足网络带宽调度策略中的协调性条件,即先选定某个回路的延迟界为基本延迟界 n_{base} ,其余的回路延迟样本应分别是该基本延迟界的 2^i 倍,其中 $i = 1, 2$),然后验证其中各个控制回路的 n_{ij} 组合是否满足网络带宽的可调度性条件式(6). 将所有满足可调度性条件的组合构成一个新的集合 NS , 经过计算可得 $NS = \{(n_{13}, n_{25}, n_{36}), (n_{17}, n_{21}, n_{36}), (n_{19}, n_{21}, n_{34}), (n_{13}, n_{27}, n_{34})\}$. 由式(6)中负载的计算方法,经过验算,可知 $n_{S1} \sim n_{S4}$ 的理论负载均为 325 Kbps,由前面分析可知 $n_{S1} \sim n_{S4}$ 均为最佳解,可任意选用一组应用,在实际中可以根据对各个控制回路性能要求的期望程度,选择其中一组. 如若对 1 号回路性能要求相对更高,则可以选择 (n_{19}, n_{21}, n_{34}) , 若对 2 号回路性能要求相对更高,则可以选择 (n_{17}, n_{21}, n_{36}) . 在此假设选择 (n_{13}, n_{25}, n_{36}) , 各控制回路分别采用 n_{13}, n_{25}, n_{36} 中指定的控制器,并满足相应的延迟约束时,各控制回路的单位阶跃响应如图 4 所示.



(a) 1号控制回路单位阶跃响应



(b) 2号控制回路单位阶跃响应



(c) 3号控制回路单位阶跃响应

图 4 各控制回路的单位阶跃响应

5 结 论

NCS 在实际工程中存在着广泛的应用需求,对 NCS 的研究目前已经成为一个热点,但对于 NCS 系统的分析与设计仍然存在许多问题没有解决,相关理论亟待完善.由于 NCS 是网络技术与控制技术紧密结合的复杂系统,其整体性能会受到控制系统性能、网络承载能力和网络运行性能等诸多因素的综合影响与制约,这就使得只有采用综合考虑控制系统性能 QoS 和网络服务质量 QoS 的设计方法才能取得最佳的总体性能.本文在总结目前相关研究成果的基础上,概念性地提出了一种新的综合性控制模型,该模型还不完善,仍然存在许多问题需要进一步的理论和实践验证.

参考文献(References)

- [1] Tipsuwan Y, Chow M Y. Control methodologize in networked control system [J]. Control Engineering Practice, 2003, 10(11): 1099-1111.
- [2] Zhang W, Branickym S, Philips S M. Stability of networked control system [J]. IEEE Control Systems Magazine, 2001, 21(1): 84-99.
- [3] 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): 586-590.
(Bai T, Wu Z M, Yang G K. Networked control systems[J]. Control Theory and Applications, 2004, 21(4): 586-590.)
- [4] 彭晨, 岳东. 网络环境下基于网络 QoS 的网络控制器优化设计[J]. 自动化学报, 2007, 2(33): 214-217.
(Peng C, Yue D. Network-based optimal controller design based on QoS[J]. Acta Automatica Sinica, 2007, 2(3): 214-217.)
- [5] Hong Seong Park. 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.
- [6] Halevi Y, Ray A. Integrated communication and control systems: Part -Analysis, Part -Design[J]. ASME J of Dynamic Systems, Measurement and Control, 1988, 110(4): 367-373, 374-381.
- [7] Hong Seong Park, Yu Chul Kim. Bandwidth allocation scheme in CAN protocol[J]. IEEE Proceedings-Control Theory and Applications, 2000, 147(1): 37-44.
- [8] Hong Seong Park. Bandwidth allocation scheme for cyclic-service fieldbus networks [J]. IEEE Trans on Machatronics, 2001, 6(2): 197-204.
- [9] Hong Seong Park, Yu Chul Kim. Implementation of a bandwidth allocation scheme in a token-passing fieldbus network [J]. IEEE Trans on Instrumentation and Measurement, 2002, 51(2): 246-251.
- [10] 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.)
- [11] 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: IEEE Press, 2001: 1794-1799.
- [12] Chow M Y, Tipsuwan Y. Gain adaptation of networked DC motor controllers based on QOS variations[J]. IEEE Trans on Industrial Electronic, 2003, 50(5): 936-943.
- [13] Chow M Y, Tipsuwan Y. Network-based control system: A tutorial[C]. Proc of the 27th Annual Conf of IEEE Industrial Electronics Society. Denver: IEEE Press, 2001: 257-261.
- [14] Dong-Sung Kim, Young Sam Lee, Wook Hyun Kwon, et al. Maximum allowable delay bounds of networked control systems [J]. Control Engineering Practice, 2003, 11(11): 1301-1313.
- [15] Peterson L L, Davie B S. Computer networks: A system approach [M]. 3rd ed. Morgan Kaufmann Publisher, 2003: 454-457.