

# 基于 QoS 性能补偿的远程控制系统

邵奇可<sup>1</sup> 俞立<sup>1</sup> 张贵军<sup>1</sup>

**摘要** 以远程控制中基于特定网络的 QoS (Quality-of-service) 性能补偿为研究内容, 首先对 QoS 在线监测方法进行研究, 进而探讨在给定系统性能指标和特定网络的 QoS 性能下的远程控制器设计问题, 最后利用自行开发的远程控制系统, 通过校园网对实验室三阶水槽液位控制系统进行远程控制实验研究. 实验结果表明基于 QoS 性能补偿的控制方法具有较好的可行性.

**关键词** 远程控制系统, QoS, 广义预测控制, 时延

**中图分类号** TP273

## A Remote Control System Based on QoS Performance Compensation

SHAO Qi-Ke<sup>1</sup> YU Li<sup>1</sup> ZHANG Gui-Jun<sup>1</sup>

**Abstract** An approach for networked three-layer water tank control system is advanced using a predictive compensation strategy to adapt the detrimental effect of networked QoS induced by communication networks. Firstly, a dynamic on-line measurement method is presented for typical networked QoS performance. Secondly, a compensation strategy is designed for the given networked QoS and system performance targets. Finally, a relevant software is developed and tested through campus-wide net. The experimental results illustrate the effectiveness of the proposed scheme.

**Key words** Remote control systems, QoS, generalized predictive control, time delay

## 1 问题描述

近年来, 由于网络控制系统<sup>[1]</sup>具有资源共享、连线少、易于扩展和维护等优点而越来越受到人们的重视. 但是, 由于系统的信息必须通过网络分时传送, 不可避免地在控制环路中引入了传输时延. 致使控制系统性能下降甚至不稳定, 同时也给网络控制系统的分析、设计带来了很大困难.

根据网络控制系统的时延特点, 目前有不同的方法对其进行分析和设计. 如文 [1] 针对时延具有定常分布概率的系统和具有 Markov 链分布概率的系统进行建模, 采用随机控制的方法研究了网络控制系统稳定性和 LQG (Linear quadratic Gaussian) 随机最优控制器设计问题. 文 [2] 针对时延的随机性和系统噪声问题, 利用在控制器和执行器接收端设置接收缓冲区的方法, 提出一种确定性的时延补偿器结构, 该结构可以同时实现对噪声的滤波处理. 类

似的研究方法还可见文献 [3,4]. 综合以上研究方法, 不难发现主要集中在工控网络进行研究, 在网络特性已知的情况下, 假设系统的网络传输时延满足某种分布或限定于某个范围内, 而不考虑网络存在非理想状况, 或仅考虑一种网络异常状况. 然而网络传输时延和网络的传输速率、网络所采用的通讯协议、网络的负载、数据包大小等因素有关<sup>[5,6]</sup>, 从而使得以上网络控制系统设计方法, 具有较大的保守性. 更进一步, 由于所设计的控制器缺少对传输网络 QoS 性能的补偿, 随着 QoS 性能的动态变化, 整个控制系统的性能得不到相应的保证, 因此很难直接推广到实际应用.

本文首先研究给定网络环境下系统的 QoS 性能在线监测方法, 进而探讨给定网络的 QoS 性能和系统综合性能指标下的控制器设计问题, 最后给出一个基于校园网的三阶水槽液位远程控制系统的实际应用实例.

## 2 远程控制系统

### 2.1 远程控制系统的结构

本文论及的远程控制系统是通过校园网, 对实验室的三阶水槽进行远程的过程控制实验. 该系统主要由三个部分组成: 客户端、实验室服务器端和受控实验设备. 系统的整体框图如图 1 所示. 其中实验室服务器主要功能包括: 实时数据采集、数据通信等. 客户端可以是服务器许可的任何校园网

收稿日期 2005-7-21 收修改稿日期 2006-1-20  
Received July 21, 2005; in revised form January 20, 2006  
国家杰出青年科学基金 (60525304), 浙江省新世纪高等教育教学改革  
研究项目 (yb04013), 浙江省自然科学基金 (y104277) 和浙江工业大学  
科技发展基金项目资助  
Supported by the National Science Fund for Distinguished  
Youth Scholars of P. R. China (60525304), the New Century  
High Education Teaching Reform Research Project of Zhejiang  
Province (yb04013), the Natural Science Foundation of Zhejiang  
Province (y104277), the Science and Technology Foundation of  
Zhejiang University of Technology  
1. 浙江工业大学信息与控制研究所 杭州 310012  
1. College of Information Engineering, Zhejiang University of  
Technology, Hangzhou 310012  
DOI: 10.1360/aas-007-0309

内的 PC. 校园网是以太网, 网络拓扑结构为星型. PCL-818L 是一块高速数据采集卡, 该卡具有数据采集, A/D、D/A 转换, DIO, 可编程计时/计数等功能.

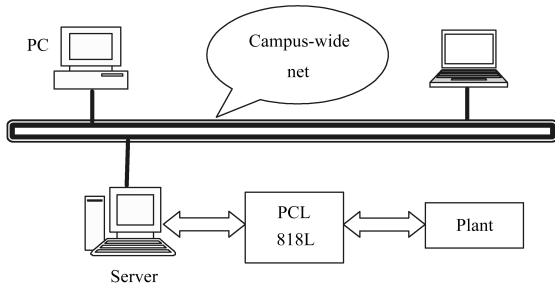


图 1 远程控制系统整体框图

Fig. 1 The whole block diagram of the remote control system

## 2.2 QoS 在线监测

传输网络的 QoS 描述的参数主要包括: 带宽、信元差错率、延迟等. 从控制系统的角度来看, 由于要传输的控制信息数据量并不大, 一般对于带宽限制没有特别要求; 信元差错率能最终反映在延迟的特性上 (如引起数据包超时到达甚至丢失), 所以在设计过程中不单独考虑; 而传输过程中的时变延迟会大大降低控制系统的性能甚至引起系统不稳定. 因此本系统的 QoS 在线监测功能主要包括: 时延监测、带宽和吞吐量监测. 为了保证系统的可实现性, 本系统包括以下几个特点: 1) 传感器是时间驱动, 执行器和控制器为事件驱动. 2) 网络时延有界, 对于时延大于系统采样周期的数据传输, 采用主动丢包策略. 3) 数据包传输时带有时间戳信息.

为了保证控制系统工作期间的最大传输带宽, 系统在传输过程中采用 IP 访问控制技术, 对于 QoS 的描述, 给出以下定义:

**定义 1.** 系统硬件特性 (HC) 为系统主机监视守护进程.

$$HC = (T_{null}, L_{len}, V_{load}, S, T_{delay}) \quad (1)$$

其中,  $T_{null}$  和  $L_{len}$  为系统监测输入参数, 分别表示收集到的 CPU 空转时间和 CPU 就绪队列长度度量值.  $S$  和  $T_{delay}$  为 QoS 监测输出量, 程序运行过程中周期性的给出系统硬件运行状况并进行负载趋势  $V_{load}$  测试和实时度量  $S$  与  $T_{delay}$ .

$$V_{load} = f(T_{null}, L_{len}) \quad (2)$$

其中,  $f(\bullet)$  为  $T_{null}$  和  $L_{len}$  的函数. 假设数据帧到达

服从 Poisson 分布 [7], 则

$$V_{load} = k \frac{e^{-\lambda T_{null}} (\lambda T_{null})^\zeta}{\zeta!} \quad (3)$$

其中,  $\zeta = L_{len}/V_{packet}$ ,  $V_{packet}$  表示数据包的大小, 对应用系统而言可测量.  $k$  为比例系数, 可根据实际硬件特性调节. 因此, 网络吞吐量  $S$  相当于在  $T_0$  时间内成功发送的平均帧数, 归一化表示为

$$S = \frac{T_0}{(T_0 + T_{null} + C)} \quad (4)$$

上式中  $C$  表示该传送平均周期内争用期的平均时间, 为保证网络系统的稳定性, 本系统对数据包的重发次数进行一定的限制, 当重发次数超过 16 次后就不再重发 [6], 所以取  $C = T_0/16$ .

根据参考文献 [8], 网络时延可表达为

$$T_{delay} = T_{send} + T_{wait} + T_{ts} + T_{rev} \quad (5)$$

其中,  $T_{send}$  表示发送处理时延,  $T_{wait}$  为等待时延,  $T_{ts}$  为传输时延,  $T_{rev}$  为接收处理时延. NCS 时延主要来自等待时延.

## 3 典型网络的 QoS 分析

在校园网上利用上述远程控制系统进行 QoS 性能分析, 考虑到控制器到执行器的延时  $T^{ca}$  是在控制器输出后发生的, 对于控制器而言是未知的. 因此本文描述的远程控制系统仅考虑传感器到控制器的网络延时  $T^{sc}$ .

1) 固定通信速率 6Kbps, 数据包大小为 50bit. 改变系统的采样周期分别为: 0.1s、0.3s、0.5s. 则系统网络时延呈随机分布, 在系统通信带宽、数据包大小一致的情况下, 不同采样周期对系统网络时延影响不同. 当采样周期为  $h = 0.1s$  时,  $T_{max}^{sc} = 11.5ms$ ,  $T_{min}^{sc} = 3.2ms$ . 随着系统采样周期的增大, 系统的网络时延将逐步减小. 系统的采样周期为  $h = 0.5s$  时,  $T_{max}^{sc} = 7.2ms$ ,  $T_{min}^{sc} = 0.9ms$ . 图 2 给出三种情况下的平均时延曲线. 从图 2 可以得出更为一般的结论: 系统的网络时延呈随机分布. 在网络带宽一致的情况下, 固定传输数据包的大小, 随着采样时间减小, 给定时间内系统的传输负载增大, 导致网络时延变大, 即系统的网络时延随着系统的采样周期的减小而增大.  $\bar{T}_{0.1}^{sc} = 2.5ms$ ,  $\bar{T}_{0.3}^{sc} = 0.9ms$ ,  $\bar{T}_{0.5}^{sc} = 0.8ms$ . 图 3 给出的上述三种情况下系统网络吞吐量曲线进一步验证了以上结论.

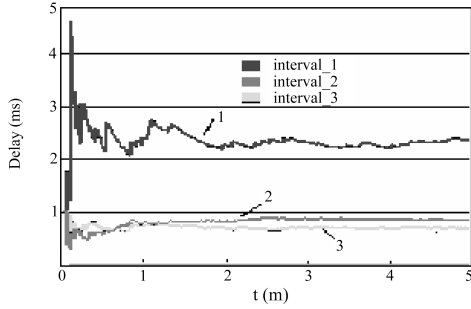


图 2 不同采样周期下系统平均时延曲线  
Fig. 2 Average of Ethernet delay with different sampling period

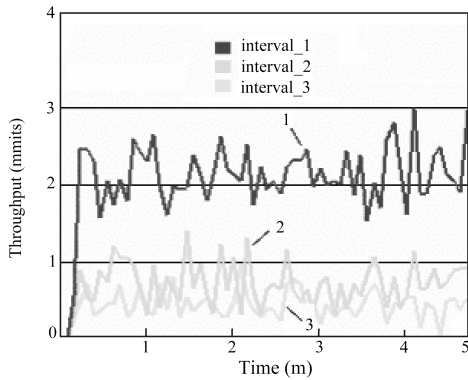


图 3 不同采样率下系统网络吞吐量  
Fig. 3 Point-to-point throughput with different sampling period

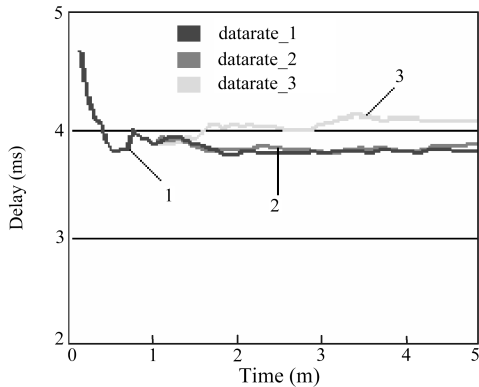


图 4 不同传输速率下系统平均时延曲线  
Fig. 4 Average of Ethernet delay with different rate of transmission

2) 给定系统的采样周期  $h = 0.5s$  和数据包大小为  $50bit$  时, 改变系统的传输速率分别为:  $10Kbps$ 、 $30Kbps$ 、 $1Mbps$ , 此时系统的平均时延特性如图 4 所示. 由图 4 可知其发送的数据将会形成拥塞从而导致一定的排队延迟, 因此整个网

络的平均时延也有所增加. 图 5 中系统的吞吐量曲线进一步验证了以上结论.

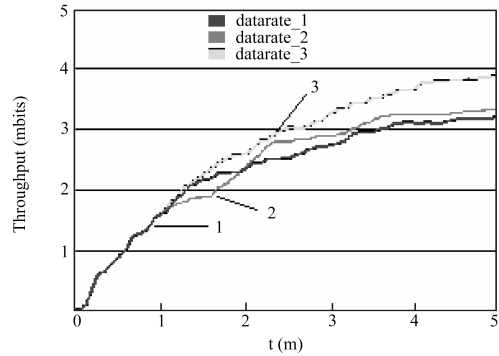


图 5 不同传输速率下系统的吞吐量曲线  
Fig. 5 Point-to-point throughput with different rate of transmission

### 4 基于 QoS 性能补偿的控制策略

由 2.2 节可知 NCS 中端到端时延是由网络和设备共同决定的.  $T_{send}$  和  $T_{rev}$  取决于设备的软、硬件性能, 当系统给定时, 它们是可以预测的. 网络带宽决定信息的发送时间, 传输时间在小范围内可忽略不计, 因此传输时延  $T_{ts}$  是确定的. 等待时延  $T_{wait}$  随网络节点数和数据量的增加而增大, 即使在正常工作状态下, 网络流量基本稳定, 对于采用不同协议的系统, 等待时延将随介质访问控制机制的不同而有很大差异, 当网络流量波动时, 这种差异会更大. 因此, NCS 时延的不确定性主要来自 MAC 层的数据包排队等待时延.

#### 4.1 QoS 对系统性能的影响

由文献 [9,10] 可知, 不同的 QoS 条件下, 闭环系统的响应完全不同, 由第 3 节分析, 易知由于不同传输速率、不同数据包大小和采样周期下, 系统的网络传输特性不同, 因此反映到闭环系统的性能就不同. 主要原因是不同的 QoS 会产生不同的传输时延, 其大小和分布特性都不同. 然而实际应用过程中, QoS 性能的变化具有随机特性, 并且跟整个网络的负载和吞吐量以及应用协议的设计有很大的关系, 因此很难直接建立相应的数学模型. 图 6 显示了 QoS 变坏的情况下, 闭环系统的性能.

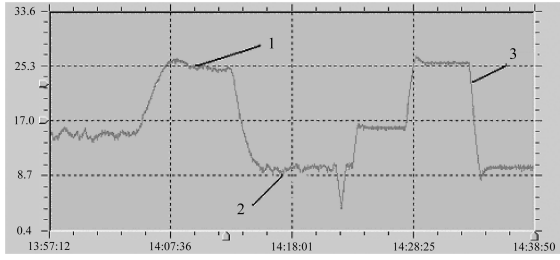


图6 不同的QoS对系统性能的影响

Fig.6 The influence in the system performance under different QoS conditions

其中曲线1的实验环境为:  $h = 0.3s$ ,  $p = 50\text{bit}$ ,  $S = 1\text{Mbps}$ . 曲线2的实验环境为:  $h = 0.1s$ ,  $p = 200\text{bit}$ ,  $S = 100\text{Kbps}$ . 从图中可以看到随着QoS的变化, 系统的性能开始变化, 甚至引起系统不稳定. 曲线3的实验环境为:  $h = 0.1s$ ,  $p = 50\text{bit}$ ,  $S = 1\text{Mbps}$ . 控制器采用基于QoS性能补偿的网络控制器.

#### 4.2 基于QoS性能补偿的广义预测控制

本系统论及的采样周期  $h$  严格满足  $h > T_{delay}$ , 通过第3节的分析, 不难看出对于特定的网络(本系统运行的网络环境为校园网), 在  $h = 0.1s$  的情况下, 满足  $h > T_{delay}^{sc}$ . 从以上可知反映到闭环系统性能的QoS参数主要是网络传输时延, 因此本系统在控制策略的设计上主要讨论传输时延的补偿.

**定义 2.**  $\bar{T}_{delay} = QoS(h, p, s)$  为系统在不同QoS性能下的平均传输时延.

其中  $h$  为系统的采样周期,  $p$  为系统传输的数据包大小,  $s$  为系统的传输速率. 基于QoS性能补偿的广义预测控制 (Generalized predictive control, GPC) 策略的主要思想是根据系统不同的  $h, p, s$  值在线监测  $QoS(h, p, s)$  的值以补偿闭环系统的传输延时. 在GPC中, 采用受控自回归积分滑动平均模型来描述受到随机干扰的对象.

$$A(z^{-1})y(t) = B(z^{-1})z^{-d}u(t-1) + C(z^{-1})w(t)/\Delta \quad (6)$$

其中,  $A(z^{-1}) = 1 + a_1z^{-1} + \dots + a_{n_a}z^{-n_a}$ ,  $B(z^{-1}) = b_0 + b_1z^{-1} + \dots + b_{n_b}z^{-n_b}$ , 式中  $z^{-1}$  表示延迟算子,  $y(t)$  表示输出,  $u(t)$  表示控制变量,  $d$  表示延迟时间,  $w(t)$  表示不相关的随机序列,  $\Delta = (1 - z^{-1})$  表示差分算子. 优化时域的起始值  $N_1 = d + 1$ , 终止值  $N_2 = d + N$ , 控制时域  $N_u = N$ .

令(6)式中  $C(z^{-1}) = 1$ , 则式(6)可表示为

$$\Delta y(t) = -a_1\Delta y(t-1) - \dots - a_{n_a}\Delta y(t-n_a) + b_0\Delta u(t+d-1) + \dots + b_{n_b}\Delta u(t+d-n_b-1) + w(t) \quad (7)$$

式(7)可表示为

$$\Delta y(t) = \mathbf{x}(t-1)^T \Gamma + w(t) \quad (8)$$

其中,  $\mathbf{x}(t-1)^T = [-\Delta y(t-1), \dots, -\Delta y(t-n_a), \Delta u(t+d-1), \Delta u(t+d-n_b-1)]$ ,  $\Gamma = [a_1, \dots, a_{n_a}, b_0, \dots, b_{n_b}]^T$ .

令  $\varepsilon(t) = \Delta y(t) - \mathbf{x}(t-1)^T \Gamma(t-1)$ , 式中  $\Gamma(t-1) = [a_1(t), \dots, a_{n_a}(t), b_0(t), \dots, b_{n_b}(t)]^T$ . 这样可以利用最小二乘法<sup>[11]</sup>给出  $A(z^{-1})$ ,  $B(z^{-1})$ , 利用  $d = C = \bar{T}_{delay}$ , 根据文献[12], 式(6)可表示为

$$\begin{pmatrix} \hat{y}(t+C+1|t) \\ \hat{y}(t+C+2|t) \\ \dots \\ \hat{y}(t+C+N|t) \end{pmatrix} = G \begin{pmatrix} \Delta u(t) \\ \Delta u(t+1) \\ \dots \\ \Delta u(t+N-1) \end{pmatrix} + H \begin{pmatrix} \Delta u(t-1) \\ \Delta u(t-2) \\ \dots \\ \Delta u(t-n_b) \end{pmatrix} + S \begin{pmatrix} \hat{y}(t+C|t) \\ \hat{y}(t+C-1|t) \\ \dots \\ \hat{y}(t+C-n_a|t) \end{pmatrix} \quad (9)$$

$$H \begin{pmatrix} \Delta u(t-1) \\ \Delta u(t-2) \\ \dots \\ \Delta u(t-n_b) \end{pmatrix} + S \begin{pmatrix} \hat{y}(t+C|t) \\ \hat{y}(t+C-1|t) \\ \dots \\ \hat{y}(t+C-n_a|t) \end{pmatrix} \quad (10)$$

定义一个预测控制律, 它使下面的性能指标最小

$$J = E \left\{ \sum_{j=N_1}^{N_2} [y(t+j|t) - y_r(t+j)]^2 + \sum_{j=1}^{N_a} \lambda(j) [\Delta u(t+j-1)]^2 \right\} \quad (11)$$

其中,  $E$  为数学期望,  $y_r$  为一理想输出值, 取  $\lambda(j) = \lambda$ , 则可得

$$\Delta u(t) = Q\Phi_0 \begin{pmatrix} \hat{y}(t+C|t) \\ \hat{y}(t+C-1|t) \\ \dots \\ \hat{y}(t+C-n_a|t) \end{pmatrix} + \quad (12)$$

$$Q\Phi_1 \begin{pmatrix} \Delta u(t-1) \\ \Delta u(t-2) \\ \dots \\ \Delta u(t-n_b) \end{pmatrix} + \quad (13)$$

$$Q\Phi_2 \begin{pmatrix} \hat{y}(t+C+1) \\ \hat{y}(t+C+2) \\ \dots \\ \hat{y}(t+C+N) \end{pmatrix} \quad (14)$$

上式中,  $\Phi_0 = -G^T S$ ,  $\Phi_1 = -G^T H$ ,  $\Phi_2 = G^T$ ,  $Q$  为矩阵  $(G^T G + \lambda I)^{-1}$  的第一行.

由以上分析, 我们可以在实际应用过程中根据系统采用的不同的  $h, p, s$  值, 用  $C = \bar{T}_{delay}$  带入式 (12)~(14) 动态修正输出预测值 (从  $t$  到  $t + \bar{T}_{delay}$ ), 即可得到最优的  $\Delta u(t)$ .

## 5 实验

为验证上述算法的有效性, 通过校园网利用自行开发的基于校园网的远程控制软件 (著作权登记号: 2004SR05080) 对实验室液位系统分别进行 GPC 和基于 QoS 性能补偿的远程控制实验. 其中实验环境:  $h = 0.1s$ ,  $p = 50bit$ ,  $S = 1Mbps$ . 被控对象为二阶液位系统. 其传递函数如下

$$G(s) = \frac{1.1524s + 0.5767}{s^2 - 0.4657s - 0.4834} \quad (15)$$

实验运行结果见图 7 和图 8, 其中系统的网络时延见图 9. 从实验结果可见本文论及的方法具有一定的可行性.

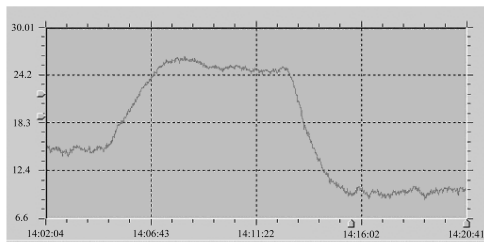


图 7 典型 GPC 控制  
Fig.7 GPC control

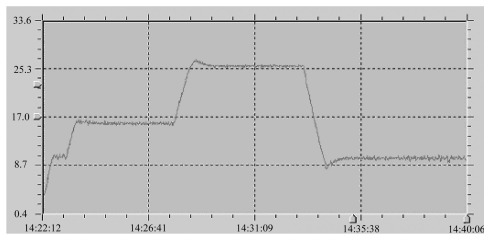


图 8 基于 QoS 性能补偿的网络控制  
Fig.8 Controller based on QoS performance compensation

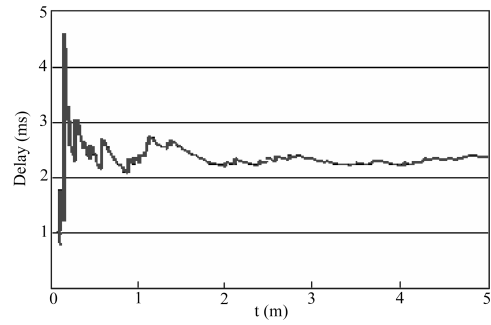


图 9 网络时延  
Fig.9 Average of Ethernet delay

## 6 小结

本文以远程控制中基于特定网络的 QoS 性能补偿的研究与应用实施为主线, 着重对 QoS 在线监测和基于 QoS 性能补偿的远程控制器的设计问题展开研究, 同时利用自行开发的远程控制系统, 通过校园网对实验室三阶水槽液位控制系统进行远程控制实验研究. 实验运行结果进一步表明本文论及的控制策略具有一定的可行性.

## References

- 1 Nilsson J, Bernhardsson B, Wittenmark B. Stochastic analysis and control of real-time systems with random time delays. *Automatica*, 1998, **1**(34): 57~64
- 2 Yu Zhi-Xun, Chen Hui-Tang, Wang Yue-Juan. Control of network system with random communication delay and noise disturbance. *Control and Decision*, 2000, **15**(5): 518~522 (in Chinese)  
(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系统控制. *控制与决策*, 2000, **15**(5): 518~522)
- 3 Walsh G C, Ye H, Bushnell L G. Stability analysis of networked control systems. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2002, **10**(3): 438~446
- 4 Zhang W, Branicky M S, Phillips S M. Stability of networked control systems. *IEEE Control Systems Magazine*, 2001, **21**(1): 84~99
- 5 Hartman J R, Branicky M S, Liberatore V. Time-dependent dynamics in networked sensing and control. In: *Proceedings of the American Control Conference*. Portland, 2005. **4**: 2925~2932
- 6 Lee, Kyung Chang, Lee Suk. Performance evaluation of switched Ethernet for real-time industrial communications. *Computer Standards & Interfaces*, 2002, **24**(5): 411~423
- 7 Guo Min-Qiang, Wang Shu-Qing. The transmission characteristics analysis of networked control systems based on model. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2003, **24**(5): 453~456 (in Chinese)  
(郭敏强, 王树青. 基于模型的网络控制系统传输特性分析. *仪器仪表学报*, 2003, **24**(5): 453~456)
- 8 Yang Li-Man, Li Yun-Hua, Yuan Hai-Bin. Analysis of time delay in networked control systems and study of data transmission technology. *Control and Decision*, 2004, **19**(4):

361~366 (in Chinese)

(杨丽曼, 李运华, 袁海斌. 网络控制系统的时延分析及数据传输技术研究. 控制与决策, 2004, 19(4): 361~366)

- 9 Abdelzaher T F, Atkins E M, Shin K G. QoS negotiation in real-time systems and its application to automated flight control. *IEEE Transactions on Computers*, 2000, 49(11): 1170~1183
- 10 Yodyium Tipsuwan, Mo-Yuen Chow. Network-based controller adaptation based on QoS negotiation and deterioration. In: *Proceeding of 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. Denver, 2001. 3: 1794~1799
- 11 Liu Hong-Cai. *System Identify and Parametric Estimation*. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1999. 95~99  
(刘宏才. 系统辨识与参数估计. 北京: 冶金工业出版社, 1999)
- 12 Wang Wei. *Generalized Predictive Control Theory and It's Applications*. Beijing: Science Press, 1998. 98  
(王伟. 广义预测控制理论及其应用. 北京: 科学出版社, 1998)



**邵奇可** 浙江工业大学信息学院讲师, 博士研究生. 主要研究方向为网络控制和计算机网络. 本文通信作者. E-mail: sqk@zjut.edu.cn  
(**SHAO Qi-Ke** Ph.D. candidate in College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology. His

research interest covers networked control systems and computer network. Corresponding author of this paper.)



**俞立** 浙江工业大学信息学院教授. 研究方向为网络控制、鲁棒控制和时滞系统. E-mail: lyu@zjut.edu.cn  
(**YU Li** Professor at College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology. His research interest covers robust control, time-delay systems, and networked control systems.)



**张贵军** 浙江工业大学信息学院讲师. 目前主要从事进化计算、网络控制和地理信息系统等研究工作. E-mail: zgj@zjut.edu.cn  
(**ZHANG Gui-Jun** Ph.D., lecturer at College of Information Engineering at Zhejiang University of Technology. His research interest covers evolutionarily computation, network control, and GIS.)