

## 网络控制系统中基于模糊反馈的消息调度

李祖欣<sup>1,2</sup> 王万良<sup>1</sup> 雷必成<sup>1</sup> 陈惠英<sup>2</sup>

**摘要** 在网络带宽受限的情况下,综合考虑了系统响应的误差和误差变化率,设计了一个共享通信网络的模糊反馈调度器.该调度器采用模糊最大优先调度算法对网络消息发送的优先级进行动态调整.同时定义了一种归一化控制质量衡量指标来评价多回路系统的控制性能.在此评价方法下,对三种不同调度算法在不同随机时延序列下进行了仿真比较.结果表明本文提出的调度算法优化了系统的控制性能,并在不确定运行环境中具有更好的适应性.

**关键词** 网络控制系统, 消息调度, 模糊反馈调度, 控制质量, 模糊最大优先

**中图分类号** TP273

### Message Scheduling Based on Fuzzy Feedback in Networked Control Systems

LI Zu-Xin<sup>1,2</sup> WANG Wan-Liang<sup>1</sup> LEI Bi-Cheng<sup>1</sup>  
CHEN Hui-Ying<sup>2</sup>

**Abstract** Considering the error and error difference of system response, a fuzzy feedback scheduler that shares communication net is designed with the bandwidth constraints. A scheduling algorithm of the scheduler, namely fuzzy maximum first (FMF), can schedule dynamically the priority of network message. Furthermore, a normalizable criterion of the quality of control (QoC), which can estimate the overall performance of networked control systems, is also defined. By this criterion three different scheduling algorithms with different stochastic delay series are compared with respectively. Finally, the results of simulation highlight that the proposed scheduling algorithm can optimize the performance of control loop and is more flexible than other algorithms in uncertain running conditions.

**Key words** Networked control systems, message scheduling, fuzzy feedback scheduling, quality of control (QoC), fuzzy maximum first (FMF)

## 1 引言

近年来由于网络控制系统 (Networked control systems, NCS)<sup>[1]</sup> 有全分布、连线少、资源共享、易于扩展和维护等优点而越来越受到人们的重视.由于 CPU 资源、网络带宽的限制以及传输机制的影响使得网络控制系统不可避免地存在着网络时延,而时变的网络时延使得对网络控制系统的分析变得更为复杂.文 [2] 比较和分析了 NCS 中固定时延和随机时延对系统性能的影响,指出随机时延将使系统的控制性能下降甚至不稳定.文 [3] 中分析了 NCS 在 CPU 资源和网络资源受限时,网络时延的不确定性将使系统的控制性能进一步

下降.

为了降低网络诱导时延对系统性能的影响,对系统资源进行合理调度是提高系统控制性能的一种有效方法.网络控制系统的调度可分为基于共享 CPU 资源的控制任务可抢占的 CPU 调度和基于共享传输介质的数据传输不可抢占的网络调度两类.对于 CPU 调度,近年来出现的反馈调度策略<sup>[4~6]</sup> 显示了该方法在不可预见环境下比开环调度具有更优的适应性.对于网络消息调度,如何有效地对消息的优先级进行动态配置一直得到许多学者的关注.文 [7] 提出了最大误差优先和 TOD 协议相结合的调度方法,保证误差最大的数据优先传输,并丢弃过时的数据而使用最新的数据.文 [2, 8] 也分别提出了基于误差的优先调度策略,文 [9] 受到文 [8] 的启发,对不同控制回路赋予不同的权重,提出了最大紧急度优先的网络消息调度方法.文 [10] 在原定的优先级的基础上,按照信息发送的最大允许时延的剩余时间的相关度来动态分配消息发送的优先权.文 [11] 也提出了基于允许误差阈值及最大时延等多重准则的网络调度算法,以减少数据传输量,当其误差阈值降为零时即类同于基于误差的网络调度算法.

以上文献所述的方法均是基于误差的优先级配置或数据传输规则的调度策略.本文在网络带宽受限的情况下,设计了一个模糊反馈调度器,它根据误差及误差变化率,通过模糊最大优先 (Fuzzy maximum first, FMF) 调度算法对网络消息的优先级进行动态调整.同时以 FMF 算法优化系统控制回路的控制质量 (Quality of control, QoC),并定义了一种归一化 QoC 衡量指标来评价多回路系统的整体 QoC.

## 2 模糊最大优先的反馈调度策略

### 2.1 问题描述与系统结构

根据文 [12],网络时延可表达为

$$T_{\text{delay}} = T_{\text{send}} + T_{\text{wait}} + T_{\text{ts}} + T_{\text{rev}} \quad (1)$$

其中  $T_{\text{send}}$  为发送处理时延,  $T_{\text{wait}}$  为等待时延,  $T_{\text{ts}}$  为传输时延,  $T_{\text{rev}}$  为接收处理时延.根据文 [12] 的分析, NCS 时延主要来自等待时延.等待时延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及网络流量基本稳定的情况下,对于采用不同协议的系统,等待时延也将随着介质访问控制机制的不同而有很大差异,并且当网络流量波动时,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.考虑到传感器到控制器的时延可测,而控制器到执行器的时延是在控制信号输出后发生的,对于控制器而言是未知的,故本文对图 1 所示的多回路 NCS 进行分析.

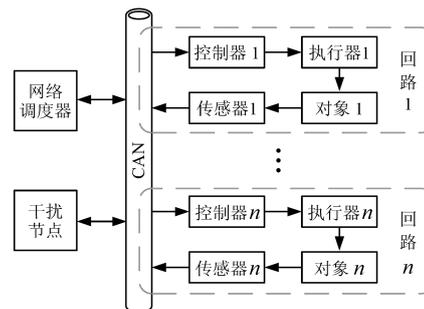


图 1 多回路网络控制系统结构图

Fig. 1 The multi-loop networked control system

收稿日期 2006-9-5 收修改稿日期 2007-6-10  
Received September 5, 2006; in revised form June 10, 2007  
国家自然科学基金 (60573123, 60573056) 资助  
Supported by National Natural Science Foundation of China (60573123, 60573056)

1. 浙江工业大学信息工程学院 杭州 310032 2. 湖州师范学院信息工程学院 湖州 313000

1. College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032 2. School of Information Engineering, Huzhou Teachers College, Huzhou 313000

DOI: 10.1360/aas-007-1229

图 1 中, 控制器和执行器集成一起视为一个节点, 该节点采用事件驱动, 传感器节点采用时间驱动. 每个控制回路只有传感器节点向网络发送消息, 该节点消息发送的优先级即为控制回路的优先级. 网络消息调度是在基于优先权的网络上实现 (如 CAN 或 DeviceNet 总线), 其中消息的优先权可以并入到消息识别符中, 由于该种现场总线采用非破坏性仲裁机制, 识别符值越小, 优先级越高. 当网络资源受限时, 低优先级控制回路的数据可能长时间得不到更新, 致使该回路的控制性能恶化. 因此, 如何在该分布式系统中动态配置控制回路的优先级是整个网络控制系统的 QoS 能否得到优化的关键. 文 [2, 3, 7~9] 的主要思想是按控制回路的误差大小来动态分配相应回路的优先级, 本文考虑到瞬态响应误差过零的时候误差变化率较大, 此时发送的数据更有效, 故采用二维模糊策略来动态分配回路的优先级, 系统的网络调度结构图如图 2 所示.

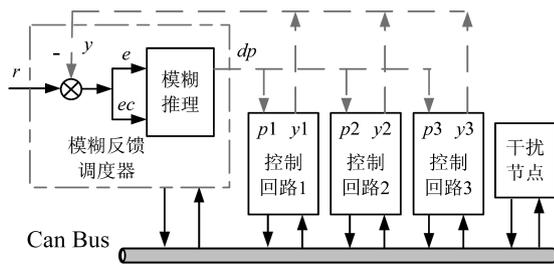


图 2 基于反馈的网络调度结构图

Fig.2 The structure of network scheduling based on feedback

NCS 中多个控制回路的优先级由模糊反馈调度器来实现, 它由模糊化、基于规则库的模糊推理、反模糊化等部分组成. 模糊反馈调度器内置一种基于反馈的新型调度算法, 称之为模糊最大优先调度算法 (FMF). 调度器的模糊推理输入是由系统设定值和系统输出的误差及误差的差分经模糊化后而得到. 调度器的输出是经模糊推理后反模糊化而得到, 该值越大, 相应控制回路的优先级越高. 如果推理得到多个回路的优先级相同时, 则采用控制回路的默认优先级.

2.2 基于反馈的 FMF 原理

基于反馈的 FMF 的调度器在融合专家语言和实时数据的基础上得到一个有效的动态优先级管理策略. 模糊反馈调度器输入为控制回路误差  $e(k)$  和误差的差分  $ec(k) = e(k) - e(k - 1)$ , 经模糊化为  $E$  和  $EC$ , 它们的模糊集均为  $\{NB, NS, ZE, PS, PB\}$ , 输出变量  $DP$  的模糊集为  $\{S, M, B\}$ . 为简化分析, 将输入变量  $E$  和  $EC$  的论域归一化处理, 其二维模糊控制器的输入输出隶属度函数和控制规则表如图 3 和表 1 所示.

其控制规则为

$$R_k : \text{if } E \text{ is } E_n \text{ and } EC \text{ is } EC_m, \text{ then } DP \text{ is } DP_{nm}, n, m = 1, \dots, 5 \quad (2)$$

因此,

$$R = \bigcup_{n,m} E_n \otimes EC_m \otimes DP_{nm} \quad (3)$$

$R$  的隶属函数为

$$\mu_R(e, ec, dp) = \bigvee_{n=1, m=1}^{n=5, m=5} \mu_{E_n}(e) \wedge \mu_{EC_m}(ec) \wedge \mu_{DP_{nm}}(dp) \quad (4)$$

输出  $DP$  根据最大最小模糊推理合成规则可得

$$DP = (E \otimes EC) \oplus R \quad (5)$$

$DP$  的隶属函数为

$$\mu_{DP}(dp) = \bigvee_{e \in E, ec \in EC} \mu_R(e, ec, dp) \wedge \mu_E(e) \wedge \mu_{EC}(ec) \quad (6)$$

上述公式中,  $\vee$  和  $\wedge$  分别为最大及最小运算,  $\otimes$  和  $\oplus$  为模糊算子. 解模糊计算由下式确定

$$dp = \frac{\sum \mu_{DP}(dp_i) \cdot dp_i}{\sum \mu_{DP}(dp_i)} \quad (7)$$

式中  $dp_i$  满足  $DP_i(dp_i) = 1$ .

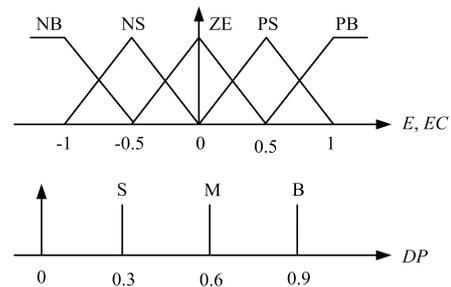


图 3 输入变量  $E, EC$  和输出变量  $DP$  的隶属度函数

Fig.3 The membership functions of  $E, EC$ , and  $DP$

表 1 模糊反馈调度器规则表  
Table 1 Rules of the fuzzy feedback scheduler

$DP$	$EC$				
	NB	NS	ZE	PS	PB
$E$	NB	B	B	B	B
	NS	B	M	S	M
	ZE	M	S	S	M
	PS	B	M	S	M
	PB	B	B	B	B

经过上述的模糊推理, 各个回路优先级的配置体现了对系统误差和误差差分的相关度, 是对系统响应更恰当的表现. 适当选择输入和输出论域元素及个数, 根据上述算法事先制定查询表可以减少 FMF 算法的计算时间.

2.3 模糊反馈调度器的实现

模糊反馈调度器和 NCS 控制回路共享网络资源, 传感器节点发送数据时, 同时也发送给反馈调度器, 这在 CAN 总线中用一点对多点通讯即可方便实现. 反馈调度器总是存储各个回路的最新数据, 通过 FMF 算法进行控制回路优先级的动态配置. 它可以采用事件驱动或时间驱动来刷新回路的优先级, 事件驱动可采用最大采样回路数据包的接收作为事件激励源, 时间驱动刷新周期可用下式

$$T_{\text{refresh}} = (1.1 - 2) \max_{1 \leq i \leq N} \{h_i\} \quad (8)$$

考虑设计的简单性和频繁计算将导致系统资源占用过大, 本文采用时间驱动方式, 更新周期为回路最大采样周期  $h_i$  的 1.5 倍.

### 3 用 QoC 管理来优化 NCS 性能

每个控制回路的 QoC 可以用误差泛函积分评价指标来衡量, 它是以控制系统的瞬时误差函数  $e(t)$  为泛函的积分评价, 包括 IE、ISE、ISTE、IAE、ITAE 等, 本文采用常用的 IAE 指标来衡量<sup>[2]</sup>, 第  $i$  个控制回路的 IAE 如下式所示

$$IAE_i = \omega_i \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (9)$$

式中  $\omega_i$  是根据各个控制回路的重要性赋予不同的权重系数, 经离散后得

$$IAE_i(e : \text{seq}\langle \tau_i(k) \rangle) = \omega_i \sum_k |e(k)| \cdot h_i \quad (10)$$

式中  $h_i$  为第  $i$  个控制回路的采样周期,  $IAE_i(e : \text{seq}\langle \tau_i(k) \rangle)$  表示第  $i$  个回路在随机网络时延序列  $\text{seq}\langle \tau_i(k) \rangle$  作用下而产生的绝对误差累积值. 每一个控制回路会因网络时延序列不同而导致性能好坏不一, 故某个回路的控制性能并不能反映整体 NCS 系统性能, 系统整体性能与每一个控制回路的性能相关联. 为了反映共有  $N$  个回路的 NCS 的控制性能, 定义类似文 [2] 的归一化控制质量 (QoC) 指标:

$$QoC(e : \text{seq}\langle \tau_i(k) \rangle) = \frac{\frac{1}{\sum_{i=1}^N IAE_i(e : \text{seq}\langle \tau_i(k) \rangle)} - \frac{1}{\sum_{i=1}^N IAE_i(e : \max\langle \tau_i(k) \rangle)}}{\frac{1}{\sum_{i=1}^N IAE_i(e : \min\langle \tau_i(k) \rangle)} - \frac{1}{\sum_{i=1}^N IAE_i(e : \max\langle \tau_i(k) \rangle)}} \quad (11)$$

由于本文 NCS 结构采用图 1 所示, 传感器到控制器的网络时延总是可以测量的 (如采用时间戳等方式), 故其网络时延总是有界的.  $\sum_{i=1}^N IAE_i(e : \max\langle \tau_i(k) \rangle)$  和  $\sum_{i=1}^N IAE_i(e : \min\langle \tau_i(k) \rangle)$  表示为各回路在最大时延序列和最小时延序列下绝对误差累积总和. 由式 (11) 可知,  $QoC(e : \text{seq}\langle \tau_i(k) \rangle) \in [0, 1]$ , 该数值越大, 表明整个网络控制系统性能越好. 由于误差的大小直接反映了各自回路的 IAE 的大小, 通过模糊反馈调度器的动态调整控制回路的优先级, 能使 NCS 的 QoC 得到总体的优化.

### 4 仿真

本文考虑一个三回路的网络控制系统, 每个回路采用相同的伺服电机为被控对象, 其传递函数为  $G(s) = \frac{1000}{s(s+2)}$ . 控制器采用 PID 控制, 在不考虑网络诱导时延的情况下进行离线设计, 仿真在基于 Matlab/TrueTime 上实现. 为了反映网络的资源限制, 设置了一个具有高优先级的干扰节点, 以随机相互独立方式向网络发送数据包, 它占用 75% 的带宽. 网络采用 CAN 总线结构, 速率设为 90Kbps. 在同一个随机时延序列下, 分别采用固定优先级 (FP)、最大误差优先 (MEF) 和本文采用的模糊最大优先 (FMF) 三种不同调度策略, 三个控制回路的阶跃响应如图 4 所示. 表 2 给出了各个控制回路的 IAE 值, 其中  $\Sigma IAE = \sum_{i=1}^3 (\omega_i \sum_k |e(k)| \cdot h_i)$ , 三个回路的权系数  $\omega_i$  均为 1. 从图 4 和表 2 中可以看出静态调度 (FP) 在网络资源受限时低优先级控制回路的数据不能及

时更新而导致系统不能稳定, 而动态调度 (MEF、FMF) 考虑到不同回路数据的紧急程度, 故能使系统性能得到较大的改善. 由于 FMF 算法充分考虑了误差变化的大小和趋势, 使得整个系统性能得到进一步的优化.

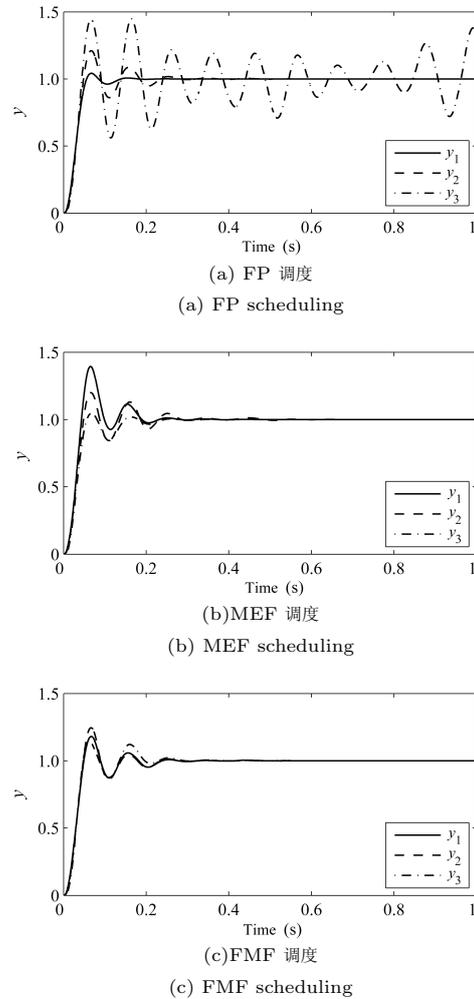
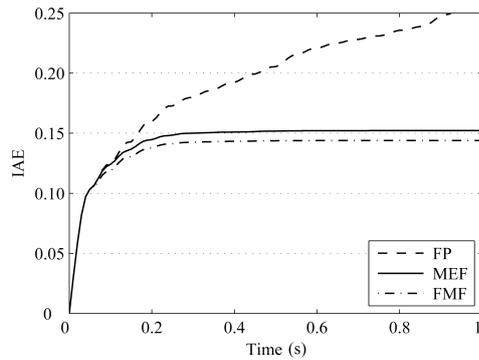


图 4 随机时延序列下三种调度的阶跃响应  
Fig. 4 The step response of respective scheduling in a stochastic delay series

表 2 三个回路的 IAE 值  
Table 2 IAE value of three loops

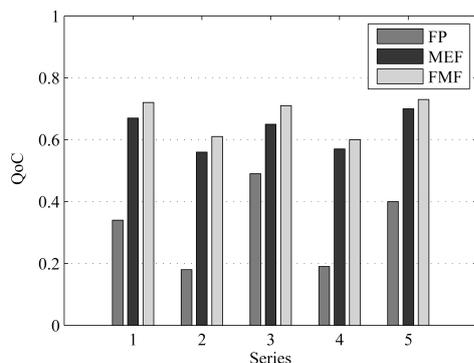
调度策略	IAE <sub>1</sub>	IAE <sub>2</sub>	IAE <sub>3</sub>	ΣIAE
FP	0.0373	0.0495	0.1759	0.2628
MEF	0.0526	0.0536	0.0459	0.1522
FMF	0.0465	0.0489	0.0486	0.1439

利用式 (10) 和 (11) 可分别计算控制系统的 IAE 和 QoC 性能, 如图 5 所示. 图 5 (a) 是在网络时延为第一种随机序列情况下分别得到的 IAE; 图 5 (b) 是在 5 种不同的网络随机时延序列下的整个控制系统的 QoC. 这两种性能评价方式分别描述了系统控制质量的变化趋势和结果. 从图 5 (a) 中易知, 在 FP 调度下, 其系统 IAE 持续增加, 说明系统某些 (个) 回路持续振荡, 如果急剧上升, 说明系统不稳定; 图 5 (b) 说明了系统在不同调度算法下的优劣比较, 显示了系统对某种算法的适应性.



(a) IAE 性能

(a) The performance of IAE



(b) QoC 性能

(b) The performance of QoC

图 5 控制系统的性能评价

Fig. 5 The evaluation of the control performance

## 5 结论

实际网络控制系统一般在 CPU 资源和 (或) 网络带宽受到一定限制的情况下运行. 本文在网络带宽受限的情况下, 综合考虑系统响应的变化及其趋势, 设计了一个共享通信网络的模糊反馈调度器. 它采用模糊最大优先调度算法对网络优先级进行动态调整, 同时以该算法优化系统各回路的控制性能, 并定义了一种归一化控制质量 (QoC) 衡量指标来评价多回路系统的整体性能. 在此评价方法下, 对三种不同调度算法在不同随机时延序列下进行了比较, 结果表明本文提出的调度算法在不确定运行环境中具有较好的适应性.

## References

- 1 Yang T C. Networked control system: a brief survey. *Control Theory and Applications*, 2006, **153**(4): 403~412
- 2 Marti P, Yopez J, Velasco M, Villa R, Fuertes J M. Managing quality-of-control in network-based control systems by controller and message scheduling co-design. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2004, **51**(6): 1159~1167
- 3 Xia F, Wang Z, Sun Y X. Simulation based performance analysis of networked control systems with resource constraints. In: Proceedings of the 30th Annual Conference of the IEEE Industry Electronics Society. Busan, Korea: IEEE, 2004. 2946~2951
- 4 Cervin A, Eker J, Bernhardsson B, Arzen K E. Feedback-feedforward scheduling of control tasks. *Real-Time Systems*, 2002, **23**(1): 25~53
- 5 Lu C, Stankovic J A, Son S H, Tao G. Feedback control real-time scheduling: framework, modeling, and algorithms. *Real-Time Systems*, 2002, **23**(1-2): 85~126
- 6 Abeni L, Palopoli L, Lipari G, Walpole J. Analysis of a reservation-based feedback scheduler. In: Proceedings of the 23rd IEEE Real-Time Systems Symposium. Austin, USA: IEEE, 2002. 71~80
- 7 Walsh G C, Ye H. Scheduling of networked control systems. *IEEE Control Systems Magazine*, 2001, **21**(1): 57~65
- 8 Yopez J, Marti P, Fuertes J M. Control loop scheduling paradigm in distributed control systems. In: Proceedings of the 29th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Roanoke, USA: IEEE, 2003. 1441~1446
- 9 Xia F, Dai X H, Wang Z, Sun Y X. Feedback based network scheduling of networked control systems. In: Proceedings of the International Conference on Control and Automation. Budapest, Hungary: IEEE, 2005. 1231~1236
- 10 Wang Z M, Zhu X M. EI based scheduling for thermal process control. In: Proceedings of the International Conference on Control and Automation. Budapest, Hungary: IEEE, 2005. 656~660
- 11 Peng Chen, Yue Dong. Research on fuzzy control in networked control system based on time-delay identification. *Information and Control*, 2004, **33**(5): 584~589  
(彭晨, 岳冬. 网络控制系统中基于时延辨识的模糊控制器研究. 信息与控制, 2004, **33**(5): 584~589)
- 12 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  
(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)

李祖欣 湖州师范学院副教授, 浙江工业大学信息工程学院博士研究生. 主要研究方向为网络控制系统、智能控制. 本文通信作者.

E-mail: lzx@hutc.zj.cn

(LI Zu-Xin Ph.D. candidate at College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology. His research interest covers networked control systems and intelligent control. Corresponding author of this paper.)

王万良 浙江工业大学教授. 主要研究方向为计算机控制与智能自动化、计算机网络技术与应用、计算机集成自动化系统、生产计划与调度. E-mail: wangwanliang@zjut.edu.cn

(WANG Wan-Liang Professor of Zhejiang University of Technology. His research interest covers computer control, computer net, CMIS, and production scheduling.)

雷必成 台州学院讲师, 浙江工业大学信息工程学院博士研究生. 主要研究方向为网络控制系统、嵌入式系统. E-mail: leibc@tzc.edu.cn

(LEI Bi-Cheng Ph.D. candidate at College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology. His research interest covers networked control systems and embedded systems.)

陈惠英 浙江工业大学信息工程学院博士研究生. 主要研究方向为网络控制系统. E-mail: hychen@hutc.zj.cn

(CHEN Hui-Ying Ph.D. candidate at College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology. His research interest covers networked control systems.)