doi:10.11959/j.issn.1000-436x.2015041

基于信息物理融合系统的紧耦合网络控制方法

林进挚，吴英，吴功宜，徐敬东
(南开大学 计算机与控制工程学院，天津 300071)

摘 要：从信息物理融合系统(CPS, cyber physical system)的设计理念来看，要求系统中的通信计算部分和被控制物理对象进行紧密耦合操作。遵照这种紧耦合操作原则，针对无线网络控制系统(WNCS, wireless networked control system)，提出一种紧耦合自适应模糊控制方法。模拟实验数据显示这种设计方法能根据实时的 NCS 紧迫度和网络的拥塞度有效地调整被控系统的采样周期及网络信道占用优先级，从而优化利用了有限的网络资源，改善了整个网络控制系统的性能。

关键词：自适应模糊控制；信息物理融合系统；网络控制系统；紧耦合
中图分类号：TP399 **文献标识码**：A

Tight coupling approach for networked control systems from cyber physical system perspective

LIN Jin-zhi, WU Ying, WU Gong-yi, XU Jing-dong
(College of Computer and Control Engineering, Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract: From cyber physical system perspective, tightly coupling the communications and computing aspects with physical dynamics is profound. This characteristic is investigated for wireless networked control systems (WNCS). Following the tight coupling principle of CPS, a tight coupling adaptive fuzzy controlling methodology for WNCS is proposed. Through simulation experiments, it is showed that proposed method could adaptively adjust the controlled system's sample period and network channel access priority according to its real time control urgency and the network traffic condition, so as to optimize network utilization and improve the performances of the whole NCS.

Key words: adaptive fuzzy control; cyber physical system; networked control system; tight coupling

1 引言

这几十年来，关于网络控制系统(NCS, networked control system)的研究非常广泛。而近几年来，一种新的术语被提出——信息物理融合系统(CPS, cyber physical system)[1, 2]。CPS 强调控制系统与网络应该在各个层次结构中有更加紧密的关联；通信、计算以及物理对象之间的紧耦合操作特征比较突出。针对传统 NCS，利用所谓的紧耦合操作协调各系统按需通信，有限的网络资源将会得到有效的利用。

现有 NCS 大多数都是采用动态调整采样率的方法来协调各系统按需进行通信。文献[3]详细分析了 NCS 的控制性能与采样/通信率的关系；为了保证控制性能和优化利用网络资源，自适应调整采样率方法被提出，但是并没考虑网络 QoS 对控制系统性能的影响，通信与物理世界的耦合度不高。文献[4]通过网络延迟判定网络 QoS，然后根据 QoS 以马尔可夫跳变线性系统来调整采样率。然而，系统状态对控制量的需求度并没被考虑，计算世界和物理世界之间没有紧密的耦合。文献[5]定义了控制系统的效用函数(utility function)，在同时考虑网络通信能力的限制与网络延

收稿日期：2013-12-13；**修回日期**：2014-03-12
基金项目：国家自然科学基金资助项目(61103214)；高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20110031110026)
Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61103214); The Research Fund of the Doctoral Program of Higher Education of China (20110031110026)

迟对控制性能的影响的条件下，给出最大化累计效用函数的规划问题。通过解决该规划问题，可以给出系统的最优采样率，并据此可设计一种分布式跨层算法来调度协调网络节点的发分组和路由转发。此文充分考虑了通信，计算和物理对象之间的耦合问题。然而这种规划问题过于复杂，不易实现；且提出的最优跨层算法只适用于同构的控制系统，缺乏灵活度和普适性。同样受 CPS 启发，文献[6,7]研究了 VANET(vehicle ad-hoc net)下的信息物理紧耦合操作如何改善合作车辆安全系统(CVS)的性能，分析了物理控制系统的相关参数(如传输距离、采样/通信率)对网络通信(通信占用率)的影响，并给出信息传播率(information dissemination rate)与物理系统性能的关系，据此提出一种物理信息紧耦合设计方法；模拟实验结果表明，这种设计方法能有效提升 CVS 的性能。

查阅更多关于 NCS 的研究文献，可以发现传统 NCS 的信息世界(通信，计算)和物理世界(被控对象)要么是分开独立设计的，要么耦合度比较松散；而仅有的少数耦合度较高的系统设计方法却比较复杂，难于被实现及广泛应用。基于此，本文着手研究分析 WNCS 中的被控系统与网络通信在紧密关联情况下对控制性能产生的影响，提出并验证一种易于实现的紧耦合自适应模糊网络控制方法。

2　问题描述

2.1　网络控制系统模型

考虑无线网络控制系统，如图 1 所示，多个被控对象与其对应的控制器通过一个无线网络相连。一个线性控制系统可描述为

$$\begin{cases}\dot{x}(t)=Ax(t)+Bu(t)+w(t)\\ y(t)=Zx(t)+v(t)\end{cases} \tag{1}$$

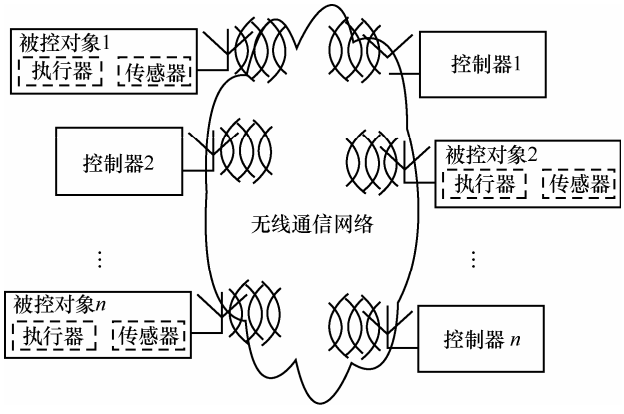

图 1　无线网络控制系统

其中，$x(t)\in\mathbb{R}^n$，$u(t)\in\mathbb{R}^m$ 分别是系统状态向量和控制输入向量，$w(t)$ 和 $v(t)$ 是均值为零的随机扰动。简单起见，假设 $Z=I_n$，则系统状态测量输出 $y(t)\in\mathbb{R}^n$，状态反馈控制器可描述为

$$u(t)=K[r(t)-x(t)-v(t)]$$

其中，$r(t)\in\mathbb{R}^n$ 是控制参考轨迹。利用自动控制理论，选择合适的 K，系统(1)的稳定性和控制性能一般可得到保证。

应用于网络控制，假设传感器采样时间为 $t_k, k=1,2,\cdots$，并考虑网络延迟 $\tau_k<t_{k+1}-t_k$，离散化系统(1)得到

$$\begin{cases}x(t_{k+1})=\boldsymbol{\Phi}_k x(t_k)+\Gamma_0^k u_k+\Gamma_1^k u_{k-1}+w_k\\ y(t_k)=Zx(t_k)+v_k\end{cases}$$

其中，

$$\begin{cases}\boldsymbol{\Phi}_k=\mathrm{e}^{A(t_{k+1}-t_k)}\\ \Gamma_0^k=\left(\int_0^{t_{k+1}-t_k-\tau_k}\mathrm{e}^{As}\mathrm{d}s\right)B\\ \Gamma_1^k=\left(\int_{t_{k+1}-t_k-\tau_k}^{t_{k+1}-t_k}\mathrm{e}^{As}\mathrm{d}s\right)B\end{cases}$$

控制量则为

$$u_k=\begin{cases}K[r(t_k+\tau_k^{sc})-x(t_k)-v(t_k)], & \gamma_k=1\\ u_{k-1}, & \gamma_k=0\end{cases}$$

其中，τ_k^{sc} 是数据从传感器到控制器的传输延迟；$\gamma_k=0,1$ 代表第 k 个控制量是否在网络中丢失。

2.2　802.11e 无线网络模型

IEEE 802.11e (EDCA, enhanced distributed channel access)可以给无线网络提供 QoS 服务[8]。由最新的研究得知[9,10]，三维 Markov 链模型最为接近 EDCA 的实际情况。三元组 $[s(i,t),b(i,t),v(i,t)]$ 表示优先级为 i 的节点和 t 时刻的退避过程状态。其中 $s(i,t)$ 表示节点处在的退避阶段，$b(i,t)$ 表示节点的退避计数器值，$v(i,t)$ 表示节点还需多少个 slot 才能从冻结阶段被唤醒进入退避过程。文献[9]对这个三维 Markov 链进行了详细的分析，给出了优先级为 i 的节点的发送概率 τ_i 如下

$$\begin{cases}\tau_1=(1-p_1^{L_1+1})\left(\sum_{j=0}^{L_1}p_1^j(1-p_1)W_{1,j}/2+2(1-p_1^{L_1+1})\right)^{-1}\\ \tau_i=(1-p_i^{L_i+1})\left(\sum_{j=0}^{L_i}p_i^j(1-p_i)W_{i,j}/2+1-p_i^{L_i+1}\right)^{-1},\\ i\in[2,c]\end{cases} \tag{2}$$

其中，p_i是节点发送数据产生碰撞的概率，L_i是最大重传次数，$W_{i,j}$是优先级为i的节点在退避阶段j时的退避窗口大小。为了求得p_i，文献[9]把信道上连续2次节点传输之间经历的空闲时隙数也建模成一个Markov链。经分析推算可得到其稳态概率，这里设为U（其数值解析式详见文献[9]）。优先级为i的节点在经历了k个空闲时隙后发送数据产生碰撞的概率$p_i(k)$为

$$p_i(k)=1-(1-\tau_i)^{-1}\left[\prod_{j=1}^{B(k)}(1-\tau_j)^{n_j}\right] \tag{3}$$

其中，$B(k)$表示k个空闲时隙后允许发送的最低优先级，n_j表示优先级为j的节点的个数。取碰撞概率的权重平均得到

$$p_i=\sum_{k=A_i}^{H}p_i(k)U_k\Big/\sum_{k=A_i}^{H}U_k \tag{4}$$

其中，$A_i=AIFSN[i]-AIFSN[1]$，$A_1=0$，$H=\min\{W_{\max}[i]+A_i\}$，$i\in[1,c]$。联合式(2)、式(3)和式(4)解非线性方程，可以求得各优先级节点的发送概率和碰撞概率。

通过以上公式可知，稳态时，优先级高的节点拥有更大的发送概率和更小的碰撞概率。

2.3 信息物理紧耦合设计

结合NCS和EDCA模型，可以看出控制系统性能、采样/通信率和网络QoS几个量是相互关联的。因此，本文致力探讨的紧耦合设计问题是要把系统的计算、通信以及物理世界相关参量关联起来以进行紧耦合操作，具体可以描述为如何根据NCS状态和网络通信状况去自适应调整采样/通信率和网络QoS，从而达到有效利用有限的网络带宽来最大化保证NCS控制性能的目的。

3 紧耦合自适应模糊网络控制的实现

反映网络通信状况的参量主要有网络拥塞度、吞吐量、传输延迟、网络QoS等，因其直观性，本文选取网络拥塞度与QoS作为通信世界代表参量，而其他量则不再被考虑，以免冗余；采样/通信率可以归于计算世界和物理世界的代表参量；而描绘物理世界的参量则是NCS紧迫度。因此在正式给出紧耦合控制方法之前，与这些参量相关的几个基础技术要先实现，包括无线网络实时拥塞度的测量，无线网络QoS的实现以及NCS紧迫度的评估。

3.1 无线网络的实时拥塞度测量

对无线网络拥塞度的实时测量，有2种方法可用：主动式与被动式[11]。因为不需要发送探测包而占用有限的网络带宽，被动式方法被本文采用。为了把实时拥塞度测量方法整合到仿真验证工具中[12]，这里针对NS-2中的802.11增强扩展模型[13]实现了一个专门用于监听信道状态的C++类。该模型的ChannelStateMgr类负责对信道状态的管理，通过截获该类的事件可以获得信道的状态。为了测量实时拥塞度，最近的N个时长为D的时隙里的信道空闲时间$idle[n]$被记录下来。图2描述了该实时拥塞度测量的实现。一个时隙的时长由定时器CM_Timer来控制，通过监控信道管理类csmgr的状态改变，变量idleDuration记录了一个时隙内信道的空闲时长。定时器CM_Timer超时后，idleDuration被写入数组buckets里，覆盖替代了最旧的一条记录，数组buckets的总记录数设为N，最后定时器CM_Timer再重新启动，如此循环。这样就实现了记录最近的N个时隙内信道的空闲时长。信道空闲时间占总时间的比例C通过下式来计算。

$$C=\frac{\sum_{n=1}^{N}idle[n]}{ND}$$

很明显，$C\in[0,1]$。本文采用C来指示网络的实时拥塞度，C值越小，说明拥塞状况越严重。

3.2 无线网络的QoS机制实现

前面已对EDCA的Markov模型进行了分析，这一小节讨论实现它的一些细节。EDCA通过定义不同的AC(access category)给不同的业务提供优先级服务，每个AC都定义有自己的参数，如最小竞争窗口CW_{min}，最大竞争窗口CW_{max}以及AIFS(arbitration interframe spaces)。AIFS代替传统802.11的DIFS参与信道的竞争，它由式(5)进行计算得到

$$AIFS[AC]=SIFS+AIFSN[AC]\sigma \tag{5}$$

其中，$SIFS$是短帧间间隔，$AIFSN[AC]$是一个与具体AC相关的非负整数，σ的大小等于SlotTime。一般来说，有较小的$AIFSN$和较小的竞争窗口的AC拥有较高的优先级，从而获得较好的QoS。

IEEE 802.11e标准[8]指定了参数的设置方法，且默认设置了4种AC。而与之不同，根据NCS应用需要本文实现了3种不同的AC。由文献[9]的仿真分析可以知道，不同AC的优先级区分主要由$AIFSN$决定，且在饱和网络下，它们的值仅相差一个单位就能带来明显的性能区分；同时，AC间选

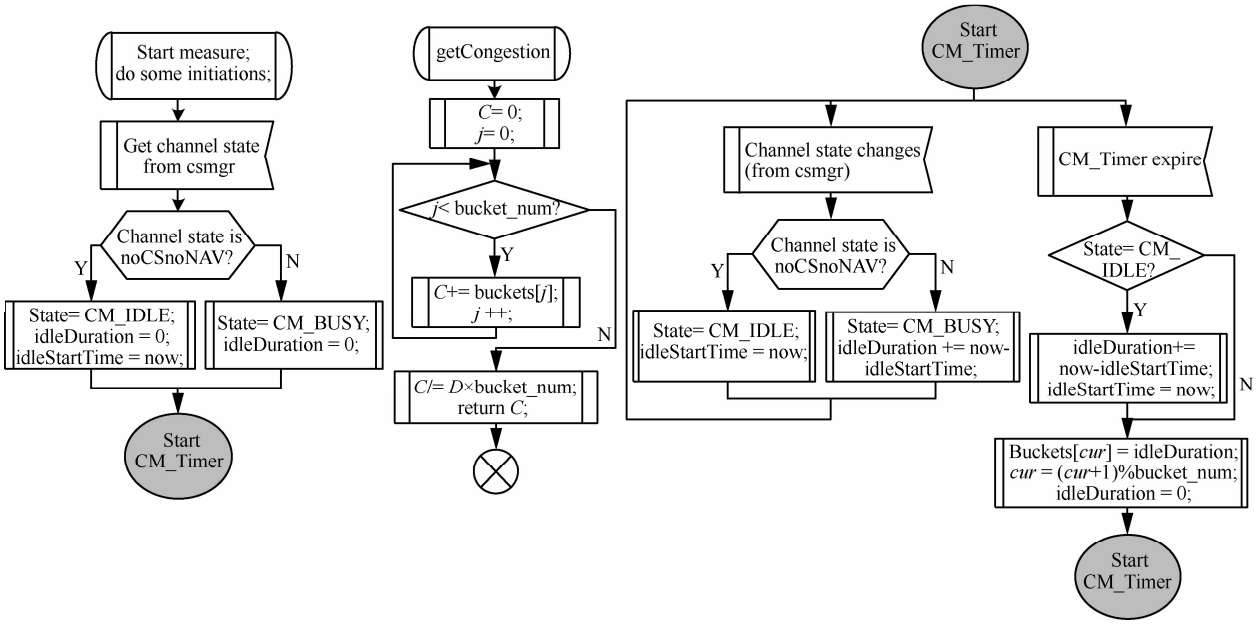

图 2　实时拥塞度测量在 NS-2 中的实现

用不同的 CW_{min} 和 CW_{max} 时则能进一步扩大它们的优先级区分度。因此，为了得到有明显区分度的 *AC*，本文采用如表 1 所列的参数，*AC* 越大，优先级越高。图 3 给出了这 3 种 *AC* 的节点关于通信延迟，数据分组接收率以及信道接入时间的模拟结果，在这个模拟场景里，节点以(228 byte×50 packet)/s 的速度广播数据分组，每种 *AC* 的节点数相同。可以看出，在通信量较少的网络中，3 种 *AC* 的性能相差无几；随着通信越接近饱和，不同优先级节点的性能差距越来越大。

表 1　　各 AC 优先级参数

AC	CW_{min}	CW_{max}	*AIFSN*
0	aCW_{min}	aCW_{max}	3
1	$(aCW_{min}+1)/2-1$	$(aCW_{max}+1)/2-1$	2
2	$(aCW_{min}+1)/4-1$	$(aCW_{max}+1)/4-1$	1

3.3　NCS 紧迫度的评估

本文定义 NCS 紧迫度如下：为了保证系统的稳定性和控制性能，因自身动力学定律或扰动而引起被控对象状态的实时变动势必要有新的控制量对其进行补偿控制，这种要求控制器更新并发送新的控制量的紧迫程度就被定义为 NCS 紧迫度。由前面对 NCS 模型的分析可知，被控对象的当前状态与上次采样状态之间的差别 *E* 以及距上次采样时间间隔 *I* 与 NCS 紧迫度 *U* 有着直接的关系如下

$$\begin{cases} E(t) = |\, x(t) - x(t_k)\,| \\ I(t) = t - t_k \end{cases}, \quad t > t_k$$

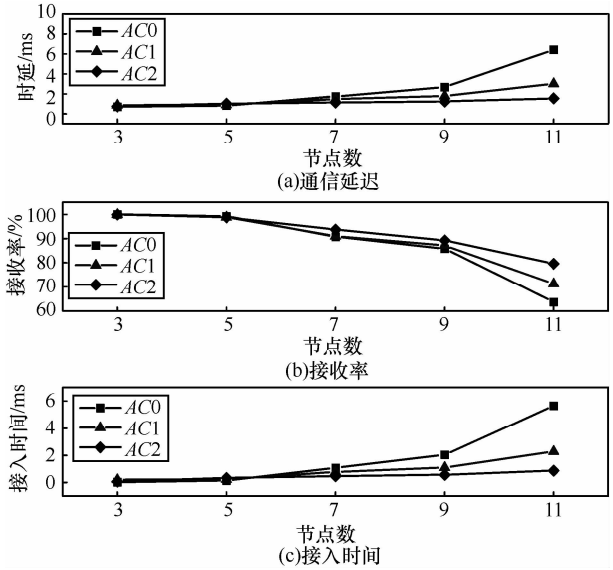

图 3　不同 *AC* 节点通信性能模拟结果对比

其中，t_k 是最新已被网络 ACK 确认接收的采样数据分组的采样时间，而并非最新的采样时间，它的值与网络分组丢失有关联，当网络不产生分组丢失时，t_k 等于最新采样时间。为了把它归一化到区间 [0.1,1)，紧迫度 *U* 通过式(6)来计算得到

$$U(t) = \frac{E_I^{\,2}(t)}{E_I^{\,2}(t) + K^2} 0.9 + 0.1 \tag{6}$$

其中，$E_I(t) = E(t)I(t)$，参数 *K* 是一个待定的量，它

将根据具体的控制系统进行设定。之所以采用这样的归一化方法一方面在于它的简单性和易于快速被计算，另一方面通过调整参数 K，它能较好地把 $E(t)$和 $I(t)$的变化真实明显地反映到紧迫度 U 上。图 4 给出了当 K=0.002 时紧迫度 U 随 E 和 I 变化的曲面。

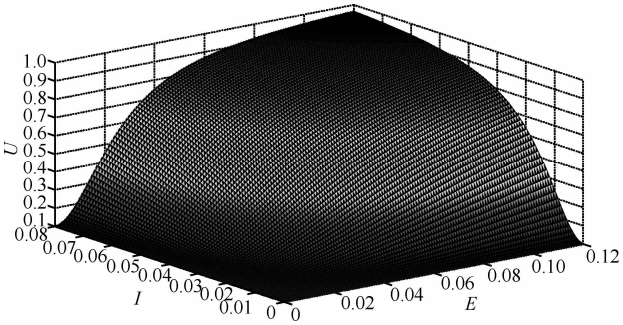

图 4 NCS 紧迫度 U 曲面

3.4 紧耦合自适应模糊网络控制

如引言所述，区别于文献[5]致力于建立精确模型以设法达到最优设计与控制，为了减少设计的复杂性和能在各种不同系统中得到应用，本文摒弃精确的最优化设计而采用模糊控制方法。模糊控制方法更适用于非线性、时变、模型不完全的系统上，能有效简化系统设计的复杂性[14]。正是因为紧耦合网络控制系统的精确模型难以建立以及模糊控制方法的易以实现性和应用普适性，模糊控制方法成为本文的最佳选择。

由前面的分析可知，当 NCS 紧迫度增大时，应减小采样周期以保证控制性能；当 NCS 紧迫度减小时，应增大采样周期以腾出更多带宽给更需要通信的节点；当网络不拥塞时，网络 QoS 优先级 AC 没有明显的性能差别；而当网络拥塞时，不同 AC 的性能差别明显，应结合 NCS 紧迫度对其进行慎重选择。选择网络拥塞度 C 与 NCS 紧迫度 U 作为模糊化输入变量，而选择采样周期变动 DH 和网络 QoS 需求量 Q 作为精确化输出变量。考虑到网络拥塞度 C 和网络 QoS 需求量 Q 取值范围的变动意义明确且易于辨识，这里对它们的模糊集分成 3 个等级；而经大量仿真实验表明，NCS 紧迫度 U 和采样周期变动 DH 的取值变动对系统表现相当敏感，这里则对它们的模糊集进行更细微的划分，分成 5 个等级。因此，选择各个输入输出变量的模糊集如下。

C：(L, M, H)，分别代表低拥塞、中级拥塞和高度拥塞；

U：(L, ML, M, MH, H)，分别代表系统较低紧迫、中低紧迫、中级紧迫、中高紧迫和高度紧迫；

DH：(NB, NS, ZE, PS, PB)，分别代表大负值、小负值、零值、小正值和大正值；

Q：(S, M, B)，分别代表网络 QoS 需求量小、中和大。

关于隶属度函数，采样周期变动 DH 需要根据具体控制系统进行设计。其他量的隶属度函数由图 5 给出，实验数据表明，网络拥塞度 C 小于 0.1 时，网络进入高度拥塞状况；而 C 大于 0.3 时，网络通信量较小，属于低拥塞状况；NCS 紧迫度 U 已经归一化，取值 0.5 时定义为中级紧迫，其他 4 个模糊等级相应向两边展开；定义网络 QoS 需求量 Q 等于零时对应中级需求，而 Q 大于和小于±3 时则分别对应较大和较小的网络 QoS 需求量。

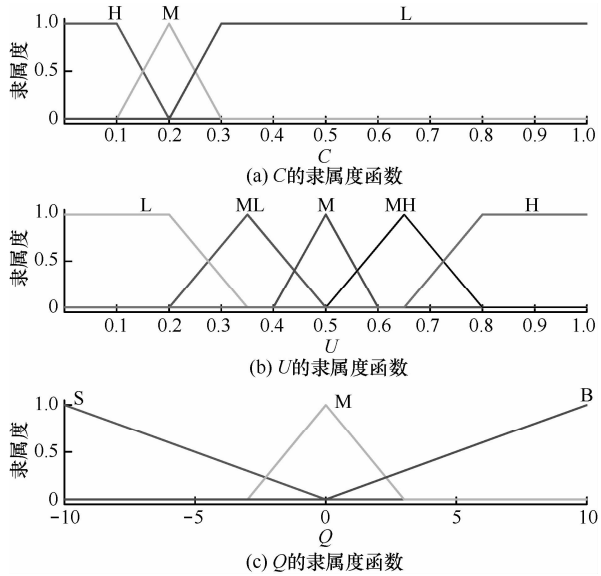

图 5 网络拥塞度 C、NCS 紧迫度 U 以及 QoS 需求量 Q 的隶属度函数

模糊控制规则是模糊控制器的关键。如前所述，为了遵循信息物理世界紧耦合操作理念，本文在设计模糊控制规则时充分考虑各参量的互相依赖关系——采样周期将会影响 NCS 紧迫度和网络拥塞度，反过来 NCS 紧迫度和网络拥塞度将决定选择多大的采样周期；网络 QoS 需求量同样会对 NCS 紧迫度产生影响，而网络拥塞度将决定选择多大的网络 QoS 需求量。经过仔细分析，本文选择如表 2 所示的模糊规则进行控制，采样周期 DH 在 NCS 紧迫度 U 较高且网络拥塞度 C 较低时，才会有较大的负值(大幅提升采样率)，而在 NCS 处于中度或中高度紧迫或网络拥塞度 C 较高时则保持较小负值或不变；另一方面，如果 NCS 紧迫度 U 较低

且网络拥塞度 C 又较高时，则采样周期 DH 将取较大的正值(大幅降低采样率)，而在 NCS 处于中度或中低度紧迫或网络拥塞度 C 较低时则保持较小负值或不变。另外，据前一小节可知，在低通信量的网络中不同 QoS 的性能相差无几，因此这里选择：当网络拥塞 C 较小时，网络 QoS 需求量 Q 保持为小；当网络拥塞度 C 较高时，网络 QoS 需求量 Q 才会随着 NCS 紧迫度 U 变高而增大。

表 2　　自适应控制模糊规则

DH/Q		U				
		L	ML	M	MH	H
C	L	PS/S	ZE/S	NS/S	NB/S	NB/S
	M	PB/S	PS/S	ZE/M	NS/M	NB/B
	H	PB/M	PB/M	PS/B	ZE/B	NS/B

结合以上各输入输出量的隶属度函数和模糊控制规则，系统的下一次采样周期大小 H_{k+1} 由 DH 决定，通过计算 $H_{k+1}=T+DH_k$ 得到，其中 T 是传统 NCS 的固定采样周期。网络 QoS 优先级 AC 的计算公式则由下式给出。

$$AC=\begin{cases}2, & Q>3\\ 1, & -3\leqslant Q\leqslant 3\\ 0, & Q<-3\end{cases}$$

4　仿真实验与分析

早前，已经开发整合了一个用于仿真验证 NCS 和 CPS 的协同模拟工具 NCCPIS[12]。本节将使用该工具模拟一个无线网络下的包含 4 组倒立摆的网络控制系统，考察它在不同拥塞环境下的性能表现，以此来检验本文提出的紧耦合自适应模糊控制方法的有效性。

4.1　实验设置

这里把倒立摆建模成在平衡点的一个线性系统[15]。

$$\begin{bmatrix}\dot{x}\\ \ddot{x}\\ \dot{\theta}\\ \ddot{\theta}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0 & 1 & 0 & 0\\ 0 & \dfrac{-(I+ml^2)b}{p} & \dfrac{m^2gl^2}{p} & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\\ 0 & \dfrac{-mlb}{p} & \dfrac{mgl(M+m)}{p} & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x\\ \dot{x}\\ \theta\\ \dot{\theta}\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}0\\ \dfrac{I+ml^2}{p}\\ 0\\ \dfrac{ml}{p}\end{bmatrix}u+\boldsymbol{w}$$

其中，$p=I(M+m)+Mml^2$，$\boldsymbol{w}$ 是系统随机扰动，这里设定 $\boldsymbol{w}=[0,0.1\sin(1.3\alpha),0,0]^{\mathrm{T}}$，其中 α 是一个 [0,10] 上的均匀分布随机数。所有物理量的详细数值由表 3 给出。控制器采用 LQR 进行设计，得到反馈增益 $K_f=[-10,-15.5,57.1,11.1]$，控制器则是 $u=-K_fx$。摆的初始角度设置在平衡点上，对于不同的实验将会在不同的时间点上给摆加入一个 $\Theta=0.3$ rad 的阶跃角度。

表 3　　倒立摆物理量参数

记号	物理量	单位	值
I	转动惯量(摆)	kg·m^2	0.003 4
m	摆质量	kg	0.109
M	小车质量	kg	1.096
l	摆长	m	0.25
b	摩擦系数	N/m/s	0.1
x	小车坐标	m	0（初值）
Θ	摆角	rad	0（初值）

因为要使用到模糊控制方法，这里要设法实现能够在协同模拟工具 NCCPIS 中对相应的模糊控制器进行仿真的功能。考虑到 Matlab 里有功能完善的模糊控制工具箱以及 Ptolemy II 已经实现了较好的 Matlab 接口[16]，这里通过在 Ptolemy II 里实现一个模糊控制引擎的方法来支撑对模糊控制器的实现。如图 6 所示，模糊控制引擎通过 Ptolemy II 的 Matlab 接口与 Matlab 相连，同时接管 Ptolemy II 里所有实现了模糊控制器功能的 Actor（图中的 FLC_n）对模糊计算的请求，并调用 Matlab 模糊控制工具箱完成模糊计算，再把计算结果反馈回各模糊控制器 Actor。因此，在本文的仿真实验里，前节所述的模糊集的定义、隶属度函数和模糊规则的设定等都是在 Matlab 的模糊控制工具箱里完成的，同时，这里选择了最常用的重心法进行解模糊。图 7 给出了整个仿真实验的具体配置，其中虚线方框里的 Actor 是模糊控制器，同时粗实线方框里的 Actor 是与 NS-2 无线通信节点相对应的 NS-2 影子节点[12]。

为了测试不同拥塞情况下的系统性能，不同数目的非倒立摆网络节点被引入，它们周期性地广播数据分组。所有节点的网络模拟参数由表 4 给出。对于传统 NCS，它们不考虑 QoS，使用固定 AC=0 和固定采样周期 T=20 ms；对于紧耦合网络控制方法，设定式(6)中的 K=0.002 来计算 NCS 紧迫度 U，同时选择 $DH\in[-10,20]$ ms 和如图 8 所示的隶属度函数，控制器端是事件驱动的，但是因为被控对象端会把当前的

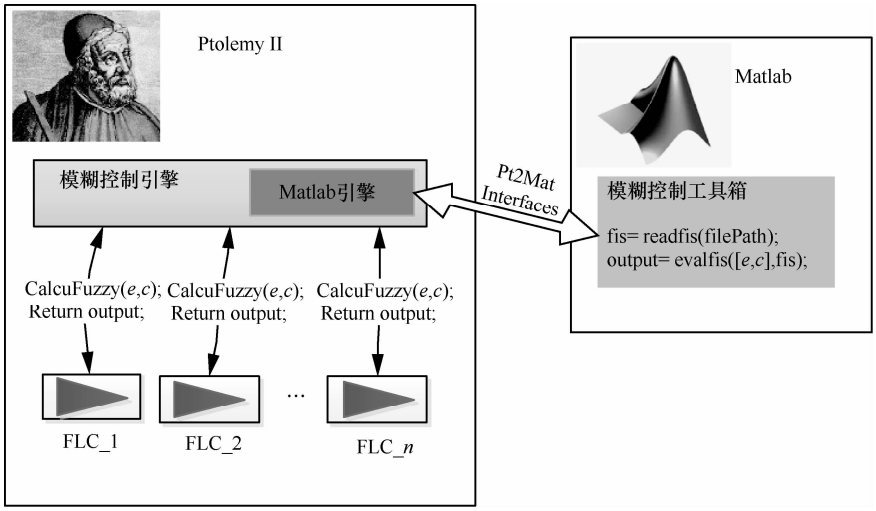

图 6 模糊控制引擎以及模糊控制器的实现

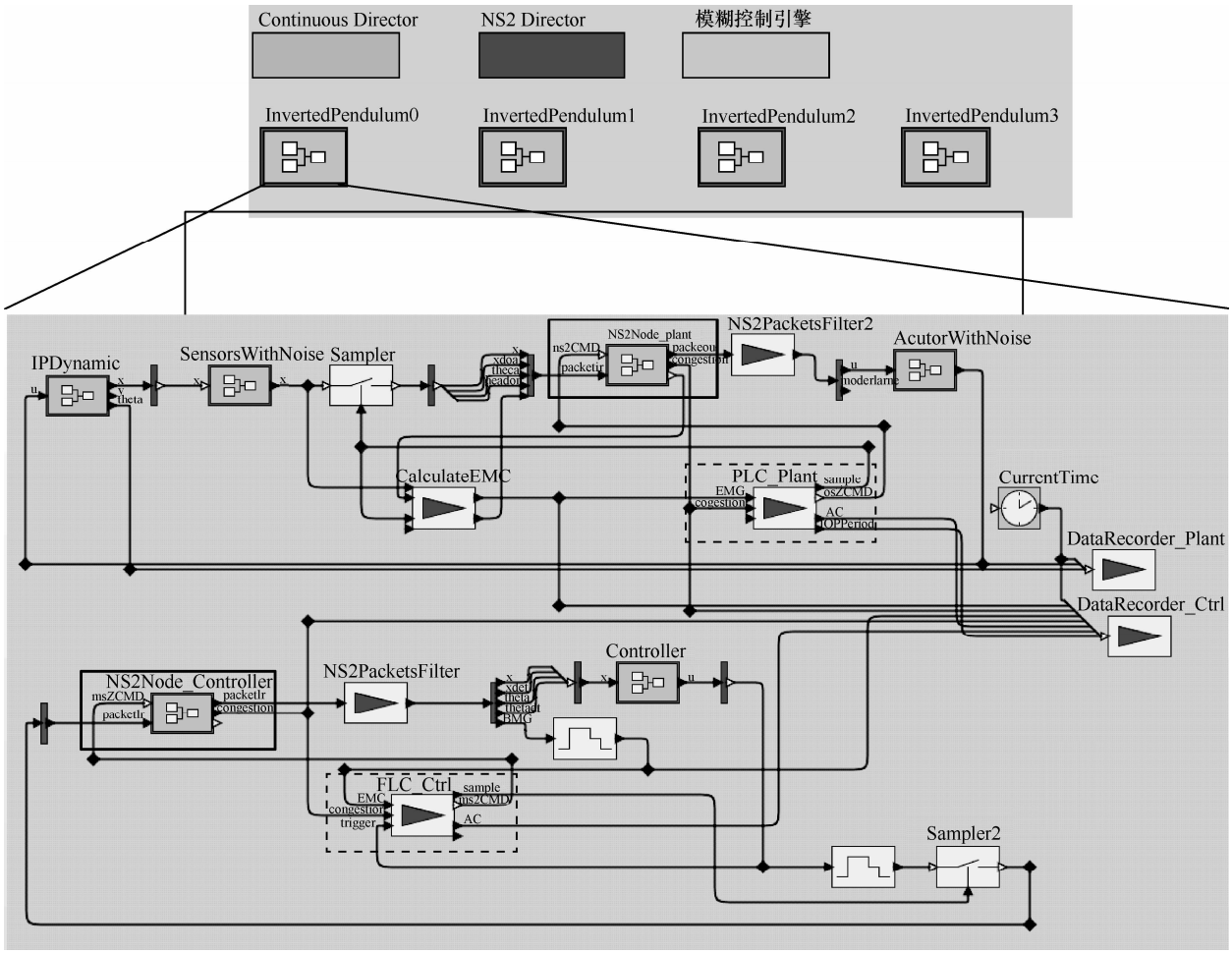

图 7 仿真实验的具体配置

紧迫度 U 搭载在数据分组里一起发送给控制器端，所以控制器端也会使用这个紧迫度 U，结合自身测量的网络拥塞度 C 来运行紧耦合模糊算法。

4.2 结果分析

为了比较控制性能，用到了常用的控制质量(QoC, quality of control)性能指标函数 $J(u)$。

表 4　无线网络仿真参数设置

类别	参数	值
PHY	Transmission power	1 mW
	SINR data capture	10 dB
MAC	Slot time	13 μs
	SIFS time	32 μs
	aCW_{min}	31
	aCW_{max}	1 023
	Symbol duration	8μs (3 Mbit·s^{-1})
Application	Packet size	200 byte
	Packet send rate	50 packet/s (T=20 ms)

$$J(u)=\int_{t_0}^{t_f}\left(\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(t)\boldsymbol{R}\boldsymbol{x}(t)+\boldsymbol{u}^{\mathrm{T}}(t)\boldsymbol{W}\boldsymbol{u}(t)\right)\mathrm{d}t$$

其中，$\boldsymbol{R}$ 和 $\boldsymbol{W}$ 二次权重矩阵，具体本例中，取 $\boldsymbol{R}=\boldsymbol{I}$，$\boldsymbol{W}=\boldsymbol{1}$。$t_0$ 和 t_f 分别是连续测试时间上的开始和结束时间。该指标函数对系统状态和控制量在整个控制过程中的表现进行了刻画，在自动控制领域里，一般都使用该指标函数对控制性能进行评估；它给出了系统控制质量的好坏：$J(u)$越小，说明系统状态越稳定，控制量越优越，因此控制质量越好。

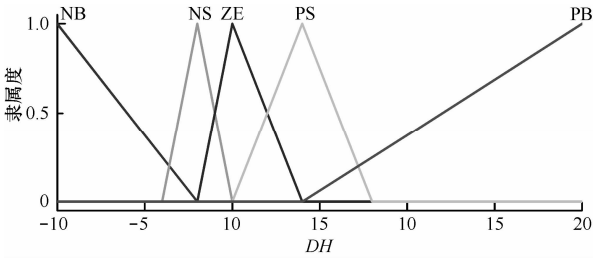

图 8　采样周期变动 DH 的隶属度函数

在分析网络通信性能方面，对于控制系统中的倒立摆节点，要考查平均传输率

$$R_{av}=\frac{\text{已发送数据分组总数}}{\text{系统运行时间}}$$

它反映了控制系统相关节点占用网络资源的情况。平均传输率越大，说明控制节点在更小的时间内发送了更多的数据分组，从而占用了更多的网络资源。对 R_{av} 的评估要看情况而定：网络拥塞较低时，希望 R_{av} 较大，避免浪费网络资源；而网络拥塞较高时，则希望在保证控制质量的前提下 R_{av} 越小越好，以优化使用有限的网络资源。另一方面，对于非倒立摆节点，分组丢失率和吞吐量将被考查，以考察本文的紧耦合控制方法对这些系统外的节点的通信性能的影响。

首先考察所有摆同时在 t=0.5 s 和 6.5 s 加入阶跃角度的情况。这里分别对节点数为 16、24、28 和 32 的网络进行了实验。图 9 给出了节点数为 28 的网络中紧耦合控制方法下的倒立摆的紧迫度 U，网络拥塞测量 C，网络优先级 AC 以及采样周期随时间的变化，可以看出网络 QoS 和控制系统的采样率都得到了自适应调整。图 10 描绘了节点数为 16 和 32 时的控制效果最差的一组倒立摆的仿真结果对比。其中虚线是传统 NCS 方法，实线是本文提出的紧耦合方法，而点划线则是不考虑 QoS 的自适应调整采样率 NCS 方法。从图可以看出，当节点数为 16 时(网络拥塞较低)，几种方法都能控制摆保持在平衡点上，紧耦合方法的控制效果只比传统方法好一点；而在节点数为 32 时(网络变得饱和)，传统方法控制的倒立摆角度一度达到$\Theta>-1.5$ rad，此时的系统实际上已不能再用简化的线性系统描述，因而实际上已经不能保持摆的稳定，而紧耦合方法仍然能保证所有倒立摆稳定在平衡点上；不考虑 QoS 自适应调整采样率方法虽然也能保持系统的稳定，但是控制效果在拥塞环境下明显不如紧耦合方法。

图 11 给出了不同节点负载下所有倒立摆的 QoC(控制质量) 和 R_{av} 的平均值对比。可以看出，随着网络拥塞的不断加重，传统方法的 QoC 呈指数级上升；因为采样率是固定的，R_{av} 不会改变。相比之下，网络拥塞度的增加不会给紧耦合方法的 QoC 带来太大变动，并且采样率得到了自适应调整：低拥塞时，R_{av} 比传统方法大，充分利用了空闲的网络带宽；高拥塞时，R_{av} 则较小，减缓了网络通信压力。总之紧耦合方法能用更少的网络通信保证更好的控制性能，这是按需进行有优先级区别通信的结果。不考虑 QoS 自适应方法，在网络低拥塞时与紧耦合方法性能相当；但是随着网络趋向拥塞，节点的通信质量要比紧耦合方法差，系统会自适应增加 R_{av} 以保证控制质量，尽管如此，它的 QoC 还是要比紧耦合方法差不少。另外，对于非倒立摆节点的通信来说，在紧耦合方法下，网络非饱和时，它们的分组丢失率和吞吐量都较传统方法有所改善，如图 12 所示。这说明紧耦合方法并没有因为 NCS 节点使用了高优先级 AC 而削弱了其他节点的通信，这是因为控制节点只有在系统紧迫时才会短

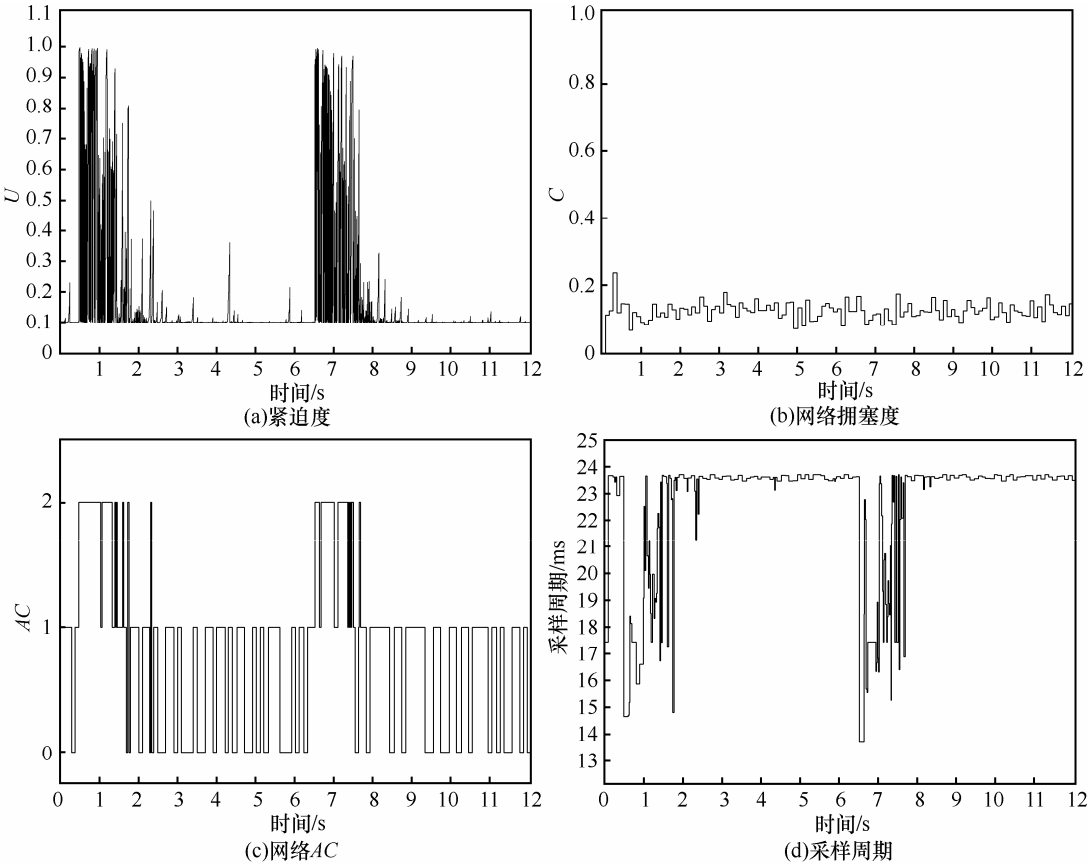

图 9 倒立摆的紧迫度 U、网络拥塞度 C、网络 AC 以及采样周期随时间的变化

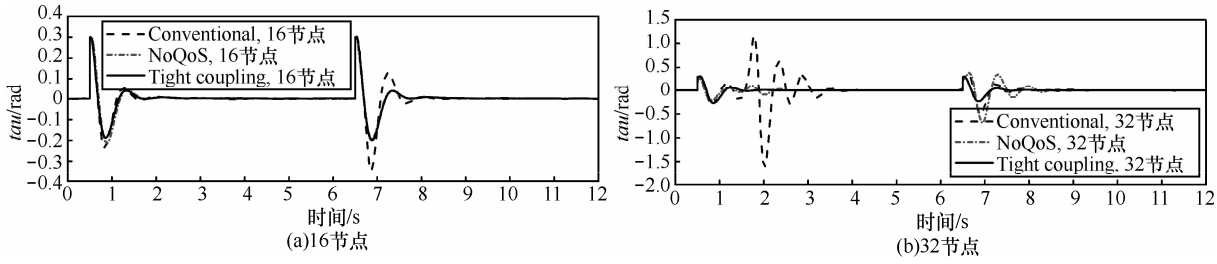

图 10 控制效果最差的倒立摆的仿真结果

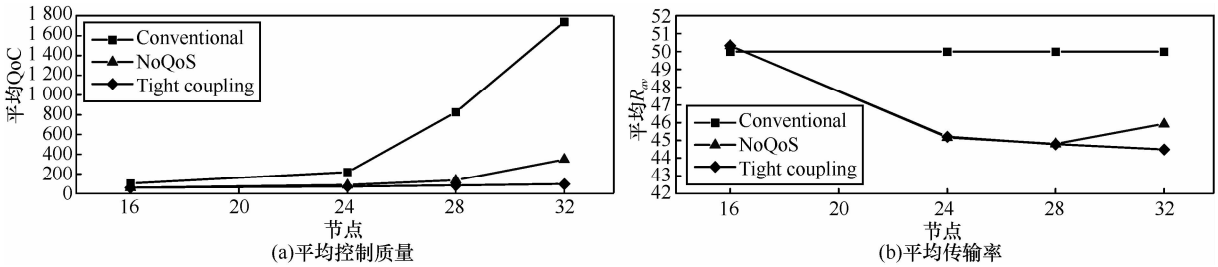

图 11 平均控制质量 QoC 及平均传输率 R_{av} 对比

暂性地使用高优先级 AC 进行通信，而在更多系统不紧迫的时候，紧耦合方法会自适应调整更少地发送数据分组，使用更低的优先级 AC，因此反而给其他节点带来更多的通信机会。

以上实验所有摆在同一时刻加入阶跃角度，它们的 NCS 紧迫度相应地会同时增大减小。一般地，现实中同一网络的不同系统的 NCS 紧迫度不会如此。以下实验设置 4 个倒立摆分别在 t=0.5、1.5、

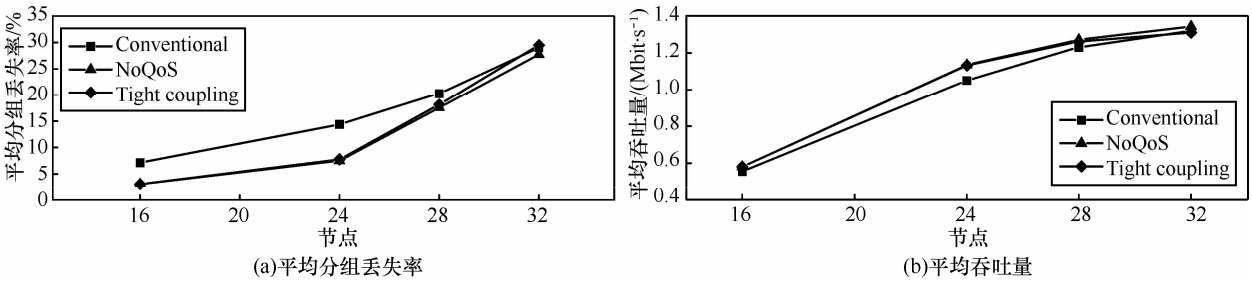

图 12　非倒立网络的平均分组丢失率及平均吞吐量对比

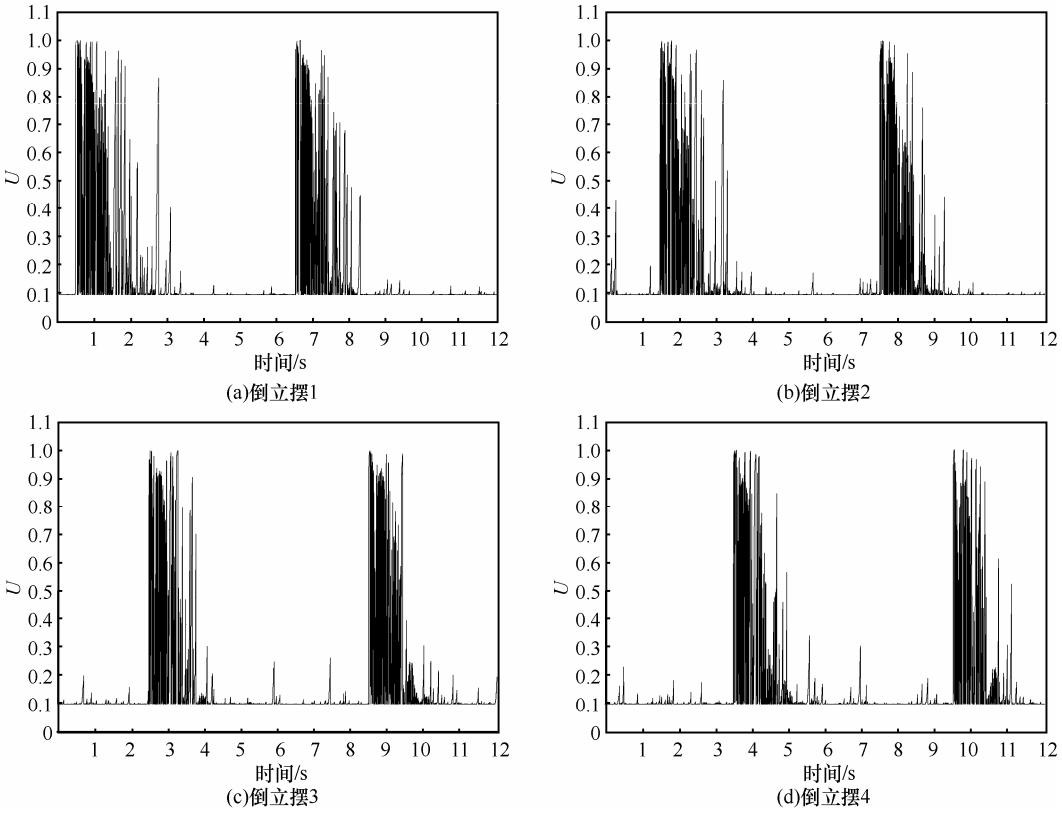

图 13　各倒立摆的 NCS 紧迫度

2.5、3.5 s 和 6.5、7.5、8.5、9.5 s 时刻加入阶跃角度。图 13 给出了 4 个倒立摆的 NCS 紧迫度随时间的变化，它们呈现出参齐起伏性。图 14 给出了 2 种情况下的紧耦合控制效果对比。可以看出，参差情况的平均 QoC 要比同时情况的小，控制效果更好。这是因为紧耦合方法能随着 NCS 紧迫度的参差出现而参差地调度各网络节点的 QoS 和采样周期，从而能避免更多的不必要网络冲突，保证了更高的通信成功率。

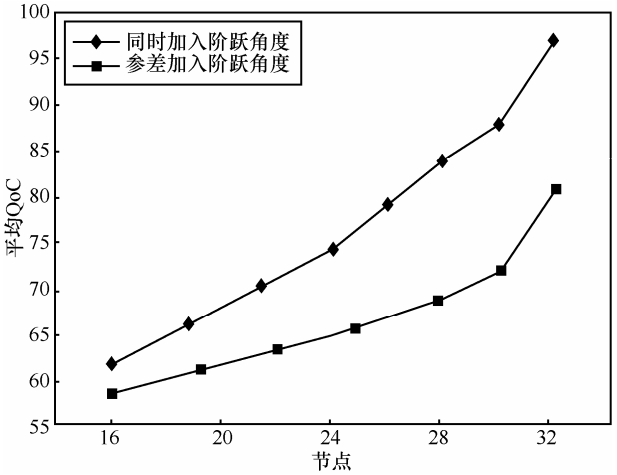

图 14　同时与参差加入阶跃角度时的控制质量 QoC 对比

5　结束语

为了在有限的网络带宽环境下提升网络控制系统的性能，基于信息物理融合系统提倡的方法学，

本文提出了一种紧耦合模糊网络控制方法。它选取 NCS 紧迫度、采样/控制周期、网络拥塞度以及网络 QoS 作为来自物理、计算以及通信世界的参量，根据系统自身的紧迫度和网络拥塞情况，自适应模糊调节系统的采样率和网络通信优先级，达到了信息世界与物理世界的紧耦合操作要求，同时也是一种简单，易于实现的实用网络控制方法。模拟实验结果分析显示，这种方法能有效地改善网络控制系统的性能，提高网络资源的利用率，比传统和非紧耦合控制方法（如文献[3,4]）能给整个网络控制方法带来更好的控制效果。当然，该方法的设计会较之复杂一些，也需要更多的计算资源来支撑；同时它也不如文献[5]这类更复杂的紧耦合方法一样具有最优的控制性能。然而，因为能实时有效地调度各控制节点按需通信，该方法特别适用于对实时性要求敏感的多个控制系统共享同一网络的应用场景。

未来，把网络多智体系统(NMAS, networked multi-agent system)[17]看作一种特殊的 NCS，本文提出的方法可以被应用到。事实上，已经着手分析紧耦合方法在编队控制(formation control)[18]问题上的应用及性能改善。此外，自动高速公路系统(automated highway system)[19]也是下一步要研究的对象。

参考文献：

[1] LEE E A. Cyber physical systems: design challenges[A]. 2008 11th IEEE International Symposium on Object Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC)[C]. 2008. 363-369.

[2] DERLER P, LEE E A, VINCENTELLI A S. Modeling cyber–physical systems[J]. Proceedings of the IEEE, 2012, 100(1): 13-28.

[3] LIAN FL, YOOK J K, TILBURY D M, *et al*. Network architecture and communication modules for guaranteeing acceptable control and communication performance for networked multi-agent systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2006, 2(1): 12-24.

[4] COLANDAIRAJ J, IRWIN G W, SCANLON W G. Wireless networked control systems with QoS-based sampling[J]. IET Control Theory and Applications, 2007, 1(1): 430-438.

[5] JIA B, EYISI E P, FAN Q, *et al*. Optimal cross-layer design of sampling rate adaptation and network scheduling for wireless networked control systems[A]. Cyber-Physical Systems (ICCPS), 2012 IEEE/ACM Third International Conference[C]. 2012. 107-116.

[6] FALLAH Y P, HUANG C, SENGUPTA R, *et al*. Design of cooperative vehicle safety systems based on tight coupling of communication, computing and physical vehicle dynamics[A]. 1st ACM/IEEE International Conference on Cyber-Physical Systems[C]. Stockholm, Sweden, 2010. 159-167.

[7] FALLAH Y P, SENGUPTA R. A cyber-physical systems approach to the design of vehicle safety networks[A]. 32nd International Conference on Distributed Computing Systems Workshops (ICDCSW)[C]. 2012. 324-329.

[8] IEEE Standard for Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 8: Medium Access Control (MAC) Quality of Service Enhancements[S]. IEEE Std 80211e-2005 (Amendment to IEEE Std 80211, 1999 Edition (Reaff 2003), 2005.

[9] 毛建兵, 毛玉明, 冷甦鹏等. 支持 QoS 的 IEEE 802.11 EDCA 性能研究[J]. 软件学报, 2010, 21(4): 750-770.
MAO J B, MAO Y M, LENG S P, *et al*. Research of the QoS-supporting IEEE 802.11 EDCA performance[J]. Journal of Software, 2010, 21(4): 750-770.

[10] YANG X, LIU R P, HEDLEY M. A channel access cycle based model for IEEE 802.11e EDCA in unsaturated traffic conditions[A]. Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)[C]. 2012. 1496-1501.

[11] ACHARYA P A K, SHARMA A, BELDING E M, *et al*. Rate adaptation in congested wireless networks through real-time measurements[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2010, 9(11): 1535-1550.

[12] LIN J, WU Y, WU G, *et al*. NCCPIS: A co-simulation tool for networked control and cyber-physical system evaluation[A]. 9th IFIP International Conference on Network and Parallel Computing[C]. Korea, 2012. 85-93.

[13] CHEN Q, SCHMIDT-EISENLOHR F, JIANG D, *et al*. Overhaul of IEEE 802.11 modeling and simulation in NS-2[A]. Proceedings of the 10th ACM Symposium on Modeling, Analysis, and Simulation of Wireless and Mobile Systems[C]. 2007. 159-168.

[14] JANTZEN J. Foundations of Fuzzy Control[M]. Hoboken, NJ, USA: John Wiley and Sons, 2007.

[15] BELANGER P R. Control Engineering: A Modern Approach[M]. New York, NY, USA: Oxford University Press, 1995.

[16] http://ptolemy.eecs.berkeley.edu/ptolemyII/ptII8.0/ptII/ptolemy/matlab/matlab.htm[EB/OL].

[17] WEN G, DUAN Z, YU W, *et al*. Consensus in multi-agent systems with communication constraints[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2012, 22(2): 170-182.

[18] WANG J L, WU H N. Leader-following formation control of multi-agent systems under fixed and switching topologies[J]. International Journal of Control, 2012, 85(6): 695-705.

[19] BERGENHEIM C, SHLADOVER S, COELINGH E, *et al*. Overview of platooning systems[A]. Proceedings of the 19th ITS World Congress[C].Vienna, Austria,2012.22-26.

作者简介：

林进挚（1985-），男，广东阳江人，南开大学博士生，主要研究方向为信息物理融合系统、嵌入式系统设计、无线网络通信技术等。

吴英[通信作者]（1973-），男，安徽安庆人，博士，南开大学副教授，主要研究方向为车载网、移动计算、网络管理等。E-mail: wuying@nankai.edu.cn。

吴功宜（1947-），男，安徽安庆人，南开大学教授，主要研究方向为物联网、对等计算、网络安全等。

徐敬东（1965-），女，辽宁兴城人，南开大学教授、博士生导师，主要研究方向为无线网络与移动计算、车载无线自组织网络、群智感知等。