

一类物联网控制系统中的时延问题研究

赵维佳¹ 袁华强¹ 李迪² 魏小锐¹

(东莞理工学院计算机学院 东莞 523808)¹ (华南理工大学机械与汽车工程学院 广州 510640)²

摘要 物联网控制系统作为一类特殊的网络控制系统,是网络控制系统的延伸与扩展。在分析系统结构、采样周期对网络负荷和控制性能影响的基础上,对物联网控制系统的时延问题进行仿真研究。针对零时延、固定时延和可变时延3种典型情况,定量地分析了随机时延对系统性能的影响。针对不同负载条件下随机时延的分布进行了仿真,并得出结论:在网络总时延中,适当减少前向通道时延所占的比重,可以大幅度改善系统性能;随机网络时延比固定网络时延对系统性能的影响更严重。

关键词 物联网控制系统,时延,网络负载,系统性能

中图分类号 TP302.7 文献标识码 A

Research on Delay in a Kind of Internet of Things Control System

ZHAO Wei-quan¹ YUAN Hua-qiang¹ LI Di² WEI Xiao-rui¹

(Computer College, Dongguan University of Technology, Dongguan 523808, China)¹

(School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)²

Abstract As a kind of special networked control systems, internet of things control system is the extension and expansion of Networked Control Systems. Based on the analysis of system structure, the impact of sampling period on network load and control performance, the simulation research about delay of Internet of things control system was carried out. For there kinds of typical cases of zero delay, fixed time delay and variable delay, the impact on system performance was quantitatively analyzed. According to the delay distribution under different load conditions, the related simulations were finished. Simulation conclusions are as follows: reducing forward channel delay can improve system performance, random delay on Internet of things control system impact more seriously than the fixed delay.

Keywords Internet of things control system (IOT CS), Delay, Network load, System performance

1 引言

网络控制系统(Networked Control Systems)是随控制技术、网络技术和计算机技术的发展而形成的一种新兴控制系统,以物联网为通信媒介的NCS称为物联网控制系统(Internet of Things Control System, IOT CS)。物联网控制系统具有连接简便、交互快捷、易于扩展和诊断准确等优点,但是网络的介入也带来了诸如网络诱导时延、数据包的多包传输及丢失、网络通信约束等新的问题,其中时延是影响系统性能的关键因素。

构成物联网控制系统的各控制闭环,通过传感器、触发器和控制器与网络连接,由于网络的分时复用特性,为避免冲突,同一时刻只能有一个节点向网络发送信息,待发送信息只有等到网络空闲时才能发送。当多个节点通过网络连接时,受到网络带宽和承载能力的限制,信息的碰撞、重发现象不可避免,必然使信息在传输过程中存在时延,所以时延问题是物联网控制系统的核心问题之一,从时延角度研究物联网控制系统具有理论和实际应用的价值。

2 物联网控制系统组成及性能分析

2.1 物联网控制系统的组成

借鉴NCS的研究方法^[1,2],分析IOT CS的结构,可知组成IOT CS的各控制环的前向通道和反馈通道都引入了控制网络这个信息传输环节,所以不可避免地会在控制回路中产生前向时延和反馈时延。图1所示为一个典型的IOT CS闭环,用 τ_{ca} 表示网络引入的控制器到执行器的前向通道时延, τ_{cr} 表示网络引入的传感器到控制器的反馈通道时延。

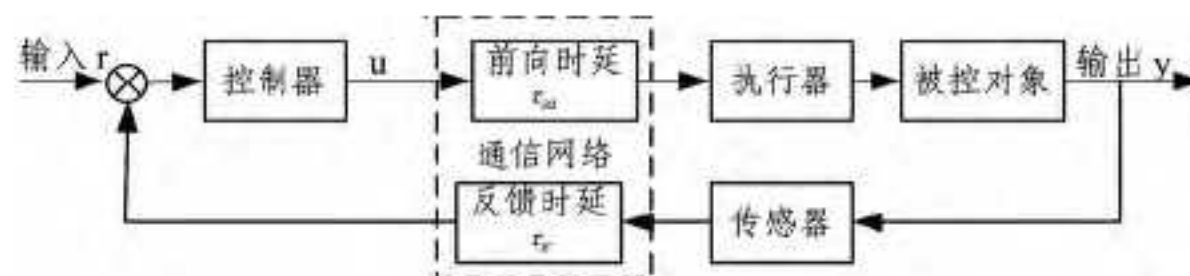


图1 物联网控制系统单个闭环结构图

被控对象大多是电机及机械附属装置,其输入和输出均为模拟量,一般采用连续时间状态方程或传递函数来描述,而控制器上的算法由计算机程序实现,是数字量形式,可以用离散时间状态方程描述。传感器节点要求接收由被控对象的模

本文受国家自然科学基金(61300197),广东省教育部产学研结合项目(2012B091100295),东莞市科技计划项目(2011108102018)资助。

赵维佳(1972—),男,博士,副教授,主要研究方向为网络化运动控制系统、嵌入式控制系统,E-mail:zhao-wei-quan@163.com;袁华强(1966—),男,博士,教授,CCF高级会员,主要研究方向为数据挖掘、模式识别。

拟量采样值转换成的数字量,同时执行器节点需要的是由通信网络传输来的控制器节点产生的数字量信号转换成的模拟量,因此,IOT CS 结构图可进一步用图 2 表示。

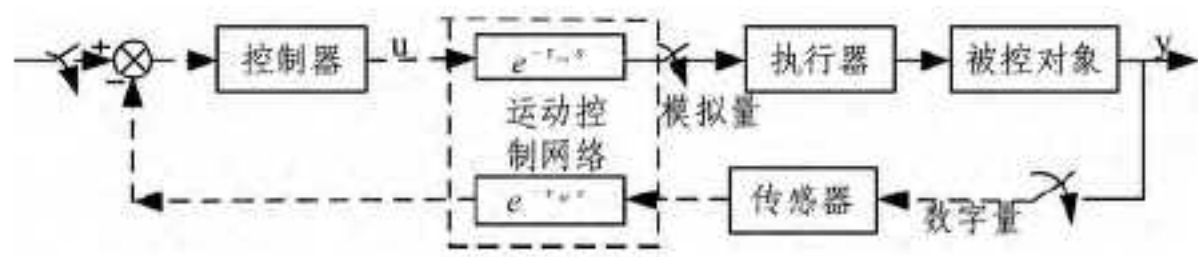


图 2 物联网控制系统采样结构图

可以看出,物联网控制系统中前向通道和反馈通道中都有与网络时延有关的纯滞后环节,增加了对其建模和分析的难度。

2.2 采样周期与网络负载及控制性能的关系

采样周期与控制系统性能密切相关,一般来讲,采样周期越小控制性能越好(因为此时离散系统更接近于实际的连续系统)。但是,由于网络的存在,采样周期小(采样频率高)意味着需要通过网络传输的数据量大,会进一步增加网络诱导时延^[3]。能否找到一个合适的采样周期,既保证时延有界和可接受又能使系统性能更接近实际的连续系统,是问题的关键。针对该问题,W. Zhang 对一个简单的积分型控制系统进行了相关讨论^[4]。假设时延小于一个采样周期 T ,系统状态方程如下:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + u(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (1)$$

$$u(t^+) = -Kx(t-\tau), \tau < h$$

其中, $t \in \{kh + \tau, k=0, 1, 2, \dots\}, k > 0, u(t^+)$ 分段连续,且在 $kh + \tau_k$ 时刻函数值更新。设系统采样周期为 T ,则相应的系统离散时间状态方程为:

$$\begin{cases} x(k+1) = \Phi x(kT) + \Gamma_0(\tau)u(kT) + \Gamma_1(\tau)u(k-1)T \\ y(k) = Cx(kT) \end{cases} \quad (2)$$

其中, $\Phi = \exp(AT), \Gamma_0(\tau) = \int_0^{T-\tau} \exp(As) ds, \Gamma_1(\tau) = \int_{T-\tau}^T \exp(As) ds$ 。通过引入增广状态向量 $z(kT) = [x^T(kT), u^T((k-1)T)]^T$,则闭环系统可以表示为: $z((k+1)T) = \tilde{\Phi}(k)z(kT)$,其中 $\tilde{\Phi}(k) = \begin{bmatrix} \Phi - \Gamma_0(\tau)k & \Gamma_1(\tau) \\ -k & 0 \end{bmatrix}$ 。

针对一个简单的积分器模型,

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = u(t), & t \in \{kT + \tau, k=0, 1, 2, \dots\}, k > 0 \\ u(t^+) = -Kx(t-\tau), & \tau < T \end{cases} \quad (3)$$

文献^[4]中对于二阶形式的 $\tilde{\Phi}$,应用稳定三角形的关系计算出采样周期 T 与时延 τ 之间的关系,得出稳定条件下网络化控制系统中时延 τ 与采样周期应该满足的条件,这一条件同样适用于 IOT CS,具体可描述如下:

$$\begin{aligned} \max\left[\frac{1}{2} - \frac{1}{kT}, 0\right] &< \frac{\tau}{T} < \min\left[\frac{1}{kT}, 1\right] \text{ or} \\ \max\left[\frac{1}{2}T - \frac{1}{k}, 0\right] &< \tau < \min\left[\frac{1}{k}, T\right] \end{aligned}$$

通过对上述积分器模型的稳定性分析,可以得到其稳定域,如图 3 所示^[5,6],可以看出时延与采样周期之间的约束关系;对于时延有上界(小于一个采样周期)的 IOT CS,时延和采样周期均影响稳定性,采样周期较小时,系统稳定允许的时延范围较大,即使时延达到一个采样周期,系统仍然是稳定

的。随着采样周期的增大,保持系统稳定所容许的时延上限减小。当采样周期达到一定值($2/K$)时,即使没有时延,系统也是不稳定的。由此可知,采样周期、网络性能和控制系统性能之间存在着约束关系。

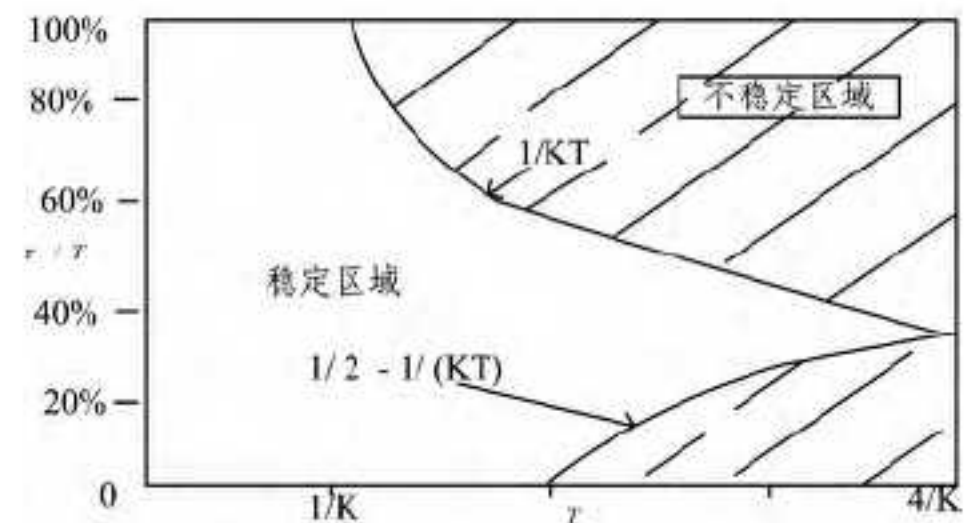


图 3 稳定域与采样周期和时延的关系

通过比较连续控制、数字控制和网络控制在不同采样速率条件下的性能,文献^[7]定性地建立了网络控制方式下,采样周期、网络运行性能和控制系统性能三者间的关系。在网络存在的情况下,控制系统性能不仅受采样周期的影响,而且受网络运行性能的限制。为了获得与直接数字控制方式下相近的控制性能,需要减小采样周期以克服网络不利因素对系统性能的影响。如图 4 中,采样周期 P_B 小于 P_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逐步提高,但是当采样周期减小到一定程度(C 点)后,网络负荷超过了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系统的性能,反而使系统性能恶化。实际应用中,如果控制策略已经确定,就可以根据系统特性初步计算出图中所示的差、优、可接受和不可接受等区域,对设计起到一定的指导作用。

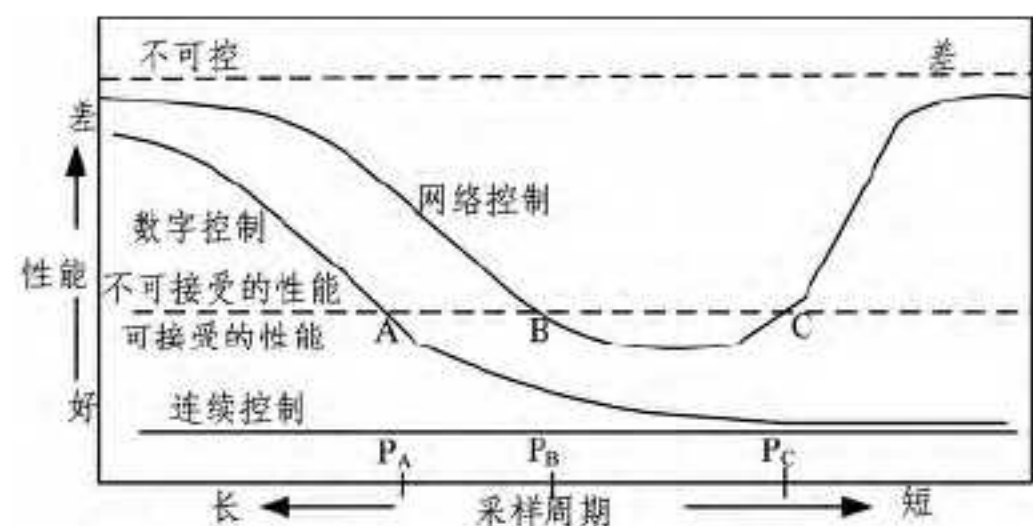


图 4 连续控制、数字控制和网络控制性能对比图^[63]

进一步,文献^[6]详细介绍了 A、B、C 点的计算方法,假设 T_s 为采样周期(对应采样频率为 ω_s), T_d 为传输时延, ω_s 满足关系式 $20 \leq \omega_s / \omega_{bw} \leq 40$ (ω_{bw} 为系统输入频率下降 3dB 的频率); T_t 为信息总的传输时间,在采用轮询数据传输方式时 $T_t = \sum_{i=1}^{2n} T_{tx} + T_{proc}$ 为所有节点信息处理时间总和,在采用选通数据传输方式时 $T_t = \sum_{i=1}^{n+1} T_{tx} + T_{proc}$ 为节点信息处理的最大时间(n 为节点总数, T_{tx} 为相应节点的信息传输时间), 0.69 是网络上要传输的信息总数趋向于无穷时在可调度情况下的最大利用率。

2.3 仿真研究

我们对不同网络负载下的系统响应进行了仿真,干扰节点对网络的占用率分别为 0%, 30%, 60%, 90% 时的仿真结果见图 5,说明了该 IOT CS 在不同网络负载下的控制性能。仿真结果可以清晰地表现出网络负载对 IOT CS 性能的影响,随着网络负载的增加,网络时延也不断增加,系统性能变差(超调量增大,上升时间和调节时间变长),当网络负载达到 90% 时,系统变得发散,导致系统由稳定变为不稳定。

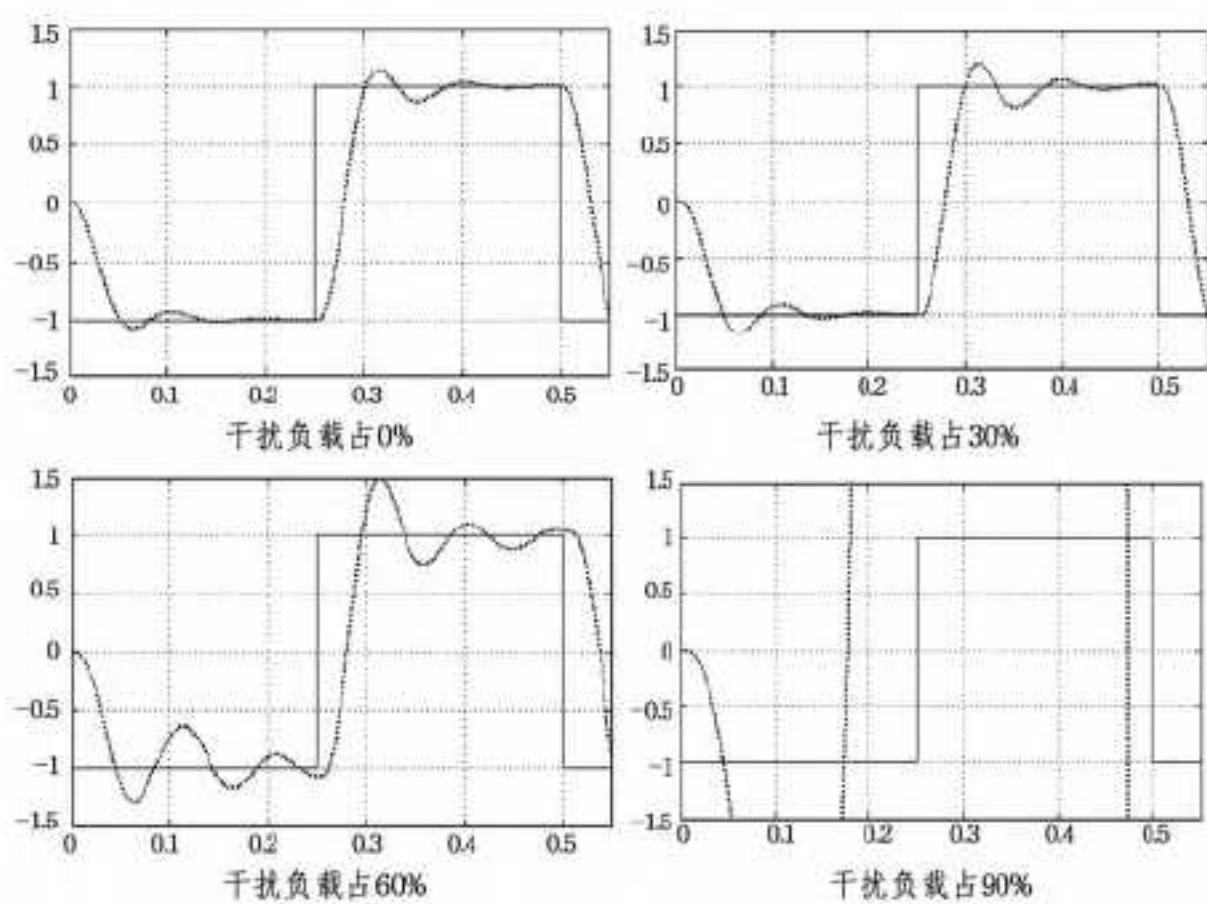


图5 不同网络负载情况下的系统响应

3 IOT CS 的网络时延分析及研究方法

3.1 IOT CS 的网络时延组成

IOT CS 中最主要有两类时延:计算时延和传输时延。传感器、控制器和执行器对数据的处理产生计算时延,分别表示为 τ_s 、 τ_c 和 τ_a ;传感器到控制器和控制器到执行器的时延统称为传输时延,分别用 τ_{sc} 和 τ_{ca} 表示。综合以上两类时延,可得被控对象到控制器的时延为 $\tau_{pc} = \tau_{sc} + \tau_s$,由于在这段时间内通过网络传输的是被控对象的输出,可称之为输出时延;控制器到被控对象的时延为 $\tau_{cp} = \tau_c + \tau_{ca} + \tau_a$,由于在这段时间内通过网络传输的是控制器输出,可称之为控制时延,IOT CS 的总时延为 $\tau = \tau_{pc} + \tau_{cp}$ 。考虑到目前微处理器速度和性能的提高,计算时延相对于传输时延可忽略不计,因此,输出时延和控制时延可以分别简化表示为 $\tau_{sc} \approx \tau_{pc}$ 和 $\tau_{ca} \approx \tau_{cp}$ 。所以在分析 IOT CS 的网络时延时,最关心的就是传输时延,即传感器_控制器时延 τ_{sc} 和控制器_执行器时延 τ_{ca} ,因为它们直接影响到系统的稳定性和控制性能。如图6所示,在实际传输过程中 $\tau_{sc} = t^s - t^c$, $\tau_{ca} = t^c - t^a \approx t^c - t^s$ 。

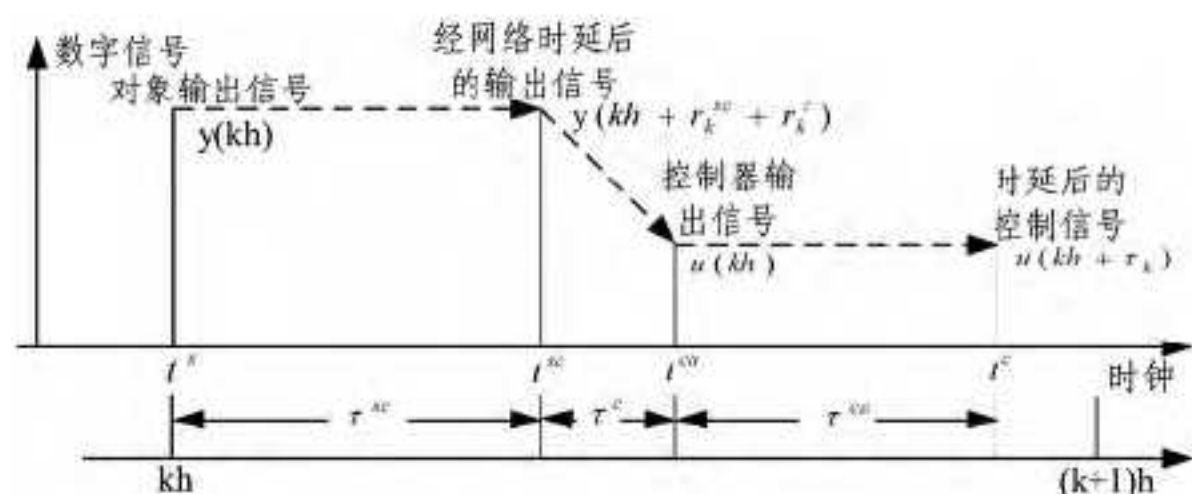


图6 物联网控制系统时延时序图

3.2 时延问题仿真研究

网络时延可能大于一个采样周期(用 T 表示),也可能小于一个采样周期,在区间 $[0, a]$ 内分布,若 $a < T$,则称为短时延;若 $a > T$,则称为长时延(注意:长时延不是一定大于一个采样周期,而是指时延的分布区间的上界大于一个采样周期)。

受网络通信协议、网络负载、传输速率和数据包大小等诸多因素的影响,IOT CS 中的网络时延可能呈现固定、随机、有界、无界的特征,导致系统性能下降甚至不稳定,同时也给系统的分析、设计带来困难。

下面以具体被控对象为例,针对3种典型时延情况,通过搭建 IOT CS 仿真模型来研究网络时延对系统性能的影响。首先,利用 Matlab/Simulink 建立如图7所示的针对常数时延

的仿真模型。

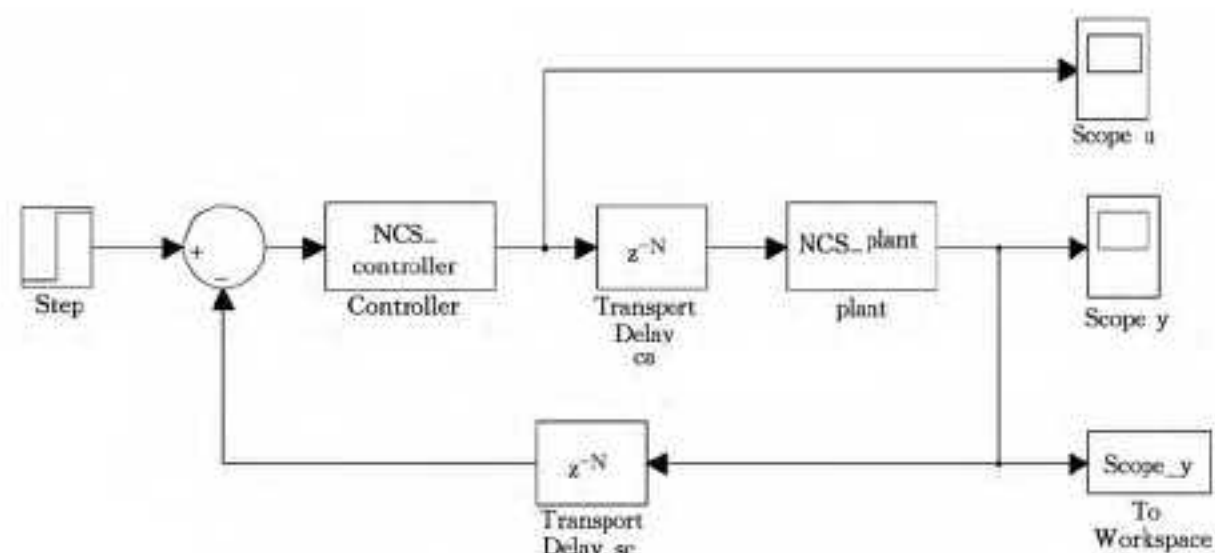


图7 常数时延仿真模型结构图

考虑 IOT CS 的时不变被控对象连续时间状态方程为:

$$\begin{cases} \dot{x}_p(t) = Ax(t) + Bu(t - \tau) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (4)$$

其中系数矩阵为: $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & -2 \end{bmatrix}$, $B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$, $C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}$ 。

为研究方便,假设控制器的连续时间状态方程为:

$$\begin{cases} \dot{x}_c(t) = -x_c(t) + u_c \\ y_c(t) = x_c(t) \end{cases} \quad (5)$$

下面分别讨论在3种典型时延情况下的系统输出:

Case1: 无时延情况,即 $\tau = \tau_{ca} + \tau_{sc} = 0$ 。

Case2: 前向通道和反馈通道时延总和为常数,即 $\tau = \tau_{ca} + \tau_{sc} = \text{常数}$,其中又分为两种情况: $\tau_{ca} \gg \tau_{sc}$ 和 $\tau_{sc} \gg \tau_{ca}$ (其中“ $\gg$ ”表示远大于)。

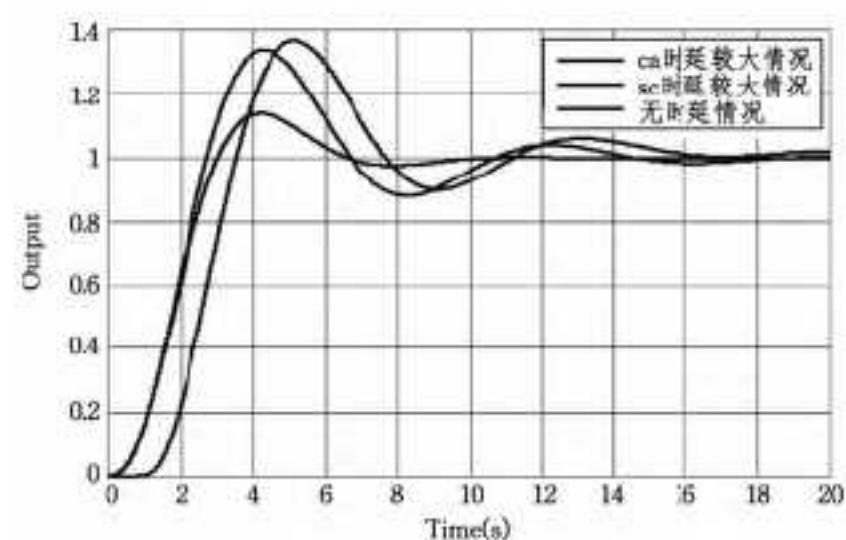


图8 两种常数时延情况的仿真结果

由上述两种情况的仿真结果(图8)可知, $\tau_{ca} \gg \tau_{sc}$ 比 $\tau_{sc} \gg \tau_{ca}$ 情况下的系统性能差,随着 τ_{ca} 的增加,系统响应的超调量增大,调节时间变长。因此,即使在网络总时延为相同常数情况下,随着 τ_{ca} 在总时延中所占比例的不同,系统的响应也会发生变化,由此可见,尽量减少前向通道时延 τ_{ca} 值,可以更大程度上改善 IOT CS 在时延条件下的控制性能。

Case3: 可变时延,针对反馈通道时延 τ_{sc} 和前向通道时延 τ_{ca} 均为随机可变时延的条件,建立如图9所示的可变时延仿真模型,得到可变时延条件下的系统输出响应曲线,如图10所示。

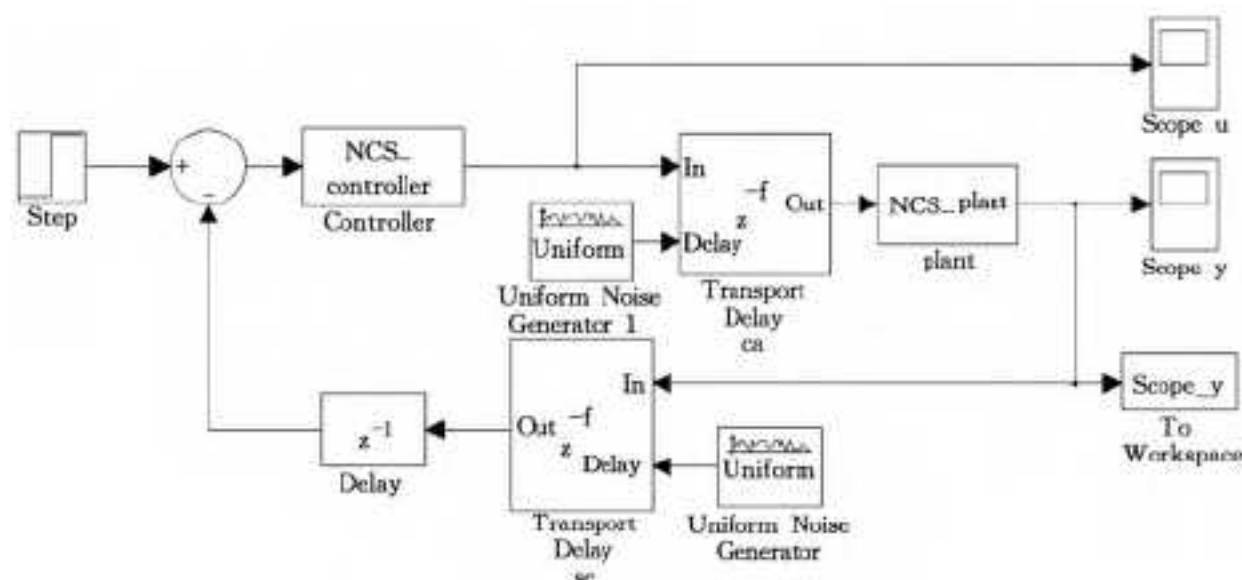


图9 可变时延仿真模型结构图

(下转第315页)

他两种算法。EXP-AG 算法的丢包率比 EXP/PF 算法平均小 48.6%,这是因为 EXP/PF 和 EXP-AG 算法考虑到了非实时业务和实时业务的优先级,而且 EXP-AG 算法给予了实时业务更高的优先级,从整体上来说 EXP-AG 算法降低了业务丢包率。

结束语 本文提出了一种新的基于 QoS 的下行调度算法,通过仿真表明该算法应用于 LTE 混合业务中可以在保证业务调度公平性的前提下,有效降低业务丢包率,并提高系统的整体吞吐量。

参考文献

- [1] 周建存,郝夏斐. LTE 中基于协作 AODV 协议的拥塞控制机制研究[J]. 计算机科学,2012,39(8):122-125
- [2] Ericsson N S. Adaptive modulation and scheduling of IP traffic over fading channels[C]// VTC 1999-Fall. IEEE VTS 50th. IEEE,1999,2:849-853
- [3] 曾木飞. LTE 下行分组调度算法研究[D]. 广州:华南理工大学,2012

- [4] Kim K, Koo I, Sung S, et al. Multiple QoS support using M-LWDF in OFDMA adaptive resource allocation[C]// The 13th IEEE Workshop on. IEEE,2004:217-222
- [5] Shakkottai S, Stolyar A L. Scheduling algorithms for a mixture of real-time and non-real-time data in HDR[C]// Proceedings of 17th International Teletraffic Congress ITC-17. 2000:793-804
- [6] Sesia S, Toufik I, Baker M. LTE: the UMTS long term evolution [M]. New York: John Wiley & Sons, 2009
- [7] Capozzi F, Piro G, Grieco L, et al. Downlink packet scheduling in lte cellular networks: Key design issues and a survey[J]. Communications Surveys & Tutorials, IEEE, 2013, 15(2): 678-700
- [8] Shakkottai S, Stolyar A L. Scheduling for multiple flows sharing a time-varying channel: The exponential rule[J]. Translations of the American Mathematical Society-Series 2, 2002, 207: 185-202
- [9] 刘伟. LTE 系统中基于混合业务的分组调度算法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2012
- [10] Piro G, Grieco L A, Boggia G, et al. Two-level downlink scheduling for real-time multimedia services in LTE networks[J]. Multimedia, IEEE Transactions on, 2011, 13(5): 1052-1065

(上接第 305 页)

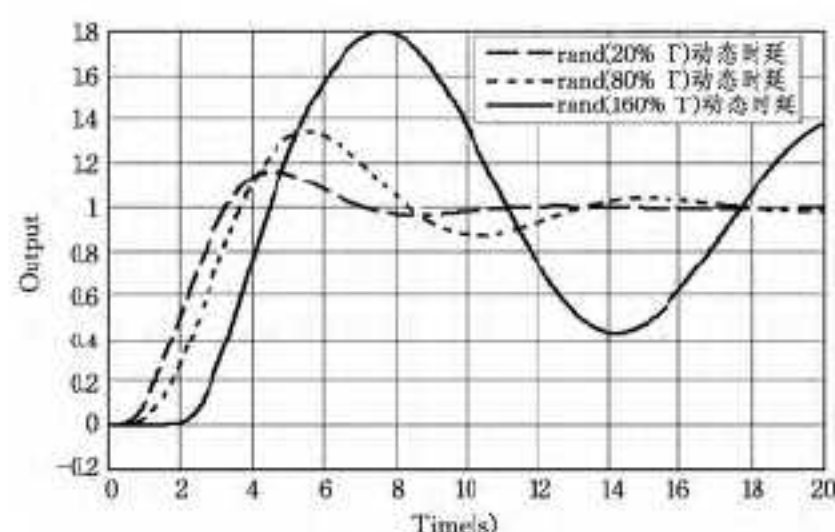


图 10 可变时延仿真结果

从图 10 中可以看出,随着网络时延的增大,系统上升时间变长,超调量变大,振荡加剧,系统趋于不稳定。由此可知,随机时延对网络化运动控制系统性能的影响比固定时延更加严重。而实际系统中,时延往往是随机出现的,且随负载条件的变化而改变。图 11 仿真结果显示了不同负载条件下的随机时延分布情况,可以看出高负载条件下时延波动的频率和幅度比低负载条件下明显增大,对系统性能更加不利。

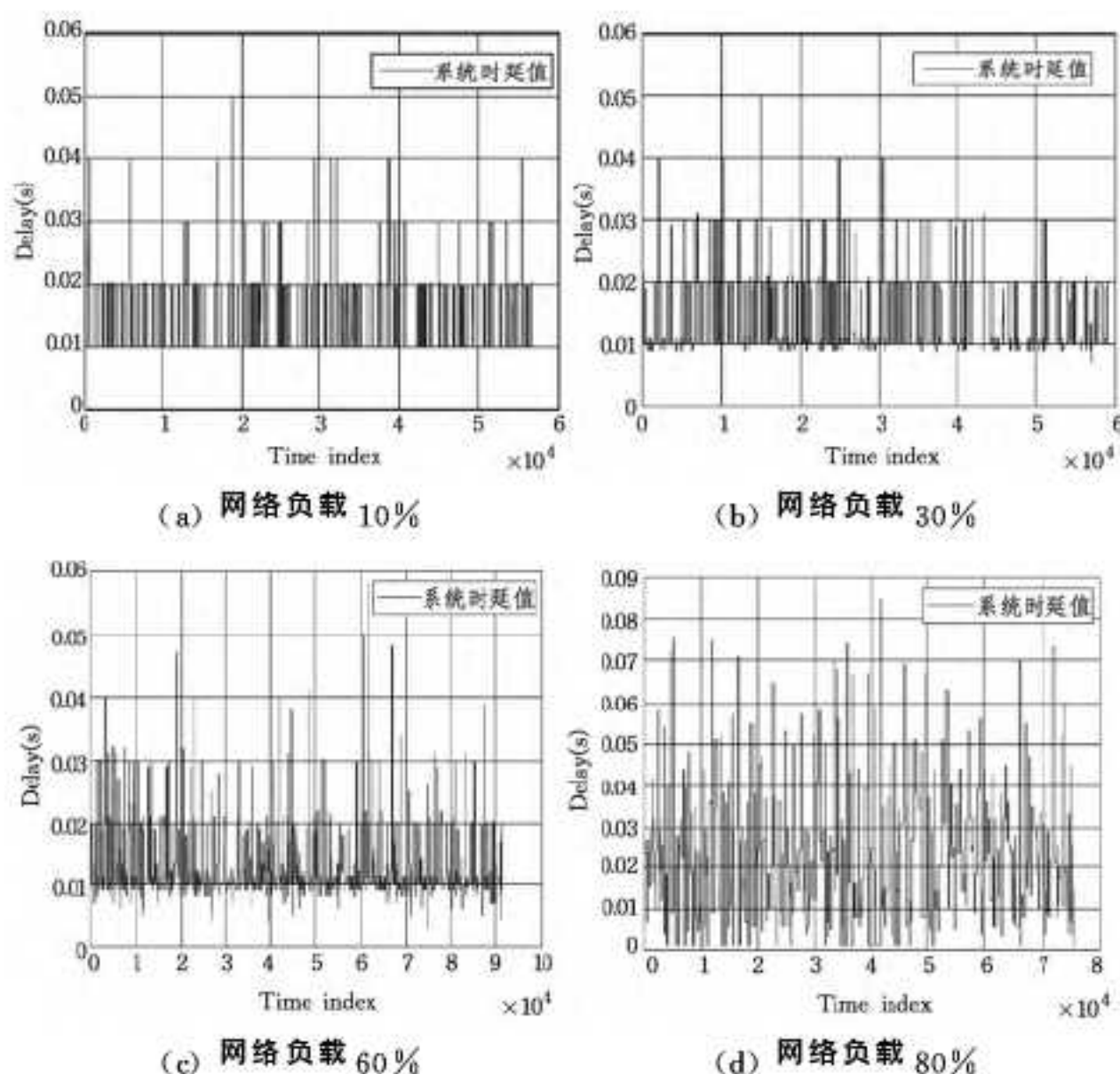


图 11 不同网络负载条件下的随机时延分布

结束语 在分析物联网控制系统的系统结构、采样周期对网络负荷和控制性能影响的基础上,对 IOT CS 的时延问题进行了研究。在 Matlab/Simulink 中搭建不同的仿真模型,就零时延、固定时延($\tau = \tau_{ca} + \tau_x = \text{常数}$,具体分为 $\tau_{ca} \gg \tau_x$ 和 $\tau_x \gg \tau_{ca}$ 两种情况)和可变时延 3 种典型的网络时延对 IOT CS 系统性能的影响进行了仿真研究。定量地分析了随机时延对系统性能的影响,同时对不同负载条件下随机时延的分布进行了仿真研究,并得出结论:减少前向通道时延 τ_{ca} 在网络总时延中所占的比重,可以大幅度改善系统性能,随机网络时延比固定网络时延对 IOT CS 的影响严重。

参考文献

- [1] Raja P, Noubir G. Static and dynamic polling mechanism for Fieldbus networks [J]. Operating System Overview, 1993, 27 (3): 34-43
- [2] 窦连旺. 网络控制系统的建模、稳定性分析及其调度的研究 [D]. 天津: 天津大学, 2003
- [3] Ray A, Halevi Y. Integrated communication and control systems: part I—analysis and part II—design consideration [J]. ASME Journal of Dynamic System Measurement & Control, 1988, 110: 367-381
- [4] Zhang W. Stability Analysis of Networked Control Systems [D]. Electrical Engineering and Computer Science, Case Western Reserve U, May 2001
- [5] Zhang W, Branicky M S, Philips S M. Stability of networked control systems[J]. IEEE Control Magazine, 2001, 21(1): 84-99
- [6] Lian F L, Moyne J, Tilbury D. Modeling and optimal controller design of networked control systems with multiple delays [J]. International Journal of Control, Taylor & Francis, 2003, 76 (6): 591-606
- [7] Lian Feng-li, Moyne J. Time Delay Modeling and Sample Time Selection for Networked Control Systems [C]// Proceedings of ASME-DSC, 2001 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. New York, 2001: 1-8