

基于HTCPN和隐马尔科夫的网络控制系统模型分析

孙连坤, 顾鸿儒[†], 赵占山

(1. 天津工业大学 计算机科学与软件学院, 天津 300387;

2. 天津工业大学 天津市光电检测技术与系统重点实验室, 天津 300387)

摘要: 针对具有随机时延的网络控制系统(NCSs), 研究其建模与系统分析问题. 运用层次时间颜色 Petri 网(HTCPN)对以PLC为控制器的NCSs进行结构保留形式建模, 并以新颖的方式将网络丢包和乱序现象与系统模型结合. 重点分析系统中传感器-控制器、控制器-执行器随机时延分布情况, 建立时延与网络中数据包运行情况间的关系. 在此基础上, 利用 Baum-Welch 算法建立两种时延的隐马尔科夫模型(HMM), 进一步验证了 HTCPN 模型与 HMM 的等效性.

关键词: 网络控制系统; HTCPN; 马尔科夫链; 网络时延; Baum-Welch 算法

中图分类号: TP273

文献标志码: A

Model analysis of network control systems based on HTCPN and hidden Markov

SUN Lian-kun, GU Hong-ru[†], ZHAO Zhan-shan

(1. School of Computer Science and Software Engineering, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China;

2. Tianjin Key Laboratory of Optoelectronic Detection Technology and System, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China)

Abstract: The modeling and system analysis of networked control systems(NCSs) with stochastic delay are studied. Firstly, the structure conserving model of the NCSs with the PLC controller is built by using hierarchical timed colour Petri net(HTCPN), which combines network packet loss and disorder with the system model in a novel way. Secondly, the random delay distributions from the sensor to controller and the controller to actuator are analyzed, and the relationship between the time delay and the operation of data packets in the network is established. On this basis, the Baum-Welch algorithm is used to establish two time delay hidden Markov models(HMM) to further verify the equivalence between HTCPN model and HMM.

Keywords: network control system; hierarchical timed coloured Petri net; hidden Markov model; time delay; Baum-Welch algorithm

0 引言

网络控制系统是控制系统中新一代的研究对象, 随着计算机网络与控制科学日益密切的交叉渗透, 网络控制系统越来越复杂的结构给控制学科的发展带来了创新与机遇^[1-5]. 网络控制系统解决了传统控制系统在地域上的局限性并拓宽了控制的活动场所, 降低了成本和费用. 然而, 网络的引入也给系统带来了时延, 这种确定或不确定的时延大大增加了系统分析的复杂性, 同时, 网络中以数据包的形式进行信息传递, 丢包与乱序现象也给系统控制带来了挑战. 为此, 大量学者针对网络控制系统的建模^[6]、系统分析^[7]以及控制器设计^[8-9]等方面展开了分析和研究. 考虑到

系统内部控制器、传感器和执行器各自的特点, 应用 Petri 网对基于 PLC 控制器的网络控制系统进行建模, 根据模型所得出的时延数据研究系统时延分布规律, 分析数据包在网络中的运行情况.

Petri 网是德国学者 Carl A Petri 于 1962 年提出的一种描述事件和条件关系的网络式建模方法^[10]. 经过数十年的发展, Petri 网已成为离散事件系统的主要建模工具. Petri 网既有其严格的数学定义, 又具有直观易懂的网络式图形表示, 其特点不仅丰富了系统行为描述方法, 更为控制系统和计算机科学扩展了坚实的数学概念基础, 许多学者运用 Petri 网对网络控制系统建模做出了大量工作^[11-14]. 层次时间颜色

收稿日期: 2016-04-28; 修回日期: 2016-09-12.

作者简介: 孙连坤(1979—), 男, 副教授, 博士, 从事网络控制系统等研究; 顾鸿儒(1991—), 女, 硕士生, 从事 Petri 网分析的研究.

[†]通讯作者. E-mail: ghr_time@163.com

Petri网(HTCPN)是对Petri网的综合扩展,它将时间Petri网、颜色Petri网与层次Petri网进行融合,利用分层技术解决空间爆炸问题,颜色数据有利于数据结构规划,而时间戳的加入有利于模型描述系统部件之间的时序关系,使得库所和变迁具有时间属性。因此,HTCPN是更适用于对动态并发异步系统进行建模研究的高效方法。文献[15]利用HTCPN分别对网络控制系统中的控制器、执行器和传感器进行简略的建模,并且进行了简单的时延分析;文献[16]给出了各结构的详细系统模型,并对所提取出的时延进行了Markov建模,分析并验证了系统时延的Markov随机性,然而系统模型中的网络部分建立在一种理想情况之下,未考虑到网络传送过程中数据包丢失和数据包乱序等现象。

利用Petri网的时间戳概念和层次化技术,对文献[16]中的理想化模型进行改进并加以提高。利用HTCPN^[17-19]针对网络控制系统各部分结构的主要特征进行了建模,将网络丢包和乱序等实际现象加入模型中,并将定常传送时延改进为均匀分布时延,使其变为具有不确定时延的网络控制系统,进一步对时延进行提取和分析。此外,为了掌握网络控制系统中数据包传送的具体状态,利用Petri网的分析技术对丢失、乱序的数据包进行统计和分析。利用马尔科夫链的数学分析方法研究模型中的时延特性并对其进行验证。

1 系统结构框架分析

NCSs是将控制器、传感器、执行器通过网络进行闭环连接的反馈控制系统。在一个基于PLC控制器的NCSs中,系统以一定的周期进行数据提取或指令运行。基于PLC控制器的网络控制系统结构框架如图1所示。

在图1中,PLC-NCS由3大部分组成,分别是控制器、执行器和传感器。控制器分为两大部分:一部分是PLC-CPU,它以扫描的方式将数据从输入单元的寄存器中提取出来传递给执行部件,经过执行时间 τ_c 之后计算出运行结果,并传递给输出单元;另一部分是通信模块,它可以周期性地扫描远程输入输出单元的寄存器,以确定是否有传感器传递过来的信息数据,并以一定的周期 T_c 提取数据,同时,通信模块也将程序执行的结果通过以太网发送给远程执行器。在PLC-NCS中,由于对数据指令的提取或者执行都存在一定的周期,整个系统会产生时延。将传感器到控制器的时延定义为 T_{sc} ,控制器到执行器时延定

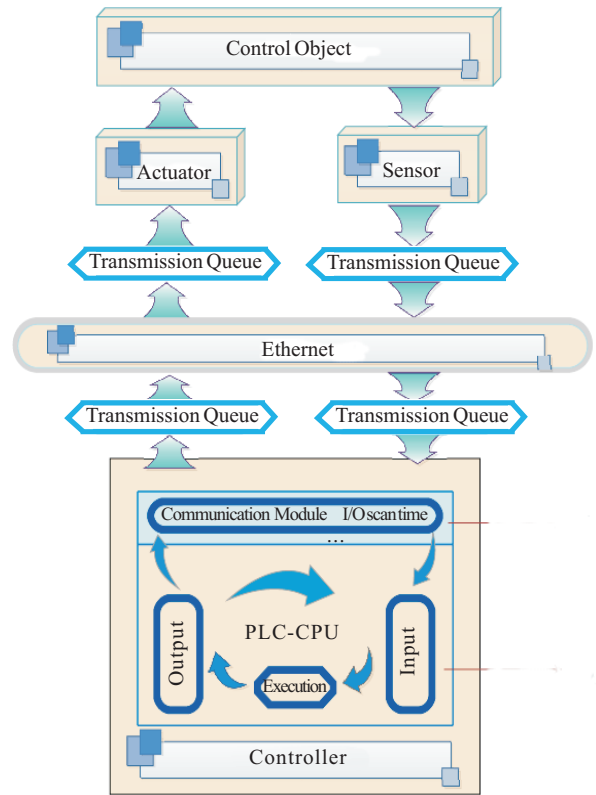


图1 基于PLC控制器的网络控制系统结构框架

义为 T_{ca} ^[20]。在研究NCSs的领域中,这两个时延也是影响系统稳定性的重要因素。

2 基于HTCPN的网络控制系统建模

考虑到整个系统各部件的性能各具特色,通过运用HTCPN对系统进行分层细化并逐步求精。基于HTCPN的NCSs的顶层结构如图2所示。

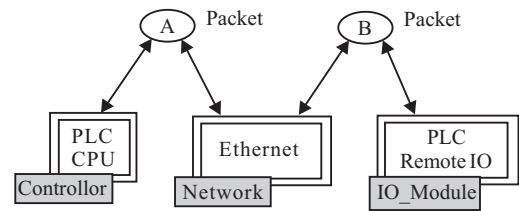


图2 基于HTCPN的网络控制系统的顶层模型

图2由3个替代变迁(PLC-CPU, Ethernet, PLC Remote IO)和两个融合库所(A, B)构成。替代变迁PLC-CPU用于模拟网络控制系统的控制器,可以在其相应的子层对控制器进行更为深层次的精化建模。它与融合库所A相连,实现与替代变迁Ethernet的数据传递。同时,融合库所B用于替代变迁Ethernet与替代变迁PLC-Remote IO之间的数据传递。在替代变迁和融合库所的共同作用下,整个NCS的HTCPN模型成为一个闭环反馈结构。

接下来采用结构保留形式建模,对顶层模型进行分层细化。子层控制器模型如图3所示。

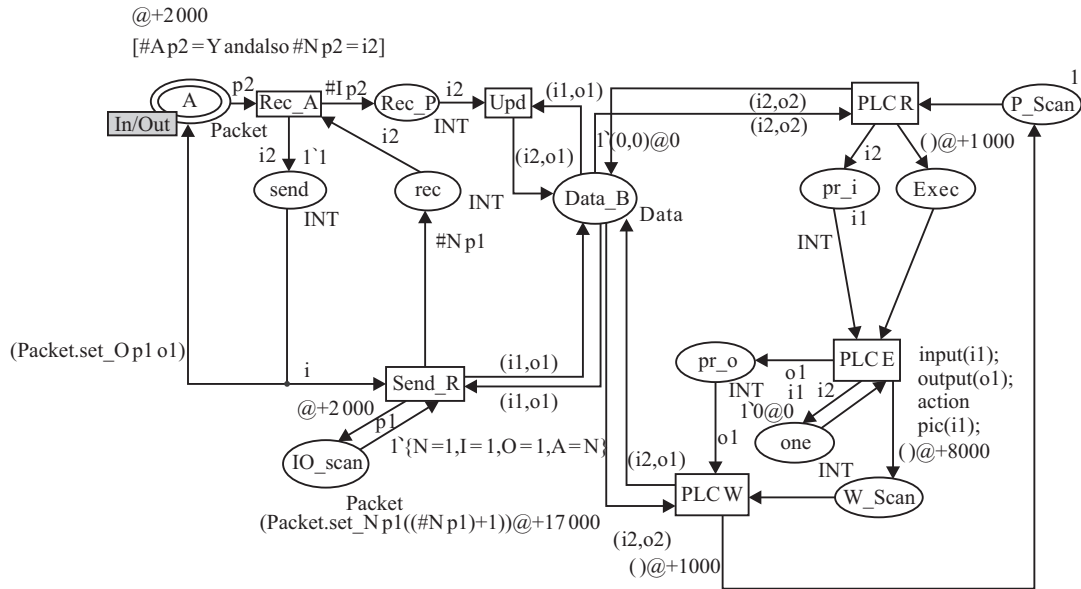


图3 子层控制器模型

图3为两个部分,左面的是通信模块,它实现对数据包进行周期性地接收和发送.变迁Send_R将数据包发送给融合库所A,融合库所A把数据与网络层模型进行交换,将数据返回到控制器模型,再通过变迁Rec_A接收,进一步发送到库所Data_B,库所Data_B是控制器中的寄存器,它对通信模块得到的新数据和执行部件计算出的结果数据进行缓存.库所Data_B右面建模部分是控制器中CPU的模型,变迁PLC_R、PLC_E和PLC_W分别完成对数据的读、执行、写3种功能,执行后的数据返回库所Data_B,再周期性地传递给变迁Send_R,实现数据发送.

NCS的远程输入输出模型既包含了传感器,也包含了执行器.子层远程IO模型如图4所示.

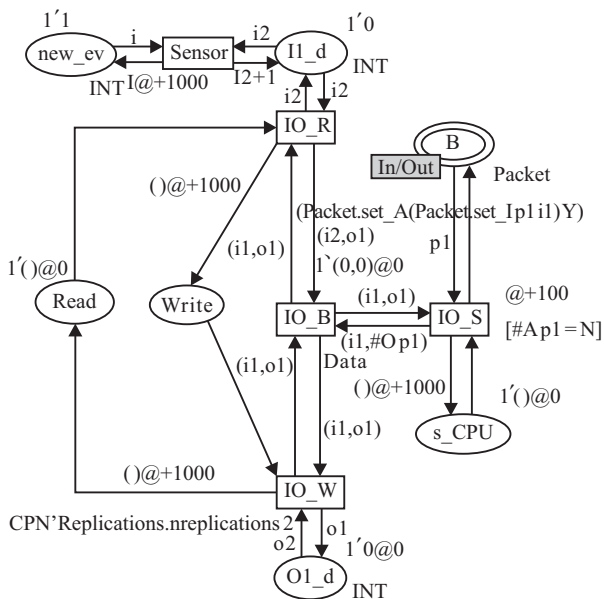


图4 子层远程IO模型

变迁IO_S对融合库所B进行周期性扫描,检查融合库所B中是否存在从网络层模型传递过来的新数据,并且将得到的新数据传入到IO_B库所中,寄存器IO_B既用于存储传感器所输出的新数据,也用于存储执行器进行读、写操作后的计算结果.库所new_ev完成了传感器周期性扫描,其扫描周期设置为1000.变迁Sensor模拟传感器,以模型所设定的周期从库所new_ev中扫描数据.变迁Read与变迁Write模拟执行器,对数据进行读和写操作,并将结果发送给寄存器IO_B,最后将结果通过网络层模型返回给控制器模型.

子层网络模型如图5所示.该层模型通过OK函数实现数据包以概率10%丢失的功能,并且在发生网络异常时将丢失的数据包进行重传.库所C和库所D模拟数据包重传介质,若OK函数返回值为假,则数据包将通过变迁Net1和变迁Net2传递给库所C和库所D,完成数据重传.库所K1和库所K2通过整型变量k,对数据包的序号进行控制,以保证数据包按序传输,解决乱序现象.通过融合库所A和融合库所B使得NCS的HTCPN模型中的3个子页实现信息传递.考虑到网络传输的不确定性,将网络传输时延设置为在[1000,2000]内均匀随机分布.

注1 在文献[16]中,作者针对网络模型的建模较为简单,网络传送时延默认为定常的时间,并未考虑到网络传输时的不确定现象,例如网络数据包丢失和数据包乱序等常见问题,在这种理想状态下的分析与结果较难应用于实际,因此,本文针对网络化控制系统中网络模型进行改善和增产.

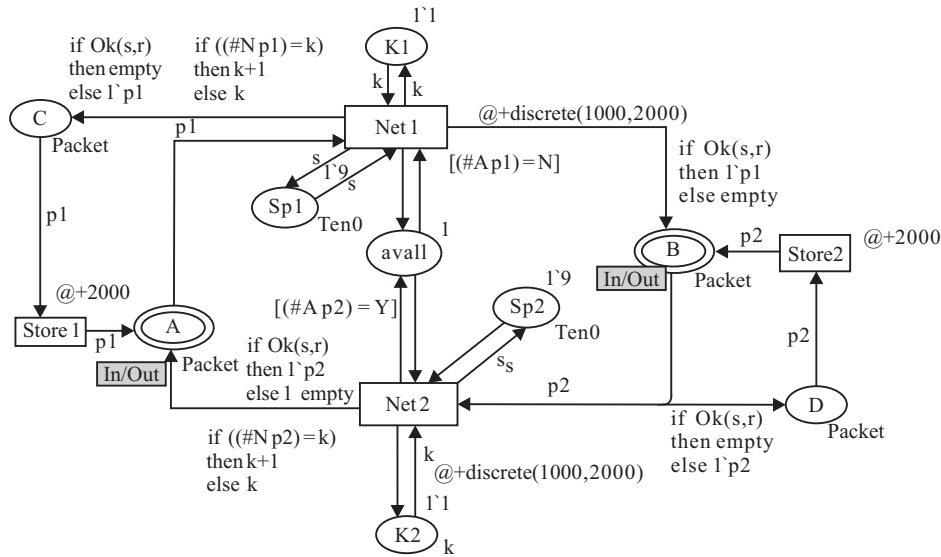


图5 子层网络模型

3 时延分析

3.1 系统时延

图6(a)和图6(c)为时延Tca和Tsc在理想网络状态下的分布,图6(b)和图6(d)为异常网络状态下的分布.从图6(a)和图6(c)可知,时延Tca和Tsc都分布在一个有限范围内且表现出一定的周期性.将其与图6(b)和图6(d)分别进行对比,可见由于网络异常的加入,打破了理想状态下的时延Tca和Tsc的周期性.这使得系统分析更加困难.为了深入研究此类状态下的时延分布特性,进一步对网络发生异常的数据包进行统计和分析.

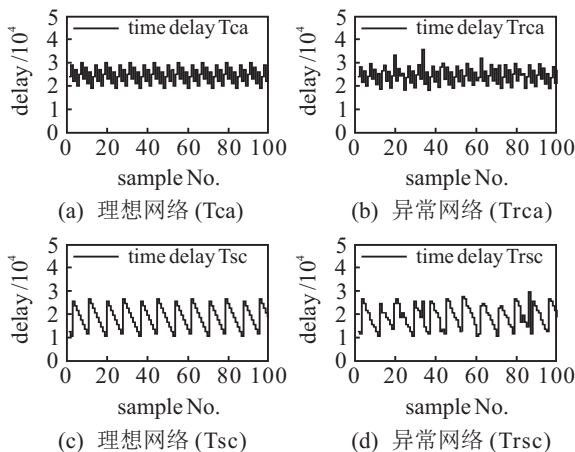


图6 理想化状态与含有不确定传输网络的NCS系统中时延对比

3.2 网络时延分析

在网络异常的情况下,对模型中的网络传送时延进行提取和计算.控制器与执行器之间的网络传送时延Trca如图7所示,子图是Tca时延的分布;传感器与控制器之间的网络传输时延如图8所示,其子图是Tsc时延的分布.

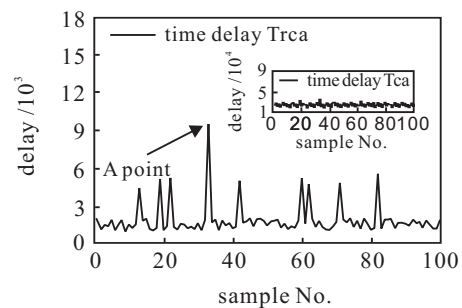


图7 网络传送时延Trca和其对应的时延Tca

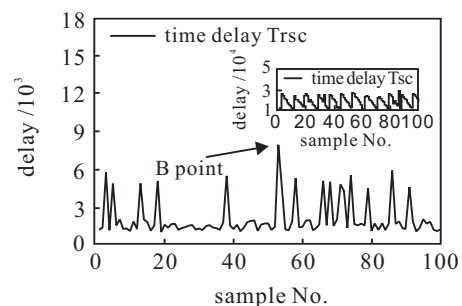


图8 网络传送时延Trsc和其对应的时延Tsc

从图7和图8中可以很清晰地看出,90%的网络传送时延Trca和Trsc均分布在 $[1\ 000, 2\ 000]$ 之内,符合系统所设定的时延界限.图7和图8中均存在10%的时延峰值超出此界限,如图中A、B点所示. A点表示序号为34的数据包从控制器到执行器之间的网络传送时间为9 800, B点表示序号为53的数据包从传感器到控制器的网络传送时间为8 200. 类似A、B的这些峰值要远远大于HTCPN模型中所设置的网络传送时间,表明在此时,该峰值所对应的数据包在网络中丢失,按照网络传输协议进行重新传送. 峰值A、B与其他峰值相比数值较高,表明此时该数据包进行了多次重传. 将图7和图8中网络传送时延与其右上方子图比较可知,这些时延峰值的存在破坏了系统时

延Tca和Tsc的周期性,并且当网络中存在丢包、乱序等现象时,传送时延随之变大,进而导致NCSs中前置时延和后置时间也相应变大.因此,丢包、乱序等网络不确定现象在建模时不可以忽略不计,并且为了更好地分析系统性能,进一步研究网络传送时延的特性显得尤为重要.

4 隐马尔科夫模型和验证

4.1 隐马尔科夫模型

HMM是一个具有隐含未知参数的统计Markov链,但通过观测序列可以得到HMM的一些信息.将观测序列定义为 O_q ,HMM的隐藏状态为 S_q . O_q 和 S_q 的定义为 $O_q = \{o_1, o_2, \dots, o_i, \dots\}$, $S_q = \{s_1, s_2, \dots, s_i, \dots\}$.其中: $O_i \in O = \{o_1, o_2, \dots, o_N\}$ 是在时刻 k 的观测序列, $S_i \in S = \{s_1, s_2, \dots, s_N\}$ 是与观测序列 S_q 相对应的隐含状态.HMM的定义为 $\lambda = \{A, B, \pi_0\}$.其中: A 是隐含状态转移概率矩阵,其表达式为 $A = \{a_{ij}\}$, $\{a_{ij}\} = P(s_{k+1} = s_j | s_k = s_i)$; B 是观测状态转移概率矩阵,其表达式为 $B = \{b_{ij}\}$, $\{b_{ij}\} = P(o_{k+1} = o_j | s_k = s_i)$; π_0 是初始状态概率矩阵,其表达式为 $\pi_0 = \{\pi_i\}$, $\{\pi_i\} = P(s_1 = s_k)$.

4.2 马尔科夫模型时延的分析和验证

针对HTCPN模型提取出的时延数据,运用BaumWelth算法建立Tca和Tsc的HMM模型.为便于分析,将模型中两种时延归纳为如下形式: $T_{ca} = [18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 32, 33, 36]$; $T_{sc} = [11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 30]$.

Tca可以按照数值大小分为 T_{calow} 低时延部分和 T_{cahigh} 高时延部分,且有 $T_{calow} = [18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25]$; $T_{cahigh} = [26, 27, 28, 29, 30, 32, 33, 36]$.

Tsc时延同样也可以分为两部分: T_{calow} 低时延部分和 T_{cahigh} 高时延部分,且有 $T_{calow} = [11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19]$; $T_{cahigh} = [20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 30]$.

因此,Tca时延和Tsc时延可以定义为

$$T_{ca} = \begin{bmatrix} T_{calow} & s_k = s_1 \\ T_{cahigh} & s_k = s_2 \end{bmatrix},$$

$$T_{sc} = \begin{bmatrix} T_{sclow} & s_k = s_1 \\ T_{schigh} & s_k = s_2 \end{bmatrix}.$$

Tca时延Tsc时延的概率分布如图9和图10所示.将两种时延进行隐含状态分类后,系统 $\lambda_{ca} = \{A_{ca}, B_{ca}, \pi_{0ca}\}$ 具有两个隐藏状态,16个观测值.

运用Baum Welth算法和最大似然估计在Matlab HMM Tool中对状态进行估计可以得到 A_{ca}, B_{ca} 的计算结果如下:

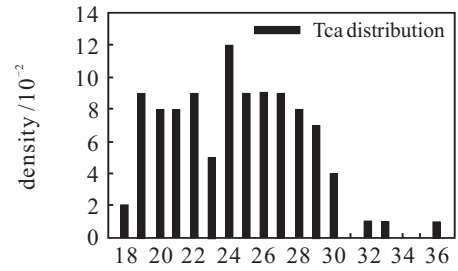


图9 时延Tca的概率分

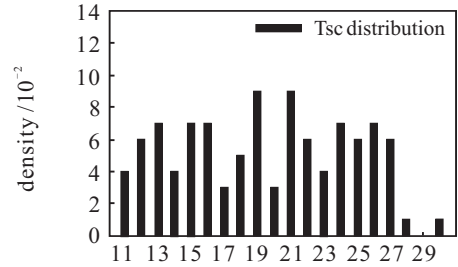


图10 时延Tsc的概率分布

$$A_{ca} = \begin{bmatrix} 0.3729 & 0.6271 \\ 0.9487 & 0.0513 \end{bmatrix}, B_{ca} = [B_{ca1} \ B_{ca2}],$$

$$B_{ca1} = \begin{bmatrix} 0.0333 & 0.1500 & 0.1167 & 0.1333 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.1500 & 0.0833 & 0.2000 & 0.1334 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$B_{ca2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.2308 & 0.2051 & 0.2051 & 0.1795 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.1025 & 0.0256 & 0.0256 & 0.0256 \end{bmatrix}.$$

系统 $\lambda_{sc} = \{A_{sc}, B_{sc}, \pi_{0sc}\}$ 具有两个隐藏状态、19个观测值,同理可得

$$A_{sc} = \begin{bmatrix} 0.6735 & 0.3265 \\ 0.3061 & 0.6939 \end{bmatrix}, B_{sc} = [B_{sc1} \ B_{sc2}],$$

$$B_{sc1} = \begin{bmatrix} 0.0816 & 0.1224 & 0.1429 & 0.0816 & 0.1224 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.1429 & 0.0408 & 0.1021 & 0.1633 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$B_{sc2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.0600 & 0.1800 & 0.1200 & 0.0800 & 0.1400 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.1200 & 0.1400 & 0.1200 & 0.0200 & 0.0200 \end{bmatrix}.$$

运用时延Tca和Tsc的概率转移矩阵对HMM进行迭代运算,得出估计的状态,计算其平稳分布,如图11和图12所示.由图11与图12对比可知,由HTCPN模型提取出的时延分布与HMM模型得出的时延分布具有相似分布特性,说明两者具有等效性,进一步表明了运用HTCPN模型对NSCs建模的有效性.

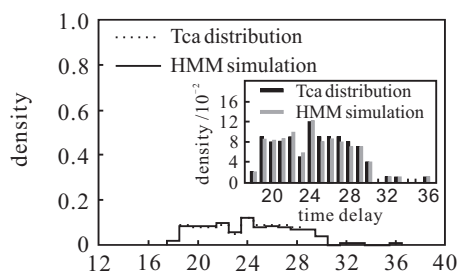


图 11 HTCPN 模型与 HMM 的时延 Tca 对比

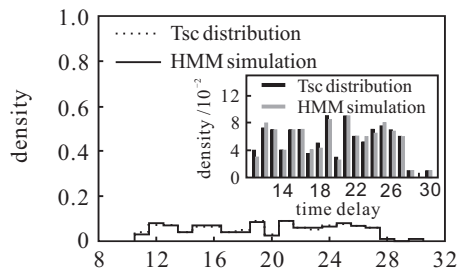


图 12 HTCPN 模型与 HMM 的时延 Tsc 对比

5 结 论

本文基于 HTCPN 建立了 HCSs 的结构保留形式模型,运用层次化方法将复杂的控制系统逐层分解再分层细化.将网络数据包丢失和乱序等不确定现象融入 HTCPN 模型中,提取了 NCSs 中两种重要的时延,并针对每一种时延,分析了数据包在网络中的传送情况.通过 Baum-Welch 算法建立了系统时延的 HMM 模型,并对其进行相应的状态估计,验证了网络控制系统中这两种时延的 Markov 特性和 HTCPN 建模的有效性.

参考文献(References)

- [1] Li H, Wu C, Yin S, et al. Observer-based fuzzy control for nonlinear networked systems under unmeasurable premise variables[J]. IEEE Trans on Fuzzy Systems, 2016, 24(5): 1233-1245.
- [2] Yin S, Zhu X, Qiu J, et al. State estimation in nonlinear system using sequential evolutionary filter[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2016, 63(6): 3786-3794.
- [3] Gao H, Li X. Filtering for discrete-time state-delayed systems with finite frequency specifications[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2011, 56(12): 2935-2941.
- [4] Li H, Gao Y, Shi P, et al. Observer-based fault detection for nonlinear systems with sensor fault and limited communication capacity[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2016, 61(9): 2745-2751.
- [5] Sun L, Wu J. Schedule and control co-design for networked control systems with bandwidth constraints[J]. J of the Franklin Institute, 2014, 351(2): 1042-1056.
- [6] Li Y, Zhang Q, Luo X. Robust L1 dynamic output feedback control for a class of networked control systems based on T-S fuzzy model[J]. Neurocomputing, 2016, 197: 86-94.
- [7] Sun L K, Wan Z K, Zhang G L. Stability for networked control systems with stochastic communication logic[J]. Control and Decision, 2010, 25(9): 1302-1306.
- [8] Sun L, Wu L. Schedule and control co-design for networked control systems with bandwidth constraints[J]. J of the Franklin Institute, 2014(351): 1042-1056.
- [9] Hui G T, Wan Y C, Zhang H G. Periodic feedback control for networked control systems with stochastic time-delay[J]. Control and Decision, 2013, 28(5): 706-710.
- [10] Petri C A. Kommunikation mit automaten[D]. Bonn: University of Bonn, 1962.
- [11] Silva M, Valette R. Petri nets and flexible manufacturing[C]. Advances in Petri Nets 1989, covers the 9th European Workshop on Applications and Theory in Petri Nets. Venice: Springer Berlin Heidelberg, 1988: 374-417.
- [12] Jamro M, Rzonca D, Rzsza W. Testing communication tasks in distributed control systems with SysML and timed colored Petri nets model[J]. Computers in Industry, 2015, 71(C): 77-87.
- [13] Wu D, Schnieder E, Lu D, et al. Realistic modelling of train control system with coloured Petri nets[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2012, 45(24): 19-23.
- [14] Lutz-Ley A, Mellado E L. Synthesis of fault recovery sequences in a class of controlled discrete event systems modelled with Petri nets[J]. Procedia Technology, 2013, 7(4): 257-264.
- [15] Ghanaim A, Frey G. Component based colored Petri net model for Ethernet based networked control systems[C]. IEEE Int Conf on Emerging Technologies & Factory Automation. Hamburg: IEEE, 2008: 1100-1103.
- [16] Ghanaim A, Borges G A, Frey G. Estimating delays in networked control systems using colored Petri nets and Markov chain models[C]. IEEE Int Conf on Emerging Technologies & Factory Automation. Mallorca: IEEE, 2009: 288-293.
- [17] Genrich H J, Lautenbach K. System modelling with high-level Petri nets[J]. Theoretical Computer Science, 1981, 13(1): 109-135.
- [18] Ponciroli R, Cammi A, Lorenzi S, et al. Petri-net based modelling approach for ALFRED reactor operation and control system design[J]. Progress in Nuclear Energy, 2016, 87: 54-66.
- [19] Li J, Zhou M C, Guo T, et al. Robust control reconfiguration of resource allocation systems with Petri nets and integer programming[J]. Automatica, 2014, 50(3): 915-923.
- [20] Sun X M, Liu K Z, Wen C, et al. Predictive control of nonlinear continuous networked control systems with large time-varying transmission delays and transmission protocols[J]. Automatica, 2016, 64: 76-85.

(责任编辑: 闫 妍)