

传输时延和时钟同步对以太网控制系统的影响

鲁立, 冯冬芹, 褚健, 章涵

(浙江大学 工业控制技术国家重点实验室 智能系统与控制研究所, 浙江 杭州 310027)

摘要: 在分析报文传输时延和时钟同步精度对EPA网络(工业以太网)控制系统的实时性和稳定性的影响的基础上, 提出了新的基于马尔科夫链的时延模型. 给出了在系统稳定的情况下, 通信宏周期、协议传输时延和时钟同步精度应满足的条件. 建立了无丢包情况下的EPA网络控制系统模型. 提出了EPA控制系统稳定时, 可以设置的最小通信宏周期的计算方法.

关键词: 网络控制系统; 工业以太网(EPA); 时延; 马尔科夫链; 时钟同步

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Effect of transmission delay and clock synchronization on networked control systems

LU Li, FENG Dong-qin, CHU Jian, ZHANG Han

(State Key Laboratory of Industrial Control Technology, Institute of Cyber-Systems and Control, Zhejiang University, Hangzhou Zhejiang 310027, China)

Abstract: A new model of Markovian jump discrete-time networked control systems is proposed by considering the effect of the packet transmission delay and the precision of clock synchronization on the networked control systems. The stability conditions for the system with the transmission delay and the clock synchronization are developed. A network control systems(NCS) based on Ethernet-plant-automation(EPA) without data packet dropout is modeled. An algorithm is developed for determining the shortest communication macro cycle for a stable EPA system.

Key words: networked control system; ethernet for plant automation(EPA); delay; Markov chain; clock synchronization

1 引言(Introduction)

随着计算机网络技术的发展, 高速以太网和现场总线技术的不断进步使得网络控制系统(NCS)的应用越来越广泛. 虽然网络控制系统有诸如成本低廉、通信速率高、硬件软件资源丰富等优势, 但也存在着一定的问题: 由于以太网采用CSMA/CD(载波侦听多路访问/冲突检测)介质访问控制机制, 在基于以太网的控制系统中, 待发送的信息只有等到网络空闲或设备的优先级相对较高时才能被发送出去, 这就不可避免地导致数据传输时延-网络诱导时延. 网络诱导时延会因为网络负载的不同有较大的变化, 这进而导致了数据传输时的不确定时延和数据包丢失等问题, 从而使得网络控制系统丧失定常性、完整性、因果性和确定性^[1,2], 实时性和可靠性能也大为降低. 因此, 普通的商用以太网必须进行一系列的修改才能适应有较高实时性和可靠性要求的

控制系统.

2000年以来, 全球各大研究机构和自动化厂商都提出了关于实时以太网的解决方案, 例如HSE, ProfiNet, Ethernet/IP以及Modbus TCP等等. 特别是拥有我国自主知识产权的EPA(ethernet for plant automation)国际标准. EPA专门定义了网络层与数据链路层之间的接口. 在正常工作的EPA网段中, 加入了时分调度机制使得报文不会发生碰撞, 避免了传统CSMA/CD机制造成的不确定时延, 从而保证了系统的实时性^[3].

在研究传统网络控制系统的模型和稳定性方面, Nilsson等^[4,5]首先对时延为定常而且小于一个采样周期的网络控制系统稳定性做了分析, 然后进一步给出了时延为Markov分布的系统的稳定条件. ZHANG^[6]等提出的离散事件驱动的异步动态系统(ADS)理论, 分析了网络控制系统数据包丢失

及多包传输稳定性问题. 这些研究并没有对以时分调度为基础的实时以太网控制系统做出分析. 在基于调度机制的网络控制系统中, 时延的主要来源并非CSMA/CD机制造成的碰撞, 因此以往的分析模型在这里并不适用. 为了更好地描述和分析实时网络控制系统, 本文在普通以太网控制系统研究的基础上, 对基于EPA协议的实时网络控制系统的稳定性进行了时延分析. 提出了一种新的时延为Markov分布的EPA控制系统模型. 得出了传输时延、时钟同步精度、通信宏周期设置和系统稳定性的关系. 通过模型分析给出了在系统稳定的情况下, 可以设置的最小通信宏周期的计算方法.

2 EPA定义和调度原理(Definitions and scheduling mechanism of EPA)

EPA的基本工作原理是修改以太网的数据链路层, 加入调度机制. 调度使一个网段内的所有设备在不同的时刻发送数据报文, 以此来避免报文的碰撞. 为了更好地讨论EPA网络控制系统, 下面先根据EPA标准给出相关定义.

定义 1 周期报文: 周期报文是按固定周期发送的数据报文, 反之则称为非周期报文. 例如系统采样数据通常由周期报文发送, 而报警之类的不固定事件则由非周期报文发送.

定义 2 通信宏周期(T_{marco}): 同一个网络系统EPA设备的数据传输均按照周期进行. 在一个周期中, 传输周期报文的时间叫做周期段, 传输非周期报文的时间叫做非周期段. 周期段和非周期段合称通信宏周期. 通信宏周期应小于系统采样周期, 且采样周期为通信宏周期的整数倍.

定义 3 时间片(T_{slot}): EPA节点设备发送各自周期报文的时间段.

定义 4 时钟同步: 同一个网络系统的EPA设备的本地时钟都和系统主时钟同步的过程. EPA采用IEEE1588规定的PTP(precision time protocol)^[7]进行时钟同步.

定义 5 时钟偏差(t_{Δ}): 两个设备时钟误差的绝对值为时钟偏差.

定义 6 时钟同步精度(T_{ptp}): 在同一个网络系统内所有设备时钟偏差的最大值.

定义 7 报文传输时延(T_{delay}): 在无碰撞的EPA网络中一个设备的数据报文从开始发送到另一个设备接收到报文的时延.

定义 8 时间片裕度(T_{Δ}): 时间片长度比实际发送报文所需时间长出的部分.

基于EPA协议的控制系统中, 所有EPA设备的数据传输均按照通信宏周期进行. EPA节点设备参与

系统通信之前, 需完成与其他设备的时钟同步, 并由组态软件对整个系统进行组态, 包括指定通信宏周期的大小、各EPA节点设备的时间片长度、时间片相对于通信宏周期起始时间的偏移量等.

系统上电后, 所有EPA节点均进行时钟同步, 并自动计算当前时间距离通信宏周期起始时间的偏移量. 当该时间偏移量等于设定值时, 表明本地设备发送周期报文的时间到, 本地设备若有周期报文要发送, 则将其发送到网络上.

图1所示为在一个周期时间段内发送周期采样数据报文的顺序. 整个网段一共有5个设备, 每个设备依次在不同时间片内发送周期报文, 避免了数据链路层因采用CSMA/CD机制造成的报文碰撞, 从而大大降低系统的网络时延和丢包率, 增强系统的实时性.

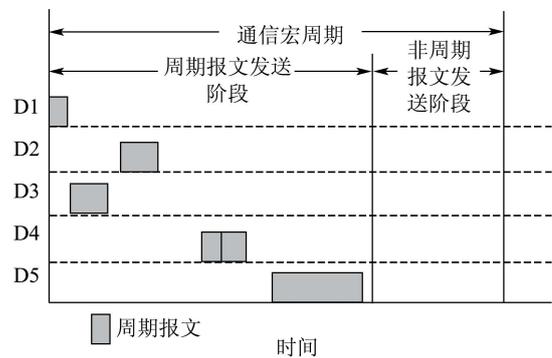


图1 周期报文调度

Fig. 1 Scheduling of periodical data packets

3 EPA网络控制系统建模(Modeling of EPA networked control systems)

具有多个设备的EPA控制系统的结构如图2所示. 本文考虑传输时延小于一个采样周期的无丢包NCS系统. 设数据报文从传感器节点传输到控制器的时延为 τ_k^{sc} , 而数据报文从控制器传输到执行机构的时延为 τ_k^{ca} .

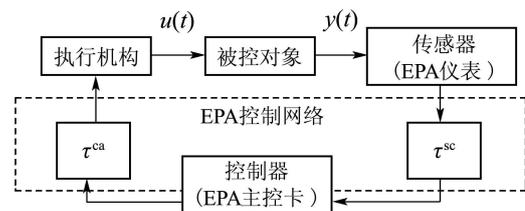


图2 EPA系统结构图

Fig. 2 Structure of an EPA system

设被控对象的状态方程为

$$\frac{dx}{dt} = Ax(t) + Bu(t). \quad (1)$$

设系统的采样周期为 h , 控制器增益矩阵为 K . 离散的控制器的数学模型为

$$u_k = -Kx_k. \quad (2)$$

则系统状态方程可以表示成^[8]

$$x_{k+1} = \Phi x_k + \Gamma_0(\tau_k^{ca}, \tau_k^{sc})u_k + \Gamma_1(\tau_k^{ca}, \tau_k^{sc})u_{k-1}. \quad (3)$$

其中:

$$\begin{aligned} \Gamma_0 &= \int_0^{h-\tau_k^{ca}-\tau_k^{sc}} e^{As} ds B, \\ \Gamma_1 &= \int_{h-\tau_k^{ca}-\tau_k^{sc}}^h e^{As} ds B, \\ x_k &= x(kh), \Phi = e^{Ah}. \end{aligned}$$

引入 $z = \begin{bmatrix} x_k \\ u_{k-1} \end{bmatrix}$, 则闭环控制系统可以表示为

$$z_{k+1} = \theta z_k.$$

其中

$$\theta = \begin{bmatrix} \Phi - \Gamma_0(\tau_k^{ca}, \tau_k^{sc})K & \Gamma_1(\tau_k^{ca}, \tau_k^{sc}) \\ -K & 0 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

在无碰撞的EPA网络环境中, τ_k^{ca}, τ_k^{sc} 为报文传输时延, 而非网络诱导时延. 考查计算式(4)的谱半径是否小于1即可知系统是否稳定.

在大多数对采样周期要求不是很高的流程工艺实际应用中, 当时间片设置为毫秒级, 时钟同步精度为亚毫秒级, 系统采样周期为秒级时, 相应EPA网络的实测丢包率在 10^{-7} 以下, 网络时延相对于采样周期可以忽略, 系统的稳定性得到了很好的保证.

但是对于EPA系统来说, 通信宏周期设置也是有一个限度的. 当系统(比如某些运动控制系统)对采样周期要求越来越高时, 通信宏周期设置将会越来越小. 此时时钟同步精度和网络传输时延相对于采样周期来说不仅不能忽略, 更是会对时分调度机制产生相当大的影响. 为了说明这个问题, 先来看 $T_{ptp} = 0$, 即系统时钟无误差时的理想情况.

如图3所示, 当没有时钟偏差时, 设备1的时间片和设备2的时间片刚好相邻而没有重合, 这样两个设备的报文不会发生碰撞.

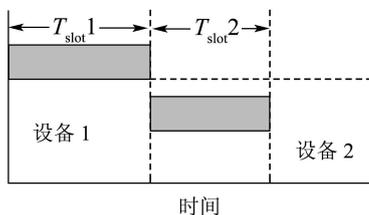


图3 理想情况下的时间片分布

Fig. 3 Time slots distribution in ideal situation

而引入实际存在的时钟偏差后, 设备1和设备2的时间片就会因为两个设备时钟偏差发生偏移, 使得两个周期报文的发送时间重合, 发生碰撞, 造成较大的时延. 如图4所示, 设备1和设备2发生碰撞.

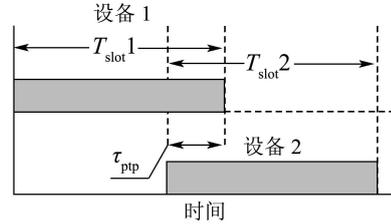


图4 碰撞情况下时间片分布

Fig. 4 Time slots distribution in collision situation

如图5所示, 为了减小时钟偏差对数据传输产生的影响, 实际应用中在设备1的周期报文发送前后分别留有一定的裕度. 即使报文由于发送刻偶然偏移一段小于的时间, 还能保证时间片相邻的两个设备发送报文时仍然处于各自的时间片之内.

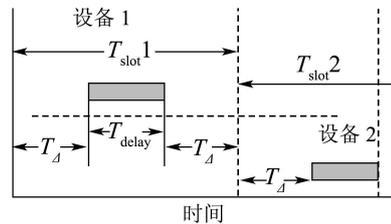


图5 实际情况下的时间片分布

Fig. 5 Time slots distribution in actual situation

如果周期报文长度相同, 可以认为报文传输时延相等. 若设备1和2分别为一个控制系统内的传感器和控制器, 那么有总传输时延:

$$\tau_k = \tau_k^{ca} + \tau_k^{sc} = 2T_{delay} + 2T_{\Delta}. \quad (5)$$

当一个周期报文发生碰撞导致错误时, 周期采样数据将会因此延后发送. 由于EPA加入了重传机制, 在不考虑丢包的最坏情况下, 当前宏周期内的采样数据将会延后一个宏周期, 系统的时延模型可以表述为

$$\tau_k = \begin{cases} 2T_{delay} + 2T_{\Delta}, & r_k = 1, \\ 2T_{delay} + 2T_{\Delta} + T_{macro}, & r_k = 2. \end{cases} \quad (6)$$

其中: r_k 表示第 k 个采样周期时延可能处于的两种状态: 正常工作状态($r_k = 1$)和碰撞发生($r_k = 2$)状态. 由于时钟偏差的变化一般为线性变化^[8], 可以认为在每个宏周期的时钟偏差仅由上一个宏周期的时钟偏差决定. 这样 r_k 只取决于 r_{k-1} , 时延分布可以看作Markov过程. 可以设转移矩阵为^[9]

$$Q = \begin{bmatrix} q_1 & 1 - q_1 \\ 1 - q_2 & q_2 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

其中: q_1 为系统从 $r_k = 1$ 跳转到 $r_{k+1} = 2$ 的概率;
 q_2 为系统从 $r_k = 2$ 跳转到 $r_{k+1} = 1$ 的概率.

对式(1)的系统来说,

$$\Gamma_0(\tau_k) = \begin{cases} \int_0^{h-2T_{\text{delay}}-2T_{\Delta}} e^{As} ds B, & r_k = 1, \\ \int_0^{h-2T_{\text{delay}}-2T_{\Delta}-T_{\text{macro}}} e^{As} ds B, & r_k = 2. \end{cases} \quad (8)$$

$$\Gamma_1(\tau_k) = \begin{cases} \int_{h-2T_{\text{delay}}-2T_{\Delta}}^h e^{As} ds B, & r_k = 1, \\ \int_{h-2T_{\text{delay}}-2T_{\Delta}-T_{\text{macro}}}^h e^{As} ds B, & r_k = 2. \end{cases} \quad (9)$$

将式(8)(9)代入式(4)可得系统的两种状态所对应的两个状态矩阵: θ_1, θ_2 . 系统稳定时, 有以下矩阵^[10]的谱半径小于1:

$$(Q^T \otimes I_{n^2}) \times \text{diag}\{\theta_1 \otimes \theta_1, \theta_2 \otimes \theta_2\}. \quad (10)$$

$r_k = 2$ 时所造成的时延为时钟同步不够精准造成的. 当 $T_{\Delta} > \tau_{\text{ptp}}$ 时不会发生报文碰撞, 反之则会发生碰撞. 可以把 $0 \leq \tau_{\text{ptp}} < T_{\Delta}$ 看作非碰撞区域, 而 $T_{\Delta} \leq \tau_{\text{ptp}} \leq T_{\text{ptp}}$ 为碰撞区域, 而 $T_{\text{ptp}} < T_{\Delta}$ 时碰撞不会发生. 作平均估算, 可以认为处于非碰撞区域时 $\tau_{\text{ptp}} = T_{\Delta}/2$, 处于碰撞区域时 $\tau_{\text{ptp}} = (T_{\Delta} + T_{\text{ptp}})/2$.

由图6可知, 当 $T_{\Delta} < T_{\text{ptp}}$, 通信宏周期时钟偏差处于非碰撞状态时, $\tau_{\text{ptp}} = T_{\Delta}/2$, 状态转移到碰撞时的概率为阴影部分的面积和整个面积的比值, 即

$$1 - q_1 = \frac{(T_{\text{ptp}} - T_{\Delta})^2 / (T_{\text{ptp}} - T_{\Delta}/2)^2}{2 - (T_{\text{ptp}} - T_{\Delta})^2 / (T_{\text{ptp}} - T_{\Delta}/2)^2}, \quad (11)$$

$$1 - q_2 = \frac{2T_{\Delta}^2 / (T_{\text{ptp}} + T_{\Delta})^2}{1 - 2T_{\Delta}^2 / (T_{\text{ptp}} + T_{\Delta})^2}. \quad (12)$$

而当 $T_{\text{ptp}} < T_{\Delta}$ 时, $q_1 = 1, q_2 = 0$.

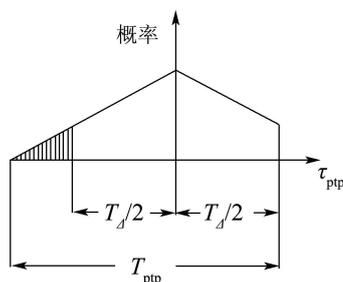


图6 状态转移概率分布

Fig. 6 Probability distribution of the state transitions

4 最小通信宏周期分析(Analysis of minimum communication macrocycle)

高实时性系统要求较快的反应能力, 因此对采样周期有较高的要求. 由于采样数据通过周期报文传输, 当通信宏周期大于采样周期时, 采样数据将会丢失. 通信宏周期的大小直接决定了系统最高的采样周期, 所以通信宏周期的大小是评判系统实时性的一个重要指标. 有了EPA系统的时延模型之后, 可以从周期报文传输时延, 时钟同步精度推出系统稳定时反馈比例与采样周期的大小. 这样就能估算出在一定控制策略下, 系统稳定时可以设置的最小宏周期, 并绘制出在给定的条件下, 系统稳定部分的区域. 下面分别定量分析由嵌入式系统和FPGA实现的两种EPA系统的稳定性.

设1阶系统

$$\frac{dx}{dt} = Ax(t) + Bu(t), \quad y = x,$$

控制策略为 $u_k = -Kx_k$, 采样周期为 h . 由式(8)(9)可以计算知, 系统的两种状态所对应的状态矩阵分别为 θ_1, θ_2 .

如果一个网段中的仪表数为 N , 周期段时间与非周期段时间设置为相等, 则一个宏周期时间为

$$T_{\text{macro}} = 2N(T_{\text{delay}} + 2T_{\Delta}). \quad (13)$$

现有的EPA协议通常为基于嵌入式软件设计. 测试^[11]说明嵌入式协议的EPA网桥EPA节点的周期发送时延 $800 \mu\text{s}$. 而PTP协议的同步精度在一般局域网条件下大致为 1 ms . 此时有 $T_{\text{delay}} = 800 \text{ ms}$, $T_{\text{ptp}} = 1000 \mu\text{s}$.

假设一个网段中设备数为5. 若取 $T_{\Delta} = T_{\text{ptp}}$, 由式(13)估算可知 $T_{\text{macro}} = 28 \text{ ms}$. 假设采样周期等于宏周期, 可以取 $h = 28 \text{ ms}$. 代入式(9)可计算出系统稳定时, K 与 q_1, q_2 的关系. 稳定部分如图7的有色部分所示, 其在 q_1, q_2 平面上的投影如图8所示. 位于曲线上方的部分为稳定.

当 K 值不断变大时, 系统的稳定性降低; q_1 增大 q_2 减小. 若取 $K < 10$, 则系统不论取何值都稳定, 而 $K > 200$ 时(图中没有给出, 但计算可知)系统无论如何都不稳定. 若取 $K = 80$, 作线性近似时系统的稳定要求是 $q_1 > 0.76 + 0.39q_2$. 可以由式(11)和(12)计算出 $T_{\Delta} > 0.77 \text{ ms}$, 由式(13)得 $T_{\text{macro}} = 23.4 \text{ ms}$ 代入式(9)中计算得系统稳定.

进一步考虑基于硬件系统的EPA节点. 由于硬件系统的执行效率较高, 实测基于FPGA实现的EPA节点 $T_{\text{delay}} = 48 \mu\text{s}$, $T_{\text{ptp}} = 2 \mu\text{s}$. 同样考虑有5个设备的1阶控制系统. 可计算出系统稳定区域如图9、图10所示.

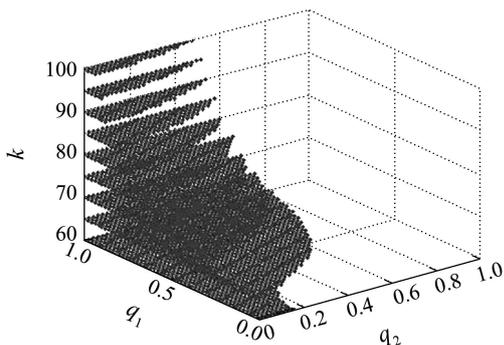


图 7 60 < K < 100 时系统的稳定区域 3 维图

Fig. 7 Stability region for the system when 60 < K < 100 in three dimensional space

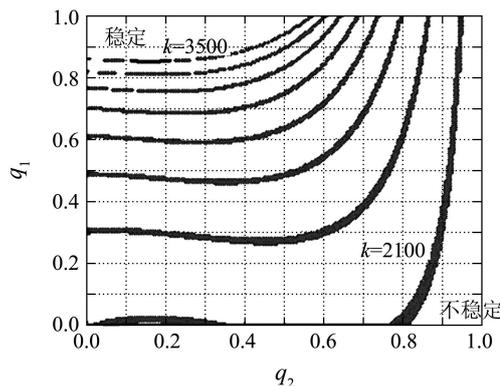


图 10 2100 < K < 3500 系统的稳定部分平面图

Fig. 10 Stability region for the system when 2100 < K < 3500 in two dimensional space

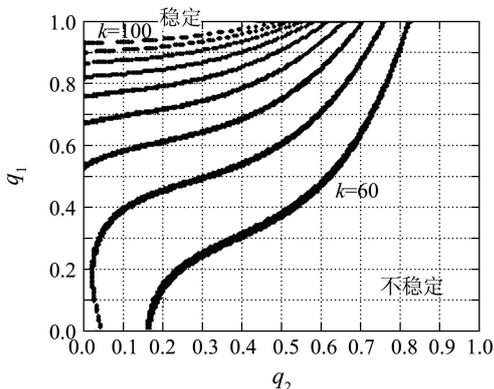


图 8 60 < K < 100 时系统的稳定区域平面图

Fig. 8 Stability region for the system when 60 < K < 100 in two dimensional space

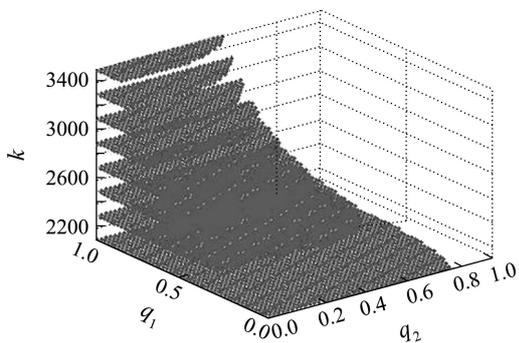


图 9 2100 < K < 3500 系统的稳定部分的 3 维图

Fig. 9 Stability region for the system when 2100 < K < 3500 in three dimensional space

由于系统时钟同步精度很高, 可以认为 $T_{slot} = 50$ 时不会因为时钟同步精度的问题导致报文碰撞. 因此如果只考虑硬件设计和网卡本身极低的故障率, 可以认为 $q_1 \approx 1$. 留有一定裕度时, 可以认为 $q_1 > 0.9$. 取 $K = 3500$, 采样周期为 $500 \mu s$, 系统稳定.

由以上仿真结果可知, 系统的报文传输时延越小, 时钟同步精度越高, 系统稳定时的宏周期就可以设置得越小, K 值越大. 在时钟同步精度很高时, 只要将时间片裕度设置成大于同步精度就可以避免报文碰撞. 因此系统的时钟同步精度越高, 报文发送时延越小, 就有更高的实时性.

5 结论(Conclusion)

本文分析了 EPA 控制系统的工作原理; 建立了一种时延为 Markov 分布的无丢包 EPA 网络控制系统的模型. 给出了已知报文传输时延和时钟同步精度时, 系统稳定时最小通信宏周期的计算方法. 在仿真条件下绘制了 EPA 系统的稳定区域. 本文方法可以推算出特定系统中 EPA 节点在时钟同步精度和报文发送时延方面应该满足的技术指标, 这对 EPA 系统的开发和评估有着重要的意义.

参考文献(References):

- [1] 邱占芝, 张庆灵, 刘明. 有时延和数据包丢失的网络控制系统控制器设计[J]. 控制与决策, 2006, 21(6): 625 - 630.
(QIU Zhanzhi, ZHANG Qingling, LIU Ming. Controller design for networked control systems with time delay and data packet Dropout[J]. *Control and Decision*, 2006, 21(6): 625 - 630.)
- [2] 严怀成, 黄心汉, 王敏. 不确定多时变时滞网络控制系统的时滞相关稳定性[J]. 控制理论与应用, 2008, 25(2): 303 - 306.
(YAN Huaicheng, HUANG Xinhan, WANG Min. Delay-dependent stability of networked control systems with uncertainties and multiple time-varying delay[J]. *Control Theory & Applications*, 2008, 25(2): 303 - 306.)
- [3] 冯冬芹, 金建祥, 褚健. 工业以太网关键技术初探[J]. 信息与控制, 2003, 32(3): 221 - 224.
(FENG Dongqin, JIN Jianxiang, CHU Jian. Study on industrial ethernet[J]. *Information and Control*, 2003, 32(3): 221 - 224.)
- [4] NILSSON J, BERNHARDSSON B, WITTENMARK B. Stochastic analysis and control of real-time systems with random time delays[J]. *Automatica*, 1998, 34(1): 57 - 64.
- [5] KARL J A. *Computer-Controlled Systems: Theory and Design*[M]. 3rd Edition. New Jersey: Prentice Hall Englewood Cliffs, 1997.

- [6] ZHANG W, BRANICKY M S, PHILLIPS S M. W. Stability of networked control systems[J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2001, 21(1): 84 – 99.
- [7] IEEE STD. IEEE standard for a precision clock synchronization protocol for networked measurement and control systems, 1588-2002[S], 2002.
- [8] NILSSON J. *Real-time control systems with delays*[D]. Lund, Sweden: Lund Institute of Technology, 1998.
- [9] 桂本炬, 冯冬芹, 褚健, 等. 基于单神经元的网络同步补偿算法研究[J]. *仪器仪表学报*, 2006, 27(12): 1573 – 1577.
(GUI Benxuan, FENG Dongqin, CHU Jian, et al. Study on single neuron compensation method in networked synchronization[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2006, 27(12): 1573 – 1577.)
- [10] COSTA O L V, FRAGOSO M D, MARQUES R P. *Discrete-Time Markov Jump Linear Systems(Probability and Its Applications)*[M]. Phoenix, AZ: Springer, 2004.
- [11] 冯小华, 王彦邦. 工业以太网EPA实时性能测试中递交时间的确定[J]. *电子科技*, 2008, 21(9): 50 – 54.
(FENG Xiaohua, WANG Yanbang. Measurement of time in EPA real-time performance delivery testing[J]. *Electronic Science and Technology*, 2008, 21(9): 50 – 54.)

作者简介:

鲁立 (1986—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为工业以太网控制系统, E-mail: llu@iipc.zju.edu.cn;

冯冬芹 (1968—), 男, 教授, 主要研究方向为现场总线、工业以太网、工业无线等, 中国第一个工业自动化国际标准-EPA的主要技术开发者和制定者之一, E-mail: dqfeng@iipc.zju.edu.cn;

褚健 (1963—), 男, 教授, 博士生导师, 长江学者, 副校长, 主要研究方向为工业控制、智能系统等, E-mail: chuj@iipc.zju.edu.cn;

章涵 (1983—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为网络时钟同步技术, E-mail:h Zhang@iipc.zju.edu.cn.