

文章编号: 1001-0920(2011)02-0248-05

EPA 网络控制系统丢包分析

鲁立, 冯冬芹, 褚健

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

摘要: 针对基于时钟同步技术的时分调度网络控制系统工作方式, 分析了基于 EPA 协议的网络丢包原理. 建立在不同实时性要求情况下 EPA 网络系统的丢包模型, 并且分析了时钟偏差抖动为马尔科夫链时, 通信周期、时间片长度以及时钟同步精度对系统稳定性的影响. 提出了提升 EPA 系统实时性的方法. 最后对 EPA 系统的稳定性进行了分析.

关键词: 网络控制系统; EPA; 丢包; 马尔科夫链; 时钟同步

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Analysis of packet dropouts in EPA based networked control systems

LU Li, FENG Dong-qin, CHU Jian

(a. State Key Laboratory of Industrial Control Technology, b. Institute of Cyber-Systems and Control, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China. Correspondent: FENG Dong-qin, E-mail: dqfeng@iipc.zju.edu.cn)

Abstract: With respect to the working mechanism of networked control systems with time division scheduling based on clock synchronization, the causes for data packet dropouts in ethernet for plant automation(EPA) based networked control systems are analyzed. A model of EPA systems with data packet dropouts according to different requirements of real time performance is established. The influences that the communication cycle, the length of time slot and the precision of clock synchronization exert on the stability of systems are given while the distribution of clock deviation jitter is a Markov chain. Methods to improve the real time performance of EPA systems are proposed. Finally, the stability of the EPA system is analyzed.

Key words: networked control system; ethernet for plant automation; packet dropout; Markov chain; clock synchronization

1 引言

近年来, 基于以太网技术的控制系统(NCS)的应用越来越广泛. 由于以太网采用载波侦听多路访问/冲突检测(CSMA/CD)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. 由此产生的网络诱导时延和丢包问题对系统的稳定性和实时性有很大影响. 为了解决以上问题, 一般可采用两种方法: 1) 对时延和丢包情况作出模型分析, 从而设计相应的控制方案来保证系统的稳定, 例如: 文献[1]从整体上全面分析了NCS的稳定性; 而[2-3]在此基础上进一步提出了时延为随机或马尔科夫分布带有丢包的NCS控制方案. 这些方案虽然解决了系统稳定性的问题, 但并没有从本质上降低传输时延, 因此

在提高系统的实时性上还有一定局限. 2) 对通信协议进行改进设计, 在介质访问控制层加入任务调度算法, 从而避免不确定的丢包和网络诱导时延. 这种方法可从底层在本质上解决NCS的应用问题, 因此也越来越受到重视.

现有的现场总线调度方案一般可分为: 令牌传输(802.4), 主从式(Porfibus), 分时调度(EPA)等^[4-5]. 对于基于令牌传输的系统而言, 设备数量过多时, 令牌传输时延和令牌丢失都会对系统的实时性产生影响. 对于主从式系统而言, 由于从设备的数据交换需要主设备发出请求报文, 当系统交换数据量过多时, 大量请求报文会占用系统带宽, 从而影响系统的实时性. 而对于分时调度系统而言, 除了完成系统时钟同步的同步报文和必要的少量控制报文外, 不需要额外

收稿日期: 2009-12-01; 修回日期: 2010-04-03.

基金项目: 国家创新研究群体科学基金项目(60721062); 国家自然科学基金项目(61074028/F030103)

作者简介: 鲁立(1986-), 男, 博士生, 从事工业以太网控制系统的研究; 冯冬芹(1968-), 男, 教授, 从事现场总线、工业以太网等研究.

的报文控制系统的调度. 由于各个设备发送报文的时间都由自己确定, 这种分布式调度方案可使总线的利用率达到最高, 并极大地提升系统的实时性, 因此在实时性要求较强的工业以太网应用场合, 一般都采用基于精确时钟同步的分时调度总线协议来协调设备占用总线的时间, 例如: Ethernet/IP, Profinet 等协议都在主从式的基础上加入了时钟同步, 以完成从站间的分时通信调度.

然而分布式的分时调度仍然存在一定问题: 由于减少了总线控制报文, 系统的调度精度很大程度上取决于总线各个设备之间的时钟同步精度. 当系统同步精度不够高时, 设备之间的通信报文的发送时间将产生偏差. 偏差大到一定程度会使相邻发送的报文产生碰撞而造成丢包, 从而降低系统的稳定性和实时性. 本文针对这样的丢包情况, 对基于分时调度的 EPA 工业以太网协议机理作了详细分析, 并建立了相应的系统丢包模型, 给出了提高 EPA 系统实时性的方法.

2 EPA 总线调度时序

2.1 一些定义

定义 1 周期报文: 周期报文是按固定的通信周期发送的数据报文; 一般对实时性要求较高的采样数据和控制数据都由周期报文发送.

定义 2 通信宏周期 T_{macro} : 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称作周期段, 传输非周期报文的时间称作非周期段. 周期段和非周期段合称通信宏周期. 通信宏周期应大于系统采样周期, 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 时钟偏差 τ_{Δ} : 两个设备时钟误差的绝对值为时钟偏差.

定义 5 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 6 时间片裕度 T_{Δ} : 时间片长度比实际发送报文所需时间多出的部分.

2.2 通信周期调度时序

EPA 协议修改了以太网的数据链路层, 加入了分时调度机制. 分时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, 协同占用总线, 以此来避免报文的碰撞^[6].

EPA 调度时序图如图 1 所示. 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, 这样可以在不发生报文冲突的情况下充分利用系统总线资源. 周期采样或控制数据等实时性要求较高

且按周期性出现的报文在一个通信周期内的周期报文发送阶段发送, 而一些非周期性出现的数据, 例如: 同步报文或优先级调度报文, 则在专门划分的非周期报文发送阶段按照一定调度顺序发送.

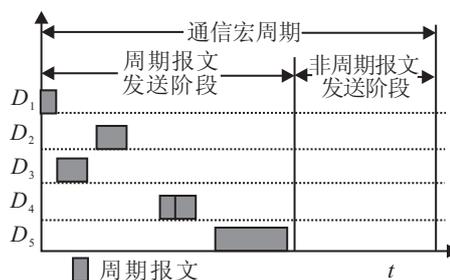


图 1 EPA 调度时序图

2.3 时间片时序

按以上定义, 通信宏周期可理解为总线循环时间. 因为一个控制系统的采样数据和控制数据的传输周期不能小于总线的循环时间, 所以总线循环时间是决定整体系统实时性的一个重要因素. 对于 EPA 系统而言, 宏周期大小的设置直接决定了系统实时性的好坏. 在强实时性应用环境下, 宏周期的设置往往为毫秒级或以下. 为了在很短的通信宏周期内传输所有设备的采样或控制数据, 必须提高总线的利用率.

从 EPA 分时调度的机理可以看出, 提高总线的利用率要从周期报文发送和非周期报文发送两个阶段来考虑. 由于非周期报文阶段的报文数量会因为应用场合的不同有较大变化, 以致长度不确定, 而周期报文的数量和发送顺序是确定的. 为了定量分析报文在时间片内的发送时序, 本文重点分析周期报文发送阶段.

由图 1 可知, 在理想情况下, 当周期发送阶段的总线利用率达到最高时, 所有设备的时间片应该依次“紧密”地相连在一起, 并且各个设备发送报文的时间长度应该充分利用各自的时间片. 达到这种状态的前提是各个设备能得知其他设备占用总线的准确时间. 由于组态设定了所有设备时间片的长度和相对位置, 在各设备完全时钟同步, 即 $T_{\text{ptp}} = 0$ 时, 这种理想状况是可以达到的. 如图 2(a) 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, 此时总线在周期报文的发送阶段利用率 $P_{\text{bus}} = 100\%$.

当引入实际存在的时钟偏差后, 设备 1 和设备 2 的时间片就可能因为两个设备时钟的偏差而发生偏移, 使得两个周期报文的发送时间(部分)重合, 从而发生碰撞, 造成较大的时延或是丢包. 如图 2(b) 所示, 设备 1 和设备 2 发生碰撞.

在实际应用中, 为了避免时钟偏差造成的碰撞, 往往在设置时间片时留有一定的裕度 T_{Δ} , 这样可保

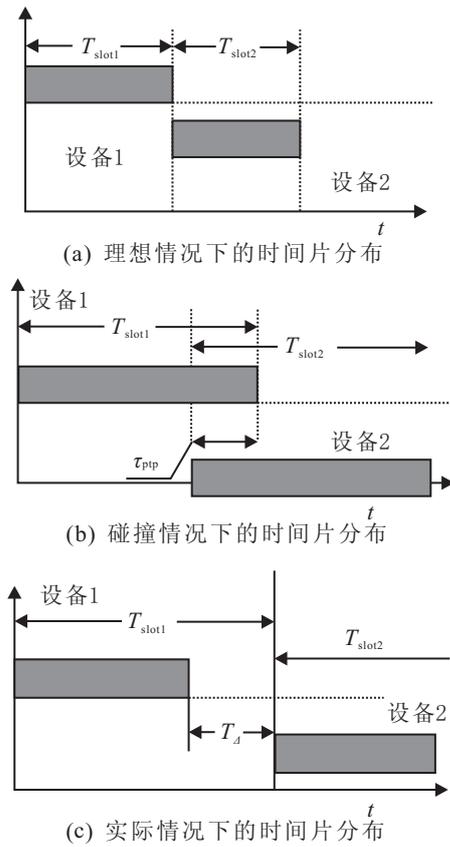


图 2 时间片分布

证当两个设备时钟偏差小于裕度, 即 $\tau_{\text{ptp}} < T_{\Delta}$ 时报文不会发生碰撞, 如图 2(c) 所示. 若设备数量为 n , 此时总线利用率为

$$P_{\text{bus}} = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^n T_{\Delta}^i}{\sum_{i=1}^n T_{\text{slot}}^i} \right). \quad (1)$$

随着 T_{Δ} 的增大, 碰撞概率即丢包率会下降, 但系统总线的利用率也会降低, 因此需要合理设置 T_{Δ} 以兼顾系统的丢包率和实时性.

3 EPA 丢包模型

3.1 EPA 丢包类型

EPA 丢包类型分为以下两种:

主动丢包: 此情况发生于设备需要发送周期报文的时间大于被分配时间片长度的时候. 此时设备在时间片内无法发送所有的周期报文, 因此多出时间片的周期报文将被丢弃. 此种丢包行为是由设备内部通过计算发送的周期报文相对于时间片的偏移量自身确定的.

碰撞丢包: 如上节所述, 当相邻的两个设备的两个周期报文的发送时间重合时, 报文会产生碰撞. 这时如果时间片在后的设备检测到碰撞, 并等待一段足够长的时间再发送自己的周期报文, 就可以避开时间片在前的设备发送报文, 从而避免丢包. 但过长的碰撞等待使主动丢包数量增多, 反而会增多丢包总数. 因此在强实时应用时, 碰撞后报文作丢弃处理, 设备

即使检测到碰撞也不会再次发送丢失的报文.

3.2 丢包与时钟同步的关系

周期报文一般为采样和控制数据, 在一个通信宏周期内其数量是固定的, 因此在无硬件故障的情况下, 合理设置时间片长度可避免主动丢包. 而碰撞丢包的发生概率由 τ_{ptp} 与 T_{Δ} 之间的关系决定. 因为 T_{Δ} 在系统组态后不再变化, 所以丢包的概率取决于时变的 τ_{ptp} .

τ_{ptp} 的变化与采用的同步协议有很大关系. EPA 采用 IEEE1588 规定的 PTP (precision time protocol)^[7] 进行时钟同步.

文献 [8] 对基于 EPA 的时钟同步原理作了详细分析. 在不进行晶振补偿的情况下, 主设备和从设备的时钟偏差 τ_{ptp} 在从设备收到主设备发出的跟随消息时最小. 之后由于两设备的时钟快慢不同, 会逐渐变大直到从设备再次收到跟随消息为止. 由于晶振的误差在温漂不大时一般为固定值, 忽略线路延时的计算误差 (一般小于 5 ms) 可以得到 τ_{ptp} 随时间变化的曲线, 如图 3 所示, 其中 T_{syn} 为跟随报文的出现周期.

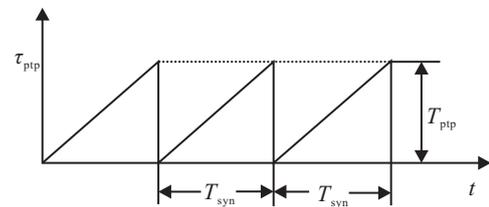


图 3 时钟偏差随时间变化

3.3 $T_{\text{ptp}} < T_{\Delta}$ 时的丢包行为

由图 2 可知, 当 $T_{\text{ptp}} < T_{\Delta}$ 时, 碰撞丢包率 $P_{\text{col}} = 0$, 但此时由式 (1) 得出的 P_{bus} 可能达不到系统 QoS 的要求, 因此应用中也会出现 $T_{\text{ptp}} \geq T_{\Delta}$ 的情况.

3.4 $T_{\text{ptp}} \geq T_{\Delta}$ 时的丢包行为

当 $T_{\text{ptp}} \geq T_{\Delta}$ 时, 有

$$P_{\text{col}} = 1 - T_{\Delta}/T_{\text{ptp}}. \quad (2)$$

若设 T_{int} 为一个随机的初始时间, 某个设备在通信宏周期内发送完最后一个报文的相对时刻为 T_{end} , 且通信宏周期等于系统采样周期, 则第 k 个宏周期是否丢包可由下式计算:

$$T_{\text{ptp}}^k = [(kT_{\text{macro}} - T_{\text{int}} - T_{\text{end}}) \bmod T_{\text{syn}}] \frac{T_{\text{ptp}}}{T_{\text{syn}}}, \quad (3)$$

当 $T_{\text{ptp}}^k \geq T_{\Delta}$ 时丢包发生.

根据式 (3) 和闭环控制系统的基本丢包模型^[3] 可以计算系统的稳定性. 但基于式 (3) 的稳定性计算方法过于复杂, 可根据实际情况适当简化模型.

在一般 EPA 的应用中, T_{syn} 为 s 级, T_{ptp} 根据晶振性能不同为 μs 或 ms 级, T_{macro} 为 ms 级, T_{syn} 为 s 级的数量级一般远大于 T_{macro} . 在某个通信宏周期

T_{ptp}^k 是否丢包很大程度上取决于上一个宏周期 T_{ptp}^{k-1} 是否丢包. 因此, 在简化计算时可认为丢包分布为马尔科夫过程. 将 T_{ptp}^k 的分布看作两个状态: 当 $r_k = 1$ 时, $T_{ptp} \geq T_{\Delta}$; 当 $r_k = 2$ 时, $T_{ptp} < T_{\Delta}$. 下面计算两个状态之间状态相互转移的概率.

如图4所示, 当时间轴上增加 T_{macro} , τ_{ptp} 会增加 $T_{ptp}T_{macro}/T_{syn}$, 当 τ_{ptp} 增大到 T_{ptp} 时会重新归零. 若在第 k 个通信宏周期内有

$$T_{ptp}^k + T_{ptp}T_{macro}/T_{syn} > T_{\Delta},$$

则在第 $k+1$ 个通信宏周期内 $T_{ptp}^{k+1} > T_{\Delta}$; 若在第 k 个通信宏周期内 $T_{ptp}^k + T_{ptp}T_{macro}/T_{syn} > T_{ptp}$, 则在第 $k+1$ 个通信宏周期内有 $T_{ptp}^{k+1} < T_{\Delta}$. 综上所述可得转移概率

$$q_1 = \begin{cases} 0, & \frac{T_{ptp}T_{macro}}{T_{syn}} \geq T_{ptp} - T_{\Delta}; \\ 1 - \frac{T_{ptp}T_{macro}}{(T_{ptp} - T_{\Delta})T_{syn}}, & \frac{T_{ptp}T_{macro}}{T_{syn}} < T_{ptp} - T_{\Delta}. \end{cases} \quad (4)$$

$$q_2 = \begin{cases} 0, & \frac{T_{ptp}T_{macro}}{T_{syn}} \geq T_{\Delta}; \\ 1 - \frac{T_{ptp}T_{macro}}{T_{\Delta}T_{syn}}, & \frac{T_{ptp}T_{macro}}{T_{syn}} < T_{\Delta}. \end{cases} \quad (5)$$

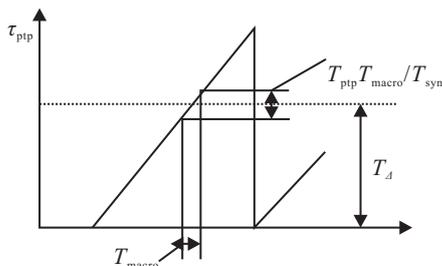


图4 状态转移概率计算

转移矩阵 Q 为

$$Q = \begin{bmatrix} q_1 & 1 - q_1 \\ 1 - q_2 & q_2 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

3.5 加入晶振纠偏后的情况

在某些具有强实时性要求的场合, 过低的时钟同步精度(如 ms 级)不能满足应用要求, 因此必须采用晶振纠偏或降低 T_{syn} 的方法提高同步精度. 文献[9]研究了对晶振进行补偿的算法, 可将同步精度提升到 $10 \mu s$ 以内.

在基于 EPA 数控系统的同步测试中, 硬件采用了 MII 接口与交换芯片相连, 从而大大加强了时间戳和线路延时计算的准确度. 当 $T_{syn} = T_{macro} = 2 \mu s$ 时, τ_{ptp} 变化在 μs 之内且分布几乎为白噪声, 由于通信宏周期的设置通常大于 $1 ms$, 时间片的长度也都大于 $100 \mu s$. 因此, 在此种情况下可以使 $T_{ptp} < T_{\Delta}$, 从而避免丢包.

4 系统稳定性分析和仿真

在建立了基本 EPA 丢包模型之后, 可用此模型分析闭环系统的稳定性. 考虑在 EPA 网络中一个状态反馈的闭环系统. 假设采样周期恒定为 h , 控制器和执行器为事件驱动(可以通过合理设置时间片来保证), 被控对象的全部状态可测, 而且不考虑测量噪声.

设被控对象的状态方程为

$$dx/dt = Ax(t) + Bu(t),$$

则线性被控对象离散状态方程可表示为^[10]

$$x((k+1)h) = \phi x(kh) + \Gamma(kh),$$

其中: $\phi = e^{Ah}$, $\Gamma = \int_0^h e^{As} ds B$. 状态反馈控制离散模型为 $u(kh) = -K\bar{x}(kh)$.

对于开关 S_1, S_2 的状态, 有:

S_1 断开: $\bar{u}(kh) = \bar{u}((k-1)h)$;

S_2 断开: $\bar{x}(kh) = \bar{x}((k-1)h)$.

令 $z(k) = [x^T(kh), \bar{x}^T(kh), \bar{u}^T(kh)]$, 可得 $z((k+1)h) = \Phi z(kh)$. 其中

$$\Phi_1 = \begin{bmatrix} \Phi & 0 & \Gamma \\ 0 & I & 0 \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix}, \quad \Phi_2 = \begin{bmatrix} \Phi & 0 & \Gamma \\ \Phi & 0 & \Gamma \\ 0 & -K & 0 \end{bmatrix},$$

$$\Phi_3 = \begin{bmatrix} \Phi & 0 & \Gamma \\ 0 & I & 0 \\ 0 & -K & 0 \end{bmatrix}, \quad \Phi_4 = \begin{bmatrix} \Phi & 0 & \Gamma \\ \Phi & 0 & \Gamma \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix}.$$

分别对应: 设 i 为系统的状态, 当 $i = 1$ 时, S_1 断 S_2 断; 当 $i = 2$ 时, S_1 通 S_2 通; 当 $i = 3$ 时, S_1 断 S_2 通; 当 $i = 4$ 时, S_1 通 S_2 断.

若此时 $T_{ptp} < T_{\Delta}$ 可满足系统 QoS 要求, 则丢包率近似为零, i 恒等于 2. 如果 $T_{ptp} \leq T_{\Delta}$, 则可用上节中的简化模型来求解. 此时系统状态有 4 种, 联立式(6)可得状态转移矩阵为

$$Q = \begin{bmatrix} aa & bb & ab & ab \\ dd & cc & cd & cd \\ ad & bc & ac & bd \\ ad & bc & bd & ac \end{bmatrix}. \quad (7)$$

其中: $a = q_1, b = 1 - q_1, c = q_2, d = 1 - q_2$.

稳定性判断矩阵为

$$(Q^T \otimes I_{n^2}) \times \text{diag}(\Phi_1 \otimes \Phi_1, \Phi_2 \otimes \Phi_2, \Phi_3 \otimes \Phi_3, \Phi_4 \otimes \Phi_4), \quad (8)$$

其中 n 为 ϕ_i 的阶数. 系统的稳定性由式(8)中的谱半径是否小于 1 决定, 得出 q_1, q_2 的关系后可带入式(4)和(5), 并计算出稳态时 T_{Δ} 的取值范围.

对于某些 EPA 智能仪表, 控制器已集成在仪表中, S_2 可看作一直闭合. 因此, i 取值只有 2 和 3 两个状态, 式(7)可减化为

$$Q = \begin{bmatrix} q_2 & 1 - q_2 \\ 1 - q_1 & q_1 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

例如: 采用如下智能仪表一阶系统:

$$\frac{dx}{dt} = x(t) + u(t), \quad y = x, \quad u(kh) = -Kx(kh).$$

系统采样周期与通信宏周期同为 5 ms, $T_{\text{ptp}} = 100 \mu\text{s}$, $T_{\text{syn}} = 2 \text{ s}$, 利用 Matlab 仿真, 当 $K = 120$, 系统稳定时满足的条件, 如图 5 所示. 将该条件带入式 (4) 和 (5) 可得 $T_{\Delta} \geq 0.952 \text{ ms}$. 因此为了保证系统稳定, 时间片裕度至少设置为 0.952 ms.

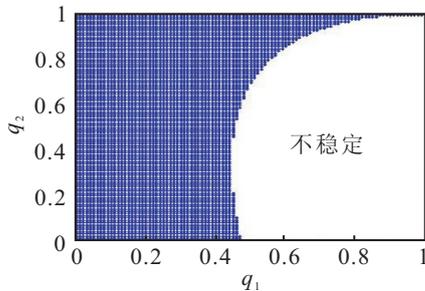


图 5 系统稳定区域

5 结 论

本文针对时钟同步偏差产生的丢包情况, 对基于分时调度的 EPA 工业以太网协议机理作了详细分析, 并建立了相应的系统丢包模型, 给出了提高 EPA 系统实时性的方法.

在给定系统采样周期和时钟同步参数的情况下, 可通过 EPA 丢包模型来计算时间片设置的最小长度, 并对系统稳定性进行分析. 从计算结果可以看出, 为了加强系统的实时性, 减少时间片裕度, 提高总线利用率, 一方面可通过减少同步文周期, 另一方面可加入晶振纠偏机制来提高时钟同步的精度. 实际上当时钟同步精度为 ns 级时, 系统实时性的瓶颈已经不在时钟同步精度, 而在以太网本身波特率的限制上. 因此, 时钟同步精度为 ns 级的 EPA 丢包模型需要进一步研究.

参考文献(References)

[1] Nilsson J. Real-time control systems with delays[D]. Lund: Lund Institute of Technology, 1998.

- [2] Costa O L V, Fragoso M D, Marques R P. Discrete-time Markov jump linear systems(probability and its applications)[M]. London: Springer, 2004.
- [3] Rabello A, Bhaya A. Stability of asynchronous dynamical systems with rate constraints and applications[J]. IEE Proc on Control Theory and Applications, 2003, 150(5): 546-550.
- [4] ISO/IEC15802-3, ANSI/IEEEStd802.1D. IEEE information technology-telecommunications and information exchange between systems-localand metropolitan area networks-common specifications, Part3: media access control(MAC) bridges[S].
- [5] IEC/PAS 62409. Real time ethernet EPA (ethernet for plant automation)[S].
- [6] 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 D Q, Jin J X, Chu J. Study on industrial ethernet [J]. Information and Control, 2003, 32(3): 221-224.)
- [7] IEEE STD. 1588-2002, IEEE standard for a precision clock synchronization protocol for networked measurement and control systems[S].
- [8] 桂本焯, 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 B X, Feng D Q, Chu J, et al. Study on single neuron compensation method in networked synchronization[J]. Chinese J of Scientific Instrument, 2006, 27(12): 1573-1577.)
- [9] 黄文君, 遇彬. 基于 FPGA 的精确时钟同步方法[J]. 浙江大学学报(自然科学版), 2007, 41(10): 1697-1700. (Huang W J, Yu B. Method for precise time synchronization based on FPGA[J]. J of Zhejiang University(Nature Science Edition), 2007, 41(10): 1697-1700.)
- [10] Hassibi A, Boyd S P, How J P. Control of asynchronous dynamical systems with rate constraints on events[C]. IEEE Conf on Decision and Control. Phoenix, 1999: 1345-1351.

(上接第247页)

[13] Vapnik V N, Mukherjee S. Support vector method for multivariate density estimation[C]. Advances in Neural Information Processing Systems. Cambridge: MIT Press, 2000: 659-665.

[14] Weston J, Gammernan A, Stitson M O, et al. Support vector density estimation[C]. Advances in Kernel Methods-

SV Learning. Cambridge: MIT Press, 1999: 293-306.

[15] Bennett K. Combining support vector and mathematical programming methods for induction[J]. Advances in Kernel Methods-SV Learning. Cambridge: MIT Press, 1999: 307-326.