

文章编号: 1001-0920(2007)07-0795-05

# 一种网络控制系统的随机通信逻辑设计与分析

宗 群, 王 鹤, 李 然

(天津大学 电气与自动化工程学院, 天津 300072)

**摘 要:** 针对网络控制系统的带宽约束问题, 提出一种基于系统状态的状态依赖泊松过程决定的随机通信逻辑, 并将其应用于一般结构的状态反馈网络控制系统. 介绍了具有通信逻辑的网络控制系统的结构, 建立了具有随机通信逻辑的网络控制系统模型. 利用随机稳定性理论和带时倚强度泊松过程相关原理, 进一步证明了系统保持均方渐近稳定的充分条件. 最后通过仿真算例验证了结论的有效性.

**关键词:** 网络控制系统; 带宽约束; 随机通信逻辑

**中图分类号:** TP273

**文献标识码:** A

## Design and analysis of stochastic communication logic for networked control systems

ZONG Qun, WANG He, LI Ran

(School of Electric and Automation Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China. Correspondent: ZONG Qun, E-mail: zongqun@tju.edu.cn)

**Abstract:** In view of the problem of bandwidth constraints in networked control systems, a kind of stochastic communication logic based on states of systems is proposed, which is built on a state dependent poisson process and applied in common structure of states-feedback networked control systems. The structure of networked control systems with communication logic is introduced, and the model of networked control systems is established. By using the theory of stochastic stability and poisson process with time varying density, the sufficient condition for keeping the mean square asymptotically stability of systems is proved. Finally, an example shows the effectiveness of the conclusion.

**Key words:** Networked control systems; Bandwidth constraints; Stochastic communication logic

### 1 引 言

网络控制系统是指通过网络形成闭环的控制系统. 它是计算机技术、通信技术和控制技术发展与融合的产物, 具有布线简单、结构灵活、易于系统扩展和维护以及能够实现信息资源共享等优点<sup>[1,2]</sup>. 网络的存在也给控制系统带来了诸如延时、丢包、带宽约束等问题, 导致系统性能下降, 甚至危及系统的稳定性. 所谓带宽约束, 是指网络中的信息源一般比较多, 信息的传送要分时占用网络通信线路, 而网络在一定的时间内只能传送有限量的数据信息, 即网络的通信速率是有界的. 带宽约束是影响网络控制系统的一个重要因素, 也是网络控制系统中研究的热点之一<sup>[3-5]</sup>. 节点过多、数据传输过于频繁或传输的

数据量过大都有可能增大网络冲突的概率, 使得网络通信延时变大, 引起数据丢失, 严重时会造成网络拥塞, 导致网络控制系统性能下降, 甚至不稳定<sup>[6]</sup>.

目前, 从降低网络中节点包传输速率的角度出发, 研究带宽约束问题的成果较少. Antsaklis 等提出利用对对象特性的了解来建立估计模型, 以减少网络中的数据传输量, 并分析了在周期传输方式下的系统稳定性条件<sup>[7]</sup>. Tilbury 等针对多输入多输出的网络控制系统, 在每一个控制器端增加了一个被控对象的状态估计模型, 引入确定通信逻辑控制网络节点发送数据, 并通过实验证明该方法有效地降低了数据传输的次数<sup>[8]</sup>. Xu 提出一种应用于并行式网络控制系统的随机通信逻辑<sup>[9]</sup>, 证明了系统的随

收稿日期: 2006-04-07; 修回日期: 2006-08-21.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60574055).

作者简介: 宗群(1961—), 男, 天津人, 教授, 博士生导师, 从事复杂系统建模与控制、网络控制系统等研究; 王鹤(1982—), 女, 吉林农安人, 硕士生, 从事网络控制的研究.

机稳定性.通信逻辑本质上可以看作是一种用户层上的网络调度规则,其作用是决定网络中的节点何时发送数据,目的是减少网络节点发送数据次数,从而降低网络带宽约束的影响.本文介绍了具有通信逻辑的网络控制系统结构,建立了具有随机通信逻辑的状态反馈网络控制系统模型,提出了一种由系统状态依赖泊松过程(SDPP)决定的随机通信逻辑,证明了系统保持均方渐近稳定的充分条件.

## 2 具有通信逻辑的网络控制系统结构

本文研究的网络控制系统结构如图1所示.系统由被控对象、智能传感器、通信网络和远程控制器构成.被控对象是一个线性时不变过程,智能传感器采集被控对象状态,并通过网络发送给远程控制器,与远程控制器一起构成状态反馈控制回路.

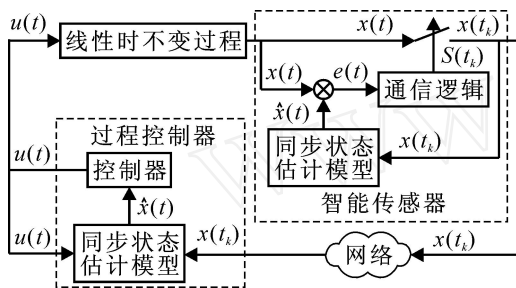


图1 具有通信逻辑的网络控制系统结构

假设被控对象的状态方程和控制方程为

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t), \quad u(t) = Kx(t). \quad (1)$$

其中: $x(t) \in R^n$ 为 $n$ 维状态向量; $u(t) \in R^m$ 为 $m$ 维控制向量; $A, B$ 和 $K$ 为具有适当维数的实系数矩阵.系统的状态反馈控制闭环方程为

$$\dot{x}(t) = (A + BK)x(t). \quad (2)$$

但是,由于网络的存在,远程控制器只能在离散时间 $\{t_1, \dots, t_k, \dots\} (k \in N)$ 获得系统的状态测量信号,在 $t \in [t_k, t_{k+1})$ 期间,远程控制器利用同步状态估计模型的输出 $\hat{x}(t)$ 进行控制,因而控制方程和状态反馈方程变为

$$\begin{aligned} u(t) &= K\hat{x}(t), \\ \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) = \\ &= Ax(t) + BK\hat{x}(t) = \\ &= (A + BK)x(t) + BKe(t). \end{aligned} \quad (3)$$

其中 $e(t) = \hat{x}(t) - x(t)$ 为系统同步状态估计模型的估计偏差,在时刻 $t_k, \hat{x}(t_k)$ 更新为 $x(t_k)$ .

智能传感器主要由同步状态估计模型和通信逻辑组成,采集被控对象状态并根据通信逻辑制定的规则传送给远程控制器.通信逻辑以同步状态估计模型的输出 $\hat{x}(t)$ 和系统状态 $x(t)$ 为输入,根据所采取的规则计算输出二进制控制信号 $S(t_k)$ .当 $S(t_k) = 1$ 时,通信逻辑控制传感器将状态信号 $x(t_k)$ 通过

网络传送给远程控制器;若 $S(t_k) = 0$ ,则不发送.

远程控制器由同步状态估计模型和控制器组成,该模型在远程控制器端和智能传感器端各有一个.远程控制器端的估计模型用于为控制器在连续2次传输时刻 $t_k$ 到 $t_{k+1}$ 之间提供被控对象的状态估计,当接收到智能传感器发送来的数据后,估计模型的状态更新为系统状态的真实值.智能传感器端的估计模型与远程控制器端的估计模型完全一致,其作用是让传感器时刻“了解”远程控制器端的状态估计值,发送数据时,传感器也将模型的估计值更新为对象的真实值.在忽略网络延时的条件下,两个模型的状态完全保持一致,称之为“同步”.同步状态估计模型

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}(t) &= A\hat{x}(t) + Bu(t), \\ \hat{x}(t_k) &= x(t_k), \quad k \in N. \end{aligned} \quad (4)$$

其中: $\hat{x}(t)$ 为估计模型对系统状态 $x(t)$ 的估计值,在时刻 $t_k$ 更新为真实的系统状态; $A$ 和 $B$ 为估计模型系数矩阵.

## 3 网络控制系统模型

假设线性时不变对象的全部状态均可通过测量直接获得,状态测量数据可由传感器通过网络一次传输给控制器,即不考虑多包传输的情况,同时忽略网络延时和计算延时的影响.

在时刻 $t \in [t_k, t_{k+1}), k \in N$ ,系统方程可表达为

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= (A + BK)x(t) + BKe(t), \\ \dot{\hat{x}}(t) &= A\hat{x}(t) + Bu(t) = \\ &= (A + BK)x(t) + (A + BK)e(t), \\ \dot{e}(t) &= (\overline{A} + \tilde{B}K)x(t) + (A + \tilde{B}K)e(t). \end{aligned} \quad (5)$$

其中: $e(t) = \hat{x}(t) - x(t), \hat{x}(t_k) = x(t_k), e(t_k) = 0$ .将式(5)表示为如下矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{e}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A + BK & BK \\ \overline{A} + \tilde{B}K & A + \tilde{B}K \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ e(t) \end{bmatrix}. \quad (6)$$

其中: $\overline{A} = A - A, \tilde{B} = B - B$ .

定义

$$\begin{aligned} z(t) &:= [x(t) \quad e(t)]^T, \\ &:= \begin{bmatrix} A + BK & BK \\ \overline{A} + \tilde{B}K & A + \tilde{B}K \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

则式(6)可简化为

$$\dot{z}(t) = z(t), \quad (7)$$

其中 $z(t_k) = \begin{bmatrix} x(t_k) \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t_k) \\ e(t_k) \end{bmatrix}$ .因此,在

时刻 $t \in [t_k, t_{k+1})$ ,系统响应为

$$\begin{aligned} z(t) &= \exp\{(t - t_k)\} z(t_k) = \\ &= \exp\{(t - t_k)\} \begin{bmatrix} x(t_k) \\ 0 \end{bmatrix} = \end{aligned}$$

$$\exp\{-(t - t_k)\} \begin{bmatrix} I & \bar{0} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t_k) \\ e(t_k) \end{bmatrix}. \quad (8)$$

本文设计的随机通信逻辑是以估计状态与系统真实状态之间的偏差  $e(t) = \hat{x}(t) - x(t)$  作为输入,通过泊松过程建立估计偏差的随机函数来计算输出  $S(t)$ . 构建一个泊松过程强度与估计偏差之间的函数,即  $\lambda(t) = f[e(t)]$ ,对于任一时刻  $t \in [t_k, t_{k+1}]$ ,利用泊松过程的概率公式

$$P(t) = 1 - \exp\left\{-\int_{t_k}^t \lambda(u) du\right\},$$

可计算出当前时刻数据发送的概率. 通信逻辑以概率  $P(t)$  输出  $S(t) = 1, S(t) = 0$  时传感器发送数据给远程控制器. 泊松过程强度  $\lambda(t)$  为当前系统状态估计偏差的函数,称这样的泊松过程为状态依赖泊松过程(SDPP). 本文选定随机通信逻辑所采取强度函数为

$$\lambda(t) = f[z(t)] = K \left\| \begin{bmatrix} 0 & \bar{0} \\ 0 & I \end{bmatrix} z(t) \right\|^2 = K \left\| \begin{bmatrix} 0 & \bar{0} \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ e(t) \end{bmatrix} \right\|^2 = Ke(t)^T e(t). \quad (9)$$

其中  $z(t) = \begin{bmatrix} x(t) \\ e(t) \end{bmatrix}$ ,  $I$  为  $n \times n$  单位矩阵,  $K \in R^+$ . 通过比例项  $K$ ,可以调整强度对系统估计偏差的依赖关系.

#### 4 网络控制系统稳定性分析

定义

$$(k) := z(t_k), T_{k+1} = t_{k+1} - t_k, H(t_{k+1}) := e^{T_{k+1}} \begin{bmatrix} I & \bar{0} \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$

则式(8)可表达为如下采样系统的形式:

$$(k+1) = H(t_{k+1}) (k). \quad (10)$$

**定理 1** 在时间  $t \in [t_k, t_{k+1}]$ ,对于式(8)所表示的系统,随机通信逻辑使用的泊松过程强度为

$$\lambda(t) = f[z(t)] = K \left\| \begin{bmatrix} 0 & \bar{0} \\ 0 & I \end{bmatrix} z(t) \right\|^2 = Ke(t)^T e(t), K \in R^+,$$

系统估计状态更新时间序列为  $\{t_1, \dots, t_k, \dots\}, k \in N$ . 对于

$$M_1 = K \left\| \begin{bmatrix} 0 & \bar{0} \\ 0 & I \end{bmatrix} \right\|^2, \lambda(k) = \lambda(t_k),$$

只要选择合适的  $K$  值,使得条件  $M_1 - 2^{-1} > 0$  成立,其中  $\lambda = \max(\lambda)$  为矩阵  $\lambda$  的最大奇异值,则系统(8)均方渐近稳定的充分条件是矩阵

$$\begin{bmatrix} I & \bar{0} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \exp\{T^*\} \begin{bmatrix} I & \bar{0} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

的最大奇异值小于 1. 其中

$$T^* = \frac{M_2}{M_1 - 2^{-1}} \cdot \left(t_k - \frac{1}{M_1 - 2^{-1}}\right)$$

为系统状态更新间隔  $T_{k+1} = t_{k+1} - t_k$  的数学期望  $E T_{k+1}$  的某一上界,即  $E T_{k+1} \leq T^*, M_2 = K^T$ .

证明 随机通信逻辑所采取的泊松过程强度为

$$\lambda(t) = f[z(t)] = K \left\| \begin{bmatrix} 0 & \bar{0} \\ 0 & I \end{bmatrix} z(t) \right\|^2 = Ke(t)^T e(t), K \in R^+.$$

由带时倚强度的泊松过程相关定义可知,系统状态更新发生时间序列  $\{t_1, \dots, t_k, \dots\}, k \in N$ ,是一个马尔可夫序列<sup>[10]</sup>,其转移密度

$$P_{t_{k+1}/t_k} = \lambda(t_{k+1}) \exp\left\{-\int_{t_k}^{t_{k+1}} \lambda(r) dr\right\} = K \left\| \begin{bmatrix} 0 & \bar{0} \\ 0 & I \end{bmatrix} z(t) \right\|^2 \exp\left\{-\int_{t_k}^{t_{k+1}} K \left\| \begin{bmatrix} 0 & \bar{0} \\ 0 & I \end{bmatrix} z(r) \right\|^2 dr\right\}. \quad (11)$$

取系统(8)的 Lyapunov 函数

$$V[k, t_k] = (k)^T (k). \quad (12)$$

计算连续两次数据传输时刻 Lyapunov 函数  $V[k+1, t_{k+1}]$  和  $V[k, t_k]$  的差  $\Delta V$  的期望值,可得

$$\begin{aligned} E[\Delta V | k] &= E[V(k+1, t_{k+1}) - V(k, t_k) | (k) = (k), k] = \\ &= E[(k+1)^T (k+1) | (k) = (k), k] - (k)^T (k) = \\ &= E[(k)^T H(t_{k+1})^T H(t_{k+1}) (k) | (k) = (k), k - T^*] = \\ &= (k)^T (E[H(t_{k+1})^T H(t_{k+1})] - I_{2n \times 2n}) (k) = \\ &= \begin{bmatrix} I & \bar{0} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \exp\{E T_{k+1}\}^T \times \\ &\quad \exp\{E T_{k+1}\} \begin{bmatrix} I & \bar{0} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} - I_{2n \times 2n}. \end{aligned}$$

将式(11)代入,求解  $E T_{k+1}$ ,可得

$$E T_{k+1} = \int_{t_k}^{\infty} \left( K \left\| \begin{bmatrix} 0 & \bar{0} \\ 0 & I \end{bmatrix} z(r) \right\|^2 \times \exp\left\{-\int_{t_k}^r K \left\| \begin{bmatrix} 0 & \bar{0} \\ 0 & I \end{bmatrix} z(r) \right\|^2 dr\right\} dr\right) dr. \quad (13)$$

假设函数  $f_1(\cdot) := \int_{t_k}^{\cdot} K \left\| \begin{bmatrix} 0 & \bar{0} \\ 0 & I \end{bmatrix} z(r) \right\|^2 dr$  在  $t = t_k$  的某一邻域内具有  $n+1$  阶导数,则  $f_1(\cdot)$  可以在时刻  $t = t_k$  按泰勒级数展开为

$$f_1(\cdot) = f_1(t_k) + f_1'(t_k)(\cdot - t_k) + \dots + \frac{f_1^{(n)}(t_k)}{n} (\cdot - t_k)^n + R_n(\cdot).$$

由于  $t_k$  且  $f_1(t_k) = 0$ ,可得到

$$\begin{aligned}
 f_1(t) &= f_1(t_k) + f_1(t_k)(t - t_k) = \\
 &= K \left\| \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} z(t_k) \right\|^2 (t - t_k) = \\
 &= K \left\| \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} \right\|^2 (t - t_k). \quad (14)
 \end{aligned}$$

设  $M_1 := K \left\| \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} \right\|^2$ , 则有

$$\begin{aligned}
 &\exp\{-\int_{t_k}^t K \left\| \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} z(r) \right\|^2 dr\} \\
 &= \exp\{-M_1(t - t_k)\}. \quad (15)
 \end{aligned}$$

在  $t \in [t_k, t_{k+1})$  时刻, 有

$$z(t) = \exp\{-(t - t_k)\} \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\begin{aligned}
 z(t)^T z(t) &= \\
 &= \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}^T \exp\{-(t - t_k)\} \exp\{-(t - t_k)\} \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}.
 \end{aligned}$$

根据文献[8]可知

$$\begin{aligned}
 &\exp\{-(t - t_k)\} \exp\{-(t - t_k)\} \\
 &= \exp\{2 \max(\lambda) (t - t_k)\},
 \end{aligned}$$

其中  $\max(\lambda)$  为矩阵  $\lambda$  的最大奇异值. 设  $\lambda^- = \max(\lambda)$ , 则

$$\begin{aligned}
 &K \left\| \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} z(t) \right\|^2 = K z(t)^T z(t) \\
 &= K \exp\{2 \lambda^- (t - t_k)\} \exp\{-(t - t_k)\}. \quad (16)
 \end{aligned}$$

将式(15)和(16)代入(13), 可得

$$\begin{aligned}
 &E T_{k+1} \\
 &= \int_{t_k}^t (K^T \exp\{2 \lambda^- (t - t_k)\} \exp\{-M_1(t - t_k)\}) d = \\
 &= K^T \int_{t_k}^t (\exp\{2 \lambda^- (t - t_k)\} \exp\{-M_1(t - t_k)\}) d.
 \end{aligned}$$

设  $M_2 := K^T$ , 则进一步可得

$$\begin{aligned}
 &E T_{k+1} \\
 &= M_2 \int_{t_k}^t (\exp\{2 \lambda^- (t - t_k)\} \exp\{-M_1(t - t_k)\}) d = \\
 &= M_2 \int_{t_k}^t (\exp\{-(M_1 - 2 \lambda^-)(t - t_k)\}) d. \quad (17)
 \end{aligned}$$

只要选择合适的  $K$  使得条件  $M_1 - 2 \lambda^- > 0$  得到满足, 则可进一步推得

$$E T_{k+1} = \frac{M_2}{M_1 - 2 \lambda^-} \cdot \left( t_k - \frac{1}{M_1 - 2 \lambda^-} \right) = T^*. \quad (18)$$

可以看出, 对于  $M_1 = K \left\| \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} \right\|^2$ , 只要选择合适的  $K$ , 使得条件  $M_1 - 2 \lambda^- > 0$  成立, 以及

$$\max \left( \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \exp\{T^*\} \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \right) < 1,$$

则矩阵

$$\begin{aligned}
 &\left( \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \exp\{E T_{k+1}\}^T \times \right. \\
 &\left. \exp\{E T_{k+1}\} \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} - I_{2n \times 2n} \right) < 0.
 \end{aligned}$$

因此,  $E[V(t), k] < 0$ , 系统(8)均方渐近稳定.

### 5 仿真实例

被控对象状态方程为

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t).$$

其中

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1.2 \\ 0.3 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix},$$

同步状态估计模型的系数矩阵

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1.3 \\ 0.5 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix},$$

该估计模型对应的离散时间模型为

$$\begin{aligned}
 G &= \begin{bmatrix} 1.0008 & 0.0650 \\ 0.0250 & 1.0008 \end{bmatrix}, \\
 H &= \begin{bmatrix} 0.0016 \\ 0.0500 \end{bmatrix}.
 \end{aligned}$$

控制器  $K = \begin{bmatrix} -1.5680 \\ -2.0556 \end{bmatrix}$  由对估计模型的 LQR 设计获得.

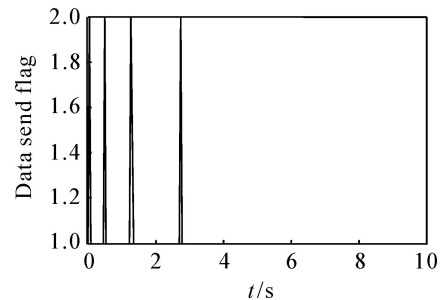


图 2 基于 SDPP 的随机通信逻辑数据发送时间

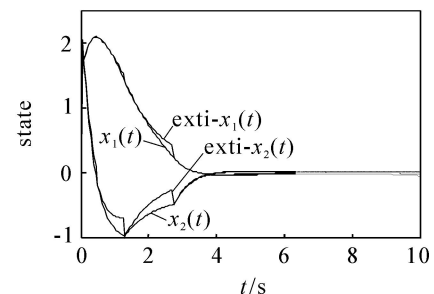


图 3 基于 SDPP 的随机通信逻辑系统状态图

取  $t_0 = 0$ ,  $x(t_0) = \begin{bmatrix} 1.5 \\ 2 \end{bmatrix}$ . 基于 SDPP 的随机通信逻辑强度  $s(t) = 25 e(t)^2$ .

基于 SDPP 的随机通信逻辑数据发送时间和系统状态如图 2 和图 3 所示. 由图可以看出, 网络控制系统中加入 SDPP 的随机通信逻辑后, 在保持系统稳定的前提下, 减少了网络控制系统中数据的发送速率, 从而降低了带宽约束对系统的影响.

## 6 结 论

本文介绍了具有通信逻辑的网络控制系统结构, 提出了一种基于 SDPP 的随机通信逻辑. 通过降低网络中节点包传输速率的方法, 解决了网络控制系统中的带宽约束问题. 仿真结果验证了所提出方法的有效性.

## 参考文献 (References)

- [1] Zhang Wei, Branicky Michael S, Philips Stephen M. Stability of networked control systems [J]. IEEE Control Systems Magazine, 2001, 21(1): 85-99.
- [2] 谢林柏, 方华京, 王华. 网络化控制系统的信息调度与稳定性研究[J]. 控制与决策, 2004, 19(5): 589-591. (Xie Lin-bo, Fang Huar-jing, Wang Hua. Information scheduling and asymptotical stability of networked control systems [J]. Control and Decision, 2004, 19(5): 589-591.)
- [3] Mu Shumei, Chu Tianguang, Wang Long, et al. State feedback control of networked systems via periodical switching[C]. 2004 IEEE Int Symposium on Computer Aided Control Systems Design. Taipei, 2004: 356-361.
- [4] Dimitrios Hristu. Stabilization of LTI systems with communication constraints [C]. Proc of the American Control Conf. Chicago: Illinois, 2000: 2342-2346.
- [5] Peter E Hokayem, Chaouki T Abdallah. Inherent issues in networked control systems: A survey[C]. Proc of the 2004 American Control Conf. Boston: Massachusetts, 2004: 4897-4902.
- [6] Panos Antsaklis, John Baillieul. Special issue on networked control systems [J]. Automatic Control, 2004, 49(9): 1421-1423.
- [7] Luis A Montestruque, Panos J Antsaklis. Model-based networked control systems-stability [R]. Notre Dame: University of Notre Dame, 2002.
- [8] John K Yook, Dawn M Tilbury, Nandit R Soparkar. Trading computation for bandwidth: Reducing communication in distributed control systems using state estimators [J]. IEEE Trans on Control Systems Technology, 2002, 10(4): 503-518.
- [9] Xu Yonggang, Joao Hespanha. Communication logics for networked control systems [C]. Proc of the 2004 American Control Conf. Boston: Massachusetts, 2004: 572-577.
- [10] 邓永录, 梁纸舜. 随机点过程及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 1992. (Deng Yong-lu, Liang Zhi-shun. Stochastic point processes and applications [M]. Beijing: Science Press, 1992.)
- [9] 韩京清. 自抗扰控制器及其应用 [J]. 控制与决策, 1998, 13(1): 19-23. (Han Jing-qing. Auto-disturbances-rejection controller and it's applications [J]. Control and Decision, 1998, 13(1): 19-23.)
- [10] 韩京清, 张文革. 大时滞系统的自抗扰控制 [J]. 控制与决策, 1999, 14(4): 354-358. (Han Jing-qing, Zhang Wen-ge. ADRC control for large time-delay systems [J]. Control and Decision, 1999, 14(4): 354-358.)
- [11] 苏位峰, 孙旭东, 李发海. 基于自抗扰控制器的异步电机矢量控制 [J]. 清华大学学报, 2004, 44(10): 1329-1332. (Su Wei-feng, Sun Xu-dong, Li Fa-hai. Vector control of induction motors with active disturbance rejection control [J]. J of Tsinghua University, 2004, 44(10): 1329-1332.)
- [12] 黄焕袍, 武利强, 高峰, 等. 自抗扰在火电厂主汽温控制中的应用 [J]. 系统仿真学报, 2005, 17(1): 241-244. (Huang Huan-pao, Wu Li-qiang, Gao Feng, et al. Main steam temperature control of thermal power plant based on active disturbance rejection control [J]. J of System Simulation, 2005, 17(1): 241-244.)
- [13] 苏玉鑫, 段宝岩, 张永芳, 等. 大射电望远镜馈源指向系统轨迹跟踪自抗扰控制 [J]. 控制理论与应用, 2004, 21(6): 956-960. (Su Yu-xin, Duan Bao-yan, Zhang Yong-fang, et al. Auto-disturbances rejection control of the feed-supporting system for the square kilometer array [J]. Control Theory & Applications, 2004, 21(6): 956-960.)

(上接第 794 页)