

文章编号: 1001-0920(2005)04-0412-05

基于模型的网络控制系统稳定性

孙海燕, 侯朝桢, 赵 奇

(北京理工大学 自动控制系, 北京 100081)

摘 要: 针对具有时间延迟的网络控制系统被控对象状态无法直接测量得到的情况, 设计了状态观测器, 并讨论了系统指数稳定性问题. 提出了在网络传输信号的时间间隔内依据被控对象模型计算控制信号的开环控制方法, 以减少对网络的使用. 在此基础上, 分别对连续和离散被控对象给出了网络控制系统全局指数稳定的充要条件, 该条件受网络信号更新时间、被控对象模型误差及网络引起的延迟等因素的影响. 仿真示例验证了稳定性条件的有效性.

关键词: 网络控制系统; 信号更新时间; 时延; 全局指数稳定

中图分类号: TP13 **文献标识码:** A

Stability of model-based networked control systems

SUN Hai-yan, HOU Chao-zhen, ZHAO Qi

(Department of Automatic Control, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China Correspondent: SUN Hai-yan, E-mail: sun-hai-yan@bit.edu.cn)

Abstract: The plant state observer is designed and the problem of exponential stability for networked control systems with time-delay is discussed when the plant state can't be measured directly. The open-loop control method of computing control signal based on plant model at intervals of state signal through network is proposed for reducing the usage of the network. Furthermore, necessary and sufficient conditions for system globally exponentially stability are derived for both continuous and discrete plants. These conditions are affected by the network signal update time and the plant model error and network-induced delay. The example illustrates the effectiveness of the stability conditions.

Key words: networked control systems; signal update time; time-delay; globally exponentially stable

1 引言

网络控制系统将网络作为被控对象和控制器之间的信号传输媒介, 形成闭环控制回路, 大范围地延长了控制的距离. 它可以应用于许多传统控制无法完成的如机器人远程控制、远程医疗、远程实验室等方面的控制问题, 因此具有广泛的应用前景^[1~3]. 将网络作为信号传输环节引入闭环控制回路, 会产生许多新问题, 如网络引起的延迟、数据包丢失、多包传输、时序等人^[2,4~8]. 其中对网络控制系统影响最大的是时间延迟, 而且由于网络节点存在信号传输分时复用的特点, 信号传输时间延迟无法避免. 它会导致系统性能下降甚至失稳. 以往的研究集中

在对时延的补偿上, 但效果不够理想.

Montestruque 等人^[4,9,10]提出了一种新思想, 即在系统控制回路中尽量减少对网络的使用, 使得网络对系统的负面影响降至最低. 并依据这种思想提出了一种基于被控对象模型的网络时延控制方法. 文献[4]中引入了网络信号更新时间的概念, 在相邻的两次更新时间间隔内, 控制器以被控对象模型为依据, 计算并产生控制信号, 作用于被控对象, 形成本地端的开环控制, 此时并不使用网络; 在信号更新时刻, 将网络并入控制回路, 形成闭环控制, 这时被控对象的状态信号通过网络传输至控制器, 用于更新被控对象模型中的状态信号. 因此可以考虑

收稿日期: 2004-06-21; 修回日期: 2004-10-13

基金项目: 国防预研基金项目

作者简介: 孙海燕(1975—), 女, 湖北武汉人, 博士生, 从事网络控制系统研究; 侯朝桢(1938—), 男, 北京人, 教授, 博士生导师, 从事计算机控制、分布式控制等研究

在保证系统稳定性的同时, 尽量增大网络信号更新的时间间隔, 以减少系统对网络的依赖 这种新思路类似于机器人遥操作中的半自主控制的思想, 尽可能实现控制器的自主性和智能化 文献[4, 9]中讨论了网络控制系统无时间延迟时状态反馈控制和输出反馈控制方法, 以及存在时延时系统状态反馈控制器设计 然而, 在实际情况下, 不仅存在网络时间延迟, 而且被控对象的状态值也往往无法直接测得, 此时问题更加复杂

本文针对以上两种情况同时存在的网络控制系统进行研究, 设计了时延情况下基于观测器的状态反馈控制方法, 得到了被控对象分别是连续和离散形式下的判定系统全局指数稳定的充要条件

2 问题描述

本文主要考虑由网络引起的时间延迟的影响, 并对系统有如下描述:

1) 为简化设计, 只考虑传感器和控制器之间在网络连接的情况 如果将嵌入式微处理器并入执行器中, 控制器与执行器之间不存在网络连接^[9], 这种情况是实际存在的

2) 网络传输信号的时间间隔为 T , T 越小, 控制器中被控对象模型的状态 \hat{x} 更新越快, 依据该模型计算控制信号效果越好, 但网络时延的影响也越大 为减少网络的影响, 可以增大时间 T , 在保证系统稳定性要求下求得 T 的最大值 信号更新时间 T 不等于系统的采样时间, 在被控对象离散情况下, 系统的采样时间 h 既可以大于 T 也可以小于 T ^[4].

3) 网络引起的时间延迟为 τ , 且 $\tau < T$. 当 $\tau > T$ 时, 信号作丢包处理, 在此不作讨论

4) 网络传输信号时刻为 $t_k, k = 0, 1, \dots$, 且 $t_{k+1} - t_k = T$. 由于存在网络时延, 传播单元在 t_k 时刻收到 τ 时间以前的被控对象状态值 $\bar{x}(kT - \tau)$, 并依据被控对象模型和控制信号估计 t_k 时刻的状态值 $\tilde{x}(kT)$, 用于更新控制器中的被控对象模型的状态值 $\hat{x}(kT)$, 使得模型更准确地反映被控对象的实际状态, 提高控制的效果

3 网络控制系统模型

设实际被控对象为线性时不变系统, 网络控制系统的结构如图 1 所示 图中: $x(t) \in R^n; u(t) \in R^m; y(t) \in R^q; A, B, C, D$ 为常数矩阵; L 为状态观测器增益; K 为状态反馈控制器增益

设模型误差矩阵^[4]: $\tilde{A} = A - \hat{A}, \tilde{B} = B - \hat{B}, \tilde{C} = C - \hat{C}, \tilde{D} = D - \hat{D}$. 在每个采样区间 $t \in [t_k, t_{k+1})$, 有

$$\dot{x}(t) = [A \quad -BK \quad 0][x(t) \quad \hat{x}(t) \quad \bar{x}(t)]^T,$$

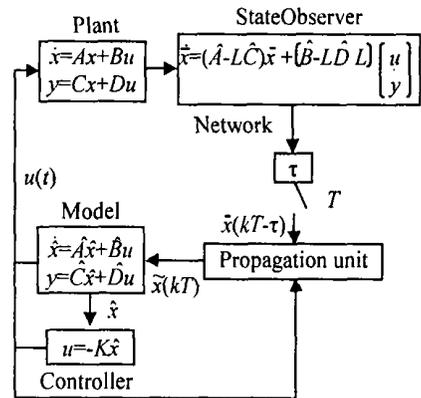


图 1 基于模型的网络控制系统结构图

$$\dot{x}(t) = [LC \quad -BK - LD\tilde{K} \quad A - LC] \begin{bmatrix} x(t) \\ \hat{x}(t) \\ \bar{x}(t) \end{bmatrix}^T.$$

此外, 设观测器中被控对象状态与传播单元中估计的状态之间的误差为 $e_1 = \bar{x} - \tilde{x}$; 估计状态与控制器中的状态之间的误差为 $e_2 = \tilde{x} - \hat{x}$. 可以定义系统的广义被控对象为

$$X(t) = [x(t) \quad \bar{x}(t) \quad e_1(t) \quad e_2(t)]^T,$$

当 $t \in [t_k, t_{k+1})$ 时, 有

$$\dot{X}(t) = PX(t). \tag{1}$$

其中

$$P = \begin{bmatrix} A & -BK & BK & BK \\ LC & A - LC - BK - LD\tilde{K} & BK + LD\tilde{K} & BK \\ LC & -LD\tilde{K} - LC & A + LD\tilde{K} & LD\tilde{K} \\ 0 & 0 & 0 & A \end{bmatrix}. \tag{2}$$

在传播单元中, 每个采样时刻接收到的是 τ 时刻以前的被控对象状态^[4]. 因此, 当 $t \in [t_{k+1} - \tau, t_{k+1})$ 时, $\dot{x}(t) = A\tilde{x}(t) + B u(t)$, 信号的更新规则为

$$\begin{cases} \tilde{x} = \bar{x}, t = t_{k+1} - \tau; \\ \hat{x} = \tilde{x}, t = t_{k+1}. \end{cases} \tag{3}$$

所以在 $t = t_k$ 时刻

$$e_2(t_k) = \tilde{x}(t_k) - \hat{x}(t_k) = 0,$$

$$X(t_k) =$$

$$[x(t_k) \quad \bar{x}(t_k) \quad e_1(t_k) \quad e_2(t_k)]^T = I_1 X(t_k). \tag{4}$$

在 $t = t_{k+1} - \tau$ 时刻

$$e_1(t_{k+1} - \tau) = \bar{x}(t_{k+1} - \tau) - \tilde{x}(t_{k+1} - \tau) = 0,$$

$$X(t_{k+1} - \tau) =$$

$$[x(t_{k+1} - \tau) \quad \bar{x}(t_{k+1} - \tau) \quad e_1(t_{k+1} - \tau) \quad e_2(t_{k+1} - \tau)]^T = I_2 X((t_{k+1} - \tau)). \tag{5}$$

$$e_1(t_{k+1} - \tau) + e_2(t_{k+1} - \tau) = 0.$$

其中

$$I_1 = \begin{bmatrix} I & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$I_2 = \begin{bmatrix} I & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I & I \end{bmatrix}. \quad (6)$$

定理 1 由式(1) 所描述的系统, 在初始条件 $X(t_0) = [x_0 \quad \bar{x}_0 \quad e_{10} \quad e_{20}]^T = X_0, t_0 = 0$ 时, 有系统响应:

1) 当 $t \in [t_k, t_{k+1} - \tau)$ 时, 有

$$X(t) = e^{P(t-t_k)} (I_1 e^{P\tau} I_2 e^{P(T-\tau)})^k \times [x_0 \quad \bar{x}_0 \quad e_{10} \quad e_{20}]^T; \quad (7)$$

2) 当 $t \in [t_{k+1} - \tau, t_{k+1})$ 时, 有

$$X(t) = e^{P(t-t_{k+1}+\tau)} I_2 e^{P(T-\tau)} (I_1 e^{P\tau} I_2 e^{P(T-\tau)})^k \times [x_0 \quad \bar{x}_0 \quad e_{10} \quad e_{20}]^T. \quad (8)$$

证明 1) 当 $t \in [t_k, t_{k+1} - \tau)$ 时, 由式(1) 求解, 可知

$$X(t) = e^{P(t-t_k)} X(t_k). \quad (9)$$

由式(4), (5) 和(9) 可得

$$\begin{aligned} X(t_k) &= I_1 X(t_{k-1}) = I_1 e^{P\tau} X(t_{k-1} - \tau) = \\ &I_1 e^{P\tau} I_2 X((t_{k-1} - \tau)^-) = I_1 e^{P\tau} I_2 e^{P(T-\tau)} X(t_{k-1}). \end{aligned} \quad (10)$$

其中 $t_k - t_{k-1} = T$. 由此类推得

$$\begin{aligned} X(t_k) &= (I_1 e^{P\tau} I_2 e^{P(T-\tau)})^k X_0 = \\ &(I_1 e^{P\tau} I_2 e^{P(T-\tau)})^k [x_0 \quad \bar{x}_0 \quad e_{10} \quad e_{20}]^T. \end{aligned} \quad (11)$$

所以, 综合式(9) 和(11) 得

$$\begin{aligned} X(t) &= e^{P(t-t_k)} (I_1 e^{P\tau} I_2 e^{P(T-\tau)})^k \times \\ &[x_0 \quad \bar{x}_0 \quad e_{10} \quad e_{20}]^T. \end{aligned} \quad (12)$$

2) 当 $t \in [t_{k+1} - \tau, t_{k+1})$ 时, 由式(1) 求解, 可知

$$X(t) = e^{P(t-t_{k+1}+\tau)} X(t_{k+1} - \tau). \quad (13)$$

由式(5) 可得

$$\begin{aligned} X(t_{k+1} - \tau) &= I_2 X((t_{k+1} - \tau)^-) = \\ &I_2 e^{P(t_{k+1}-\tau-t_k)} X(t_k) = I_2 e^{P(T-\tau)} X(t_k), \end{aligned} \quad (14)$$

其中 $t_{k+1} - t_k = T$. 所以综合式(11), (13) 和(14) 得

$$\begin{aligned} X(t) &= e^{P(t-t_{k+1}+\tau)} X(t_{k+1} - \tau) = \\ &e^{P(t-t_{k+1}+\tau)} I_2 e^{P(T-\tau)} X(t_k) = \\ &e^{P(t-t_{k+1}+\tau)} I_2 e^{P(T-\tau)} (I_1 e^{P\tau} I_2 e^{P(T-\tau)})^k \times \\ &[x_0 \quad \bar{x}_0 \quad e_{10} \quad e_{20}]^T. \end{aligned} \quad (15)$$

定理 1 得证

4 连续被控对象网络系统稳定性

定理 2 由模型(1) 描述的网络控制系统围绕平衡点 $X(t) = [x(t) \quad \bar{x}(t) \quad e_1(t) \quad e_2(t)]^T = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T$ 保持全局指数稳定的充要条件为

$$Q = \begin{bmatrix} I & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} e^{P\tau} \begin{bmatrix} I & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I & I \end{bmatrix} e^{P(T-\tau)} \quad (16)$$

的特征根位于单位圆内

证明 由矩阵范数定义可知, 对于任意的向量 x , 矩阵 P 的范数为 $\|P\| = \sup_{\|x\|=1} \|Px\|$. 由矩阵奇异值的定义有 $\max_x \|Px\| = \sigma_{\max}(P) = \bar{\sigma}(P)$, $\bar{\sigma}(P)$ 表示矩阵 P 的最大奇异值, 则

$$\|P\| = \bar{\sigma}(P). \quad (17)$$

因此, 有

$$\|e^{P(t-t_k)}\| = e^{P(t-t_k)} e^{\bar{\sigma}(P)T} = R, \quad t - t_k \leq T. \quad (18)$$

同理

$$\|e^{P(t-t_{k+1}+\tau)}\| = R, \quad e^{P(T-\tau)} = R. \quad (19)$$

所以, 当 $t \in [t_k, t_{k+1} - \tau)$ 时, 有

$$\|X(t)\| = \|e^{P(t-t_k)} Q^k X_0\| = R \cdot \|Q^k\| \cdot \|X_0\|; \quad (20)$$

当 $t \in [t_{k+1} - \tau, t_{k+1})$ 时, 有

$$\|X(t)\| = \|e^{P(t-t_{k+1}+\tau)} I_2 e^{P(T-\tau)} Q^k X_0\| = R^2 \cdot \|R_1\| \cdot \|Q^k\| \cdot \|X_0\|, \quad R_1 = I_2. \quad (21)$$

因此要使得 $X(t)$ 有界必须保证 Q^k 有界. 由文献[10] 的证明可知当且仅当矩阵 Q 的特征根位于单位圆内时, 有

$$\|Q^k\| = K_1 e^{-\alpha_1 k} + K_2 e^{-\alpha_2 k}, \quad \alpha_1 > 0, \alpha_2 > 0$$

此时

$$\|X(t)\| = R \cdot K_2 e^{-\alpha_2 k} \cdot \|X_0\|, \quad t \in [t_k, t_{k+1} - \tau); \quad (22)$$

$$\|X(t)\| = R^2 \cdot R_1 \cdot K_2 e^{-\alpha_2 k} \cdot \|X_0\|, \quad t \in [t_{k+1} - \tau, t_{k+1}). \quad (23)$$

根据系统全局指数稳定性定义可知, 当 X_0 有界时, $X(t)$ 有界. 即当且仅当矩阵 Q 的特征根位于单位圆内时, 网络控制系统在平衡状态 X_0 保持李亚普诺夫意义下的全局指数稳定

5 离散被控对象网络系统稳定性

针对离散被控对象的网络控制系统, 被控对象为

$$\begin{cases} x(n+1) = Ax(n) + Bu(n), \\ y(n) = Cx(n) + Du(n). \end{cases}$$

设被控对象状态误差 $e_1(n) = \bar{x}(n) - \tilde{x}(n)$, $e_2(n) = \tilde{x}(n) - x(n)$, 则定义网络系统广义被控对象为

$$X(n) = [x(n) \quad \bar{x}(n) \quad e_1(n) \quad e_2(n)]^T.$$

当 $n \in [n_k, n_{k+1})$ 时, 有



$$X(n+1) = P_D X(n), P_D = P. \quad (24)$$

定理 3 由式(24)描述的系统, 在初始条件 $X(n_0) = [x_0 \quad \bar{x}_0 \quad e_{10} \quad e_{20}]^T = X_0, n_0 = 0$ 时, 有系统响应如下:

1) 当 $n \in [n_k, n_{k+1} - \tau)$ 时, 有

$$X(n) = P_D^{(n-n_k)} (I_{D_1} P_D^T I_{D_2} P_D^{(T-\tau)k}) \times [x_0 \quad \bar{x}_0 \quad e_{10} \quad e_{20}]^T; \quad (25)$$

2) 当 $n \in [n_{k+1} - \tau, n_{k+1})$ 时, 有

$$X(n) = P_D^{(n-n_{k+1}+\tau)} I_{D_2} P_D^{(T-\tau)} (I_{D_1} P_D^T I_{D_2} P_D^{(T-\tau)k}) \times [x_0 \quad \bar{x}_0 \quad e_{10} \quad e_{20}]^T. \quad (26)$$

其中: $I_{D_1} = I_1, I_{D_2} = I_2$ 证明略

定理 4 由离散状态反馈系统围绕平衡点

$$X(n) = [x(n) \quad \bar{x}(n) \quad e_1(n) \quad e_2(n)]^T = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T \text{ 保持全局指数稳定的充要条件为}$$

$$Q_D = \begin{bmatrix} I & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} P_D^T \begin{bmatrix} I & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I & I \end{bmatrix} P_F^{(T-\tau)D} \quad (27)$$

的特征根位于单位圆内 证明略

由此可见, 网络信号传输时间间隔 T , 被控对象模型误差及网络引起的时间延迟 τ 等因素直接影响网络控制系统的稳定性 下面通过仿真示例来验证稳定性定理

6 仿真示例

设被控对象的状态方程为^[3,4,9]

$$\dot{x}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(t),$$

$$y(t) = [1 \quad 0]x(t).$$

网络控制系统采用状态反馈控制器 $u(t) = -Kx(t)$, 利用极点配置法确定控制器增益 K 值 当极点为 -1 时, 增益值 $K = [1, 2]$ 状态观测器的增益为 L , 当系统的期望极点取为 -0.1 时, $L = [0.2, 0.01]^T$. 控制器中被控对象的模型参数为

$$\hat{A} = \begin{bmatrix} 0 & 251 & 1 & 214 \\ 0 & 001 & - & 0 & 009 \end{bmatrix}, \hat{B} = \begin{bmatrix} 0 & 007 \\ 1 & 020 \end{bmatrix}, \hat{C} = [0 & 992 & 0 & 301], \hat{D} = -0 & 001.$$

图 2 体现了当网络存在不同时间延迟 τ 时, 网络信号更新时间 T 与系统稳定性判定矩阵 Q 之间的关系, 实质是反映了网络时间延迟 τ 和信号更新时间 T 对整个网络控制系统稳定性的影响 由定理 2 可知, 为保持系统稳定, 时延 τ 和更新时间 T 的选取必须使得矩阵 Q 的特征根位于单位圆内, 即其特征值的绝对值小于 1. 在图 2 中, 虚线表示当 $\tau = 0$ 时, T 的最大值约为 2.4 s; 点划线表示当 $\tau = 0.25$ s 时,

T 的最大值约为 2.25 s; 实线表示当 $\tau = 0.5$ s 时, T 的最大值约为 2.2 s 因此, 网络时间延迟 τ 越大, 信号更新时间 T 的最大值越小, 即时间延迟较大时, 要加快网络更新信号的频率, 以保持系统稳定; 相反, 网络引起的时间延迟较小时, 可适当延长网络信号更新时间, 这样既可保证系统的稳定性, 又可以减少网络的使用率, 节省带宽资源

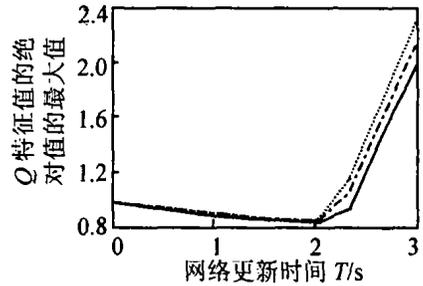
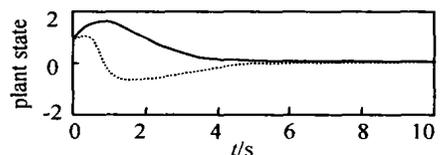
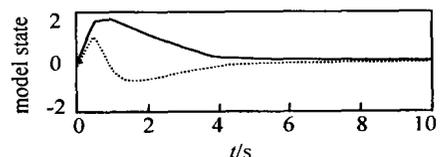


图 2 系统稳定性判定矩阵

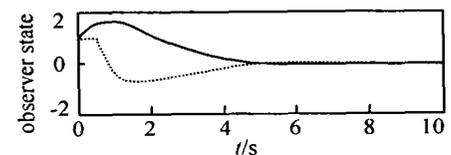
图 3 显示了在系统稳定区域内, 当网络引起的时间延迟为 $\tau = 0.25$ s, 网络信号更新时间为 $T = 0.5$ s 时, 系统被控对象状态、被控对象模型状态及状态观测器状态对初始条件 $[1, 1]^T$ 的响应 说明时延 τ 和信号更新时间 T 在定理 2 所规定的范围内时, 系统中的各部分状态均保持稳定, 此时整个网络控制系统处于稳定状态 因此, 当定理 2 的条件得到满足时, 系统保持全局指数稳定 此外, 定理 2 中的系数 P 中包含了被控对象及其模型的信息, 即包含了模型误差的影响 由图 3 中的被控对象及其模型的状态曲线可以看出, 即使网络控制系统存在模型误差, 只要满足定理 2 的要求, 整个系统依然保持稳



(a) 被控对象状态响应



(b) 被控对象模型状态响应



(c) 状态观测器状态响应

图 3 当 $T = 0.5$ s, $\tau = 0.25$ s 时系统响应

定 由此说明基于模型的网络系统控制方法具有一定程度的鲁棒性

7 结 语

本文从实际情况出发,分析了具有时间延迟的网络控制系统被控对象状态无法直接测量的情况,并提出基于观测器的时延网络控制系统模型 该系统采用状态反馈控制器,在网络信号传输时间间隔内以被控对象模型为依据,计算控制信号,以减少系统对网络的依赖 并且,分别对连续和离散的被控对象给出了系统全局稳定性的判定准则,该准则简单实用,可以综合地反映出网络信号更新时间、被控对象模型误差及由网络引起的时间延迟等因素对系统稳定性的影响,并通过仿真示例对稳定性判定准则进行了有效性验证 在此仅讨论了线性被控对象情况,对非线性被控对象网络控制系统的稳定性还有待进一步的研究

参考文献(References)

- [1] Tipsovan Y, Chow M Y. Control methodologies in networked control systems [J]. *Control Engineering Practice*, 2003, 11(10): 1099-1111.
- [2] Hu S S, Zhu Q X. Stochastic optimal control and analysis of stability of networked control systems with long delay [J]. *Automatica*, 2003, 39(11): 1877-1884.
- [3] 朱其新, 胡寿松. 网络控制系统的能控性和能观性 [J]. *控制与决策*, 2004, 19(2): 157-161.
- (Zhu Q X, Hu S S. Controllability and observability of networked control systems [J]. *Control and Decision*, 2004, 19(2): 157-161.)
- [4] Montestruque L A, Antsaklis P J. On the model-based control of networked systems [J]. *Automatica*, 2003, 39(10): 1837-1843.
- [5] Walsh G C, Ye H, Bushnell L. Stability analysis of networked control systems [J]. *Proc of American Control Conf [C]*. San Diego, 1999: 2876-2880.
- [6] Rabello A, Bhaya A. Stability of asynchronous dynamical systems with rate constraints and applications [J]. *IEE Proc Control Theory and Applications*, 2003, 150(5): 546-550.
- [7] Zhang W, Michael S Branicky, Stephen M Phillips. Stability of networked control systems [J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2001, 21(2): 84-99.
- [8] Hokayem P F, Abdallah C T. Networked control systems: A sampled-data approach [A]. *Proc of the 2003 IEEE Int Symposium on Intelligent Control [C]*. Houston, 2003: 415-419.
- [9] Montestruque L A, Antsaklis P J. State and output feedback control in model-based networked control systems [J]. *41st IEEE Conf Decision and Control [C]*. Las Vegas, 2002: 1620-1625.
- [10] Montestruque L A, Antsaklis P J. Model-based networked control systems stability [R]. American: University of Notre Dame, 2002: 1-58.
- [7] Veillette J R. Reliable linear-quadratic state feedback control [J]. *Automatica*, 1995, 31(1): 137-143.
- [8] Patton J R. Fault-tolerant control: The 1997 situation [A]. *Proc of IFAC Symposium Fault Detection, Supervision Safety for Process [C]*. Spain, 1997: 1033-1055.
- [9] Tortora G, Kouvaritakis B, Clarke D W. Simultaneous optimization of tracking performance and accommodation of sensor faults [J]. *Int J of Control*, 2002, 75(1): 163-176.
- [10] Boskovic D J, Yu H S, Mehra K R. A stable scheme for automatic control reconfiguration in the presence of actuator failures [A]. *Proc of the American Control Conf [C]*. American, 1998: 2455-2459.
- [11] Idan M, Johnson M, Calise J A, et al. Intelligent aerodynamic / propulsion flight control for flight safety: A nonlinear adaptive approach [A]. *Proc of the American Control Conf [C]*. American, 2001: 2918-2923.
- [12] Sastry S S, Isidori A. Adaptive control of linearizable systems [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1998, 34(8): 1123-1131.
- [13] Wang L X. *A course in fuzzy systems and control* [M]. NJ: Prentice-Hall, 1997.
- [14] Sktine J J E, Li W. *Applied nonlinear control* [M]. NJ: Prentice-Hall, 1991.

(上接第 411 页)