

文章编号: 1001-0920(2007)01-0021-04

具有长时延及丢包的网络控制系统稳定性分析

马卫国, 邵 诚

(大连理工大学 信息与控制研究中心, 辽宁 大连 116024)

摘 要: 研究了同时具有大于一个采样周期的随机传输时延及数据包丢失的网络控制系统的稳定性问题. 对于给定的数据包丢失率, 网络控制系统被建模为具有两个事件速率约束的异步动态系统, 利用异步动态系统理论给出了网络控制系统指数稳定的充分条件, 状态反馈控制器可通过解一组矩阵不等式求出. 仿真示例验证了所提出方法的有效性.

关键词: 网络控制系统; 长时延; 数据包丢失; 稳定性; 异步动态系统

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Stability analysis for networked control systems with long transmission delay and data packet dropout

MA Wei-guo, S HAO Cheng

(Research Center of Information and Control, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China.

Correspondent: MA Wei-guo, E-mail: ma_weiguo@sohu.com)

Abstract: The stability of networked control systems, with stochastic transmission delay larger than one sampling period and the dropped out packets, is studied. For the given data packet dropout, the networked control systems is modeled as an asynchronous dynamical system with rate constraints on two events. The sufficient condition of exponential stability for the networked control systems is presented based on the theory of asynchronous dynamical system. Meanwhile the state feedback controller can be solved by a set of matrix inequalities. A numerical example shows the effectiveness of the proposed method.

Key words: Networked control systems; Long transmission delay; Data packet dropout; Stability; Asynchronous dynamical system

1 引言

网络控制系统是指通过通讯网络形成闭环的反馈控制系统^[1]. 在网络控制系统中, 传感器、控制器和执行器等系统组件作为网络节点直接挂接在网络上, 通过共享的有线或无线通讯网络进行传感和控制信息的交换, 因此网络控制系统与传统的直接点对点连接的控制系统的相比, 具有连线少、成本低、安装维护方便和灵活性高等优点, 被广泛应用于汽车制造、机器人和飞行器控制系统等多个领域^[2,3].

虽然网络控制系统具有很多优点, 但在反馈回路中引入通讯网络后将产生一些新的问题: 由于网络节点共享同一个通讯网络, 数据通过网络传输时将会产生恒定或随机的通讯时延, 而时延会使控制

系统的性能恶化, 甚至有可能使系统变得不稳定. 网络控制系统中存在的另一个问题是数据丢包问题. 因为通讯网络是一种非可靠的传输通道, 当受到外界干扰或发生网络拥塞时, 网络上的数据在传输时不但存在传输延迟, 而且可能会出现数据包丢失的现象. 这些问题使网络控制系统的分析和设计变得很复杂.

对于网络控制系统中传输时延小于一个采样周期的情况, 文献[4]利用时间戳的方法研究了系统的随机最优控制问题; 文献[5]分析了传输时延大于一个采样周期的网络控制系统的稳定性, 设计了最优状态反馈控制器和输出反馈控制器; 文献[6]将时变网络时延看作某一恒定时延与不确定时延之和, 建

收稿日期: 2005-11-08; 修回日期: 2006-05-09.

基金项目: 国家科技攻关计划项目(2001BA204B01); 教育部骨干教师基金项目(69825106).

作者简介: 马卫国(1976—), 男, 山东栖霞人, 博士生, 从事网络控制系统的研究; 邵诚(1958—), 男, 江苏靖江人, 教授, 博士生导师, 从事复杂系统的建模与控制、自适应控制、鲁棒控制等研究.

立了具有结构不确定性的长时延网络控制系统模型,给出了基于矩阵不等式的控制器设计方法.然而,上述文献仅研究了网络传输延迟问题,没有考虑数据在传输过程中的丢包问题.对于网络控制系统中存在的丢包问题,文献[7]利用异步动态系统的方法研究了网络控制系统稳定性,给出了系统指数稳定的充分条件,但没有考虑数据的网络传输延迟的问题;文献[8]分析了同时具有传输延迟和数据包丢失的网络控制系统稳定性,但文中仅对小于一个采样周期的恒定延迟进行了讨论,没有考虑传输延迟大于一个采样周期的情况.

本文将同时具有大于一个采样周期的随机传输延迟和数据包丢失的网络控制系统建模为具有两个事件速率约束的异步动态系统,利用异步动态系统理论分析了网络控制系统的稳定性,给出了基于矩阵不等式的状态反馈控制器设计方法.

2 具有长时延及数据包丢失的网络控制系统模型

本文研究的网络控制系统如图 1 所示.系统中控制器和执行器位于同一节点上,网络只存在于传感器与控制器之间.

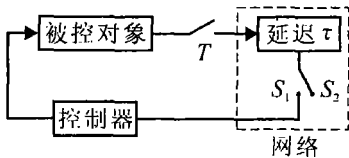


图 1 具有长时延和数据包丢失的网络控制系统

假设网络控制系统中被控对象的状态方程为

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t), \\ y(t) = Cx(t). \end{cases} \quad (1)$$

其中: $x(t) \in R^n, u(t) \in R^m, y(t) \in R^p$ 分别为被控对象的状态、控制输入和被控对象的输出; A, B, C 为具有相应维数的定常矩阵.

设传感器节点采用时间驱动方式,对被控对象进行等周期采样,采样周期为 T ,传感器将采集到的被控对象数据打成一个数据包,通过串行通讯网络传输到控制器端的接收缓冲区.控制器接收到经过网络传输的数据后立刻计算控制量.设数据在网络上的传输时延大于一个采样周期且是随机的,则时延可描述为

$$\tau_k = (d - 1)T + \tau^{\text{mid}} + \tau' \leq \bar{d}T.$$

其中: $d \leq \bar{d} = \lceil \tau^{\text{c}} / T \rceil, \lceil \Delta \rceil$ 表示大于 Δ 的最小整数, τ^{c} 为已知的最坏情况下的时延, $\tau^{\text{mid}} = T/2, -T/2 \leq \tau' \leq T/2$.

通常数据通过网络传输可分为两种情况:一是数据在传输过程中没有出现差错,成功地从源节点

到达目的节点,将这种数据传输成功的情况记为事件 S_1 ,设其发生率为 r ;另一种情况是数据在传输过程中由于受到外界干扰而出现差错或者丢失,此时发送节点将根据所采用的通讯协议采取不同的措施.例如,如果网络节点采用的是基于连接的 TCP 协议,则发送节点将重新传输丢失的数据包;如果网络节点采用的是 UDP 协议,由于 UDP 协议是基于无连接的,如果数据包丢失,发送节点不会重传丢失的数据包.将数据传输失败的情况记为事件 S_2 ,其发生率为 $1 - r$.这样就可以将网络看作一个以速率 r 闭合的开关.

当 S_1 发生时,被控对象的离散时间模型为^[6]

$$\begin{aligned} x(k+1) = & \Phi x(k) + \Gamma_0(\tau_k)u(k-d+1) + \\ & \Gamma_1(\tau_k)u(k-d). \end{aligned} \quad (2)$$

其中

$$\begin{aligned} \Phi &= e^{AT}, \\ \Gamma_0(\tau_k) &= \int_0^{T/2-\tau'} e^{As} ds B = \\ & \int_0^{T/2} e^{As} ds B + e^{A(T/2)} \int_0^{\tau'} e^{As} ds B, \\ \Gamma_1(\tau_k) &= \int_{T/2-\tau'}^T e^{As} ds B = \\ & \int_0^T e^{As} ds B + e^{A(T/2)} \int_0^{\tau'} e^{As} ds (-B). \end{aligned}$$

令

$$\begin{aligned} \Gamma_0 &= \int_0^{T/2} e^{As} ds B, \Gamma_1 = \int_0^T e^{As} ds B, \\ D &= e^{A(T/2)}, F = \int_0^{\tau'} e^{As} ds, \\ E_0 &= B, E_1 = -B, \end{aligned}$$

增广向量

$$z(k) = [x(k)^T u(k-d)^T \cdots u(k-1)^T]^T,$$

则式(2)化为

$$z(k+1) = \Phi_1 z(k) + \Gamma_1 u(k). \quad (3)$$

其中

$$\begin{aligned} \Phi_1 &= \\ & \begin{bmatrix} \Phi & \Gamma_1 + DFE_1 & \Gamma_0 + DFE_0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & I & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & I \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}, \\ \Gamma_1 &= [0 \ 0 \ \cdots \ 0 \ I]^T. \end{aligned}$$

当 S_2 发生时,由于网络传输数据失败,执行器将保持上一周期的值,即 $u(k) = u(k-1)$.此时被控对象的离散时间模型为^[6]

$$z(k+1) = \Phi_2 z(k) + \Gamma_2 u(k). \quad (4)$$

其中

$$\Phi_2 = \begin{bmatrix} \Phi & I_1 + DFE_1 & I_0 + DFE_0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & I & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & I \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & I \end{bmatrix},$$
$$I_2 = [0 \ 0 \ \cdots \ 0 \ 0]^T$$

如果网络控制系统中的控制器采用状态反馈控制律 $u(k) = Kz(k)$,则闭环网络控制系统的状态方程为

$$z(k+1) = \Phi_s z(k), s = 1, 2. \tag{5}$$

其中

$$\Phi_1 = \Phi_1 + DFE + I_1 K,$$
$$\Phi_2 = \Phi_2 + DFE + I_2 K,$$
$$\Phi_1 = \begin{bmatrix} \Phi & I_1 & I_0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & I & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & I \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix},$$
$$\Phi_2 = \begin{bmatrix} \Phi & I_1 & I_0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & I & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & I \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & I \end{bmatrix},$$
$$D = [D^T \ 0 \ \cdots \ 0 \ 0]^T,$$
$$E = [0 \ E_1 \ E_0 \ \cdots \ 0 \ 0].$$

这样,网络控制系统便转化成为一个具有两个事件速率约束的异步动态系统,可利用已有的异步动态系统理论对其进行分析研究.

3 稳定性分析

引理 1^[9] 设具有相应维数的矩阵 W, D 和 E , 其中 W 为对称阵,对于所有满足 $F^T F \leq I$ 的矩阵 F , $W + DFE + E^T F^T D^T < 0$ 成立的充要条件是存在 $\varepsilon > 0$,使得 $W + \varepsilon DD^T + \varepsilon^{-1} E^T E < 0$.

引理 2^[10] (Schur 补引理) 对于给定的对称矩阵

$$L = \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} \\ L_{12}^T & L_{22} \end{bmatrix},$$

下述条件是等价的:

- 1) $L < 0$;
- 2) $L_{11} < 0, L_{22} - L_{12}^T L_{11}^{-1} L_{12} < 0$;
- 3) $L_{22} < 0, L_{11} - L_{12} L_{22}^{-1} L_{12}^T < 0$.

引理 3^[11] 设异步动态系统 $x(k+1) = f_s(x(k))$, 其中 $s = 1, 2, \cdots, N$, 离散事件的发生率

分别为 $r_1, r_2, \cdots, r_N, 0 \leq r_s \leq 1$, 且 $\sum_{s=1}^N r_s = 1$. 如果存在 Lyapunov 函数 $V(x(k)): R^n \rightarrow R_+$ 以及对应于事件发生率的正标量 $\alpha_1, \alpha_2, \cdots, \alpha_N$, 满足下列不等式:

$$\alpha_1 \alpha_2 \cdots \alpha_N > \alpha > 1, \tag{6}$$
$$V(x(k+1)) \leq \alpha^2 V(x(k)),$$
$$s = 1, 2, \cdots, N, \tag{7}$$

则异步动态系统是指数稳定的,其衰减率为 α 具有传输延迟和数据包丢失的网络控制系统可建模为一个异步动态系统,所以根据上述引理,可得到如下结论:

定理 1 对于由式(5) 描述的闭环网络控制系统,假设数据通过网络传输的成功率为 r . 如果存在对称正定矩阵 X , 矩阵 Y 以及正的标量 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha$ 和 ε , 使得下列不等式成立:

$$\alpha \alpha^{1-r} > \alpha > 1, \tag{8}$$
$$\begin{bmatrix} -\alpha^2 X & (\Phi_1 X + I_1 Y)^T & (EX)^T \\ \Phi_1 X + I_1 Y & -X + \varepsilon DD^T & 0 \\ EX & 0 & -\mathcal{E} \end{bmatrix} < 0, \tag{9}$$

则网络控制系统是指数稳定的,其衰减率为 α , 其中状态反馈控制器增益矩阵 $K = YX^{-1}$.

证明 因为数据通过网络传输的成功率为 r , 所以事件 S_1 和 S_2 的发生率为 r 和 $1 - r$. 代入式(6) 可得式(8).

选取 Lyapunov 函数 $V(z(k)) = z^T(k) Pz(k)$, 其中 P 为对称正定矩阵.

事件 S_1 发生时,有

$$V(z(k+1)) - \alpha^2 V(z(k)) =$$
$$z^T(k+1) Pz(k+1) - \alpha^2 z^T(k) Pz(k) =$$
$$z^T(k) [(\Phi_1 + I_1 K)^T P(\Phi_1 +$$
$$I_1 K) - \alpha^2 P] z(k),$$

所以 $V(z(k+1)) \leq \alpha^2 V(z(k))$ 成立的充分条件为 $(\Phi_1 + I_1 K)^T P(\Phi_1 + I_1 K) - \alpha^2 P < 0$.

由 Schur 补引理,上式等价于

$$\begin{bmatrix} -\alpha^2 P & (\Phi_1 + I_1 K)^T \\ \Phi_1 + I_1 K & -P^{-1} \end{bmatrix} < 0.$$

将 $\Phi_1 = \Phi_1 + DFE$ 代入上式,得

$$\begin{bmatrix} -\alpha^2 P & (\Phi_1 + DFE + I_1 K)^T \\ \Phi_1 + DFE + I_1 K & -P^{-1} \end{bmatrix} < 0.$$

上述不等式两边同时乘以 $\text{diag}\{P^{-1}, I\}$, 并设 X

$= P^{-1}, Y = KX$, 得

$$\begin{bmatrix} -\alpha^2 X & (\Phi_1 X + DFE X + \Gamma_1 Y)^T \\ \Phi_1 X + DFE X + \Gamma_1 Y & -X \end{bmatrix} < 0,$$

即

$$\begin{bmatrix} -\alpha^2 X & (\Phi_1 X + \Gamma_1 Y)^T \\ \Phi_1 X + \Gamma_1 Y & -X \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ D \end{bmatrix} F [EX \ 0] + \begin{bmatrix} (EX)^T \\ 0 \end{bmatrix} F^T [0 \ D^T] < 0.$$

根据引理1,得

$$\begin{bmatrix} -\alpha^2 X & (\Phi_1 X + \Gamma_1 Y)^T \\ \Phi_1 X + \Gamma_1 Y & -X + \varepsilon D D^T \end{bmatrix} + \varepsilon^2 \begin{bmatrix} (EX)^T \\ 0 \end{bmatrix} [EX \ 0] < 0.$$

再由 Schur 补引理得式(9).

事件 s_2 发生时,按上述推导方法可以得到式(10).根据引理2,当式(8)~(10)成立时系统是指数稳定的,其衰减率为 α $\square$

定理1说明被控对象允许数据在传输过程中存在一定的丢失率.例如软实时系统,当网络发生拥塞时,系统可以主动丢弃一些非紧急数据来节约网络带宽,避免拥塞发生.

4 仿真示例

假设网络控制系统中被控对象的状态方程为

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(t), \\ y(t) = [1 \ 0] x(t). \end{cases}$$

系统的采样周期为0.3 s,网络通讯延迟在区间 $[0.3, 0.6]$ s 内均匀分布,数据通过网络传输的成功率为90%.首先对被控对象离散化,得

$$\begin{aligned} \Phi &= \begin{bmatrix} 1 & 0.3 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \Gamma_0 = \begin{bmatrix} 0.0113 \\ 0.15 \end{bmatrix}, \\ E_0 &= \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \Gamma_1 = \begin{bmatrix} 0.0338 \\ 0.15 \end{bmatrix}, \\ E_1 &= \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} 1 & 0.15 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

设控制器采用状态反馈控制,利用本文方法求解不等式(8)~(10),得

$$\alpha = 1.06, \alpha = 0.76, \alpha = 1.02, \varepsilon = 0.22,$$

$X =$

$$\begin{bmatrix} 429.02 & -84.188 & 11.56 & 11.558 \\ -84.188 & 21.343 & -4.52 & -4.4896 \\ 11.56 & -4.52 & 1.7616 & 1.5668 \\ 11.558 & -4.4896 & 1.5668 & 1.5626 \end{bmatrix},$$

$$Y = [11.54 \ -4.4105 \ 1.3936 \ 1.3908].$$

进一步,可求得 Lyapunov 函数中的对称正定矩阵

$P =$

$$\begin{bmatrix} 0.0281 & 0.1695 & 0.0207 & 0.2586 \\ 0.1695 & 1.1420 & 0.1365 & 1.8907 \\ 0.0207 & 0.1365 & 5.2619 & -5.0371 \\ 0.2586 & 1.8907 & -5.0371 & 9.2101 \end{bmatrix},$$

控制器的状态反馈增益矩阵

$K =$

$$[0.0351 \ -0.2611 \ -0.0356 \ 0.4354].$$

假设系统的初始状态为 $[-2 \ 3]^T$,在上述控制律的作用下,网络控制系统的状态运动轨迹如图2和图3所示.从图可以看出,在网络通讯延迟是随机变化且存在一定程度数据包丢失的情况下,系统仍然能够快速达到稳定状态.

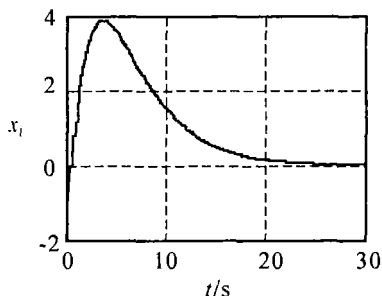


图2 状态 x_1 的运动轨迹

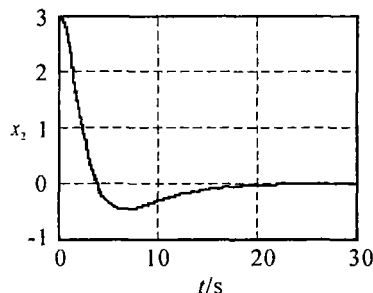


图3 状态 x_2 的运动轨迹

5 结语

由于网络控制系统中的节点通过共享的通讯网络交换信息,当网络带宽有限时,数据在传输过程中不仅具有传输延迟,而且可能产生数据包丢失.本文分析了网络传输延迟和数据包丢失对网络控制系统的性能影响,利用异步动态系统理论建立了传输延迟大于一个采样周期,同时具有数据包丢失的网络控制系统模型,给出了基于矩阵不等式的网络控制系统指数稳定的充分条件,利用该矩阵不等式可以很容易地求出系统的状态反馈控制器.仿真算例说明了该方法的有效性.

参考文献(References)

- [1] Branicky M S, Phillips S M, Zhang W. Stability of networked control systems: Explicit analysis of delay [C]. Proc American Control Conf. Chicago, 2000: 2352-2357.

(下转第29页)

$[-0.175, +0.175]$, $\alpha_{\theta} = 0.1$ 的白噪声扰动^[9]. 系统的跟踪情况如图 5 所示. 由图 5 可知, 系统能较好地跟踪设定轨迹.

5 结 论

本文从信息向量的相似性角度, 提出了 k -VNN 即时学习算法, 该算法能够提高局部建模的精度. 将该算法与数据驱动(Data-driven)的逆控制方法相结合, 在得到系统控制量的同时, 用性能指标最优策略在线修正系统控制量, 可得到当前的最优控制量. 将其作用于系统, 可实现系统跟踪控制.

为提高系统的泛化能力, 同时避免系统数据库过于庞大, 提出了数据库更新策略, 以适应系统新的工况要求. 仿真结果表明了所提出方法的有效性.

参考文献(References)

- [1] Atkeson C G, Moore A W, Schaal S. Locally weighted learning for control [J]. Artificial Intelligence Review, 1997, 11(1): 75-113.
- [2] Rhodes C, Morari M, Tsimring L S, et al. Data-based control trajectory planning for nonlinear systems [J]. Physical Review E, 1997, 56(3): 2398-2406.
- [3] Arif M, Ishihara T, Inooka H. Incorporation of experience in iterative learning controllers using locally weighted learning [J]. Automatica, 2001, 6(37): 881-888.
- [4] Bertolissi E, Birattari M, Bontempi G, et al. Data-driven techniques for direct adaptive control: The lazy and the fuzzy approaches [J]. Fuzzy Sets and Systems, 2002, 128(1): 3-14.
- [5] 孙维, 王伟, 朱瑞军. 即时学习算法在非线性系统迭代学习控制中的应用[J]. 控制与决策, 2003, 18(3): 263-266.
(Sun W, Wang W, Zhu R J. Iterative learning control for nonlinear system using lazy learning method [J]. Control and Decision, 2003, 18(3): 263-266.)
- [6] Bontempi G, Birattari M, Bersini H. Lazy learning for local modeling and control design [J]. Int J Control, 1999, 72(7/8): 643-658.
- [7] 潘天红, 李少远, 王昕. 基于即时学习的非线性系统多模型建模方法[C]. 第二十四届中国控制会议论文集. 广州: 华南理工大学出版社, 2005: 268-273.
(Pan T H, Li S Y, Wang X. A multi-model modeling approach to nonlinear systems based on lazy learning [C]. Proc of the 24th Chinese Control Conf. Guangzhou: Publishing Company of South China University of Technology, 2005: 268-273.)
- [8] 李柠, 李少远, 席裕庚. 基于 LPF 算法的多模型建模方法[J]. 控制与决策, 2002, 17(1): 11-14.
(Li N, Li S Y, Xi Y G. Multi-model modeling method based on LPF algorithm [J]. Control and Decision, 2002, 17(1): 11-14.)
- [9] Bontempi G. Local learning techniques for modeling prediction and control [D]. Bruxelles: IRIDIA-Universit ÉLibre de Bruxelles, 1999.
- [10] Cheng Cheng, Chiu Min-Sen. A new data-based methodology for nonlinear process modeling [J]. Chemical Engineering Science, 2004, 13(59): 2801-2810.
- [2] Tipsuwan Y, Chow M Y. Control methodologies in networked control systems [J]. Control Engineering Practice, 2003, 11(10): 1099-1111.
- [3] Hokayem P F, Abdallah C T. Inherent issues in networked control systems: A survey [C]. Proc American Control Conf. Boston, 2004: 4897-4902.
- [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] 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.
- [6] Li S B, Wang Z, Sun Y X. Delay-dependent controller design for networked control systems with long time delays: An iterative LMI method[C]. Proc of the 5th World Congress on Intelligent Control and Automation. Hangzhou, 2004: 1338-1342.
- [7] Zhang W, Branicky M S, Phillips S M. Stability of networked control systems[J]. IEEE Control Systems Magazine, 2001, 21(1): 84-99.
- [8] 樊卫华, 蔡骅, 吴晓蓓, 等. 具有延时和数据包丢失的网络控制系统的稳定性[J]. 南京理工大学学报, 2004, 28(5): 465-468.
(Fan W H, Cai H, Wu X B, et al. Stability of networked control systems with time delay and data packet dropout [J]. J of Nanjing University of Science and Technology, 2004, 28(5): 465-468.)
- [9] Wang Y, Xie L, De Souza C E. Robust control of a class uncertain nonlinear systems [J]. Systems and Control Letter, 1992, 19(3): 139-149.
- [10] Boyd S, Ghaoui L E, Feron E, et al. Linear matrix inequalities in system and control theory [M]. Philadelphia: SIAM, 1994.
- [11] Hassibi A, Boyd S P, How J P. Control of asynchronous dynamical systems with rate constraints on events[C]. Proc IEEE Conf Decision and Control, Phoenix, 1999: 1345-1351.

(上接第 24 页)