

文章编号: 1001-0920(2005)05-0525-04

一类多输入多输出网络控制系统的稳定性分析

邱占芝^{1,2}, 张庆灵¹

(1. 东北大学系统科学研究所, 辽宁沈阳 110004; 2. 朝阳师范高等专科学校, 辽宁朝阳 122000)

摘要: 研究了具有分布时延、有界输入的多输入多输出网络控制系统的建模和稳定性问题。基于线性时不变对象, 建立了系统的数学模型。利用李雅普诺夫第2方法和线性矩阵不等式描述, 分析了系统的渐近稳定性, 导出了与时延相关的系统渐近稳定判据, 同时得到了系统稳定运行的最大允许时延。系统渐近稳定的最大允许时延可用Matlab LM I工具箱从稳定判据获得。仿真算例表明稳定判据是可行的。

关键词: 网络控制系统; 有界输入; 时延; 建模; 稳定性; 最大允许时延

中图分类号: TP13 **文献标识码:** A

Stability analysis of a class of networked control systems with multi-input and multi-output

QIU Zhan-zhi^{1,2}, ZHANG Qing-ling¹

(1. Institute of Systems Sciences, Northeastern University, Shenyang 110004, China; 2. Chaoyang Teacher's College, Chaoyang 122000, China. Correspondent: QIU Zhao-zhi, E-mail: qiuqiuqz@sina.com)

Abstract: The issue of modeling and stability for multi-input and multi-output networked control systems with distributed time-delay and bounded input is researched. Mathematic model of the system is developed based on linear time-invariant plant. A symptotical stability of the system is analyzed using the 2nd Lyapunov method and linear matrix inequalities fomulation, and criteria of delay-dependent asymptotical stability for systems are derived. The maximum allow able delay bound of networked control systems for stability is obtained. The maximum allow able delay bounds can be calculated using the Matlab LM I toolbox from the stability criteria. Simulation examples show that the stability criterion is feasible.

Key words: networked control systems; bounded input; time-delay; modeling; stability; maximum allow able delay bound

1 引言

近年来,通过网络将分布于不同地理空间的控制器、传感器和执行器等系统部件连接起来,满足一定性能指标的网络控制系统(NCS)已得到广泛应用。传统的集中式点对点控制方式已不能满足系统分布控制、综合诊断、维护快速容易、低造价等新的需求。NCS中的传感器、执行器与控制器之间通过网络交互信息时,随着网络通信协议的不同,将产生不同类型的时延。传统的控制理论不再适用于NCS, NCS的分析和设计更具挑战性。其中,系统建模和

稳定性研究是分析NCS性能、设计控制规律的基础,已有许多研究成果^[1~8],但大多研究都针对单输入单输出系统,而且稳定性分析通常假定网络只存在于传感器与控制器之间。而在实际NCS中,时延往往是分布的、时变的,与此相关的研究尚不多见^[4,8,9]。并且,实际控制对象常常要求控制输入有界,不能超出给定的幅值,以满足控制对象安全、可靠运行的实际需求。

本文研究了具有分布时延、对象控制输入有界的多输入多输出(MMO)NCS,建立了MMO状态

收稿日期: 2004-04-08; 修回日期: 2004-10-20

基金项目: 辽宁省普通高校学科带头人基金项目(124210); 辽宁省科技基金项目(20014010411)。

作者简介: 邱占芝(1960—),女,辽宁朝阳人,副教授,博士生,从事网络控制、广义系统的研究; 张庆灵(1956—),男,辽宁营口人,教授,博士生导师,从事广义大系统的鲁棒控制、模糊控制等研究。

反馈NCS 数学模型, 并进行了系统的稳定性分析, 给出了与时延相关的系统渐近稳定判据, 同时得到了系统稳定运行的最大允许时延 最后给出了仿真算例, 说明了稳定判据的可行性

2 问题描述

由多个分布的传感器、执行器和控制器组成的具有分布时延的NCS系统结构如图1所示^[5]。图中: $x_p(t)$ 为对象状态; u_p^m, x_p^m 分别为回路 m 的执行器输入和传感器输出; u_c^m 为回路 m 的控制器输出; τ_{sc}^m, τ_{ca}^m 分别为回路 m 中传感器到控制器的时延和控制器到执行器的时延 时延有可能恒定、时变或随机, 取决于通信网络的通信协议 对于采用 CSMA/CD 协议的以太网, 时延随机且无上界; 对于采用 CAN Bus 协议的网络, 时延随机有上界; 对于采用 IEEE 802.4 协议的令牌传递网络, 时延是确定、周期、有上界的^[6,7]。

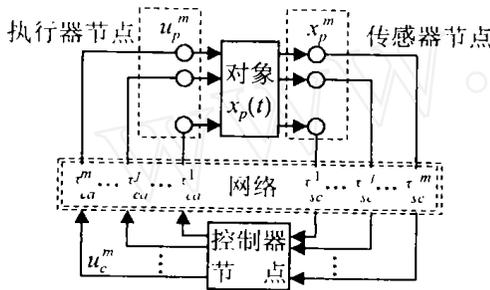


图1 具有分布式时延的多输入多输出 NCS 系统结构

假定 1 传感器时钟驱动, 以周期 T 采样 时钟同步通过软件方式实现, 即由控制器通过网络发送高优先级的时钟同步信号

假定 2 控制器和执行器事件驱动 即控制器收到全部传感器采样信号后立即进行计算, 并发送给执行器; 执行器收到控制信号后立即执行控制命令

假定 3 控制器输出幅值不超过给定的最大值, 保证对象输入幅值有上界

假定 4 数据单包传输, 无数据包丢失

假定 5 传感器、控制器和执行器处理数据的时间忽略不计 回路 j 的时延 τ_{sc}^j 和 τ_{ca}^j 可以是恒定、随机, 但有上界, 最大时延分别为 $\tau_{sc, \max}^j$ 和 $\tau_{ca, \max}^j$, 且满足 $0 \leq \tau_{sc}^j \leq \tau_{sc, \max}^j, 0 \leq \tau_{ca}^j \leq \tau_{ca, \max}^j$

在上述NCS中, 每个传感器、执行器与控制器组成单个控制回路, 具有多个控制回路的节点可看作各单个回路的节点之和^[8] 每个回路看成一个子系统, 整个系统的分析可转变为单个子系统的分析

3 NCS 的数学模型

回路 j 的线性对象状态方程表示为

$$\dot{x}_p^j(t) = A_p^j x_p^j(t) + B_p^j u_p^j(t) \quad (1)$$

其中: $u_p^j(t) \in R^{N_A^j}, x_p^j(t) \in R^{N_P^j}$ 分别为对象的输入和状态; N_A^j, N_P^j 分别为回路 j 中执行器、传感器维数; A_p^j, B_p^j 为回路 j 中具有相应维数的常量矩阵

回路 j 的控制器输出 $u_c^j(\bullet)$ 具有如下约束:

$$u_c^j(t) = \text{sat}(K^j x_p^j(t - \tau_{sc}^j)), \quad (2)$$

$$\text{sat}(K^j x_p^j(t - \tau_{sc}^j)) = \begin{cases} u_{\max}^j, & K^j x_p^j(t - \tau_{sc}^j) > u_{\max}^j(\bullet); \\ K^j x_p^j(t - \tau_{sc}^j), & |K^j x_p^j(t - \tau_{sc}^j)| \leq u_{\max}^j(\bullet); \\ -u_{\max}^j, & K^j x_p^j(t - \tau_{sc}^j) < -u_{\max}^j(\bullet). \end{cases} \quad (3)$$

其中: $u_c^j(t) \in R^{N_A^j}, K^j$ 为保证回路 j 稳定的控制器增益, 是具有相应维数的常量矩阵

定义实函数 $g^j(x(\bullet))$ 为

$$g^j(x(\bullet)) = \begin{cases} 1, & |K^j x_p^j(t - \tau_{sc}^j)| \leq u_{\max}^j K^j x_p^j(t - \tau_{sc}^j); \\ \frac{u_{\max}^j}{|K^j x_p^j(t - \tau_{sc}^j)|}, & |K^j x_p^j(t - \tau_{sc}^j)| > u_{\max}^j \end{cases} \quad (4)$$

显然, $g^j(x_p^j(\bullet)) \in (0, 1]$ 是时变的, 简记为 g^j , 则回路 j 的状态反馈控制器方程可写为

$$u_c^j(t) = g^j K^j x_p^j(t - \tau_{sc}^j); \quad (5)$$

回路 j 的控制器到执行器网络时延方程为

$$u_p^j(t) = u_c^j(t - \tau_{ca}^j). \quad (6)$$

结合式(5)、(6)和(1), 并令整个回路时延为 τ^j , 则回路 j 的闭环子系统方程为

$$\dot{x}_p^j(t) = A_p^j x_p^j(t) + g^j B_p^j K^j x_p^j(t - \tau^j). \quad (7)$$

其中: $\tau^j = \tau_{sc}^j + \tau_{ca}^j, 0 \leq \tau^j \leq \tau_{sc, \max}^j + \tau_{ca, \max}^j = \bar{\tau}^j$, 即 $\tau^j \in [0, \bar{\tau}^j]$, 实数 $g^j \in (0, 1]$

具有 m 个子系统的M/MO网络控制系统的数学模型为

$$\dot{\bar{x}}(t) = \Phi \bar{x}(t) + \Psi \bar{x}(t - \tau), \quad j = 1, 2, \dots, m. \quad (8)$$

其中

$$\bar{x}(t) = [(x_p^1(t))^T \dots (x_p^m(t))^T]^T, \quad \Phi = \begin{bmatrix} A_p^1 & & \\ & \ddots & \\ & & A_p^m \end{bmatrix}, \quad \Psi = \begin{bmatrix} g^1 B_p^1 K^1 & & \\ & \ddots & \\ & & g^m B_p^m K^m \end{bmatrix}.$$

对于系统(8), 若各子系统稳定, 则整个M/MO系统稳定 这样, 整个系统的稳定分析可转变为子系统的稳定分析 采用该方法, 可使由式(8)表示的M/MO网络控制系统的稳定性分析大大简化

4 NCS 的稳定性分析

为分析方便, 单个子系统方程表示如下:

$$\begin{aligned} \dot{x}_p(t) &= A_p x_p(t) + g B_p K x_p(t - \tau), \\ x_p(t) &= \Phi(t), t \in [-\bar{\tau}, 0] \end{aligned} \quad (9)$$

其中: $x_p(t) \in R^n$ 为状态; A_p, K 和 B_p 为具有相应维数的常数矩阵; τ 为子系统整个回路的时延, $0 < \tau \leq \tau_{\max} = \bar{\tau}$; $\bar{\tau}$ 为子系统整个回路最大时延; g 为满足 $0 < g < 1$ 的时变实数; $\Phi(\cdot)$ 为初始条件

定义 1 对于 NCS 子系统(9), 如果存在一个具有连续一阶导数的泛函 $V(x_p(t))$, 满足如下条件:

- 1) $V(x_p(t))$ 为正定;
 - 2) $V(x_p(t))$ 沿式(9)的导数为负半定;
 - 3) 当 $x_p(t) \rightarrow 0$ 时, 有 $V(x_p(t)) \rightarrow 0$.
- 则, NCS 子系统(9) 对于初始条件是渐近稳定的

引理 1^[10] 对任意适当维数向量 a, b 和矩阵 N, X, Y, Z , 其中 X 和 Z 是对称的, 若 $\begin{bmatrix} X & Y \\ Y^T & Z \end{bmatrix} > 0$, 则

$$-2a^T N b \leq \inf_{x, Y, Z} \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} X & Y - N \\ Y^T - N^T & Z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix}. \quad (10)$$

引理 2^[10] (Schur 补性质) 对称阵

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{12}^T & S_{22} \end{bmatrix},$$

其中 S_{11}, S_{12}, S_{22} 为块阵, S_{11} 为方阵, 以下 3 个条件等价:

- 1) $S < 0$;
- 2) $S_{22} < 0, S_{11} - S_{12} S_{22}^{-1} S_{12}^T < 0$;
- 3) $S_{11} < 0, S_{22} - S_{12}^T S_{11}^{-1} S_{12} < 0$

定理 1 (渐近稳定判据) 如果存在正定矩阵 P , 对称矩阵 Q, X, Z 及矩阵 Y , 实数 $g \in (0, 1]$, 满足

$$\begin{bmatrix} X & Y \\ Y^T & Z \end{bmatrix} > 0, \quad \begin{bmatrix} M & gPB_pK - Y & \bar{\alpha}^T Z \\ (gPB_pK - Y)^T & -Q & \bar{\tau}gK^T B_p^T Z \\ \bar{\tau}ZA_p & g\bar{\tau}ZB_pK & -\bar{\tau}Z \end{bmatrix} > 0, \quad (11)$$

其中 $M = PA_p + A_p^T P + Y + Y^T + \bar{\alpha} + Q$, 则对于任意时延 $\tau \in [0, \bar{\tau}]$, 子系统(9) 渐近稳定

证明 选择满足式(11)的矩阵 P, Q 和 Z , 定义 Lyapunov-Krasovskii 泛函

$$V(x_p(t)) = V_1 + V_2 + V_3, \quad (12)$$

对于系统(9)的初始条件是正定的, 其中

$$V_1 = x_p^T(t) P x_p(t), \quad (13)$$

$$V_2 = \int_{-\tau}^t \int_{\beta}^t x_p^T(\alpha) Z x_p(\alpha) d\alpha d\beta, \quad (14)$$

$$V_3 = \int_{-\tau}^t x_p^T(\alpha) Q x_p(\alpha) d\alpha \quad (15)$$

由于 $x_p(t - \tau) = x_p(t) - \int_{t-\tau}^t \dot{x}_p(\alpha) d\alpha$, 方程(9)又可

写为

$$\begin{aligned} \dot{x}_p(t) &= (A_p + gB_pK)x_p(t) - gB_pK \int_{t-\tau}^t x_p(\alpha) d\alpha \end{aligned} \quad (16)$$

V_1 沿式(16)的导数为

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= 2x_p^T(t)P(A_p + gB_pK)x_p(t) - \\ &\int_{t-\tau}^t 2gx_p^T(t)PB_pKx_p(\alpha) d\alpha \end{aligned} \quad (17)$$

令 $a = x_p(t), b = x_p(\alpha), N = gPB_pK$, 代入引理 1, 得

$$\begin{aligned} &-2x_p^T(t)gPB_pKx_p(\alpha) \\ &\begin{bmatrix} x_p(t) \\ x_p(\alpha) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} X & Y - gPB_pK \\ (Y - gPB_pK)^T & Z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_p(t) \\ x_p(\alpha) \end{bmatrix} \end{aligned} \times$$

将上式代入式(17), 经整理, 有

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= x_p^T(t)(PA_p + A_p^T P + \bar{\alpha} + Y + Y^T)x_p(t) + \\ &\int_{t-\tau}^t x_p^T(\alpha)Zx_p(\alpha) d\alpha - 2x_p^T(t)(Y - gPB_pK)x(t - \tau), \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= \bar{\alpha} x_p^T(t)Zx_p(t) - \int_{t-\tau}^t x_p^T(\alpha)Zx_p(\alpha) d\alpha, \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \dot{V}_3 &= x_p^T(t)Qx_p(t) - x_p^T(t - \tau)Qx_p(t - \tau), \end{aligned} \quad (20)$$

则 $V(x_p(t))$ 的导数为

$$\begin{aligned} \dot{V}(x_p(t)) &= \dot{V}_1 + \dot{V}_2 + \dot{V}_3 \\ &= x_p^T(t)(PA_p + A_p^T P + \bar{\alpha} + Y + Y^T + Q)x_p(t) - 2x_p^T(t)(Y - gPB_pK)x_p(t - \tau) + \\ &\bar{\alpha} x_p^T(t)Zx_p(t) - x_p^T(t - \tau)Qx_p(t - \tau). \end{aligned} \quad (21)$$

令 $\hat{x} = [x_p^T(t) \quad x_p^T(t - \tau)]^T$, 记 $M = PA_p + A_p^T P + \bar{\alpha} + Y + Y^T + Q$, 同时考虑式(9), 进一步得

$$\begin{aligned} \dot{V}(x_p(t)) &= \hat{x}^T \begin{bmatrix} M + \bar{\alpha}^T Z A_p & \bar{\tau}gA_p^T Z B_p K - (Y - gPB_pK) \\ \bar{\tau}gA_p^T Z B_p K - (Y - gPB_pK)^T & \bar{\tau}g^2 K^T B_p^T Z B_p K - Q \end{bmatrix} \hat{x}. \end{aligned} \quad (22)$$

由于 $0 < g < 1$, 根据定义 1, 当 $V(x_p(t)) > 0$, 子系统(9) 渐近稳定, 此时式(22)中时延 τ 是系统渐近稳定的最大允许时延 $\bar{\tau}$, 即对于任意时延 $\tau \in [0, \bar{\tau}]$, 子系统(9) 渐近稳定, 须满足

$$\begin{bmatrix} M & gPB_pK - Y \\ (gPB_pK - Y)^T & -Q \end{bmatrix} >$$

$$\begin{bmatrix} \bar{\tau}A_p^T Z A_p & \bar{\tau}gA_p^T Z B_p K \\ (\bar{\tau}gA_p^T Z B_p K)^T & \bar{\tau}g^2 K^T B_p^T Z B_p K \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M & gPB_p K - Y \\ (gPB_p K - Y)^T & -Q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \bar{\tau}A_p^T Z \\ \bar{\tau}gK^T B_p^T Z \end{bmatrix} (-\bar{\tau}^{-1}Z^{-1}) \times \begin{bmatrix} \bar{\tau}Z A_p & \bar{\tau}gZ B_p K \end{bmatrix} \leq 0 \quad (23)$$

由引理 2 的条件 2) 可知, 式(23) 等价于(11).

根据定理 1, 使用 Matlab 的 LMI 工具箱可以计算出各个子系统的最大允许时延 $\bar{\tau}$, 整个 M MO 系统渐近稳定的最大允许时延选取 $\min\{\bar{\tau}, j = 1, 2, \dots, m\}$, 可保证 M MO 系统可靠稳定运行.

5 仿真算例

考虑如下两个子系统, 控制对象分别为

$$\dot{x}_1(t) = A_1 x_1(t) + B_1 u_1(t), \quad (24)$$

$$\dot{x}_2(t) = A_2 x_2(t) + B_2 u_2(t). \quad (25)$$

其中

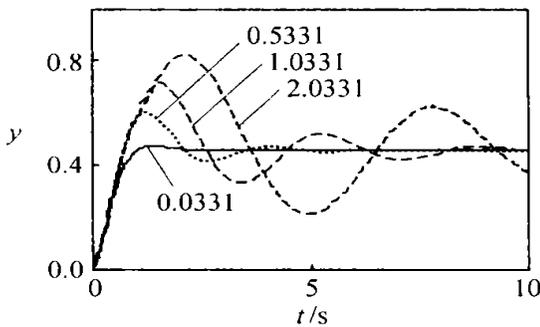
$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & -2 \end{bmatrix}, B_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix},$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix}, B_2 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

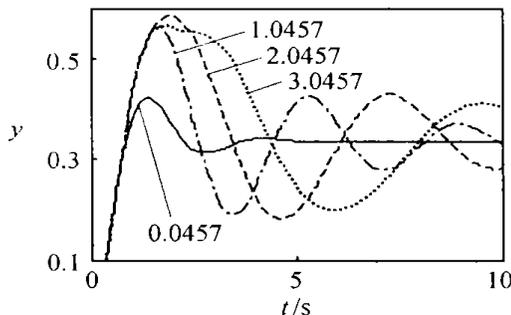
经状态反馈后, 两个子系统控制输入分别为

$$u_1(t) = g_1 K_1 x_1(t - \tau_1),$$

$$u_2(t) = g_2 K_2 x_2(t - \tau_2).$$



(a) 子系统 1



(b) 子系统 2

图 2 仿真曲线

为仿真方便, 两个子系统 g 均取值 1, 即两个控制器输出不超过最大幅值. 经 Matlab 仿真, 此时保证系统渐近稳定的控制器增益分别为

$$K_1 = [-5 \quad -3],$$

$$K_2 = [-2 \quad -3 \quad -3]$$

调用 Matlab LMI 工具箱中的可行性问题求解器 feasp, 由定理 1 得到的 $\bar{\tau}_1$ 和 $\bar{\tau}_2$ 值分别为 0.0331 s, 0.0457 s. 即当子系统(24) 和(25) 分别满足 $\tau_1 \leq 0.0331$ s, $\tau_2 \leq 0.0457$ s 时渐近稳定. 因此, 当 NCS 的任意时延小于等于 0.0331 s 时, 可保证 M MO 系统渐近稳定. 两个子系统的仿真曲线如图 2 所示. 可以看出, 两个子系统时延分别为 $\tau_1 = 0.0331$ s, $\tau_2 = 0.0457$ s 时, 系统具有接近理想的性能. 时延的增加, 加大了系统的超调量和调节时间, 降低了系统的平稳性.

注 1 图 2 中为表现时延效果, 采用了不同坐标范围.

6 结 语

本文针对网络控制系统中普遍存在分布时延, 对象控制输入有界的实际情况, 建立了状态反馈系统的数学模型, 并用李雅普诺夫第 2 方法和线性矩阵不等式描述, 推导出了与时延相关的系统渐近稳定判据. 利用该判据可判定一类具有分布时延, 控制输入有界的多输入多输出网络控制系统稳定运行所允许的最大时延值. 该最大允许时延值可使用 Matlab 的 LMI 工具箱从稳定判据中获得, 也可作为选择每个传感器采样周期的参考依据. 仿真算例说明, 稳定判据是可行的.

参考文献 (References)

[1] Zhang W, Branicky M S, Phillips S M. Stability of networked control systems [J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2001, 21(1): 84-99.

[2] Luis A Montestruque, Panos J Antsaklis. On the model-based control of networked systems [J]. *Automatica*, 2003, 39: 1837-1843.

[3] 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 L B, Fang H J, Wang H. Information scheduling and asymptotical stability of networked control systems [J]. *Control and Decision*, 2004, 19(5): 589-591.)

[4] Lian F L, Moyne J, Tilbury D. Modeling and optimal controller design of networked control systems with multiple delays [J]. *Int J of Control, Taylor & Francis*, 2003, 76(6): 591-606.

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

(下转第 544 页)

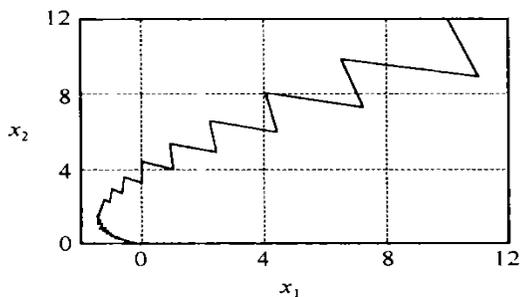


图3 系统的状态轨迹

然两个子系统均不稳定,但系统 $\dot{x} = (A_1 + 4A_2)x$ 渐近稳定.依据上述定理,存在周期切换序列使切换系统渐近稳定.采取本文提出的自适应方法反馈镇定,取等时切换的时间间隔 $\tau = 0.1, l = 2, k = 1$,初始状态 $(10, 12)$.仿真结果如图2和图3所示,从图2和图3可看出,切换系统渐近稳定,而且两个子系统作周期切换.

5 结 语

本文研究了线性切换系统经周期切换渐近稳定问题,给出了线性切换系统经周期切换渐近稳定的充要条件,以及周期切换的具体实现方法,并指出一个系统可经切换二次稳定的充要条件是该系统可经周期切换渐近稳定.采用本文方法设计的切换信号简单,可用于实际工程,所得结论还可直接用于各类控制器的设计,具有理论与应用价值.

参考文献(References)

- [1] Liberzon D, Morse A S. Basic problems in stability and design of switched systems[J]. *IEEE Control System Magazine*, 1999, 19(5): 59-70
- [2] Ezzine J, Haddad A H. Controllability and observability of hybrid systems [J]. *Int J Control*,

1989, 49(6): 2045-2055

- [3] Pettersson S, Lennartson B. LM I for stability and robustness of hybrid systems [A]. *Proc American Control Conf [C]*. Albuquerque, 1997: 1714-1718
- [4] Pettersson S, Lennartson B. Exponential stability analysis of nonlinear systems using LM Is [A]. *Proc 36th IEEE Conf Decision and Control [C]*. San Diego, 1997: 199-204
- [5] Pettersson S, Lennartson B. Exponential stability of hybrid systems using piecewise quadratic Lyapunov functions resulting in an LM I problem [A]. *Proc 14th IFA C World Congress [C]*. Beijing, 1999: 103-108
- [6] 刘玉忠,张霄力,赵军.一类线性开关系统的渐近稳定性[J]. *控制与决策*, 2002, 17(1): 111-113
(Liu Y Z, Zhang X L, Zhao J. A asymptotic stability of a class of linear switched systems [J]. *Control and Decision*, 2002, 17(1): 111-113)
- [7] 谢广明,郑大钟.线性切换系统基于范数的系统镇定条件及算法[J]. *自动化学报*, 2001, 27(1): 115-119
(Xie G M, Zheng D Z. System stabilizable condition and stabilization algorithm of linear switching systems based on vector norm theory [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2001, 27(1): 115-119)
- [8] Li Z G, Soh Y C, Wen C Y. Stability of uncertain quasi-periodic hybrid dynamic systems [J]. *Int J Control*, 2000, 73(1): 63-73
- [9] 罗家洪. *矩阵分析引论* [M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2002: 130-131.
- [10] Decarlo R A, Branicky M S, Pettersson S, et al. Perspectives and results on the stability and stabilizability of hybrid systems [J]. *Proc of the IEEE*, 2000, 88(7): 1069-1082

(上接第528页)

- [6] Beldiman O V. Networked control systems [D]. Ann Arbor: Duke University, 2001.
- [7] Lian F L. Analysis, design, modeling, and control of networked control systems [D]. Ann Arbor: Michigan University, 2001.
- [8] Kim D-S, Lee Y S, Kwon W H, et al. Maximum allowable delay bounds of networked control systems [J]. *Control Engineering Practice*, 2003, 11: 1301-1313

- [9] 张桂香,金耀,叶振凯.具有有界控制输入的状态反馈控制系统闭环稳定性[J]. *计算技术与自动化*, 2002, 21(2): 16-19
(Zhang G X, Jin Y, Ye Z K. Closed-loop stability of state feedback control systems with bounded control input [J]. *Computing Technology and Automation*, 2002, 21(2): 16-19)
- [10] 俞立. *鲁棒控制—线性矩阵不等式处理方法* [M]. 北京: 清华大学出版社, 2002: 8-164