

基于 Volterra 级数的离散 MIMO 非线性闭环系统的稳定性*

方洋旺 焦李成

(西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室·西安, 710071)

党映农 韩崇昭

(西安交通大学电子与信息工程学院·西安, 710049)

摘要: 基于非线性传递函数矩阵的 Volterra 级数表示, 利用多维 Z 变换, 讨论了一类 MIMO 离散非线性系统的闭环稳定性, 给出了直接利用开环稳定性来判别系统闭环稳定性的新方法, 并用实例仿真来验证其有效性。

关键词: 非线性传递函数矩阵; MIMO 离散非线性控制系统; FDBIBO 稳定性

文献标识码: A

Stability of Discrete MIMO Nonlinear Closed-Loop System Based on Volterra Series

FANG Yangwang and JIAO Licheng

(Key Lab for Radar Signal Processing, Xi'an University · Xi'an, 710071, P.R. China)

DANG Yingnong and HAN Chongzhao

(School of Electronic & Information Engineering, Xi'an Jiaotong University · Xi'an, 710049, P.R. China)

Abstract: Based on the Volterra series representation of nonlinear transfer function matrix, the stability of closed-loop control systems for a class of MIMO discrete nonlinear control systems is discussed, and the new method for judging FDBIBO (BI-BO stability in frequency domain) stability for the closed-loop control system by using its open-loop subsystem stability is proposed in this paper, and its validity is demonstrated by a simulation example.

Key words: nonlinear transfer function matrix; MIMO discrete nonlinear control system; FDBIBO stability

1 引言 (Introduction)

基于 Volterra 级数的非线性传递函数或广义频率响应函数为非线性系统研究提供了一个新的研究方法。非线性频域分析不仅是经典的线性频域分析方法的推广, 而且它易于计算与实验验证。目前, 在非线性频域分析^[1,2]、非线性辨识^[3]、信号处理(自适应滤波^[4]、盲均衡^[5])等方面都取得了重要进展。文[6,7]中讨论了基于广义频率响应函数的非线性系统开环系统稳定性, 但这些都是对连续非线性系统进行研究的, 而在文[8]中指出离散化对非线性控制系统的动力学行为产生很大的影响, 一个稳定的连续非线性系统, 通过离散化后可能变得不稳定, 甚至产生混沌现象。文[9]讨论了 SISO 离散非线性系统闭环稳定性, 而对于非线性系统而言, 讨论 MIMO 离散非线性系统闭环稳定性远比 SISO 情形复杂得多。

本文基于 Volterra 级数的非线性传递函数矩阵表示, 利用多维 Z 变换, 讨论了一类 MIMO 离散非线性系统闭环稳定性, 给出了直接利用开环稳定性来判别系统闭环稳定性的判据, 避免了文[7]中非常复杂的范数级数的计算。最后用实例仿真来验证其有效性。

2 问题描述 (Problems description)

本文考虑多项式类非线性系统:

$$\begin{aligned} & \sum_{n=1}^N \left| \sum_{p_1=0}^M \cdots \sum_{p_n=0}^M [a_{n,p_1,\dots,p_n} \prod_{i=1}^n D^{p_i} y(k) + \right. \\ & \left. c_{n,p_1,\dots,p_n} \prod_{i=1}^n D^{p_i} u(k)] \right| + \\ & \sum_{n=1}^{N-1} \sum_{q=1}^{N-n} \left[\sum_{p_1=0}^M \cdots \sum_{p_{n+q}=0}^M b_{n,q,p_1,\dots,p_{n+q}} \times \right. \\ & \left. \prod_{i=1}^n \prod_{k=n+1}^N D^{p_i} y(k) D^{q_i} u(k) \right] = 0. \end{aligned} \quad (1)$$

* 基金项目: 国家自然科学基金(69674009)资助项目。

收稿日期: 1999-09-21; 收修改稿日期: 2000-06-02。

式中差分算子 $D: y(k) \rightarrow y(k-1)$, M 为最大的差分阶数, N 是最高次方, a, b, c 是系统参数矩阵, $u(k) \in \mathbb{R}^r$ 和 $y(k) \in \mathbb{R}^m$ 分别是系统的输入和输出信号, 它们是实向量序列, 且在 $k < 0$ 时取零.

假设上述非线性系统具有 Volterra 级数表示, 即

$$y(k) = \sum_{n=1}^{\infty} y_n(k),$$

$$y_n(k) = \sum_{i_1=0}^{\infty} \cdots \sum_{i_n=0}^{\infty} h_n(i_1, \dots, i_n) (u(k-i_1) \otimes \cdots \otimes u(k-i_n)),$$

$$k = 1, 2, \dots,$$

其中, “ $\otimes$ ” 表示矩阵的张量积, $h_n(i_1, i_2, \dots, i_n) \in \mathbb{R}^{m \times r^n}$ 是 n 阶 Volterra 核, 它是对称的, 且具有因果性.

利用多维 Z 变换, 则

$$\hat{y}(z) = \sum_{n=1}^{\infty} \hat{y}_n(z),$$

$$\hat{y}_n(z) = (2\pi j)^{-(n-1)} \oint \cdots \oint \frac{\hat{H}_n(z_1, z_2/z_1, \dots, z/z_{n-1})}{z_1 \cdots z_{n-1}} \times$$

$$\hat{u}(z_1) \otimes \hat{u}(z_2/z_1) \otimes \cdots \otimes \hat{u}(z/z_{n-1}) dz_1 \cdots dz_{n-1},$$

其中 $\hat{y}, \hat{y}_n$ 与 $\hat{u}$ 分别为 y, y_n 和 u 的变换, $\hat{H}_n(z_1, \dots, z_n) = \sum_{i_1=0}^{\infty} \cdots \sum_{i_n=0}^{\infty} h_n(i_1, \dots, i_n) z_1^{i_1} \cdots z_n^{i_n}$ 是 h_n 的多维 Z 变换, 称为 n 阶非线性传递函数.

几个记号: $l_r^2 := \{ \{x_n\} : x_n \in \mathbb{R}^r \text{ 是实向量序列, 且 } \sum_{n=0}^{\infty} \|x_n\|_2^2 < +\infty \}$, $H_m^2(D) := \{f: f: D \rightarrow \mathbb{C}^m \text{ 在单位圆盘上解析, 且 } \|f\|_2 := ((2\pi)^{-1} \int_0^{2\pi} \|f(e^{j\theta})\|_2^2 dt)^{1/2} < +\infty\}$.

注: 以下非线性系统如不作特别说明, 都假设是 MIMO 多项式类离散非线性系统.

3 主要结果(Main results)

定义 1 非线性系统(1)称为频域 l^2 稳定的, 若对于输入 $u \in l_r^2$, 且存在正常数 L , 使 $\|u\|_1 < L$, 有 $y \in l_m^2$.

命题 1 如果 $u \in l_r^2 \cap l_r^1$, 则 $\hat{u} \in H_r^2(D)$.

证 此证明类似于文献[9]中的命题 1.

引理 1 假设 $\|\hat{H}_n\|_{\infty} < +\infty$, i.e. $\sup_{i_1, \dots, i_n \in \mathbb{N}} \|\hat{H}_n(e^{j_{i_1}}, \dots, e^{j_{i_n}})\|_2 < +\infty$, 且 $\hat{u} \in H_r^2(D)$, 则 $\|\hat{y}_n\|_2 \leq \|\hat{H}_n\|_{\infty} \|\hat{u}\|_2^n$.

证 利用多维 Z 变换, 得

$$\hat{u}(z) = Z[u(k)] = \sum_{k=0}^{\infty} u(k) z^k,$$

$$\hat{H}_n(z_1, \dots, z_n) := Z[h_n(i_1, \dots, i_n)] =$$

$$\sum_{i_1, \dots, i_n=0}^{\infty} h_n(i_1, \dots, i_n) z_1^{i_1} \cdots z_n^{i_n},$$

记

$$F_n(z_1, \dots, z_n) :=$$

$$\hat{H}_n(z_1, \dots, z_n) (\hat{u}(z_1) \otimes \cdots \otimes \hat{u}(z_n)) =$$

$$\sum_{i_1, \dots, i_n=0}^{\infty} h_n(i_1, \dots, i_n) z_1^{i_1} \cdots z_n^{i_n} \times$$

$$((\sum_{k_1=0}^{\infty} u(k_1) z_1^{k_1}) \otimes \cdots \otimes (\sum_{k_n=0}^{\infty} u(k_n) z_n^{k_n})) =$$

$$\sum_{i_1, \dots, i_n=0}^{\infty} f_n(i_1, \dots, i_n) z_1^{i_1} \cdots z_n^{i_n},$$

这里

$$f_n(i_1, \dots, i_n) =$$

$$\sum_{l_1=0}^{i_1} \cdots \sum_{l_n=0}^{i_n} h_n(l_1, \dots, l_n) (u(i_1-l_1) \otimes \cdots \otimes u(i_n-l_n)).$$

则

$$\hat{y}(z) = (2\pi j)^{-1} \oint \cdots \oint \frac{\hat{H}_n(z_1, z_2/z_1, \dots, z/z_{n-1})}{z_1 \cdots z_n} \times$$

$$(\hat{u}(z_1) \otimes \cdots \otimes \hat{u}(z/z_{n-1})) dz_1 \cdots dz_{n-1} =$$

$$(2\pi j)^{-(n-1)} \oint \cdots \oint \frac{F(z_1, \dots, z/z_{n-1})}{z_1 \cdots z_n} dz_1 \cdots dz_{n-1} =$$

$$\sum_{i_1, \dots, i_n=0}^{\infty} f_n(i_1, \dots, i_n) z^{i_n} [(2\pi j)^{-1} \oint z_1^{-i_1-1} dz_1] \times \cdots \times$$

$$[(2\pi j)^{-1} \oint z_{n-1}^{-i_{n-1}-1} dz_{n-1}] = \sum_{i=0}^{\infty} f_n(i, \dots, i) z^i.$$

因此

$$\|\hat{y}_n\|_2^2 = (2\pi)^{-1} \int_0^{2\pi} \|\hat{y}_n(e^{j\theta})\|_2^2 dt =$$

$$\sum_{i=0}^{\infty} \sum_{l=0}^{\infty} f_n(i, \dots, i) f_n(l, \dots, l) \int_0^{2\pi} e^{j(k-l)t} dt =$$

$$\sum_{i=0}^{\infty} \|f_n(i, \dots, i)\|_2^2 \leq$$

$$\sum_{i_1, \dots, i_n=0}^{\infty} \|f_n(i_1, \dots, i_n)\|_2^2 = \|F_n\|_2^2.$$

而

$$\|F_n\|_2^2 =$$

$$(2\pi)^{-n} \int_0^{2\pi} \cdots \int_0^{2\pi} \|F(e^{j_{i_1}}, \dots, e^{j_{i_n}})\|_2^2 dt_1 \cdots dt_n \leq$$

$$\|\hat{H}_n\|_{\infty}^2 ((2\pi)^{-1} \int_0^{2\pi} \|\hat{u}(e^{j_{i_1}})\|_2^2 dt_1) \cdots$$

$$((2\pi)^{-1} \int_0^{2\pi} \|\hat{u}(e^{j\omega})\|_2^2 d\omega) = \|\hat{H}_n\|_\infty^2 \|u\|_2^2.$$

故 $\|\hat{y}\|_2 \leq \|\hat{H}_n\|_\infty \|u\|_2$.

定理 1 假设非线性控制系统(1)具有 Volterra 级数表示,若其线性控制系统是渐近稳定的,即 1 阶子系统的传递函数的极点的模大于 1,且幂级数 $\sum_{n=1}^{\infty} \|\hat{H}_n\|_\infty \|x^n\|$ 的收敛半径 $r > 0$,则非线性系统是频域 l^2 稳定的.

证 由于 1 阶子系统的传递函数矩阵的极点的模大于 1,由 $\hat{H}_n(z_1, \dots, z_n)$ 的递推算法知, $\|\hat{H}_n\|_\infty < \infty, n = 1, 2, \dots$. 且 $\|\hat{y}\|_2 = \|\hat{y}\|_2 \leq \sum_{n=1}^{\infty} \|\hat{H}_n\|_\infty \|u\|_2^n$, 由命题 1 知,当 $u \in l^2$, 且存在 $L > 0$, 使 $\|u\|_1 < L$ 时,有 $\hat{u} \in H^2(D)$. 即存在 $r > 0$, 使 $\|\hat{u}\|_2 < r$, 从而 $\sum_{n=1}^{\infty} \|\hat{H}_n\|_\infty \|u\|_2^n < +\infty$. 故 $\|\hat{y}\|_2 < +\infty$, 即非线性系统(1)是频域 l^2 稳定的.

以下为了讨论闭环非线性系统频域 l^2 稳定性的方便,我们对定义稍作修改:

定义 2 MIMO 离散非线性系统(1)称为 FDBI-BO(频域 BIBO)稳定的,若满足:

- 1) 它的线性控制子系统是渐近稳定的.
- 2) 幂级数 $\sum_{n=1}^{\infty} \|\hat{H}_n\|_\infty x^n (x \neq 0)$ 是收敛的.

引理 2 如果非线性系统 H, P 的非线性传递函数矩阵分别为 $\{\hat{H}_n\}, \{\hat{P}_n\}$, 则级联系统 $G = H \circ P$ 的非线性传递函数矩阵 $\{\hat{G}_n\}$ 为:

$$\hat{G}_1(z) = \hat{H}_1(z)\hat{P}_1(z), \dots,$$

$$\hat{G}_n(z_1, \dots, z_n) =$$

$$\sum_{m=1}^n \sum_{k_1+\dots+k_m=n} \hat{H}_n(z_1 \dots z_{k_1}, \dots, z_{n-k_m-1} \dots z_n) \times$$

$$(\hat{P}_{k_1}(z_1, \dots, z_{k_1}) \otimes \dots \otimes$$

$$\hat{P}_{k_m}(z_{n-k_m-1}, \dots, z_n)), n = 2, 3, \dots.$$

证 此证明类似于文献[7]中的引理 5.1.

引理 3^[9] 对于非线性级联系统 $G = H \circ P$, 假设 H, P 都是 FDBI-BO 稳定的, 则 G 也是 FDBI-BO 稳定的.

引理 4 假设 L 是非线性系统, 其中 I 为恒等算子, 若 $F: = (I + L)^{-1}$ 存在, 则它的非线性传递函数矩阵 $\{\hat{F}_n\}$ 为:

$$\hat{F}_1(z) = (1 + \hat{L}(z))^{-1}, \dots,$$

$$\hat{F}_n(z_1, \dots, z_n) =$$

$$- (1 + \hat{L}_1(z_1 \dots z_n))^{-1} \times$$

$$\sum_{m=2}^n \sum_{k_1+\dots+k_m=n} \hat{L}_m(z_1 \dots z_{k_1}, z_{k_1+1} \dots z_{k_2+k_1}, \dots, z_{n-k_m-1} \dots z_n) \times$$

$$(\hat{F}_{k_1}(z_1, \dots, z_{k_1}) \otimes \dots \otimes$$

$$\hat{F}_{k_m}(z_{n-k_m-1}, \dots, z_n)), n = 2, 3, \dots.$$

证 此证明类似于文献[7]中的引理 5.3.

引理 5 假设 L 是非线性系统, 其中 I 为恒等算子, 若 $\|\hat{L}_n\|_\infty < \infty$, 且 $F: = (I + L)^{-1}$ 存在, $1 + \hat{L}_1(0)$ 是非奇异矩阵, 且 $(1 + \hat{L}_1(z))^{-1}$ 是渐近稳定的. 则 $\|\hat{F}_n\|_\infty < \infty, n = 1, 2, \dots$.

证 此证明类似于文献[7]中的引理 5.4.

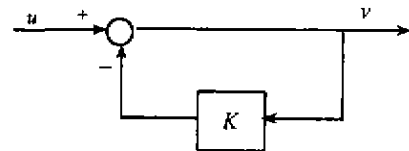


图 1 非线性反馈系统

Fig. 1 Nonlinear feedback system

引理 6^[10] 考虑如图 1 所示的非线性系统, 若 K 为 FDBI-BO 稳定的, 记 K_1 为 K 的 1 阶 Volterra 子系统, 假设闭环系统 F 的 1 阶 Volterra 子系统 $F_1 = (I + K_1)^{-1}$ 是渐近稳定的, 且 $I + \hat{K}_1(0)$ 是非奇异矩阵, 则闭环系统 F 也是 FDBI-BO 稳定的.

定理 2 对于如图 2(a) 所示的非线性系统, 假设: 1) G, H 为 FDBI-BO 稳定的非线性系统.

2) $I + \hat{G}_1(0)\hat{H}_1(0)$ 是非奇异矩阵, 且 $F_1: = (I + G_1 \circ H_1)^{-1}$ 是渐近稳定的, 则图 2(a) 所示的闭环非线性系统为 FDBI-BO 稳定的.

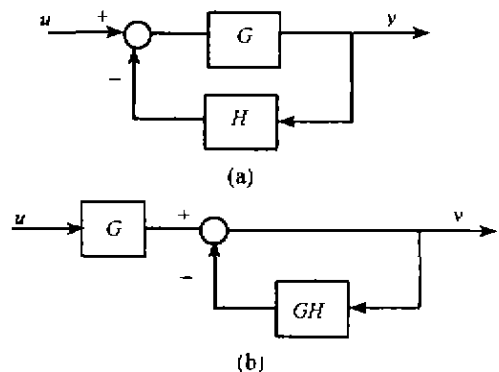


图 2 闭环非线性系统

Fig. 2 Closed-loop nonlinear system

证 如图 2(a) 所示闭环非线性系统能够表示成如图 2(b) 所示闭环非线性系统, 记从输入 v 到输出 y 的闭环非线性子系统为 F , 即 $y = F(v)$, 由引理 3 知, F 是 FDBI-BO 稳定的, 再由引理 6 知, 上述系统是 FDBI-BO 稳定的.

推论 1 假设 G 是 FDBIBO 稳定的非线性系统, $H: y = f(u)$ 是非线性即时系统, 且 $F(0) = 0$, $f(y)$ 为解析函数, $u \in \mathbb{R}^r, y \in \mathbb{R}^m$ 分别为离散系统的输入输出信号, 若 $I + \hat{G}_1(0)f'(0)$ 是非奇异矩阵, 且 $(1 + \hat{G}_1(z)f'(0))^{-1}$ 是渐近稳定的, 则图 2(a) 所示的闭环系统是 FDBIBO 稳定的.

4 仿真研究(Simulation study)

例 1 假设 MIMO 连续非线性系统

$$G: \begin{cases} y_1'' + 2y_1' + 2y_1 + y_2' + 2y_2 - u_1^3 = 0, \\ y_2'' + 3y_2' + 2y_2 + y_1' + y_1 - u_2^2 = 0, \end{cases}$$

$$H: \begin{cases} y_1' + 2y_1 + 0.1y_1y_2 - u_1 = 0, \\ y_2' + y_2 + 0.2y_1^2 - u_2 = 0, \end{cases}$$

对输入输出信号 $u = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix}$ 和 $y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix}$ 同时采样, 采样周期为 T , 用

$$y_i' = \frac{y_i(k+1) - y_i(k)}{T},$$

$$y_i'' = \frac{y_i(k+2) - 2y_i(k+1) + y_i(k)}{T^2}, \quad i = 1, 2$$

代入 G, H , 得离散非线性系统. 它们的一阶非线性传递函数矩阵为: $\hat{G}_1(z) = 0$,

$$\hat{H}_1(z) = \begin{bmatrix} \frac{Tz}{1 + (2T-1)z} & 0 \\ 0 & \frac{Tz}{1 + (T-1)z} \end{bmatrix},$$

取 $T = 0.1$, 由文[6]可判定开环系统 G, H 分别是 FDBIBO 稳定的, 又由于 $I + \hat{G}_1(0)\hat{H}_1(0) = I$ 非奇异, $(I + \hat{G}_1(z)\hat{H}_1(z))^{-1} = I$ 是常数矩阵, 由定理 2 知, 闭环离散非线性系统是 FDBIBO 稳定的. 而当 $T \geq 1$ 时, G, H 的线性子系统不稳定, 从而它的闭环系统可能是不稳定的. 对于 $T = 0.1$ 和 $T = 1.5$ 时系统的阶跃响应分别为图 3 和图 4.

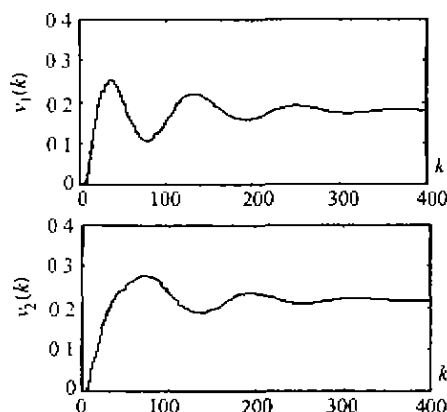


图 3 系统的阶跃响应 ($T=0.1$)

Fig. 3 Step response of system

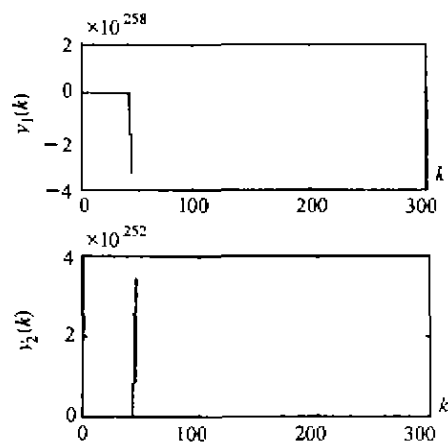


图 4 系统的阶跃响应 ($T=1.5$)

Fig. 4 Step response of system

5 结论(Conclusion)

本文基于非线性传递函数矩阵给出了 MIMO 离散非线性闭环控制系统 FDBIBO 稳定性判据, 它非常类似于 MIMO 离散线性系统闭环稳定性判据. 从判据可看出, 它的 1 阶传递函数矩阵即线性传递函数矩阵的零极点对非线性闭环系统稳定性起着主要的作用. 由于去掉了文[6]中非常复杂的范数级数的计算, 因此, 本文的稳定性判据变得非常简单实用.

参考文献(References)

- [1] Billings S A and Tsang K M. Spectral analysis for nonlinear systems, Part II: Interpretation of nonlinear frequency response functions [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 1989, 3(4): 341-359
- [2] Billings S A and Tsang K M. Spectral analysis for nonlinear systems, Part I: Parametric nonlinear spectral analysis [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 1989, 3(4): 319-339
- [3] Nam S W and Powers E J. Application of higher order spectral analysis to cubically nonlinear system identification [J]. IEEE Trans. Signal Processing, 1994, 42(7): 1746-1765
- [4] Nowak R D. Penalized least squares estimation of Volterra filters and higher order statistics [J]. IEEE Trans. Signal Processing, 1998, 46(2): 419-426
- [5] Giannakis G B. Serpedin erchin. Linear multi-channel blind equalizers of nonlinear FIR Volterra channels [J]. IEEE Trans. Signal Processing, 1997, 45(1): 67-81
- [6] Han Chongzhao and Cao Jianfu. Study on stability of nonlinear control system based on generalized frequency response functions [J]. Control Theory and Applications, 1996, 13(5): 573-582
- [7] Cao Jianfu. Study on stability and frequency-domain analysis of nonlinear transfer function [D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 1996 (in Chinese)
- [8] Zhu Xijian, Shao Huihe and Zhang Zhongjun. The effect of discrete analysis on the dynamic behavior of nonlinear control system [J]. Information and Control, 1996, 25(2): 115-119 (in Chinese)

(下转第 747 页)

- systems in the plane. Part 1: Local behavior of trajectories and local cycle geometry [J]. *J. of Opt. Theory and Appl.*, 1987, 52(3): 365 - 394
- [2] Loparo K A, Aslanis J T and Hajek O. Analysis of switched linear systems in the plane. Part 2: Global behavior of trajectories, controllability and attainability [J]. *J. of Opt. Theory and Appl.*, 1987, 52(3): 395 - 427
- [3] Wicks M A, Peleties P and DeCarlo R A. Constructions of piecewise Lyapunov functions for stabilizing switched systems [A]. *Proc. IEEE Conf. on Decision and Control* [C], Lake Buena Vista, FL, 1994, 3492 - 3497
- [4] Branicky M S. Analyzing continuous switching systems: theory and examples [A]. In *Proc. American Control Conf.* [C], Baltimore, MD, 1994, 3110 - 3114
- [5] Malinborg J, Bernhardsson B and Astrom K J. A stabilizing switching scheme for multi-controller systems [A]. In *Proc. IFAC World Congress* [C], San Francisco, CA, 1996
- [6] Peleties P and DeCarlo R A. Asymptotic stability of m -switched systems using Lyapunov-like functions [A]. In *Proc. American Control Conf.* [C], Boston, MA, 1991, 1679 - 1684
- [7] Peleties P and DeCarlo R A. Asymptotic stability of m -switched systems using Lyapunov functions [A]. *Proc. IEEE Conf. on Decision and Control* [C], Tucson, Arizona, 1992, 3438 - 3439
- [8] Branicky M S. Stability of switched and hybrid systems [A]. *Proc. IEEE Conf. on Decision and Control* [C], Lake Buena Vista, FL, 1994, 3498 - 3503
- [9] Branicky M S. Multiple Lyapunov functions and other analysis tools for switched and hybrid systems [J]. *IEEE Trans. Automatic Control*, 1998, 43(4): 475 - 482

本文作者简介

刘玉忠 1963 年生, 东北大学信息科学与工程学院博士生, 1985 年和 1988 年分别获山东大学数学系学士和硕士学位, 研究方向为非线性与混杂控制系统, 开关系统。

赵 军 1957 年生, 东北大学信息科学与工程学院教授, 博士生导师, 1991 年毕业于东北大学信息科学与工程学院, 获博士学位, 1998 年至 1999 年作为高级访问学者赴美国 Illinois 大学 (Urbana-champaign) 研修, 现为中国自动化学会控制理论委员会委员, 主要研究方向为混杂控制系统, 复杂非线性系统结构研究。

(上接第 744 页)

- [9] Fang Yangwang and Han Chongzhao. Study on stability of closed-loop nonlinear control system based on nonlinear transfer function [J]. *Control and Decision*, 1999, 14(3): 199 - 205 (in Chinese)
- [10] Fang Yangwang and Han Chongzhao. Study on stability of nonlinear closed-loop control systems based on generalized frequency response function matrices [J]. *Control Theory and Applications*, 1999, 16(6): 916 - 920

本文作者简介

方洋旺 见本刊 2001 年第 4 期第 604 页。

熊李成 1959 年生, 西安电子科技大学教授, 博士生导师, 研究生院常务副院长, 研究兴趣为: 非线性信号处理及智能信号处理, 无线通信等。

党映农 1971 年生, 1997 年在西安交通大学获工学硕士学位, 现为西安交通大学电子与信息工程学院博士研究生, 主要从事非线性系统控制方面的研究。

韩崇昭 见本刊 2001 年第 4 期第 604 页。