

# 广义非线性系统的模型跟踪控制 及内部状态稳定性证明<sup>1)</sup>

唐厚君 韩正之 尚宇辉

大久保重范

(上海交通大学智能工程研究所 上海 200030) (山形大学工学部 日本山形 992-8510)

(E-mail: hjtang@sh163b.sta.net.cn)

**摘 要** 将被控对象设定成线性部分和非线性部分,提出了一种广义非线性系统模型跟踪控制的新方法,给出了非线性代数约束方程中包含控制输入时闭环系统具有唯一解的条件,证明了当非线性项满足范数条件以及相关的传递函数满足正实条件时,闭环系统的所有变量都是有界的.该方法可处理代数约束为非线性,用状态空间方程无法描述的被控对象.仿真结果验证了设计方法的有效性.

**关键词** 广义非线性系统,模型跟踪控制,状态有界性,唯一解,代数约束方程.

## A DESIGN METHOD OF MODEL FOLLOWING CONTROL FOR NONLINEAR DESCRIPTOR SYSTEMS AND PROOF OF BOUNDEDNESS OF INTERNAL STATES

TANG Hou-Jun HAN Zheng-Zhi SHANG Yu-Hui

(Institute of Intelligence Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030)

(E-mail: hjtang @sh 163b. sta. net. cn)

OKUBO Shigenori

(Yamagata University, Japan)

**Abstract** This paper considers the problem of model following control for a class of nonlinear descriptor systems which are composed by linear part and nonlinear part. By dealing with the two parts separately, a method of constructing the feedback law which can achieve model following is proposed. This paper also provides the following results: (1) A necessary condition is presented for the uniqueness of the states of closed-loop system whose nonlinear algebraic equation contains control input. (2) If the norm of nonlinear part satisfies some condition and the related transfer function is positive real, then the states are boundedness. This method is also suitable to those systems whose algebraic restraint is nonlinear. Simulation is given to show the effectiveness of this method.

1) 国家教委留学回国人员和博士后基金资助.

**Key words** Nonlinear descriptor systems, model following control, boundedness of states, uniqueness of the solution, algebraic equation.

## 1 引言

模型跟踪控制系统(Model Following Control System, 以下简称 MFCS)是控制理论的一个重要领域,它不仅在理论上与许多控制问题有较强的通融性(如根据模型设定的不同,MFCS 可以变换成调节器、伺服系统、观测器、极点配置等设计问题)<sup>[1]</sup>,而且在工程实际中也得到了广泛的应用(如化学工程、飞机模拟驾驶、轿车转向、电机和机械手的控制等).但是目前的研究,几乎都是基于一般状态空间方程的方法,而对基于广义系统的研究还少有报道.一般情况下,当广义系统中的代数方程为非线性时,通过坐标变换将广义系统转换为状态空间方程是困难的<sup>[2]</sup>.因此,确立直接处理广义系统的解析方法是控制理论的一个重要课题<sup>[3,4]</sup>.本文的目的是给出一种广义非线性系统模型跟踪控制的新方法.该方法主要解决以下几个问题:1)给出闭环系统具有唯一解的判别条件.2)给出控制输入的具体设计方法和步骤.3)证明该设计方法的所有状态变量都是有界的.在文章的最后,通过仿真验证了本方法的有效性.

## 2 问题的描述

考虑由(1)式所描述的控制对象及(2)式所描述的参考模型.假定参考模型是稳定、可控和可观的.

$$E\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + B_f f(v(t)) + d(t), \quad (1a)$$

$$v(t) = C_f x(t), \quad (1b)$$

$$y(t) = Cx(t) + d_0(t). \quad (1c)$$

$$\dot{x}_m(t) = A_m x_m(t) + B_m r_m(t), \quad (2a)$$

$$y_m(t) = C_m x_m(t). \quad (2b)$$

在此, $x(t)$ , $u(t)$ , $y(t)$ ,分别为  $n$  维、 $l$  维和  $l$  维的广义变量、控制输入和被控对象的输出, $d(t)$ , $d_0(t)$  分别为  $n$  维与  $l$  维的外部干扰, $v(t) \in R^l$  是对象的量测变量. $f(v(t)) \in R^l$  是已知的非线性部分,而  $x(t)$  是不能直接得到的. $E \in R^{n \times n}$  且  $\text{rank}(E) = r \leq n$ . $x_m(t) \in R^{n_m}$ , $r_m(t) \in R^{l_m}$ , $y_m(t) \in R^l$ ,所有矩阵都是适当维数的实矩阵.假设控制对象满足下列条件:

A1.  $(E, A)$  是正则的,且  $E$  的秩等于线性部分特征多项式的次数.

A2. 控制系统具有唯一解,即被控对象满足下述条件(限于篇幅,证明省略,可参见文[5])

$$\deg \det \begin{bmatrix} pE - A & -B \\ -C & 0 \end{bmatrix} = \deg \det \begin{bmatrix} pE - A - B_f \frac{\partial f(v)}{\partial v} C_f & -B \\ -C & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{对 } \forall v \text{ 成立}).$$

A3. 控制对象的线性部分是  $R$  可控和  $R$  可观的<sup>[6]</sup>.

A4. 控制对象的线性部分的不变零点在开左半平面上.

### 3 控制系统的设计

记  $p=d/dt$  为微分算子,则由(1), (2)式可得控制对象和参考模型的输入、输出关系如下:

$$y(t) = C(pE - A)^{-1}Bu(t) + C(pE - A)^{-1}B_f f(\mathbf{v}(t)) + C(pE - A)^{-1}d(t) + d_0(t), \quad (3)$$

$$y_m(t) = C_m(pI - A_m)^{-1}B_m r_m(t), \quad (4)$$

$\mathbf{v}(t) = C_f(pE - A)^{-1}Bu(t) + C_f(pE - A)^{-1}B_f f(\mathbf{v}(t)) + C_f(pE - A)^{-1}d(t)$ .  
若设

$$C(pE - A)^{-1}B = N(p)/D(p), C(pE - A)^{-1}B_f = N_f(p)/D(p),$$

$$C_m(pI - A_m)^{-1}B_m = N_m(p)/D_m(p),$$

$$D(p) = \det[pE - A], D_m(p) = \det[pI - A_m],$$

则(3), (4)式分别变换成(5), (6)式,而干扰项归纳于(7)式中.

$$D(p)y(t) = N(p)u(t) + N_f(p)f(\mathbf{v}(t)) + w_d(t), \quad (5)$$

$$D_m(p)y_m(t) = N_m(p)r_m(t), \quad (6)$$

$$w_d(t) = C \cdot \text{adj}(pE - A)d(t) + D(p)d_0(t). \quad (7)$$

用  $\partial \cdot$  表示多项式  $\cdot$  的次数,用  $\partial_{r_i} \cdot$  表示矩阵  $\cdot$  的行次,则  $\sigma_i, \sigma_{f_i}, \sigma_{m_i}$  分别表示  $\partial_{r_i} N(p), \partial_{r_i} N_f(p), \partial_{r_i} N_m(p)$ . 对  $N(p)$  及干扰  $d(t), d_0(t)$ , 假设

A5.  $N(p)$  是行满秩的(即  $\det N_r \neq 0, N_r$  为  $N(p)$  的行阶次阵),

A6. 存在一个多项式  $D_d(p)$  使得  $D_d(p)d(t) = 0, D_d(p)d_0(t) = 0$ .

因此  $D_d(p)w_d(t) = 0$ . 选择稳定的多项式  $T(p)$  使其满足  $\partial T(p) = \rho$ , 其中  $\rho \geq n_d + 2r - n_m - \min\{\sigma_i\}, (i=1, \dots, l)$ . 在此,  $n_d = \partial D_d(p), r = \partial D(p)$  和  $n_m = \partial D_m(p)$ . 选取  $T(p)$  的最高次项的系数与  $D(p)$  的最高次项的系数相同. 对选取的  $T(p)$  存在唯一的  $R(p), S(p)$ , 使得

$$T(p)D_m(p) = D_d(p)D(p)R(p) + S(p). \quad (8)$$

用  $e(t) = y(t) - y_m(t)$  表示跟踪误差,则由(5), (6), (8)式

$$T(p)D_m(p)e(t) = \{D_d(p)R(p)N(p) - Q(p)N_r\}u(t) + Q(p)N_r u(t) + D_d(p)R(p)N_f(p)f(\mathbf{v}(t)) + S(p)y(t) - T(p)N_m(p)r_m(t). \quad (9)$$

在此,  $Q(p)$  的行列式是稳定的,  $Q(p)$  具有如下形式

$$Q(p) = \text{diag}(p^{\rho+n_m-r+\sigma_i}) + \tilde{Q}(p), (i=1, \dots, l, \quad \partial_{r_i} \tilde{Q}(p) = \rho + n_m - r + \sigma_i).$$

令(9)式的左边等于零,则可求得控制律  $u(t)$  为

$$u(t) = -N_r^{-1}Q(p)^{-1}\{D_d(p)R(p)N(p) - Q(p)N_r\}u(t) - N_r^{-1}Q^{-1}(p)S(p)y(t) - N_r^{-1}Q(p)^{-1}D_d(p)R(p)N_f(p)f(\mathbf{v}(t)) + N_r^{-1}Q(p)^{-1}T(p)N_m(p)r_m(t). \quad (10)$$

为使  $u(t)$  中不包含  $y(t), r_m(t)$  的微分,各有关阶次必须满足下述条件

A7.  $n_m - \sigma_{m_i} \geq r - \sigma_i, \sigma_i \geq \sigma_{f_i} \quad (i=1, \dots, l)$ .

注意(10)式右边的第一项是严格真有理的. 使用内部状态可将  $u(t)$  表示成如下形式

$$u(t) = -H_1 \xi_1(t) - E_2 y(t) - H_2 \xi_2(t) - E_3 f(\mathbf{v}(t)) - H_3 \xi_3(t) + E_4 r_m(t) + H_4 \xi_4(t).$$

在此

$$H_1(pI - F_1)^{-1}G_1 = N_r^{-1}Q(p)^{-1}\{D_d(p)R(p)N(p) - Q(p)N_r\}, \quad (11)$$

$$E_2 + H_2(pI - F_2)^{-1}G_2 = N_r^{-1}Q(p)^{-1}S(p), \quad (12)$$

$$E_3 + H_3(pI - F_3)^{-1}G_3 = N_r^{-1}Q(p)^{-1}D_d(p)R(p)N_f(p), \quad (13)$$

$$E_4 + H_4(pI - F_4)^{-1}G_4 = N_r^{-1}Q(p)^{-1}T(p)N_m(p). \quad (14)$$

这里  $\xi_i (i=1, \dots, 4)$  分别为下列系统的状态.

$$\dot{\xi}_1(t) = F_1\xi_1(t) + G_1u(t), \quad (15)$$

$$\dot{\xi}_2(t) = F_2\xi_2(t) + G_2y(t), \quad (16)$$

$$\dot{\xi}_3(t) = F_3\xi_3(t) + G_3f(v(t)), \quad (17)$$

$$\dot{\xi}_4(t) = F_4\xi_4(t) + G_4r_m(t). \quad (18)$$

上述各式中  $F_i (i=1, \dots, 4)$  都满足  $\det[pI - F_i] = \det[Q(p)]$ . 当(10)式成立时  $T(p)D_m(p)e(t) = 0$ , 又  $T(p)$  和  $D_m(p)$  都是稳定的, 故  $e(t) \rightarrow 0 (t \rightarrow \infty)$ . 因此, 如果构成控制系统的状态有界, 便可实现模型跟踪控制.

#### 4 内部状态有界性的证明

为了证明内部状态的有界性, 将控制系统整体的运动归纳为(19)~(21)式. 对于控制系统来说, 从外部的信号只有  $d(t)$ ,  $d_0(t)$  和  $r_m(t)$ , 设这些外部信号都是有界的, 从(1), (10), (15)~(18)式中消去  $u(t)$  可得下述各式.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ \xi_1(t) \\ \xi_2(t) \\ \xi_3(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A - BE_2C & -BH_1 & -BH_2 & -BH_3 \\ -G_1E_2C & F_1 - G_1H_1 & -G_1H_2 & -G_1H_3 \\ G_2C & 0 & F_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & F_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ \xi_1(t) \\ \xi_2(t) \\ \xi_3(t) \end{bmatrix} +$$

$$[BH_4 \quad G_1H_4 \quad 0 \quad 0]^T \xi_4(t) + [B_f \quad -BE_3 \quad -G_1E_3 \quad 0 \quad 0]^T f(v(t)) +$$

$$[BE_4 \quad G_1E_4 \quad 0 \quad 0]^T r_m(t) + [d(t) - BE_2d_0(t) \quad -G_1E_2d_0(t) \quad G_2d_0(t) \quad 0]^T, \quad (19)$$

$$\dot{\xi}_4(t) = F_4\xi_4(t) + G_4r_m(t), \quad (20)$$

$$v(t) = C_f x(t). \quad (21)$$

由于  $\det[pI - F_4] = \det[Q(p)]$  是稳定的多项式, 故  $\xi_4(t)$  是有界的. 将由(19)和(21)式组成的系统精简地记为

$$\tilde{E}\dot{z}(t) = A_s z(t) + B_s f(v(t)) + d_s(t), \quad (22)$$

$$v(t) = C_s z(t), \quad (23)$$

其中  $z(t)$ ,  $\tilde{E}$ ,  $A_s$ ,  $B_s$ ,  $C_s$ ,  $d_s(t)$  的含义可对应比较而得. 经过上述整理, 内部状态的有界性证明归结为  $z(t)$  的有界性证明. 为此, 引入下述引理.

**引理 1**<sup>[7]</sup>. 对于多变量广义线性系统, 如果系统是: 1) 正则的; 2) 可控和可观的, 那么包括重根结构在内, 系统的传递极点和传递零点分别与系统极点和系统的不变零点是一致的.

计算  $A_s$  的特征多项式并使用引理 1 可以得到

$$\det[p\tilde{E} - A_s] = \alpha_e \cdot \det[N_r^{-1}]T'(p) \cdot D_m'(p) \cdot \{\det[Q(p)]\}^2 \cdot \det[N_L(p)].$$

在此  $\alpha_e$  是常数,  $\det[N_L(p)]$  是传递零点多项式, 与系统的线性部分的不变零点多项式是一致的. 由假定知它是稳定的多项式. 另外,  $T(p), D_m(p), \det[Q(p)]$  都是稳定的多项式, 故  $A_s$  是稳定的系统矩阵.

通过(24)式的坐标变换, (22)式可变换成(25)式<sup>[6]</sup>.

$$z(t) = Qw(t) = Q[w_1(t) \quad w_2(t)]^T$$

$$\text{(注意 } Q \text{ 与上面的多项式矩阵 } Q(p) \text{ 的区别).} \quad (24)$$

$$P\tilde{E}Q\dot{w}(t) = PA_sQw(t) + PB_s f(v(t)) + Pd_s(t). \quad (25)$$

由(25)式可得  $\det[P] \cdot \det[p\tilde{E} - A_s] \cdot \det[Q] = \alpha_{PQ} \cdot \det[p\tilde{E} - A_s] = \alpha_I \cdot \det[pI - A_{S1}]$ , 在此,  $\alpha_{PQ}, \alpha_I$  是常数. 因为  $A_s$  是稳定的系统矩阵, 故  $A_{S1}$  是稳定的矩阵.

由 Kalman 定理及(24)式, 选择适当的正则变换矩阵进行正则变换, 则(25)和(23)式将变换成(26)式.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{w}_{11}(t) \\ \bar{w}_{12}(t) \\ \bar{w}_{13}(t) \\ \bar{w}_{14}(t) \\ w_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{A}_{11} & \bar{A}_{12} & \bar{A}_{13} & \bar{A}_{14} & 0 \\ 0 & \bar{A}_{22} & 0 & \bar{A}_{24} & 0 \\ 0 & 0 & \bar{A}_{33} & \bar{A}_{34} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \bar{A}_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{w}_{11}(t) \\ \bar{w}_{12}(t) \\ \bar{w}_{13}(t) \\ \bar{w}_{14}(t) \\ w_2(t) \end{bmatrix} +$$

$$[\bar{B}_1 \quad \bar{B}_2 \quad 0 \quad 0 \quad B_{S2}]^T f(v(t)) + [\bar{d}_{S1}(t) \quad \bar{d}_{S2}(t) \quad \bar{d}_{S3}(t) \quad \bar{d}_{S4}(t) \quad d_{S2}(t)]^T \quad (26a)$$

$$v(t) = C_s z(t) = \bar{C}_2 \bar{w}_{12}(t) + \bar{C}_4 \bar{w}_{14}(t) + C_5 w_2(t). \quad (26b)$$

因  $A_{S1}$  是稳定的矩阵, 故  $\bar{A}_{11}, \bar{A}_{22}, \bar{A}_{33}, \bar{A}_{44}$  也是稳定的矩阵. 由此可知  $\bar{w}_{13}(t), \bar{w}_{14}(t)$  是有界的. 下面按照  $\bar{w}_{12}(t), \bar{w}_{11}(t), w_2(t)$  的顺序来证明它们的有界性. 首先对于  $\bar{w}_{12}(t), v(t)$  进行整理, 得到

$$\dot{\bar{w}}_{12}(t) = \bar{A}_{22} \bar{w}_{12}(t) + \bar{B}_2 f(v(t)) + \bar{d}_2(t), \quad (27a)$$

$$v(t) = \bar{C}_2 \bar{w}_{12}(t) + C_5 w_2(t) + \bar{d}_v(t), \quad (27b)$$

式中  $\bar{d}_2(t) = \bar{A}_{24} \bar{w}_{14}(t) + \bar{d}_{S2}(t), \bar{d}_v(t) = \bar{C}_4 \bar{w}_{14}(t)$  是有界的函数. 由 Kalman 定理知  $(\bar{C}_2, \bar{A}_{22}, \bar{B}_2)$  是可控, 可观的. 由(26a)式可得

$$w_2(t) = -B_{S2} f(v(t)) - d_{S2}(t). \quad (28)$$

由(27a), (27b), (28)式, 计算从  $f(v(t))$  到  $v(t)$  的传递函数得

$$v(t) = \{\bar{C}_2(Ip - \bar{A}_{22})^{-1} \bar{B}_2 - C_5 B_{S2}\} f(v(t)) + \{\bar{C}_2(Ip - \bar{A}_{22})^{-1} \bar{d}_2(t) - C_5 d_{S2}(t) + \bar{d}_v(t)\} = H(p) f(v(t)) + \bar{d}_v(t), \quad (29)$$

式中  $\bar{d}_v(t)$  是有界的函数. 另一方面, 用被控对象的原始参数来计算  $H(p)$ , 可得(30)式<sup>[5]</sup>.

$$H(p) = \bar{C}_2(Ip - \bar{A}_{22})^{-1} \bar{B}_2 - C_5 B_{S2} = [C_f \quad 0] \begin{bmatrix} Ep - A & -B \\ -C & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} B_f \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (30)$$

为了证明内部状态的有界性, 对(29)式的  $H(p)$  及  $f(v(t))$  作如下假设.

A8.  $H(p)$  是正实的.

$$A9. \quad f(v(t)) = f_1(v(t)) - A_{2k-1} v(t)^{[2k-1]}, \quad (31a)$$

$$\|f_1(v(t))\| \leq \alpha_1 + \beta_1 \|v(t)\|^{\gamma_1}, v^T(t) A_{2k-1} v(t)^{[2k-1]} > 0, \quad (v(t) \neq 0), \quad (31b)$$

式中  $k$  是大于 1 的整数,  $v(t)^{[2k-1]}$  是  $v(t)$  的  $(2k-1)$  次的克罗内克积 (Kronecker product)<sup>[8]</sup>,  $\alpha_1 \geq 0, \beta_1 \geq 0, 0 \leq \gamma_1 < (2k-1)$ .

令  $\hat{v}(t) = v(t) - \bar{d}_v(t)$ , 则可将 (29) 式改写成不显含  $\bar{d}_v(t)$  的形式

$$\dot{\hat{v}}(t) = H(p) \hat{f}(\hat{v}(t)), \quad (32)$$

式中  $\hat{f}(\hat{v}(t))$  由下式给出

$$\begin{aligned} f(v(t)) &= f(\hat{v}(t) + \bar{d}_v(t)) = \hat{f}(\hat{v}(t)) = f_1(\hat{v}(t) + \bar{d}_v(t)) - \\ &A_{2k-1}(\hat{v}(t) + \bar{d}_v(t))^{[2k-1]} = f_1(\hat{v}(t) + \bar{d}_v(t)) - \\ &\left\{ \sum_{r=1}^{2k-1} A_{2k-1} [\hat{v}(t) \otimes \cdots \otimes \bar{d}_v(t) \otimes \cdots \otimes \hat{v}(t)] + \cdots + \right. \\ &\left. A_{2k-1} \bar{d}_v(t)^{[2k-1]} \right\} - A_{2k-1} \hat{v}(t)^{[2k-1]} \\ &= \hat{f}_1(\hat{v}(t)) - A_{2k-1} \hat{v}(t)^{[2k-1]}. \end{aligned} \quad (33)$$

注意到  $\bar{d}_v(t)$  是有界的以及 (31 b) 式,  $\hat{f}_1(\hat{v}(t))$  的范数将满足关系  $\|\hat{f}_1(\hat{v}(t))\| \leq \alpha_3 + \beta_3 \|\hat{v}(t)\|^{\gamma_3}$ . 在此,  $\alpha_3 \geq 0, \beta_3 \geq 0, 0 \leq \gamma_3 < (2k-1)$  是常数, 注意到  $H(p)$  的形式, 将 (32) 式用状态变量来表示可得

$$\dot{\hat{w}}_{12}(t) = \bar{A}_{22} \hat{w}_{12}(t) + \bar{B}_2 \hat{f}(\hat{v}(t)), \quad (34a)$$

$$\hat{v}(t) = \bar{C}_2 \hat{w}_{12}(t) - C_5 B_{S2} \hat{f}(\hat{v}(t)). \quad (34b)$$

在上述准备的基础上, 根据正实传递函数矩阵的性质,  $\theta (= \|\hat{v}^T(t) \hat{f}(\hat{v}(t))\| / \{\|\hat{v}(t)\| \cdot \|\hat{f}(\hat{v}(t))\|\})$  的定义及其性质, 李雅普诺夫方程和反证法等可以证明  $\hat{v}(t)$  的有界性. 因证明过程较长, 限于篇幅在此省略 (见文献 [5]). 对于其它内部状态有界性的证明分述如下: 对于  $\hat{w}_{12}(t)$ , 注意到 (31b) 和 (33) 式, 可知在 (34a) 式中,  $\hat{f}(\hat{v}(t))$  是  $\hat{v}(t)$  的有界函数. 又因为  $\bar{A}_{22}$  是稳定的矩阵, 故  $\hat{w}_{12}(t)$  是有界的; 因  $\hat{v}(t), \bar{d}_v(t)$  是有界的, 故由  $\hat{v}(t) = v(t) - \bar{d}_v(t)$  可知  $v(t)$  是有界的; 因 (27a) 式中的  $\bar{d}_2(t)$  是有界的, 以及  $f(\hat{v}(t))$  是  $v(t)$  的有界函数, 且  $\bar{A}_{22}$  是稳定的矩阵, 故可知  $\bar{w}_{12}(t)$  是有界的; 因 (26a) 式中的  $\bar{A}_{11}$  是稳定的矩阵, 且  $\bar{w}_{12}(t), \bar{w}_{13}(t), \bar{w}_{14}(t)$  是有界的,  $f(v(t))$  是  $v(t)$  的有界函数, 故  $\bar{w}_{11}(t)$  的有界性是显见的; 最后由 (28) 式, 因  $d_{S2}(t)$  是有界的,  $f(v(t))$  是  $v(t)$  的有界函数, 故  $w_2(t)$  是有界的. 综合以上的讨论可知, 所有的内部状态  $[\bar{w}_{11}(t) \bar{w}_{12}(t) \bar{w}_{13}(t) \bar{w}_{14}(t) w_2(t)]^T$ , 亦即  $z(t)$  是有界的.

**定理 1.** 对于稳定的、可控和可观的参考模型, 如果 (1) 式所描述的广义非线性系统满足 A1~A9 的条件, 则由本方法所设计的模型跟踪系统可以保证所有的内部状态有界且跟踪误差  $e(t) = y(t) - y_m(t)$  趋于零.

## 5 仿真计算

**例 1.** 控制对象由 (35) 式, 参考模型由 (36) 式给出. 在此例中  $d(t), d_0(t)$ , 分别为斜坡

和方波干扰,  $T(p) = (p+4)^2$ ,  $Q(p) = (p+3)^4$ . 仿真结果示于图 1. 由图可见, 即便是在干扰的作用区间内, 跟踪误差也渐进收敛于零.

$$\begin{bmatrix} 3 & 1 & 2 \\ 3 & -1 & -2 \\ 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \dot{\mathbf{x}}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 2 & 1 \\ -5 & 5 & 7 \\ 3 & 1 & -1 \end{bmatrix} \mathbf{x}(t) + \begin{bmatrix} 2 \\ 3 \\ 1 \end{bmatrix} u(t) + \begin{bmatrix} 9 \\ 14 \\ 2 \end{bmatrix} f(\mathbf{v}(t)) + \begin{bmatrix} 3 \\ 3 \\ 1 \end{bmatrix} \mathbf{d}(t), \quad (35a)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{v}(t) &= [4 \quad -2 \quad -7] \mathbf{x}(t), f(\mathbf{v}(t)) = 5 - 2\mathbf{v}(t) + 2\mathbf{v}^2(t) - \mathbf{v}^3(t) - 1.5\mathbf{v}(t)^5, \\ \mathbf{y}(t) &= [-1 \quad 1 \quad 5] \mathbf{x}(t) + \mathbf{d}_0(t), \end{aligned} \quad (35b)$$

$$\dot{\mathbf{x}}_m(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -6 & -5 \end{bmatrix} \mathbf{x}_m(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \mathbf{r}_m(t), \quad (36a)$$

$$\mathbf{y}_m(t) = [2 \quad 1] \mathbf{x}_m(t), \mathbf{r}_m(t) = 3\sin t + 4.5, \quad (36b)$$

另一方面, 被控对象(35)式通过正则变换可以变换成标准状态空间方程(37a)和代数方程(37b)相混合的形式. 在该例中, 由于(37b)式是非线性代数方程式, 故一般情况下无法由此解出  $z_3(t)$  在(37a)式中将它消去变换成低一阶的方程, 因此已有的方法无法处理此类被控对象. 本文提出的方法能够适用于这样的系统, 故扩展了现有方法的适用范围.

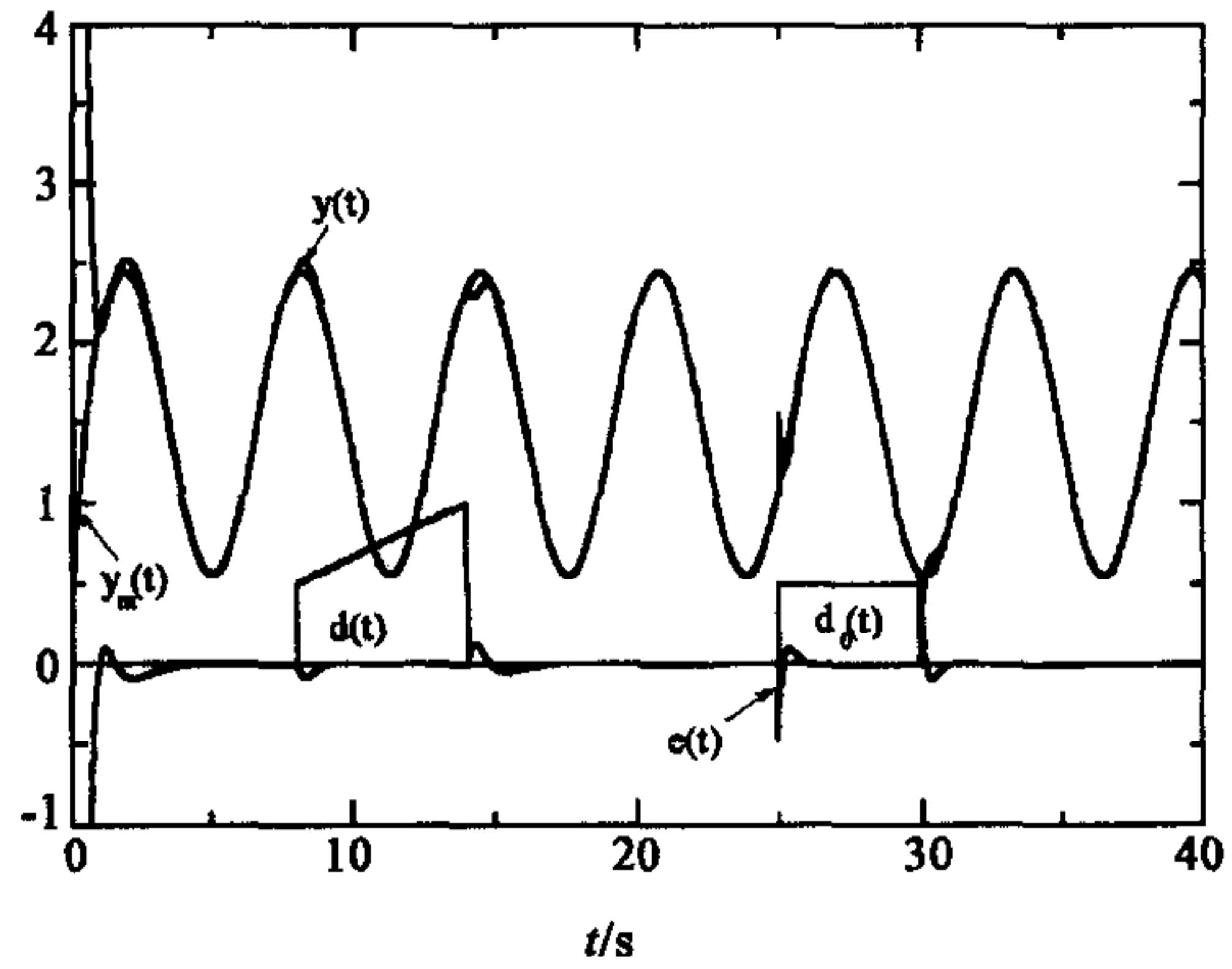


图 1 仿真结果

$$\begin{bmatrix} \dot{z}_1(t) \\ \dot{z}_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & -3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1(t) \\ z_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(t) + \begin{bmatrix} 1 \\ 6 \end{bmatrix} f(\mathbf{v}(t)) + \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \mathbf{d}(t), \quad (37a)$$

$$0 = z_3(t) + u(t) + f(\mathbf{v}(t)), \quad (37b)$$

$$\mathbf{v}(t) = [-1 \quad 3 \quad 1] \mathbf{z}(t), \quad (37c)$$

$$f(\mathbf{v}(t)) = 5 - 2v(t) + 2v^2(t) - v^3(t) - 1.5v(t)^5. \quad (37d)$$

## 6 结论

本文给出了一种广义非线性系统模型跟踪控制的新方法. 在证明内部状态的有界性时对被控对象作了坐标变换, 但设计控制输入  $u(t)$  时没有施加坐标变换, 故系统的物理结构得到了保存. 本设计方法不仅适用于代数方程是非线性, 一般情况下不能用正常系统 ( $E=I$ ) 来描述的控制对象, 也完全适用于正常系统. 从这个意义上来说, 本方法的应用范围比已有的基于状态空间模型的方法要广.

## 参 考 文 献

- 2 伊藤. なぜ構造に着目するか. 計測と制御, 1981, 20(7): 641~654
- 3 温香彩. 广义非线性系统的变结构控制理论. 控制理论与应用, 1996, 16(1): 87~90
- 4 张庆灵, 戴冠中等. 广义系统的渐近稳定性与镇定. 自动化学报, 1998, 24(2): 208~211
- 5 唐厚君. 广义非线性系统模型跟踪控制的研究[博士后研究报告]. 上海: 上海交通大学自动控制博士后流动站, 2000
- 6 Dai L. Singular control systems. Berlin: Springer-verlay, 1989. 12~87
- 7 Houjun Tang, Bingyan Zhao. On poles and zeros of descriptor system. In: Proceedings of the second Chinese world congress on intelligent control and intelligent automation, China. 1997. 1384~1388
- 8 児玉慎三, 须田信英. システム制御のためのマトリクス理論. 東京: 計測自動制御学会, 1992. 15~17

**唐厚君** 1957年生, 副教授, 1997年于日本山形大学取得博士学位, 1998年3月至2000年2月在上海交通大学博士后流动站从事博士后研究工作. 研究领域为模型跟踪控制及机电一体化控制.

**韩正之** 1947年生, 教授, 博导. 研究领域为非线性及智能控制.

## 第六届国际青年计算机会议

(The Sixth International Conference for Young Computer Scientists)

2001年10月23—25日 中国·杭州

### 征文通知

国际青年计算机会议(ICYCS)是由中国计算机学会主办的系列国际会议, 每两年召开一次, 至今已成功举办了五届. 第六届国际青年计算机会议(ICYCS'2001)由中国计算机学会主办, 浙江大学承办, 将于2001年10月23—25日在杭州浙江大学召开. 会议主题: 新世纪信息技术与应用, 主要涉及: e-business, e-man, e-engineering, e-learning……. 届时将有众多中外著名计算机专家及后起之秀出席会议. 会议将为与会者提供一个学术论坛, 供与会者与专家进行学术交流, 介绍和探讨计算机理论及应用等广泛领域的最新进展. 会议论文集将由国内著名出版社出版, 会议收录论文将进入EI检索.

征文范围主要有以下领域, 但并不限于这些领域:

- ◆ 软件理论与实践
- ◆ 计算机系统结构与芯片设计技术
- ◆ 网络通信与信息安全技术
- ◆ 智能信息处理技术
- ◆ 理论与计算
- ◆ 分布式及并行处理技术
- ◆ 图形图象技术
- ◆ 生物信息理论与技术
- ◆ 商业领域中的信息技术及应用
- ◆ 工业领域中的信息技术及应用
- ◆ 教育领域中的信息技术及应用

(下转第17页)