

文章编号: 1001-0920(2007)02-0206-05

一类非线性多时滞系统的干扰解耦控制

宫清先^{1,2}, 张化光¹, 孟祥萍²

(1. 东北大学 信息科学与工程学院, 沈阳 110004; 2. 长春工程学院 电气工程系, 长春 130012)

摘要: 考虑了一类 MIMO 非线性多时滞系统的干扰解耦控制问题. 在一定条件下, 通过构造非线性状态反馈控制规律, 确保闭环系统的输出不受干扰影响而且是时滞无关的. 基于微分几何理论, 给出该状态反馈控制规律存在的充分必要条件. 仿真验证了所得结果的有效性.

关键词: 干扰解耦; 非线性系统; 时滞系统; 向量相对阶; 反馈控制

中图分类号: TP13 **文献标识码:** A

Disturbance decoupling control for a class of nonlinear multi-delay systems

GONG Qing-xian^{1,2}, ZHANG Hua-guang¹, MENG Xiang-ping²

(1. College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China; 2. Department of Electrical Engineering, Changchun Institute of Technology, Changchun 130012, China. Correspondent: GONG Qing-xian, E-mail: qxgong@21cn.com)

Abstract: The disturbance decoupling control problem is considered for a class of MIMO nonlinear multi-delay systems. Under assumptions, nonlinear state feedback control laws are constructed, which ensure that outputs of the closed-loop system are unaffected by disturbances and independent of time-delays. Based on differential geometry theory, sufficient and necessary conditions are derived for the existence of the state feedback control laws. An example illustrates the effectiveness of the results.

Key words: Disturbance decoupling; Nonlinear systems; Time-delay systems; Vector relative degree; Feedback control

1 引言

微分几何理论的发展推动了非线性系统的研究,它在非线性系统的线性化与解耦控制中起到了重要的作用,并产生很多较好的研究成果^[1-3]. 近年来,不少研究结果集中在微分几何理论的相对阶和分布概念上^[3],尽管在实际中微分几何理论被认为理论性过强,但这些方法还是有用于实际工程控制的例子,如电机控制等^[4-6]. 另外,一些智能控制方法也用于解决解耦控制问题^[7],但在实际工程上这些方法显得太过繁杂.

实际系统不可避免地受到不同程度的干扰,因此干扰解耦问题(DDP)的研究有着理论和实际意义. 文献[8-12]给出了一些针对不同系统解决干扰解耦的方法,其中文献[8]讨论了一类非线性 SISO

系统的干扰解耦问题,并在微分几何相对阶概念上给出了状态反馈控制的充分必要条件. 时滞也是实际系统常见的现象,所以对时滞系统控制的研究越来越受到重视. 文献[13]考虑了一类非线性 MIMO 常时滞系统的输出输入解耦和线性化的问题,在构造状态反馈的同时也使输出与时滞无关.

本文考虑一类非线性 MIMO 多时滞系统的干扰解耦问题,通过构造状态反馈规律,保证系统输出不受干扰的影响而且与时滞无关. 在一定的条件下,用微分几何理论给出了该类系统干扰解耦可解的充分必要条件,最后用一个仿真算例验证了本文结果的有效性.

2 问题描述

考虑如下—类非线性 MIMO 时滞系统:

收稿日期: 2006-01-14; 修回日期: 2006-04-10.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60274017,60572070,60325311,20022030).

作者简介: 宫清先(1968—),男,安徽太和人,讲师,博士生,从事非线性控制及解耦的研究; 张化光(1959—),男,吉林省吉林市人,教授,博士生导师,从事复杂系统的模糊自适应控制、非线性控制等研究.

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \\ f(x(t)) + \sum_{j=1}^N f_j(x(t-t_j)) + \\ g(x(t))u(t) + e(x(t))d(t) = \\ f(x(t)) + f_d + g(x(t))u(t) + e(x(t))d(t), \\ y = h(x(t)), \\ x(t) = \varphi(t), \quad -M \leq t \leq 0. \end{cases} \quad (1)$$

其中: $x \in R^n$ 为状态向量; $u, y \in R^m$ 分别为输入、输出向量; $d \in R^l$ 为干扰向量; f, f_j 为 n 维光滑函数向量; g, e 为有适当维数的矩阵值函数; $t_j > 0, j = 1, \dots, N$ 为系统时滞; 为方便描述, 定义 $f_d := \sum_{j=1}^N f_j(x(t-t_j))$; 令 $M = \max\{t_j; j = 1, \dots, N\}$, $\varphi(t)$ 是 $[-M, 0]$ 上的已知连续的初始函数.

定义 1 给定 MIMO 非线性时滞系统 (1) 和 x_0 , 如果在 x_0 邻域 U 上存在一个反馈控制规律使得相应闭环系统的输出 y 不受干扰 d 的影响, 则称非线性系统是 DDP 可解的.

定义 2^[3] 非线性系统 (1) 在 x_0 具有关于输入 u 的向量相对阶 (ρ_1, \dots, ρ_m) , 且 $\rho_i \leq n$, 如果:

$$1) \quad L_{g_j} L_f^k h_i(x) = 0, \quad i, j = 1, \dots, m, k < \rho_i - 1. \quad (2)$$

其中

$$\begin{aligned} L_f^0 h_i(x) &:= h_i(x), \\ L_f^k h_i(x) &:= \frac{\partial(L_f^{k-1} h_i(x))}{\partial x} f(x), \\ L_{g_i} L_f h_i(x) &:= \frac{\partial(L_f h_i(x))}{\partial x} g_i(x). \end{aligned}$$

2) $m \times m$ 矩阵 $A(x)$ 满足

$$A(x) = \begin{bmatrix} L_{g_1} L_f^{\rho_1-1} h_1(x) & \dots & L_{g_m} L_f^{\rho_1-1} h_1(x) \\ \dots & \ddots & \dots \\ L_{g_1} L_f^{\rho_m-1} h_m(x) & \dots & L_{g_m} L_f^{\rho_m-1} h_m(x) \end{bmatrix}_{m \times m} \quad (3)$$

在 $x = x_0$ 是非奇异的.

仿照文献 [8], 给出系统关于干扰的向量相对阶定义.

定义 3 非线性系统 (1) 在 x_0 具有关于干扰 d 的向量相对阶 (ρ_1, \dots, ρ_m) , 如果对 $i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, l$ 以及所有的 $k < \rho_i - 1$ 有

$$L_{e_j} L_f^k h_i(x) = 0, \quad (4)$$

且

$$L_{e_j} L_f^{\rho_i-1} h_i(x_0) \neq 0. \quad (5)$$

注 1 当 $\rho_i > n$ 时定义 $\rho_i = n$.

3 主要结果

考虑非线性 MIMO 时滞系统 (1), 假设下列条件成立:

条件 1 根据定义 1, 假设系统 (1) 具有关于输入 u 的向量相对阶 (ρ_1, \dots, ρ_m) .

条件 2 在条件 1 下, 设下式成立:

$$\begin{aligned} L_{f_d} L_f^k h_i(x) &= 0, \\ k &= 0, \dots, \rho_i - 2, i = 1, \dots, m. \end{aligned} \quad (6)$$

根据定义 2, 假设系统 (1) 关于干扰 d 的向量相对阶为 (ρ_1, \dots, ρ_m) . 考虑状态反馈控制规律

$$u(t) = \varphi(x(t)) + \varphi_1(x(t)) + \varphi_2(x(t))v. \quad (7)$$

其中: $\varphi(x(t))$ 和 $\varphi_1(x(t))$ 均为 m 维函数向量, $\varphi_2(x(t))$ 为时滞相关状态, $\varphi_1(x(t))$ 为 x_0 邻域 U 内的 $m \times m$ 维非奇异矩阵, $v \in R^m$ 为新的控制输入向量.

对系统 (1) 施加反馈 (7), 得到相应的闭环系统为

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \tilde{f}(x(t)) + \tilde{f}_d + \tilde{g}(x(t))v + e(x(t))d(t), \\ y &= h(x(t)). \end{aligned} \quad (8)$$

其中

$$\begin{cases} \tilde{f}(x(t)) = f(x(t)) + g(x(t))\varphi(x(t)), \\ \tilde{f}_d(x(t)) = f_d + g(x(t))\varphi_1(x(t)), \\ \tilde{g}(x(t)) = g(x(t))\varphi_2(x(t)). \end{cases} \quad (9)$$

显然, 闭环系统 (8) 与系统 (1) 具有相同的结构形式.

引理 1 如果系统 (1) 满足条件 1, 则闭环系统 (8) 具有关于输入 v 的向量相对阶 (ρ_1, \dots, ρ_m) , 且

$$L_{g_j} L_f^{\rho_i-1} h_i(x) \neq 0. \quad (11)$$

证明略.

定理 1 对给定 MIMO 非线性时滞系统 (1), 如果满足条件 1 和条件 2, 则在 x_0 处存在形如式 (7) 的有记忆的状态反馈规律使得系统 (1) DDP 可解的充分必要条件是

$$\rho_i < \rho_j, i = 1, \dots, m, \quad (12)$$

且相应闭环系统输出是时滞无关的.

证明 1) 充分性. 考虑输出 $y_i (i = 1, \dots, m)$, 如果 $\rho_i < \rho_j$, 由条件 1 和条件 2 容易得到

$$\begin{aligned} y_i^{(k)} &= L_f^k h_i, \\ i &= 1, \dots, m, k = 1, \dots, \rho_i - 1. \end{aligned} \quad (13)$$

而

$$\begin{aligned} k &= \rho_i, \\ y_i^{(\rho_i)} &= \\ &L_f^{\rho_i} h_i + L_{f_d} L_f^{\rho_i-1} h_i + \\ &\dots + L_{g_j} L_f^{\rho_i-1} h_i u_j + \dots + L_{e_j} L_f^{\rho_i-1} h_i d_j, \end{aligned} \quad (14)$$

其中 $L_{g_j} L_{f_j}^{i-1} h_i = 0, j = 1, \dots, m$. 由条件 $i < i$ 有 $L_{e_j} L_{f_j}^{i-1} h_i(x) = 0, j = 1, \dots, l$. 可得

$$\begin{bmatrix} y_1^1 \\ \dots \\ y_m^m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_f^1 h_1 \\ \dots \\ L_f^m h_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{f_d} L_{f_j}^{i-1} h_1 \\ \dots \\ L_{f_d} L_{f_j}^{m-1} h_m \end{bmatrix} + A(x) \begin{bmatrix} u_1 \\ \dots \\ u_m \end{bmatrix}. \quad (15)$$

根据定义 2, $A(x)$ 是非奇异的, 对式(7) 取

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = -A^{-1}(x(t))b(x(t)), \\ \dot{x}(x(\cdot)) = -A^{-1}(x(t))b_1(x(\cdot)), \\ \dot{x}(t) = A^{-1}(x(t)). \end{cases} \quad (16)$$

其中

$$b(x(t)) = \begin{bmatrix} L_f^1 h_1 \\ \dots \\ L_f^m h_m \end{bmatrix}, b_1(x(\cdot)) = \begin{bmatrix} L_{f_d} L_{f_j}^{i-1} h_1 \\ \dots \\ L_{f_d} L_{f_j}^{m-1} h_m \end{bmatrix}. \quad (17)$$

由式(7) 和(16), 系统输入输出的动态方程可描述为

$$y_i^{(i)} = v_i, i = 1, \dots, m. \quad (18)$$

设 $r = \sum_{i=1}^m i$, 则 $r = n$. 根据文献[3], 如果 $r < n$, 总可以找到 $(n - r)$ 个光滑函数 $\varphi_{r+1}(x), \dots, \varphi_n(x)$, 使得映射

$$\begin{aligned} (x) = & [h_1(x), L_f h_1(x), \dots, L_f^{i-1} h_1(x), \dots, \\ & h_m(x), L_f h_m(x), \dots, L_f^{m-1} h_m(x), \varphi_{r+1}, \dots, \varphi_n]^T \end{aligned} \quad (19)$$

在 x_0 是局部微分同胚的, 即 (x) 在 U 上具有非奇异 Jacobi 矩阵, 则取如下的坐标变换:

$$\begin{cases} i = i, i = 1, \dots, r; \\ i = i, i = r + 1, \dots, n. \end{cases} \quad (20)$$

直接推导可得到系统(1) 在新坐标下的形式为

$$\begin{cases} \dot{x}_j = x_{j+1}, \\ i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, i - 1; \\ \dot{x}_i = v_i; \\ \dot{x}_j = \\ q(\cdot, \cdot) - p(\cdot, \cdot)[A(\cdot, \cdot)]^{-1}b(\cdot, \cdot) + \\ p(\cdot, \cdot)[A(\cdot, \cdot)]^{-1}v; \\ y_j = x_j, j = 1, \dots, m. \end{cases} \quad (21)$$

从方程(21) 可见系统输出不再受干扰影响, 而且是时滞无关的.

2) 必要性. 假设存在一个形如式(7) 的状态反馈可使系统 DDP 可解, 即相应的闭环系统(8) 输出 y 不受干扰 d 的影响, 那么对 $y_i (i = 1, \dots, m)$, 有

$$y_i^{(1)} = L_{\tilde{f}} h_i + L_{\tilde{f}_d} h_i + \sum_{j=1}^m (L_{\tilde{g}_j} h_i) v_j + \sum_{j=1}^l (L_{e_j} h_i) d_j. \quad (22)$$

如果 $L_{\tilde{g}_j} h_i(x) = 0, j = 1, \dots, m$, 则 $\tilde{f}_i = 1$. 由假设可知, 因为 y_i 不受干扰 d 的影响, 必有 $L_{e_j} h_i(x) = 0, j = 1, \dots, l$, 即有 $\tilde{f}_i > 1$. 根据引理 1 得 $\tilde{f}_i < i$.

如果 $L_{\tilde{g}_j} h_i(x) = 0$, 根据条件 2, 式(22) 可写为

$$y_i^{(1)} = L_{\tilde{f}} h_i.$$

而

$$y_i^{(2)} = L_{\tilde{f}}^{(2)} h_i(x) + L_{\tilde{f}_d} L_{\tilde{f}} h_i + \sum_{j=1}^m (L_{\tilde{g}_j} L_{\tilde{f}} h_i) v_j + \sum_{j=1}^l (L_{e_j} L_{\tilde{f}} h_i) d_j. \quad (23)$$

同理, 若 y_i 不受干扰 d 的影响, 必有 $L_{e_j} L_{\tilde{f}} h_i = 0, j = 1, \dots, l$, 这时 $\tilde{f}_i > 2$. 如果 $L_{\tilde{g}_j} L_{\tilde{f}} h_i = 0, j = 1, \dots, m$, $\tilde{f}_i = 2$, 根据引理 1 有 $\tilde{f}_i = 2$, 得到 $\tilde{f}_i < i$. 重复上述过程, 必要性可得证.

显然, 定理 1 中的状态反馈是与时滞相关的, 但如果系统满足下面的条件, 可以构造无记忆的状态反馈控制规律使得系统 DDP 可解.

条件 3 在条件 1 成立的情况下

$$L_{f_d} L_{f_j}^k h_i(x) = 0, \quad k = 0, \dots, i - 1, i = 1, \dots, m. \quad (24)$$

考虑状态反馈控制规律

$$u(t) = (x(t)) + (x(t))v, \quad (25)$$

这样, 容易得到如下推论:

推论 1 对给定 MIMO 非线性时滞系统(1), 如果满足条件 1 和条件 3, 则在 x_0 处存在形如式(25) 的无记忆的状态反馈规律使得系统(1) DDP 可解的充分必要条件为

$$\tilde{f}_i < i, i = 1, \dots, m, \quad (26)$$

且相应闭环系统输出是时滞无关的.

从定理 1 证明可知, 在条件 3 下反馈控制规律(25) 可取

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = -A^{-1}(x(t))b(x(t)), \\ \dot{x}(t) = A^{-1}(x(t)). \end{cases} \quad (27)$$

其中

$$b(x(t)) = [L_f^1 h_1 \quad \dots \quad L_f^m h_m]^T. \quad (28)$$

同样可以使得系统(1) DDP 可解, 且相应的闭环系统输出是时滞无关的.

注 2 显然, 推论 1 中的条件约束要比定理 1 中的强.

注 3 从定理 1 证明可知, 闭环系统(21) 不但是干扰解耦的和时滞无关的, 同时整个系统也是输入输出解耦的和线性化的.

系统(21) 可以表示为

$$\begin{cases} \dot{x} = A x + B v, \\ \dot{y} = \tilde{q}(x, y) + k(x, y) d, \\ y_j = \dot{x}_j, j = 1, \dots, m. \end{cases} \quad (29)$$

其中

$$A = \text{diag}(A_i), B = \text{diag}(B_i),$$

$$A_i = \begin{bmatrix} 0 & I_{i-1} \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$B_i = [0 \ 0 \ \dots \ 1] x_i^T, i = 1, \dots, m.$$

式(29)中实际上包含两个子系统 $\dot{x} = A x + B v$ 和 $\dot{y} = \tilde{q}(x, y) + k(x, y) d$.前者刻画的是从新输入到输出的 m 个通道,而后者则是个不能观的子系统.设

$$v_i = -c_{0i} \dot{x}_i - c_{1i} \ddot{x}_i - \dots - c_{i-1i} x_i^{(i)} + w_i, \quad i = 1, \dots, m. \quad (30)$$

其中 $c_{0i}, c_{1i}, \dots, c_{i-1i}$ 是待设计参数; w_i 为参考输入.显然,对输出 y 而言,只要选取适当的参数 c_{ij} 即可得到期望的稳定性能.

而对式(29)中第2式,当 $\dot{y} = 0$,该子系统可表示为

$$\dot{y} = \tilde{q}(0, y) + k(0, y) d, \quad (31)$$

称为系统(1)的摄动零动态,它与整个解耦系统的稳定性有着重要关系.

4 示例仿真

考虑非线性时滞系统(1),其中

$$\begin{cases} f(x(t)) = \begin{bmatrix} x_1(t) x_4(t) + x_4(t) \\ x_2(t) + x_3(t) \\ x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix}, \\ g(x(t)) = \begin{bmatrix} 2e^{x_1(t)} & 1 & 0 & 0 \\ -1 & e^{x_3(t)} & 0 & 0 \end{bmatrix}^T, \\ e(x(t)) = [0 \ 0 \ 0 \ 1] J^T, \\ h(x(t)) = [x_3(t) \ x_2(t)] J^T, \\ f_d = [x_1(t-2) + x_2(t-3) \ 0 \ 0 \ x_2(t-1) - x_4(t-3)] J^T. \end{cases} \quad (32)$$

容易验证 $(x_0, u_0, d_0) = (0, 0, 0)$ 是标称系统的一个平衡点,且 $h(0) = 0$. 根据定义不难得到 $\lambda = (2, 1)$, $\mu = (-1, 1)$. 且有 $L_{f_d} h_1 = 0, L_{f_d} h_2 = 0, L_{f_d} L_f h_1 = x_3(t-2), L_{f_d} L_f h_2 = x_2(t-3)$, 所以系统满足定理1的条件. 即系统(1)DDP可解且可保证解耦系统输出与时滞无关. 由式(16)和(17),可选择形如式(7)的状态反馈控制规律如下:

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} =$$

$$\frac{1}{1 + 2e^{x_1(t) + x_3(t)}} \times \begin{bmatrix} e^{x_3(t)} (x_1(t) x_4(t) + x_4(t) + x_1(t-2) + x_3(t-3) - v_1) + x_2(t) + x_3(t) - v_2 \\ v_1 - x_1(t) x_4(t) - x_4(t) - x_1(t-2) - x_3(t-3) + 2e^{x_1(t)} (x_2(t) + x_3(t) - v_2) \end{bmatrix}. \quad (34)$$

由式(30)选 v 为

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -c_{11} x_3(t) - c_{12} x_1(t) \\ -c_{21} x_2(t) \end{bmatrix}, \quad (35)$$

并取

$$\begin{aligned} x(0) &= [-1, -2, 3, -4] J^T, \\ c_{11} &= 2, c_{12} = 1, c_{21} = 3, \\ u(t) &= [2.0 \ -1.0 \ 1.2 \ -1.3] J^T, \\ \forall t &\in [0, 10]. \end{aligned}$$

对由式(1), (32), (33), (34)和(35)构成的闭环系统进行仿真,仿真结果如图1~图3所示.图1为闭环系统的输出.而图2和图3分别是在系统具有不同时滞下的控制,输出结果均如图1所示.其

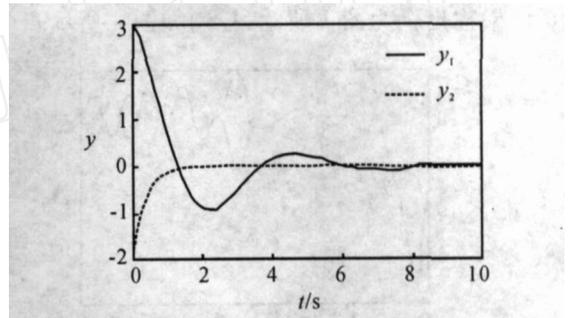


图1 闭环系统的输出 y

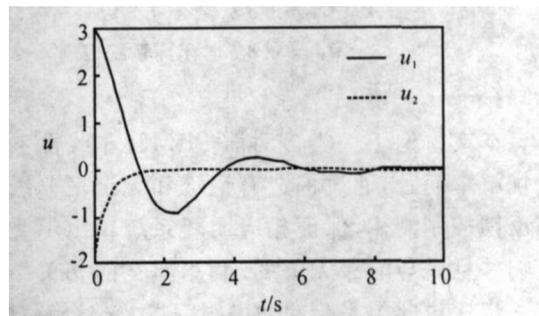


图2 $\tau_1 = 0.3 \text{ s}, \tau_2 = 0.5 \text{ s}, \tau_3 = 0.8 \text{ s}$ 时闭环系统控制 u

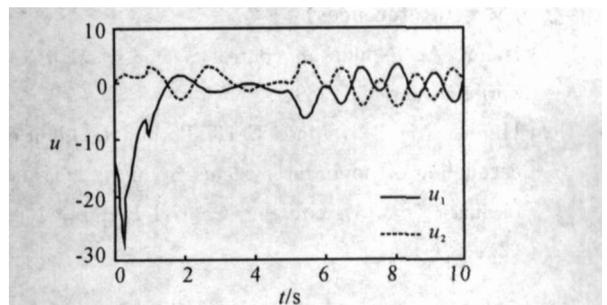


图3 $\tau_1 = 0.1 \text{ s}, \tau_2 = 0.3 \text{ s}, \tau_3 = 0.9 \text{ s}$ 时闭环系统控制 u

中系统在前5 s 干扰 $d = 8 \cos(3t)$, 而在5 s 后加干扰 $d = 50 \cos(6t)$. 从仿真结果可以看出, $t = 0$ 时系统输出是干扰解耦的且与时滞无关的, 但控制是与外部干扰和时滞相关的.

进一步, 如果式(33) 取为

$$f_d = [0 \quad 0 \quad 0 \quad x_2(t - \tau_1) - x_4(t - \tau_3)]^T, \quad (36)$$

系统则满足推论1 的条件, 根据式(27) 和(28) 可得到无记忆状态反馈控制规律为

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{1 + 2e^{x_1(t) + x_3(t)}} \times \begin{bmatrix} e^{x_3(t)} (x_1(t) x_4(t) + x_4(t) - v_1) + \\ x_2(t) + x_3(t) - v_2 \\ v_1 - x_1(t) x_4(t) - x_4(t) + \\ 2e^{x_1(t)} (x_2(t) + x_3(t) - v_2) \end{bmatrix}. \quad (37)$$

同样可以保证由式(1), (32), (35), (36) 和(37) 构成的闭环系统的输出是干扰解耦且与时滞无关的. 仿真结果输出仍为图1 所示, 控制如图4 所示.

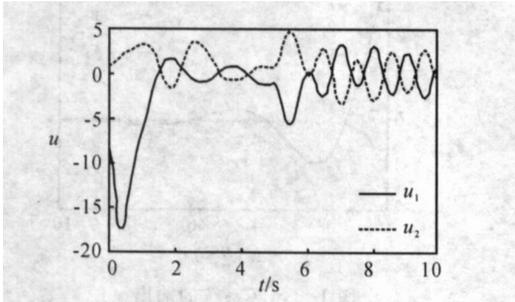


图4 $\tau_1 = 0.3 \text{ s}$, $\tau_2 = 0.5 \text{ s}$,
 $\tau_3 = 0.8 \text{ s}$ 时闭环系统控制 u

5 结 语

本文讨论了一类多时滞 MIMO 非线性系统的干扰解耦问题, 通过构造有记忆和无记忆非线性状态反馈控制规律, 保证相应闭环系统输出不受干扰影响并且是与时滞无关的. 利用本文的相关结论可进一步探讨此类系统的输出跟踪以及整个解耦系统的稳定问题等.

参考文献(References)

- [1] Isidori A. Nonlinear control systems [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1989.
- [2] Huijberts H J C, Moog C H, Pothin R. Input-output decoupling of nonlinear systems by static measurement feedback [J]. Systems and Control Letters, 2000, 39 (2): 109-114.

- [3] 夏小华, 高为炳. 非线性系统控制及解耦[M]. 北京: 科学出版社, 1997.
(Xia X H, Gao W B. Nonlinear system control and decoupling[M]. Beijing: Science Press, 1997.)
- [4] Chiasson J. A new approach to dynamic feedback linearization control of an induction motor [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1998, 43(3): 391-397.
- [5] De Leon J, Glumineau A, Guerra C. Control and observation of induction motors [C]. Proc of the American Control Conf. Chicago: Illinois, 2000: 589-593.
- [6] 张春林, 林飞, 宋文超, 等. 基于直接反馈线性化的异步电动机非线性控制[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23 (2): 99-102.
(Zhang C L, Lin F, Song W C, et al. Nonlinear control of induction motors based on direct feedback linearization[J]. Proc of CSEE, 2003, 23(2): 99-102.)
- [7] 张化光, 杨英旭, 柴天佑. 多变量模糊控制的现状与发展() [J]. 控制与决策, 1995, 10(4): 289-295.
(Zhang H G, Yang Y X, Chai T Y. The present status and future developments of multivariable fuzzy control (II) [J]. Control and Decision, 1995, 10(4): 289-295.)
- [8] Velasco M. Disturbance decoupling for time delay systems[J]. Int J of Robust Nonlinear Control, 1997, 7 (9): 847-864.
- [9] Moog C H, Castro-Linares R, Velasco-Villa M, et al. The disturbance decoupling problem for time-delay nonlinear systems [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2000, 45(2): 305-309.
- [10] Pothin R. Disturbance decoupling for a class of nonlinear MIMO systems by static measurement feedback[J]. Systems and Control Letters, 2001, 43 (2): 111-116.
- [11] Baser U, Celik M K K, Schumacher J M. Disturbance decoupling and robustness of stability [J]. Int J of Robust Nonlinear Control, 2000, 10(15): 1317-1336.
- [12] 胡品慧, 袁璞. 状态反馈预测控制干扰解耦的研究 [J]. 控制与决策, 2003, 18(2): 194-198.
(Hu P H, Yuan P. Study on disturbance decoupling of state feedback model predictive control[J]. Control and Decision, 2003, 18(2): 194-198.)
- [13] Wang W, Tang G Y, Zhou S S. Decoupling control and feedback linearization for a class of nonlinear time-delay systems [C]. 8th Int Conf on Control, Automation, Robotics and Vision. Kunming, 2004: 867-871.