

一类 MIMO 非线性系统的稳定干扰解耦控制

官清先^{1,2}, 张化光¹, 孟祥萍²

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

摘要: 基于非线性系统的微分几何理论相对阶概念, 研究了一类 MIMO 非线性系统的干扰解耦问题(DDP), 定义了 MIMO 系统关于干扰的向量相对阶, 给出了该类非线性系统通过静态状态反馈的干扰解耦可解的充分必要条件, 并进一步讨论了解耦系统反馈镇定问题, 给出了解耦系统可镇定的充分条件, 仿真结果验证了该方法的有效性.

关键词: 非线性系统; 向量相对阶; 反馈控制; 干扰解耦; 零动态

中图分类号: TP13 **文献标识码:** A

Disturbance decoupling control with stability
for a class of MIMO nonlinear systemsGONG Qing-xian^{1,2}, ZHANG Hua-guang¹, MENG Xiang-ping²

(1. School of Information Science & Engineering, Northeastern University, Shenyang Liaoning 110004, China;

2. Department of Electrical Engineering, Changchun Institute of Technology, Changchun Jilin 130012, China)

Abstract: Based on the relative-degree concept of differential geometry theory on nonlinear system, the disturbance decoupling problem (DDP) is studied for a class of MIMO nonlinear systems. First, the vector relative-degree associated with the disturbances is defined. Sufficient and necessary conditions are then given for solvability of DDP via static state feedback. Furthermore, the stability of the decoupled systems is discussed and its sufficient condition is given. Finally, Simulation results are given to illustrate the effectiveness of this method.

Key Words: nonlinear systems; vector relative degree; feedback control; disturbance decoupling; zero dynamics

1 引言(Introduction)

实际系统都不可避免地受到不同程度的干扰, 因此抗干扰研究已成为系统控制的重要课题, 一般在控制系统中, 消除干扰对系统的影响问题称为干扰解耦问题(disturbance decoupling problem, DDP). 近年来, 非线性 MIMO 系统解耦问题研究方法多集中于微分几何理论, 文献[1]集中介绍了相关的输入输出解耦方法, 这类方法优点是物理意义清晰, 虽然微分几何理论方法被认为理论性较强, 在工程应用中有一定局限性, 但利用该理论解决实际问题的例子也不鲜见(如文献[2]). 可见, 这种解耦方法在理论上基本趋于成熟. 干扰解耦问题在 20 世纪 70 年代就引起人们的关注并开始被研究, 多年来已

经取得很多成果^[3-5]. 文献[6]利用几何理论研究了一类 SISO 非线性系统的干扰解耦问题, 并给出了通过状态反馈干扰解耦可解的充分必要条件; 文献[7]提出了干扰解耦的补偿器法, 同时给出了该类系统干扰解耦可解的充分必要条件, 但这些方法都是对某类 SISO 控制系统的, 针对 MIMO 系统的相关文献还不多见. 文献[8,9]通过量测反馈方法解决干扰解耦问题, 并给出一些较好结果, 这些结果都是针对某类控制系统的, 往往有较严格条件要求. 因此, 对干扰解耦问题的研究依然有不少工作要做.

本文基于微分几何理论相对阶概念, 在非线性和系统输出输入解耦基础上, 研究了一类 MIMO 非线性系统的完全干扰解耦及其镇定问题. 本文首先定

收稿日期: 2004-07-25; 收修改稿日期: 2005-07-28.

基金项目: 国家杰出青年科学基金资助项目(60325311); 国家自然科学基金资助项目(60274017); 辽宁省自然科学基金资助项目(20022030).

义了MIMO非线性系统关于干扰的向量相对阶,接着给出了该类非线性系统通过状态反馈实现干扰解耦可解的充分必要条件,并进一步讨论了解耦系统反馈镇定问题,给出了解耦系统可镇定的充分条件,最后通过仿真实例验证了该方法的有效性.

2 问题的提出与定义 (Problem description and definition)

考虑MIMO非线性系统

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + g(x)u + e(x)d, \\ y = h(x). \end{cases} \quad (1)$$

其中: $x \in \mathbb{R}^n$ 为状态变量, $u \in \mathbb{R}^m$ 为输入变量, $d \in \mathbb{R}^l$ 为干扰, $y \in \mathbb{R}^m$ 为输出变量; $f(x), g(x), e(x), h(x)$ 为适当维数的非线性光滑解析函数.

考虑一个状态反馈控制规律

$$u = \alpha(x) + \beta(x)v. \quad (2)$$

其中: $\alpha(x)$ 为 m 维解析函数向量, $\beta(x)$ 为邻域内的 $m \times m$ 维非奇异矩阵, $v \in \mathbb{R}^m$ 为新的输入变量. 把式(2)作用于非线性系统(1),可得到闭环系统

$$\begin{cases} \dot{x} = \tilde{f}(x) + \tilde{g}(x)v + e(x)d, \\ y = h(x), \end{cases} \quad (3)$$

其中

$$\tilde{f} = f(x) + g(x)\alpha(x), \quad (4)$$

$$\tilde{g}(x) = g(x)\beta(x), \quad (5)$$

具有与系统(1)相同的结构.

定义 1 对系统(1),如果能通过静态状态反馈(2)使得系统(3)的输出 y 不会受到干扰 d 的影响^[6],则称非线性系统(3)是干扰解耦的,并称非线性系统(1)是干扰解耦可解的.

3 MIMO非线性系统的干扰解耦 (Disturbance decoupling for the MIMO nonlinear systems)

先考虑非线性系统(1)无干扰(即 $d=0$)的情况.

定义 2^[1] MIMO非线性系统(1)在 x_0 具有关于输入 u 的向量相对阶 $\rho = [\rho_1, \dots, \rho_m]$, 如果

i) 对所有 $i, j = 1, \dots, m, k < \rho_i - 1$, 在 x_0 邻域内的所有的 x 有

$$L_{g_j} L_f^k h_i(x) = 0. \quad (6)$$

其中

$$L_f^k h_i(x) := \frac{\partial(L_f^{k-1} h_i(x))}{\partial x} f(x),$$

$$L_g L_f h_i(x) := \frac{\partial(L_f h_i(x))}{\partial x} g(x).$$

ii) $m \times m$ 解耦矩阵

$$A(x) = \begin{bmatrix} L_{g_1} L_f^{\rho_1-1} h_1(x) & \cdots & L_{g_m} L_f^{\rho_1-1} h_1(x) \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ L_{g_1} L_f^{\rho_m-1} h_m(x) & \cdots & L_{g_m} L_f^{\rho_m-1} h_m(x) \end{bmatrix} \quad (7)$$

在 $x = x_0$ 是非奇异的.

命题 1^[1] 如果系统(1) ($d=0$ 时) 在 x_0 点具有相对阶,即解耦矩阵 $A(x)$ 在 x_0 点非奇异,那么系统输入输出解耦在 x_0 附近可通过一个静态状态反馈(2) (具有非奇异 $\beta(x)$) 解决. 反之也成立.

下面考虑非线性系统(1)受到干扰影响(即 $d \neq 0$) 的情况.

设 ρ^F 为反馈闭环系统(3)关于新输入 v 的向量相对阶.

定理 1 如果MIMO非线性系统(1)具有关于输入 u 的向量相对阶 ρ , 则通过状态反馈(2)构成的闭环解耦系统(3)具有关于新输入 v 的向量相对阶 ρ^F , 且

$$\rho^F = \rho. \quad (8)$$

证 因为系统(1)与(3)具有相同的结构,由式(2)知若它们分别具有向量相对阶 ρ, ρ^F , 则 ρ 与 ρ^F 具有相同的维数 m .

考虑系统(3)中第 i 个输出 $y_i, i = 1, \dots, m$, 由相对阶定义

$$L_{\tilde{g}} h_i(x) = L_{g\beta} h_i(x) = \frac{\partial h_i(x)}{\partial x} g\beta = (L_g h_i(x))\beta. \quad (9)$$

显然,因为 β 是非奇异的,故若 $\rho_i = 1$, 有 $L_g h_i(x) \neq 0$, 则 $L_{\tilde{g}} h_i(x) \neq 0$, 有 $\rho_i^F = 1$, 即 $\rho_i = \rho_i^F$; 若 $\rho_i > 1$, 有 $L_g h_i(x) = 0$, 则 $L_{\tilde{g}} h_i(x) = 0$, 即 $\rho_i^F > 1$.

同样,当 $k > 1$ 时,

$$\begin{aligned} L_{\tilde{g}} L_f^{(k-1)} h_i(x) &= \\ L_{\tilde{g}} (L_f^{(k-1)} h_i(x) + L_{g\alpha}^{(k-1)} h_i(x)) &= \\ L_{\tilde{g}} (L_f^{(k-1)} h_i(x) + (L_g^{(k-1)} h_i(x))\alpha) &= \\ L_g (L_f^{(k-1)} h_i(x)) + (L_g^{(k-1)} h_i(x))\alpha\beta &= \\ (L_g L_f^{(k-1)} h_i(x) + L_g (L_g^{(k-1)} h_i(x))\alpha)\beta &= \\ (L_g L_f^{(k-1)} h_i(x) + (L_g^k h_i(x))\alpha)\beta. \end{aligned} \quad (10)$$

由式(9),当 $\rho_i > 1$ 时 $L_g h_i(x) = 0$, 有 $L_{\tilde{g}} h_i(x) = 0$, β 是非奇异的,所以式(10)中,若

$$L_g L_f^{(k-1)} h_i(x) = 0, \quad (11)$$

则有 $L_{\tilde{g}} L_f^{(k-1)} h_i(x) = 0$. 当 $k = \rho_i$ 时,

$$L_g L_f^{(k-1)} h_i(x) \neq 0, \quad (12)$$

则有 $L_{\tilde{g}} L_f^{(k-1)} h_i(x) \neq 0$, 则 $\rho_i^F = k$, 即有 $\rho_i^F = \rho_i$, 得证.

定义 3 MIMO 非线性系统(1)在 x_0 具有关于干扰 d 的向量相对阶 $\sigma = [\sigma_1, \dots, \sigma_m]$, 如果对所有 $i, j = 1, \dots, m; k < \sigma_i - 1$ 在 x_0 的邻域内所有的 x 有

$$L_g L_f^k h_i(x) = 0, \quad (13)$$

且

$$L_g L_f^{\sigma_i - 1} h_i(x) \neq 0. \quad (14)$$

注 1 如果 $\sigma_i > n$, 则定义 $\sigma_i = \infty$.

定理 2 假设非线性系统(1)具有关于输入 u 的向量相对阶 ρ 及关于干扰 d 的向量相对阶 σ , 那么系统在 x_0 点干扰解耦可解的充分必要条件是

$$\rho_i < \sigma_i, \quad i = 1, \dots, m. \quad (15)$$

证 充分性. 若 $\rho_i < \sigma_i$, 则

$$y_i^{(k)} = L_f^k h_i(x), \quad i = 1, \dots, m, \quad k = 1, \dots, \rho_i - 1, \quad (16)$$

$$y_i^{(\rho_i)} = L_f^{\rho_i} h_i(x) + L_g L_f^{\rho_i - 1} h_i(x) u(x) + L_g L_f^{\rho_i - 1} h_i(x) d(x), \quad i = 1, \dots, m. \quad (17)$$

其中

$$L_g L_f^{\rho_i - 1} h_i(x) \neq 0 \text{ 而 } L_g L_f^{\rho_i - 1} h_i(x) = 0.$$

这样定义反馈控制规律

$$\begin{cases} \alpha(x) = -A^{-1}(x)b(x), \\ \beta(x) = A^{-1}(x). \end{cases} \quad (18)$$

其中

$$b(x) = \begin{bmatrix} L_f^{\rho_1} h_1(x) \\ \vdots \\ L_f^{\rho_m} h_m(x) \end{bmatrix}. \quad (19)$$

由式(1)(2)构成的闭环系统在新坐标下为^[1]

$$\begin{cases} \dot{\xi}_j^i = \xi_{j+1}^i, \quad i = 1, \dots, m, \quad j = 1, \dots, \rho_i - 1, \\ \dot{\xi}_{\rho_i}^i = v_i, \quad i = 1, \dots, m, \\ \dot{\eta} = q(\xi, \eta) - p(\xi, \eta) [A(\xi, \eta)]^{-1} b(\xi, \eta) + p(\xi, \eta) [A(\xi, \eta)]^{-1} v, \\ y_j = \xi_j^j, \quad j = 1, \dots, m. \end{cases} \quad (20)$$

显然, v 不依赖于干扰 d , 则输出 y 不受干扰 d 的影响, 实现了系统干扰解耦.

必要性. 如果闭环系统(3)是干扰解耦的, 即输出 y 与干扰 d 无关. 这样对 $y_i, i = 1, \dots, m$,

$$y_i^{(1)} = L_f h_i(x) + L_g h_i(x) v + L_e h_i(x) d_i, \quad (21)$$

有 $L_e h_i(x) = 0$, 必 $\sigma_i > 1$. 如果 $L_g h_i(x) \neq 0$, 即 $\rho_i^f = 1$, 再由定理 1 有 $\rho_i = 1$, 得到 $\rho_i < \sigma_i$.

如果 $L_g h_i(x) = 0$, 式(21)可写为

$$y_i^{(1)} = L_f h_i(x).$$

又有

$$y_i^{(2)} = L_f^2 h_i(x) + L_g L_f h_i(x) v + L_e L_f h_i(x) d_i. \quad (22)$$

同理, 由假设 $L_e L_f h_i(x) = 0$, 即 $\sigma_i > 2$. 如果 $L_g L_f h_i(x) \neq 0$, 即 $\rho_i^f = 2$, 则由定理 1 有 $\rho_i = 2$, 得到 $\rho_i < \sigma_i$.

重复上面的过程即可证明条件的必要性.

4 镇定问题 (Problem of stabilization)

经坐标变换后, 系统(1)具有如下形式:

$$\begin{cases} \dot{\xi} = A\xi + Bv, \\ \dot{\eta} = \bar{q}(\xi, \eta) + k(\xi, \eta)d, \\ y_j = \xi_j^j, \quad j = 1, \dots, m. \end{cases} \quad (23)$$

其中

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

$$A_i = \begin{bmatrix} 0 & I_{\rho_i - 1} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B_i = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}_{\rho_i \times 1}, \quad i = 1, \dots, m.$$

系统(23)实际上是一个无干扰影响的完全输入输出解耦系统. 取

$$\begin{aligned} v_i &= -c_{i0} \xi_1^i - c_{i1} \xi_2^i - \dots - \\ & c_{i, \rho_i - 1} \xi_{\rho_i}^i + w_i, \quad i = 1, \dots, m. \end{aligned} \quad (24)$$

其中 w_i 是参考输入.

显然, 对其中 $\dot{\xi} = A\xi + Bv$, 只要通过选择适当参数 c_{ij} 可使得设计的系统具有任意指定的输入输出稳定性质.

另一子系统 $\dot{\eta} = \bar{q}(\xi, \eta) + k(\xi, \eta)d$ 在输入输出关系中是反映不出来的. 当 $\xi = 0$ 时,

$$\dot{\eta} = \bar{q}(0, \eta) + k(0, \eta)d \quad (25)$$

叫做系统的零动态, 与系统稳定性有重要关系. 此时若要使整个系统稳定, 只需零动态系统的状态指数稳定即可. 由此不加证明地给出如下定理.

定理 3 假设非线性系统(1)干扰解耦可解, 即满足定理 2, 则系统稳定干扰解耦可解的充分条件是系统零动态(25)状态指数稳定.

下面通过仿真示例进一步说明.

5 仿真示例 (Simulation example)

考虑非线性系统(1), 假设

$$f(x) = [f_1(x) \quad f_2(x) \quad \dots \quad f_5(x)]^T,$$

其中

$$f_1(x) = x_2, \quad f_2(x) = (x_2 + 1)x_3,$$

$$f_3(x) = x_4, \quad f_4(x) = (x_4 + 1)x_5,$$

$$f_5(x) = -(x_1 + 1)(x_2 + 1)^2 - (x_3 - 1) - (x_1 + 1)x_3 - (x_3 + 1)x_4 - (x_4 + 1)x_5,$$

$$g(x) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, e(x) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, y(x) = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_3 \end{bmatrix}.$$

显然, $x_0 = 0$ 为系统平衡点, 由定义 2 和定义 3 容易得到系统相对阶 $\rho = [2 \ 2], \sigma = [5 \ 3]$. 根据定理 2 可知, 该系统满足干扰解耦可解条件, 即系统是干扰可解的. 于是由式 (7) (19) 可得到

$$A(x) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, b(x) = \begin{bmatrix} (x_2 + 1)x_3 \\ (x_4 + 1)x_5 \end{bmatrix}. \quad (26)$$

再由式 (24) (这里取参考输入 w 为零) 有

$$v = \begin{bmatrix} -c_{11}x_1 - c_{12}x_2 \\ -c_{21}x_3 - c_{22}x_4 \end{bmatrix}. \quad (27)$$

取 $c_{11} = 1, c_{12} = 2, c_{21} = 2, c_{22} = 3$, 由式 (18) (20) (24) (26) 和 (27) 可得到控制

$$u = \begin{bmatrix} -(x_2 + 1)x_3 - x_1 - 2x_2 \\ -(x_4 + 1)x_5 - 2x_3 - 3x_4 \end{bmatrix}. \quad (28)$$

这里取干扰函数 $d(t) = 2\cos(3t)$, 分别在初始条件为 $x(0) = [2 \ -1 \ -1 \ -1 \ 1.5]^T$ 和 $x(0) = [-1 \ 2 \ 0.5 \ -1 \ 0.3]^T$ 下, 对由反馈控制 (28) 作用的闭环系统进行仿真, 结果分别如图 1 和图 2 所示. 从图可以看出, 控制输入 u_2 受干扰 d 的影响, 但输出 y 已经不受干扰 d 的影响, 且输出是稳定的. 不难得到, 系统零动态为 $\eta = 2\cos(3t)$ 是稳定的, 可见整个解耦系统是稳定的, 即实现了系统的稳定干扰解耦.

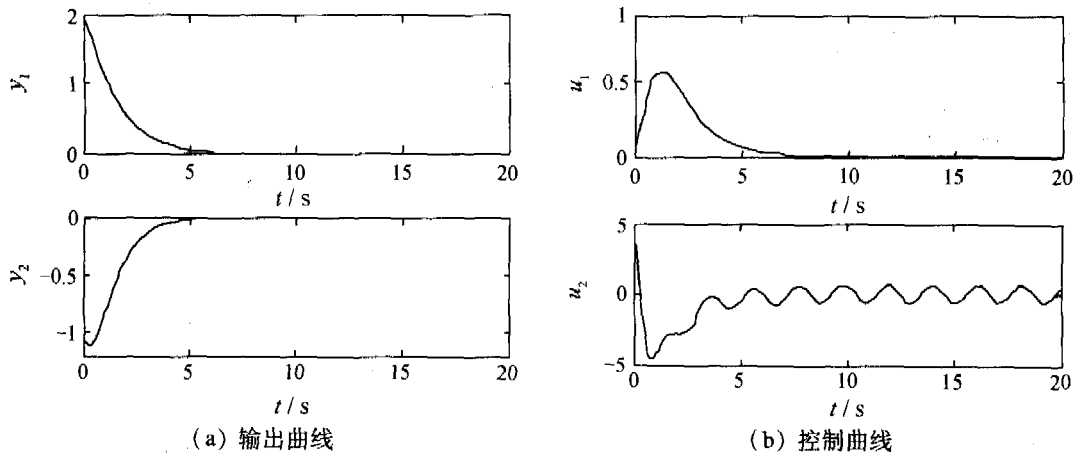


图 1 初始条件为 $x(0) = [2 \ -1 \ -1 \ -1 \ 1.5]^T$ 时的仿真响应曲线

Fig. 1 Simulation response of the closed-loop system under initial conditions $x(0) = [2 \ -1 \ -1 \ -1 \ 1.5]^T$

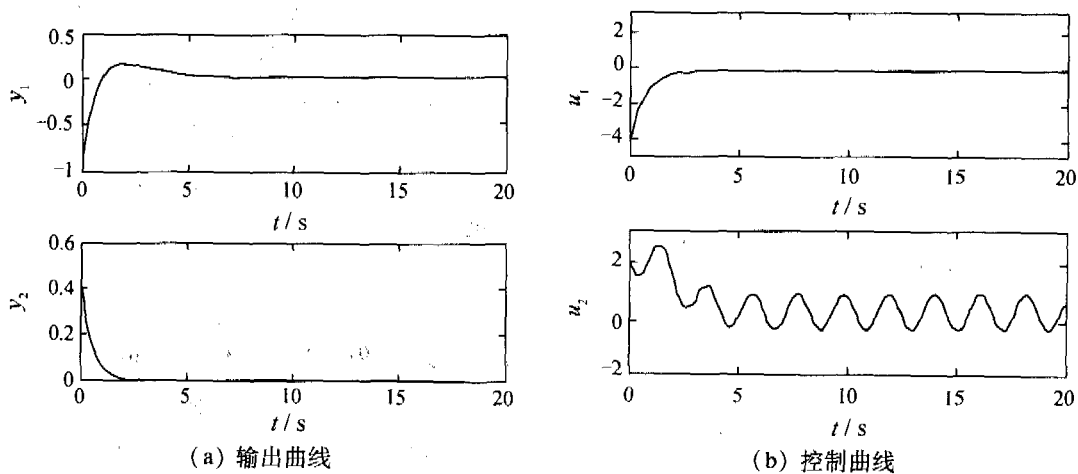


图 2 初始条件为 $x(0) = [-1 \ 2 \ 0.5 \ -1 \ 0.3]^T$ 时的仿真响应曲线

Fig. 2 Simulation response of the closed-loop system under initial conditions $x(0) = [-1 \ 2 \ 0.5 \ -1 \ 0.3]^T$

6 结论 (Conclusion)

本文应用微分几何方法研究了一类 MIMO 非线性系统的干扰解耦问题, 定义了 MIMO 系统干扰

的向量相对阶, 给出了该类非线性系统的干扰解耦的充分必要条件, 并给了严格的证明. 进一步说明了静态状态反馈解耦系统的镇定方法, 仿真结果验

证了该方法的有效性. 对 MIMO 非线性时滞系统的干扰解耦是下一步继续研究的课题.

参考文献(References):

- [1] 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 Xiaohua, GAO Weibing. *Control and Decoupling of Nonlinear System* [M]. Beijing: Science Press, 1997.)
- [2] 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.
- [3] TZAFESTAS S G. Frequency domain conditions for disturbance rejection [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1973, 25(2): 405 - 415.
- [4] CURTAIN R F. Disturbance decoupling by measurement feedback with stability for infinite-dimensional systems [J]. *Int J Control*, 1986, 43(6): 1723 - 1743.
- [5] PANDOLFI L. Disturbance decoupling and invariant subspaces for delay systems [J]. *Applied Mathematics & Optimization*, 1986, 14(1): 55 - 72.
- [6] VELASCO M. Disturbance decoupling for time delay systems [J]. *Int J of Robust Nonlinear Control*, 1997, 7(9): 847 - 864.
- [7] 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
- [8] XIA X, MOOG C H. Disturbance decoupling by measurement feedback for SISO nonlinear systems [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1999, 44(7): 1425 - 1429.
- [9] POTHIN R. Disturbance decoupling for a class of nonlinear MIMO systems by static measurement feedback [J]. *Systems & Control Letters*, 2001, 43(2): 111 - 116.
- [10] BASER U, CEVIK M K K, SCHUMACHER J M. Disturbance decoupling and robustness of stability [J]. *Int J of Robust Nonlinear Control*, 2000, 10(15): 1317 - 1336.
- [11] MARINO R, TOMEI P. Adaptive output feedback tracking with almost disturbance decoupling for a class of nonlinear systems [J]. *Automatica*, 2000, 36(12): 1871 - 1877.
- [12] MARINO R, TOMEI P. Adaptive output feedback regulation with almost disturbance decoupling for nonlinear parameterized systems [J]. *Int J of Robust Nonlinear Control*, 2000, 10(8): 655 - 669.
- [13] LIU Xiaoping. Local disturbance decoupling of nonlinear singular systems [J]. *Int J Control*, 1998, 70(7): 685 - 702.
- [14] LIU Xiaoping, DANIEL W C Ho. Disturbance decoupling of linear time-varying singular systems [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2002, 47(2): 335 - 341.
- [15] 王文涛, 李媛, 刘晓平, 等. 非线性奇异控制系统的干扰解耦问题[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2003, 24(10): 945 - 948.
(WANG Wentao, LI Yuan, LIU Xiaoping, et al. Disturbance decoupling of nonlinear singular control systems [J]. *J of Northeastern University(Natural Science)*, 2003, 24(10): 945 - 948.)
- [16] ZHANG Huaguang, CAI Lilong, BIEN Zeungnam. A fuzzy basis function vector based multivariable adaptive controller for nonlinear systems [J]. *IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics*, 2000, 30(1): 210 - 217.
- [17] ZHANG Huaguang, QUAN Yongbing. Modeling identification and control of a class of nonlinear system [J]. *IEEE Trans on Fuzzy Systems*, 2001, 9(2): 349 - 354.
- [18] 王晓华, 刘晓平. 非线性广义时变系统的干扰解耦[J]. 自动化学报, 2000, 26(6): 798 - 802.
(WANG Xiaohua, LIU Xiaoping. Disturbance decoupling of nonlinear generalized time-varying systems [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2000, 26(6): 798 - 802.)
- [19] 张智焕, 玉树青, 荣冈. 基于精确线性化的 MIMO 双线性系统预测函数控制[J]. 控制理论与应用, 2003, 20(3): 477 - 480.
(ZHANG Zhihuan, WANG Shuqing, RONG Gang. Predictive function control based on global feedback linearization for MIMO bilinear system [J]. *Control Theory & Applications*, 2003, 20(3): 477 - 480.)

作者简介:

宫清先 (1968—), 男, 东北大学信息科学与工程学院博士研究生, 主要研究方向为非线性控制及解耦等, E-mail: qxgong@21cn.com;

张化光 (1959—), 男, 东北大学电气自动化研究所所长, 教授, 博士生导师, 主要研究领域为复杂系统的模糊自适应控制、非线性控制、混沌控制等, E-mail: hg_zhang@21cn.com;

孟祥萍 (1961—), 女, 长春工程学院教授, 博士, 主要研究人工智能、数据挖掘、智能控制理论及应用等, E-mail: xp_meng@ccit.edu.cn.