

非线性系统的有限时间精细抗干扰控制

韩俊杰, 魏新江

(鲁东大学 数学与统计科学学院, 山东 烟台 264039)

摘要: 本文研究一类具有多源干扰的非线性系统在有限时间条件下抗干扰问题, 提出有限时间精细抗干扰控制方案。通过设计非线性干扰观测器, 解决系统中含有的不确定性非线性项, 同时保证复合系统全局有限时间稳定。最后, 通过一个数值仿真实例验证了本文所设计的控制方案是可行的。

关键词: 基于干扰观测器的控制; 有限时间控制; 隐式李雅普诺夫函数; 全局有限时间稳定; 多源干扰

中图分类号: TP273 文献标志码: A 文章编号: 1673-8020(2021)03-0193-07

具有不同来源和不同类型的干扰称为多源干扰, 这类干扰广泛存在于复杂的工程系统中。由于不同类型干扰会影响系统的控制精度, 所以针对系统的抗干扰问题受到广泛关注^[1-2]。20世纪80年代末提出基于干扰观测器的控制(disturbance observer-based control, DOBC), 主要用来处理干扰抑制问题^[3]。文献[4]通过设计非线性干扰观测器估计一类非线性系统的干扰, 提出非线性 DOBC 方案; 文献[5]发现对于一类多输入多输出非线性系统, 其干扰可以由外源系统产生, 就此提出一种新的 DOBC 方法来估计和抑制干扰; 文献[6]研究了一类含有不确定非线性项的时滞系统 DOBC 问题。随后, 针对带有未知非线性项的受扰系统, 提出 DOBC 与 H_∞ 控制、模糊控制相结合的控制方法。文献[7]针对非线性系统中存在的部分信息已知的干扰, 设计干扰观测器进行估计, 并将 DOBC 与模糊控制相结合, 进一步提升系统的抗干扰能力; 文献[8]针对一类具有多源干扰的复杂连续非线性系统, 提出一种将 DOBC 与 H_∞ 控制相结合的控制方案, 分别对不同类型的干扰进行抑制和抵消。

近年来, DOBC 方法被广泛应用到多源干扰系统的复合分层抗干扰控制中, 主要目标是对多源干扰进行特有性质分析和系统性能分析, 并根据不同干扰的不同特征分类建模, 分别实现干扰的补偿和抑制; 另一方面, 有限时间控制以其快速的瞬态响应、强鲁棒性和有限时间收敛等特点引起人们关注^[9-12], 为了安全或提高工作效率, 工程实践中往往需要将控制系统的收敛时间严格限制在一定范围内^[13-15]。基于上述应用要求, 有限时间控制理论已成功应用于永磁同步电机系统^[16]、刚体航天器姿态跟踪控制^[17]等领域。

在此基础上, 本文提出一种针对多源干扰非线性系统的有限时间精细抗干扰控制策略, 主要创新点总结如下:

1) 与文献[18]相比, 本文将有限时间控制应用到抗干扰控制中, 提出有限时间精细抗干扰控制方法, 保证复合系统最终达到全局有限时间稳定。此外, 本文所提出的控制方法保证系统的收敛时间受到约束, 克服现有的抗干扰控制方法中对收敛时间没有约束的缺点。

2) 将隐式 Lyapunov 函数应用于有限时间稳定性分析, 以检验隐式公式的所有稳定条件, 实现全局有限时间稳定。与现有的有限时间控制方法相比, 这种方法相对简单, 易于实现。

收稿日期: 2020-10-22; 修回日期: 2021-03-06

基金项目: 国家自然科学基金(61973149)

第一作者简介: 韩俊杰(1996—), 女, 山东潍坊人, 硕士研究生, 研究方向为系统控制与优化。E-mail: 843822910@qq.com

通信作者简介: 魏新江(1977—), 男, 山东东营人, 教授, 硕士研究生导师, 博士, 研究方向为非线性系统控制、鲁棒控制等。E-mail:

weixinjiang@163.com

1 问题描述

考虑以下具有多源干扰的非线性系统:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + B[u(t) + d_0(t) + f(x(t), t)] + Fd(t, x(t)), \quad (1)$$

其中: $x(t) \in \mathbf{R}^n$ 是系统的状态 $u \in \mathbf{R}^m$ ($m < n$) 是控制输入 $A \in \mathbf{R}^{n \times n}$ $B \in \mathbf{R}^{n \times m}$ $F \in \mathbf{R}^{n \times m}$ 均是系统的系数矩阵; $d_0(t)$ 是部分信息已知的干扰 $d(t, x(t))$ 是不确定有界干扰, 且满足假设 1; $f(x(t), t)$ 是未知非线性向量函数, 且满足假设 3。本文干扰系统描述如下:

$$\begin{cases} \dot{z}(t) = W\omega(t), \\ d_0(t) = G\omega(t), \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\omega(t) \in \mathbf{R}^m$ 是干扰系统的状态; W, G 是已知的系数矩阵。

假设 1 对于任意向量 $x(t)$, 干扰 $d(t, x(t))$ 满足:

$$\|d(t, x(t))\|^2 \leq \alpha \|\Gamma\| \|x(t)\|^2 + \beta, \quad (3)$$

其中, Γ 是正定矩阵, 常数 $\alpha \geq 0, \beta \geq 0$ 。

假设 2 (A, B) 为能控的, 且 (W, BG) 是可观测的。

假设 3 对于任意向量 $x_1(t) \in \mathbf{R}^n$, 非线性向量函数 $f(x(t), t)$ 满足: $f(x(0), 0) = 0, \|f(x_1(t), t) - f(x_2(t), t)\| \leq \|U(x_1(t) - x_2(t))\|$, 其中 U 是连续加权矩阵。

定义 1^[18] 考虑以下系统

$$\dot{x}(t) = f(t, x(t)), \quad (4)$$

其中, $x(t) \in \mathbf{R}^n$ 表示状态向量, $f: \mathbf{R}_+ \rightarrow \mathbf{R}^n$ 表示非线性向量函数。称系统 (4) 是全局有限时间稳定的, 需满足下列两个条件:

(i) 存在局部有界函数 $T: \mathbf{R}^n \setminus \{0\} \rightarrow \mathbf{R}_+$, 使得所有的 $x_0 \in \mathbf{R}^n \setminus \{0\}$, 系统 (4) 的任意解 $x(t, x_0)$ 定义在 $[0, T(x_0)]$, 且满足 $\lim_{t \rightarrow T(x_0)} x(t, x_0) = 0$, 这里函数 T 称为系统 (4) 的沉降时间函数。

(ii) $\exists \delta \in K$, 有 $\|x(t, x_0)\| \leq \delta(\|x_0\|)$, 其中 $x_0 \in \mathbf{R}^n, t \in \mathbf{R}_+$ 。

引理 1^[18] 假设存在连续函数 $Q(V(t), x(t)): \mathbf{R}_+ \times \mathbf{R}^n \rightarrow \mathbf{R}$, 满足下列条件:

(i) $Q(V(t), x(t))$ 在 $\mathbf{R}_+ \times \mathbf{R}^n \rightarrow \mathbf{R}$ 上是连续可微的;

(ii) 对于任意的 $x(t) \in \mathbf{R}^n \setminus \{0\}$, 存在 $V(t) \in \mathbf{R}_+$, 使得 $Q(V(t), x(t)) = 0$;

(iii) 令 $\Omega = \{(V(t), x(t)) \in \mathbf{R}_+ \times \mathbf{R}^n: Q(V(t), x(t)) = 0\}$, 并且

$$\lim_{\substack{x \rightarrow 0 \\ (V(t), x(t)) \in \Omega}} V = 0^+, \quad \lim_{\substack{V \rightarrow 0 \\ (V(t), x(t)) \in \Omega}} \|x\| = 0, \quad \lim_{\substack{\|x\| \rightarrow +\infty \\ (V(t), x(t)) \in \Omega}} V = +\infty;$$

(iv) 对于 $x(t) \in \mathbf{R}^n \setminus \{0\}, V(t) \in \mathbf{R}_+$, 有不等式 $\frac{\partial Q(V(t), x(t))}{\partial V(t)} \leq 0$ 成立;

(v) 存在 $c \in \mathbf{R}_+$ 和 $\mu \in (0, 1]$, 有 $\frac{\partial Q(V(t), x(t))}{\partial V(t)} f(t, x) \leq cV_q^{1-\mu} \frac{\partial Q(V(t), x(t))}{\partial V(t)}$, $(V(t), x(t)) \in \Omega$, 其中 V_q 为 $Q(V(t), x(t)) = 0$ 的解。

则系统 (4) 在 $T(x_0) \leq \frac{V_0^\mu}{c\mu}$ 内是全局有限时间稳定, 其中 $V_0 = V(0)$ 满足 $Q(V_0, x_0) = 0$ 。

2 自适应非线性干扰观测器的设计

假设系统状态 $x(t)$ 可以通过观测得到, 设计干扰观测器如下:

$$\begin{cases} \hat{d}_0 = G\hat{\omega}(t) , \\ \hat{\omega} = v(t) - Lx(t) , \\ \dot{v}(t) = (W + LBG)\hat{\omega} + L[Ax(t) + Bu(t) + Bf(x(t), t)] , \end{cases} \quad (5)$$

其中: $\hat{\omega}(t)$ 是 $\omega(t)$ 估计值 $v(t)$ 是辅助变量。

定义干扰误差为 $e_\omega(t) = \omega(t) - \hat{\omega}(t)$, 从而得到误差系统:

$$\dot{e}_\omega(t) = (W + LBG)e_\omega(t) + LFd(t, x(t)) . \quad (6)$$

设计有限时间干扰观测控制器:

$$u(t) = -\hat{d}_0 + \rho^{1-\mu}KDr(\rho^{-1})x(t) , \quad (7)$$

其中: K 是控制增益; $Q(V(t), \bar{x}(t))$ 是引理 1 中的隐式李雅普诺夫函数, ρ 是 $Q(V(t), \bar{x}(t)) = 0$ 对 $V(t)$ 的解, 可以用二分法求解^[19]; $Dr(\rho^{-1}) = (\rho^{-1})^{1+\mu}E_n$, $\rho < \mu < 1$, E_n 表示 n 阶单位矩阵。

将式 (7) 代入式 (1) 中, 得到闭环系统为:

$$\dot{x}(t) = [A + \rho^{1-\mu}KDr(\rho^{-1})]x(t) + BGe_\omega(t) + Bf(x(t), t) + Fd(t, x(t)) , \quad (8)$$

令 $\bar{x}(t) = [x(t) \ e_\omega(t)]^T$, 将误差系统 (6) 与闭环系统 (8) 相复合, 得到复合系统:

$$\dot{\bar{x}} = (\bar{A}_{11} + \bar{A}_{12})\bar{x}(t) + (\bar{F}_{11} + \bar{F}_{12})\bar{d}(t) , \quad (9)$$

其中

$$\begin{aligned} \bar{x}(t) &= \begin{bmatrix} x(t) \\ e_\omega(t) \end{bmatrix} \quad \bar{A}_{11} = \begin{bmatrix} A + \rho^{1-\mu}KDr(\rho^{-1}) & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & W + LBG \end{bmatrix} \quad \bar{A}_{12} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & BG \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} , \\ \bar{F}_{11} &= \begin{bmatrix} B & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & LF \end{bmatrix} \quad \bar{F}_{12} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & F \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad \bar{d}(t) = \begin{bmatrix} f(x(t), t) \\ d(t, x(t)) \end{bmatrix} . \end{aligned}$$

3 主要结果

本节主要是设计观测器增益 L 和控制增益 K , 使复合系统 (9) 满足干扰衰减性能。

定理 1 考虑具有扰动 (2) 的系统 (1), 如果存在矩阵 $X_1 > 0$, $X_2 > 0$, 常数 $0 < \mu < 1$, $\rho < \eta < 1$ 和矩阵 R_1, L 满足

$$\left\{ \begin{aligned} & E_\mu H + HE_\mu > 0 , \\ \theta &= \begin{bmatrix} \Delta_1 & BGX_2 & \rho^\mu B & \rho^\mu F \\ * & \Delta_2 & \rho^\mu LB & \rho^\mu LF \\ * & * & -\rho^{2\mu}I & \mathbf{0} \\ * & * & * & -\rho^{2\mu}I \end{bmatrix} < 0 , \end{aligned} \right. \quad (10)$$

其中, * 表示由矩阵的对称性得到的子块,

$$\begin{aligned} \Delta_1 &= AX_1 + \rho^{1-\mu}BR_1 + X_1A^T + \rho^{1-\mu}R_1^TB^T + 2(1 + \mu)X_1 , \\ \Delta_2 &= (W + LBG)X_2 + X_2(W^T + G^TB^TL^T) + 2X_2 , \\ E_\mu &= \text{diag}\{(1 + \mu)E_n, E_s\} , \end{aligned}$$

设计观测器 (5) 和控制器 (7), 选取控制增益 $K = R_1X_1^{-1}Dr_1(\rho)$, 则复合系统 (9) 是全局有限时间稳定的。

证明 考虑如下 Lyapunov 函数:

$$Q(V(t), x(t)) = \bar{x}^T(t)Dr(\rho^{-1})HDr(\rho^{-1})\bar{x}(t) - 1 , \quad (11)$$

定义

$$H = \begin{bmatrix} H_1 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & H_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1^{-1} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & X_2^{-1} \end{bmatrix} > 0 ,$$

$$Dr(\rho^{-1}) = \begin{bmatrix} Dr_1(\rho^{-1}) & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & Dr_2(\rho^{-1}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (\rho^{-1})^{1+\mu} E_n & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \rho^{-1} E_s \end{bmatrix}.$$

可以验证下面不等式

$$\frac{\lambda_{\min}(\mathbf{H}) \|\bar{\mathbf{x}}\|^2}{\max\{\rho^{2+2(n-1)\mu} \rho^2\}} \leq Q(V(t), \mathbf{x}(t)) + 1 \leq \frac{\lambda_{\max}(\mathbf{H}) \|\bar{\mathbf{x}}\|^2}{\min\{\rho^{2+2(n-1)\mu} \rho^2\}}$$

适用于所有 $\bar{\mathbf{x}}(t) \in \mathbf{R}^{n+s} \setminus \{0\}$ 并且存在 $V^-(t) \in \mathbf{R}_+$ 和 $V^+(t) \in \mathbf{R}_+$ 使得 $Q(V^-(t), \mathbf{x}(t)) < 0 < Q(V^+(t), \mathbf{x}(t))$ 。因此,由式(11)定义的隐式李雅普诺夫函数满足引理 1 的条件(i)~(iii)。此外,可以验证

$$\frac{\partial Q(V(t), \mathbf{x}(t))}{\partial V(t)} = -\rho^{-1} \bar{\mathbf{x}}^T(t) Dr(\rho^{-1}) (E_\mu H + HE_\mu) Dr(\rho^{-1}) \bar{\mathbf{x}}(t) < 0, \tag{12}$$

其中 $E_\mu H + HE_\mu > 0$, 则引理 1 的条件(iv)也成立。考虑到这一点,可以得到

$$\begin{aligned} & \frac{\partial Q(V(t), \bar{\mathbf{x}}(t))}{\partial \bar{\mathbf{x}}(t)} [(\bar{A}_{11} + \bar{A}_{12}) \bar{\mathbf{x}}(t) + (\bar{F}_{11} + \bar{F}_{12}) \bar{\mathbf{d}}(t)] = \\ & \bar{\mathbf{x}}^T(t) Dr(\rho^{-1}) (H\bar{A}_{11} + \bar{A}_{11}^T H) Dr(\rho^{-1}) \bar{\mathbf{x}}(t) + \rho^{-\mu} \bar{\mathbf{x}}^T(t) Dr(\rho^{-1}) (H\bar{A}_{12} + \bar{A}_{12}^T H) Dr(\rho^{-1}) \bar{\mathbf{x}}(t) + \\ & \bar{\mathbf{x}}^T(t) Dr(\rho^{-1}) (H\bar{F}_{11} + \bar{F}_{11}^T H) Dr(\rho^{-1}) \bar{\mathbf{d}}(t) + \rho^{-\mu} \bar{\mathbf{x}}^T(t) Dr(\rho^{-1}) (H\bar{F}_{12} + \bar{F}_{12}^T H) Dr(\rho^{-1}) \bar{\mathbf{d}}(t) = \\ & \begin{bmatrix} Dr(\rho^{-1}) \bar{\mathbf{x}}(t) \\ Dr(\rho^{-1}) \bar{\mathbf{d}}(t) \end{bmatrix}^T \theta_0 \begin{bmatrix} Dr(\rho^{-1}) \bar{\mathbf{x}}(t) \\ Dr(\rho^{-1}) \bar{\mathbf{d}}(t) \end{bmatrix} + \rho^{-\mu} \bar{\mathbf{d}}^T(t) Dr(\rho^{-1}) Dr(\rho^{-1}) \bar{\mathbf{d}}(t) - \\ & \rho^{-\mu} \bar{\mathbf{x}}^T(t) Dr(\rho^{-1}) (E_\mu H + HE_\mu) Dr(\rho^{-1}) \bar{\mathbf{d}}(t), \end{aligned} \tag{13}$$

其中

$$\begin{aligned} \theta_0 &= \begin{bmatrix} \Lambda & \Psi \\ * & -\rho^{-\mu} \mathbf{I} \end{bmatrix}, \\ \Lambda &= H\bar{A}_{11} + \bar{A}_{11}^T H + \rho^{-\mu} (H\bar{A}_{12} + \bar{A}_{12}^T H + E_\mu H + HE_\mu), \\ \Psi &= H\bar{F}_{11} + \bar{F}_{11}^T H + H\bar{F}_{12} + \bar{F}_{12}^T H. \end{aligned}$$

基于假设 1,3,可以得到

$$\begin{aligned} d^T(t, \mathbf{x}(t)) d(t, \mathbf{x}(t)) &\leq 2\eta(1 + \mu) \rho^{-2\mu} \mathbf{x}^T(t) H_1 \mathbf{x}(t), \\ f^T(\mathbf{x}(t), t) f(\mathbf{x}(t), t) &\leq \mathbf{x}^T(t) U^T U \mathbf{x}(t) \leq \mathbf{x}^T(t) H_1 \mathbf{x}(t), \end{aligned}$$

从而

$$\rho^{-2(1+\mu)} [f^T(\mathbf{x}(t), t) f(\mathbf{x}(t), t) + d^T(t, \mathbf{x}(t)) d(t, \mathbf{x}(t))] \leq 2\eta(1 + \mu) \rho^{-2-4\mu} \mathbf{x}^T(t) H_1 \mathbf{x}(t), \tag{14}$$

由此可得

$$\begin{aligned} & \frac{\partial Q(V(t), \bar{\mathbf{x}}(t))}{\partial \bar{\mathbf{x}}(t)} [(\bar{A}_{11} + \bar{A}_{12}) \bar{\mathbf{x}}(t) + (\bar{F}_{11} + \bar{F}_{12}) \bar{\mathbf{d}}(t)] \leq \\ & \begin{bmatrix} Dr(\rho^{-1}) \bar{\mathbf{x}}(t) \\ Dr(\rho^{-1}) \bar{\mathbf{d}}(t) \end{bmatrix}^T \theta_0 \begin{bmatrix} Dr(\rho^{-1}) \bar{\mathbf{x}}(t) \\ Dr(\rho^{-1}) \bar{\mathbf{d}}(t) \end{bmatrix} + 2\eta(1 + \mu) \rho^{-2-3\mu} \mathbf{x}^T(t) H_1 \mathbf{x}(t) - \\ & \rho^{-\mu} \bar{\mathbf{x}}^T(t) Dr(\rho^{-1}) (E_\mu H + HE_\mu) Dr(\rho^{-1}) \bar{\mathbf{x}}(t) \leq \\ & \begin{bmatrix} Dr(\rho^{-1}) \bar{\mathbf{x}}(t) \\ Dr(\rho^{-1}) \bar{\mathbf{d}}(t) \end{bmatrix}^T \theta_0 \begin{bmatrix} Dr(\rho^{-1}) \bar{\mathbf{x}}(t) \\ Dr(\rho^{-1}) \bar{\mathbf{d}}(t) \end{bmatrix} + \eta \rho^{-\mu} [2(1 + \mu) \rho^{-2-2\mu} \mathbf{x}^T(t) H_1 \mathbf{x}(t) + 2\rho^{-2} e_\omega^T(t) H_2 e_\omega(t)] - \\ & \rho^{-\mu} \bar{\mathbf{x}}^T(t) Dr(\rho^{-1}) (E_\mu H + HE_\mu) Dr(\rho^{-1}) \bar{\mathbf{x}}(t) \leq \\ & \begin{bmatrix} Dr(\rho^{-1}) \bar{\mathbf{x}}(t) \\ Dr(\rho^{-1}) \bar{\mathbf{d}}(t) \end{bmatrix}^T \theta_0 \begin{bmatrix} Dr(\rho^{-1}) \bar{\mathbf{x}}(t) \\ Dr(\rho^{-1}) \bar{\mathbf{d}}(t) \end{bmatrix} + \eta \rho^{-\mu} \bar{\mathbf{x}}^T(t) Dr(\rho^{-1}) (E_\mu H + HE_\mu) Dr(\rho^{-1}) \bar{\mathbf{x}}(t) - \\ & \rho^{-\mu} \bar{\mathbf{x}}^T(t) Dr(\rho^{-1}) (E_\mu H + HE_\mu) Dr(\rho^{-1}) \bar{\mathbf{x}}(t) \leq \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} Dr(\rho^{-1})\bar{x}(t) \\ Dr(\rho^{-1})\bar{d}(t) \end{bmatrix}^T \theta_0 \begin{bmatrix} Dr(\rho^{-1})\bar{x}(t) \\ Dr(\rho^{-1})\bar{d}(t) \end{bmatrix} + (1 - \eta) \rho^{1-\mu} \frac{\partial Q(V(t), \mathbf{x}(t))}{\partial V(t)}. \quad (15)$$

下面通过三个步骤证明: $\theta < 0 \Leftrightarrow \theta_0 < 0$ 。

1) $\theta_0 < 0 \Leftrightarrow \theta_1 < 0$ 。将矩阵 θ_0 分别左乘和右乘 $\text{diag}\{X, I\}$ 得到 $\theta_0 < 0$ 等价于 $\theta_1 < 0$, 这里

$$\theta_1 = \begin{bmatrix} \bar{A}_{11}X + X\bar{A}_{11}^T + \rho^{-\mu}(\bar{A}_{12}X + X\bar{A}_{12}^T + E_\mu X + XE_\mu) & \bar{F}_{11} + \bar{F}_{11}^T + \bar{F}_{12} + \bar{F}_{12}^T \\ * & -\rho^\mu I \end{bmatrix}. \quad (16)$$

2) $\theta_1 < 0 \Leftrightarrow \theta_2 < 0$ 。将式(13)代入式(16)中, 则 $\theta_1 < 0$ 等价于 $\theta_2 < 0$, 其中

$$\theta_2 = \begin{bmatrix} \Delta_1 & BGX_2 & \rho^\mu B & \rho^\mu F \\ * & \Delta_2 & 0 & \rho^\mu LF \\ * & * & -\rho^{2\mu} I & 0 \\ * & * & * & -\rho^{2\mu} I \end{bmatrix}, \quad (17)$$

$$\Delta_1 = [A + \rho^{1-\mu}BKDr(\rho^{-1})]X_1 + X_1[A^T + \rho^{1-\mu}Dr(\rho^{-1})K^TB^T] + 2(1 + \mu)X_1,$$

$$\Delta_2 = (W + LBG)X_2 + X_2(W^T + G^TB^TL^T) + 2X_2.$$

3) $\theta_2 < 0 \Leftrightarrow \theta < 0$ 。根据 $K = R_1X_1^{-1}Dr_1(\rho)$, 可以得到 $\theta_2 < 0$ 等价于 $\theta < 0$ 。

综合 1) ~ 3), 可以得到: $\theta < 0 \Leftrightarrow \theta_2 < 0 \Leftrightarrow \theta_1 < 0 \Leftrightarrow \theta_0 < 0$ 。根据引理 1 可得, 系统 (9) 在 $T(x_0) \leq \frac{V_0^\mu}{(1 - \eta)\mu}$ 内能够实现全局有限时间稳定。

4 仿真算例

本节通过一个算例验证所提控制方案的有效性。系统(1)选取的参数如下:

$$A = \begin{bmatrix} 0.2 & -0.97 \\ 0.98 & 0.72 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} -2.9 & 0.92 \\ 1.032 & 2.18 \end{bmatrix}, \quad F = \begin{bmatrix} 0.862 & -1.61 \\ 2.901 & -1.46 \end{bmatrix},$$

系统(2)中 W 和 G 分别取为

$$W = \begin{bmatrix} 0 & 1.3 \\ 0.98 & 0.72 \end{bmatrix}, \quad G = \begin{bmatrix} -1.5 & -0.39 \\ 3.2 & -2.6 \end{bmatrix},$$

初值设定为 $x(0) = [-1 \ 2]^T$ 。通过在式(12)中设计极点 $[-3, -4]$, 得到

$$L = \begin{bmatrix} 2.101 \ 1 & 0.650 \ 6 \\ -1.492 \ 4 & -0.968 \ 9 \end{bmatrix}.$$

设计参数 $\mu = 0.28$, 由定理 1 可以求解矩阵不等式, 得到:

$$X_1 = \begin{bmatrix} 9.798 \ 0 & 0.000 \ 0 \\ 0.000 \ 0 & 9.798 \ 0 \end{bmatrix}, \quad R_1 = \begin{bmatrix} 4.606 \ 0 & -20.918 \ 9 \\ -20.918 \ 9 & -13.034 \ 1 \end{bmatrix},$$

$$X_2 = \begin{bmatrix} 3.109 \ 0 & 2.070 \ 8 \\ 2.070 \ 8 & 4.809 \ 3 \end{bmatrix}, \quad K = \begin{bmatrix} 0.410 \ 8 & -1.921 \ 5 \\ -1.865 \ 7 & -1.197 \ 2 \end{bmatrix}.$$

仿真结果见图 1~3。

从图 1~3 可以看出, 系统状态在控制器 $u(t)$ 的作用下是渐近稳定的, 干扰估计误差在较短时间内趋于零, 且控制输入曲线在一定范围内上下波动。仿真结果表明利用该控制方法得到的结果是理想的, 所设计的控制方案能够保证复合系统的状态最终达到全局有限时间稳定。

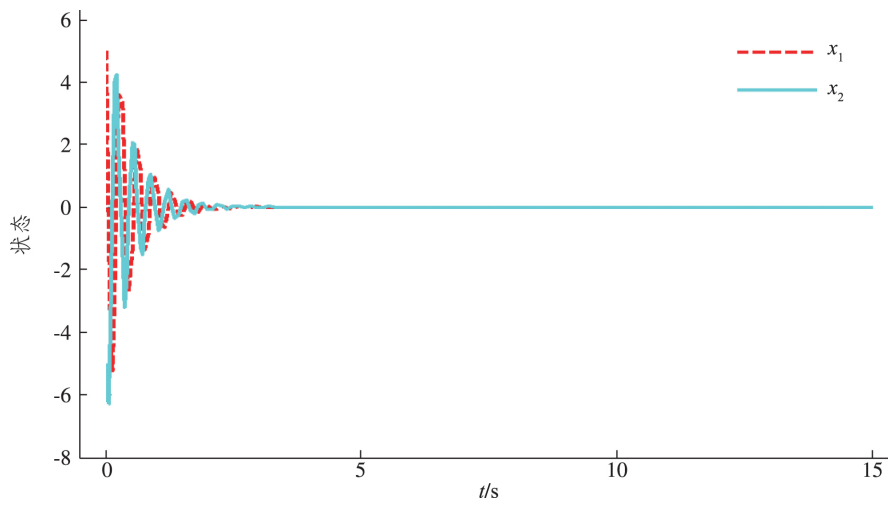


图 1 系统状态响应曲线
Fig.1 System state response curves

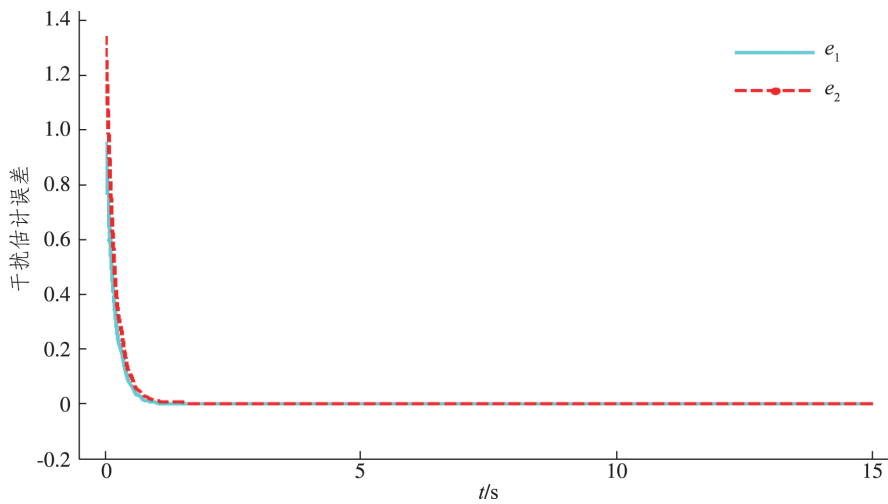
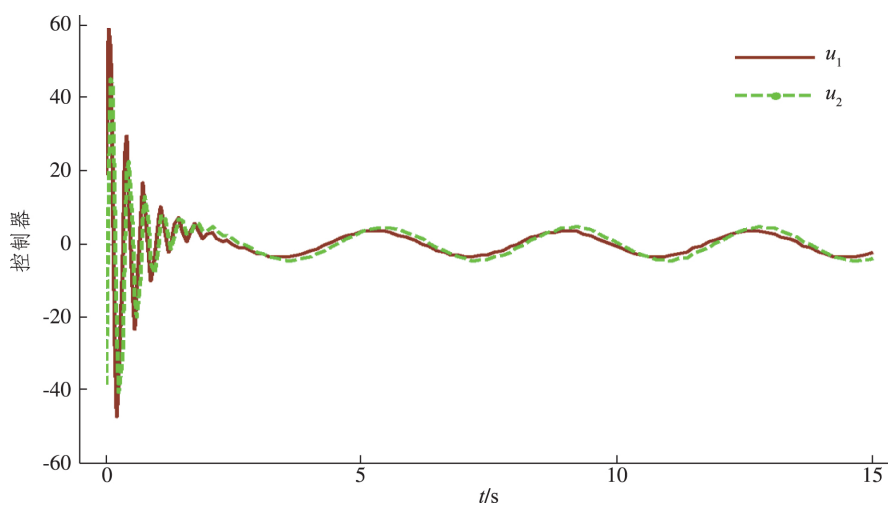


图 2 干扰估计误差变化曲线
Fig.2 Disturbance estimation error curves



(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>
图 3 控制器变化曲线
Fig.3 Controller curves

5 结语

本文考虑了带有多源干扰的非线性系统在有限时间内精细抗干扰的控制问题。将 DOBC 与隐式李雅普诺夫方法相结合, 提出有限时间精细抗干扰控制方案, 保证复合系统在有限时间内达到全局有限时间稳定。今后的研究工作之一是提出一种固定时间精细抗干扰控制方案, 在保证有限时间稳定的基础上, 减少对系统初值的依赖, 从而达到更好的抗干扰效果。

参考文献:

- [1] SUN H B, LI Y K, ZONG G D, et al. Disturbance attenuation and rejection for stochastic Markovian jump system with partially known transition probabilities [J]. *Automatica* 2018, 89(39): 349–357.
- [2] ADAMY J, FLEMMING A. Soft variable structure controls: a survey [J]. *Automatica* 2004, 40(11): 1821–1844.
- [3] BACK J, SHIM H B. Adding robustness to nominal output-feedback controllers for uncertain nonlinear systems: a nonlinear version of disturbance observer [J]. *Automatica* 2008, 44(10): 2528–2537.
- [4] CHEN M, CHEN W H. Disturbance-observer-based robust control for time delay uncertain systems [J]. *International Journal of Control, Automation and Systems* 2010, 8(12): 445–453.
- [5] GUO L, CHEN W H. Disturbance attenuation and rejection for systems with nonlinearity via DOBC approach [J]. *International Journal of Robust and Nonlinear Control* 2005, 15(3): 109–125.
- [6] CHEN W H. Disturbance observer based control nonlinear systems [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 2004, 9(4): 706–710.
- [7] SUN S X, REN T, WEI X J. Composite DOBC with fuzzy fault-tolerant control for stochastic systems with unknown nonlinear dynamics [J]. *International Journal of Robust and Nonlinear Control* 2019, 29(18): 6605–6615.
- [8] GUO L, WEI X J. Composite disturbance-observer-based control and H_∞ control for complex continuous models [J]. *International Journal of Robust and Nonlinear Control* 2010, 20(1): 106–118.
- [9] MA J L, XU S Y, CUI G Z, et al. Command-filter-based adaptive tracking control for nonlinear systems with unknown input quantization and mismatching disturbances [J]. *Applied Mathematics and Computation* 2020, 377: 125161–125174.
- [10] WEI X J, DONG L W, ZHANG H F, et al. Composite anti-disturbance control for stochastic systems with multiple heterogeneous disturbances and input saturation [J]. *ISA Transactions* 2019, 100: 436–445.
- [11] MEI R, CHEN M, GUO W W. Robust adaptive control scheme for optical tracking telescopes with unknown disturbances [J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics* 2015, 126: 1185–1190.
- [12] WU Z J, CUI M Y, SHI P, et al. Stability of stochastic nonlinear systems with state-dependent switching [J]. *IEEE Transaction on Automatic Control* 2013, 58(8): 1904–1918.
- [13] LIU Y L, ZHANG Y M, YAO X M, et al. Composite anti-disturbance control for a class of nonlinear stochastic systems via disturbance observer [J]. *Mathematical Problems in Engineering* 2013, 10(12): 1–7.
- [14] DING S D, LI S H. Stabilization of the attitude of a rigid spacecraft with external disturbances using finite-time control techniques [J]. *Aerospace Science and Technology* 2009, 13(4): 256–265.
- [15] JIN E D, SUN Z W. Robust controllers design with finite time convergence for rigid spacecraft attitude tracking control [J]. *Aerospace Science and Technology* 2008, 12(4): 324–330.
- [16] 刘慧贤, 丁世宏, 李世华 等. 永磁同步电机位置伺服系统的有限时间控制 [J]. *电机与控制学报*, 2009, 13(3): 424–430.
- [17] WEI X J, CHEN N. Composite hierarchical anti-disturbance control for nonlinear systems with DOBC and fuzzy control [J]. *International Journal of Robust and Nonlinear Control* 2014, 20(1): 106–118.
- [18] POLYAKOV A, EFIMOV D, PERRUQUETTI W. Robust stabilization of MIMO systems in finite/fixed time [J]. *International Journal of Robust Nonlinear Control* 2015, 26: 69–70.
- [19] POLYAKOV A, EFIMOV D, PERRUQUETTI W. Finite-time and fixed-time stabilization: Implicit Lyapunov function approach [J]. *Automatica* 2015, 51: 332–340.

(下转第266页)

Substituent Effect on the Epoxidation of Olefins Catalyzed by Schiff Base Molybdenum Complexes

ZHANG Wenxin , ZHUO Zihan , XIE Jingjing , WEI Hang , LI Tong , LIU Haiwen , WANG Weili

(School of Chemistry and Material Science ,Ludong University ,Yantai 264039 ,China)

Abstract: The 5-position of Cl on benzaldehyde ring and 5'-position of NO₂ on aniline ring were brought to the backbone of the ligands to prepare four different Schiff base molybdenum complexes ,and their catalytic performances in the catalytic epoxidation of cyclooctene under solvent-free condition were investigated. It is found that the introduction of electron withdrawing group has an obvious influence on the catalytic process ,and the conversion of cyclooctene reaches up to 94% over the optimal catalyst (0.1%) with high epoxide selectivity (>88%). Furthermore ,the catalytic system is simple ,economic and clean.

Keywords: Epoxide; Schiff base; molybdenum complex; olefin epoxidation; catalysis; substituent

(责任编辑 刘军深)

(上接第 199 页)

Abstract ID: 1673-8020(2021) 03-0193-EA

Finite-time Elegant Anti-disturbance Control for Nonlinear Systems

HAN Junjie , WEI Xinjiang

(School of Mathematics and Statistics Science ,Ludong University ,Yantai 264039 ,China)

Abstract: In this paper ,the problem of anti-disturbance control in finite-time for a class of nonlinear systems with multiple disturbances was studied. A nonlinear disturbance observer was designed to solve the uncertain nonlinear terms in the system. On this basis ,finite-time elegant anti-disturbance control scheme was proposed to ensure the global finite-time stability of the complex system. Finally ,a numerical example was given to verify the feasibility of the proposed control scheme.

Keywords: disturbance observer-based control; finite-time control; Implicit Lyapunov function; globally finite-time stable; multiple disturbances

(责任编辑 顾建忠)