

控制与决策

Control and Decision

基于干扰观测器的不确定非线性系统终端滑模控制器设计

杨俊起, 高煜欣, 陈滢涛, 崔立志

引用本文:

杨俊起, 高煜欣, 陈滢涛, 等. 基于干扰观测器的不确定非线性系统终端滑模控制器设计[J]. 控制与决策, 2020, 35(1): 155–160.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.0599>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于模糊控制的高超声速飞行器二阶滑模姿态控制

Second-order sliding mode attitude control based on fuzzy control for hypersonic vehicle

控制与决策. 2019, 34(9): 1901–1908 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1059>

带参数辨识的自适应二阶滑模观测器PMSM无传感器矢量控制

Adaptive second-order sliding mode observer with parameter identification for PMSM sensorless vector control

控制与决策. 2019, 34(7): 1385–1393 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2017.1578>

基于积分滑模控制的非理想变时滞神经网络有限时间同步

Finite-time synchronization of nonidentical neural networks with time-varying delay based on integral sliding mode control

控制与决策. 2019, 34(7): 1559–1564 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2017.1689>

一种无模型自适应积分终端滑模控制方法

A model-free adaptive integral terminal sliding mode control method

控制与决策. 2018, 33(9): 1591–1597 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2017.0556>

基于ESO的无速度传感器PMSM系统自适应滑模FCS-MPC

Sensorless adaptive sliding mode FCSMPC using ESO for PMSM system

控制与决策. 2018, 33(6): 999–1007 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2017.0295>

基于非线性干扰观测器的翼伞鲁棒反步跟踪控制

Robust backstepping tracking control based on nonlinear disturbance observer for unmanned parafoil vehicle

控制与决策. 2017, 32(8): 1427–1433 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2016.0589>

一类未知MIMO非线性离散系统的改进自适应准滑模解耦控制

Improved adaptive quasi-sliding mode decoupling control for a class of unknown MIMO nonlinear discrete-time systems

控制与决策. 2016, 31(5): 783–789 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2015.0223>

受动态约束的谐波传动式可重构模块机器人分散积分滑模控制

Decentralized integral sliding mode control for time varying constrained modular and reconfigurable robot based on harmonic drive transmission

基于干扰观测器的不确定非线性系统终端滑模控制器设计

杨俊起[†], 高煜欣, 陈滢涛, 崔立志

(河南理工大学 电气工程与自动化学院, 河南 焦作 454000)

摘要: 考虑系统遭受复合干扰影响, 针对一类不确定非线性系统的控制问题展开研究. 首先, 提出一种 n 阶超螺旋干扰观测器, 对系统干扰进行估计; 然后, 结合系统的结构特点和滑模控制理论构造积分滑模面, 并与二阶快速终端滑模控制理论相结合, 设计基于干扰观测器的滑模控制器, 通过引入反曲函数降低抖振, 利用 Lyapunov 理论证明闭环系统的稳定性; 最后, 将该方法应用到磁悬浮系统的稳定性控制并进行仿真实验, 结果表明了所提出方法的有效性.

关键词: 复合干扰; 干扰观测器; 积分滑模面; 终端滑模控制器

中图分类号: TP273

文献标志码: A

Disturbance observer-based terminal sliding mode controller design for uncertain nonlinear systems

YANG Jun-qi[†], GAO Yu-xin, CHEN Yan-tao, CUI Li-zhi

(College of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: For a class of uncertain nonlinear systems, the control problem under the condition that every order of the systems is affected by unknown disturbance is investigated. Firstly, a n -orders super twisting disturbance observer is introduced, which estimates the disturbances of the systems. Then, based on the structure of the systems and the sliding mode control technique, a sliding surface with integral function is designed. Combining with the second order fast terminal sliding mode control theory, a sliding mode controller based on the proposed disturbance observer is presented. In order to alleviate the chattering caused by the sign function, the sigmoid function is employed. And the stability of the closed-loop system is proved by the Lyapunov theory. Finally, the method is applied to the simulator for controlling the magnetic levitation system, and the results show the effectiveness of the proposed method.

Keywords: multiple disturbances; disturbance observer; integral sliding mode surface; terminal sliding mode controller

0 引 言

近年来, 非线性系统的控制问题一直是研究热点, 并取得了显著成果, 如模糊控制^[1-3]、基于观测器控制^[4]、反步控制^[5]等, 其中高阶非线性系统的控制问题^[6-9]受到了广泛关注. 一般情况下, 在实际高阶系统中总是存在建模误差^[10]、时滞问题^[11]、外部干扰等不确定因素, 系统的不确定性以及外部干扰使得系统输出不能稳定或渐近跟踪期望的目标, 使系统的控制问题变得困难. 如何抑制干扰对系统的影响, 是国内外学者所关注的热点, 为此, 人们提出了不同的鲁棒控制策略. 滑模控制 (sliding mode control, SMC)^[12-15] 因其响应速度快、对参数变化及外部扰动不灵敏、无需在线辨识和结构简单等优势,

在高阶非线性系统控制中得到了大量应用. 文献[16]针对一类不确定仿射非线性系统, 提出了一种基于回归扰动模糊神经网络干扰观测器的鲁棒自适应终端滑模控制策略, 实现了系统跟踪控制. 文献[17]发展了一种更快收敛速度的终端滑模面, 并设计自适应滑模控制律, 解决了带有未知参数和非线性输入的两个不同非线性系统之间的同步问题. 文献[18]给出一种自适应控制策略, 实现了对一类带有高阶干扰和未知参数的非线性系统的自适应跟踪. 文献[19]给出一种新的切换面和滑模控制器设计方法, 实现了对一类不确定混沌系统的控制. 上述文献在考虑系统受到干扰时, 文献[16]、文献[18]和文献[19]仅考虑了单一系统状态量存在干扰的情况; 文献[17]针对所有系

收稿日期: 2018-05-07; 修回日期: 2018-08-13.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61403129); 河南省高校基本科研业务费专项基金项目(NSFRF180335); 河南省科技攻关计划项目(172102210024).

责任编辑: 王燕舞.

[†]通讯作者. E-mail: yjq@hpu.edu.cn.

统状态量均存在干扰的情况,利用干扰的已知上界实现跟踪控制.然而,在实际的高阶非线性系统中,系统各阶状态量均可能存在干扰且干扰变化较大时,只利用干扰的上界进行跟踪控制会影响控制效果.

基于上述分析,针对一类非线性系统,本文提出一种基于超螺旋干扰观测器的终端滑模控制策略.首先,针对一类多干扰不确定非线性系统,为准确估计系统遭受的复合干扰,提出一种 n 阶超螺旋干扰观测器;然后,针对系统的结构特点,提出带有积分项的滑模面,并将该滑模面与二阶快速终端滑模控制方法相结合,以反曲函数代替符号函数降低抖振,提出一种控制器结构;最后,利用磁悬浮系统进行仿真,结果表明了所提出方法的有效性.

1 系统模型与问题描述

考虑如下 n 阶不确定非线性系统:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 + d_1, \\ \dot{x}_2 = x_3 + d_2, \\ \vdots \\ \dot{x}_n = f(x, t) + cu(t) + d_n. \end{cases} \quad (1)$$

其中: $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \in \mathbf{R}^n$ 为可测的系统状态向量, c 为系统非零参数, $u(t) \in \mathbf{R}$ 为系统的控制输入, $f(x, t) \in \mathbf{R}$ 为系统的非线性函数项, $d = [d_1, d_2, \dots, d_n]^T \in \mathbf{R}^n$ 为系统遭受的由未知参数和建模误差等不确定因素构成的复合干扰项.

注1 系统(1)是一类典型的非线性系统,许多实际系统均可用此类系统形式表达,如文献[20]提到的磁悬浮系统.由于此类系统参数的微小变动,在一些关键点上可能会引起系统运动形式的较大改变,对此类系统的控制问题研究具有实际意义.

为了便于下文控制器的设计,给出下列假设条件和相应引理.

假设1^[17,21] 假设系统复合干扰 $d_i(1 \leq i \leq n)$ 满足下列条件:

1) 有界,即存在未知正实数 $\varphi_i > 0$,使得 $|d_i| \leq \varphi_i$;

2) 可导,即 \dot{d}_i 存在.

假设2^[17,21] 假设系统第 n 阶的未知非线性函数 $f(x, t)$ 满足下列条件:

1) 有界,即存在一个未知正实数 $\kappa > 0$,使得 $|f(x, t)| \leq \kappa \|x\|$,其中 $\|\cdot\|$ 表示欧几里德范数;

2) 可导,即 $\dot{f}(x, t)$ 存在.

引理1^[21] 对于 $1 \leq i \leq n$,考虑如下受控系统:

$$\dot{\tilde{x}}_i = u_{si}(t) + d_i(t). \quad (2)$$

其中: \tilde{x}_i 为状态变量; $d_i(t)$ 为未知参数或建模误差等

不确定因素构成的复合干扰,其一阶导数 $\dot{d}_i(t)$ 存在且满足假设1.

采用如下超螺旋控制律:

$$u_{si}(t) = u_{1i}(t) + u_{2i}(t). \quad (3)$$

其中: $u_{1i}(t) = -\gamma_i |\tilde{x}_i|^{1/2} \text{sgn}(\tilde{x}_i)$, $\dot{u}_{2i}(t) = -\delta_i \text{sgn}(\tilde{x}_i)$, γ_i, δ_i 为正数且满足

$$\begin{cases} \gamma_i > 2, \\ \delta_i > \frac{\gamma_i}{4 - 8\gamma_i^{-1}} + \varphi_i^2 \gamma_i^{-1}. \end{cases} \quad (4)$$

因此,如下系统稳定且 $\tilde{x}_i, \dot{\tilde{x}}_i$ 在有限时间内收敛到零:

$$\begin{cases} \dot{\tilde{x}}_i = u_{1i}(t) + y_i, \\ \dot{y}_i = \dot{u}_{2i}(t) + \dot{d}_i(t). \end{cases} \quad (5)$$

引理2^[22] 若连续函数 $V(t)$ 满足下式,则 $V(t)$ 将在有限时间内收敛到零且收敛时间 t 满足下式:

$$\begin{cases} \dot{V}(t) \leq -aV(t) - bV^\beta(t), \forall V(t_0) \geq 0, t \geq t_0; \\ t = t_0 + \frac{1}{a(1-\beta)} \ln \frac{aV^{1-\beta}(t_0) + b}{b}. \end{cases} \quad (6)$$

其中: $a, b > 0, 0 < \beta < 1$.

本文在系统遭受复合干扰影响的条件下,通过设计终端滑模控制器实现对不确定非线性系统的控制,使其在有限时间内收敛到零.

2 干扰观测器设计

本文采用超螺旋干扰观测器实现对复合干扰的估计.该观测器是一种连续的二阶滑模观测器,可以实现状态变量及其一阶导数在有限时间内稳定收敛到零.针对此类情况,文献[21]提出了一类二阶干扰观测器,本文在此基础上,提出一类 n 阶超螺旋干扰观测器.

定理1 针对系统(1),在假设1和假设2的前提下,构造如下 n 阶超螺旋干扰观测器:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_1 = x_2 + \gamma_1 |\tilde{x}_1|^{1/2} \text{sgn}(\tilde{x}_1) - z_1, \\ \dot{z}_1 = -\delta_1 \text{sgn}(\tilde{x}_1), \\ \dot{\hat{x}}_2 = x_3 + \gamma_2 |\tilde{x}_2|^{1/2} \text{sgn}(\tilde{x}_2) - z_2, \\ \dot{z}_2 = -\delta_2 \text{sgn}(\tilde{x}_2), \\ \vdots \\ \dot{\hat{x}}_n = f(x, t) + cu(t) + \gamma_n |\tilde{x}_n|^{1/2} \text{sgn}(\tilde{x}_n) - z_n, \\ \dot{z}_n = -\delta_n \text{sgn}(\tilde{x}_n). \end{cases} \quad (7)$$

其中

$$\tilde{x}_i = x_i - \hat{x}_i, 1 \leq i \leq n; \quad (8)$$

参数 $\gamma_i, \delta_i(1 \leq i \leq n)$ 为需要设计的正数.则系统复

合干扰 $d_i (1 \leq i \leq n)$ 可由下式估计:

$$\begin{cases} \hat{d}_1 = \gamma_1 |\tilde{x}_1|^{1/2} \text{sgn}(\tilde{x}_1) - z_1, \\ \dot{z}_1 = -\delta_1 \text{sgn}(\tilde{x}_1), \\ \hat{d}_2 = \gamma_2 |\tilde{x}_2|^{1/2} \text{sgn}(\tilde{x}_2) - z_2, \\ \dot{z}_2 = -\delta_2 \text{sgn}(\tilde{x}_2), \\ \vdots \\ \hat{d}_n = \gamma_n |\tilde{x}_n|^{1/2} \text{sgn}(\tilde{x}_n) - z_n, \\ \dot{z}_n = -\delta_n \text{sgn}(\tilde{x}_n). \end{cases} \quad (9)$$

证明 定义干扰观测器与系统之间的估计误差为 $e = x - \hat{x}$, 考虑系统(1)的第1个子系统

$$\dot{x}_1 = x_2 + d_1, \quad (10)$$

以及干扰观测器(7)的第1个子系统

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_1 = x_2 + \gamma_1 |\tilde{x}_1|^{1/2} \text{sgn}(\tilde{x}_1) - z_1, \\ \dot{z}_1 = -\delta_1 \text{sgn}(\tilde{x}_1), \end{cases} \quad (11)$$

则式(10)与(11)相减可得

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = \dot{x}_1 - \dot{\hat{x}}_1 = d_1 - \gamma_1 |\tilde{x}_1|^{1/2} \text{sgn}(\tilde{x}_1) + z_1, \\ \dot{z}_1 = -\delta_1 \text{sgn}(\tilde{x}_1). \end{cases} \quad (12)$$

由假设1可知 d_1 的导数存在, 并结合式(8), 则(12)可写成如下形式:

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = \dot{\tilde{x}}_1 = -\gamma_1 |\tilde{x}_1|^{1/2} \text{sgn}(\tilde{x}_1) + z_1, \\ \dot{z}_1 = -\delta_1 \text{sgn}(\tilde{x}_1) + \dot{d}_1. \end{cases} \quad (13)$$

由引理1可知, 第1个子系统估计误差 e_1 和 \dot{e}_1 将在有限时间内收敛至零, 于是可得复合干扰 d_1 的估计式为

$$\begin{cases} \hat{d}_1 = \gamma_1 |\tilde{x}_1|^{1/2} \text{sgn}(\tilde{x}_1) - z_1, \\ \dot{z}_1 = -\delta_1 \text{sgn}(\tilde{x}_1). \end{cases} \quad (14)$$

同理, 系统(1)的第2个子系统式与干扰观测器(7)的第2个子系统式相减, 可得干扰误差式为

$$\begin{cases} \dot{e}_2 = \dot{x}_2 - \dot{\hat{x}}_2 = d_2 - \gamma_2 |\tilde{x}_2|^{1/2} \text{sgn}(\tilde{x}_2) + z_2, \\ \dot{z}_2 = -\delta_2 \text{sgn}(\tilde{x}_2). \end{cases} \quad (15)$$

由假设1和引理1可知, 估计误差 e_2 和 \dot{e}_2 将在有限时间内收敛至零, 则可得复合干扰 d_2 的估计式为

$$\begin{cases} \hat{d}_2 = \gamma_2 |\tilde{x}_2|^{1/2} \text{sgn}(\tilde{x}_2) - z_2, \\ \dot{z}_2 = -\delta_2 \text{sgn}(\tilde{x}_2). \end{cases} \quad (16)$$

依此类推, 系统(1)与干扰观测器(7)的第 n 个子系统估计误差 e_n 和 \dot{e}_n 将在有限时间内收敛至零, 且复合干扰 d_n 的估计式为

$$\begin{cases} \hat{d}_n = \gamma_n |\tilde{x}_n|^{1/2} \text{sgn}(\tilde{x}_n) - z_n, \\ \dot{z}_n = -\delta_n \text{sgn}(\tilde{x}_n). \end{cases} \quad (17)$$

因此, 系统(1)的所有复合干扰 $d_i (1 \leq i \leq n)$ 可由下式估计:

$$\begin{cases} \hat{d}_1 = \gamma_1 |\tilde{x}_1|^{1/2} \text{sgn}(\tilde{x}_1) - z_1, \\ \dot{z}_1 = -\delta_1 \text{sgn}(\tilde{x}_1), \\ \hat{d}_2 = \gamma_2 |\tilde{x}_2|^{1/2} \text{sgn}(\tilde{x}_2) - z_2, \\ \dot{z}_2 = -\delta_2 \text{sgn}(\tilde{x}_2), \\ \vdots \\ \hat{d}_n = \gamma_n |\tilde{x}_n|^{1/2} \text{sgn}(\tilde{x}_n) - z_n, \\ \dot{z}_n = -\delta_n \text{sgn}(\tilde{x}_n). \end{cases} \quad (18)$$

由此, 定理得证. \square

注2 与文献[21]设计的干扰观测器相比, 本文提出的 n 阶超螺旋干扰观测器可用于二阶及以上的高阶系统, 适用范围更广.

注3^[21] 干扰观测器(7)对干扰的估计是通过系统状态测量值与状态估计值的误差实现的, 可在不考虑系统结构的情况下实现干扰的准确估计. 因此, 本文提出的干扰观测器可用于解决高阶复杂模型不确定非线性系统的干扰估计问题.

3 二阶快速终端滑模控制器设计

3.1 设计积分型滑模面

考虑系统(1)的结构并结合滑模控制理论, 设计如下带有积分项的滑模面:

$$s = x_n + \int_0^t \sum_{i=1}^n a_i x_i d\tau. \quad (19)$$

其中: $a_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 为设计的常数增益项, 使得 $a_n x^{(n-1)} + \dots + a_2 x + a_1$ 满足 Hurwitz 稳定; τ 为时间常数, 常数增益项影响系统状态收敛速率.

定理2 针对系统(1), 设计控制器 $u(t)$ 为

$$u(t) = -\frac{1}{c} \left[\sum_{i=1}^n a_i x_i + f(x, t) + \hat{d}_n + k_s \text{sgn}s \right]. \quad (20)$$

于是, 式(19)的滑动阶段成立, 即 $\dot{s}s < 0$.

证明 取 Lyapunov 函数 $V_1 = 0.5s^2$, 于是有

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 = s\dot{s} &= s \left[\dot{x}_n + \sum_{i=1}^n a_i x_i \right] = \\ &= s \left(f(x, t) + cu(t) + \hat{d}_n + \sum_{i=1}^n a_i x_i \right). \end{aligned} \quad (21)$$

将式(19)和(20)代入(21), 得

$$\dot{V}_1 = s(-k_s \text{sgn}s) = -k_s |s|. \quad (22)$$

其中: \hat{d}_n 为干扰观测器(7)的干扰估计值, $k_s > 0$ 为设计的常数. 因此 $\dot{V}_1 < 0$, 滑模面(19)滑动阶段成立. \square

由式(20)可知,因符号函数在 $u(t)$ 中存在,故必定存在控制量抖振问题.为了使系统在有限时间内达到稳定并改善抖振问题,在式(20)的基础上,本文利用快速终端滑模面给出二阶滑模面构造及控制器设计过程.

3.2 基于带有积分函数滑模面的二阶快速终端滑模控制器设计

终端滑模控制在改善抖振问题的同时,也可以使得滑动模态跟踪误差在有限时间内收敛至零.为使系统(1)能在有限时间内收敛到零,设计带有积分滑模面函数(19)的快速终端滑模面

$$\sigma = \dot{s} + \alpha s + \mu s^\beta. \quad (23)$$

其中: $\alpha, \beta > 0$,为需要设计的常数; $\beta = p/q$, p 和 q 为正奇数,且满足 $0 < \beta < 1$.

定理3 对于 n 阶不确定非线性系统(1)和带有积分滑模面的快速终端滑模面(23),设计控制器 $u(t)$ 为

$$\begin{aligned} \dot{u}(t) = & -\frac{1}{c} \left\{ (\alpha + \mu\beta s^{\beta-1}) \left(cu(t) + \sum_{i=1}^n a_i x_i \right) + \right. \\ & a_n cu(t) + \sum_{i=1}^{n-1} a_i x_{i+1} + \\ & \left. \phi \xi + k_2 \operatorname{sgn}(\sigma) |\sigma|^\beta + k_1 \sigma \right\}. \quad (24) \end{aligned}$$

其中

$$\begin{aligned} \phi = & \sum_{i=1}^n a_i \hat{d}_i + \dot{f}(x, t) + f(x, t) (\alpha + a_n + \\ & \mu\beta s^{\beta-1}) + \dot{\hat{d}}_n + \alpha \hat{d}_n + \mu\beta \hat{d}_n s^{\beta-1}; \quad (25) \end{aligned}$$

$k_1, k_2 > 0$,为待设计常数; \hat{d}_i, \hat{d}_n 为干扰观测器(7)的干扰估计值.反曲函数与常规切换函数相比,可以有效避免边界层处切换不光滑而产生的抖振现象,以增强系统的鲁棒性.引入反曲函数 ζ 为

$$\zeta = \frac{2}{1 + e^{-\omega\sigma}} - 1, \quad (26)$$

在控制器(24)的作用下,不确定非线性系统(1)在有限时间内趋于稳定,系统状态在有限时间内收敛至零.

证明 将干扰估计值 \hat{d}_i 和 \hat{d}_n 代入带有积分项的滑模面(19),并结合系统(1)可得 \dot{s} 和 \ddot{s} 的表达式为

$$\begin{aligned} \dot{s} = & \dot{x}_n + \sum_{i=1}^n a_i x_i = \\ & \sum_{i=1}^n a_i x_i + f(x, t) + cu(t) + \hat{d}_n, \\ \ddot{s} = & \ddot{x}_n + \sum_{i=1}^n a_i \dot{x}_i = \end{aligned}$$

$$\sum_{i=1}^n a_i (x_{i+1} + \hat{d}_i) + \dot{f}(x, t) + \dot{c}u(t) + \dot{\hat{d}}_n. \quad (27)$$

结合式(27),快速终端滑模面(23)意味着

$$\begin{aligned} \dot{\sigma} = & \dot{\ddot{s}} + \alpha \dot{s} + \mu\beta s^{\beta-1} \dot{s} = \\ & \sum_{i=1}^n a_i (x_{i+1} + \hat{d}_i) + \dot{f}(x, t) + \dot{c}u(t) + \\ & \dot{\hat{d}}_n + \alpha \left(\sum_{i=1}^n a_i x_i + f(x, t) + cu(t) + \hat{d}_n \right) + \\ & \mu\beta s^{\beta-1} \left(\sum_{i=1}^n a_i x_i + f(x, t) + cu(t) + \hat{d}_n \right). \quad (28) \end{aligned}$$

选择Lyapunov函数为 $V_2 = 0.5\sigma^2$,对其求一阶导数并代入式(24)~(28),化简可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 = & \sigma \dot{\sigma} = \sigma (\dot{\ddot{s}} + \alpha \dot{s} + \mu\beta s^{\beta-1} \dot{s}) = \\ & \sigma \left(\sum_{i=1}^n a_i (x_{i+1} + \hat{d}_i) + \dot{f}(x, t) + \dot{c}u(t) + \dot{\hat{d}}_n + \right. \\ & \left. \alpha \left(\sum_{i=1}^n a_i x_i + f(x, t) + cu(t) + \hat{d}_n \right) + \right. \\ & \left. \mu\beta s^{\beta-1} \left(\sum_{i=1}^n a_i x_i + f(x, t) + cu(t) + \hat{d}_n \right) \right) = \\ & -k_1 \sigma^2 - k_2 \sigma \operatorname{sgn}(\sigma) |\sigma|^\beta - \phi \operatorname{sgn}(\sigma) + \phi \leq \\ & -a_2 V(\sigma) - b_2 V^{\beta_2}(\sigma). \quad (29) \end{aligned}$$

其中

$$a_2 = 2k_1, b_2 = 2^{\beta_2} k_2, \beta_2 = 0.5(\beta + 1). \quad (30)$$

由引理2可知, V_2 将在有限时间内收敛到零,故 σ 将在有限时间内收敛.因此,系统(1)将在有限时间内趋于稳定,且收敛时间为

$$t = t_0 + \frac{1}{a_2(1-\beta_2)} \ln \frac{a_2 V^{1-\beta_2}(t_0) + b_2}{b_2}. \quad (31)$$

由此,定理得证. \square

4 仿真实验

4.1 仿真参数设定

为了验证本文所提出理论的正确性,下面采用文献[20]给出的磁悬浮模型,在引入多复合干扰的情形下进行仿真.系统模型如下:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 + d_1, \\ \dot{x}_2 = x_3 + d_2, \\ \dot{x}_3 = f(x, t) + g(x, t)u(t) + d_3. \end{cases} \quad (32)$$

其中复合干扰选取为

$$\begin{cases} d_1 = 0.04 \sin t, \\ d_2 = 0.03 \cos(2t) + 0.01, \\ d_3 = 0.02 \sin(2t) - 0.01 \cos t; \end{cases} \quad (33)$$

非线性项为

$$f(x, t) = -6x_1 - 2.92x_2 - 1.2x_3 + x_1^2. \quad (34)$$

系统(32)中, $g(x, t) = 1$; 干扰观测器、滑模面和控制器的参数选取为 $\gamma = 2.5, \delta = 3.5, \alpha = 2, \beta = 0.6, \mu = 0.5, a_1 = 1, a_2 = 1, a_3 = 1.5, k_1 = 0.1, k_2 = 6, \varpi = 6, c = 1$; x, \hat{x}, z 的初始值分别为 $x(0) = [8, -7, 7]^T, \hat{x}(0) = [6.8, -6, -6]^T, z(0) = [3.25, -2.45, 2.4]^T$; 控制器 $u(t)$ 初始值为 $u(0) = 6.5$.

4.2 仿真结果分析

基于上述参数设定, 针对磁悬浮系统(32), 给出式(33)所示的3类不同复合干扰, 利用干扰观测器(7)对复合干扰进行准确估计, 估计误差曲线如图1所示. 由图1可以看出, 干扰估计误差在较短时间内收敛至零.

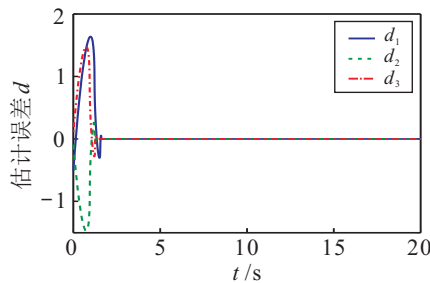


图1 干扰估计误差

采用本文设计的带有积分项滑模面函数的二阶快速终端滑模面(23), 结合选取的参数, 有

$$\sigma = \dot{s} + 2s + 0.5s^{0.6}, \quad (35)$$

其中

$$s = x_3 + \int_0^{20} (x_1 + x_2 + 1.5x_3) d\tau. \quad (36)$$

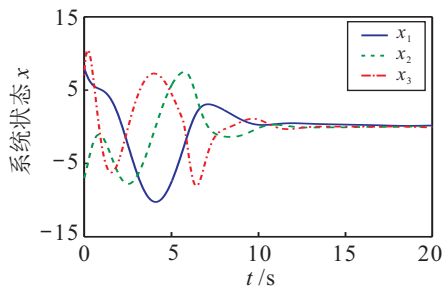


图2 系统状态曲线

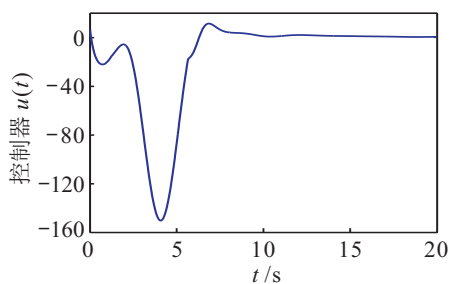


图3 控制器 $u(t)$

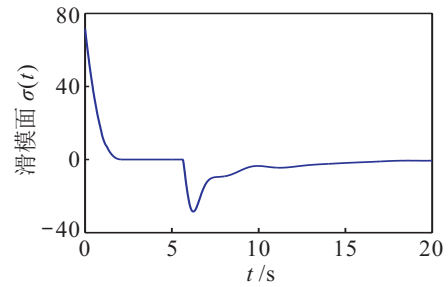


图4 二阶快速终端滑模面 σ

将式(35)和(36)代入控制器(24), 可以得到控制器 $u(t)$, 通过控制器可使磁悬浮系统各状态在有限时间内收敛, 如图2所示. 由图3和图4可以看出, 所设计的控制器 $u(t)$ 和带有积分项滑模面函数的二阶快速终端滑模面 σ 也在有限时间内收敛, 表明系统状态最终沿滑动模态运动, 从而验证了理论的有效性.

5 结论

本文研究一类不确定非线性系统的控制问题. 为实现快速准确估计多复合干扰, 提出了一种 n 阶超螺旋干扰观测器; 结合系统的结构特点, 设计了一种积分型滑模面; 结合二阶快速终端滑模理论和干扰的估计值, 给出了控制器结构, 与仅采用干扰上界的控制器相比, 提高了控制器的可靠性, 实现了系统状态在有限时间内收敛, 并利用 Lyapunov 理论证明了系统的稳定性. 仿真结果表明, 干扰观测器可在较短时间内跟踪复合干扰, 控制器可使磁悬浮系统在有限时间内稳定.

参考文献(References)

- [1] Chen B, Liu X P, Ge S Z, et al. Adaptive fuzzy control of a class of nonlinear systems by fuzzy approximation approach[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2012, 20(6): 1012-1021.
- [2] Chen B, Lin C, Liu X P, et al. Observer-based adaptive fuzzy control for a class of nonlinear delayed systems[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2016, 46(1): 27-36.
- [3] 杜贞斌. 不确定非线性系统的模糊鲁棒 H_∞ 跟踪控制[J]. 控制与决策, 2015, 30(7): 1325-1328. (Du Z B. Fuzzy robust H_∞ tracking control for uncertain nonlinear systems [J]. Control and Decision, 2015, 30(7): 1325-1328.)
- [4] Gao Y F, Sun X M, Wen C Y, et al. Observer-based adaptive NN control for a class of uncertain nonlinear systems with nonsymmetric input saturation[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2017, 28(7): 1520-1530.
- [5] Wang Y, Zhang Y F, Qiu J B, et al. Adaptive fuzzy backstepping control for a class of nonlinear systems with sampled and delayed measurements[J].

- IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2015, 23(2): 302-312.
- [6] 满永超, 刘允刚. 高阶不确定非线性系统线性状态反馈自适应控制设计[J]. 自动化学报, 2014, 40(1): 24-32.
(Man Y C, Liu Y G. Adaptive control design via linear state-feedback for high-order uncertain nonlinear systems[J]. Acta Automatica Sinica, 2014, 40(1): 24-32.)
- [7] Liu L, Yang X B. Robust adaptive state constraint control for uncertain switched high-order nonlinear systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(10): 8108-8117.
- [8] Zhao X D, Shi P, Zheng X L, et al. Intelligent tracking control for a class of uncertain high-order nonlinear systems[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2016, 27(9): 1976-1982.
- [9] 孙丞, 孙鹤旭, 刁心薇. 一类非齐次高阶非线性系统的自适应控制设计[J]. 控制理论与应用, 2016, 33(6): 816-824.
(Sun C, Sun H X, Diao X W. Adaptive control design for a class of high order nonlinear nonhomogeneous uncertain systems[J]. Control Theory & Applications, 2016, 33(6): 816-824.)
- [10] 卢厚清. 系统建模的误差分析[J]. 解放军理工大学学报: 自然科学版, 2001, 2(3): 20-22.
(Lu H Q. Error analysis for mathematics Modeling[J]. Journal of PLA University: Science and Technology, 2001, 2(3): 20-22.)
- [11] 张翼飞, 曾亮, 邓方林. 时滞系统控制发展历程综述[J]. 控制工程, 2004, 11(S0): 4-8.
(Zhang Y F, Zeng L, Deng F L. A survey of developing course for the time delay system control[J]. Control Engineering of China, 2004, 11(S0): 4-8.)
- [12] Ding S H, Wang J D, Zheng W X. Second-order sliding mode control for nonlinear uncertain systems bounded by positive functions[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(9): 5899-5909.
- [13] He S P, Song J. Finite-time sliding mode control design for a class of uncertain conic nonlinear systems[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2017, 4(4): 809-816.
- [14] 杨晓骞, 李健, 董毅. 非线性不确定系统的非奇异快速终端滑模控制[J]. 控制理论与应用, 2016, 33(6): 772-778.
(Yang X Q, Li J, Dong Y. A novel non-singular fast terminal sliding mode control of nonlinear systems with uncertain disturbances[J]. Control Theory & Applications, 2016, 33(6): 772-778.)
- [15] Xu S D, Liang Y W, Chiou S W. Discrete-time quasi-sliding-mode control for a class of nonlinear control systems[J]. Electronics Letters, 2008, 44(17): 1008-1010.
- [16] 张强, 袁铸钢, 许德智. 基于干扰观测器的一类不确定非线性系统自适应二阶动态 terminal 滑模控制[J]. 控制理论与应用, 2017, 34(2): 179-187.
(Zhang Q, Yuan Z G, Xu D Z. An adaptive second order terminal sliding mode control for a class of uncertain nonlinear systems using disturbance observer[J]. Control Theory & Applications, 2017, 34(2): 179-187.)
- [17] 高俊山, 宋歌, 邓立为. 具有未知参数的混沌系统的有限时间滑模同步控制[J]. 控制与决策, 2017, 32(1): 149-156.
(Gao J S, Song G, Deng L W. Finite-time sliding mode synchronization control of chaotic systems with uncertain parameters[J]. Control and Decision, 2017, 32(1): 149-156.)
- [18] 孙海滨, 宗广灯, 侯林林. 含高阶干扰的非仿射非线性系统自适应跟踪控制[J]. 控制理论与应用, 2017, 34(10): 1321-1327.
(Sun H B, Zong G D, Hou L L. Adaptive tracking control for nonlinear system with high-order disturbances[J]. Control Theory & Applications, 2017, 34(10): 1321-1327.)
- [19] 陈秀琴, 陈钧涛. 非线性输入的不确定混沌系统的滑模控制[J]. 控制工程, 2017, 24(1): 239-242.
(Chen X Q, Chen J T. Sliding mode control for uncertain unified chaotic systems with nonlinear inputs[J]. Control Engineering of China, 2017, 24(1): 239-242.)
- [20] Al-Muthairi N F, Zribi M. Sliding mode control of a magnetic levitation system[J]. Mathematics Problems in Engineering, 2004(2): 93-107.
- [21] 王首斌, 王新民, 谢蓉, 等. 基于干扰观测器的高超音速飞行器鲁棒反步控制[J]. 控制与决策, 2013, 28(10): 1507-1512.
(Wang S B, Wang X M, Xie R, et al. Robust backstepping control based on disturbance observer for hypersonic vehicle[J]. Control and Decision, 2013, 28(10): 1507-1512.)
- [22] Yu X H, Man Z H. Fast sliding mode control design for nonlinear dynamic systems[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems, Part I: Fundamental Theory and Application, 2002, 39(2): 261-264.

作者简介

杨俊起(1979—), 男, 副教授, 博士, 从事观测器设计、复杂系统建模与控制等研究, E-mail: yjq@hpu.edu.cn;

高煜欣(1991—), 男, 硕士生, 从事复杂系统建模与控制的研究, E-mail: 515237205@qq.com;

陈滢涛(1977—), 女, 讲师, 硕士, 从事状态估计与故障诊断的研究, E-mail: cyt@hpu.edu.cn;

崔立志(1980—), 男, 讲师, 博士, 从事智能信息处理的研究, E-mail: clzh0308@hpu.edu.cn.

(责任编辑: 李君玲)