

非奇异快速终端滑模液位跟踪控制

赵鹏, 姚敏立, 沈晓卫, 胡友涛

(第二炮兵工程学院 602 教研室, 710025, 西安)

摘要: 针对传统终端滑模控制中控制输入奇异和收敛时间长的问题,提出了一种非奇异快速终端滑模(NFTSM)控制方法.该方法由 NFTSM 滑模面和控制律组成.在此框架下,首先通过非奇异终端滑模面中引入指数函数和符号函数来设计 NFTSM 滑模面,其中指数函数用来加快状态远离平衡点时的收敛速度,符号函数用来提升系统稳定性.然后,基于 NFTSM 滑模面来设计由等效控制输入和切换控制输入构成的 NFTSM 控制律,该控制律具有能同时实现控制输入非奇异和系统状态有限时间内快速收敛的优势.最后,根据给出的耦合双容水箱模型数学描述,将 NFTSM 方法应用于耦合双容水箱液位控制中,设计了 NFTSM 液位跟踪控制器.仿真证明,在存在外扰且参数摄动 25%条件下,该控制系统仍能精确跟踪给定液位,表明了 NFTSM 控制方法的有效性和鲁棒性.

关键词: 跟踪控制;终端滑模;非奇异;快速;耦合双容水箱

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2011)12-0039-06

Tracking Control of Water Level Based on a Nonsingular Fast Terminal Sliding Mode

ZHAO Peng, YAO Minli, SHEN Xiaowei, HU Youtao

(Staff Room 602, The Second Artillery Engineering College, Xi'an 710025, China)

Abstract: A nonsingular fast terminal sliding mode controller (NFTSM) is proposed to offset the singularity of control inputs and to shorten the convergence time in traditional terminal sliding mode control methods. The proposed method is composed of the NFTSM manifold and its control law. An exponential function of the system states is introduced into the manifold to accelerate the convergence when the states are far away from the equilibrium point, and a symbolic function is also brought in to ensure the stabilization of the system. Then, a novel sliding mode control law is deduced based on the newly proposed manifold, and is composed of the equivalent control law and the shift control law. The NFTSM control law is proved to be nonsingular and fast convergent in finite time. A mathematical description of the coupled tanks model is presented, based on which the novel NFTSM method is applied to control the water level tracking processing of the coupled tanks, and the NFTSM water level controller is designed. Simulations results show that the tracking process is precisely controlled even with the disturbance and a 25% perturbation in parameters, and that the NFTSM controller is robust.

Keywords: tracking control; terminal sliding mode; nonsingular; fast; coupled tanks

作为一类常见的工业装置,耦合双容水箱广泛应用于制药工程、水净化与污水处理和核废料处理等工业领域,其液位控制亦为一类重要的工业控制问题.目前,耦合双容水箱的液位控制多采用 PID

收稿日期: 2011-03-21. 作者简介: 赵鹏(1983—),男,博士生;姚敏立(通信作者),男,教授,博士生导师. 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61074072).

网络出版时间: 2011-10-18

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20111018.1150.006.html>

方法^[1]或线性化方法^[2].然而,实际的水箱系统参数容易发生变化,水箱液位调节过程还受到各类外界扰动,耦合双容水箱本质上是一个不确定的非线性系统,因此有必要采用非线性方法来控制耦合双容水箱液位,以满足系统在复杂环境下正常工作的要求.

滑模控制(sliding mode control, SMC)对满足匹配条件的扰动和模型不确定性具有完全鲁棒性^[3-4],因此被广泛应用于解决飞行器^[5]、电机^[6]和机械臂^[7]等领域的控制问题.但是,由于传统 SMC 采用线性滑模面,系统状态只能渐近收敛至平衡点,且收敛速度较慢,因此系统偏差较大时 SMC 的控制效果不理想^[8].文献[8]引入神经网络的吸引子概念^[9]设计了非线性的终端滑模面(terminal sliding mode, TSM),使系统状态能够从相平面任意初始位置在有限时间内收敛至平衡点.文献[10]设计了非奇异终端滑模面(nonsingular terminal sliding mode, NTSM),据此获得的控制输入消除了文献[8]中控制律的奇异项.文献[11]设计了快速终端滑模面(fast terminal sliding mode, FTSM),实现了当初始状态距离平衡点过远时系统状态的快速收敛.此外,文献[12]还提出了采用二阶吸引子的非奇异快速终端滑模面,但是二阶吸引子使系统状态由有限时间到达退化为渐近到达,且引起滑动阶段的收敛停滞,导致滑模状态的快速收敛特性消失.显然,设计能够同时满足控制输入非奇异和系统状态有限时间内快速收敛的滑模控制方法具有重要的理论意义和工程应用价值.

本文的研究目的是通过设计新型非奇异快速终端滑模面和控制律,建立新的非奇异快速终端滑模(nonsingular fast terminal sliding mode, NFTSM)控制方法,同时实现系统控制输入非奇异和系统状态快速收敛.在此基础上,设计 NFTSM 液位跟踪控制器,实现参数不确定且存在外部扰动情况下耦合双容水箱对参考液位的精确跟踪.本文提出的 NFTSM 控制方法不仅适用于耦合双容水箱控制,也能够满足各种非线性系统终端滑模控制中对控制输入非奇异和收敛快速性的要求,因而可以推广应用用于各类实际工程控制问题.

1 问题描述

1.1 耦合双容水箱模型

如图1所示的耦合双容水箱^[12-13]中,水箱1和水箱2通过连通口互相耦合.液体以流速 q 从入口流入水箱1,以流速 q_1 从连通口进入水箱2,以流速

q_2 从出口流出水箱2, $q, q_1, q_2 > 0$.水箱1的液位 h_1 和水箱2的液位 h_2 满足 $h_1 > h_2 > 0$.根据液位与流速关系,耦合双容水箱可用如下微分方程描述

$$\dot{h}_1 = \frac{q - q_1}{\alpha}; \quad \dot{h}_2 = \frac{q_1 - q_2}{\alpha} \quad (1)$$

式中: α 为水箱1和水箱2横截面积之和; $q_1 = \alpha_1(2gh_1 - 2gh_2)^{1/2}$; $q_2 = \alpha_2(2gh_2)^{1/2}$; α_1 为连通口截面积; α_2 为出口截面积; g 为重力加速度.

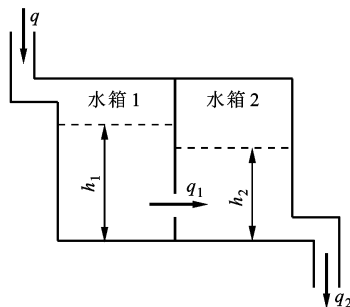


图1 耦合双容水箱系统

控制目标:设计非奇异快速终端滑模控制方法,在参数不确定和存在扰动的条件下,通过控制液体流速 q ,使水箱2液位 h_2 在有限时间内由初始值快速跟踪参考液位.

1.2 模型重定义

定义耦合双容水箱系统的控制输入 $u_t = q$,定义系统状态 $\mathbf{Z} = [z_1, z_2]^T$ 为

$$\left. \begin{aligned} z_1 &= h_2 \\ z_2 &= \frac{1}{\lambda} [\alpha_1(2gh_1 - 2gh_2)^{1/2} - \alpha_2(2gh_2)^{1/2}] \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

将式(2)代入式(1),并考虑系统模型不确定性与扰动之和 $c(\mathbf{Z})$,则式(1)转化为

$$\left. \begin{aligned} \dot{z}_1 &= z_2 \\ \dot{z}_2 &= a(\mathbf{Z}) + c(\mathbf{Z}) + b(\mathbf{Z})u_t \\ y &= z_1 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: y 为系统输出;非线性函数 $a(\mathbf{Z})$ 、 $b(\mathbf{Z})$ 为

$$\begin{aligned} a(\mathbf{Z}) &= \frac{(2g)^{1/2}\alpha_2}{2\alpha} \cdot \\ &\frac{2g\alpha_1^2 z_1 - [\alpha_2(2gz_1)^{1/2} + \alpha z_2]^2}{(2g)^{1/2}\alpha\alpha_2 z_1 + \alpha^2 z_2 z_1^{1/2}} + \frac{g(\alpha_2^2 - 2\alpha_1^2)}{\alpha^2}; \\ b(\mathbf{Z}) &= \frac{g\alpha_1^2}{\alpha^2 [\alpha_2(2gz_1)^{1/2} + \alpha z_2]} \end{aligned}$$

式(3)即为采用状态空间描述的耦合双容水箱数学模型.控制目标转化为:设计非奇异快速终端滑模面和适当的控制律 u_t ,在存在不确定参数和扰动条件下,控制系统式(3)的输出 y 在有限时间内快

速跟踪给定函数 $H(t)$.

2 NFTSM 控制算法设计

考虑存在如下参数不确定性与未知扰动的仿射非线性系统的镇定问题

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= f(\mathbf{X}) + g(\mathbf{X}) + b(\mathbf{X})u \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: $\mathbf{X}=[x_1, x_2]^T \in \mathbf{R}^2$ 为系统状态变量; $u \in \mathbf{R}$ 为系统的控制输入; $f(\mathbf{X})$ 、 $b(\mathbf{X})$ 均为已知非线性函数; $g(\mathbf{X})$ 为系统不确定性与未知扰动之和.

为了克服 TSM 控制输入奇异和收敛时间过长的问题, 定义新型 NFTSM 的滑模变量

$$s = x_1 + \alpha |x_1|^{\gamma} \operatorname{sgn} x_1 + \beta |x_2|^{\lambda} \operatorname{sgn} x_2 \quad (5)$$

式中: 比例系数 $\alpha, \beta > 0$; 控制律参数 $\gamma > 1, 2 > \lambda > 1$. 根据式(5)所得滑模面 $s=0$, 避免了 $x_1 < 0$ 或 $x_2 < 0$ 时系统状态产生复数解而导致滑模面不稳定的情况发生.

假设 1 非线性系统式(4)中 $g(\mathbf{X})$ 的上界已知, 即 $\|g(\mathbf{X})\| < l_g$, 其中 $l_g > 0$ 为一个常数.

定理 1 对于非线性不确定系统式(4), 选取 NFTSM 滑模变量表达式(5), 若采用如下式表示的控制律, 则状态 $\mathbf{X}$ 在有限时间内收敛至平衡点

$$u = u_{\text{eq}} + u_d \quad (6)$$

$$u_{\text{eq}} = -b^{-1}(\mathbf{X})(f(\mathbf{X}) +$$

$$\frac{\alpha\gamma}{\beta\lambda} |x_1|^{r-1} |x_2|^{2-\lambda} \operatorname{sgn} x_2 +$$

$$\frac{1}{\beta\lambda} |x_2|^{2-\lambda} \operatorname{sgn} x_2) \quad (7)$$

$$u_d = -b^{-1}(\mathbf{X})(l_g + \eta) \operatorname{sgn} s \quad (8)$$

式中: u_{eq} 为等效控制输入; u_d 为切换控制输入; 设计常数 $\eta > 0$.

证明 取 Lyapunov 函数 $V = s^2/2 \geq 0$, 将式(6)~式(8)代入式(4), 得

$$\dot{x}_2 = g(\mathbf{X}) - \frac{\alpha\gamma}{\beta\lambda} |x_1|^{r-1} |x_2|^{2-\lambda} \operatorname{sgn} x_2 -$$

$$\frac{1}{\beta\lambda} |x_2|^{2-\lambda} \operatorname{sgn} x_2 - b^{-1}(\mathbf{X})(l_g + \eta) \operatorname{sgn} s \quad (9)$$

对 V 求一阶导数, 并将式(5)和式(9)代入, 得

$$\dot{V} = \dot{s} = s(\dot{x}_1 + \alpha\gamma |x_1|^{r-1} \dot{x}_1 + \beta\lambda |x_2|^{\lambda-1} \dot{x}_2) =$$

$$s(x_2 + \alpha\gamma |x_1|^{r-1} x_2 + \beta\lambda |x_2|^{\lambda-1} \cdot$$

$$(g(\mathbf{X}) - \frac{\alpha\gamma}{\beta\lambda} |x_1|^{r-1} |x_2|^{2-\lambda} \operatorname{sgn} x_2 -$$

$$\frac{1}{\beta\lambda} |x_2|^{2-\lambda} \operatorname{sgn} x_2 - (l_g + \eta) \operatorname{sgn} s)) =$$

$$s\beta\lambda |x_2|^{\lambda-1} (g(\mathbf{X}) - (l_g + \eta) \operatorname{sgn} s) \quad (10)$$

当 $s \neq 0$ 且 $x_2 \neq 0$ 时, 根据假设 1 可知 $\dot{V} \leq -\eta |s| < 0$ 恒成立, 即系统状态轨迹在有限时间内到达 $s=0$.

当 $V=0$ 时, 存在以下 3 种情况之一:

(1) $s=0$, 说明系统状态已到达滑模面, 有限时间到达实现;

(2) $s>0$ 且 $x_2=0$ 时, 由式(5)可知 $x_1>0$, 由式(10)可知 $\dot{x}_2<0$;

(3) $s<0$ 且 $x_2=0$ 时, 由式(5)可知 $x_1<0$, 由式(10)可知 $\dot{x}_2>0$.

图 2 为系统状态的相平面收敛轨迹曲线. 由图 2 可以看出: 情况(2)和情况(3)意味着在相平面内存在一个极小量 $\epsilon > 0$, 使得 $s>0$ 且 $x_2 \in [-\epsilon, \epsilon]$ 时, 状态 $\mathbf{X}$ 将远离 x_1 轴向相平面第 II 象限移动; $s<0$ 且 $x_2 \in [-\epsilon, \epsilon]$ 时, 状态 $\mathbf{X}$ 将远离 x_1 轴向相平面第 IV 象限移动, 在有限时间内到达切换面 $s=0$. 因此, 相平面内任意位置代表的系统状态都将在控制律 u 作用下在有限时间 t_r 内到达 $s=0$. 到达时间 t_r 满足^[13]

$$t_r \leq s(t_0)/\eta \quad (11)$$

式中: t_0 为起始时刻; $s(t_0)$ 为起始时刻的滑模变量值.

当 $s=0$ 时, 由式(5)可求得状态收敛时间 t_s 为

$$t_s = -\beta^{1/\lambda} \int_{x_1(t_r)}^0 (x_1 + \alpha |x_1|^{\gamma} \operatorname{sgn} x_1)^{-1/\lambda} dx_1 \quad (12)$$

因此, 系统状态 $\mathbf{X}=[x_1, x_2]^T$ 可在有限时间 t_s 内滑动到平衡点. 定理 1 得证.

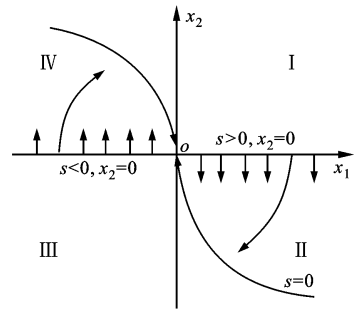


图 2 相平面状态收敛轨迹

文献[8]给出了基于系统式(4)的 TSM 滑模面 $s_1 = x_2 + \beta x_1^{q/p} = 0$, 其中比例系数 $\beta > 0$, 指数的分母 p 和分子 q 均为正的奇数且 $p > q$. 文献[8]中给出基于 s_1 设计的控制律 u_1 的表达式为

$$u_1 = -b^{-1}(\mathbf{X})(f(\mathbf{X}) + \beta \frac{q}{p} x_1^{(q-p)/p} x_2 + (l_g + \eta) \operatorname{sgn} s) \quad (13)$$

当系统状态 $x_1=0, x_2 \neq 0$ 时, $x_1^{(q-p)/p} x_2$ 瞬时趋于无穷大, 导致控制律式(13)奇异, 而基于 NFTSM 滑模变量表达式(5)给出的控制律式(6)~式(8)消除了可能的奇异项, 实现了控制输入非奇异。

文献[10]给出了基于系统式(4)的 NTSM 滑模面的表达式 $s_2 = x_1 + \beta x_2^{p/q} = 0$, β, p, q 的定义同 s_1 。文献[10]中给出 NTSM 的收敛时间为

$$t_{s2} = -\beta^{q/p} \int_{x_1(t_r)}^0 x_1^{-q/p} dx_1 \quad (14)$$

令 $\lambda = p/q, h(x_1) = (x_1 + \alpha |x_1|^{\gamma} \text{sgn} x_1)^{-1/\lambda} - x_1^{-1/\lambda}$, $\Delta t = t_s - t_{s2} = -\beta^{1/\lambda} \int_{x_1(t_r)}^0 h(x_1) dx_1$ 。由式(12)和式(14)可知, 当 $0 < x_1 < x_1(t_r)$ 时, $h(x_1) < 0$, 因此 $\Delta t < 0$; 当 $x_1(t_r) < x_1 < 0$ 时, $h(x_1) > 0$, 同样 $\Delta t < 0$ 。因此, 系统状态远离平衡点时 NFTSM 方法的收敛时间 $t_s < t_{s2}$ 。

3 NFTSM 液位跟踪控制器设计

本文根据式(5)~式(8)设计耦合双容水箱液位 h_2 的 NFTSM 跟踪控制器。假设液位 h_2 满足如下条件。

假设 2 参考液位 $H(t)$ 有界且 $\ddot{H}(t)$ 存在。

假设 3 耦合双容水箱模型式(3)的不确定性与扰动之和 $c(Z)$ 满足

$$\|c(Z)\| < K_e \quad (15)$$

式中: $K_e > 0$ 。

定义 h_2 的跟踪误差 $e = [e_1, e_2]^T$, 其中 $e_1 = z_1 - H(t)$, $e_2 = \dot{e}_1 = z_2 - \dot{H}(t)$ 。因此, 跟踪误差的动力方程组为

$$\left. \begin{aligned} \dot{e}_1 &= e_2 \\ \dot{e}_2 &= a(Z) + c(Z) + b(Z)u_t - \ddot{H}(t) \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

定理 2 设计液位 h_2 跟踪控制所用 NFTSM 方法中的滑模变量 σ 的表达式为

$$\sigma = e_1 + k_1 |e_1|^{\gamma} \text{sgn} e_1 + k_2 |\dot{e}_1|^{\lambda} \text{sgn} \dot{e}_1 \quad (17)$$

式中: $k_1, k_2 > 0; \gamma > 1; 2 > \lambda > 1$ 。设计如式(18)的控制律, 则耦合双容水箱系统液位高度 h_2 的跟踪误差 e_1 将在有限时间收敛至 0

$$u_t = u_{\text{teq}} + u_{\text{td}} \quad (18)$$

$$u_{\text{teq}} = -b^{-1}(Z) \left[a(Z) - \ddot{H}(t) + \frac{1}{k_2 \lambda} |e_2|^{2-\lambda} \cdot \text{sgn} e_2 + \frac{k_1 \gamma |e_1|^{\gamma-1}}{k_2 \lambda} |e_2|^{2-\lambda} \text{sgn} e_2 \right] \quad (19)$$

$$u_{\text{td}} = -b^{-1}(Z)(K_e + \eta) \text{sgn} \sigma \quad (20)$$

式中: u_{teq} 为耦合双容水箱系统的等效控制输入; u_{td} 为耦合双容水箱系统的切换控制输入。

证明 取 Lyapunov 函数 $V = \sigma^2/2 \geq 0$, 则由式(17)~式(20)可得

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \sigma \dot{\sigma} = \\ &\sigma(e_2 + k_1 \gamma |e_1|^{\gamma-1} e_2 + k_2 \lambda |e_2|^{\lambda-1} \dot{e}_2) = \\ &\sigma[e_2 + k_1 \gamma |e_1|^{\gamma-1} e_2 + k_2 \lambda |e_2|^{\lambda-1} \cdot \\ &(a(Z) + c(Z) + b(Z)(u_{\text{teq}} + u_{\text{td}}) - \ddot{H}(t))] = \\ &\sigma k_2 \lambda |e_2|^{\lambda-1} (c(Z) + b(Z)u_{\text{td}}) = \\ &\sigma k_2 \lambda |e_2|^{\lambda-1} (c(Z) - (K_e + \eta) \text{sgn} \sigma) \quad (21) \end{aligned}$$

与定理 1 的证明过程类似, 根据假设 3 和式(21)可以证得滑模面 σ 在有限时间内收敛至 0, $\sigma=0$ 时, e_1 在有限时间内收敛至 0。定理 2 得证。

4 仿真实验

4.1 控制性能仿真比较

分别对 TSM、NTSM 和 NFTSM 方法的控制性能进行了仿真比较。考虑如下系统^[10,14]的镇定控制问题

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= 0.1 \sin(20t) + u \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

在状态 x_2 导数中加入不确定性与扰动之和 $g(\mathbf{X}) = 0.012 \sin t$ ^[15], 设初始状态为(1, 0)。

为确保比较的合理性, 采用对应参数设置均相同的滑模面和控制律进行仿真。3 种滑模变量取 $s_{\text{TSM}} = x_1^{3/5} + x_2$, $s_{\text{NTSM}} = x_1 + x_2^{5/3}$, $s = x_1 + |x_1|^5 \text{sgn} x_1 + |x_2|^{5/3} \text{sgn} x_2$, 3 种控制律参数均取 $l_g = 0.015$, $\eta = 0.2$ 。仿真结果如图 3 所示。由图 3 可知: TSM 的系统状态收敛速度较快(见图 3a), 但控制输入在状态 x_1 接近平衡点时有奇异产生(见图 3b); NTSM 克服了控制输入奇异的缺点(见图 3e), 但状态收敛速度较慢(见图 3d); 3 种方法中, NFTSM 的系统状态收敛速度最快(见图 3g), 且消除了控制输入奇异(见图 3h), 具有最佳的控制性能。

4.2 液位跟踪控制仿真

仿真 1 NFTSM 方法液位控制仿真。对按照定理 2 设计的 NFTSM 液位跟踪控制器进行了仿真。耦合双容水箱参数 $\alpha = 208.2 \text{ cm}^2$, $\alpha_1 = 0.58 \text{ cm}^2$, $\alpha_2 = 0.24 \text{ cm}^2$, $g = 981 \text{ cm/s}^2$, 参考液位为 6 cm。NFTSM 滑模面和控制律参数 $k_1 = 10$, $k_2 = 80$, $\gamma = 1.5$, $\lambda = 1.2$, $K_e = 0.005$ 。仿真结果如图 4 所示, 在控制流速 q (图 4b)作用下, 图 4a 中的水箱液位 h_2

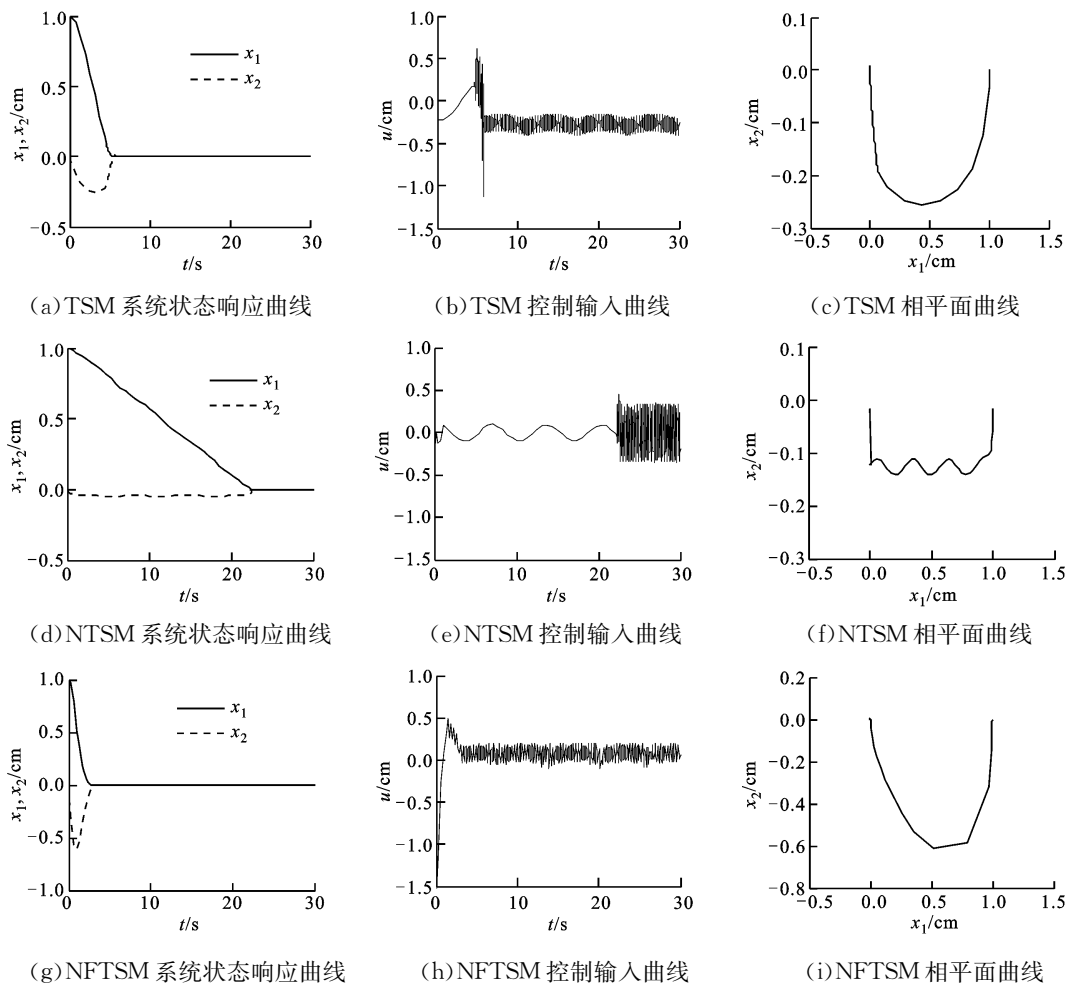


图 3 终端滑模控制性能仿真比较

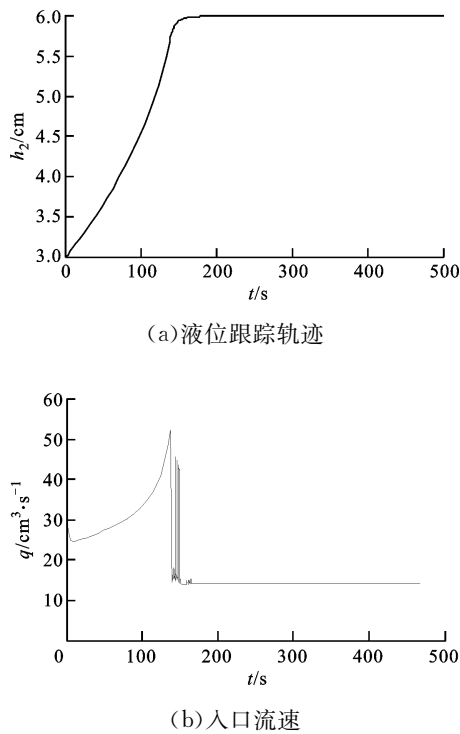


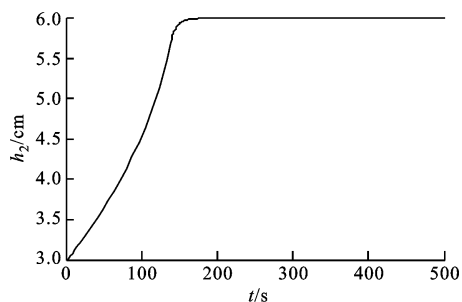
图 4 NFTSM 液位控制仿真曲线

准确跟踪了参考液位,NFTSM 液位跟踪控制器能够实现对水箱 2 参考液位的跟踪控制.

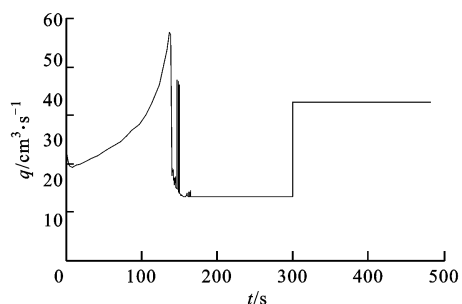
仿真 2 NFTSM 液位控制鲁棒性验证. 将耦合双容水箱参数 α_1 和 α_2 同时增大 25%, 并从 $t=300\text{ s}$ 时开始对系统施加 $-1.5\text{ cm}^3/\text{s}$ 的扰动. 保持滑模面和控制律参数设置与未受扰时相同, 对 NFTSM 液位跟踪控制器进行仿真, 结果如图 5 所示. 在控制流速 q (见图 5b)作用下, 与图 4a 对比, 图 5a 中系统的参数摄动对液位跟踪轨迹影响甚微, 且液位跟踪轨迹未受扰动影响, 表明 NFTSM 控制器对水箱参数摄动和扰动具有完全鲁棒性.

5 结 论

为了解决传统终端滑模控制中控制律奇异和系统状态收敛速度慢的问题, 提出一种非奇异快速终端滑模控制方法. 采用 Lyapunov 直接法证明 NFTSM 方法可保证系统状态在有限时间内收敛至平衡点. 通过仿真比较, 证明 NFTSM 方法具有控制输入非奇异和收敛时间短的优良特性. 在此基础



(a) 液位跟踪轨迹



(b) 入口流速

图5 存在扰动的 NFTSM 液位控制仿真曲线

上,将 NFTSM 方法引入耦合双容水箱系统数学模型,通过设计 NFTSM 液位跟踪控制器,实现了参数摄动和系统扰动存在时水箱液位的精确控制。此外,由于本文 NFTSM 方法是针对一般不确定非线性系统提出的,所以还可推广应用于解决各类实际系统的镇定或跟踪控制问题。

参考文献:

- [1] ANTONIO V. A new design for a PID plus feed forward controller [J]. *Journal of Process Control*, 2004, 14(2): 457-463.
- [2] WU Kwoliang, YU Chengching, CHENG Yuchang. A two degree of freedom level control [J]. *Journal of Process Control*, 2001, 11(2): 311-319.
- [3] RONALD H. Sliding-mode control variations [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2007, 52(3): 468-480.
- [4] CHEN Minshin, CHEN Chiahang, YANG Fuyun. An LTR-observer-based dynamic sliding mode control for chattering reduction [J]. *Automatica*, 2007, 43(6): 1111-1116.
- [5] 胡剑波, 庄开宇. 高级变结构控制理论及应用[M]. 西安:西北工业大学出版社, 2008.
- [6] 张军, 姜长生, 文杰. 近空间飞行器的 DSF: vast 鲁棒

快速 Terminal 滑模控制 [J]. *西安交通大学学报*, 2009, 43(3): 110-115.

ZHANG Jun, JIANG Changsheng, WEN Jie. Robust tracking control of near space vehicle based on dynamic saturation function fast terminal sliding mode [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2009, 43(3): 110-115.

- [7] 郑剑飞, 冯勇, 陆启良. 永磁同步电机的高阶终端滑模控制方法 [J]. *控制理论与应用*, 2009, 26(6): 697-700.

ZHENG Jianfei, FENG Yong, LU Qiliang. High-order terminal sliding-mode control for permanent magnet synchronous motor [J]. *Control Theory & Applications*, 2009, 26(6): 697-700.

- [8] MAN Zhihong, PAPLINSKI A P, WU Hairong. A robust MIMO terminal sliding mode control scheme for rigid robotic manipulators [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1994, 39(12): 2464-2469.

- [9] ZAK M. Terminal attractors for addressable memory in neural network [J]. *Physics Letters: A*, 1988, 133(10): 18-22.

- [10] FENG Yong, YU Xinhua, MAN Zhihong. Non-singular terminal sliding mode control of rigid manipulators [J]. *Automatica*, 2002, 38(11): 2159-2167.

- [11] YU Xinhua, MAN Zhihong. Fast terminal sliding-mode control design for nonlinear dynamical systems [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems: I Fundamental Theory and Applications*, 2002, 49(2): 261-264.

- [12] 李升波, 李克强, 王建强, 等. 非奇异快速的终端滑模控制方法 [J]. *信息与控制*, 2009, 38(1): 1-8.

LI Shengbo, LI Keqiang, WANG Jianqiang, et al. Nonsingular and fast terminal sliding mode control method [J]. *Information and Control*, 2009, 38(1): 1-8.

- [13] ALMUTAIRI N B, ZRIBI M. Sliding mode control of coupled tanks [J]. *Mechatronics*, 2006, 16(3): 427-441.

- [14] 刘金琨. 滑模变结构控制 MATLAB 仿真[M]. 北京:清华大学出版社, 2005: 381-383.

- [15] KHAN M K, SPURGEON S K. Robust MIMO water level control in interconnected twin-tanks using second order sliding mode control [J]. *Control Engineering and Practice*, 2006, 14(2): 375-386.

(编辑 刘杨)