

基于弹性能量函数的非线性不确定系统控制方法

谭永宏^{1†}, 曾喆昭²

(1. 湖南科技学院 电子与信息工程学院, 湖南 永州 425199;

2. 长沙理工大学 电气与信息工程学院, 长沙 410076)

摘要: 针对非线性不确定系统的控制问题, 提出一种基于弹性能量函数的扰动观测方法和弹性跟踪控制方法. 该方法以弹性能量函数为核心, 将其分别应用于扰动观测器、虚拟跟踪指令以及弹性跟踪控制器的设计. 该控制方法的突出优势是只根据误差来消除误差, 不涉及误差的微分运算, 控制器增益参数完全根据积分步长来整定. 理论研究表明, 所提出的弹性跟踪控制方法不仅可从理论上保证各级子控制器的稳定性, 有效解决高阶 SISO 非线性不确定系统的控制问题, 而且可有效避免反步控制方法出现的微分爆炸问题. 此外, 每个子控制器只有一个由积分步长即可整定的增益参数, 因而控制器结构简单、计算量较小. 仿真结果表明: 所提出的控制方法不仅具有快的响应速度、高的控制精度以及强的抗扰动能力, 而且不依赖于被控对象模型, 在非线性不确定系统控制领域具有广泛的应用前景.

关键词: 弹性跟踪控制; 弹性能量函数; 扰动观测器; 非线性不确定系统; 鲁棒稳定性; 免参数整定

中图分类号: TP13

文献标志码: A

Nonlinear uncertain system control method based on elastic energy function

TAN Yong-hong^{1†}, ZENG Zhe-zhao²

(1. School of Electronics and Information Engineering, Hu'nan University of Science and Engineering, Yongzhou 425199, China; 2. College of Electric and Information Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410076, China)

Abstract: For the control problem of a nonlinear uncertain system, a disturbance observation method and an elastic tracking control method are proposed based on the elastic energy function. The elastic energy function is applied to design the disturbance observer, virtual tracking instruction and elastic tracking controller, respectively, as the core technology. The prominent advantage of the proposed control method is only according to the error to eliminate the error, does not involve the differential operators of the error, and the controller gain parameters are determined completely by the integral step. Theory research show that the proposed elastic tracking control method not only guarantees the stability of various sub-controller theoretically, and effectively solves the control problem of higher-order SISO nonlinear uncertain systems, but also effectively avoids the differential explosion problem of the back stepping control method. In addition, each sub-controller has only one gain parameter which can be tuned by the integral step, so the controller has simple structure and small calculation. Simulation results show that the proposed elastic tracking control method not only has fast response speed, high control precision and strong ability to resist disturbance, but also is not dependent on the controlled object model, therefore has wide application prospect in the field of nonlinear uncertain systems control.

Keywords: elastic tracking control; elastic energy function; disturbance observer; nonlinear uncertain system; robust stability; parameter-free tuning

0 引言

非线性不确定系统不仅是一个复杂的非线性系统, 而且也是一个不稳定的非线性系统. 通过研究非线性不确定控制系统, 许多控制中的典型问题能够得

到有效反映, 比如控制系统中的鲁棒稳定性问题、非线性控制问题、控制器增益参数的镇定问题以及抗扰动控制问题等^[1]. 针对非线性不确定系统的控制问题, 国内外学者在滑模控制和自抗扰控制两个控制

收稿日期: 2017-11-15; 修回日期: 2018-05-23.

基金项目: 湖南省自然科学基金项目(2015JJ6043); 永州市指导性科技计划项目(永科发[2016]27号: 7); 湖南科技学院重点学科建设项目.

责任编辑: 毛志忠.

[†]通讯作者. E-mail: 496081928@qq.com.

领域做了大量研究工作,并取得不少研究成果^[2-6]. 针对常规滑模控制存在固有抖振现象的问题,国内外学者提出了多种解决方法,比如准滑模控制方法、高阶滑模控制方法、动态滑模控制方法、滑模趋近律方法、滑模扰动观测方法等. 文献[7]选取连续光滑的继电特性函数代替符号函数,是一种特殊的准滑模控制方法. 该方法在全程控制过程中都是连续状态的反馈控制,虽然完全消除了常规滑模控制中的高频抖振现象,但却完全丧失了常规滑模控制固有的抗内部参数摄动和外部扰动的宝贵特性. 动态滑模控制方法^[8-10]和高阶滑模控制方法^[11]则是将常规滑模控制中的滑模切换函数 s 通过微分环节构成新的滑模切换函数 σ ,因而可将不连续项转移到控制输入的一阶或高阶微分项中,在时间上即可得到实质连续的动态滑模控制信号,从而有效降低常规滑模控制中的抖振现象,然而用该方法精确获取一阶或高阶导数十分困难. 文献[12]利用 $\text{fal}(s, \alpha, \delta)$ 和 $\text{arsh}(s)$ 函数构造了一种新型滑模趋近律,取得了一定的控制效果. 然而,在控制过程中,由于现有的滑模趋近律仍然存在不可避免的抖振问题^[13-14],而且收敛速度还有待进一步加强^[15],文献[16]提出了一种多幂次滑模趋近律方法,但从仿真结果看,该方法抗扰动能力欠佳.

自抗扰控制(ADRC)方法中的核心技术是扩张状态观测器^[17-18]. 扩张状态观测器(ESO)的出现为处理控制系统中的内部不确定性和外部扰动提供了新的理论方法. 文献[19]对几种观测器的性能和参数进行了比较研究,并指出在观测性能上,ESO比传统的高增益观测器和滑模观测器具有更大的优势. 然而,在存在强扰动的情况下,现有ESO的状态观测能力都较差. 为此,文献[20-21]用非线性特殊光滑函数 $g(x, \delta)$ 分别设计扩张状态观测器(ESO)和滑模趋近律,并将ESO与增益参数自学习更新的滑模控制技术融为一体,分别实现了非仿射非线性系统以及一类时变系统的有效控制.

针对现有控制方法存在的局限性,本文提出一种基于弹性能量函数的扰动观测与虚拟控制相结合的弹性跟踪控制方法. 该控制方法不依赖于控制系统的具体模型,不涉及误差的微分运算,只利用控制误差即可实现非线性不确定系统的有效控制,因而是一种基于误差来消除误差的控制方法,在非线性不确定系统的控制领域具有较大的应用价值.

1 弹性能量函数及其特性分析

1.1 弹性能量函数定义

定义弹性能量函数模型为^[20-21]

$$\text{fee}(x, \delta) = \frac{x}{\delta^2} \exp(-x^2/2\delta^2), \quad (1)$$

其中 $\delta > 0$. 当宽度因子 $\delta = 1$ 时, $\text{fee}(x, \delta)$ 图形如图1所示.

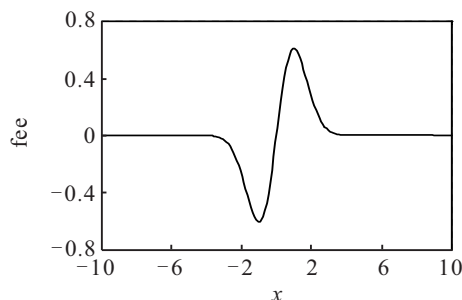


图1 $\text{fee}(x, \delta)$ 图形($\delta = 1$)

1.2 弹性能量函数特性分析

1) 时域特性.

i) $\text{fee}(0, \delta) = 0, \text{fee}(\pm\infty, \delta) = 0$;

ii) 当 $x = \pm\delta$ 时, $\text{fee}(x, \delta)$ 取极大、极小值: $\text{fee}(\pm\delta, \delta) = \pm 1/(\delta\sqrt{e})$, 其中 e 为自然对数的底.

2) 能量特性.

$$E(\delta) = \int_{-\infty}^{\infty} |\text{fee}(x, \delta)|^2 dx = \frac{\sqrt{\pi}}{2\delta}. \quad (2)$$

由于 $\text{fee}(x, \delta)$ 的能量随宽度因子 δ 变化, 将其称为弹性能量函数.

在控制过程中, 控制的目标就是期望系统输出能够高精度跟踪期望轨迹, 要求控制误差在有限时间内趋向零, 因而误差信号是典型的能量信号.

2 弹性跟踪控制器设计

2.1 问题描述

考虑如下非线性控制系统:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2, \\ \dot{x}_2 &= x_3, \\ &\vdots \\ \dot{x}_i &= x_{i+1}, \\ &\vdots \\ \dot{x}_n &= x_{n+1}, \\ x_n &= f(t, x) + g(t, x)u, \\ y &= x_1. \end{aligned} \quad (3)$$

其中: $x \in R^n$ 、 $u \in R$ 分别为系统的状态和控制输入; $f(t, x)$ 和 $g(t, x)$ 为不确定光滑函数, 而且 $g(t, x)$ 为非负函数; y 为系统输出.

2.2 虚拟递推控制器设计

假设系统的各个状态可以量测, 并设期望跟踪指令信号为 r , 则跟踪控制误差信号为 $e_1 = r - y$.

设 x_2 的虚拟跟踪指令为 x_{2d} , 且有

$$x_{2d} = c_1 \text{fee}(e_1, \delta_1), \quad (4)$$

则有虚拟跟踪控制误差为 $e_2 = x_{2d} - x_2$.

再设 x_3 的虚拟跟踪指令为 x_{3d} , 且有

$$x_{3d} = c_2 \text{fee}(e_2, \delta_1). \quad (5)$$

以此类推, 设 x_i 的虚拟跟踪指令为 x_{id} , 且有

$$x_{id} = c_{i-1} \text{fee}(e_{i-1}, \delta_1), \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (6)$$

其中: $c_i > 0, \delta_1 > 0$.

当 $i = n$ 时, 由式(6)可得虚拟跟踪指令

$$x_{nd} = c_{n-1} \text{fee}(e_{n-1}, \delta_1), \quad (7)$$

其中虚拟跟踪控制误差为 $e_{n-1} = x_{(n-1)d} - x_{n-1}$.

再设虚拟跟踪控制误差为 $e_n = x_{nd} - x_n$, 由系统(3)可得非线性不确定系统的弹性跟踪控制器

$$u = c_n \text{fee}(e_n, \delta_1) - d(t, \mathbf{x}). \quad (8)$$

其中: $c_n > 0, d(t, \mathbf{x}) = f(t, \mathbf{x}) + g(t, \mathbf{x})u - u$.

式(8)所示的弹性跟踪控制器实际上是一种虚拟递推控制方法, 如果系统模型不确定, 则使用式(8)进行控制将会出现困难. 为此, 本文使用基于弹性能量函数的ESO实现对系统状态以及总和扰动的观测估计.

2.3 基于扰动观测器的弹性跟踪控制器设计

假设总和扰动 $d(t, \mathbf{x})$ 的微分存在且有界, 定义观测误差为 $e_{z1} = x_1 - z_1$, 则有基于弹性能量函数的 $(n+1)$ 阶ESO模型如下^[20-21]:

$$\begin{aligned} \dot{z}_1 &= z_2 + b_1 \text{fee}(e_{z1}, \delta_2), \\ &\vdots \\ \dot{z}_n &= z_{n+1} + u + b_n \text{fee}(e_{z1}, \delta_2), \\ \dot{z}_{n+1} &= b_{n+1} \text{fee}(e_{z1}, \delta_2). \end{aligned} \quad (9)$$

其中: $b_j = 5^{j-1}/h (j = 1, 2, \dots, n+1)$, h 为积分步长; $\delta_2 > 0$.

由式(9)所示的ESO即可实现 $z_j \rightarrow x_j (j = 1, 2, \dots, n)$, $z_{n+1} \rightarrow d(t, \mathbf{x})$ 的状态估计, 因此, 式(8)所示的弹性跟踪控制器可改写为

$$u = c_n \text{fee}(e_n, \delta_1) - z_{n+1}. \quad (10)$$

此时, 系列误差信号改写为 $e_j = x_{jd} - z_j$, 且 $e_1 = r - z_1 (j = 2, 3, \dots, n)$. 对于二阶非线性不确定系统, 有

$$\dot{x}_1 = x_2, \quad \dot{x}_2 = f(t, x_1, x_2) + g(t, x_1, x_2)u. \quad (11)$$

本文研究的弹性跟踪控制系统如图2所示.

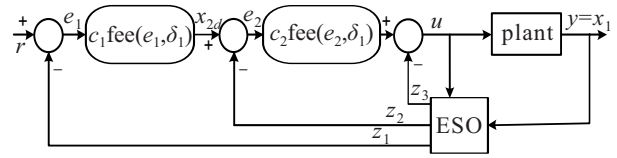


图2 弹性跟踪控制系统

2.4 控制系统稳定性分析

基于虚拟递推控制的弹性跟踪控制系统, 其控制目标就是实现系统各个状态的递推跟踪控制, 即 $y = x_1 \rightarrow r, x_2 \rightarrow x_{2d} \rightarrow \dot{r}, x_i \rightarrow x_{id} \rightarrow r^{(i-1)}, \dots, x_n \rightarrow x_{nd} \rightarrow r^{(n-1)}$ 以及状态观测估计 $z_1 \rightarrow x_1, z_2 \rightarrow x_2, \dots, z_n \rightarrow x_n, z_{n+1} \rightarrow d(t, \mathbf{x})$.

定理1 设 $r^{(j)}$ 表示 r 的第 j 阶导数有界, 即 $|r^{(j)}| \leq \varepsilon_j (j = 1, 2, \dots, n)$, 设扰动观测误差有界, 即 $|z_{n+1} - d(t, \mathbf{x})| \leq \varepsilon_{n+1}$, 则当且仅当虚拟跟踪控制指令中的增益参数满足 $c_j \gg \varepsilon_j, j = 1, 2, \dots, n$, 且 $c_n \gg \varepsilon_{n+1}$ 时, 基于虚拟递推指令的弹性跟踪控制系统是稳定的.

证明 设控制误差 $e_1 = r - x_1$, 则有

$$\begin{aligned} \dot{e}_1 &= \dot{r} - \dot{x}_1 = \dot{r} - x_2 \rightarrow \dot{r} - x_{2d} = \\ &c_1 [\dot{r}/c_1 - \text{fee}(e_1, \delta_1)]. \end{aligned}$$

定义Lyapunov函数 $V_1 = 0.5e_1^2$, 则有

$$\dot{V}_1 = e_1 \dot{e}_1 \rightarrow c_1 e_1 [\dot{r}/c_1 - \text{fee}(e_1, \delta_1)]. \quad (12)$$

由假设条件可知, 当 $|\dot{r}| \leq \varepsilon_1$ 时, 如果增益参数满足 $c_1 \gg \varepsilon_1$, 则有 $\dot{r}/c_1 \leq \varepsilon_1/c_1 \rightarrow 0$, 因此, 式(12)可简化为

$$\dot{V}_1 = e_1 \dot{e}_1 \rightarrow -c_1 e_1 \text{fee}(e_1, \delta_1). \quad (13)$$

考虑到 $c_1 > 0$ 且 $e_1 \text{fee}(e_1, \delta_1) \geq 0$, 由式(13)可得 $\dot{V}_1 \rightarrow -c_1 e_1 \text{fee}(e_1, \delta_1) \leq 0$, 即 V_1 正定, $\dot{V}_1$ 负定, 满足Lyapunov稳定性定理, 因此, 虚拟控制器(4)是稳定的.

同理, 设跟踪误差 $e_2 = \dot{r} - x_2$, 则有

$$\begin{aligned} \dot{e}_2 &= \ddot{r} - \dot{x}_2 = \ddot{r} - x_3 \rightarrow \ddot{r} - x_{3d} = \\ &c_2 [\ddot{r}/c_2 - \text{fee}(e_2, \delta_1)]. \end{aligned}$$

定义Lyapunov函数 $V_2 = 0.5e_2^2$, 则有

$$\dot{V}_2 = e_2 \dot{e}_2 \rightarrow c_2 e_2 [\ddot{r}/c_2 - \text{fee}(e_2, \delta_1)]. \quad (14)$$

由假设条件可知, 当 $|\ddot{r}| \leq \varepsilon_2$ 时, 如果增益参数满足 $c_2 \gg \varepsilon_2$, 则有 $\ddot{r}/c_2 \leq \varepsilon_2/c_2 \rightarrow 0$, 因此, 式(14)可简化为

$$\dot{V}_2 = e_2 \dot{e}_2 \rightarrow -c_2 e_2 \text{fee}(e_2, \delta_1). \quad (15)$$

考虑到 $c_2 > 0$ 且 $e_2 \text{fee}(e_2, \delta_1) \geq 0$, 因此, 由式(15)可得 $\dot{V}_2 \rightarrow -c_2 e_2 \text{fee}(e_2, \delta_1) \leq 0$, 即 V_2 正定, $\dot{V}_2$ 负定, 满

足Lyapunov稳定性定理,因此,虚拟控制器(5)是稳定的.

以此类推,设误差 $e_j = r^{(j-1)} - x_j$,则有

$$\dot{e}_j = r^{(j)} - \dot{x}_j = r^{(j)} - x_{j+1} \rightarrow r^{(j)} - x_{(j+1)d} = c_j[r^{(j)}/c_j - \text{fee}(e_j, \delta_1)].$$

定义Lyapunov函数 $V_j = 0.5e_j^2$,则有

$$\dot{V}_j = e_j \dot{e}_j \rightarrow c_j e_j [r^{(j)}/c_j - \text{fee}(e_j, \delta_1)]. \quad (16)$$

由假设条件可知,当 $|r^{(j)}| \leq \varepsilon_j$ 时,如果增益参数满足 $c_j \gg \varepsilon_j$,则有 $r^{(j)}/c_j \leq \varepsilon_j/c_j \rightarrow 0$,因此,式(16)可简化为

$$\dot{V}_j = e_j \dot{e}_j \rightarrow -c_j e_j \text{fee}(e_j, \delta_1). \quad (17)$$

考虑到 $c_j > 0$ 且 $e_j \text{fee}(e_j, \delta_1) \geq 0$,因此,由式(17)可得 $\dot{V}_j \rightarrow -c_j e_j \text{fee}(e_j, \delta_1) \leq 0$,即 V_j 正定, $\dot{V}_j$ 负定,满足Lyapunov稳定性定理,因此,虚拟控制器(6)是稳定的,其中 $j = 1, 2, \dots, n-1$.

同理,设误差 $e_n = r^{(n-1)} - x_n$,则有

$$\dot{e}_n = r^{(n)} - \dot{x}_n = r^{(n)} - d(t, \mathbf{x}) - u,$$

其中 $d(t, \mathbf{x}) = f(t, \mathbf{x}) + g(t, \mathbf{x})u - u$. 由弹性跟踪控制律(10)可得

$$\dot{e}_n = r^{(n)} + z_{n+1} - d(t, \mathbf{x}) - c_n \text{fee}(e_n, \delta_1).$$

定义Lyapunov函数 $V_n = 0.5e_n^2$,则有

$$\begin{aligned} \dot{V}_j &= e_n \dot{e}_n = \\ c_n e_n [r^{(n)}/c_n + (z_{n+1} - d(t, \mathbf{x}))/c_n - \text{fee}(e_n, \delta_1)]. \end{aligned} \quad (18)$$

由假设 $|r^{(n)}| \leq \varepsilon_n$ 和 $|z_{n+1} - d(t, \mathbf{x})| \leq \varepsilon_n$ 可知,如果满足条件 $c_n \gg \varepsilon_n$ 且 $c_n \gg \varepsilon_{n+1}$,则有 $r^{(n)}/c_n \leq \varepsilon_n/c_n \rightarrow 0$, $(z_{n+1} - d(t, \mathbf{x}))/c_n \leq \varepsilon_{n+1}/c_n \rightarrow 0$,因此,式(18)可简化为

$$\dot{V}_n = e_n \dot{e}_n \rightarrow -c_n e_n \text{fee}(e_n, \delta_1). \quad (19)$$

考虑到 $c_n > 0$ 且 $e_n \text{fee}(e_n, \delta_1) \geq 0$,因此,由式(19)可得 $\dot{V}_n \rightarrow -c_n e_n \text{fee}(e_n, \delta_1) \leq 0$,即 V_n 正定, $\dot{V}_n$ 负定,满足Lyapunov稳定性定理,因此,弹性跟踪控制器(10)是稳定的.

综上所述,当且仅当虚拟递推指令的增益参数满足条件 $c_j \gg \varepsilon_j, j = 1, 2, \dots, n$,且 $c_n \gg \varepsilon_{n+1}$ 时,本文提出的弹性跟踪控制系统是稳定的. $\square$

通常取增益参数为 $c_j = 5^{j-1}/h, (j = 1, 2, \dots, n)$,其中 h 是积分步长.

3 仿真结果与分析

为了验证本文控制方法的有效性,以文献[1]给出的二阶非线性不确定系统为例进行仿真实验.

例1 考虑如下非线性控制系统^[1]:

$$\dot{x}_1 = x_2, \quad \dot{x}_2 = f(t, \mathbf{x}) + g(t, \mathbf{x})u. \quad (20)$$

其中: $f(t, \mathbf{x}) = e^{x_2} \cos x_1, g(t, \mathbf{x}) = 1 + \sin^2 t$,期望轨迹 $r = \sin t$. 为了便于比较,给出文献[1]使用的二阶滑模控制方法,其具体控制器为

$$\begin{aligned} u = & -15 \int_0^t [\sigma(s^{-\frac{9}{7}} + 1.5^{\frac{9}{7}} \sigma(s))]^{\frac{5}{9}} dt - \\ & \int_0^t \bar{a} \text{sgn}(s^{-\frac{9}{7}} + 1.5^{\frac{9}{7}} \sigma(s)) dt. \end{aligned} \quad (21)$$

其中: $s = x_2 - \sin t$,且有

$$\sigma(x) = \begin{cases} \varepsilon \text{sgn}(x), & |x| > \varepsilon; \\ x, & |x| \leq \varepsilon. \end{cases}$$

$$\bar{a} = e^{2x_2} + 1 + e^{x_2} |x_2| + 5(1 + 2e^{x_2}).$$

仿真实验中,设采样频率为 $f_s = 100 \text{ Hz}$,则积分步长为 $h = 0.01$. 取弹性跟踪控制器增益参数为 $c_1 = 1/h = 100, c_2 = 500; \delta_1 = 2, \delta_2 = 1; b_1 = 10, b_2 = 500, b_3 = 2500$.

本文仿真结果如图3所示.

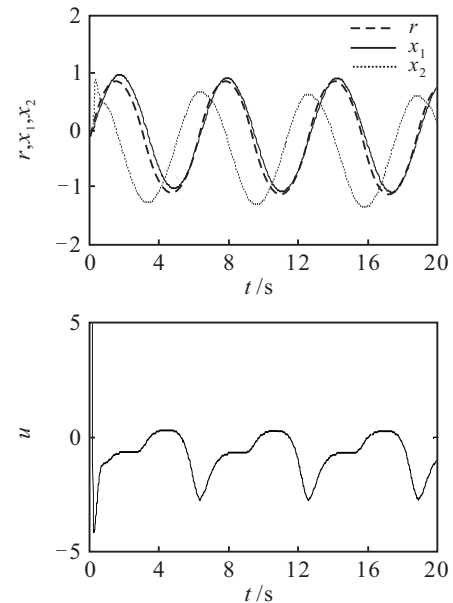


图3 例1仿真结果

由图3可知,与文献[1]相比,本文提出的弹性跟踪控制方法具有更快的响应速度,在不到0.2s的时间内就能快速跟踪期望轨迹,而文献[1]需要约6s才能跟踪上期望轨迹.此外,由式(21)可知,文献[1]的控制方法涉及复杂的计算,因而在实际应用中存在局限性.

例2 考虑二阶倒立摆模型^[1]

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= x_2, \\ \dot{x}_2 &= -\frac{MgL}{2J} \sin x_1 - \frac{V_s}{J} x_2 + \rho + \frac{1}{J} u, \\ y &= x_1.\end{aligned}\quad (22)$$

其中: x_1 是摆角, x_2 是摆速; g 是重力加速度; M 是摆杆质量; L 是摆长; $J = ML^2$ 是转动惯量; V_s 是粘滞摩擦系数; ρ 是外部扰动. 设受控系统的相关参数与文献[1]完全相同, 即 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$, $V_s = 0.18$, $M = 1.1 \text{ kg}$, $L = 1 \text{ m}$; $x_1(0) = -\pi/3$, $x_2(0) = 2$.

外部扰动为 $\rho = 0.5 \sin(2t) + 0.5 \cos(2t)$. 为了便于比较, 给出文献[1]的具体控制器为

$$\begin{aligned}u &= -10[\sigma(s^{-\frac{7}{5}} + 1.1^{\frac{7}{5}}\sigma(s))]^{\frac{3}{7}} - \\ &\quad \bar{a} \operatorname{sgn}(s^{-\frac{7}{5}} + 1.1^{\frac{7}{5}}\sigma(s)).\end{aligned}\quad (23)$$

其中: $s = x_1$, $\bar{a}(x) = \frac{MgL}{2} + V_s|x_2 + J|$.

仿真实验中, 设采样频率为 $f_s = 100 \text{ Hz}$, 则积分步长为 $h = 0.01$. 取弹性跟踪控制器增益参数为 $c_1 = 100$, $c_2 = 500$; $\delta_1 = 2$, $\delta_2 = 1$; $b_1 = 100$, $b_2 = 500$, $b_3 = 2500$. 本文方法的仿真结果如图4所示.

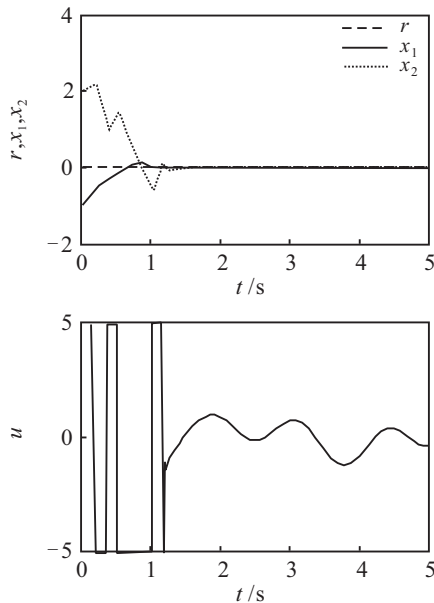


图4 例2仿真结果

由图4可知: 与文献[1]相比, 本文设计的弹性跟踪控制信号不存在抖振现象, 具有更快的响应速度, 且在1.3 s之内就能快速跟踪期望轨迹; 而文献[1]的控制信号不仅存在严重的高频抖振现象, 而且需要约2.6 s才能跟踪上期望轨迹. 因此, 与文献[1]相比, 本文研究的控制方法具有更好的控制效果. 此外, 式(23)所示的控制方法再一次表明, 文献[1]的控制器不仅计算复杂, 而且与被控对象的模型参数有关.

4 结 论

本文针对一类非线性不确定系统的控制问题, 提出了基于弹性能量函数的弹性跟踪控制方法. 该方法实际上是一种只根据误差来消除误差的基于虚拟递推跟踪指令的弹性跟踪控制方法, 该方法不涉及误差的微分运算, 虚拟跟踪指令以及系统控制信号的增益参数完全由积分步长来决定, 不需要凭经验或者不需要在线自适应镇定, 控制器模型结构简单, 物理概念清晰, 不依赖于受控系统模型, 因而具有良好的通用性. 此外, 本文研究的弹性跟踪控制方法不仅具有很强的抗扰动能力, 而且具有很强的鲁棒稳定性, 在非仿射非线性不确定系统控制领域具有较大的应用前景.

参考文献(References)

- [1] 李雪冰, 马莉, 丁世宏. 一类新的二阶滑模控制方法及其在倒立摆控制中的应用[J]. 自动化学报, 2015, 41(1): 193-202.
(LI X B, Ma L, Ding S H. A new second-order sliding mode control and its application to inverted pendulum[J]. Acta Automatica Sinica, 2015, 41 (1): 193-202.)
- [2] 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.)
- [3] Xu B, Shi Z, Yang C. Composite fuzzy control of a class of uncertain nonlinear systems with disturbance observer[J]. Nonlinear Dynamics, 2015, 80(1/2): 341-351.
- [4] 刘月, 马树萍. 时滞系统的输出反馈滑模控制的一种奇异系统方法[J]. 自动化学报, 2013, 39(5): 594-601.
(Liu Y, Ma S P. A singular system approach to output feedback sliding mode control for time-delay systems[J]. Acta Automatica Sinica, 2013, 39(5): 594-601.)
- [5] 蒲明, 吴庆宪, 姜长生, 等. 非匹配不确定高阶非线性系统递阶Terminal滑模控制[J]. 自动化学报, 2012, 38(11): 1777-1793.
(Pu M, Wu Q X, Jiang C S, et al. Recursive terminal sliding mode control for higher-order nonlinear system with mismatched uncertainties[J]. Acta Automatica Sinica, 2012, 38(11): 1777-1793.)
- [6] Yang L, Yang J. Nonsingular fast terminal sliding-mode control for nonlinear dynamical systems[J]. Int J of Robust and Nonlinear Control, 2011, 21(16): 1865-1879.
- [7] 闵富红, 马美玲, 翟炜, 等. 基于继电特性函数的互联电力系统混沌控制[J]. 物理学报, 2014, 63(5):

- 5041-5048.
(Min F H, Ma M L, Zhai W, et al. Chaotic control of the interconnected power system based on the relay characteristic function[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(5): 5041-5048.)
- [8] Levant A. Universal single-input-single-output(SISO) sliding-mode controllers with finite-time convergence[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2001, 46(9): 1447-1451.
- [9] Laghrouche S, Plestan F, Glumineau A. Higher order sliding mode control based on integral sliding mode[J]. *Automatica*, 2007, 43(3): 531-537.
- [10] Defoort M, Floquet T, Kokosy A, et al. A novel higher order sliding mode control scheme[J]. *Systems and Control Letters*, 2009, 58(2): 102-108.
- [11] Siraramirez H. On the dynamic sliding mode control of nonlinear systems[J]. *Int J of Control*, 1993, 57(5): 1039-1061.
- [12] 周涛. 基于一种新型趋近律的自适应滑模控制[J]. *控制与决策*, 2016, 31(7): 1335-1338.
(Zhou T. Adaptive sliding control based on a new reaching law[J]. *Control and Decision*, 2016, 31(7): 1335-1338.)
- [13] Fallaha C J, Saad M, Kanaan H Y, et al. Sliding mode robot control with exponential reaching law[J]. *IEEE Trans on Industrial Electronics*, 2011, 58(2): 600-610.
- [14] Niu Y, Ho D W C, Wang Z. Improved sliding mode control for discrete-time systems via reaching law[J]. *IET Control Theory and Applications*, 2010, 4(11): 2245-2251.
- [15] Jerouane M, Sepehri N, Lamnabhi-Lagarigue F. Dynamic analysis of variable structure force control of hydraulic actuators via the reaching law approach[J]. *Int J of Control*, 2004, 77(14): 1260-1268.
- [16] 张瑶, 马广富, 郭延宁, 等. 一种多幂次滑模趋近律设计与分析[J]. *自动化学报*, 2016, 42(3): 466-472.
(Zhang Y, Ma G F, Guo Y N, et al. A multi power reaching law of sliding mode control design and analysis[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2016, 42(3): 466-472.)
- [17] 邵星灵, 王宏伦. 线性扩张状态观测器及其高阶形式的性能分析[J]. *控制与决策*, 2015, 30(5): 815-822.
(Shao X L, Wang H L. Performance analysis on linear extended state observer and its extension case with higher extended order[J]. *Control and Decision*, 2015, 30(5): 815-822.)
- [18] 马悦悦, 唐胜景, 郭杰. 基于ESO的复合滑模面非奇异Terminal滑模控制[J]. *控制与决策*, 2015, 30(1): 76-80.
(Ma Y Y, Tang S J, Guo J. Nonsingular terminal sliding mode control with compound sliding surface based on ESO[J]. *Control and Decision*, 2015, 30(1): 76-80.)
- [19] 陈增强, 孙明玮, 杨瑞光. 线性自抗扰控制器的稳定性研究[J]. *自动化学报*, 2013, 39(5): 574-580.
(Chen Z Q, Sun M W, Yang R G. On the stability of linear active disturbance rejection control[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2013, 39(5): 574-580.)
- [20] 曾喆昭, 吴亮东, 杨振源, 等. 非仿射系统的自学习滑模抗扰控制[J]. *控制理论与应用*, 2016, 33(7): 980-987.
(Zeng Z Z, Wu L D, Yang Z Y, et al. Self-learning sliding-mode disturbance rejection control for non-affine systems[J]. *Control Theory & Applications*, 2016, 33(7): 980-987.)
- [21] 曾喆昭, 吴亮东, 陈韦名. 基于ESO的一类线性时变系统自学习滑模控制方法[J]. *控制与决策*, 2016, 31(11): 2101-2105.
(Zeng Z Z, Wu L D, Chen W M. Self-learning sliding mode control method of a class of linear time-varying systems based on ESO[J]. *Control and Decision*, 2016, 31(11): 2101-2105.)

作者简介

谭永宏(1975—), 男, 教授, 从事嵌入式系统、智能控制等研究, E-mail: 496081928@qq.com;

曾喆昭(1963—), 男, 教授, 博士, 从事智能计算与智能控制等研究, E-mail: 508984293@qq.com.

(责任编辑: 闫妍)