



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 119717552 B

(45) 授权公告日 2025.05.16

(21) 申请号 202510232254.4

(56) 对比文件

(22) 申请日 2025.02.28

CN 104614995 A, 2015.05.13

CN 105242676 A, 2016.01.13

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 119717552 A

审查员 李想

(43) 申请公布日 2025.03.28

(73) 专利权人 西北工业大学

地址 710072 陕西省西安市碑林区友谊西路127号

(72) 发明人 董瀚林 李浩楠 胥馨月 马志强

(74) 专利代理机构 西安匠星互智知识产权代理有限公司 61291

专利代理师 陈星

(51) Int. Cl.

G05B 13/04 (2006.01)

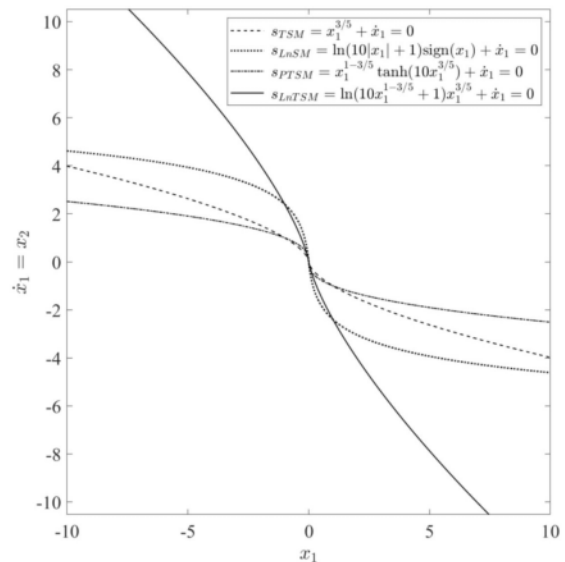
权利要求书2页 说明书8页 附图5页

(54) 发明名称

一种用于非线性系统的对数终端滑模控制方法

(57) 摘要

本发明提出一种用于非线性系统的对数终端滑模控制方法,属于滑模控制技术领域。本发明基于设计的对数终端滑模面得到一阶对数终端滑模控制策略和超扭对数终端滑模控制策略,得到了面向非线性系统的对数终端滑模协同控制架构,实现了抖振抑制、全局快速收敛与滑动时间显式化的多目标优化,能够在削弱滑模控制抖振的同时提高系统状态在滑模面上的全局收敛速度,并且显式给出系统状态在滑模面上的滑动时间,通过滑动时间参数的显式解析表达式,确立了控制器增益系数与系统动态性能的严格数学对应关系,为工业现场的参数整定提供量化理论依据,显著增强复杂工况下的系统鲁棒性。



1. 一种用于非线性系统的对数终端滑模控制方法,其特征在于:包括以下步骤:

步骤1:建立一个含有不确定性的非线性二阶系统:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f(x_1, x_2) + d(t, x_1, x_2) + b(x_1, x_2)u \\ y = x_1 \end{cases}$$

其中 x_1 是非线性二阶系统的状态变量, x_2 是 x_1 的一阶导数, \dot{x}_2 是 x_2 的一阶导数,且 x_1 和 x_2 及其各自的一阶导数及二阶导数均可测; $b(x_1, x_2)$ 和 $f(x_1, x_2)$ 是已知的非线性函数, $d(t, x_1, x_2)$ 是未知的非线性扰动, u 是非线性二阶系统的控制信号, y 是非线性二阶系统的输出;所述非线性二阶系统为空间航天器绳系布放控制应用中的航天器姿态控制系统;

步骤2:基于步骤1建立的非线性二阶系统设计对数终端滑模面:

$$s = \ln[kx_1^{1-q/p} + 1]x_1^{q/p} + \dot{x}_1$$

其中 s 为设计的对数终端滑模面; $\ln[\bullet]$ 为自然对数函数; k 为根据性能要求设置的常值参数,且 $k > 0$; p 和 q 均为正奇数,且 $0 < q/p < 1$;

步骤3:根据步骤2设计的对数终端滑模面设计一阶对数终端滑模控制策略和超扭对数终端滑模控制策略:

根据对数终端滑模面设计得到的一阶对数终端滑模控制策略为:

$$u_1 = -b^{-1}(x_1, x_2)[f'(x_1, x_2) + f(x_1, x_2) + \eta \text{sign}(s)]$$

其中 u_1 为一阶对数终端滑模控制输出; $b^{-1}(x_1, x_2)$ 为已知的非线性函数 $b(x_1, x_2)$ 的倒数; $\text{sign}(\bullet)$ 为符号函数; η 为外界扰动的上界; $f'(x_1, x_2)$ 为中间变量;

根据对数终端滑模面设计得到的超扭对数终端滑模控制策略为:

$$\begin{cases} u_2 = -b^{-1}(x_1, x_2)[f'(x_1, x_2) + f(x_1, x_2) + K_1 |s|^{1/2} \text{sign}(s) - u_0] \\ \dot{u}_0 = -K_2 \text{sign}(s) \end{cases}$$

其中 u_2 为超扭对数终端滑模控制输出; u_0 为中间变量, \dot{u}_0 为 u_0 的导数; $|s|$ 为 s 的绝对值; K_1 和 K_2 是设定的控制参数;

步骤4:当滑模面 $s = 0$ 成立时,非线性二阶系统的状态变量 x_1 在有限时间 T 内收敛

到平衡点附近的微小邻域内,其中有限时间的显示表达式为:

$$T = \frac{P}{qk} \text{Li}(k |x_{1,s=0}|^{q/p} + 1) - \frac{P}{qk} \text{Li}(k |x_{1,f}|^{q/p} + 1)$$

其中 $\text{Li}(\bullet)$ 是对数积分函数, $x_{1,s=0}$ 为滑模面 $s = 0$ 时的非线性二阶系统状态参数, $|x_{1,f}|$ 为平衡点附近的微小邻域。

2. 根据权利要求1所述一种用于非线性系统的对数终端滑模控制方法,其特征在于:中间变量 $f'(x_1, x_2)$ 为:

$$f'(x_1, x_2) = \left[\frac{q \ln(k |x_1|^{1-q/p} + 1)}{p x_1^{1-q/p}} + \frac{k(1-q/p)}{k |x_1|^{1-q/p} + 1} \right] \dot{x}_1。$$

3. 根据权利要求1或2所述一种用于非线性系统的对数终端滑模控制方法,其特征在于:所述非线性扰动 $d(t, x_1, x_2)$ 满足约束 $|d(t, x_1, x_2)| < \eta$, η 是外界扰动的上界, $|d(t, x_1, x_2)|$ 是 $d(t, x_1, x_2)$ 的绝对值。

4. 根据权利要求1所述一种用于非线性系统的对数终端滑模控制方法,其特征在于:所述不确定性包括环境不确定性和动力学建模不确定性。

5. 一种电子设备,包括处理器、存储器,所述存储器用于存储一个或多个程序;其特征在于:当所述一个或多个程序被所述处理器执行时,实现权利要求1~4任一所述方法。

6. 一种可读存储介质,存储有计算机程序,其特征在于:当计算机程序被处理器执行时,实现权利要求1~4任一所述方法。

一种用于非线性系统的对数终端滑模控制方法

技术领域

[0001] 本发明涉及滑模控制技术领域,具体为一种用于非线性系统的对数终端滑模控制方法。

背景技术

[0002] 滑模控制技术作为一种非线性鲁棒控制方法,因其对系统参数摄动、外部干扰和模型不确定性的强鲁棒性,在航天器绳系布放控制中得到的广泛应用。

[0003] 滑模控制技术面临两个核心挑战:收敛速率优化与抖振抑制。终端滑模控制技术通过引入分数阶状态反馈机制,在有限时间内实现系统状态收敛,有效解决了传统滑模控制的渐近收敛问题。高阶滑模控制方法(以超扭算法为典型代表)通过构建连续控制量的微分特性,在保留滑模鲁棒性的同时显著削弱了抖振现象。然而,在工程实践中同时实现快速收敛与低抖振控制仍存在理论瓶颈。

[0004] 研究显示,非奇异终端滑模控制器在平衡点远端区域存在收敛速率衰减现象,其根源在于分数阶滑模面设计导致的非线性增益不足。更关键的是,该类控制律的二阶导数中呈现不可积非线性相位分量,使得基于李雅普诺夫稳定性分析的超扭算法参数整定失效,难以建立全局稳定的复合控制架构。值得注意的是,当采用线性滑模面与超扭算法结合时,虽能实现抖振的有效抑制,但系统状态在滑模面上的收敛特性退化为指数形式,导致过渡过程时间显著延长。

[0005] 这种矛盾本质源于滑模动力学特性与收敛机制的内在冲突:终端滑模的有限时间收敛特性依赖于强非线性项的引入,而高阶滑模的抖振抑制需要控制律的连续可微特性。

[0006] 针对上述技术瓶颈,申请人先后提出过对数型滑模面(Dong et al., IEEE/ASME TMech 2022)

$$[0007] \quad s_{LnSM} = \beta \ln(k |x_1| + 1) \text{sign}(x_1) + \dot{x}_1 \quad (1.1)$$

[0008] 及实用终端滑模面(Dong et al., IEEE TIE 2023)

$$[0009] \quad s_{PTSM} = \beta x_1^{1-q/p} \tanh(kx_1^{q/p}) + \dot{x}_1 \quad (1.2)$$

[0010] 通过构造具有自适应增益特性的非线性切换函数,在平衡点邻域实现了收敛速度与抖振强度的帕累托优化。其核心机理在于:对数项的非对称增益特性可动态调节等效控制量幅值,而实用终端结构的有限时间收敛机制则通过状态相关的指数参数实现相轨迹收缩。

[0011] 然而,现有方案在全局性能优化方面仍存在本质性局限:无论是对数型滑模流形还是实用终端滑模流形,虽然都能在平衡点附近建立高增益,但当系统状态远离平衡点时,两类滑模流形的非线性增益均呈现梯度衰减特性,导致大偏差条件下的收敛速率显著低于线性滑模基准。尽管通过引入线性补偿项可增强全局动力学特性,但由此产生的混合型滑模面(Hybrid Sliding Surface)将破坏微分方程的可积性条件,使得滑动模态时间参数的解析解推导陷入李雅普诺夫方程无显式解的困境。特别地,混合滑模流形中的多阶非线性

耦合项会引发超平面几何结构的非光滑特性,导致基于齐次性理论的时间估计方法失效。

[0012] 此外,发明人在中国发明专利CN202010692622.0与CN202010693051.2提出了基于对数双曲正切函数的终端滑模面构造方法。该技术通过融合对数函数的增益自适应特性和双曲正切函数的非对称饱和特性,构建了具有连续二阶导数的复合型滑模流形,在理论上实现了有限时间收敛与抖振抑制的协同优化。但深入分析表明,此类方案仍存在理论缺陷:尽管可通过李雅普诺夫稳定性证明系统状态在有限时间内进入平衡点邻域,但收敛时间的显式解析表达式推导遭遇本质障碍。主要因为双曲正切函数与对数项的非线性耦合导致滑模微分方程呈现强非自治特性,其解析解的存在性无法满足Picard-Lindelöf定理的前提条件。更关键的是,滑模相轨迹在趋近阶段的时变曲率特性破坏了齐次性理论的适用基础,使得传统有限时间估计方法中依赖的标度律失效。收敛时间的不可解析性导致在工程实践中,控制器参数整定缺乏量化指导原则,实际应用中只能通过数值仿真进行试错调整,而且在存在未建模动态的工况下,系统实际收敛时间与理论预测值可能发生数量级偏差,制约了该方法的工业可靠性。

[0013] 综上所述,如何在削弱滑模控制抖振的同时提高系统状态在滑模面上的全局收敛速度,并显式给出系统状态在滑模面上的滑动时间,这一问题尚无有效解决方案。

发明内容

[0014] 为实现在削弱滑模控制抖振的同时提高系统状态在滑模面上的全局收敛速度,并显式给出系统状态在滑模面上的滑动时间,本发明提出一种用于非线性系统的对数终端滑模控制方法。

[0015] 本发明的技术方案为:

[0016] 所述一种用于非线性系统的对数终端滑模控制方法,包括以下步骤:

[0017] 步骤1:建立一个含有不确定性的非线性二阶系统:

$$[0018] \quad \begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f(x_1, x_2) + d(t, x_1, x_2) + b(x_1, x_2)u \\ y = x_1 \end{cases}$$

[0019] 其中 x_1 是非线性二阶系统的状态变量, x_2 是 x_1 的一阶导数, \dot{x}_2 是 x_2 的一阶导数,且 x_1 和 x_2 及其各自的一阶导数及二阶导数均可测; $b(x_1, x_2)$ 和 $f(x_1, x_2)$ 是已知的非线性函数, $d(t, x_1, x_2)$ 是未知的非线性扰动, u 是非线性二阶系统的控制信号, y 是非线性二阶系统的输出;

[0020] 步骤2:基于步骤1建立的非线性二阶系统设计对数终端滑模面:

$$[0021] \quad s = \ln \left[kx_1^{1-q/p} + 1 \right] x_1^{q/p} + \dot{x}_1$$

[0022] 其中 s 为设计的对数终端滑模面; $\ln[\bullet]$ 为自然对数函数; k 为根据性能要求设置的常值参数,且 $k > 0$; p 和 q 均为正奇数,且 $0 < q/p < 1$;

[0023] 步骤3:根据步骤2设计的对数终端滑模面设计一阶对数终端滑模控制策略和超扭对数终端滑模控制策略:

[0024] 根据对数终端滑模面设计得到的一阶对数终端滑模控制策略为:

$$[0025] \quad u_1 = -b^{-1}(x_1, x_2) \left[f'(x_1, x_2) + f(x_1, x_2) + \eta \text{sign}(s) \right]$$

[0026] 其中 u_1 为一阶对数终端滑模控制输出; $b^{-1}(x_1, x_2)$ 为已知的非线性函数 $b(x_1, x_2)$ 的倒数; $\text{sign}(\bullet)$ 为符号函数; η 为外界扰动的上界; $f'(x_1, x_2)$ 为中间变量;

[0027] 根据对数终端滑模面设计得到的超扭对数终端滑模控制策略为:

$$[0028] \quad \begin{cases} u_2 = -b^{-1}(x_1, x_2) \left[f'(x_1, x_2) + f(x_1, x_2) + K_1 |s|^{1/2} \text{sign}(s) - u_0 \right] \\ \dot{u}_0 = -K_2 \text{sign}(s) \end{cases}$$

[0029] 其中 u_2 为超扭对数终端滑模控制输出; u_0 为中间变量, \dot{u}_0 为 u_0 的导数; $|s|$ 为 s 的绝对值; K_1 和 K_2 是设定的控制参数;

[0030] 步骤4:当滑模面 $s = 0$ 成立时,非线性二阶系统的状态变量 x_1 在有限时间 T 内收敛到平衡点附近的微小邻域内,其中有限时间 T 的显示表达式为:

$$[0031] \quad T = \frac{P}{qk} \text{Li}(k |x_{1,s=0}|^{q/p} + 1) - \frac{P}{qk} \text{Li}(k |x_{1,f}|^{q/p} + 1)$$

[0032] 其中 $\text{Li}(\bullet)$ 是对数积分函数, $x_{1,s=0}$ 为滑模面 $s = 0$ 时的非线性二阶系统状态参数, $|x_{1,f}|$ 为平衡点附近的微小邻域。

[0033] 进一步的,中间变量 $f'(x_1, x_2)$ 为:

$$[0034] \quad f'(x_1, x_2) = \left[\frac{q \ln(k |x_1|^{1-q/p} + 1)}{p x_1^{1-q/p}} + \frac{k(1-q/p)}{k |x_1|^{1-q/p} + 1} \right] \dot{x}_1。$$

[0035] 进一步的,所述非线性扰动 $d(t, x_1, x_2)$ 满足约束 $|d(t, x_1, x_2)| < \eta$, η 是外界扰动的上界, $|d(t, x_1, x_2)|$ 是 $d(t, x_1, x_2)$ 的绝对值。

[0036] 进一步的,所述非线性二阶系统为空间航天器绳系布放控制应用中的航天器姿态控制系统。

[0037] 进一步的,所述不确定性包括环境不确定性和动力学建模不确定性。

[0038] 此外,本发明还提出一种电子设备及可读存储介质:

[0039] 一种电子设备,包括处理器、存储器,所述存储器用于存储一个或多个程序;

[0040] 当所述一个或多个程序被所述处理器执行时,实现上述方法。

[0041] 一种可读存储介质,存储有计算机程序,当计算机程序被处理器执行时实现上述方法。

[0042] 有益效果:

[0043] 本发明提出了一种用于非线性系统的对数终端滑模控制方法,基于设计的对数终端滑模面得到一阶对数终端滑模控制策略和超扭对数终端滑模控制策略,得到了面向非线性系统的对数终端滑模协同控制架构,实现了抖振抑制、全局快速收敛与滑动时间显式化的多目标优化,能够在削弱滑模控制抖振的同时提高系统状态在滑模面上的全局收敛速度,并且显式给出系统状态在滑模面上的滑动时间,通过滑动时间参数的显式解析表达式,确立了控制器增益系数与系统动态性能的严格数学对应关系,为工业现场的参数整定提供量化理论依据,显著增强复杂工况下的系统鲁棒性。

[0044] 本发明的附加方面和优点将在下面的描述中部分给出,部分将从下面的描述中变得明显,或通过本发明的实践了解到。

附图说明

[0045] 本发明的上述和/或附加的方面和优点从结合下面附图对实施例的描述中将变得明显和容易理解,其中:

[0046] 图1:终端滑模面、对数滑模面、实用终端滑模面和本发明提出的对数终端滑模面的相平面图;其中 s_{TSM} 为终端滑模面, s_{LNSM} 为对数滑模面, s_{PTSM} 为实用终端滑模面, s_{LnTSM} 为对数终端滑模面;

[0047] 图2:在一阶对数终端滑模控制策略作用下,实施例1的系统状态参数到达滑模面的过程;其中横坐标为时间,纵坐标为对数终端滑模面 s 对应数值;

[0048] 图3:在一阶对数终端滑模控制策略作用下,实施例1的系统状态沿滑模面滑动到平衡点附近的微小邻域的过程;其中横坐标为时间,纵坐标为系统状态参数 x_1 对应数值;

[0049] 图4:在一阶对数终端滑模控制策略作用下,实施例1的输出曲线;其中横坐标为时间,纵坐标为一阶对数终端滑模控制输出 u_1 对应数值;

[0050] 图5:在超扭对数终端滑模控制策略作用下,实施例1的系统状态参数到达滑模面的过程;其中横坐标为时间,纵坐标为对数终端滑模面 s 对应数值;

[0051] 图6:在超扭对数终端滑模控制策略作用下,实施例1的系统状态沿滑模面滑动到平衡点附近的微小邻域的过程;其中横坐标为时间,纵坐标为系统状态参数 x_1 对应数值;

[0052] 图7:在超扭对数终端滑模控制策略作用下,实施例1的输出曲线;其中横坐标为时间,纵坐标为超扭对数终端滑模控制输出 u_2 对应数值;

[0053] 图8:在超扭对数终端滑模控制策略作用下,实施例2的系统状态参数到达滑模面的过程;其中横坐标为时间,纵坐标为对数终端滑模面对应数值;

[0054] 图9:在超扭对数终端滑模控制策略作用下,实施例2的系统状态沿滑模面滑动到平衡点附近的微小邻域的过程;其中横坐标为时间,纵坐标为姿态四元数状态参数对应的数值;

[0055] 图10:在超扭对数终端滑模控制策略作用下,实施例2的输出曲线;其中横坐标为时间,纵坐标为三维控制量数值。

具体实施方式

[0056] 下面详细描述本发明的实施例,所述实施例是示例性的,旨在用于解释本发明,而不能理解为对本发明的限制。

[0057] 实施例1:

[0058] 本实施例提出的提出一种用于非线性系统的对数终端滑模控制方法,能够实现在削弱滑模控制抖振的同时提高系统状态在滑模面上的全局收敛速度,并显式给出系统状态在滑模面上的滑动时间,具体包括以下步骤:

[0059] 步骤1:建立含有不确定性的非线性二阶系统。对于空间航天器绳系布放控制应用而言,这里的不确定性包括环境不确定性,如空间环境扰动、电磁效应、空间碎片等,还包括动力学建模不确定性,如复杂多体耦合与参数时变性等。

[0060] 含有不确定性的非线性二阶系统表示为:

$$[0061] \quad \begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f(x_1, x_2) + d(t, x_1, x_2) + b(x_1, x_2)u \\ y = x_1 \end{cases} \quad (1.3)$$

[0062] 其中 x_1 是非线性二阶系统的状态变量, x_2 是 x_1 的一阶导数, \dot{x}_2 是 x_2 的一阶导数,且 x_1 和 x_2 及其各自的一阶导数及二阶导数均可测;对于一个二阶系统而言, x_1 通常是指位置、角度等信息, x_2 通常是指速度、角速度等信息,本实施例中状态变量的初始值为: $x_1(0) = 2$, $x_2(0) = 0$ 。 $b(x_1, x_2)$ 和 $f(x_1, x_2)$ 是已知的非线性函数,本实施例中,取 $b(x_1, x_2) = 1$, $f(x_1, x_2) = x_1^2 + x_2$ 。 $d(t, x_1, x_2)$ 是未知的非线性扰动,但 $d(t, x_1, x_2)$ 满足约束 $|d(t, x_1, x_2)| < \eta$, η 是外界扰动的上界,本实施例中, $d(t, x_1, x_2) = 0$ 。 u 是非线性二阶系统的控制信号, y 是非线性二阶系统的输出。

[0063] 步骤2:基于步骤1建立的非线性二阶系统设计对数终端滑模面:

$$[0064] \quad s = \ln \left[kx_1^{1-q/p} + 1 \right] x_1^{q/p} + \dot{x}_1 \quad (1.4)$$

[0065] 其中 s 为设计的对数终端滑模面; $\ln[\bullet]$ 为自然对数函数; k 为根据性能要求设置的常值参数,且 $k > 0$,本实施例中,取值为 $k = 5$; p 和 q 均为正奇数,且 $0 < q/p < 1$,本实施例中,取值为 $q = 3$, $p = 5$ 。

[0066] 步骤3:根据步骤2设计的对数终端滑模面设计一阶对数终端滑模控制策略和超扭对数终端滑模控制策略。

[0067] 一阶对数终端滑模控制策略:

[0068] 根据对数终端滑模面设计得到的一阶对数终端滑模控制策略为:

$$[0069] \quad u_1 = -b^{-1}(x_1, x_2) \left[f'(x_1, x_2) + f(x_1, x_2) + \eta \text{sign}(s) \right] \quad (1.5)$$

[0070] 其中 u_1 为一阶对数终端滑模控制输出; $b^{-1}(x_1, x_2)$ 为已知的非线性函数 $b(x_1, x_2)$ 的倒数; $\text{sign}(\bullet)$ 为符号函数; η 为外界扰动的上界, 本实施例中取 $\eta = 0.1$; $f'(x_1, x_2)$ 为中间变量:

$$[0071] \quad f'(x_1, x_2) = \left[\frac{q \ln(k |x_1|^{1-q/p} + 1)}{p x_1^{1-q/p}} + \frac{k(1-q/p)}{k |x_1|^{1-q/p} + 1} \right] \dot{x}_1$$

[0072] 在一阶对数终端滑模控制策略的作用下, 非线性二阶系统状态变量 x_1 到达滑模面的过程如图2所示, 非线性二阶系统状态变量 x_1 收敛到平衡点的微小邻域的过程如图3所示。一阶对数终端滑模控制策略的输出曲线如图4所示。结果表明, 一阶对数终端滑模控制策略可以使非线性二阶系统的状态变量 x_1 在有限时间内收敛到平衡点附近的微小邻域内; 而且一阶对数终端滑模控制策略输出曲线平缓, 无突变到无穷大的趋势(即无奇异项)。

[0073] 超扭对数终端滑模控制策略:

[0074] 根据对数终端滑模面设计得到的超扭对数终端滑模控制策略为:

$$[0075] \quad \begin{cases} u_2 = -b^{-1}(x_1, x_2) \left[f'(x_1, x_2) + f(x_1, x_2) + K_1 |s|^{1/2} \text{sign}(s) - u_0 \right] \\ \dot{u}_0 = -K_2 \text{sign}(s) \end{cases} \quad (1.6)$$

[0076] 其中 u_2 为超扭对数终端滑模控制输出; u_0 为中间变量, \dot{u}_0 为 u_0 的导数; $|s|$ 为 s 的绝对值; K_1 和 K_2 是设定的控制参数, 本实施例中取为 $K_1 = 10$, $K_2 = 0.0014$ 。

[0077] 在超扭对数终端滑模控制策略的作用下, 非线性二阶系统状态变量 x_1 到达滑模面的过程如图5所示, 非线性二阶系统状态变量 x_1 收敛到平衡点的微小邻域的过程如图6所示。超扭对数终端滑模控制策略的输出曲线如图7所示。结果表明, 超扭对数终端滑模控制策略可以使非线性二阶系统的状态变量 x_1 在有限时间内收敛到平衡点附近的微小邻域内; 而且超扭对数终端滑模控制策略输出曲线平缓, 无突变到无穷大的趋势(即无奇异项), 且超扭对数终端滑模控制策略相比于一阶对数终端滑模控制策略具有更小的抖振, 从而削弱了滑模控制的抖振效应。

[0078] 步骤4: 一阶对数终端滑模控制策略和超扭对数终端滑模控制策略都可以使滑模面 $s = 0$ 在有限时间内可达; 一旦 $s = 0$ 成立, 非线性二阶系统的状态变量 x_1 在有限时间

$$[0079] \quad T = \frac{P}{(p-q)k} \text{Li}(k |x_{1,s=0}|^{1-q/p} + 1) - \frac{P}{(p-q)k} \text{Li}(k |x_{1,f}|^{1-q/p} + 1) \quad (1.7)$$

[0080] 内收敛到平衡点附近的微小邻域 $x_1 \leq |x_{1,f}|$ 内, 其中 $\text{Li}(\bullet)$ 是对数积分函数, $x_{1,s=0}$ 为滑模面 $s = 0$ 时的非线性二阶系统状态参数, $|x_{1,f}|$ 为平衡点附近的微小邻域。由此可以看出, 本实施例提出的一阶对数终端滑模控制策略和超扭对数终端滑模控制策略能够显式给出系统状态在滑模面上的滑动时间, 有利于在工程实践中有依据的进行控制器参数整定, 提高了系统可靠性。

[0081] 对于上述有限时间,这里给出证明:

[0082] 当 $s=0$ 时, $\frac{d}{dT}e_1 = -x_1^{q/p} \ln(kx_1^{1-q/p} + 1)$

[0083] 因此非线性二阶系统的状态变量 x_1 趋于平衡点的时间可以表示为:

[0084]
$$dT = -\frac{dx_1}{x_1^{q/p} \ln(kx_1^{q/p} + 1)} = -\frac{pd(kx_1^{1-q/p} + 1)}{k(p-q)\ln(kx_1^{1-q/p} + 1)} = -\frac{P}{k(p-q)} d\text{Li}(kx_1^{1-q/p} + 1)$$

[0085] 最后通过积分得到 $T = \frac{P}{(p-q)k} \text{Li}(k|x_{1,s=0}|^{1-q/p} + 1) - \frac{P}{(p-q)k} \text{Li}(k|x_{1,f}|^{1-q/p} + 1)$ 。

[0086] 下面以传统的二阶线性超扭滑模控制策略作为对比,进行说明:

[0087] 传统的二阶线性超扭滑模控制策略为:

[0088]
$$\begin{cases} u_2 = -b^{-1}(x_1, x_2) \left[\dot{x}_1 + f(x_1, x_2) + K_1 |s|^{1/2} \text{sgn}(s) - u_0 \right] \\ \dot{u}_0 = -K_2 \text{sgn}(s) \end{cases} \quad (1.8)$$

[0089] 其中

[0090] $s = kx_1 + \dot{x}_1 \quad (1.9)$

[0091] 通过图1可以看出,本发明提出的一阶对数终端滑模控制策略和超扭对数终端滑模控制策略都可以使非线性二阶系统的状态参数 x_1 在有限时间内收敛到平衡点附近的微小邻域内(即有限时间内到达某一精度,而非无穷时间);而传统的二阶线性超扭滑模控制策略只能保证当时间无穷大的时候,系统状态才能收敛到平衡点。

[0092] 实施例2:

[0093] 本实施例针对空间航天器绳系布放过程中的航天器姿态控制问题,运用本发明提出的对数终端滑模控制方法,具体过程为:

[0094] 考虑一个用姿态四元数描述航天器的姿态控制模型:

[0095]
$$\begin{cases} \dot{q} = E(q)\omega \\ \ddot{q} = E(q)\dot{\omega} + E(\dot{q})\omega \\ \dot{\omega} = -J^{-1}\omega^\times J\omega + J^{-1}d + J^{-1}u \end{cases} \quad (1.10)$$

[0096] 其中, $E(q) = \bar{q}I_{3 \times 3} + (q^\times)^\top$, \bar{q} 是航天器姿态四元数的标量部分, $q = [q_1 \ q_2 \ q_3]^\top$ 是航天器姿态四元数的矢量部分, \dot{q} 和 \ddot{q} 分别是其一阶导数和二阶导数,

$q^\times = \begin{bmatrix} 0 & -q_3 & q_2 \\ q_3 & 0 & -q_1 \\ -q_2 & q_1 & 0 \end{bmatrix}$; ω 是航天器的转动角速度, $\dot{\omega}$ 是其一阶导数, ω^\times 的定义方式与 q^\times 相

同; d 是航天器受到的外部有界扰动; u 是作用于航天器上的控制信号; J 是航天器的转动惯量。显然,姿态控制模型(1.10)可以变化为如下非线性系统:

$$[0097] \quad \begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = F(x_1, x_2) + D(t, x_1, x_2) + B(x_1, x_2)u \\ y = x_1 \end{cases} \quad (1.11)$$

[0098] 其中： $x_1 = q$ ， $x_2 = \dot{q}$ ， $F(x_1, x_2) = E(\dot{q})\omega - E(q)J^{-1}\omega^x J\omega$ ， $D(t, x_1, x_2) = E(q)J^{-1}d$ ， $B(x_1, x_2) = E(q)J^{-1}$ 。

[0099] 那么，基于非线性系统(1.11)，采用对数终端滑模面设计超扭对数终端滑模控制策略进行控制，最终效果如图8-10所示，表明航天器姿态各分量能快速达到滑模面，然后在有限时间内沿滑模面迅速滑动到平衡点附近的微小邻域，且控制信号超调较小。

[0100] 尽管上面已经示出和描述了本发明的实施例，可以理解的是，上述实施例是示例性的，不能理解为对本发明的限制，本领域的普通技术人员在不脱离本发明的原理和宗旨的情况下在本发明的范围内可以对上述实施例进行变化、修改、替换和变型。

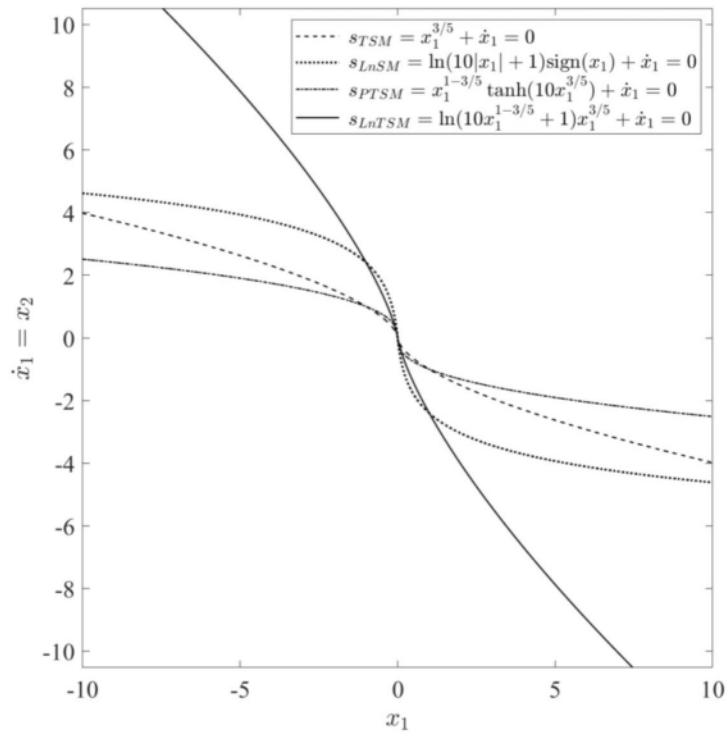


图1

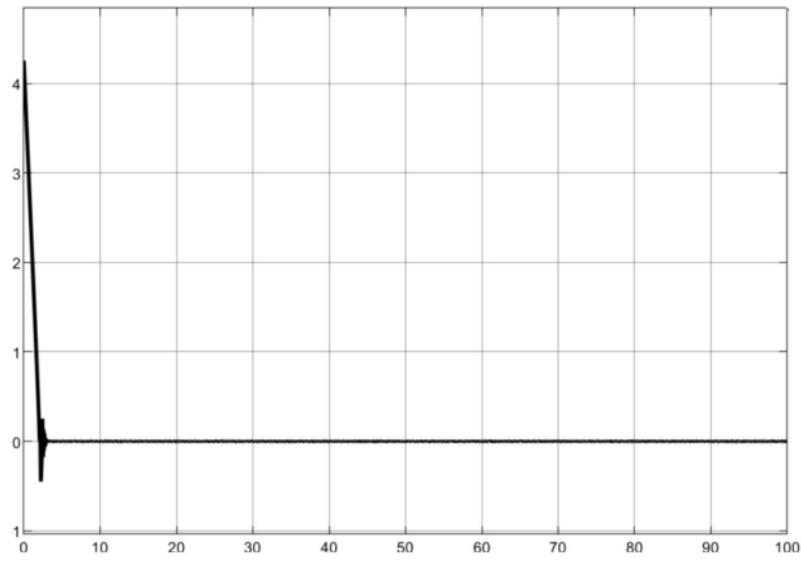


图2

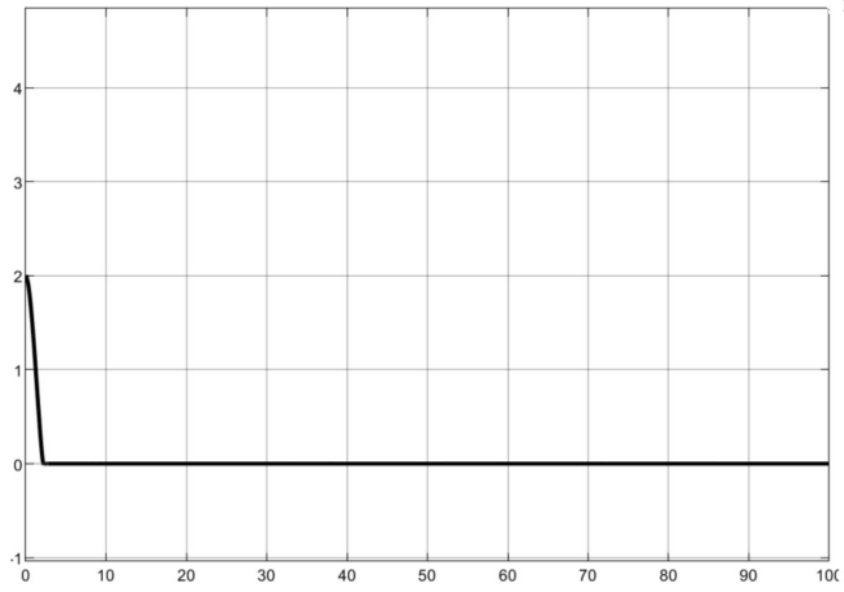


图3

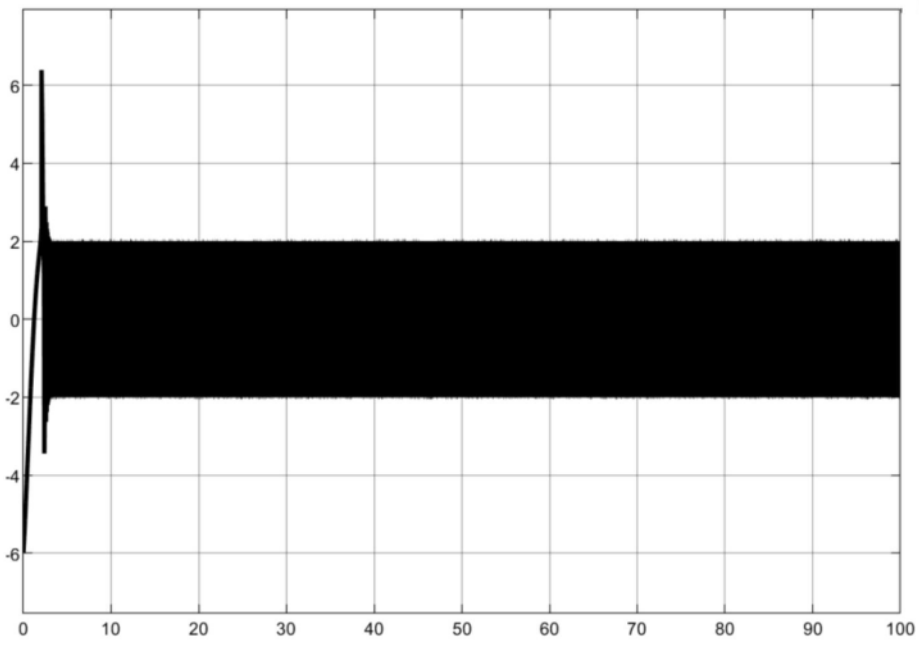


图4

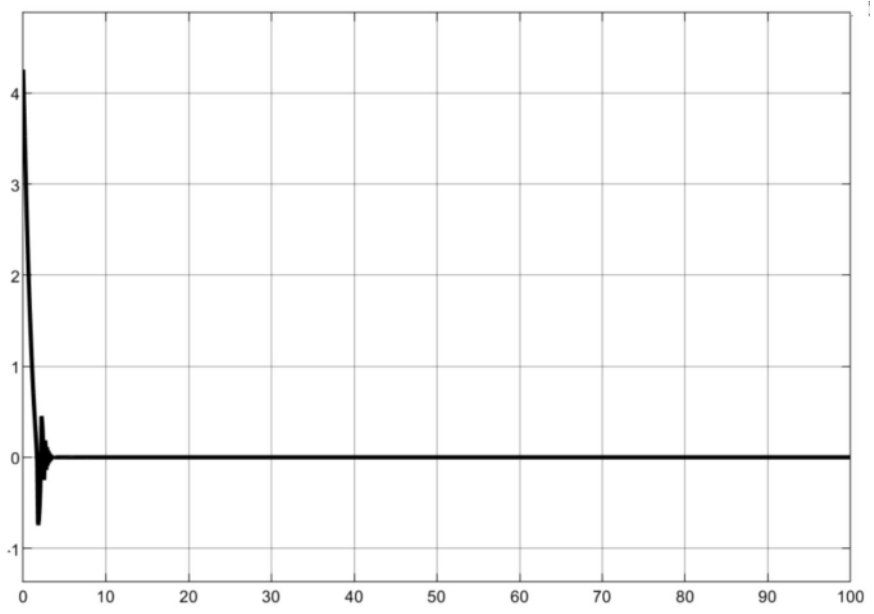


图5

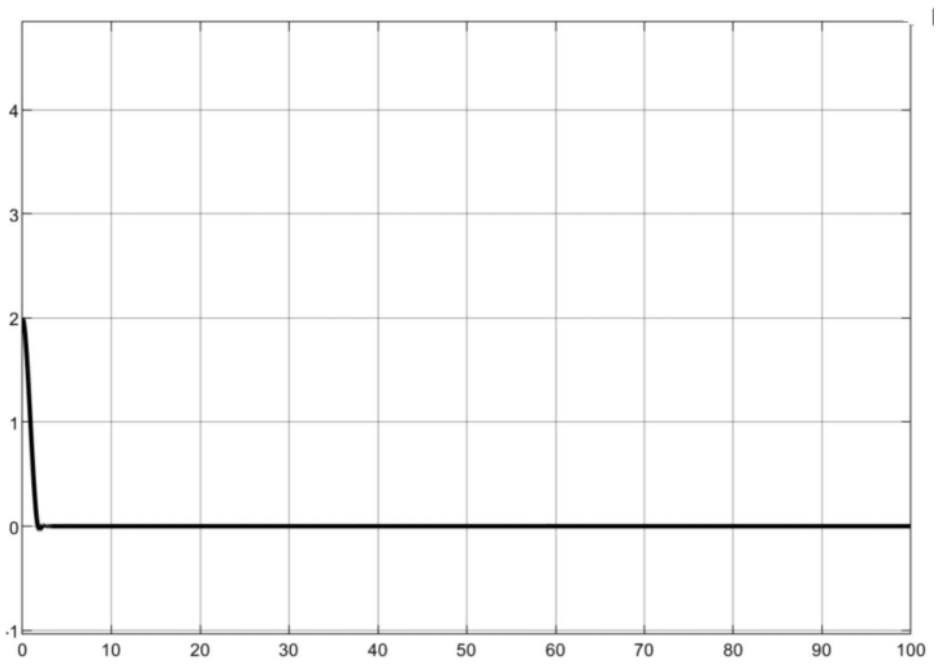


图6

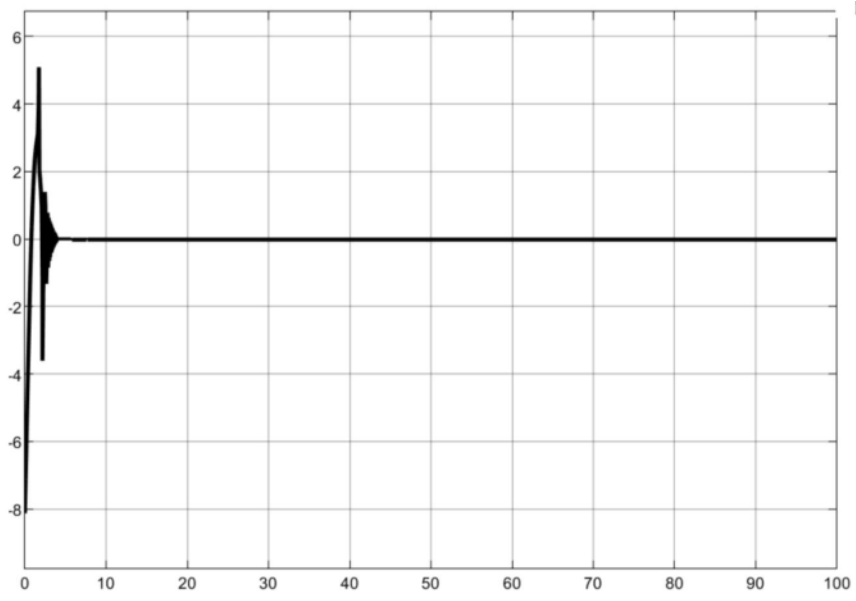


图7

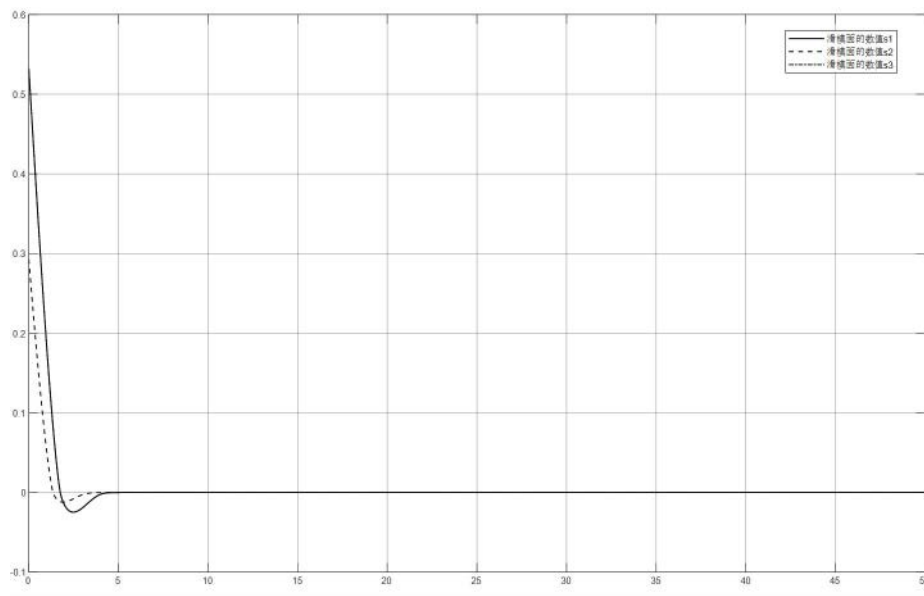


图8

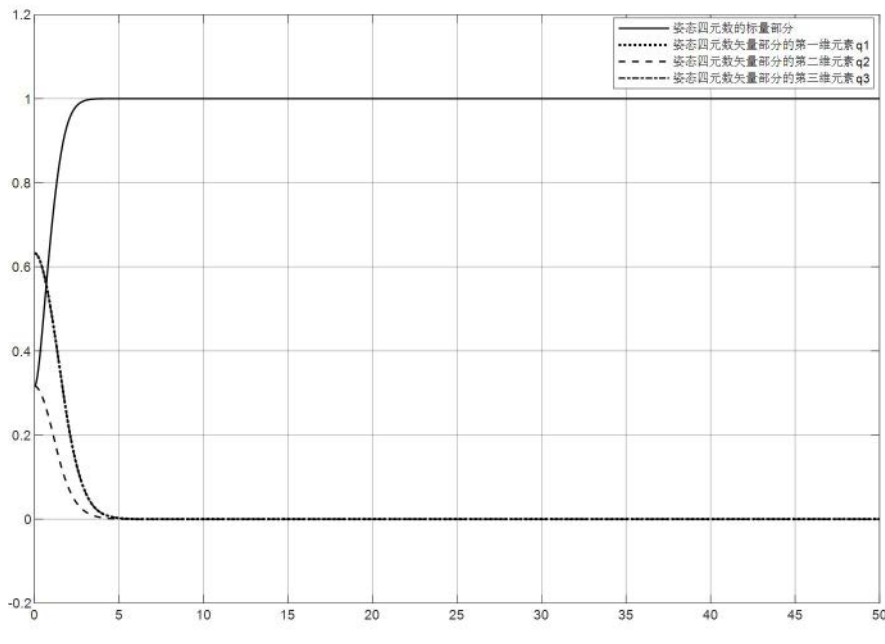


图9

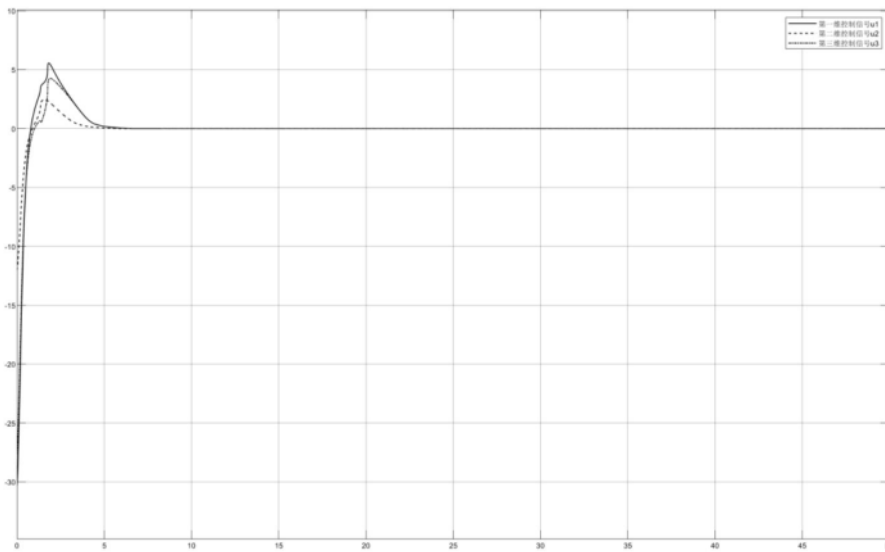


图10