

# 基于平滑饱和函数改进的自适应超扭转空间系绳系统部署控制

赵灿阳

河南工业大学电气工程学院, 河南 郑州

收稿日期: 2026年7月16日; 录用日期: 2026年9月16日; 发布日期: 2026年9月29日

## 摘 要

针对空间系绳系统在未知边界扰动与模型不确定性下的稳定部署问题, 本文提出一种改进的平滑自适应超扭转控制方法。为克服传统滑模及标准自适应超扭转算法中固有的控制抖振与不连续切换缺陷, 所提方法在控制律中引入平滑饱和函数替代不连续的符号函数。在完整保留自适应增益机制以应对未知边界扰动的同时, 实现了控制输入的连续化与抖振抑制。基于李雅普诺夫理论分析了闭环系统的稳定性, 证明滑模变量可在有限时间内收敛至原点附近的小邻域, 并在所引入的边界层内保证一致最终有界性。在无扰动与复合强扰动工况下的数值仿真对比表明, 相较于标准自适应超扭转控制与带幂次趋近律的滑模控制, 本文改进方法在保持收敛速度的前提下, 张力控制输入更平滑、系绳长度跟踪的均方根误差更小、对面内角摆动的鲁棒抑制能力更强。仿真结果验证了该方法在降低执行机构磨损及提升部署稳定性方面的工程优势。

## 关键词

空间系绳系统, 系绳部署, 自适应超扭转控制, 抖振抑制, 饱和函数, 平滑滑模控制, 扰动抑制

# Adaptive Super-Twisting Deployment Control for a Space Tethered System Enhanced by a Smooth Saturation Function

Canyang Zhao

School of Electrical Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou Henan

Received: July 16, 2026; accepted: September 16, 2026; published: September 29, 2026

## Abstract

To address the stable deployment of space tethered systems subject to unknown bounded disturbances and model uncertainties, an improved smooth adaptive super-twisting control method is proposed. To overcome the inherent control chattering and discontinuous switching of conventional sliding-mode control and standard adaptive super-twisting algorithms, a smooth saturation function is introduced into the control law to replace the discontinuous signum function. The adaptive gain mechanism is retained to compensate for unknown bounded disturbances while ensuring continuous control input and suppressing chattering. The stability of the closed-loop system is analyzed using Lyapunov theory. It is demonstrated that the sliding variable can reach a small neighborhood of the origin within finite time and remain uniformly ultimately bounded within the introduced boundary layer. Numerical simulations under disturbance-free and composite strong-disturbance conditions show that, compared with standard adaptive super-twisting control and sliding-mode control with a power reaching law, the proposed method provides a smoother tether-tension input, a smaller root-mean-square tether-length tracking error, and stronger robust suppression of in-plane libration while maintaining a comparable convergence rate. The results demonstrate the engineering advantages of the proposed method in reducing actuator wear and improving deployment stability.

## Keywords

Space Tethered System, Tether Deployment, Adaptive Super-Twisting Control, Chattering Suppression, Saturation Function, Smooth Sliding-Mode Control, Disturbance Rejection

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

空间系绳系统(Space Tethered System, STS)的概念最早由 Tsiolkovsky 于 1895 年提出,通常由航天器、系绳以及通过系绳相互连接的卫星构成。由于具备结构简单、能耗低及任务适应性强等特点,该系统在轨道转移、空间碎片清除、能量采集及有效载荷运输等领域展现出广阔的应用前景[1]。在各类空间任务中,系绳的安全、稳定部署是系统正常运行的基本前提。然而,受系绳仅提供张力而无法承受压力的物理特性制约,部署过程呈现典型的欠驱动特性,并受到输入饱和约束的严格限制。同时,轨道环境扰动及模型不确定性的客观存在,使得系统易产生面内摆动与张力波动,显著增加了部署控制的难度[2][3]。

针对此问题,国内外学者已提出多种控制策略。基于刚性杆模型的简化动力学描述,研究者相继发展了模糊控制、鲁棒自适应控制、事件触发控制及学习控制等方法。Huang 等针对外部扰动条件下的三角形系绳卫星系统设计模糊滑模部署控制方法,提高了系统的抗扰能力[4];随后又研究了考虑输入量化的预定义时间事件触发部署控制方法[5]。Luo 等将学习控制方法应用于旋转系绳卫星编队的部署与回收过程,提高了控制器对复杂非线性动力学的适应能力[6]。这些方法在部署稳定性、摆动抑制和输入约束处理方面取得了一定效果,但部分方法对系统模型精度和控制参数选择仍具有较强依赖性。

近年来,滑模控制因其对匹配扰动具有较强的鲁棒性、有限时间收敛能力及结构简单等特点,在空间系绳系统控制领域得到了广泛应用。Tao 等提出了固定时间滑模协调部署控制方法,实现了空间三角形系绳编队系统的快速稳定部署[7];Zhang 等采用分数阶固定时间滑模控制方法,提高了系绳卫星部署

过程中的收敛速度和抗扰性能[8]。然而,传统滑模控制依赖不连续切换函数,容易在平衡点附近激发高频抖振,不仅影响控制精度,还可能在输入受限条件下激发未建模动态,降低工程可实现性。

为了保持滑模控制鲁棒性的同时削弱抖振,高阶滑模控制逐渐成为研究热点。其中,超扭转控制作为典型的二阶滑模算法,能够在扰动梯度有界条件下生成连续控制输入,实现滑模变量及其导数的有限时间收敛。Moreno 和 Osorio 构造了超扭转算法的严格李雅普诺夫函数,为其有限时间稳定性分析提供了理论基础[9]。在此基础上,Shtessel 等提出了自适应增益超扭转滑模控制方法,使控制增益能够根据系统状态及扰动变化进行在线调节,从而降低对扰动上界先验信息的依赖[10]。Dong 等将自适应超扭转控制应用于未知边界扰动下的空间系绳系统部署问题,验证了该方法具有较好的抗扰性能[11];Li 等进一步将分数阶控制与自适应超扭转滑模控制相结合,提高了空间系绳卫星部署系统的鲁棒性和收敛性能[12]。然而,该类方法的控制律中仍显式包含符号函数,在滑模面邻域内可能产生残余抖振及局部高频振荡,增加执行机构负担,并制约张力输入平滑性的进一步提升。

对此,本文在自适应超扭转控制框架的基础上,提出一种基于平滑饱和函数的改进型部署控制方法。该方法将控制律中的不连续符号函数替换为连续平滑函数,通过边界层参数调节平滑程度,从而将滑模面邻域内的不连续切换转化为连续反馈控制。在完整保留原有自适应增益调节机制的前提下,该改进能够降低控制抖振幅度并提高张力输入信号的平滑性。同时,通过合理选取边界层参数,系统在边界层外保持有限时间趋近特性,而在边界层内实现一致最终有界,从而在动态响应性能与控制平滑性之间取得平衡。

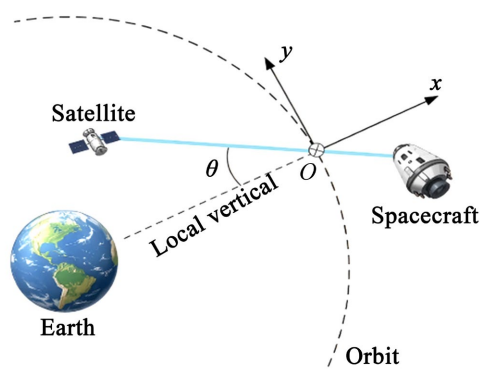
在此基础上,本文建立空间系绳系统的非线性部署动力学模型,设计改进型平滑自适应超扭转控制器,并在考虑输入约束的条件下开展仿真分析。通过引入复合扰动验证系统的鲁棒性,并以系绳长度误差均方根值、收敛时间及控制输入平滑性为评价指标,对比分析所提方法与标准自适应超扭转控制及幂次趋近律滑模控制的性能差异。本文后续章节安排如下:第二节建立非线性部署动力学模型;第三节设计改进型控制器;第四节进行稳定性分析;第五节开展数值仿真与结果讨论;第六节总结全文并展望未来研究方向。

## 2. 空间系绳系统部署动力学建模

空间系绳系统在部署过程中同时存在系绳长度变化和面内摆角运动,二者之间具有明显的非线性耦合关系。考虑到本文重点研究系绳部署阶段的张力控制问题,为在保证模型简洁性的同时保留系统主要动力学特征,采用二维刚性哑铃模型描述空间系绳系统的面内运动[1][4][6][7]。该模型将系统简化为由母星、子星和连接二者的系绳构成的两体系统,能够反映系绳张力、系绳长度以及面内摆角之间的耦合作用。空间系绳系统的二维刚性哑铃模型如图 1 所示。

### 2.1. 坐标系与基本假设

考虑空间系绳系统质心沿圆形开普勒轨道绕地球运动。以系统质心为原点建立轨道坐标系  $O_{xyz}$ ,其中  $O_x$  轴指向地心方向,  $O_y$  轴位于轨道平面内并沿轨道速度方向,  $O_z$  轴由右手定则确定。设  $L$  为系绳长度,  $\theta$  为系绳相对于当地铅垂方向的面内摆角,  $\Omega$  为系统质心轨道角速度,  $m$  为子星质量,  $T$  为系绳张力。为便于建立动力学模型,作如下假设: (1) 母星和子星均视为质点,且母星质量远大于子星质量,因此系统质心可近似认为位于母星处; (2) 系绳视为直线、不可伸长、无质量的刚性杆; (3) 系绳只能承受拉力,不能承受压力; (4) 子星在部署过程中无主动推力,系统仅通过调节系绳张力实现部署控制; (5) 系统质心轨道保持不变,并沿圆形开普勒轨道运动; (6) 仅考虑系统面内运动,忽略面外摆振对面内部署过程的影响。由于系绳只能承受拉力,不能承受压力,因此在整个部署过程中张力应满足



**Figure 1.** Schematic diagram of the two-dimensional rigid dumbbell model of the space tethered system (redrawn from Refs. [1] [4] [6] [7])

**图 1.** 空间系绳系统二维刚性哑铃模型示意图(据文献[1] [4] [6] [7]改绘)

$$T > 0 \quad (1)$$

同时, 考虑执行机构能力和系绳强度限制, 实际张力还应满足

$$T_{\min} \leq T \leq T_{\max} \quad (2)$$

其中,  $T_{\min} > 0$  为张力下限, 用于避免系绳松弛;  $T_{\max}$  为张力上限, 用于避免张力过大导致执行机构饱和或系绳断裂。

## 2.2. 部署动力学方程

在上述坐标系和建模假设下, 空间系绳系统的面内部署运动可由系绳长度  $L$  和面内摆角  $\theta$  两个广义坐标描述。基于拉格朗日方法, 可得到系统部署动力学方程为[4] [7]

$$\ddot{\theta} + 2(\dot{\theta} + \Omega)\frac{\dot{L}}{L} + 3\Omega^2 \sin \theta \cos \theta = 0 \quad (3)$$

$$\ddot{L} - L\left[(\dot{\theta} + \Omega)^2 + \Omega^2(3\cos^2 \theta - 1)\right] = -\frac{T}{m} \quad (4)$$

其中,  $\dot{\theta}$  和  $\ddot{\theta}$  分别表示面内角速度和面内角加速度,  $\dot{L}$  和  $\ddot{L}$  分别表示系绳释放速度和释放加速度。式(3)描述面内摆角运动, 其中  $2(\dot{\theta} + \Omega)\dot{L}/L$  反映了系绳长度变化与摆角运动之间的耦合作用,  $3\Omega^2 \sin \theta \cos \theta$  为轨道引力梯度引起的恢复项。式(4)描述系绳长度方向运动, 其中  $(\dot{\theta} + \Omega)^2$  反映轨道运动和相对摆动共同产生的离心效应,  $\Omega^2(3\cos^2 \theta - 1)$  表示轨道引力梯度对长度方向运动的影响,  $-T/m$  表示系绳张力对释放运动的约束作用。由式(3)和式(4)可以看出, 系绳长度变化会影响面内摆角运动, 而面内摆角及其角速度又会影响长度方向运动。因此, 空间系绳系统部署控制不是单一的长度控制问题, 而是具有非线性耦合特征的张力控制问题。

## 2.3. 无量纲化动力学模型

原始动力学方程中包含质量、轨道角速度和目标长度等物理参数。为简化模型形式, 并便于后续控制器设计, 对式(3)和式(4)进行无量纲化处理[4] [13]。定义

$$\xi = \frac{L}{L_{\text{end}}}, \quad \hat{T} = \frac{T}{mL_{\text{end}}\Omega^2}, \quad \tau = \Omega t, \quad (\cdot)' = \frac{d(\cdot)}{d\tau} \quad (5)$$

其中,  $L_{\text{end}}$  为目标部署长度,  $\xi$  为无量纲系绳长度,  $\hat{T}$  为无量纲张力,  $\tau$  为无量纲时间,  $(\cdot)'$  表示对无量

纲时间的导数。将式(5)代入式(3)和式(4)，可得无量纲化后的系统动力学方程

$$\theta'' + 2(\theta' + 1)\frac{\xi'}{\xi} + 3\sin\theta\cos\theta = 0 \quad (6)$$

$$\xi'' - \xi[(\theta' + 1)^2 + 3\cos^2\theta - 1] = -\hat{T} \quad (7)$$

式(6)和式(7)为后续控制器设计所采用的无量纲动力学模型。由式(6)可知，系绳释放速率  $\xi''$  会通过  $\xi'/\xi$  项影响面内摆角运动；由式(7)可知，面内摆角  $\theta$  和角速度  $\theta'$  会影响系绳长度方向的加速度，而无量纲张力  $\hat{T}$  直接作用于长度通道，是系统可调节的控制输入。在理想部署完成状态下，系绳长度达到目标值，释放速率为零，面内摆角和角速度均收敛至零，即

$$\xi = 1, \xi' = 0, \theta = 0, \theta' = 0 \quad (8)$$

将式(8)代入式(7)，可得平衡状态下的无量纲张力为

$$\hat{T} = 3 \quad (9)$$

这说明在部署完成后，系统仍需保持一定的正张力，以维持系绳处于拉紧状态。

## 2.4. 状态空间模型

为了便于后续控制器设计，将无量纲动力学方程进一步写成一阶状态空间形式。考虑到部署控制的目标是使系绳长度达到目标值，并抑制面内摆角运动，定义状态变量为

$$x = [x_1, x_2, x_3, x_4]^T = [\theta, \theta', \lambda, \lambda']^T \quad (10)$$

其中

$$\lambda = \xi - 1 \quad (11)$$

表示无量纲系绳长度相对于目标长度的偏差。因此，当部署任务完成时，有

$$x_{1f} = x_{2f} = x_{3f} = x_{4f} = 0 \quad (12)$$

由式(6)和式(7)可得系统状态空间模型为

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2 \\ f_1(x_1, x_2, x_3, x_4) \\ x_4 \\ f_2(x_1, x_2, x_3, x_4) - \hat{T} \end{bmatrix} \quad (13)$$

其中

$$f_1(x_1, x_2, x_3, x_4) = -\frac{2(x_2 + 1)x_4}{x_3 + 1} - 3\cos x_1 \sin x_1 \quad (14)$$

$$f_2(x_1, x_2, x_3, x_4) = [(x_2 + 1)^2 + 3\cos^2 x_1 - 1](x_3 + 1) \quad (15)$$

式中， $x_3 + 1 = \xi$ ，因此  $x_3$  表示系绳长度相对于目标长度的误差。式(13)将系统的摆角运动和长度运动统一写成状态空间形式，为后续滑模变量构造和控制律设计提供了基础。

## 2.5. 含扰动的系统模型

上述模型是在理想条件下建立的。实际部署过程中，空间环境扰动、模型参数摄动以及未建模动态

等因素会对系统运动产生影响。由于这些不确定因素来源复杂，难以分别建立精确模型，本文将其统一表示为集总扰动[9][13]。由式(13)可知，张力直接作用于长度通道。令控制输入为

$$u = \hat{T}, b = -1 \quad (16)$$

则考虑集总扰动后的系统模型可写为

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} x_2 \\ f_1 \\ x_4 \\ f_2 + bu + d_2 \end{bmatrix} \quad (17)$$

其中， $d_2$ 表示作用于长度通道的集总扰动，用于描述外部环境扰动、模型不确定性以及未建模动态的综合影响。本文假设 $d_2$ 有界但边界未知，即

$$|d_2| \leq D \quad (18)$$

其中， $D$ 为未知正常数。式(17)即为后续控制器设计所采用的系统模型。由于扰动边界未知，控制器需要在不依赖扰动上界的情况下保证系统状态稳定收敛，因此后续将基于该模型设计增强型自适应超螺旋滑模控制律。

### 3. 平滑自适应超扭转控制器设计

#### 3.1. 控制目标与设计思路

本文控制目标是在未知边界扰动和输入约束条件下，通过调节张力输入 $u$ ，使空间系绳系统完成稳定部署，即长度误差 $x_3$ 收敛至零附近，释放速率 $x_4$ 趋于零，同时面内摆角 $x_1$ 和角速度 $x_2$ 得到抑制。为实现上述目标，控制器设计需要满足以下要求：

- (1) 能够使系绳长度稳定到达目标值；
- (2) 能够抑制面内摆动和角速度振荡；
- (3) 能够使释放速率逐渐趋于零，保证部署过程平稳；
- (4) 能够在扰动边界未知时保持鲁棒性；
- (5) 能够减弱张力输入中的高频波动，提高工程可实现性。

基于此，本文采用如下设计思路：首先构造包含全部状态信息的滑模变量，使长度误差、释放速率和面内摆动统一进入控制目标；然后通过等效张力控制项抵消系统标称非线性；最后设计平滑自适应超扭转控制项补偿未知扰动并驱动滑模变量收敛。

#### 3.2. 滑模变量与张力控制律

定义滑模变量

$$\sigma = k_1 x_1 + k_2 x_2 + k_3 x_3 + k_4 x_4, \quad (19)$$

其中， $k_1, k_2, k_3, k_4$ 为滑模面参数。该滑模变量同时包含面内摆角、角速度、长度误差和释放速率，可以综合反映系统偏离目标部署状态的程度。对 $\sigma$ 求导，有

$$\dot{\sigma} = k_1 \dot{x}_1 + k_2 \dot{x}_2 + k_3 \dot{x}_3 + k_4 \dot{x}_4. \quad (20)$$

代入状态空间方程，可得

$$\sqrt{\dot{\sigma}} = k_1 x_2 + k_2 f_1 + k_3 x_4 + k_4 f_2 + k_4 bu + k_4 d_2. \quad (21)$$

为抵消系统标称非线性项，设计张力控制律

$$u = -\frac{1}{bk_4}(k_1x_2 + k_2f_1 + k_3x_4 + k_4f_2) + \frac{1}{bk_4}v. \quad (22)$$

将其代入  $\dot{\sigma}$ ，可得

$$\dot{\sigma} = v + k_4d_2. \quad (23)$$

令

$$\Delta(t) = k_4d_2, \quad (24)$$

$$\dot{\sigma} = v + \Delta(t), \quad (25)$$

其中， $\Delta(t)$  为有界但边界未知的集总扰动项。由此，空间系绳部署控制问题被转化为含未知边界扰动的滑模变量调节问题。

### 3.3. 平滑饱和函数

传统符号函数  $\text{sign}(\sigma)$  能够提供强趋近作用，但在  $\sigma = 0$  附近存在不连续切换。为改善控制输入连续性，本文引入平滑饱和函数

$$\text{sat}\left(\frac{\sigma}{\varphi}\right) = \begin{cases} 1, & \sigma > \varphi, \\ \frac{\sigma}{\varphi}, & |\sigma| \leq \varphi, \\ -1, & \sigma < -\varphi, \end{cases} \quad (26)$$

其中， $\varphi > 0$  为边界层参数。当  $|\sigma| > \varphi$  时，

$$\text{sat}\left(\frac{\sigma}{\varphi}\right) = \text{sign}(\sigma), \quad (27)$$

控制项保持较强的趋近作用；当  $|\sigma| \leq \varphi$  时，

$$\text{sat}\left(\frac{\sigma}{\varphi}\right) = \frac{\sigma}{\varphi}, \quad (28)$$

控制项转化为连续反馈，避免了符号函数在滑模面附近的突变因此，平滑饱和函数能够在远离滑模面时保持较强趋近能力，在接近滑模面时减弱高频切换。边界层参数  $\varphi$  越小，控制律越接近符号函数，收敛精度较高但平滑性减弱； $\varphi$  越大，控制输入更平滑，但稳态误差邻域可能增大。因此， $\varphi$  是调节控制精度和输入平滑性之间折中的关键参数。

### 3.4. 平滑自适应超扭转控制律

为处理扰动边界未知问题，并改善控制输入平滑性，本文设计如下平滑自适应超扭转控制律：

$$v = v_1 + v_2, \quad (29)$$

$$v_1 = -\alpha |\sigma|^{1/2} \text{sat}\left(\frac{\sigma}{\varphi}\right), \quad (30)$$

$$\dot{v}_2 = -\frac{\beta}{2} \text{sat}\left(\frac{\sigma}{\varphi}\right). \quad (31)$$

其中， $v_1$  为非线性反馈项，用于驱动滑模变量向滑模面趋近； $v_2$  为辅助动态项，用于补偿扰动对滑模变量动态的影响； $\alpha$  和  $\beta$  为自适应控制增益采用如下自适应律调节控制增益：

$$\dot{\alpha} = \begin{cases} \omega_1 \sqrt{\frac{\gamma_1}{2}} \operatorname{sign}(|\sigma| - \mu), & \alpha > \alpha_m, \\ \eta, & \alpha \leq \alpha_m, \end{cases} \quad (32)$$

$\beta = 2\varepsilon\alpha$ 。其中,  $\omega_1, \gamma_1, \mu, \alpha_m, \eta, \varepsilon$  均为正设计参数。参数  $\mu$  用于判断滑模变量是否进入给定邻域。当  $|\sigma| > \mu$  时, 说明系统偏离滑模面较远, 增益增加以增强控制作用; 当  $|\sigma| \leq \mu$  时, 增益可逐渐减小或维持在较低水平, 以避免过度控制。参数  $\alpha_m$  为增益下界, 用于防止控制作用不足。该控制律具有以下特点: 第一, 自适应增益机制避免了对扰动上界的直接依赖; 第二, 超扭转结构提高了滑模变量的动态响应能力; 第三, 平滑饱和函数削弱了滑模面附近的不连续切换, 使张力输入更加平滑。

### 3.5. 输入约束处理

由于系绳不能承受压力, 且张力不能超过执行机构能力或系绳强度上限, 实际施加到系统的控制输入应满足

$$u_{\min} \leq u \leq u_{\max}. \quad (33)$$

因此, 最终控制输入经过如下饱和和约束处理:

$$u_o = \begin{cases} u_{\max}, & u \geq u_{\max}, \\ u, & u_{\min} < u < u_{\max}, \\ u_{\min}, & u \leq u_{\min}. \end{cases} \quad (34)$$

其中,  $u_o$  为实际控制输入。该处理保证系绳在部署过程中始终处于受拉状态, 并避免张力超过执行机构能力或系绳安全范围。

## 4. 稳定性分析

### 4.1. 闭环滑模动态

由式(25)及所设计的平滑自适应超扭转控制律, 可得闭环滑模变量动态为

$$\dot{\sigma} = -\alpha |\sigma|^{\frac{1}{2}} \operatorname{sgn}_{\varphi}(\sigma) + v_2 + \Delta(t), \quad \dot{v}_2 = -\frac{\beta}{2} \operatorname{sgn}_{\varphi}(\sigma), \quad (35)$$

其中,  $\operatorname{sgn}_{\varphi}(\sigma) = \operatorname{sat}(\sigma/\varphi)$ 。为满足超扭转算法的稳定性条件, 假设集总扰动  $\Delta(t)$  绝对连续, 且存在未知正常数  $\bar{\Delta}$  和  $L_{\Delta}$ , 使得

$$|\Delta(t)| \leq \bar{\Delta}, \quad |\dot{\Delta}(t)| \leq L_{\Delta}. \quad (36)$$

考虑式(34)中的输入饱和和约束后, 集总扰动可统一表示为

$$\Delta(t) = k_4 d_2(t) + k_4 b[u_o(t) - u(t)], \quad (37)$$

其中, 第二项表示输入饱和引起的控制偏差。因此, 只要外部扰动及输入饱和误差满足式(36), 即可将其统一纳入稳定性分析。

由于平滑饱和函数引入了边界层, 以下分别讨论边界层外的有限时间趋近性和边界层内的一致最终有界性。

### 4.2. 边界层外的有限时间趋近

当  $|\sigma| \geq \varphi$  时, 有

$$\operatorname{sgn}_{\varphi}(\sigma) = \operatorname{sgn}(\sigma). \quad (38)$$

定义组合变量  $z = v_2 + \Delta(t)$ ，并令  $k_2 = \beta/2$ ，则闭环滑模动态可以写为

$$\dot{\sigma} = -\alpha |\sigma|^{\frac{1}{2}} \operatorname{sgn}(\sigma) + z, \quad \dot{z} = -k_2 \operatorname{sgn}(\sigma) + \dot{\Delta}(t). \quad (39)$$

进一步定义扩展状态变量

$$\zeta = \begin{bmatrix} |\sigma|^{\frac{1}{2}} \operatorname{sgn}(\sigma) \\ z \end{bmatrix}. \quad (40)$$

参考严格超扭转 Lyapunov 分析方法[9]，选取

$$V = \zeta^T P \zeta, \quad \lambda_{\min}(P) \|\zeta\|^2 \leq V \leq \lambda_{\max}(P) \|\zeta\|^2, \quad (41)$$

其中

$$P = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 4k_2^* + (\alpha^*)^2 & -\alpha^* \\ -\alpha^* & 2 \end{bmatrix} > 0. \quad (42)$$

这里， $\alpha^*$  和  $k_2^*$  分别表示自适应增益在边界层外达到的有效下界。由于  $k_2 = \beta/2 = \varepsilon\alpha$ ，选取自适应参数满足  $\mu \leq \varphi$ ，则当系统位于边界层外时增益持续增加。只要经过有限时间  $t^*$  后满足

$$k_2^* = \varepsilon\alpha^* > L_\Delta, \quad (\alpha^*)^2 > \frac{4L_\Delta(k_2^* + L_\Delta)}{k_2^* - L_\Delta}, \quad (43)$$

便存在对称正定矩阵  $Q$ ，使 Lyapunov 函数沿式(39)的导数满足

$$\dot{V} \leq -\frac{1}{|\zeta_1|} \zeta^T Q \zeta \leq -c_0 V^{\frac{1}{2}}, \quad c_0 = \frac{\lambda_{\min}(Q)}{\sqrt{\lambda_{\max}(P)}} > 0. \quad (44)$$

由有限时间稳定性理论可知，滑模变量能够在有限时间内到达边界层，其到达时间满足

$$T_r \leq t^* + \frac{2\sqrt{V(t^*)}}{c_0}. \quad (45)$$

因此，即使扰动上界未知，自适应增益仍能够逐渐增加至满足式(43)的水平，从而保证滑模变量有限时间进入  $|\sigma| \leq \varphi$  的边界层。

### 4.3. 边界层内的一致最终有界性

当  $|\sigma| < \varphi$  时，平滑饱和函数满足

$$\operatorname{sgn}_\varphi(\sigma) = \frac{\sigma}{\varphi}. \quad (46)$$

令  $z = v_2 + \Delta(t)$ ，则边界层内的闭环动态为

$$\dot{\sigma} = -\frac{\alpha}{\varphi} |\sigma|^{\frac{3}{2}} \operatorname{sgn}(\sigma) + z, \quad \dot{z} = -\frac{k_2}{\varphi} \sigma + \dot{\Delta}(t). \quad (47)$$

根据边界层外的有界性结果以及式(36)，变量  $z$  保持有界。记  $|z| \leq \bar{z}$ ，并取  $W = \sigma^2/2$ 。由于  $\alpha \geq \alpha_m > 0$ ，有

$$\dot{W} \leq -\frac{\alpha_m}{\varphi} |\sigma|^{\frac{5}{2}} + \bar{z} |\sigma| = -|\sigma| \left( \frac{\alpha_m}{\varphi} |\sigma|^{\frac{3}{2}} - \bar{z} \right). \quad (48)$$

当  $|\sigma| > (\varphi \bar{z} / \alpha_m)^{2/3}$  时，有  $\dot{W} < 0$ 。结合边界层外的有限时间趋近性，可得

$$\limsup_{t \rightarrow \infty} |\sigma(t)| \leq \delta_\sigma, \quad \delta_\sigma = \min \left\{ \varphi, \left( \frac{\varphi \bar{z}}{\alpha_m} \right)^{\frac{2}{3}} \right\}. \quad (49)$$

因此, 滑模变量在边界层内一致最终有界, 且最终误差范围与边界层厚度  $\varphi$ 、辅助状态上界  $\bar{z}$  和增益下界  $\alpha_m$  直接相关。减小  $\varphi$  或增大  $\alpha_m$  能够提高稳态精度, 但过小的边界层可能削弱控制输入的平滑性。

#### 4.4. 降阶内部动态稳定性

当滑模变量进入最终有界区域后, 可以表示为

$$k_1 x_1 + k_2 x_2 + k_3 x_3 + k_4 x_4 = e_\sigma, \quad |e_\sigma| \leq \delta_\sigma. \quad (50)$$

由此得到

$$x_4 = -\frac{1}{k_4} (k_1 x_1 + k_2 x_2 + k_3 x_3) + \frac{e_\sigma}{k_4}. \quad (51)$$

将式(51)代入系统状态方程可得到关于  $x_1$ 、 $x_2$  和  $x_3$  的降阶内部动态。当  $e_\sigma = 0$  时, 采用本文参数  $k_1 = -7$ 、 $k_2 = -0.01$ 、 $k_3 = 9$  和  $k_4 = 4.5$ , 降阶系统在目标平衡点处线性化矩阵的特征值为  $-0.4179 \pm 2.2270i, -1.1686$ 。所有特征值实部均为负, 因此降阶内部动态在目标平衡点附近局部渐近稳定。当  $|e_\sigma| \leq \delta_\sigma$  时, 式(51)中的最后一项可视为有界输入。根据局部输入状态稳定性, 面内摆角、角速度、长度误差和释放速率最终收敛至与  $\delta_\sigma$  有关的小邻域。

#### 4.5. 稳定性结论

综合上述分析, 在集总扰动及其变化率有界、输入饱和和误差满足式(36)、自适应参数满足  $\mu \leq \varphi$ , 且自适应增益最终达到式(43)给出的充分条件时, 所提出的平滑自适应超扭转控制方法能够保证滑模变量在有限时间内进入边界层, 并在边界层内一致最终有界。与此同时, 所选滑模面参数能够保证降阶内部动态局部渐近稳定, 因此空间系绳系统的面内摆角、角速度、长度误差和释放速率最终收敛至目标平衡点附近的小邻域。平滑饱和函数使控制输入在滑模面附近连续变化, 从而在保持鲁棒部署能力的同时减弱张力输入抖振。

### 5. 数值仿真与结果讨论

为验证所提控制方法的有效性, 本文基于空间系绳系统无量纲状态空间模型开展数值仿真。仿真分别设置无扰动和复合扰动两种工况, 并与 SMC-PRL 和标准 ASTC 方法进行对比。对比的目的不是简单判断某一方法在所有时刻均最优, 而是从部署完成能力、扰动抑制能力和控制输入平滑性三个方面综合评价控制效果。

#### 5.1. 仿真参数设置

系统初始状态取为

$$x(0) = [0, 0, -0.99, 0.7]^T. \quad (52)$$

目标状态为

$$x_d = [0, 0, 0, 0]^T. \quad (53)$$

滑模面参数选取为

$$k_1 = -7, k_2 = -0.01, k_3 = 9, k_4 = 4.5.$$

自适应控制参数选取为

$$\omega_1 = 10, \gamma_1 = 2, \mu = 0.1, \alpha_m = 45, \eta = 5, \varepsilon = 0.05$$

张力输入约束为

$$u_{\min} = 0.02, u_{\max} = 5.$$

平滑饱和函数的边界层参数为  $\varphi$ ，用于调节滑模面附近的控制平滑程度。上述参数设置与材料中给出的仿真设置保持一致。复合扰动工况下，扰动取为

$$d_2 = 0.4[\sin(\pi\tau) + \sin(100\pi\tau)]. \quad (54)$$

该扰动由低频项和高频项组成，低频项用于模拟缓慢变化的轨道摄动，高频项用于模拟小尺度快速扰动。该设置能够较好地检验控制方法在复杂扰动环境下的鲁棒性。

## 5.2. 无扰动工况分析

无扰动工况主要用于验证控制器在理想条件下的基本部署能力。仿真结果包括控制输入、面内摆角、释放速率和长度误差四组曲线。整体来看，三种方法均能够使系统状态逐渐趋近目标状态，说明在无扰动条件下均具备完成部署任务的能力。但从曲线形态和控制输入平滑性来看，三种方法表现出不同特征。

由图 2~5 可见，无扰动条件下三种控制方法均能够使系统状态逐渐趋近目标状态，实现稳定部署。其中，SMC-PRL 在控制输入和部分状态响应中仍存在较明显波动，标准 ASTC 的收敛速度和响应平稳性有所改善。所提方法与标准 ASTC 具有相近的总体收敛性能，同时张力输入变化更加平缓，面内摆角、释放速率及长度误差在稳态附近的波动进一步减小。结果表明，引入平滑饱和函数能够在保持部署速度和长度跟踪性能的基础上，有效改善控制输入连续性和系统稳态响应品质。

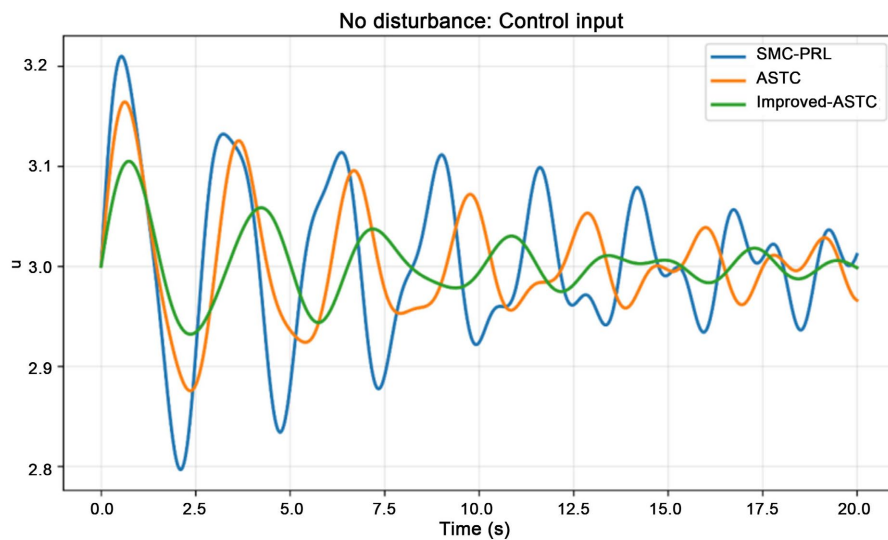
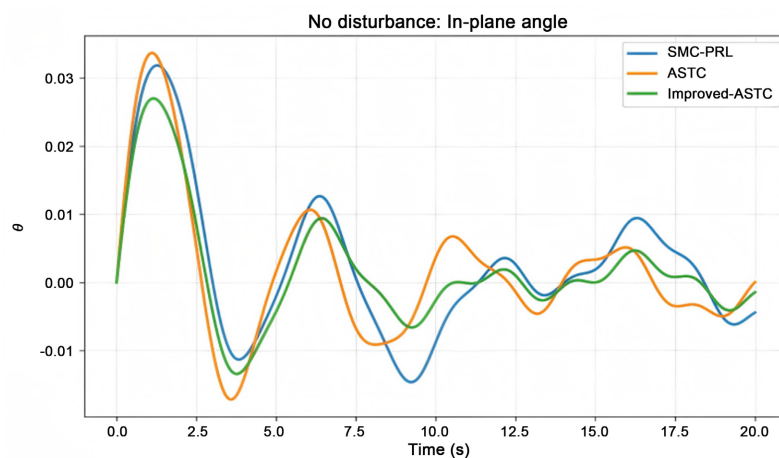
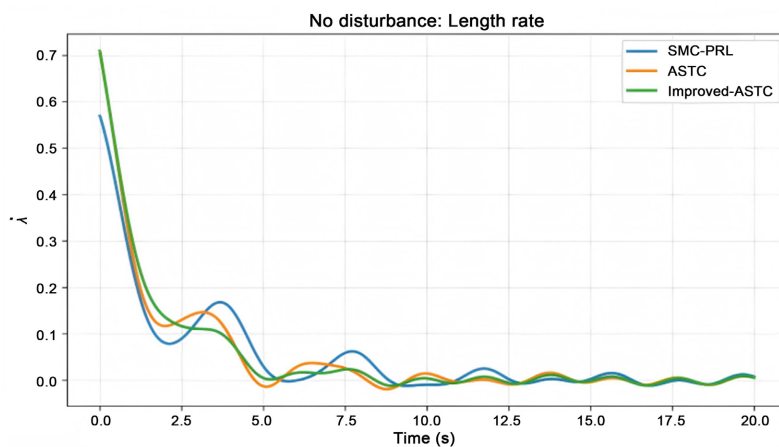


Figure 2. Time history of the system control input without disturbance

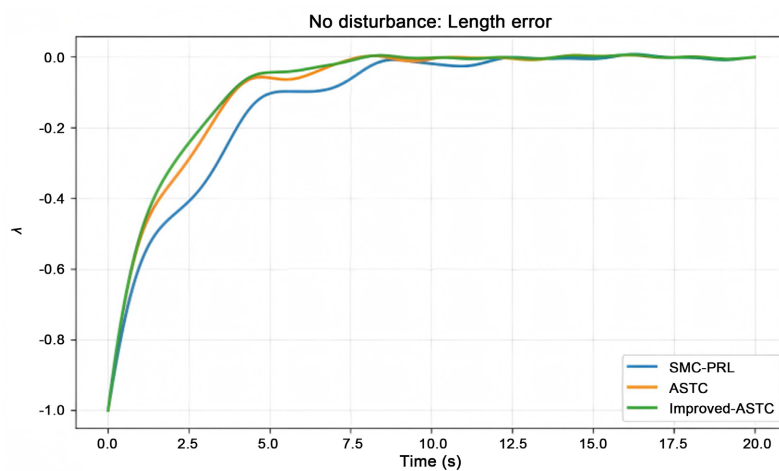
图 2. 系统控制输入随时间的变化(无扰动)



**Figure 3.** Time history of the system in-plane libration angle without disturbance  
**图 3.** 系统面内摆角随时间的变化(无扰动)



**Figure 4.** Time history of the tether deployment rate without disturbance  
**图 4.** 系绳释放速率随时间的变化(无扰动)



**Figure 5.** Time history of the tether length error without disturbance  
**图 5.** 系绳长度误差随时间的变化(无扰动)

### 5.3. 复合扰动工况分析

复合扰动工况用于检验控制器在外部扰动和模型不确定性存在时的鲁棒性。与无扰动工况相比，扰动会使控制输入和状态变量出现更明显波动，因此更能反映控制方法的实际抗扰能力。

由图 6~9 可见，在复合扰动作用下，三种控制方法均能维持系统稳定部署，但控制输入和状态变量均出现不同程度的波动。SMC-PRL 的张力输入及状态响应振荡较为明显，标准 ASTC 具有较好的扰动抑制能力，但局部仍存在一定波动。相比之下，所提方法在保持较快长度误差收敛和面内摆动抑制能力的同时，张力输入更加平滑，释放速率及稳态长度误差的波动幅值更小。说明平滑自适应超扭转控制能够在未知边界扰动下保持较好的鲁棒性，并进一步提高部署过程的平顺性和控制输入品质。

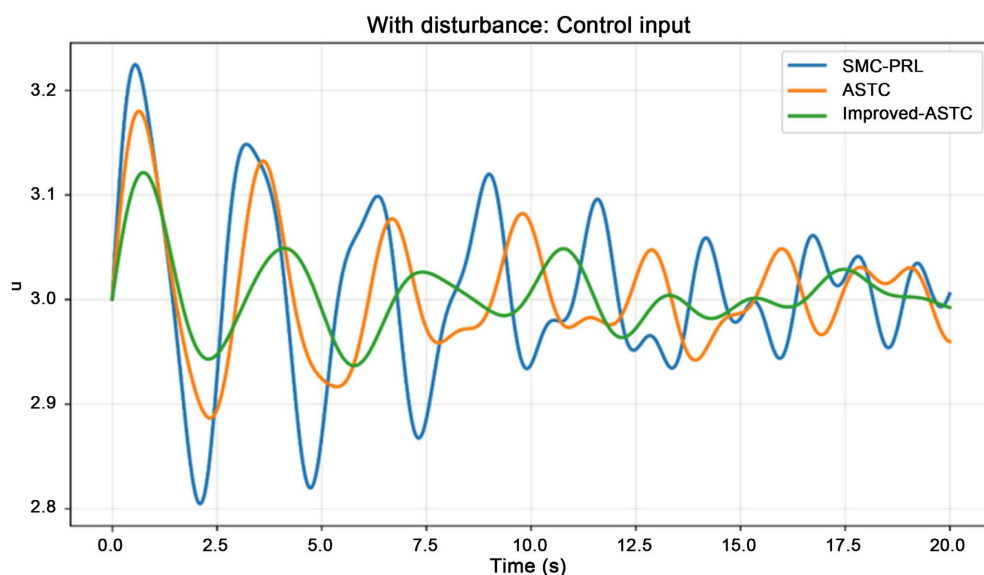


Figure 6. Time history of the system control input under composite disturbance

图 6. 系统控制输入随时间的变化(复合扰动)

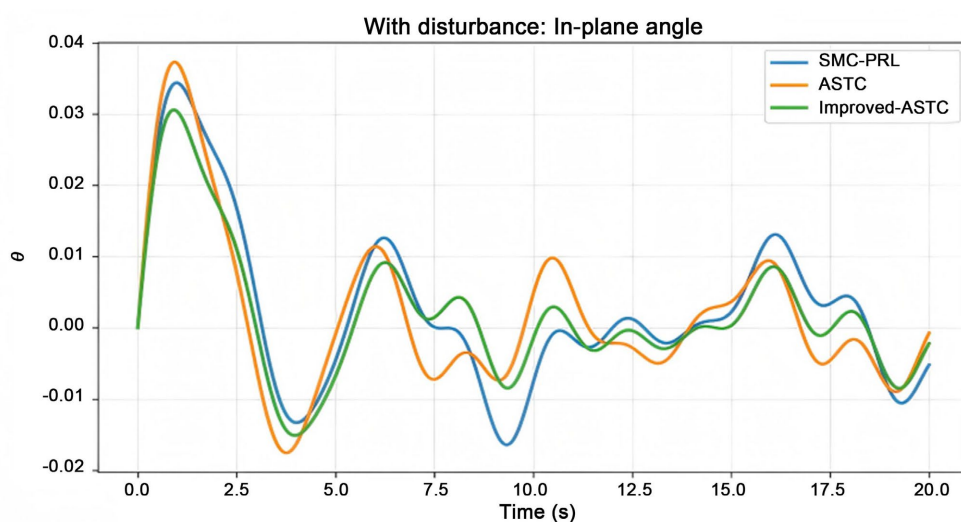
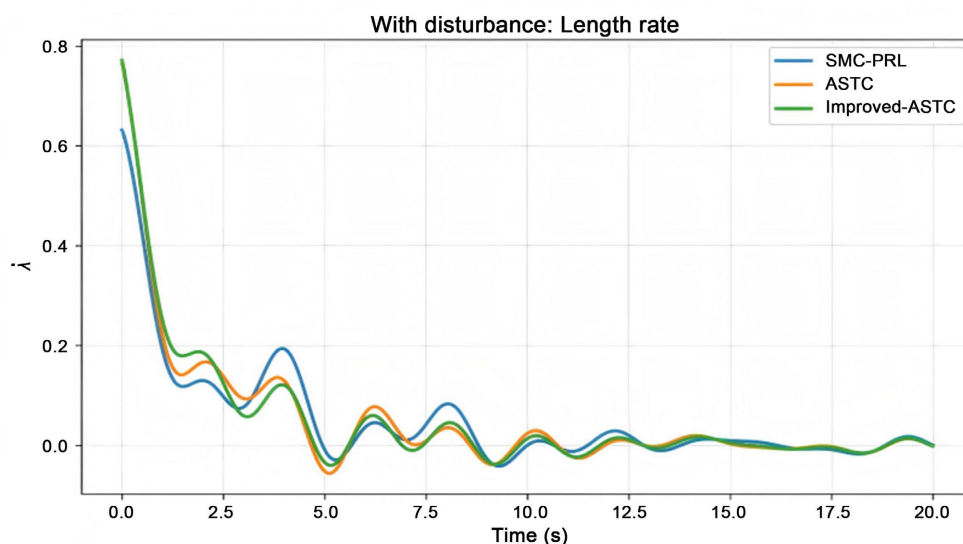


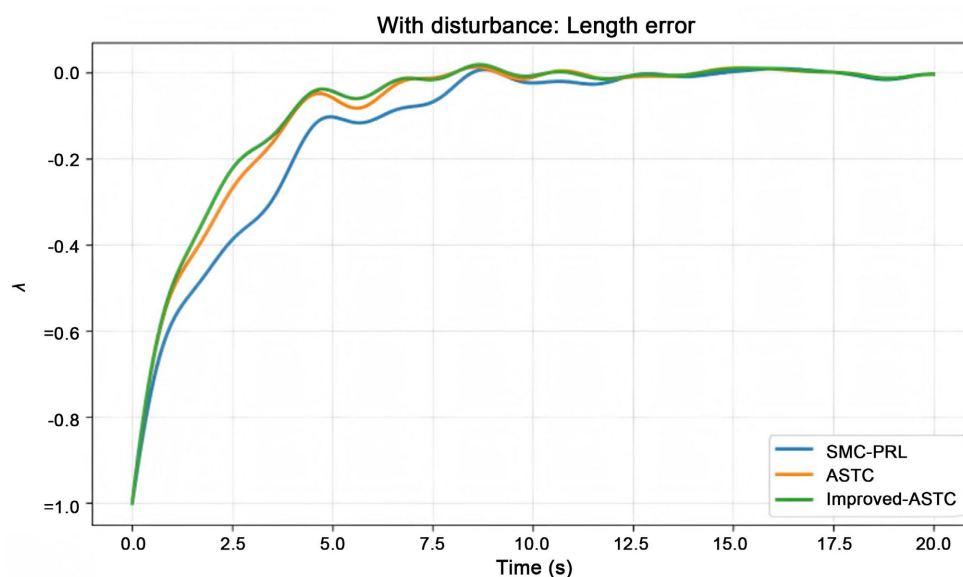
Figure 7. Time history of the system in-plane libration angle under composite disturbance

图 7. 系统面内摆角随时间的变化(复合扰动)



**Figure 8.** Time history of the tether deployment rate under composite disturbance

**图 8.** 系绳释放速率随时间的变化(复合扰动)



**Figure 9.** Time history of the tether length error under composite disturbance

**图 9.** 系绳长度误差随时间的变化(复合扰动)

## 6. 结论

本文针对空间系绳系统部署过程中存在的非线性耦合、未知边界扰动、模型不确定性以及张力输入约束问题，提出了一种基于平滑饱和函数的自适应超扭转控制方法。该方法基于空间系绳系统无量纲非线性动力学模型，构造包含面内摆角、角速度、长度误差和释放速率的滑模变量，并通过张力控制律将部署控制问题转化为滑模变量的鲁棒调节问题。在控制器设计中，引入平滑饱和函数替代不连续符号函数，使控制律在滑模面邻域内实现连续过渡，从而减弱控制输入抖振；同时保留自适应增益调节机制，使控制器能够在扰动边界未知的情况下自动调整控制强度。稳定性分析表明，在扰动有界、输入约束满足且控制参数合理选取的条件下，滑模变量能够在有限时间内到达边界层，并在边界层内保持一致最终

有界。仿真结果表明,所提方法能够在无扰动和复合扰动条件下实现空间系绳系统稳定部署,使长度误差、释放速率和面内摆角逐渐收敛;相比传统滑模控制和标准自适应超扭转控制,所提方法在保持较好收敛性能和抗扰能力的同时,进一步改善了张力输入平滑性和稳态波动特性,提高了空间系绳部署控制的工程可实现性。后续研究可进一步考虑系绳弹性、面外摆动、执行机构动态以及复杂轨道摄动等因素,以提升该方法在实际空间任务中的适用性。

## 参考文献

- [1] Teik Hong, A.A., Varatharajoo, R. and Chak, Y. (2025) Review of Deployment Controllers for Space Tethered System. *Advances in Space Research*, **75**, 3933-3949. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2024.11.061>
- [2] Xu, S., Chen, T., Wen, H. and Jin, D. (2023) Digital Deployment Control of a Tethered Satellite System with Constrained Tension. *Advances in Space Research*, **72**, 4184-4196. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2023.08.025>
- [3] Liu, C., Chen, S., Guo, Y. and Wang, W. (2023) Robust Adaptive Control for Rotational Deployment of an Underactuated Tethered Satellite System. *Acta Astronautica*, **203**, 65-77. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2022.11.025>
- [4] Huang, B., Zhang, F., Song, M. and Huang, P. (2023) Event-Model-Based Fuzzy Sliding Mode Deployment Control for Triangular Tethered Satellite Systems Suffering External Disturbance. *Aerospace Science and Technology*, **139**, Article 108399. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2023.108399>
- [5] Huang, B., Zhang, F., Song, M. and Huang, P. (2023) Event-Based Predefined-Time Deployment Control for Space Triangular Tethered Satellite System with Input Quantization. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, **59**, 4936-4946. <https://doi.org/10.1109/taes.2023.3244178>
- [6] Luo, C., Chen, T., Wen, H. and Jin, D. (2024) Learning-Based Control for Deployment and Retrieval of a Spinning Tethered Satellite Formation System. *Acta Astronautica*, **225**, 788-800. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2024.09.061>
- [7] Tao, X., Zhang, F., Huang, B., Shen, G. and Huang, P. (2024) Fixed-Time Sliding Mode Coordinated Deployment Control for Space Triangle Tethered Formation System. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, **60**, 1351-1363. <https://doi.org/10.1109/taes.2023.3335910>
- [8] Zhang, X., Wu, F., Liu, M. and Chen, X. (2023) Fractional-Order Robust Fixed-Time Sliding Mode Control for Deployment of Tethered Satellite. *Acta Astronautica*, **209**, 172-178. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2023.04.041>
- [9] Moreno, J.A. and Osorio, M. (2012) Strict Lyapunov Functions for the Super-Twisting Algorithm. *IEEE Transactions on Automatic Control*, **57**, 1035-1040. <https://doi.org/10.1109/tac.2012.2186179>
- [10] Shtessel, Y., Taleb, M. and Plestan, F. (2012) A Novel Adaptive-Gain Supertwisting Sliding Mode Controller: Methodology and Application. *Automatica*, **48**, 759-769. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2012.02.024>
- [11] Dong, Z., Zhang, L., Li, A., Wang, C. and Shi, Q. (2022) Adaptive Super-Twisting Control for Deployment of Space-Tethered System with Unknown Boundary Disturbances. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, **236**, 2739-2750. <https://doi.org/10.1177/09544100211068909>
- [12] Li, X., Sun, G. and Xue, C. (2022) Fractional-Order Deployment Control of Space Tethered Satellite via Adaptive Super-Twisting Sliding Mode. *Aerospace Science and Technology*, **121**, Article 107390. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2022.107390>
- [13] Su, B., Zhang, F. and Huang, P. (2022) Nonlinear State Observer and Control Design for Triangular Tethered Satellite Formation. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, **58**, 4718-4728. <https://doi.org/10.1109/taes.2022.3167997>