基于退步控制方法的绳系卫星回收张力控制

钟 睿 徐世杰

(北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100191)

摘 要: 利用退步控制方法研究了绳系卫星系统 TSS(Tethered Satellite System)的平面内回收控制问题,提出了一种新的张力控制律.该控制律设计由两步组成:首先利用退步控制将摆角稳定到目标值,然后通过设计摆角的目标值实现系绳的回收和回收速度的控制.控制率设计了分段连续的目标角度方案和延时环节,可以使 TSS 回收过程各状态量变化平滑.数值仿真结果表明,该控制律在圆轨道、近圆轨道和大偏心率的椭圆轨道都有很好的控制效果.

关 键 词: 绳系卫星系统; 控制规律; 退步控制方法; 子星回收

中图分类号: V 474.292

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2010)01-0026-05

Tension control strategy for TSS retrieval process based on backstepping control method

Zhong Rui Xu Shijie

(School of Astronautics, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: A new tension control law based on backstepping control method was proposed for planar retrieval control of tethered satellite system(TSS). The control law was designed in two steps. Firstly, the planar swing angle was stabilized into target value via using backstepping control method. Then, the retrieval velocity was controlled by designing appropriate profile for the target value. A continuous piecewise profile was adopted for the target value and a delay term was added to ensure a better retrieval behavior. Numerical simulation results validate that the control law designed here works well for TSS mission in circular, near circular orbits and also elliptical orbit with large eccentricity.

Key words: tethered satellite system; control algorithm; backstepping control method; subsatellite retrieval

空间任务的多样性要求开发新的卫星系统.绳系卫星系统 TSS(Tethered Satellite System)已经向人们展示了其广泛的用途和应用前景,例如空间实验、空间运输、大型空间结构的构建等等.典型的 TSS 可以利用绳系卷扬机构将子星释放、滞留和回收到母星中,以完成各种任务.近 30 年来,TSS 一直是航天领域的研究热点之一[1].

TSS 回收过程的控制问题一直是研究的难点,由于系统包含有负阻尼,其动力学行为呈现不稳定的现象[2],给收绳带来了困难.很多学者都在探讨如何解决 TSS 的控制,特别是回收过程的控制问题,取得一些成果.于韶华[3]等基于非线性动态理论分析,提出了速度距离控制方法,该方法实现方便且控制效果比较明显;黄奕永[4]等人对速度距离法提出了改进,扩大了二阶系统的稳定域,提高了释放速度;近年来,最优控制理论被越来越多的应用到 TSS 的控制问题当中,文献[5-6]发表了大量的文献证明最优控制是解决 TSS 控制

收稿日期: 2008-12-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10702003)

作者简介: 钟 睿(1984-),男,江西赣州人,博士生,zhongruia@163.com.

的一种很好的工具;而对于最优控制问题,除了采用 Pontyagin 极大值原理推导给出状态及其协变量的一组方程进行求解外,越来越多的学者开始采用基于伪谱离散的直接配点法(pseudo-spectral knotting methods),文献[7]采用 Chebyshev 伪谱离散的方法将 TSS 连续时间的最优控制转化为标准的二次型问题,取得了较好的控制效果.

本文提出一种新的设计思路:在系绳张力控制条件下,TSS 的控制可以认为是一个欠驱动问题,退步控制[8]应用于这类问题具有控制律设计灵活的特点,且本身具有良好的动态和稳态性能.本文研究面内情况下的 TSS 的控制问题,运用退步控制理论设计了回收过程的张力控制律,并通过加入延时环节使张力变化平滑.该控制律在收绳速率上与已有的研究成果相近,但是在回收稳定性方面的性能略优.近年来对 TSS 回收过程的研究大多限于圆轨道情况,对椭圆轨道的情况研究较少,而本文得到控制率可以适用的椭圆轨道偏心率范围较广.

1　绳系动力学模型

所研究的 TSS 系统由一颗子星 S 和母星 M 组成.轨道坐标系建立如图 1 所示:x 轴沿母星速度方向,y 轴沿地心与母星连线方向.绳系问题非常复杂,为简化分析过程,作如下假设:

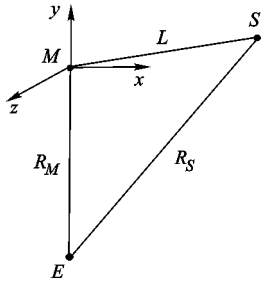


图 1　TSS 示意图

1) 地球视为中心重力体,TSS 母星和子星均视为质点,姿态运动不予考虑.

2) 子星质量远小于母星,后者的运动轨道不受前者影响.

3) 柔绳无质量、无弹性变形.

4) 作用在 TSS 系统上的唯一外力是重力,忽略其他外力.

5) 柔绳张力沿着绳的方向,没有垂直绳方向的控制力和能量耗散.

根据以上假设,TSS 的动力学方程[3]可以写为

$$\ddot{L}-L\dot{\theta}^2-L(\dot{v}+\dot{\varphi})^2\cos^2\theta=\mu LR_M^{-3}(3\cos^2\theta\sin^2\varphi-1)-Tm^{-1} \tag{1}$$

$$L(\dot{v}+\ddot{\varphi})+2\dot{L}(\dot{v}+\dot{\varphi})-2L(\dot{v}+\dot{\varphi})\dot{\theta}\tan\theta=3\mu LR_M^{-3}\cos\varphi\sin\varphi \tag{2}$$

$$L\ddot{\theta}+2\dot{L}\dot{\theta}+L(\dot{v}+\dot{\varphi})^2\cos\theta\sin\theta=-3\mu LR_M^{-3}\sin^2\varphi\cos\theta\sin\theta+FM^{-1} \tag{3}$$

式中,F 为面外推力;T 为系绳张力;μ 为地球引力常数;m 和 M 分别表示子星和母星的质量;L 为绳长;R_M 为母星到地心的距离,且 $R_M\gg L$;θ 是系绳与轨道平面的夹角;φ 是系绳在轨道平面内的投影与 x 轴的夹角;v 是近地点幅角;求导符号表示对时间 t 的导数.

平面情况下式(1)和式(2)可简化为

$$\ddot{L}-L(\dot{v}+\dot{\varphi})^2=\mu LR_M^{-3}(3\sin^2\varphi-1)-Tm^{-1} \tag{4}$$

$$\ddot{v}+\ddot{\varphi}+2\dot{L}L^{-1}(\dot{v}+\dot{\varphi})=1.5\mu R_M^{-3}\sin 2\varphi \tag{5}$$

2　摆角稳定的退步控制率

退步方法的设计过程中,将一部分状态变量或状态变量的组合看成虚拟控制量,并根据 Lyapunov 方法对它们进行中间控制律的设计.

为了方便中间控制率的设计,首先定义如下辅助变量:

$$\left.\begin{aligned} z_1&=\dot{\varphi}_e+k_1\varphi_e+k_0z_0\\ \dot{z}_0&=\varphi_e\end{aligned}\right\} \tag{6}$$

式中,角度误差 $\varphi_e=\varphi-\varphi_d$;$\varphi_d$ 是给定的目标角度;k_1 和 k_0 为正的参数.z_1 相当于一般退步控制中的中间状态误差量,易知 z_1 就是一个 PID 控制律且当 $z_1\to 0$ 时,φ_e 渐近地收敛到 0.

对式(6)求导,结合式(5)并考虑到一般任务中选取 $\dot{\varphi}_d=\ddot{\varphi}_d=0$ 得到:

$$\dot{z}_1=\ddot{\varphi}_e+k_1\dot{\varphi}_e+k_0\varphi_e=-\ddot{v}-2\dot{L}L^{-1}(\dot{v}+\dot{\varphi})+1.5\mu R_M^{-3}\sin 2\varphi+k_1\dot{\varphi}+k_0\varphi_e \tag{7}$$

将 $2\dot{L}L^{-1}(\dot{v}+\dot{\varphi})$ 视为虚拟控制量,再令

$$z_2=2\dot{L}L^{-1}(\dot{v}+\dot{\varphi})-u \tag{8}$$

则 z_2 是中间控制误差,而 u 是一个可以使 z_1 收敛的中间控制律.选择:

$$u=-\ddot{v}+1.5\mu R_M^{-3}\sin 2\varphi+k_1\dot{\varphi}+k_0\varphi_e+z_1 \tag{9}$$

将式(8)和式(9)代入式(7),则有

$$\dot{z}_1=-z_1-z_2 \tag{10}$$

选择 Lyapunov 函数:

$$V_1=\frac{1}{2}k_2z_1^2 \tag{11}$$

式中 k_2 为正的参数，对式(11)求导得到：

$$\dot{V}_1 = k_2 z_1(-z_1 - z_2) = -k_2 z_1^2 - k_2 z_1 z_2 \tag{12}$$

由上式可见，如果 $z_2 \to 0$，则可以得到 $\dot{V}_1 = -k_2 z_1^2 < 0$，从而根据 Lyapunov 稳定性理论，$z_1 \to 0$. 为使系统稳定，接下来的任务是设计真实控制律 T，使 $z_2 \to 0$.

为求得真实的控制律，需要知道中间控制误差的时间导数，结合式(4)、式(5)、式(8)和式(9)可求得：

$$\dot{z}_2 = a + bT \tag{13}$$

其中

$$a = \mu R_M^{-3}[(6\sin^2\varphi - 2)(\dot{v}+\dot{\varphi}) - 1.5(1+k_1)\sin 2\varphi + 3\dot{L}L^{-1}\sin 2\varphi - 3\dot{\varphi}\cos 2\varphi] + 4.5\mu R_M^{-4}\dot{R}_M \sin 2\varphi + 2(\dot{v}+\dot{\varphi})^3 - 6\dot{L}^2 L^{-2}(\dot{v}+\dot{\varphi}) + \ddot{v} + 2(k_1+1)\dot{L}L^{-1}(\dot{v}+\dot{\varphi}) + (k_1+1)\ddot{v} - k_0\dot{\varphi} - k_1\dot{\varphi} - k_0\varphi_e \tag{14}$$

$$b = -2(\dot{v}+\dot{\varphi})L^{-1}m^{-1} \tag{15}$$

式中的 $\dot{R}_M$ 和 $\ddot{v}$ 项可由轨道动力学得到.

再选取 Lyapunov 函数：

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2}z_2^2 \tag{16}$$

对式(16)求导得到：

$$\dot{V}_2 = \dot{V}_1 + z_2\dot{z}_2 = -k_2 z_1^2 - (k_2 z_1 - a - bT)z_2 \tag{17}$$

由此，只需要真实控制量 T 满足：

$$k_2 z_1 - a - bT = k_3 z_2 \tag{18}$$

其中 k_3 为正的参数，则有

$$\dot{V}_2 = -k_2 z_1^2 - k_3 z_2^2 < 0 \tag{19}$$

系统渐近稳定. 因此可得系统的真实控制律为

$$T = b^{-1}(k_2 z_1 - a - k_3 z_2) \tag{20}$$

式中各变量在上文推导过程中均已给出. 稳定回收的情况下，TSS 的轨道角速度要比绳的摆动快很多，所以控制律不会因为 $b=0$ 而奇异.

3 回收控制率设计

上节得到的张力控制律可以满足 TSS 系绳的摆角收敛到期望值 φ_d. 要实现系绳的回收，即必须满足 $\dot{L}<0$，这一点可以通过设计期望值 φ_d 来实现，分析如下：

综合式(8)和式(9)可以得到：

$$-\ddot{v} + 1.5\mu R_M^{-3}\sin 2\varphi + k_1\dot{\varphi} + k_0\varphi_e + z_1 = 2\dot{L}L^{-1}(\dot{v}+\dot{\varphi}) - z_2 \tag{21}$$

当稳定后，摆角误差 φ_e、中间状态误差 z_1 和中间控制误差 z_2 都收敛到 0，摆角的各阶时间导数也为 0，则可以得到：

$$\dot{L} = (\mu/p^3)^{0.5}(1+e\cos v)(e\sin v + 0.75\sin 2\varphi_d)L \tag{22}$$

由此可见，绳长速率 $\dot{L}$ 主要和目标角度 φ_d 有关，$\dot{L}<0$ 即 TSS 处于回收阶段的充要条件：

$$e\sin v + 0.75\sin 2\varphi_d < 0 \tag{23}$$

式(23)表明，当偏心率很小时，φ_d 的取值范围基本为$(-\pi/2, 0)$，而随着偏心率的增大这一范围不断变小.

重力梯度平衡时，由图 1 易见平衡摆角为 $-\pi/2$，不妨假设子星的轨道高度低于母星，即 φ_d 的取值范围是$(-\pi, 0)$，则回收的速度达到最快的充要条件是 $\sin 2\varphi_d = -1$，即 $\varphi_d = -\pi/4$. 此时式(23)时时满足的条件是 $e<0.75$，这说明上文得到的张力控制律也适用于偏心率较大的椭圆轨道.

在圆轨道情况下，绳长速率简化为

$$\dot{L} = \kappa\omega L \tag{24}$$

这与于韶华在速度距离法[3]中得到的结果相同.

对控制律的分析表明，对收绳速度的控制可以通过改变目标角度 φ_d 来实现，为了使回收过程变得平滑，设计如下的目标角度方案：

$$\varphi_d = \begin{cases} -\pi/4 & L_b < L \leqslant L_i \\ f(L) & L_s \leqslant L \leqslant L_b \\ -\pi/2 & 0 \leqslant L < L_s \end{cases} \tag{25}$$

式中，L_i，L_b 和 L_s 分别为绳的初始长度和过渡过程绳长的上下域值，$f(L)$是一个人为设计的平滑过渡函数，满足：

$$\left.\begin{aligned} f(L_b) &= -\pi/4 \\ f(L_s) &= -\pi/2 \\ \dot{f}(L_b) &= \dot{f}(L_s) = 0 \end{aligned}\right\} \tag{26}$$

式(25)使回收初期，收绳速度达到最快，而当绳长在变得足够小之后，目标角度平滑地由最快速的收绳角度变化到平衡角度，以使绳长稳定. 需要说明的是：前文设计控制律时假定目标角度的导数为 0，而这在过渡过程中并不满足，但是由于该过程只是整个回收过程的一小部分，故影响不大.

另外，如果初始时刻 TSS 处于平衡状态，采用式(25)作为目标角度方案，初始的角度误差 φ_e

比较大,造成中间状态误差 z_1、控制误差 z_2 和时变参数 a 都会比较大.由式(20)可以看出,退步控制律得到的初始张力会是一个比较大的值,即存在一个突变过程,这对于收绳过程是不利的.另外,系绳的张力必须为正,这一点可以通过调节参数来尽量实现,同时,在张力为负值时令其为 0.为此可以将张力控制律修正为

$$T_{\text{ture}}=0.5[T(1-\mathrm{e}^{-kt})+T_{\text{i}}\mathrm{e}^{-kt}]+0.5\mid T(1-\mathrm{e}^{-kt})+T_{\text{i}}\mathrm{e}^{-kt}\mid \quad (27)$$

式中,T_{i} 为初始时刻绳的张力;k 是一个正的常数.由式(27)可见:随着时间的推移,修正后的张力逐步逼近退步控制设计的张力,即控制率的有效性可以得到保证,而延时环节的存在推迟了波峰出现的时间,避免了突变的发生.

4　数值仿真

不防假设 TSS 任务中绳长为 $L=20$ km,(美国航空航天局 NASA 和意大利空间局 ASI 合作研制的绳系卫星系统 TSS1 试验的释放绳长即为 20 km)子星质量 $m=500$ kg.

1) 圆轨道回收过程

图 2 是 TSS 在圆轨道回收操作的仿真结果;其中母星运行的轨道高度为 200 km,各参数分别取为 $k_0=5\times10^{-7}$,$k_1=1\times10^{-3}$,$k_2=k_3=1\times10^{-6}$,$k=1\times10^{-3}$.目标角度方案取为 $L_{\text{i}}=20$ km,$L_{\text{b}}=6$ km,$L_{\text{s}}=3$ km,$f(L)=-\frac{3\pi}{8}+\frac{\pi}{8}\sin\left[\frac{\pi}{3}(L-3)-\frac{\pi}{2}\right]$.

释放初值取为重力梯度平衡状态,由式(4)易得初始张力(即平衡张力)为 $T_{\text{i}}=3m\omega^2L$,ω 为轨道角速度.

为了作图和比较的方便,以下仿真结果按惯例将各变量的单位量归一化:时间为 $1/\omega$,长度为 L,张力为 $m\omega^2L$,角度为弧度.

通过图 2 可以看出,本文给出的控制率在回收时间(大约相当于 3.1 h)上优于文献[3]的结果,而与文献[7]近似.虽然初始阶段的控制力比后者的结果大,(文献[7]的性能函数考虑了能量消耗最优)但是整个过程中摆角的波动比较小,绳长速率的最大值也更小,即回收过程更为平稳.

2) 椭圆轨道上 TSS 的回收过程

图 3 和图 4 是椭圆轨道上 TSS 回收过程的仿真结果.TSS 母星运行的轨道近地点高度均为 200 km,偏心率分别为 0.1 和 0.4.假定回收过程开始于母星运行到近地点处.各控制参数取值及目标角度方案与圆轨道情况相同.根据文献[3],椭圆轨道的 TSS 在垂直方向无法保持平衡,而是保持一个有界的周期运动,常值的平衡张力是不存在的,故将控制率中的初始张力修正为

$$T_{\text{i}}=3mn^2L$$

式中,n 为平均角速度,这个初始张力可以认为是椭圆轨道 TSS 的平均张力.相应的,仿真结果各变量的单位量变成:时间为 $1/n$,长度为 L,张力为 mn^2L,角度为弧度.

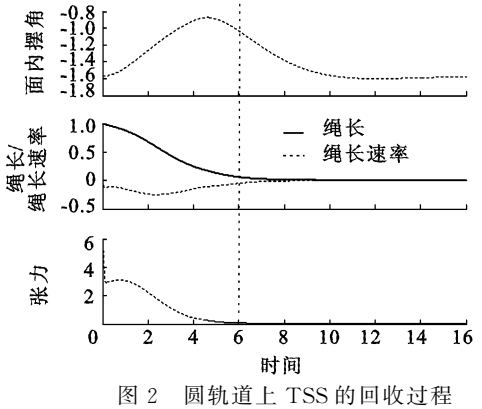


图 2　圆轨道上 TSS 的回收过程

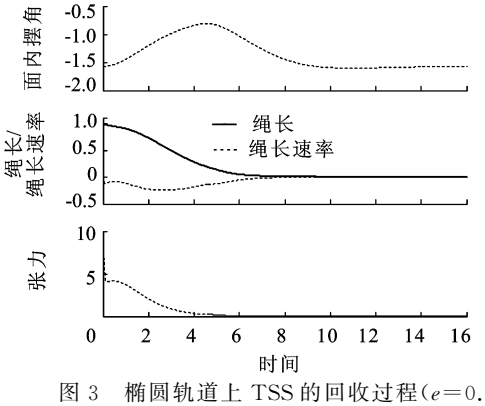


图 3　椭圆轨道上 TSS 的回收过程($e=0.1$)

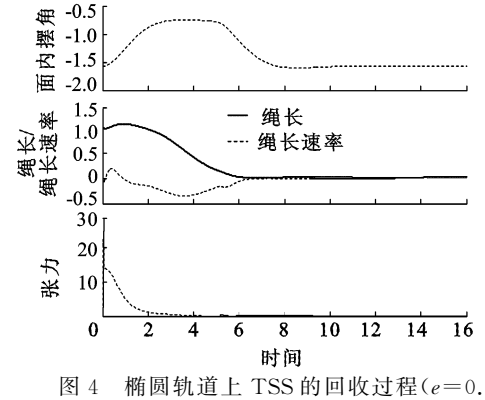


图 4　椭圆轨道上 TSS 的回收过程($e=0.4$)

从仿真结果可以看出,上文得到的张力控制律在小偏心率的椭圆轨道工作得很好,张力波动明显小于文献[3]的结果.对于大偏心率的椭圆轨道,回收过程会出现系绳短暂的释放过程,但是这

对回收时间的影响有限,且整个回收过程中绳长、摆角和张力的变化都比较平滑,退步控制方法得到的控制率具有良好的稳态和动态性能.已有文献中对大偏心率椭圆轨道情况下的TSS研究很少,故可供比较的研究成果也很少,如何避免系绳的释放过程是今后的主要研究内容之一.

5 结 论

仅有系绳张力作用下的TSS控制可以归结为一个欠驱动问题,可以利用退步控制来加以解决.本文利用这种设计方法得到了TSS回收过程的一种张力控制律,该控制律可以将摆角稳定到目标值,通过调节目标角度来控制回收速度.退步控制的设计过程比较灵活,能够将非线性的TSS控制问题最终转化为调节PID参数的问题,从而具有良好的动态和稳态性能.数值仿真结果表明,本文得到的张力控制律在圆轨道和椭圆轨道情况下都能很好地控制TSS的回收过程,对工程应用有一定的参考价值.

参考文献(References)

[1] Cartmell M P, McKenzie D J. A review of space tether research[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2008, 44: 1-21

[2] Kumar K D. Review of dynamics and control of nonelectrodynamic tethered satellite systems[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2006, 43(4): 705-720

[3] 于绍华,刘强,杨林娜.绳系卫星系统二维平面运动和常规动力学[J].宇航学报,2000,21(4):15-24
Yu Shaohua, Liu Qiang, Yang Linna. Regular dynamics of inplanar motion oftethered satellite system[J]. Journal of Astronautics, 2000, 21(4): 15-24(in Chinese)

[4] 黄奕勇,杨乐平.改进的绳系卫星系统距离速率控制律[J].上海航天,2007(3):30-33
Huang Yiyong, Yang Leping. The research on the modified range rate control law for tethered satellite[J]. Aerospace Shanghai, 2007(3): 30-33(in Chinese)

[5] Williams P. Optimal deployment/retrieval of tethered satellites[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2008, 45(2): 324-343

[6] Williams P. Optimal deployment/retrieval of tethered satellites formation spinning in the orbital plane[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2006, 43(3): 638-650

[7] Jin D P, Hu H Y. Optimal control of a tethered subsatellite of threedegrees of freedom[J]. Nonlinear Dynamics, 2006 (46): 161-178

[8] 郑敏捷.退步控制设计方法在航天器姿态控制系统中的应用[D].北京:北京航空航天大学宇航学院,2007
Zheng Minjie. Spacecraft attitude control system design via backstepping control method[D]. Beijing: School of Astronautics, Beijing University of Aeronatics and Astronantics, 2007(in Chinese)

(编 辑:张 嵘)

(上接第21页)

[2] Gao Bo, Fu Yongling, Pei Zhongcai, et al. Research on dual-variable integrated electro-hydrostatic actuator[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2006, 19(1): 77-82

[3] 马纪明,付永领,李军,等.一体化电动静液作动器(EHA)的设计与仿真分析[J].航空学报,2005,26(1):79-83
Ma Jiming, Fu Yongling, Li Jun, et al. Design, simulation and analysis of integrated electrical hydrostatic actuator[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2005, 26(1): 79-83(in Chinese)

[4] Habibi S, Goldenberg A. Design of a new high performance electro-hydraulic actuator[C]// Habibi S. Proceedings of the 1999 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. USA: Pergamon, 1999: 227-232

[5] 王占林.近代液压伺服控制[M].北京:北京航空航天大学出版社,2005: 16-20
Wang Zhanlin. Modern electrical and hydraulic servo control [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2005: 16-20(in Chinese)

[6] Zhu Faguo, Chen Xueyun. Analysis and improvement of the nonlinear tracking-differentiator[J]. Control Theory and Applications, 1999, 16(6): 898-902

[7] Kang Rongjie, Mare J C, Jiao Zongxia. Nonlinear modeling and control design of electro-hydrostatic actuator[C]//Tanaka Y. Proceedings of the 7th JFPS International Symposium on Fluid Power. Japan: JFPS-Press, 2008: 665-670

(编 辑:刘登敏)