

绳系拖曳离轨模型及脉冲喷气控制策略的可行性

刘新建, 郑杰匀

(国防科学技术大学航天科学与工程学院, 长沙 410073)

摘要:在空间绳网的绳系组合体拖曳变轨运动控制中,系绳张力控制策略需要有一套卷扬机构及张力检测控制装置,将增加机构的质量、复杂度和成本,并降低操作可靠性。提出仅利用拖船飞行器上的三轴正交喷嘴控制策略,可同时实现拖曳离轨中的相对运动控制和系统质心的轨道控制,而系绳张力只作为约束,推导了组合体拖曳离轨的三维空间运动动力学模型,给出了一种准霍曼拖曳离轨控制方法,完成了同步轨道废弃目标拖曳离轨方案的初步可行性仿真验证,并给出了拖曳过程的喷气力、燃料消耗量指标,可供空间绳网研究参考。

关键词:空间绳网;绳系组合体;拖曳离轨动力学;脉冲喷气控制

中图分类号:V433

文章标识码:A

文章编号:2096-4080(2017)01-0013-08

Modeling of Tug Deorbit and Feasibility of Pulse Jet Control Strategy for Tether-Combined System

LIU Xin-Jian Zheng Jie-Yun

(College of Astronautical Science and Engineering, National University of Defense Tech., Changsha 410073, China)

Abstract: For the motion control of tug deorbit of a tether combined system of rope net in space, tether tension control needs a set of windlass, tension force measurement and control, which will increase the weight, complexity and cost, and decrease operation reliability. It has been put forward that the 3-axis orthogonal nozzles fixed in tug vehicle can be used to simultaneously realize relative motion control between tug boat and target, and centre-of-mass control of system orbital motion, but tether tension is only restricted, the three dimensional space motion dynamic model of combined system has been deduced, a quasi-Hohmann tug deorbit method has been given and verified to be feasible by numerical simulation with an example of geostationary tug deorbit, and jet force and fuel consumption has been given, which may be referential for the research of space net.

Key words: Space net; Tether combined system; Tug deorbit dynamics; Pulse jet control

0 引言

过去,国内外对绳系卫星的动力学与控制研究较多^[1-12],但近年来,空间绳网成为空间碎片清理领域的一个热门研究方向,如欧空局的 Roger 项目^[14]。绳网展开捕获锁紧目标后,任务星(拖船)、目标与系绳成为了组合体。绳系组合体与绳

系卫星系统的不同之处在于:1)绳系组合体的目标通常是大型空间碎片或者废弃失效卫星,而绳系卫星为合作目标;2)绳系组合体的系绳长度较短,为几十米至上百米,而绳系卫星的系绳长达几十千米;3)绳网碰撞收口空间目标之后,初始状态发生瞬间变化,尤其是绳网锁紧目标连成一体后对任务星的相对角速度是任务星拖曳变轨任

收稿日期:2017-03-18;修订日期:2017-04-21

作者简介:刘新建(1966-),男,博士,主要从事飞行器设计与控制研究。E-mail:lxjxyy@126.com

务主要的初始干扰源,绳系卫星系统的任务主要是释放和回收卫星;4)绳系组合体要求有主动变轨,控制至给定的轨道高度离轨,而变轨力严重影响组合体之间的相对运动,可能导致不允许的碰撞和缠绕现象发生,所以绳系组合体拖曳变轨问题是绳网应用的另一重要研究方向。

绳系组合体的动力学研究主要考虑2维轨道面内的运动,如Liu等^[14]建立了绳系组合体轨道面内运动的2维动力学模型,但3维空间运动动力学模型的研究不足;绳系组合体的控制研究也借鉴绳系卫星,主要开展了轨道面内系绳张力的稳定控制问题,但系绳张力控制策略需要有一套卷扬机构及张力检测控制装置,增加了空间绳网机构的质量、复杂度和成本,并降低了操作可靠性。国内外对绳网组合体拖曳离轨控制的其他研究文献不多,而且对拖曳离轨的能量需求没有给出具体的参考结果。

如果单纯利用拖船飞行器上的三轴正交喷嘴同时实现拖曳离轨中的相对运动控制和系统质心的轨道控制,则非常有意义。本文先建立绳系组合体拖曳离轨运动的空间运动动力学模型,然后给出一种脉冲控制策略及方法,最后以同步轨道碎片清理的拖曳离轨为背景完成仿真算例,探讨能量需求和可行性。

1 绳系组合体拖曳离轨运动的空间运动动力学模型

1.1 系统描述

为研究控制策略,首先需要研究组合体轨道运动与相对质心转动的系统动力学。考虑由目标 S_1 、拖船 S_2 及连接两者的系绳组成的空间绳系离轨系统,如图1所示。作如下基本假设:地球视为均质球体,完全中心引力场;目标和拖船视为集中质点,忽略系绳的质量;系绳不能抗压也不能抗弯,系绳有纵向的弹性和阻尼;只考虑系统面内的轨道转移,由安装在拖船上的推力器实现。

假设系统质心运动的升交点赤经 Ω 、轨道倾角 i 变化忽略不计,沿体坐标系 x_1 轴的推力大小为 F ,相对轨道坐标系的姿态角3-2-1 Euler角俯仰、偏航和滚动角 α 、 β 、 γ 表示。系统的轨道运动用地心距 r 、极角 u 和垂直轨道面的横向位移 z 来描述;描述系统相对运动的参数有:目标和拖船的距离 d 、系绳的面内摆角 θ 、面外摆角 φ 。

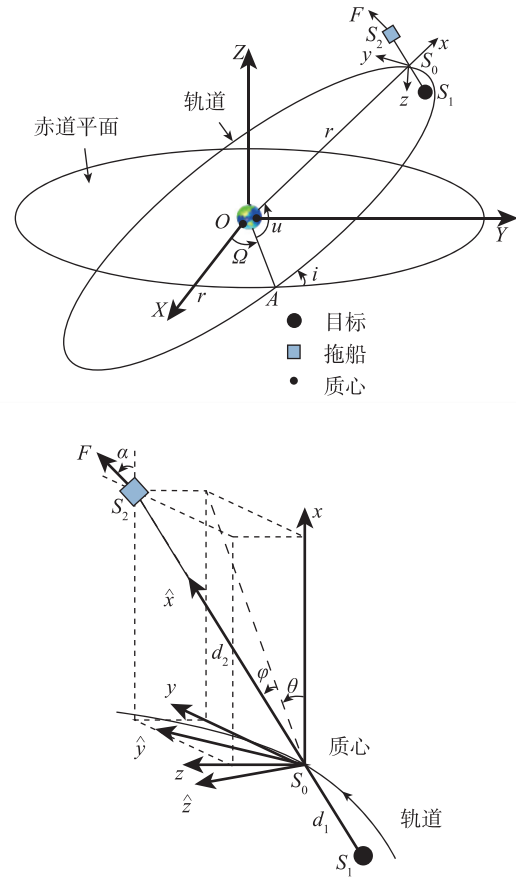


图1 空间绳系组合体离轨系统示意图

引入以下3个坐标系:

1) 地心惯性系 $O-XYZ$, 原点为地心 O , 三轴方向上的单位矢量分别为 \mathbf{I} 、 \mathbf{J} 、 \mathbf{K} , 其中 X 轴指向春分点 r , Z 轴垂直于赤道面指向北极, Y 轴由右手法则确定。

2) 轨道坐标系 S_0-xyz , 原点为系统质心 S_0 , 三轴方向上的单位矢量分别为 \mathbf{i} 、 \mathbf{j} 、 \mathbf{k} , 其中 x 轴由 O 指向 S_0 , y 轴在轨道面内垂直于 x 轴并指向运动方向, z 轴由右手法则确定。

3) 体轴系 $S_0-\hat{x}\hat{y}\hat{z}$, 原点为系统质心 S_0 , 三轴方向上的单位矢量分别为 $\hat{\mathbf{i}}$ 、 $\hat{\mathbf{j}}$ 、 $\hat{\mathbf{k}}$, 其中 \hat{x} 轴由 S_1 指向 S_2 。体轴系是由轨道坐标系先沿 \mathbf{k} 旋转 θ , 后沿 $\hat{\mathbf{j}}$ 旋转 $-\varphi$ 得到。

1.2 动力学方程组

设 S_1 、 S_2 的质量分别为 m_1 、 m_2 , 则系统总质量为 $m = m_1 + m_2$ 。设 S_1 、 S_2 到 S_0 的距离分别为 d_1 、 d_2 , 则

$$d_1 = \eta_2 d, \quad d_2 = \eta_1 d \quad (1)$$

其中, η_1 、 η_2 为质量系数, 且 $\eta_1 = m_1/m$, $\eta_2 = m_2/m$, 设等效质量 $\bar{m} = m_1 m_2 / m$, 则有

$$m_1 d_1^2 + m_2 d_2^2 = \bar{m} d^2, \quad m_1 \dot{d}_1^2 + m_2 \dot{d}_2^2 = \bar{m} \dot{d}^2 \quad (2)$$

设 O 到 S_0 的位置矢量为 \mathbf{r} , 则 $\mathbf{r} = r\mathbf{i}$, S_0 到 S_1 、 S_2 的位置矢量分别为 \mathbf{d}_j ($j = 1, 2$), 则 $\mathbf{d}_1 = -d_1\mathbf{i}$, $\mathbf{d}_2 = d_2\mathbf{i}$, 则由质点系的 Koenig 定理, 系统动能包括随质心平动动能和相对质心转动动能

$$K = \frac{1}{2} m \dot{\mathbf{r}}^2 + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^2 m_j \dot{\mathbf{d}}_j^2 \quad (3)$$

对于平面内的轨道运动, 有

$$\dot{\mathbf{r}} = \dot{r}\mathbf{i} + r\dot{\theta}\mathbf{j} + \dot{z}\mathbf{k} \quad (4)$$

由刚体动力学知, 体轴系的旋转角速度为

$$\begin{aligned} \omega_b &= (\dot{u} + \dot{\theta})\mathbf{k} + (-\dot{\varphi})\mathbf{j} \\ &= \sin\varphi(\dot{u} + \dot{\theta})\mathbf{i} - \dot{\varphi}\mathbf{j} + \cos\varphi(\dot{u} + \dot{\theta})\mathbf{k} \end{aligned} \quad (5)$$

由此 $\dot{\mathbf{d}}_1$ 、 $\dot{\mathbf{d}}_2$ 可表示为

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{d}}_1 &= -\dot{d}_1\mathbf{i} + \omega_b \cdot (-d_1\mathbf{i}) \\ \dot{\mathbf{d}}_2 &= \dot{d}_2\mathbf{i} + \omega_b \cdot d_2\mathbf{i} \end{aligned} \quad (6)$$

综上可得动能表达式为

$$\begin{aligned} K &= \frac{1}{2} m (\dot{r}^2 + r^2 \dot{\theta}^2 + \dot{z}^2) + \frac{1}{2} \bar{m} \dot{d}^2 \\ &[\dot{\varphi}^2 + \cos^2\varphi(\dot{u} + \dot{\theta})^2] + \frac{1}{2} \bar{m} \dot{d}^2 \end{aligned} \quad (7)$$

设地球引力常数为 μ , 相对位置矢量 \mathbf{d}_j 在轨道坐标系的坐标表示为 $\mathbf{d}_j = (x_j, y_j, z_j)^T$, 因为 $|\mathbf{d}_j| = |\mathbf{r}|$, 略去 x_j/r 、 y_j/r 、 z_j/r 的二次以上项, 质点系的引力势能为

$$\begin{aligned} U_g &= -\mu \sum_{j=1}^2 \frac{m_j}{|\mathbf{r} + \mathbf{d}_j|} \\ &\approx -\frac{\mu m}{r} + \frac{\mu}{2r^3} \sum_{j=1}^2 m_j (d_j^2 - 3x_j^2) \end{aligned} \quad (8)$$

由图 1 知 $|x_j| = d_j \cos\theta \cos\varphi$, 并将式 (1) 代入式 (8) 得

$$U_g = -\frac{\mu m}{r} + \frac{\mu \bar{m} d^2}{2r^3} (1 - 3\cos^2\theta \cos^2\varphi) \quad (9)$$

非有势力包括推力矢量 (F , α , β) 和系绳张力 T 。设系绳弹性模量为 E , 截面积为 A , 系绳自然长度为 l , 阻尼比为 ζ , 则弹性系数 $k = EA/l$, 等效阻尼系数 $c = 2\zeta\sqrt{EAm/l}$, 系绳张力 T 为

$$T = \begin{cases} k(d-l) + c(\dot{d}-\dot{l}) & d > l \\ 0 & d \leq l \end{cases} \quad (10)$$

定义广义坐标为 $\mathbf{q} = (r, u, z, d, \theta, \varphi)^T$, 设 Q_r 、 Q_u 、 Q_z 、 Q_d 、 Q_θ 、 Q_φ 分别是与坐标 r 、

u 、 z 、 d 、 θ 和 φ 相对应的广义力, 由虚功法计算广义力, 推导过程详见参考文献 [18], 得

$$\begin{cases} Q_r = F \cos\alpha \cos\beta \\ Q_u = Fr \sin\alpha \cos\beta \\ Q_z = -F \sin\beta \\ Q_d = F \cos\beta \eta_1 (\sin\alpha \sin\theta \cos\varphi + \cos\alpha \cos\theta \cos\varphi) - T \\ Q_\theta = F \cos\beta d \eta_1 (\sin\alpha \cos\theta \cos\varphi - \cos\alpha \sin\theta \cos\varphi) \\ Q_\varphi = -F \cos\beta d \eta_1 (\sin\alpha \sin\theta \sin\varphi + \cos\alpha \cos\theta \sin\varphi) \end{cases} \quad (11)$$

如果用体轴上的三轴喷嘴脉冲开关力来实现组合体的拖曳离轨控制, 则对应轨道坐标系中的轨控开关力分量为 F_x 、 F_y 、 F_z , 上述方程中广义力的相关项只需用

$$\begin{aligned} F \cos\alpha \cos\beta &= F_x \\ F \sin\alpha \cos\beta &= F_y \\ -F \sin\beta &= F_z \end{aligned}$$

替换即可, 显然开关力有正、负、零 3 档。

取 Lagrange 函数为 $L = K - U_g$, 应用第 2 类 Lagrange 方程, 然后舍去 d/r 2 阶以上小量项, 整理得到绳系组合体系统的空间运动方程组

$$\begin{aligned} \ddot{r} - r\dot{\theta}^2 + \frac{\mu}{r^2} &= \frac{Q_r}{m} \\ \ddot{u} + \frac{2r\dot{u}}{r} &= \frac{Q_u}{mr^2} \\ \ddot{z} &= \frac{Q_z}{m} \\ \ddot{d} - d[(\dot{\varphi}^2 + (\dot{u} + \dot{\theta})^2 \cos^2\varphi + \frac{\mu}{r^3} (3\cos^2\theta \cos^2\varphi - 1))] &= \frac{Q_d}{m} \\ \ddot{\theta} - \frac{2r\dot{\theta}}{r} + 2(\dot{u} + \dot{\theta}) \left(\frac{\dot{d}}{d} - \dot{\varphi} \tan\varphi \right) + \frac{3\mu}{r^3} \sin\theta \cos\theta &= \frac{Q_\theta}{md^2 \cos^2\varphi} - \frac{Q_u}{mr^2} \\ \ddot{\varphi} + 2\dot{\varphi} \frac{\dot{d}}{d} + \left((\dot{u} + \dot{\theta})^2 + \frac{3\mu}{r^3} \cos^2\theta \right) \sin\varphi \cos\varphi &= \frac{Q_\varphi}{md^2} \end{aligned} \quad (12)$$

式中, 前 3 个方程描述的是系统质心的轨道运动, 后 3 个方程描述的是系统相对运动, 显然为非线性方程组。

2 绳系拖曳离轨的控制策略

2.1 拖曳变轨的安全约束

针对拖曳离轨过程防碰撞、防断裂、防缠绕要求,需要设定基本的安全约束。

1) 防碰撞:整个离轨过程目标和拖船不得小于某个安全距离限,如图2中的 L_0 。

组合体拖曳变轨过程中,通过安装在拖船飞行器上的相对测量设备(如雷达)保持对目标的连续跟踪观测,以获取目标的相对飞行状态。

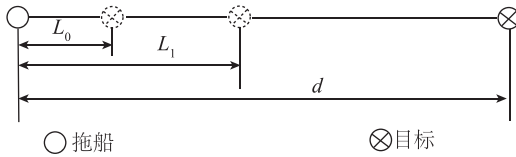


图2 防碰撞约束示意图

2) 防绷断:要求系绳张力不超过可承受的最大拉力。

3) 防缠绕:当系绳处于松弛状态时,由于目标自身无动力,不能进行轨道控制,可能出现系绳与目标发生缠绕的现象,为此拖船要根据目标的相对飞行状态,进行相对转动控制,防系绳缠绕。

2.2 拖曳变轨策略及方法

以同步轨道空间碎片清理为例,研究将其包裹收口后拖曳到高于同步轨道300km高度的坟墓轨道,然后切断系留绳离轨的准霍曼变轨控制策略。

变轨过程如图3所示:绳系组合体在地球静止轨道 C_1 的A点产生速度冲量 Δv_1 ,转移到椭圆轨道E,它的近地点是A点,经过半个椭圆轨道周期,在椭圆的远地点B点产生速度冲量 Δv_2 ,使组合体满足进入坟墓轨道 C_2 的状态要求。

根据轨道动力学理论得到总的所需特征速度增量为

$$\Delta v_{\Sigma} = \sqrt{\frac{\mu}{r_1}} \left(\sqrt{\frac{2r_2}{r_1+r_2}} - 1 + \sqrt{\frac{r_1}{r_2}} - \sqrt{\frac{2r_1^2}{r_2(r_1+r_2)}} \right) \quad (13)$$

其中, μ 为地球引力常数, r_1 、 r_2 分别为静止轨道 C_1 、坟墓轨道 C_2 的半径。

假设 $r_1 = 42164\text{km}$, $r_2 = (42164 + 300)\text{km}$,计算得所需霍曼脉冲变轨的特征速度增量仅为 $\Delta v_{\Sigma} = 10.9\text{m/s}$,但绳系组合体同步轨道准霍曼拖曳至300km坟墓轨道远没有霍曼变轨双脉冲简单,因为拖曳防碰撞和防缠绕产生的喷气力会使最终

的轨道为小偏心率椭圆轨道,大致过程如下:

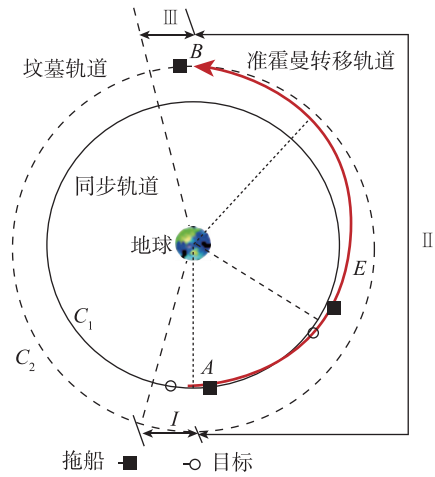


图3 基于霍曼变轨拖曳控制策略的3个阶段

第I阶段:前期加速段,当绳网抓捕处于同步轨道的废弃目标后(假设处于近地点),拖船需要运动至同步轨道的V-bar方向,即将面内摆角控制在与地心矢径垂直的 90° 附近。如图3所示,面外摆角在0附近,然后对初始面内摆动角速度进行限制,期间喷气力也需控制相对运动,防碰撞、防缠绕,稳定后再施加切向脉冲推力,以提升组合体质心轨道的远地点高度,满足要求后停止加速。

第II阶段:准霍曼自由转移阶段,完成约12小时轨道转移,期间喷气力只进行相对运动控制,避免碰撞和缠绕。

第III阶段:离轨阶段,拖船运动至远地点,再次施加切向力,提升近地点高度,当满足要求后关闭喷嘴,并切断系绳使废弃目标进入坟墓轨道,完成离轨。期间除进行轨道控制之外,也需要进行相对运动的防碰撞、防缠绕控制。第III阶段与第I阶段的控制过程是相似的。

2.2.1 变结构解耦控制律

假设任务星上有3对控轨喷嘴,沿体坐标系安装,相对运动的状态向量为 $\boldsymbol{p} = [d \ \theta \ \varphi]^T$,期望至 $\boldsymbol{p}^* = [l_c \ \theta_c \ \varphi_c]^T$, l_c 为安全距离,面外摆角指令显然为 $\varphi_c = 0$,面内摆角指令使 $\theta_c = \pi/2$ (希望组合体与目标的连线垂直地心矢径)

相对状态期望速率 $\dot{\boldsymbol{p}}^* = [0 \ 0 \ 0]^T$,误差及其微分的向量为 $\boldsymbol{e} = \boldsymbol{p} - \boldsymbol{p}^*$, $\dot{\boldsymbol{e}} = \dot{\boldsymbol{p}} - \dot{\boldsymbol{p}}^*$

变结构函数 $\boldsymbol{s} = \dot{\boldsymbol{e}} + \lambda \boldsymbol{e}$,采用趋近律达到条件,选取指数趋近律:

$$\dot{\boldsymbol{s}} = -\boldsymbol{\varepsilon} \cdot \text{sgns} - k\boldsymbol{s} \quad (14)$$

则含非线性解耦的相对运动变结构控制律为

$$f_c = -A_1 \boldsymbol{p} - A_2 \dot{\boldsymbol{p}} - (\lambda + \boldsymbol{k}) \dot{\boldsymbol{e}} - \boldsymbol{k} \lambda \boldsymbol{e} - \boldsymbol{\varepsilon} \cdot \text{sgns} \quad (15)$$

其中, $\boldsymbol{\varepsilon}$ 、 $\boldsymbol{\lambda}$ 、 \boldsymbol{k} 均为 3×3 正定对角阵, A_1 、 A_2 是与相对运动方程中对应的非线性补偿解耦项。

为节省燃料, 假设开关极限环阈值参数设置稍大点, 为 $\delta_d = 5$, $\delta_\theta = 2^\circ$, $\delta_\varphi = 2^\circ$

2.2.2 增设缓冲环节

仿真发现, 由于凯芙拉系绳虽然只有很小的直径 (如 2mm), 但材料的弹性模量为 120Gpa, 为增强拖曳开关控制稳定性, 需要在拖船任务星与系留绳的连接处串接一缓冲软弹簧, 以降低系绳张紧的连接刚度, 即拖船脉冲喷气力由缓冲弹簧再传递到系绳拉动目标。

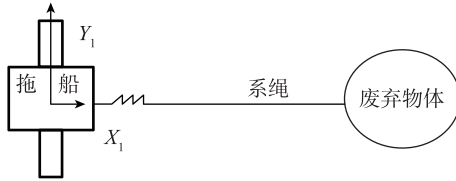


图 4 增设缓冲连接弹簧图

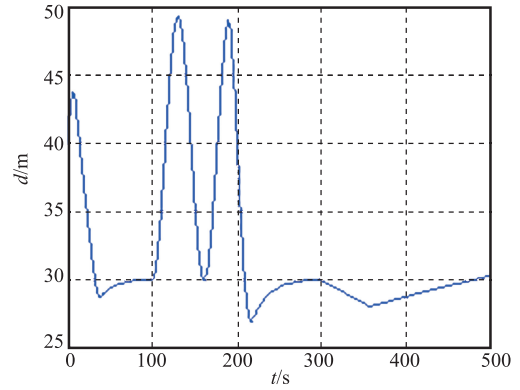
3 数值仿真验证与分析

以欧空局 Roger 为例, 假设拖船飞行器质量为 2000kg, 失效目标质量为 1000kg, 拖船沿 V-bar 逼近, 展开绳网包裹目标, 从 GEO 拖曳至 TGSO (坟墓轨道) 离轨。喷气开关推力 $F = 100\text{N}$, 系绳总长度为 100m, 安全接近距离为 30m 左右或不低于 25m, 绳网收口后的初始相对状态为: $d_0 = 40\text{m}$, $\dot{d}_0 = 1\text{m/s}$, $\theta_0 = 85^\circ$, $\varphi = 3^\circ$, $\dot{\varphi} = 3^\circ/\text{s}$, $\dot{\theta}_0 = 3^\circ/\text{s}$, $r_0 = 4.2164 \times 10^7(\text{m})$, $\dot{u}_0 = 7.292 \times 10^{-5}(\text{rad/s})$, $z_0 = 0$ 。

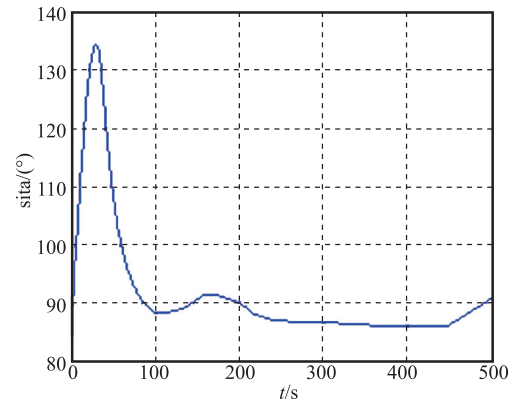
具体控制流程: 绳网收口后 100s 内抑制初始干扰引起的相对运动, 即相对接近速度为 0, 相对距离为 30m; 面内角度为 90° , 相对角速度为 0。100s~190s, 沿切向加速, 完成系统霍曼转移的第一个速度增量, 以提升远地点高度大于 300km。190s~400s, 为变结构开关控制, 再次抑制切向加速对相对运动的干扰, 之后进入准霍曼椭圆自由转移阶段, 12h 之后的某个时刻进行切向加速, 提升近地点高度, 当距离同步轨道 300km 后, 切断系绳。仿真结果如下。

第 I 阶段如图 5 所示, 图 6 和图 7 中的各小图给出了全程 3 阶段约 12h 仿真结果。

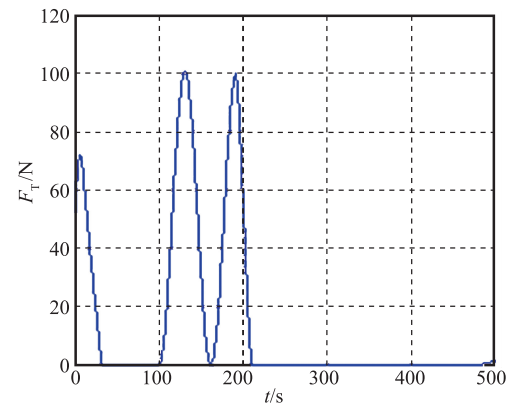
图 5 (a) 和 (b) 给出了第 I 阶段相对运动控



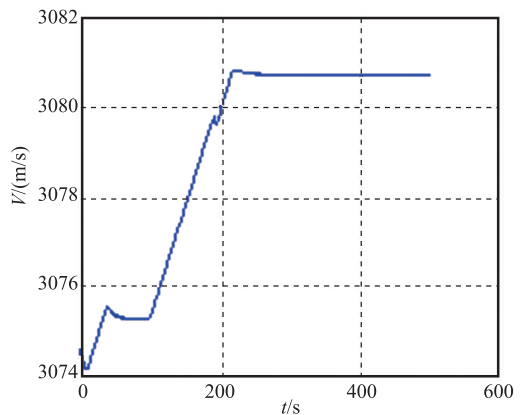
(a) 相对距离响应



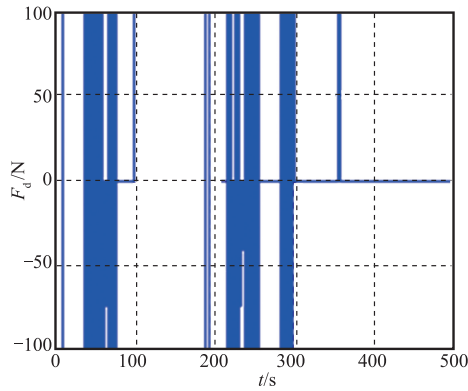
(b) 相对摆角



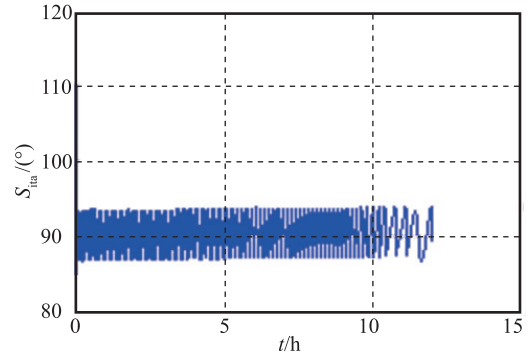
(c) 系绳张力



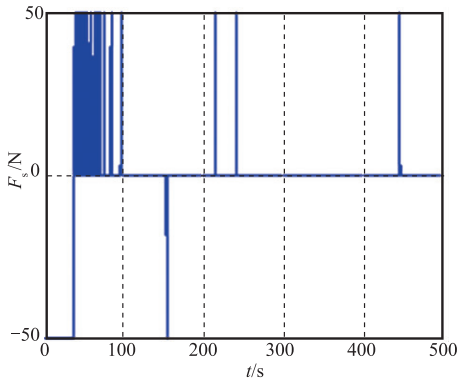
(d) 轨道速度改变



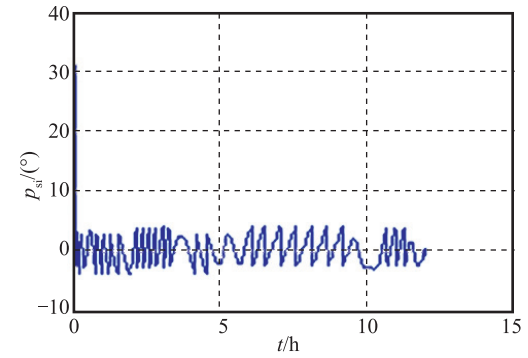
(e) 轴向喷气力开关曲线



(b) 面内摆角曲线

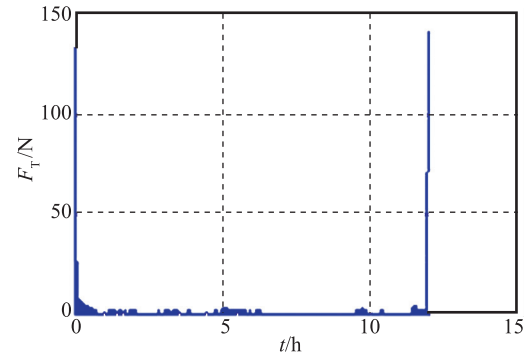


(f) 切向喷气力开关曲线

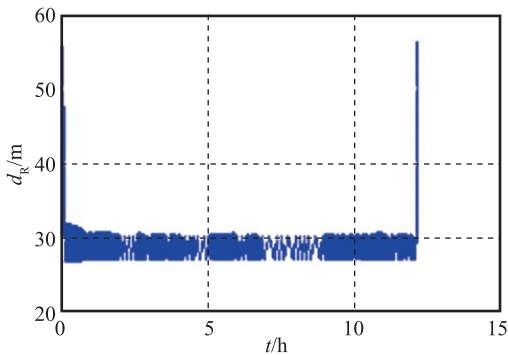


(c) 面外摆角曲线

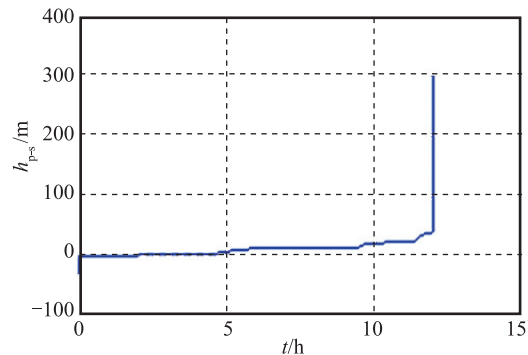
图5 同步轨道间断喷气霍曼拖曳变轨的第I阶段仿真制仿真结果，安全距离实现了30m的保持，面内摆角稳定在90°，抑制了较大初始速度 $\dot{d} = 1\text{m/s}$ 、 $\dot{\theta} = 3(^{\circ})/\text{s}$ 的干扰，在50s之内就实现了相对运动的期望状态。图5(a)中100s~190s为切向加速阶段，图5(c)系绳张力变化，小于100N。图5(d)表示加速90s，系统质心切向速度增量为5.7m/s，实现了霍曼第一阶段的加速，图5(e)和(f)给出了控制相对距离和霍曼第一次脉冲加速的轴向力和控制面内摆角的切向力开关控制过程。



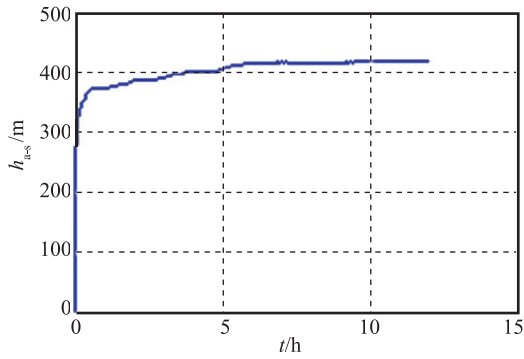
(d) 系绳张力曲线



(a) 相对距离曲线



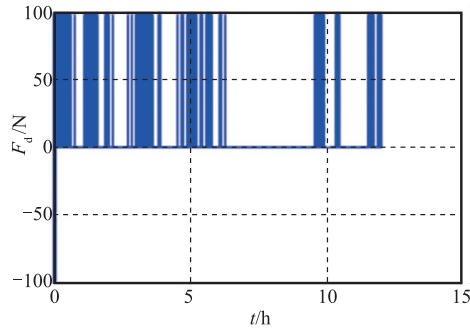
(e) 距离同步轨道的近地点高度变化曲线



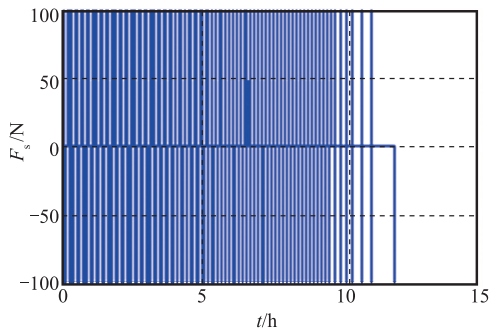
(f) 距离同步轨道的远地点高度变化曲线

图 6 同步轨道霍曼拖曳变轨全程仿真

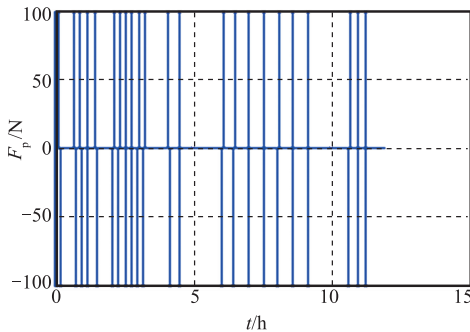
图 6 中表明，实现了近地点离同步轨道 300km，远地点离同步轨道 419km 的拖曳离轨控制，总的燃料只要 22kg 左右，面内摆角、面外摆角、相对距离均在期望值附近来回稳定小幅振荡，系绳张力小于 150N。图 7 为三轴喷气力和燃料消耗曲线。



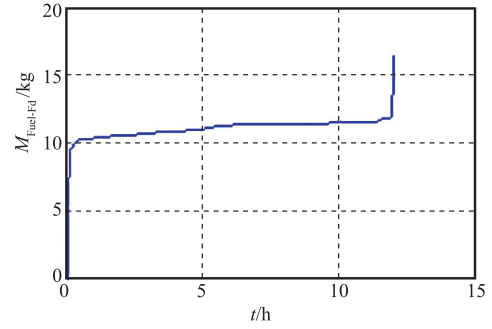
(a) 轴向防碰撞与变轨喷气力曲线



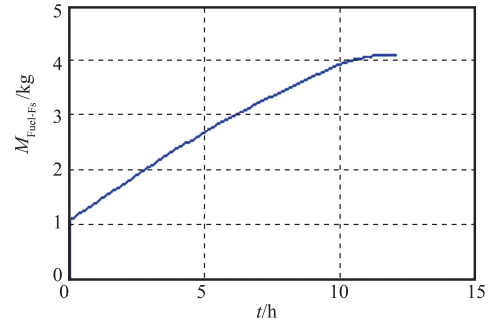
(b) 面内摆角抑制喷气力曲线



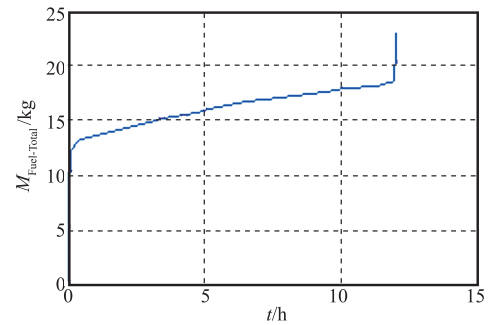
(c) 面外摆角抑制喷气力曲线



(d) 防碰撞与离轨燃料消耗曲线



(e) 面外摆角抑制燃料消耗曲线



(f) 总燃料消耗量变化曲线

图 7 同步轨道脉冲间断喷气全程约 12h 的拖曳变轨过程曲线

总的燃料消耗为 22kg，具体组成为：第 I 阶段消除初始相对状态误差的轴向防碰撞燃料为 7.5kg，防缠绕面内摆角控制燃料为 1.2kg，面外摆角控制燃料为 1.2kg，将近 10kg，占全过程的一半，所以初始状态误差的影响较大；第 II 阶段，主要为拖曳控制，防碰撞燃料为 4kg，面内防缠绕控制为 3.0kg，面外摆角控制为 0.6kg；第 III 阶段，防碰撞燃料为 4.5kg，面内防缠绕为 0.05kg，面外摆角控制为 0.01kg。

由仿真算例可以看出，准霍曼拖曳离轨过程是稳定可控的，50%的燃料消耗量约 11kg 用于拖曳过程的防碰撞、防缠绕控制。但如果喷气力较小，只有 50N，数值仿真是不稳定，所以脉冲喷气拖曳控制稳定的必要条件是喷气力不能过小，具体与绳系组合体的质量、初始扰动有关，可经数

值仿真确定。

4 总结

推导了空间绳网应用中绳系组合体的拖曳离轨空间运动动力学模型,提出了准霍曼拖曳离轨的脉冲控制策略和方法,给出了拖曳非线性系统稳定控制的措施(增设缓冲弹簧及保证足够的喷气力)和同步轨道拖曳离轨的燃料消耗量,各控制参数由数值仿真决定。

参考文献

- [1] Cartmell M D, McKenzie D J. A review of space tether research [J]. *Progress in Astronautical Sciences*, 2008, 44 (1): 1-21.
- [2] Heinen G, Smith F, Santangelo A, et al. An orbit transfer vehicle utilizing an electrodynamic tether [J]. *Astronautical Sciences Meeting & Exhibit*, 2000, 6 (64): 75-77.
- [3] Kmnar K, Pradeep S. Strategies for three dimensional deployment of tethered satellites [J]. *Mechanics Research Communications*, 1998, 25 (5): 543-550.
- [4] Steindl A, Troger H. Optimal Control of Deployment of a Tethered Subsatellite [J]. *Nonlinear Dynamics*, 2003, 31 (3): 257-274.
- [5] 王维. 绳系卫星的动力学与控制 [D]. 北京: 清华大学, 2009.
- [6] 文浩. 绳系卫星释放和回收的动力学控制 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008.
- [7] 朱仁璋. 速率控制下的空间系绳的伸展 [J]. *中国空间科学技术*, 1991, 11 (4): 50-55.
- [8] 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, 24 (3): 30-33.
- [9] 顾晓勤. 圆及椭圆轨道释放绳系子星的方法研究 [J]. *空间科学学报*, 2002, 22 (3): 282-288.
- [10] 顾晓勤. 绳系卫星释放及工作态动力学分析 [J]. *空间科学学报*, 2002, 22 (2): 154-162.
- [11] 崔乃刚, 刘墩. 基于椭圆轨道的绳系卫星伸展及释放过程仿真研究 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 1996, 28 (4): 117-122.
- [12] 于绍华. 空间系留卫星系统动力学与控制 [J]. *宇航学报*, 1992, 13 (2): 87-94.
- [13] ROGER-Team. RObotic GEostationary Orbit Restorer ROGER Phase A Executive Summary. 2003, 10.
- [14] Liu H T, Yang L P. An investigation on tether-tugging de-orbit of geostationary satellites [J]. *Science China Technology*, 2012, 55 (7): 2019-2027.
- [15] 王道吉. 绳网展开动力学与拖曳变轨研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2012.
- [16] 刘新建, 刘海涛, 王道吉. 绳网展开动力学研究报告 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2012.
- [17] 刘新建, 郑杰匀. 绳网组合体拖曳变轨动力学与控制研究报告 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2014.