

# 气动阻力作用下电动力绳系动力学及控制研究

张 健<sup>1</sup>, 王 峰<sup>1,2</sup>, 李化义<sup>1,2</sup>, 孙兆伟<sup>1,2</sup>

(1. 哈尔滨工业大学卫星技术研究所, 哈尔滨 150001; 2. 小卫星技术国家地方联合工程研究中心, 长春 130033)

**摘 要:** 针对电动力绳系轨道机动控制与系绳稳定控制互相耦合的问题, 提出通过结构设计使二者解耦控制的方法。采用多段系绳结构, 通过调节不同段系绳中电流的大小和方向, 使轨道机动和系绳稳定实现独立控制。分析气动阻力作用下的系绳运动规律, 设计控制器来调节系绳中的电流以抑制系绳通电时产生的偏心力矩和初始扰动所引起的系绳天平动。最后进行了仿真研究, 结果表明: 气动阻力作用下惯性系绳以初始扰动为幅值在平衡位置作等幅振荡; 和传统单段系绳结构相比, 基于多段系绳结构设计的控制器能够以较小的电流实现系绳的稳定控制。

**关键词:** 电动力绳系; 气动阻力; 稳定控制; 多段系绳结构

中图分类号: V448.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1328(2014)03-0291-07

DOI: 10.3873/j.issn.1000-1328.2014.03.007

## Research on Dynamics and Control of Electrodynamic Tether under Aerodynamic Drag

ZHANG Jian<sup>1</sup>, WANG Feng<sup>1,2</sup>, LI Hua-yi<sup>1,2</sup>, SUN Zhao-wei<sup>1,2</sup>

(1. Research Center of Satellite Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. National & Local United Engineer Research Center of Satellite Technology, Changchun 130033, China)

**Abstract:** To realize orbit maneuver and suppress the libration independently of the electrodynamic tether through modulating the tether current, multi-segment structure is designed. The libration of the tether is analyzed in the presence of the aerodynamic drag, and the controllers are designed to suppress the libration caused by the eccentric moment and the initial disturbance. At last, the simulations are done to verify performance of the controllers. The results show that the tether under the aerodynamic drag is marginally stable; and the controller based on the multi-segment structure could accomplish the stability of the tether by use of a small current.

**Key words:** Electrodynamic tether; Aerodynamic drag; stability control; Multi-segment structure

### 0 引 言

随着近年来空间垃圾的不断积累, 对在轨运行的航天器, 尤其是像国际空间站这样的大型结构, 产生了很大的威胁。靠气动阻力使空间垃圾自然衰减需要较长的时间, 而通过喷气推进来清除空间垃圾需要消耗大量的推进剂, 因此不适合用于大规模地清除空间垃圾<sup>[1]</sup>。电动力绳系作为最有发展前景的推进技术之一, 通过带电系绳和空间磁场的相互作用, 产生作用力来实现无需消耗推进剂的离轨和

推进<sup>[2]</sup>, 可用于大规模地清除空间垃圾<sup>[3]</sup>。

针对通电和不通电情况下系绳的运动规律及其稳定控制算法, 文献中进行了大量的研究。文献[4]中研究了惯性系绳的周期解, 以及其稳定性与轨道偏心率的关系。文献[5]研究了气动阻力作用下惯性系绳的运动, 结果表明气动阻力在研究系绳稳定时是不可忽略的。文献[6-7]采用解析和数值方法针对倾斜圆轨道上带常值电流的电动力绳系的运动进行分析, 得到系统运动的不稳定周期解。文献[8]提出了针对绝缘系绳和裸露系绳两种情况

下通过合理安排两端子星质量使系绳始终保持自平衡的设计方法,这种设计需要两端子星质量满足特定的关系,不具有普适性。文献[9]在考虑系绳运动情况下,采用配点法实现轨道转移和系绳天平动的同时控制,但需要经过大量的计算来获得最优解。文献[10]通过调节绳长来阻尼面内和面外运动,结果表明只需要改变绳长的 10% 就能实现面内和面外运动的阻尼。这种控制策略需要设计专门的系绳长度的调节机构,且受到系绳中允许最大拉力的限制。文献[11]通过设计控制器中的阻尼系数,调节串联在系统中的电阻来改变感应电动势产生的电流,从而使系绳在不同的平衡位置之间实现转移,但不能实现轨道和姿态的解耦。文献[12]针对系绳的非线性动力学模型,设计了主动姿态控制和基于系绳张力的振动控制结合的方法,实现了系绳的回转和振动抑制。上述文献中都采用传统的单段系绳结构,系绳中电流方向单一,控制系绳稳定的能力有限,且不能实现轨道机动和系绳稳定控制的解耦。

本文采用多段系绳的电动力绳系结构,分析气动阻力作用下系绳的运动规律,并分别针对由于通电系绳两端质量偏差产生的安培力偏心力矩和初始扰动引起的面内和面外运动设计控制算法来实现系绳稳定。

## 1 动力学建模

### 1.1 地磁场模型

首先建立轨道面坐标系  $Oe_r e_t e_n$ , 原点  $O$  为系统质心,  $e_r$  方向为由地心指向质心的方向,  $e_n$  方向为垂直于轨道面的方向,  $e_t$  垂直于  $e_r, e_n$  构成右手系。此处地磁场模型采用非倾斜偶极子模型,即假设地磁场为一偶极子,且偶极子的极轴与地球转轴重合,且不会随着地球的旋转而旋转,则地磁场可表示为:

$$\mathbf{B} = \frac{\gamma_m}{r^3} [-2\sin(\omega + \theta)\sin i e_r] + \frac{\gamma_m}{r^3} [\cos(\omega + \theta)\sin i e_t + \cos i e_n] \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{B} = [B_r, B_t, B_n]^T$ ,  $\omega, \theta, i$  分别为近心点角距,真近点角和轨道倾角,  $r$  为轨道半径,  $\gamma_m$  为地磁场极距为  $\gamma_m = 8 \times 10^6 \text{ T} \cdot \text{km}^3$ 。

### 1.2 电动力绳系动力学建模

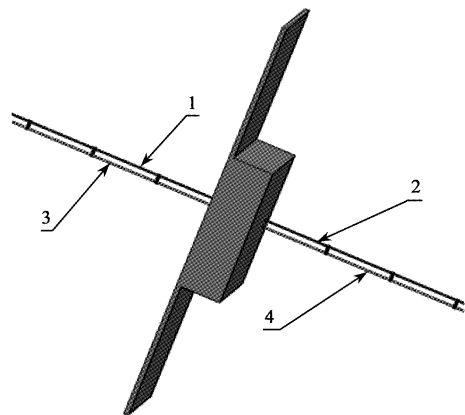
在传统的系绳结构中,当需要实现轨道机动和

系统稳定同时控制时,由于通电系绳运动不存在一个稳定的平衡位置,而是一个周期解,且在轨道机动过程中电流大小不断变化,要实现通过调节单根系绳中的电流来实现轨道机动和姿态稳定的同时控制比较困难。可行的途径就是把这两种控制分解开来,单独实现控制。为解决这一问题,除文献[8]中提到的系统自平衡设计和文献[10]中通过系绳张力来控制稳定,此处参考 STAR and TAI 公司设计的 EDDE 的结构思想<sup>[13]</sup>,设计如图 1 所示的悬挂式多段系绳结构:系统由两端质量较大的卫星和中间质量较小卫星组成,并由四段绝缘导电系绳连接,每个卫星都有电子发射和电子吸收的装置,可以实现每段系绳中电流的双向流动。

为了实现两种控制的分离,此处假设四段系绳中的通电电流方向和大小为:1-2 中电流大小相等,方向相同;3-4 中电流大小相等,方向相反,则 1-2 段电流既能提供力,也能提供力矩,可用于稳定系绳姿态运动和轨道机动控制;3-4 段电流只提供力矩,不提供力,只能用于稳定系绳姿态运动。



(a) 多段系绳电动力绳系结构剖面图



(b) 中间部分放大图

图 1 电动力绳系多段结构示意图

Fig. 1 Multi-segment structure of the electrodynamic tether

为建立系统运动的动力学模型,作如下假设<sup>[14]</sup>:1. 系绳假设为刚性杆,且指向相同;2. 质心运动轨道为不变的圆轨道;3. 地磁场为非倾斜偶极子;4. 系绳为绝缘导线,沿系绳方向电流相同。则电动力绳系卫星系统的模型如图 2 所示。

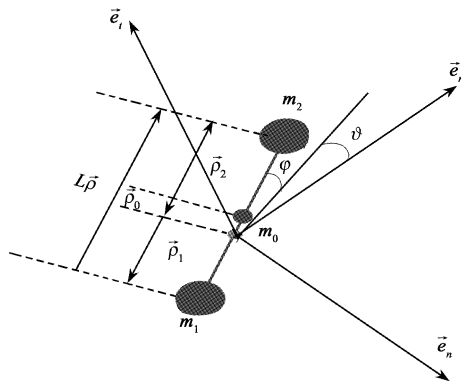


图2 系统刚性杆模型示意图  
Fig.2 The rigid rod model

由拉格朗日方程可得系统的运动方程为:

$$\begin{cases} \cos^2\varphi(\ddot{\vartheta} + \ddot{\theta}) - 2\sin\varphi\cos\varphi\dot{\varphi}(\dot{\vartheta} + \dot{\theta}) + \\ 3\omega_0^2\sin\vartheta\cos\vartheta\cos^2\varphi = \frac{Q_\vartheta}{u_e L^2} \\ \ddot{\varphi} + \sin\varphi\cos\varphi((\dot{\vartheta} + \dot{\theta}) + 3\omega_0^2\cos^2\vartheta) = \frac{Q_\varphi}{u_e L^2} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $\vartheta$  为轨道面内振动角,  $\varphi$  为轨道面外振动角,  $\omega_0$  为系统质心所在圆轨道的轨道角速度,  $L$  为绳长,  $m_s = m_1 + m_2 + m_t + m_0, M_1 = m_1 + \frac{m_t + m_0}{2}, M_2 = m_2 + \frac{m_t + m_0}{2}, u_e$  为系统的约减质量, 为:

$$\begin{cases} Q_{\vartheta a} = \frac{L\rho_{acom}v^2\cos\vartheta\cos\varphi}{2m_s} \left[ M_1M_2 \left( B_1^* e^{\frac{M_2L\cos\vartheta\cos\varphi}{m_s H}} - B_2^* e^{-\frac{M_1L\cos\vartheta\cos\varphi}{m_s H}} \right) - \frac{m_0(m_1 - m_2)}{2} B_0^* e^{-\frac{(m_1 - m_2)L\cos\vartheta\cos\varphi}{2m_s H}} \right] - \\ C\cos\vartheta\cos\varphi \left[ e^{\frac{M_2L}{m_s H}\cos\vartheta\cos\varphi} \left( 1 - \frac{M_2L}{m_s H}\cos\vartheta\cos\varphi \right) - e^{-\frac{M_1L}{m_s H}\cos\vartheta\cos\varphi} \left( 1 + \frac{M_1L}{m_s H}\cos\vartheta\cos\varphi \right) \right] \\ Q_{\varphi a} = \frac{L\rho_{acom}v^2\sin\vartheta\sin\varphi}{2m_s} \left[ M_1M_2 \left( -B_1^* e^{\frac{M_2L\cos\vartheta\cos\varphi}{m_s H}} + B_2^* e^{-\frac{M_1L\cos\vartheta\cos\varphi}{m_s H}} \right) + \frac{m_0(m_1 - m_2)}{2} B_0^* e^{-\frac{(m_1 - m_2)L\cos\vartheta\cos\varphi}{2m_s H}} \right] + \\ C\sin\vartheta\sin\varphi \left[ e^{\frac{M_2L}{m_s H}\cos\vartheta\cos\varphi} \left( 1 - \frac{M_2L\cos\vartheta\cos\varphi}{m_s H} \right) - e^{-\frac{M_1L\cos\vartheta\cos\varphi}{m_s H}} \left( 1 + \frac{M_1L}{m_s H}\cos\vartheta\cos\varphi \right) \right] \end{cases} \quad (7)$$

## 2 气动阻力作用下初始扰动引起的天平动分析

电力绳系在无外力和电流作用时, 保持在平衡位置, 但受到初始扰动作用时将偏离平衡位置。为求解系统中无电流通过时的运动平衡位置, 把平衡条件  $\ddot{\vartheta} = \dot{\vartheta} = \ddot{\varphi} = \dot{\varphi} = 0$  代入运动方程(2), 则可得平衡位置满足的条件为:

$$u_e = \frac{m_1M_2^2}{m_s^2} + \frac{m_2M_1^2}{m_s^2} + \frac{m_0(M_1 - M_2)^2}{4m_s^2} + \frac{m_t(M_1^2 + M_2^2)}{3m_s^3} \quad (3)$$

$Q_\vartheta, Q_\varphi$  分别为  $\vartheta, \varphi$  对应的广义力, 包括三部分: 由 1-2 段系绳的安培力产生的广义力, 由 3-4 段系绳的安培力矩产生的广义力以及气动阻力产生的广义力, 即有:

$$\begin{aligned} Q_\vartheta &= Q_{\vartheta e12} + Q_{\vartheta e34} + Q_{\vartheta a} \\ Q_\varphi &= Q_{\varphi e12} + Q_{\varphi e34} + Q_{\varphi a} \end{aligned} \quad (4)$$

式(4)中各广义力的表达式如式(5)、(6)、(7)所示:

$$\begin{cases} Q_{\vartheta e12} = \frac{I_{12}L^2(m_1 - m_2)}{2m_s} (\cos\vartheta\sin\varphi\cos\varphi B_r) + \\ \frac{I_{12}L^2(m_1 - m_2)}{2m_s} \sin\vartheta\sin\varphi\cos\varphi B_t - \\ \frac{I_{12}L^2(m_1 - m_2)}{2m_s} \cos^2\varphi B_n \\ Q_{\varphi e12} = \frac{I_{12}L^2(m_1 - m_2)}{2m_s} (-\sin\vartheta B_r + \cos\vartheta B_t) \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} Q_{\vartheta e34} = \frac{I_{34}L^2}{2} \cos\vartheta\cos\varphi\sin\varphi B_r + \\ \frac{I_{34}L^2}{2} \sin\vartheta\cos\varphi\sin\varphi B_t - \frac{I_{34}L^2}{2} \cos^2\varphi B_n \\ Q_{\varphi e34} = \frac{I_{34}L^2}{2} (-\sin\vartheta B_r + \cos\vartheta B_t) \end{cases} \quad (6)$$

$$3\omega_0^2\sin\vartheta\cos\vartheta\cos^2\varphi = \frac{Q_{\vartheta a}}{u_e L^2}$$

$$\omega_0^2(1 + 3\cos^2\vartheta)\sin\varphi\cos\varphi = \frac{Q_{\varphi a}}{u_e L^2} \quad (8)$$

由式(8)易得  $\vartheta = \vartheta_e; \varphi = 0$  是系统的一个平衡点, 则面内运动的平衡条件变为:

$$3u_e L^2 \omega_0^2 \sin\vartheta_e = Q_{\vartheta a} \quad (9)$$

用牛顿迭代法可求得式(9),从而得到面内平衡位置。由于系绳较长,则两端点卫星的重力梯度产生的恢复力矩较大,且气动阻力作用较弱,可知面内的平衡位置相对于当地垂线的偏差为小量,由后续的仿真结果可知当轨道高度大于200 km时,有 $\vartheta_e < 1^\circ$ ,并且随着轨道高度的增加,平衡点趋于0,可令 $\sin\vartheta_e \approx \vartheta_e$ ;  $\cos\vartheta_e \approx 1$ ,则可得小角度近似下的动力学方程:

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -3\omega_0^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -4\omega_0^2 & 0 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{x} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{Q_{\theta a}}{u_e L^2} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中:  $\mathbf{x} = [\vartheta; \varphi; \dot{\vartheta}; \dot{\varphi}]$ ,把式(9)代入式(10)可得面内和面外角的运动规律为:

$$\begin{aligned} \vartheta &= \vartheta_e + A_0 \sin(\sqrt{3}\omega_0 t + \vartheta_0) \\ \varphi &= B_0 \sin(2\omega_0 t + \varphi_0) \end{aligned} \quad (11)$$

式中:  $A_0, B_0$  分别为面内和面外的初始扰动幅角,  $\vartheta_0, \varphi_0$  为初始的相位角。则由式(11)可得,气动阻力作用下,惯性系绳以初始扰动角为幅值在平衡点附近作等幅振动,因此需要施加控制使系绳稳定在当地垂线附近。

### 3 系绳天平动控制算法设计

通电系绳绕质心的运动包括两部分:1-2段系绳通电时由于两端质量偏差引起的安培力偏心力矩和初始扰动引起的系绳天平动。基于图1所示的多段系绳结构,通过调节3-4段系绳中的控制电流大小和方向来实现系绳的稳定控制。

#### 3.1 偏心力矩引起的天平动控制算法设计

不考虑气动阻力的情况下,要稳定1-2段系绳偏心力矩引起的运动,由式(4)得平衡条件:

$$\begin{aligned} Q_{\vartheta e12} &= -Q_{\vartheta e34} \\ Q_{\varphi e12} &= -Q_{\varphi e34} \end{aligned} \quad (12)$$

把广义力的表达式代入式(12)可得:

$$I_{34} = \frac{m_2 - m_1}{m_s} I_{12} \quad (13)$$

由式(13)可得,当 $m_1 = m_2$ 即系统质心和系绳中心重合时,系统是一个自平衡系统,不需要外加力矩来维持平衡。当 $m_1 \gg m_2 + m_0 + m_t$ ,即主星质量远远大于其他部件质量之和时,有 $I_{34} \approx -I$ ,即需要大

致相等的电流才能克服由于安培力偏心产生的力矩。综上可知,当主星和子星质量相差不大时,只需要较小的电流来克服安培力偏心力矩,具有较好的效果。

#### 3.2 初始扰动引起的运动控制算法设计

当仅考虑面内振动,忽略面外振动的情况下,系统的振动方程变为:

$$\begin{aligned} \ddot{\vartheta} + 3\omega_0^2 \sin\vartheta \cos\vartheta \\ = 3\omega_0^2 \sin\vartheta_e - \frac{\gamma_m \cos i}{2u_e r^3} I_{34} \end{aligned} \quad (14)$$

假设初始为小扰动,在平衡点附近进行简化,并令 $\bar{\vartheta} = \vartheta - \vartheta_e$ ,式(14)变为:

$$\ddot{\bar{\vartheta}} + 3\omega_0^2 \bar{\vartheta} = -\frac{\gamma_m \cos i}{2u_e r^3} I_{34} \quad (15)$$

为使系统能稳定在平衡位置,设计PD控制器,可令控制电流为:

$$I_{34} = \frac{2u_e r^3}{\gamma_m \cos i} \left( \frac{4}{\pi k_1} \omega_0 \dot{\bar{\vartheta}} \right) \quad (16)$$

式中:  $k_1$  为正整数,代入式(15)有:

$$\ddot{\bar{\vartheta}} + \frac{4}{\pi k_1} \omega_0 \dot{\bar{\vartheta}} + 3\omega_0^2 \bar{\vartheta} = 0 \quad (17)$$

式(15)为一典型的带阻尼的二阶系统,当系统特征根实部为负时系统稳定。设 $\zeta$ 为阻尼系数,可通过设计 $k_1$ 来调节 $\zeta$ 。设要求的过渡过程时间为 $t_s = k_2 T$ ,其中 $T$ 为轨道周期。若取 $\Delta = 2\%$ ,则由式(17)可得:

$$k_1 = k_2 \quad (18)$$

说明控制器(16)中的系数即为过渡过程所需的轨道圈数。考虑到实际应用中系绳中可通过最大电流的限制,得到PD控制器为:

$$I_{34} = \text{sat} \left[ \frac{2u_e r^3}{\gamma_m \cos i} \left( \frac{4}{\pi k_1} \omega_0 \dot{\bar{\vartheta}} \right) \right] \quad (19)$$

式中:  $\text{sat}(\cdot)$  定义为:若最大允许电流为 $I_{\max}$ ,当计算出的电流 $I > I_{\max}$ 时,  $\text{sat}(I) = I_{\max}$ ;  $I < -I_{\max}$ 时,  $\text{sat}(I) = -I_{\max}$ 。在上述控制器基础上,同时考虑面内和面外运动,且对运动方程在平衡点附近进行小角度简化,可得:

$$\begin{aligned} \ddot{\vartheta} + 3\omega_0^2 (\vartheta - \vartheta_e) &= \frac{-\gamma_m}{2u_e r^3} (2\varphi \sin i \cos i + \cos i) I_{34} \\ \ddot{\varphi} + 4\omega_0^2 \varphi &= \frac{\gamma_m}{2u_e r^3} (\cos i \sin i + 2\vartheta \sin i \cos i) I_{34} \end{aligned} \quad (20)$$

式中:  $u$  为纬度幅角,  $u = \omega + \theta$ 。设计式(21)所示的 PD 控制器:

$$I_{34} = \frac{2u_e r^3}{\gamma_m \cos i} (k_1 \dot{\vartheta} + k_2 \dot{\varphi}) \quad (21)$$

式中:  $k_1, k_2$  为控制系数。把式(21)代入式(20), 忽略二阶小量  $\vartheta \dot{\vartheta}, \vartheta \dot{\varphi}, \dot{\vartheta} \varphi, \varphi \dot{\varphi}, \vartheta_e \dot{\vartheta}, \vartheta_e \dot{\varphi}$ , 可得:

$$\begin{aligned} \ddot{\vartheta} + k_1 \dot{\vartheta} + 3\omega_0^2 \bar{\vartheta} &= -k_2 \dot{\varphi} \\ \ddot{\varphi} - \cos \omega_0 t \tan i k_2 \dot{\varphi} + 4\omega_0^2 \varphi &= \cos \omega_0 t \tan i k_1 \dot{\vartheta} \end{aligned} \quad (22)$$

令  $u = \omega_0 t, \mathbf{x} = [\bar{\vartheta}, \varphi, \dot{\vartheta}, \dot{\varphi}]$ , 式(22)可表示成状态空间形式为:

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -3\omega_0^2 & 0 & -k_1 & -k_2 \\ 0 & -4\omega_0^2 & \cos(\omega_0 t) \tan i k_1 & \cos(\omega_0 t) \tan i k_2 \end{bmatrix} \mathbf{x} \quad (23)$$

系统的特征方程为:

$$\lambda^4 + (k_1 - \cos \omega_0 t \tan i k_2) \lambda^3 + 7\omega_0^2 \lambda^2 + (4\omega_0^2 k_1 - 3\omega_0^2 \cos \omega_0 t \tan i k_2) \lambda + 12\omega_0^4 = 0 \quad (24)$$

假设式(24)所示的特征方程存在两个负实根  $\lambda_1, \lambda_2$ , 和一对具有负实部的复根  $\lambda_3, \lambda_4$ , 且令  $\lambda_1 = -c_1 \omega_0, \lambda_2 = -c_2 \omega_0, \lambda_3 = a + bj, \lambda_4 = a - bj$ , 则可得特征方程为:

$$\begin{aligned} \lambda^4 + [-2a + (c_1 + c_2) \omega_0] \lambda^3 + \\ [a^2 + b^2 - 2(c_1 + c_2) a \omega_0 + c_1 c_2 \omega_0^2] \lambda^2 + \\ [(a^2 + b^2)(c_1 + c_2) \omega_0 - 2c_1 c_2 a \omega_0^2] \lambda + \\ c_1 c_2 \omega_0^2 (a^2 + b^2) = 0 \end{aligned} \quad (25)$$

式中:  $a, b, c, d$  为实数。式(24)与式(25)对应系数相等, 则有:

$$\begin{aligned} (a^2 + b^2) - 2(c_1 + c_2) a \omega_0 + c_1 c_2 \omega_0^2 &= 7\omega_0^2 \\ (a^2 + b^2) c_1 c_2 \omega_0^2 &= 12\omega_0^2 \end{aligned} \quad (26)$$

由式(26), 可得  $c_1, c_2$  满足以下约束条件:

$$3 < c_1 c_2 < 4; c_1 \geq c_2 \geq -a; a < 0 \quad (27)$$

为使收敛速度最快, 设目标函数为:

$$J = a = \frac{(c_1 c_2)^2 - 7c_1 c_2 + 12}{2c_1 c_2 (c_1 + c_2)} \quad (28)$$

采用复合型法求解式(27)和(28)表示的带约束优化问题, 可得最优解为:

$$c_1 = 1.9; c_2 = 1.8; a = -0.01\omega_0; b = 1.87\omega_0 \quad (29)$$

则可得式(21)中系数为:

$$k_1 = 1.84\omega_0, k_2 = -1.88\omega_0 / (\cos \omega_0 t \tan i + \text{eps}) \quad (30)$$

式中: eps 表示可以取到的最小值。考虑到系绳中电流饱和的限制, 可得修正的电流控制律:

$$I = \text{sat} \left\{ \frac{2u_e r^3}{\gamma_m \cos i} \left[ 1.84\omega_0 \dot{\vartheta} - \frac{1.88\omega_0}{\cos \omega_0 t \tan i + \text{eps}} \dot{\varphi} \right] \right\} \quad (31)$$

#### 4 数值仿真分析

下面通过数值仿真校验上述设计的抑制系绳天平动算法的有效性。系绳材料选用铝导线, 电阻率为  $r_{Al} = 32.5 \times 10^{-9} \Omega \cdot \text{m}$ , 密度为  $\rho_{Al} = 1850 \text{ kg/m}^3$ , 系绳长度为 4 km, 直径为 2 mm。其他仿真参数如表 1、表 2 所示。

表 1 电动力绳系结构参数

$m_0$ /kg	$A_0$ /m <sup>2</sup>	$m_1$ /kg	$A_1$ /m <sup>2</sup>	$m_2$ /kg	$A_2$ /m <sup>2</sup>
20	0.2	100	0.8	150	16.7

表 2 轨道参数及初始扰动角

轨道倾角/(°)	轨道高度/km	面内角/(°)	面外角/(°)
30	500	5	5

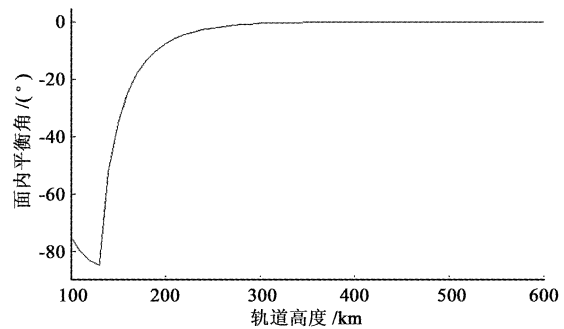


图 3 面内平衡角随轨道高度的变化曲线

Fig. 3 The relation between libration angle and the orbital altitude

(1) 气动阻力作用下系绳面内平衡位置仿真  
首先对气动阻力作用下系绳的平衡位置进行仿真, 结果如图 3 和图 4 所示。由图可得系绳面内平

衡位置随轨道高度和系绳长度的增加逐渐趋于 0, 即当地垂线附近。这是因为随着轨道高度的增加气动阻力减小, 随着系绳长度的增加系绳产生的恢复力矩增大。

(2) 安培力偏心力矩引起的天平动抑制仿真

此处对通过调节 3-4 段系绳电流大小和方向来抑制 1-2 段系绳产生的安培力偏心力矩引起的系绳天平动控制策略进行仿真, 结果如图 5 所示。

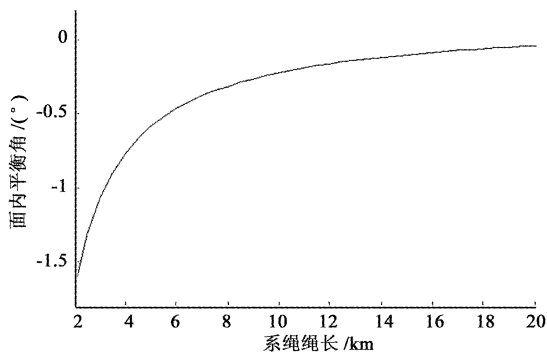


图 4 面内平衡角随系绳长度的变化曲线

Fig. 4 The relation between libration angle and the length of the tether

由图 5 可校验 3.1 节中的结果, 当两端质量近似相等时, 所设计的多段系绳结构只需很小的控制电流来抑制由偏心力矩引起的系绳天平动。

(3) 初始扰动引起的系绳天平动抑制仿真

首先针对仅考虑面内运动设计的控制器进行仿真。仿真结果如图 6 所示。由图可得: 式 (19) 所示的控制算法能够使系绳在 1 个轨道周期内消耗较小的电流来实现初始扰动的抑制。

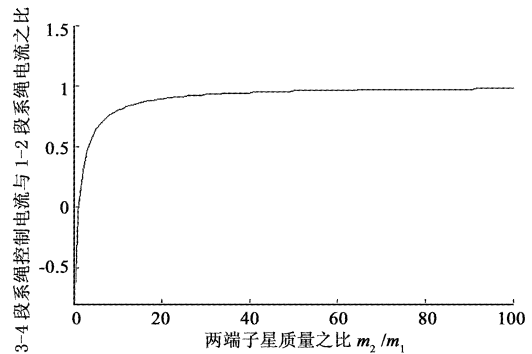


图 5 控制电流与两端质量之比的关系

Fig. 5 The relation between the control current and the ratio of the two satellite' mass

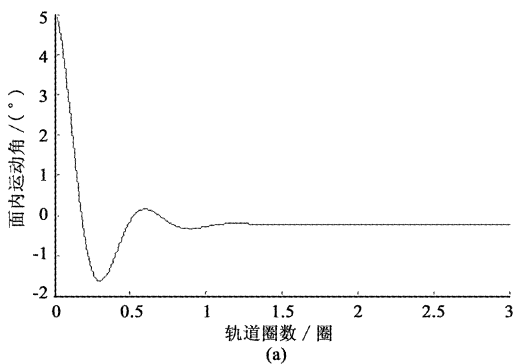


图 6 仅考虑面内运动时面内角 (a) 和控制电流 (b) 曲线

Fig. 6 The in-plane angle (a) and current (b) only taking the in-plane motion into consideration

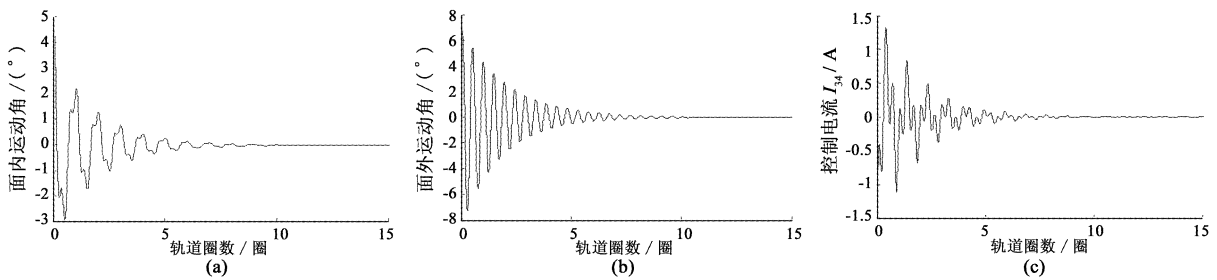


图 7 同时考虑面内外运动时面内角 (a)、面内角 (b) 和控制电流变化曲线

Fig. 7 The in-plane angle (a), out-of-plane angle (b) and the control current (c) taking the in-plane and out-of-plane motion meantime

接着对同时考虑面内面外天平动抑制设计的控制算法进行仿真,仿真结果如图7所示。由图可得:同时考虑面内外运动时式(31)所示的控制器经过10个轨道周期收敛于平衡位置,且需要较小的控制电流。

## 5 结 论

通过设计的多段系绳结构,实现了电动力绳系的系绳稳定与轨道机动控制的解耦。在考虑气动阻力作用的情况下,分析了惯性系绳的天平动规律,并基于多段系绳结构设计了抑制系绳运动的控制算法。研究表明:气动阻力作用下,圆轨道上惯性系绳以初始运动角为幅值作等幅振荡。且当两端子星质量之比趋于1时,只需要很小的控制电流来稳定由于通电系绳两端质量偏差产生的安培力偏心力矩引起的运动。针对初始扰动引起的系绳天平动设计的控制算法能够以较小的电流实现系绳稳定控制。

## 参 考 文 献

- [1] 罗刚桥. 空间碎片减缓措施及其研究对策[J]. 中国空间科学技术, 2001, 21(6): 33 - 42. [Luo Gang-qiao. The mitigation measures of space debris and the strategy of study[J]. Chinese Space Science and Technology, 2001, 21(6): 33 - 42.]
- [2] Johnson L, Meyer M, Palaszewski B, et al. Development priorities for in-space propulsion technologies [J]. Acta Astronautica, 2012, 82(2): 148 - 152.
- [3] Levin E, Pearson J, Carroll J. Wholesale debris removal from LEO[J]. Acta Astronautica, 2012, 73: 100 - 108.
- [4] 于绍华. 绳系卫星系统中的周期运动[J]. 宇航学报, 1997, 18(3): 51 - 58. [Yu Shao-hua. Periodic motion in the tethered satellite system[J]. Journal of Astronautics, 1997, 18(3): 51 - 58.]
- [5] Matteis G D, Socio L M D. Dynamic of a tethered satellite subjected to aerodynamic drag [J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 1984, 7(1): 45 - 50.
- [6] Palaez J, Lorenzini E C. Libration control of electrodynamic tethers in inclined orbit[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2005, 28(4): 611 - 622.
- [7] 张勇. 电动力绳索系统的周期求解及其稳定性分析[J]. 振动与冲击, 2011, 30(5): 59 - 82. [Zhang Yong. Periodic solution and stability analysis for a electrodynamic tethered system [J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(5): 59 - 82.]
- [8] Pelaez J. Self balance electrodynamic tethers [C]. AIAA/AAS Astrodynamic Specialist Conference and Exhibit, Rhode Island, USA, August 18 - 19, 2004.
- [9] Williams P. Optimal orbital transfer with electrodynamic tether [J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2005, 28(2): 369 - 372.
- [10] Davis W R, Banerjee A K. Libration damping of a tethered satellite using rate only control [C]. AIAA Guidance, Navigation and Control Conference, Minneapolis, MN, USA, August 15 - 17, 1988.
- [11] Mankala K K, Agrawal S K. Equilibrium to equilibrium maneuvers of rigid electrodynamic tethers [J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2005, 28(3): 541 - 545.
- [12] 周荻, 范继祥. 绳系太阳能发电卫星姿态机动的主动振动控制[J]. 宇航学报, 2012, 33(5): 605 - 611. [Zhou Di, Fan Ji-xiang. Active vibration control of tethered solar power satellite during attitude maneuvering[J]. Journal of Astronautics, 2012, 33(5): 605 - 611.]
- [13] Pearson J, Carroll J, Levin E. Overview of the electrodynamic delivery express [C]. 39th AIAA / ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, Huntsville, AL, USA, July 20 - 23, 2003.
- [14] 文浩, 金栋平, 胡海岩. 倾斜轨道电动力绳系卫星回收控制[J]. 力学学报, 2008, 40(3): 375 - 380. [Wen Hao, Jin Dong-ping, Hu Hai-yan. Retrieval control of an electrodynamic tethered satellite in an inclined orbit [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2008, 40(3): 375 - 380.]

作者简介:

张健(1988 - ),男,硕士,主要从事电动力绳系动力学与控制研究。

通信地址:黑龙江省哈尔滨市南岗区一匡街2号B3栋514室(150001)

电话:15846594863

E-mail:zhangjian6140@126.com

(编辑:曹亚君)