

文章编号: 1001-0920(2015)06-0961-08

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2014.0408

考虑空间系绳释放特性的空间绳系机器人协调耦合控制

黄攀峰, 张帆, 徐秀栋

(西北工业大学 a. 航天学院, b. 飞行动力学技术重点实验室, 西安 710072)

摘要: 针对空间绳系机器人的轨迹跟踪控制问题, 提出考虑系绳释放特性的跟踪轨迹协调控制方法. 该方法考虑系绳释放的动力学特性, 在最优轨迹规划过程中将系绳释放速度作为一个规划量, 将系绳释放机构的转矩作为一个控制输入, 结合操作机器人上推力器控制输入设计协调耦合位姿控制器. 该方法的优点是控制输入易于施加, 可工程实现系绳协调控制. 仿真结果表明, 操作机器人能精确跟踪最优轨迹, 末端误差为 ± 0.1 m, 且能有效跟踪期望姿态, 精度在 $\pm 0.2^\circ$.

关键词: 空间绳系机器人; 协调耦合控制; 空间系绳; 推力器; 释放机构

中图分类号: TP273

文献标志码: A

Coordinated coupling control of tethered space robot for considering releasing characteristics of space tether

HUANG Pan-feng, ZHANG Fan, XU Xiu-dong

(a. School of Astronautics, b. Key Laboratory of Flight Dynamics Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China. Correspondent: HUANG Pan-feng, E-mail: pfhuang@nwpu.edu.cn)

Abstract: According to the tracking optimal trajectory control problem of the tethered space robot(TSR) for approaching the target, a coordinated coupling control method for considering releasing characteristics of the space tether is proposed. This method considers the dynamic characteristics of releasing tether, the releasing velocity of tether can be taken as planning input towards optimal trajectory planning, and the releasing mechanism torque can be seen as one control input. The 6-DOF coordinated coupling controller is designed with the help of thruster control input and releasing motor control input for tracking optimal trajectory and desired attitude. It is easy to impose and achieve engineering application for the auxiliary control of the space tether by utilizing the proposed method. The simulation results show that the TSR can track optimal trajectory accurately, and the terminal error is ± 0.1 m. Furthermore, the TSR can track the desired attitude effectively, and the error is $\pm 0.2^\circ$.

Keywords: tethered space robot; coordinated coupling control; space tether; thruster; releasing mechanism

0 引言

空间绳系机器人是一种用于空间在轨服务的新型空间机器人, 其主要由空间平台、空间系绳和操作机器人构成. 操作机器人通过空间系绳释放后自主接近目标并实施在轨操作任务. 该空间绳系机器人的结构中包含空间系绳, 操作机器人的作用范围较大, 因此与传统的空间机器人相比有着操作半径大、灵活性强等优点.

操作机器人完成最终在轨服务任务的前提是需要沿着最优轨迹逼近至目标附近并保持稳定的姿态, 因此控制操作机器人跟踪轨迹和相对目标姿态是进

行在轨操作的一个关键的科学问题. 本文根据这个控制问题展开研究, 提出了以空间平台上系绳释放机构、空间系绳、操作机器人上的推力器为执行机构的协调姿轨耦合控制方法.

对于利用空间系绳的协调控制, 国内外已经进行了一些研究^[1-6]. Yuya等^[1]提出一种分阶段利用系绳拉力及推力器进行控制机器人飞行轨迹的方法, 节省了燃料消耗, 但缺点是没有考虑利用系绳拉力时对机器人姿态的影响. Masahiro等^[2]提出利用拉力进行协调控制绳系机器人的运动, 在控制过程中, 通过控制系绳与机器人的连接点位置进行系绳拉力方向

收稿日期: 2014-03-24; **修回日期:** 2014-10-11.

基金项目: 国家自然科学基金项目(11272256); 西北工业大学博士论文创新基金项目(CX201217).

作者简介: 黄攀峰(1974—), 男, 教授, 博士生导师, 从事空间机器人、空间遥操作等研究; 徐秀栋(1985—), 男, 博士生, 从事空间绳系机器人动力学、轨迹规划及协调控制的研究.

的控制;在此基础上他还提出利用“系绳+连杆”的方式协调控制姿态,并做了相关的仿真实验^[3]. Godard 等^[4]提出了通过控制两根系绳上质量块的位置来协调控制卫星姿态的方法. Osamu 等^[5]针对卫星在面内的旋转运动,利用系绳张力和推力器设计了一种协调控制方法,这种方法不但可以减少燃料消耗,还可改善控制精度. 徐秀栋等^[6]针对空间系绳机器人逼近目标问题提出一种利用空间系绳、推力器和反作用轮的协调控制方法,节省了推力器燃料消耗,很好地稳定了自身姿态.

以上研究在设计协调控制器时均是以空间系绳张力作为直接的控制量,未考虑空间系绳张力跟踪和实现问题,而且没有考虑空间系绳释放机构和释放特性,所以以上研究是理想状况下的协调控制方法. 本文充分考虑了空间平台上空间系绳释放机构结构特性和系绳释放特性,研究以系绳释放机构转矩为控制输入的操作机器人逼近目标最优轨迹规划方法,并在此基础上考虑系绳释放机构的操作机器人跟踪最优轨迹的6自由度协调位姿耦合控制方法.

对于空间系绳释放机构的设计与研制,国际上主要是借助空间系绳系统相关研究计划进行研究的^[7-11],研究计划主要有:欧洲第2次青年工程师卫星(YES2)计划设计了一种控制系绳释放的阻尼滚轮,该机构可以控制实现30km系绳的释放^[7-8];SEDS计划设计了一种系绳释放机构,该机构由驱动电机、滚轮、张力计、剪切刀和空间系绳出入控制口等组成,其对系绳的释放控制已在空间环境中作过实验,证明是有效的^[9];日本空间发展机构研制了一种系绳释放机构,该机构由滚轮、驱动电机、滚轮锁死机构和排线机构等构成,可以控制系绳的释放及回收^[10-11]. 这些空间系绳释放机构有一个共同点:都采用滚轮作为系绳缠绕储存装置,利用驱动电机的力矩控制实现空间系绳从滚轮的被动释放. 这些空间系绳释放机构均在空间中或地面实验中证明是可用的,所以本文采用驱动电机、滚轮式的简化系绳释放机构进行协调控制研究.

1 空间系绳机器人耦合动力学建模

1.1 空间系绳机器人释放动力学建模

设空间系绳机器人的空间平台的质量为 m_p ,操作机器人的质量为 m_r ,忽略空间系绳的质量,空间系绳机器人的总质量 $m = m_r + m_p$. 图1为空间系绳机器人相关定义图, $OXYZ$ 为地心惯性坐标系, $o_t x_t y_t z_t$ 为目标轨道坐标系, $o_s x_s y_s z_s$ 为空间系绳机器人轨道坐标系, o_s 为空间系绳机器人质心, $o_s x_2 y_2 z_2$ 为空间系绳坐标系, α 和 β 分别为操作机器人相对于空间系绳机器人轨道坐标系的面内和面外偏转角. 设空间绳

系机器人质心相对于地心的位置矢量为 R_0 ,空间平台相对于地心的位置矢量为 R_p ,操作机器人相对于地心的位置矢量为 R_r ,空间平台相对于质心 o_s 的位置向量为 r_p ,操作机器人相对于质心 o_s 的位置向量为 r_r ,则有如下关系式成立:

$$\begin{aligned} R_p &= R_0 + r_p, \\ R_r &= R_0 + r_r. \end{aligned} \quad (1)$$

空间系绳机器人的动能可以表示为

$$T_g = \frac{1}{2} m_p \dot{R}_p \cdot \dot{R}_p + \frac{1}{2} m_r \dot{R}_r \cdot \dot{R}_r. \quad (2)$$

其中: \dot{R}_p 为矢量 R_p 对时间的导数, \dot{R}_r 为矢量 R_r 对时间的导数.

空间系绳机器人的势能可以表示为

$$V_g = -\mu \left(\frac{m_p}{|R_0 + r_p|} + \frac{m_r}{|R_0 + r_r|} \right), \quad (3)$$

其中 $\mu = 3.986\,005 \times 10^{14} \text{ m}^3/\text{s}^2$ 为地球引力常数.

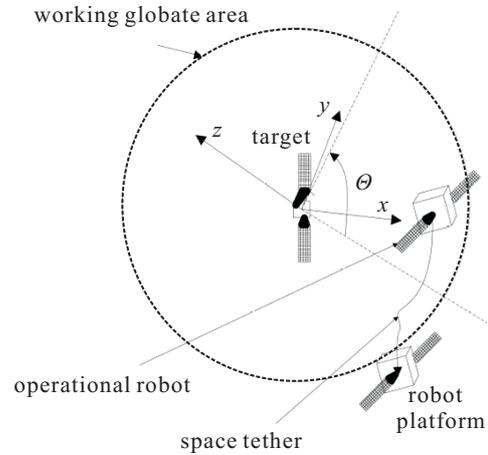


图1 空间系绳机器人相关定义

设空间系绳机器人运行在圆轨道上,运行轨道角速度 $\Omega_r = \sqrt{\mu/R_0^3}$, R_0 为轨道半径. 取Lagrange函数 $L = T_g - V_g$,应用第2类Lagrange方程推导出空间系绳机器人释放动力学方程为

$$\begin{aligned} \ddot{\alpha} + 2(\dot{\alpha} - \Omega_r) \left(\frac{\dot{l}}{l} - \dot{\beta} \tan \beta \right) + \\ 3\Omega_r^2 \sin \alpha \cos \alpha = \frac{1}{\cos \beta l} \frac{F_1}{m_r}, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \ddot{\beta} + 2\frac{\dot{l}}{l}\dot{\beta} + [(\dot{\alpha} - \Omega_r)^2 + \\ 3\Omega_r^2 \cos^2 \alpha] \sin \beta \cos \beta = -\frac{1}{l} \frac{F_2}{m_r}, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \ddot{l} - l \cos^2 \beta [(\dot{\alpha} - \Omega_r)^2 + 3\Omega_r^2 \cos^2 \alpha] + \\ l(\Omega_r^2 - \dot{\beta}^2) = -\frac{F_t}{\bar{m}} + \frac{F_3}{m_r}. \end{aligned} \quad (6)$$

其中: $F = [F_1, F_2, F_3]^T$ 为操作机器人自带小型推力器在空间系绳坐标系 $o_s x_2 y_2 z_2$ 中的推力表示, l 为空间系绳的长度, F_t 为空间系绳上存在的张力, $\bar{m} = (m_p + m_r)/(m_p m_r)$.

1.2 空间绳系机器人姿态动力学建模

设操作机器人本体坐标系为 $o_c x_c y_c z_c$, 若操作机器人姿态不发生偏转, 则本体坐标系与系绳坐标系 $o_s x_2 y_2 z_2$ 指向一致. 操作机器人姿态发生变化后经过“321”旋转即绕 $o_c z_c$ 轴旋转 ψ_l 角; 然后绕新产生坐标系的第2坐标轴旋转 θ_l 角; 最后绕新产生坐标系的第1坐标轴旋转 ϕ_l 角, 其本体坐标系即与系绳坐标系重合.

设操作机器人的动量矩为 H , M 为操作机器人所受到的外力矩(包括控制力矩和干扰力矩), 根据动量矩定理, 满足如下关系式:

$$M = \frac{dH}{dt} = \dot{H} + \omega^\times H. \quad (7)$$

其中: $\omega^\times = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y \\ \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -\omega_y & \omega_x & 0 \end{bmatrix}$, $\omega = [\omega_x, \omega_y, \omega_z]^T$ 为操作机器人的空间旋转角速度.

选取 $o_c x_c$ 、 $o_c y_c$ 和 $o_c z_c$ 为操作机器人的主转动惯量轴, 在小角度假设条件下, 即 $|\phi| \ll 1 \text{ rad}$ 、 $|\theta| \ll 1 \text{ rad}$ 和 $|\psi| \ll 1 \text{ rad}$, 忽略二次项得到空间绳系机器人的姿态动力学方程为^[12]

$$\begin{aligned} \ddot{\phi}_l - n_x \Omega_r^2 (\sin^2 \beta - \cos^2 \beta) \phi_l - (n_x + 1) \Omega_r \sin \beta \dot{\theta}_l + \\ (n_x - 1) \Omega_r \cos \beta \dot{\psi}_l - \Omega_r \cos \beta \dot{\beta} \dot{\theta}_l + \Omega_r \sin \beta \dot{\beta} \dot{\psi}_l + \\ n_x \Omega_r^2 \sin \beta \cos \beta = \frac{M_x}{I_x}, \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \ddot{\theta}_l - n_y \Omega_r \sin \beta \dot{\theta}_l + (\sin \beta - n_y \sin \beta) \Omega_r \dot{\phi}_l + \\ \Omega_r \cos \beta \dot{\beta} \dot{\phi}_l - n_y \Omega_r^2 \sin \beta \cos \beta \dot{\psi}_l + \\ \Omega_r \sin \beta \dot{\beta} = \frac{M_y}{I_y}, \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \ddot{\psi}_l + n_z \Omega_r^2 \cos^2 \beta \dot{\psi}_l + (1 - n_z) \Omega_r \cos \beta \dot{\phi}_l - \\ \Omega_r \sin \beta \dot{\beta} \dot{\phi}_l + n_z \Omega_r^2 \sin \beta \cos \beta \dot{\theta}_l + \\ \Omega_r \cos \beta \dot{\beta} = \frac{M_z}{I_z}. \end{aligned} \quad (10)$$

其中

$$n_x = \frac{I_y - I_z}{I_x}, \quad n_y = \frac{I_x - I_z}{I_y}, \quad n_z = \frac{I_y - I_x}{I_z},$$

I_x 、 I_y 、 I_z 分别为操作机器人绕坐标轴 $o_c x_c$ 、 $o_c y_c$ 和 $o_c z_c$ 的转动惯量.

1.3 空间系绳释放机构结构与动力学建模

引言中已对国际上一些空间系绳释放机构作了简单介绍, 通过空间实验证明这些机构在控制系绳释放时是有效的. 本文通过这些机构具有滚轮的共同特点采用一种简化的空间系绳释放机构进行结构与动力学建模, 并为协调控制器设计奠定基础.

设空间系绳上存在的张力为 F_t , 空间系绳的横截面积为 A , 空间系绳的弹性模量为 E , 滚轮的旋

角度为 ϕ_r , l_r 为被释放的空间系绳的长度, l 为产生形变后空间系绳的长度, C_t 为空间系绳阻尼系数, C_d 为滚轮阻尼系数, I_r 为滚轮的转动惯量, 空间系绳在释放过程中与滚轮产生的摩擦力矩为 T_l , 驱动电机的控制力矩为 T_m , 滚轮的宽度为 w_d , 未缠绕空间系绳时滚轮的直径为 D_1 , 缠绕空间系绳后滚轮的直径为 D , 空间系绳的直径为 d .

根据上面的假设, 空间系绳上产生的张力可以计算为

$$F_t = \frac{EA}{l_r}(l - l_r) + \frac{C_t EA}{l_r}(\dot{l} - \dot{l}_r). \quad (11)$$

设在滚轮上缠绕了 n 层空间系绳, 则缠绕空间系绳后滚轮的直径 D 可以表示为

$$D = D_1 + 2nd. \quad (12)$$

在滚轮上排列空间系绳时有紧排列和松排列两种, 用系数 γ ($0 < \gamma \leq 1$) 表示排列形式. 若 $\gamma = 1$, 则表示空间系绳在滚轮上无间隙紧密排列, γ 越小表示排列越松. 设空间系绳的半径为 r_d ($r_d = d/2$), 未缠绕空间系绳时滚轮的半径为 r_1 ($r_1 = D_1/2$), 缠绕空间系绳后滚轮的半径为 r ($r = D/2$), 则根据缠绕在滚轮上空间系绳所占的体积一定为原则有如下关系式:

$$\gamma w_d \pi (r^2 - r_1^2) = \pi (L_r - l_r) r_d^2. \quad (13)$$

其中 L_r 为空间系绳总长度(包括缠绕在滚轮上的长度和释放出的长度之和). 若空间系绳在滚轮上为紧密排列, 则式(13)可以写为

$$w_d \pi (r^2 - r_1^2) = \pi (L_r - l_r) r_d^2. \quad (14)$$

通过式(13)可以计算出缠绕空间系绳后滚轮的半径

$$r = \sqrt{\frac{(L_r - l_r) r_d^2}{\gamma w_d} + r_1^2}. \quad (15)$$

设 $S_1 = \frac{r_d^2}{e w_d}$, $S_2 = S_1 L_r + r_1^2$, 式(15)可以写为

$$r = \sqrt{S_2 - S_1 l_r}. \quad (16)$$

由滚轮的结构和转动规律可以得出

$$r \frac{d\phi_r}{dt} = \frac{dl_r}{dt}. \quad (17)$$

将式(16)代入(17), 得

$$\frac{d\phi_r}{dt} = \frac{1}{\sqrt{S_2 - S_1 l_r}} \frac{dl_r}{dt}. \quad (18)$$

对式(18)两边积分, 得到

$$\phi_r = -\frac{2}{S_1} \sqrt{S_2 - S_1 l_r} + \frac{2\sqrt{S_2}}{S_1}. \quad (19)$$

式(19)描述了空间系绳简化释放机构的结构模型.

根据滚轮的转动规律, 可以得出滚轮转动的动力学方程

$$I_r \ddot{\phi}_r + C_d \dot{\phi}_r = F_t r - T_l - T_m. \quad (20)$$

式(20)即为系绳释放简化机构动力学模型, 可以看出: 该动力学模型为一个简单的二阶微分方程, 其

中 T_m 为驱动电机输入控制力矩, T_l 为空间系绳被释放时与滚轮间的摩擦力矩, 可以设为常值; F_{tr} 项为空间系绳张力对滚轮产生的张力矩, 可通过控制驱动电机的转矩输入实现对空间系绳释放滚轮的运动控制.

1.4 考虑空间系绳释放机构特性的 6 自由度耦合动力学模型

前面几节分别建立了空间绳系机器人释放动力学、姿态动力学和系绳释放机构结构及动力学模型. 本节在此基础上归纳出考虑空间系绳释放机构特性的 6 自由度耦合动力学模型.

首先给出一个前提: 操作机器人在逼近目标初始时刻具有一定初速, 利用空间系绳及其释放机构进行协调控制仅指对操作机器人实施减速操作, 即在逼近过程中系绳方向上无需操作机器人自带推力器推力施加.

为了后续设计耦合控制器的需要, 将在系绳坐标系系绳方向 $o_s z_2$ 的控制向量设计为释放加速度 u_3 , 连同系绳坐标系 $o_s x_2 y_2 z_2$ 上 $o_s x_2$ 方向的推力器推力 u_1 、 $o_s y_2$ 方向的推力器推力 u_2 共同设计为逼近控制矢量; 操作机器人的姿态控制矢量为 $M = [M_x, M_y, M_z]^T$, 系绳释放机构控制量为驱动电机转动力矩 T_m , 所以 6 自由度耦合动力学模型可以归纳为

$$\ddot{\alpha} + 2(\dot{\alpha} - \Omega_r) \left(\frac{\dot{l}}{l} - \dot{\beta} \tan \beta \right) + 3\Omega_r^2 \sin \alpha \cos \alpha = \frac{1}{\cos \beta l} \frac{F_1}{m_r}, \quad (21)$$

$$\ddot{\beta} + 2\frac{\dot{l}}{l}\dot{\beta} + [(\dot{\alpha} - \Omega_r)^2 + 3\Omega_r^2 \cos^2 \alpha] \sin \beta \cos \beta = -\frac{1}{l} \frac{F_2}{m_r}, \quad (22)$$

$$\ddot{l} = u_3, \quad (23)$$

$$I_r \ddot{\phi}_r + C_d \dot{\phi}_r - F_{tr} + T_l = -T_m, \quad (24)$$

$$\ddot{\phi}_l - n_x \Omega_r^2 (\sin^2 \beta - \cos^2 \beta) \phi_l - (n_x + 1) \Omega_r \sin \beta \dot{\theta}_l + (n_x - 1) \Omega_r \cos \beta \dot{\psi}_l - \Omega_r \cos \beta \dot{\beta} \dot{\theta}_l + \Omega_r \sin \beta \dot{\beta} \dot{\psi}_l + n_x \Omega_r^2 \sin \beta \cos \beta = \frac{M_x}{I_x}, \quad (25)$$

$$\ddot{\theta}_l - n_y \Omega_r \sin \beta \dot{\theta}_l + (\sin \beta - n_y \sin \beta) \Omega_r \dot{\phi}_l + \Omega_r \cos \beta \dot{\beta} \dot{\phi}_l - n_y \Omega_r^2 \sin \beta \cos \beta \psi_l + \Omega_r \sin \beta \dot{\beta} = \frac{M_y}{I_y}, \quad (26)$$

$$\ddot{\psi}_l + n_z \Omega_r^2 \cos^2 \beta \psi_l + (1 - n_z) \Omega_r \cos \beta \dot{\phi}_l - \Omega_r \sin \beta \dot{\beta} \dot{\phi}_l + n_z \Omega_r^2 \sin \beta \cos \beta \theta_l + \Omega_r \cos \beta \dot{\beta} = \frac{M_z}{I_z}. \quad (27)$$

2 考虑系绳释放机构特性的空间绳系机器人 6 自由度协调耦合控制器设计

由于考虑到空间系绳释放机构的特性和操作机

器人具有释放初速的前提特点, 将控制系绳释放机构的电机转矩作为一个控制量, 实现对操作机器人在逼近目标过程中初速的减速操作, 用来代替空间系绳方向的力控制. 对空间绳系机器人逼近目标过程中的 6 自由度耦合协调控制策略为: 利用操作机器人自带的 6 个双向推力器, 辅之空间系绳释放驱动电机的控制, 实现操作机器人三向位置跟踪和三轴姿态稳定与控制. 在进行协调控制器设计之前首先介绍一下操作机器人逼近目标的最优轨迹规划方法.

2.1 考虑系绳释放机构的最优轨迹规划

考虑到操作机器人具有释放初速和利用空间系绳进行减速操作的特点, 将最优轨迹规划的规划量设计为空间系绳坐标系 $o_s x_2 y_2 z_2$ 上 $o_s x_2$ 方向的推力器推力 u_1 、 $o_s y_2$ 方向的推力器推力 u_2 和 $o_s z_2$ 轴向空间系绳释放加速度 \ddot{l} , 所以操作机器人逼近目标的最优轨迹规划动力学方程可以用式 (21)~(23) 表示.

设操作机器人逼近目标初始时刻具有释放初速; 操作机器人在逼近目标过程中自身推力器推力有限, 设在 $o x_2$ 轴向和 $o y_2$ 轴向具有的最大推力器推力为 $F_{1 \max}$ 和 $F_{2 \max}$; 空间系绳上提供的拉力是有限的, 因此设空间系绳方向可以提供的拉力减加速度最大值为 $a_{t \max}$, 则在规划过程中操作机器人所受的控制约束可以写为

$$\begin{aligned} -F_{1 \max} &\leq u_1 \leq F_{1 \max}, \\ -F_{2 \max} &\leq u_2 \leq F_{2 \max}, \\ -a_{t \max} &\leq u_3 \leq 0. \end{aligned} \quad (28)$$

从式 (28) 可以看出, 操作机器人在空间系绳方向所受的控制约束为 $-a_{t \max} \leq u_3 \leq 0$, 说明空间系绳上仅能提供拉力, 不能提供推力, 即空间系绳方向仅能对操作机器人提供减加速度. 这种设计也是充分考虑了空间系绳的力单向性, 这个控制约束也从侧面反映出操作机器人在逼近目标初始时刻必须具有释放初速度的前提要求.

设操作机器人的状态变量 $X = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6]^T$, 其中 $x_1 = \alpha$, $x_2 = \dot{\alpha}$, $x_3 = \beta$, $x_4 = \dot{\beta}$, $x_5 = l$, $x_6 = \dot{l}$. 设操作机器人的逼近初始状态为 X_0 , 操作机器人的逼近终端状态为 X_f , 则操作机器人在最优轨迹规划终端需要满足的条件为

$$\Phi(X_0, X_f) = 0. \quad (29)$$

操作机器人在逼近最优轨迹规划过程中需要考虑操作机器人自带推力器燃料消耗, 因此以推力器燃料消耗最少为最优指标函数, 设 $u = [u_1, u_2]^T$, 则指标函数为

$$J_g = \int_{t_0}^{t_f} u^T(t)u(t)dt. \quad (30)$$

操作机器人在逼近目标过程中对其自身状态需要有一定的约束, 可以表达为

$$X_{\min} \leq X \leq X_{\max}, \quad (31)$$

其中 X_{\min} 和 X_{\max} 为操作机器人在逼近目标过程中的状态下限和状态上限。

本文以高斯伪谱法^[13-14]对具有动力学模型(21)~(23)的操作机器人逼近目标最优轨迹进行规划, 在满足控制约束条件(28)、末端状态约束条件(29)和轨迹规划过程中操作机器人状态(位置、速度)约束条件(31)下, 寻求最优指标(30)最小的逼近目标连续控制力最优轨迹。

2.2 6自由度协调耦合控制方法

2.2.1 操作机器人上自带推力器布局设计

将操作机器人抽象近似为 $l_1 \times l_2 \times l_3$ 的长方体, 设操作机器人本体坐标系为 $o_c x_c y_c z_c$, 在 $o_c x_c$ 轴向配备推力器 f_1 ($o_c x_c$ 轴正向)和 f_2 ($o_c x_c$ 轴负向), $o_c y_c$ 轴向配备推力器 f_3 ($o_c y_c$ 轴正向)和 f_4 ($o_c y_c$ 轴负向), $o_c z_c$ 轴向配备推力器 f_5 ($o_c z_c$ 轴正向)和 f_6 ($o_c z_c$ 轴负向)。

操作机器人推力器配置输入矩阵 C_r 可以表示为

$$C_r = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & \frac{l_3}{2} & \frac{l_3}{2} & \frac{l_2}{2} & \frac{l_2}{2} \\ -\frac{l_3}{2} & -\frac{l_3}{2} & 0 & 0 & -\frac{l_1}{2} & -\frac{l_1}{2} \\ \frac{l_2}{2} & \frac{l_2}{2} & \frac{l_1}{2} & \frac{l_1}{2} & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (32)$$

2.2.2 6自由度协调耦合控制器设计

由空间绳系机器人6自由度耦合动力学模型(21)~(27)可以看出, 系绳释放机构控制系绳释放长度与操作机器人的姿态运动是解耦的。

考虑系绳释放机构后(抽离电机转矩后)操作机器人自带推力器在系绳坐标系下的主动控制变量 $u' = [u_1, u_2, 0, M_x, M_y, M_z]^T$, 设推力器在操作机器人本体坐标系 $o'_c x'_c y'_c z'_c$ 下的推力向量可以表示为 $u_T = [f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6]^T$, 则有以下关系式:

$$u' = \begin{bmatrix} {}^b C_l^T & 0 \\ 0 & I_{3 \times 3} \end{bmatrix} C_r u_T, \quad (33)$$

其中 ${}^b C_l$ 为系绳坐标系到操作机器人本体坐标系的转化矩阵。

协调耦合控制器分为两部分: 6自由度滑模控制器和系绳释放机构转动PD控制器。在进行6自由度滑模控制器设计时首先设操作机器人自带推力器主动控制变量为 $u_s = [u_{s1}, u_{s2}, u_{s3}, M_{sx}, M_{sy}, M_{sz}]^T$, 通过滑模控制器得到 u_s 后计算出 u' , 其中 $u_1 = u_{s1}$,

$u_2 = u_{s2}$, $M_x = M_{sx}$, $M_y = M_{sy}$, $M_z = M_{sz}$, 进而通过式(33)求得各推力器上的推力 u_T 。本文所采用的协调耦合控制框图如图2所示。

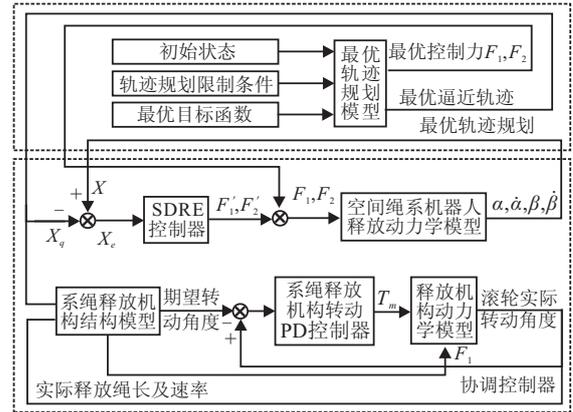


图2 6自由度耦合协调控制框图

对于 $o_s z_2$ 方向拉力减加速度的实现是通过驱动电机及系绳释放机构实现的; 在操作机器人逼近目标最优轨迹规划模型中, 可以得到理想的空间系绳释放长度, 根据式(19)得出理想的滚轮转动角度 ϕ_{rq} 和相应的转动角速度 $\dot{\phi}_{rq}$, 与空间系绳释放机构实际得到的转动角度 ϕ_r 和转动角速度 $\dot{\phi}_r$ 比较, 可以设计空间系绳释放机构驱动电机转矩控制律为

$$T_m = K_p(\phi_r - \phi_{rq}) + K_d(\dot{\phi}_r - \dot{\phi}_{rq}), \quad (34)$$

其中 K_p 和 K_d 分别为驱动电机PD控制比例系数和微分系数。下面进行6自由度滑模控制器设计。

设 $x_1 = \alpha$, $x_2 = \dot{\alpha}$, $x_3 = \beta$, $x_4 = \dot{\beta}$, $x_5 = l$, $x_6 = \dot{l}$, $x_7 = \phi_l$, $x_8 = \dot{\phi}_l$, $x_9 = \theta_l$, $x_{10} = \dot{\theta}_l$, $x_{11} = \psi_l$, $x_{12} = \dot{\psi}_l$, 将操作机器人6自由度姿轨耦合动力学模型写为状态向量的形式, 即

$$\dot{x}_1 = x_2, \quad (35)$$

$$\dot{x}_2 = -2(x_2 - \Omega_r) \left(\frac{x_6}{x_5} - x_4 \tan x_3 \right) - 3\Omega_r^2 \sin x_1 \cos x_1 + \frac{u_1}{\cos(x_3)x_5 m_r}, \quad (36)$$

$$\dot{x}_3 = x_4, \quad (37)$$

$$\dot{x}_4 = -2 \frac{x_6}{x_5} x_4 - [(x_2 - \Omega_r)^2 + 3\Omega_r^2 \cos^2 x_1] \sin x_3 \cos x_3 - \frac{u_2}{x_5 m_r}, \quad (38)$$

$$\dot{x}_5 = x_6, \quad (39)$$

$$\dot{x}_6 = u_3, \quad (40)$$

$$\dot{x}_7 = x_8, \quad (41)$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_8 = & n_x \Omega_r^2 (\sin^2 x_3 - \cos^2 x_3) x_7 + \\ & (n_x + 1) \Omega_r \sin x_3 x_{10} + (1 - n_x) \Omega_r \cos x_3 x_{12} + \\ & \Omega_r \cos x_3 x_4 x_9 - \Omega_r \sin x_3 x_4 x_{11} - \\ & n_x \Omega_r^2 \sin x_3 \cos x_3 + \frac{M_x}{I_x}, \end{aligned} \quad (42)$$

$$\dot{x}_9 = x_{10}, \quad (43)$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_{10} = & n_y \Omega_r \sin x_3 x_9 - (\sin x_3 - n_y \sin x_3) \Omega_r x_8 - \\ & \Omega_r \cos x_3 x_4 x_7 + n_y \Omega_r^2 \sin x_3 \cos x_3 x_{11} - \\ & \Omega_r \sin x_3 x_4 + \frac{M_y}{I_y}, \end{aligned} \quad (44)$$

$$\dot{x}_{11} = x_{12}, \quad (45)$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_{12} = & -n_z \Omega_r^2 \cos^2 x_3 x_{11} + (n_z - 1) \Omega_r \cos x_3 x_8 + \\ & \Omega_r \sin x_3 x_4 x_7 - n_z \Omega_r^2 \sin x_3 \cos x_3 x_9 - \\ & \Omega_r \cos x_3 x_4 + \frac{M_z}{I_z}. \end{aligned} \quad (46)$$

可以将上述 6 自由度状态空间描述式简化为

$$\dot{x} = f(x, x, t) + D + u_s. \quad (47)$$

其中: D 包含各种干扰(包括环境干扰及系绳张力干扰), x 为所有状态变量矢量.

对上述系统设计控制律, 采用滑模变结构控制, 定义误差矢量 $e = x - x_q$, 则 $\dot{e} = \dot{x} - \dot{x}_q$, $\ddot{e} = \ddot{x} - \ddot{x}_q$.

选取切换函数为

$$S = e + \Lambda e, \quad (48)$$

其中 Λ 选取为 6 阶单位矩阵.

系统处于滑动平面 $S = 0$ 时即处于滑动模式, 且滑动模式稳定; 为了使系统从非滑动状态趋近到滑动平面上, 引入指数趋近律

$$\dot{S} = -KS - \varepsilon \operatorname{sgn}(S). \quad (49)$$

其中

$$\begin{aligned} K = & \operatorname{diag}(k_1, \dots, k_6), \varepsilon = \operatorname{diag}(\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_6), \\ k_i > & 0, \varepsilon_i > 0, \operatorname{sgn}(S) = [\operatorname{sgn}(s_1), \dots, \operatorname{sgn}(s_6)]^T. \end{aligned}$$

式(49)中 $-KS$ 为指数趋近项, $-\varepsilon \operatorname{sgn}(S)$ 为等速趋近项; 在指数趋近时, 趋近速度从一个较大值逐步减小到 0, 不仅缩短了趋近时间, 而且使运动点到达切换面时的速度很小; 但对于单纯的指数趋近, 运动点逼近切换面是一个渐近的过程, 不能保证在有限时间内到达, 所以增加等速趋近项后, 当 S 趋近于 0 时, 趋近速度是 ε 而不是 0, 可以保证在有限时间内到达.

将切换函数(48)求导, 并将其代入指数趋近律(49)中, 有

$$\ddot{x} - \ddot{x}_q + \Lambda \dot{e} = -KS - \varepsilon \operatorname{sgn}(S). \quad (50)$$

将系统耦合动力学模型(47)代入(50), 得

$$f(x, x, t) + D + u_s = \ddot{x}_q - \Lambda \dot{e} - KS - \varepsilon \operatorname{sgn}(S). \quad (51)$$

由式(51)可以得到滑模变结构控制律为

$$\begin{aligned} u_s = & -f(x, x, t) - D + \ddot{x}_q - \\ & (\Lambda + K)\dot{e} - K\Lambda e - \varepsilon \operatorname{sgn}(S). \end{aligned} \quad (52)$$

其中 D 为干扰力(干扰力矩), 是未知的, 因此需要进行处理. 考虑到环境干扰力(干扰力矩)和系绳张力干

扰力(干扰力矩)有界, 若估计出 D 的上界为 D_h , 则控制律可以改写为

$$\begin{aligned} u_s = & -f(x, x, t) - D_h \operatorname{sgn}(S) + \ddot{x}_q - \\ & (\Lambda + K)\dot{e} - K\Lambda e - \varepsilon \operatorname{sgn}(S). \end{aligned} \quad (53)$$

在得出空间系绳坐标系上控制力(控制力矩) u_s 后即可间接得到控制力(控制力矩) u' , 最后可以利用式(33)得出操作机器人本体坐标系上 6 个推力器推力 u_T .

根据空间绳系机器人耦合动力学模型及系绳释放机构转角和转动角速度可以估计出空间系绳上存在的张力为 F_t (由式(11)估计出); 设空间系绳与操作机器人连接点与操作机器人质心的距离在本体坐标

系上的表示为 l_x, l_y 和 l_z , $l^x = \begin{bmatrix} 0 & -l_z & l_y \\ l_z & 0 & -l_x \\ -l_y & l_x & 0 \end{bmatrix}$, 所

以空间系绳张力产生的姿态干扰力矩 T_t 可以表示为

$$T_t = l^x C_l [0 \ 0 \ -F_t]^T. \quad (54)$$

2.2.3 6 自由度协调耦合控制器稳定性

定义 Lyapunov 函数

$$V = \frac{1}{2} S^T S, \quad (55)$$

对式(55)求导, 得到

$$\begin{aligned} \dot{V} = & S^T \dot{S} = S^T (\ddot{e} + \Lambda \dot{e}) = \\ & S^T [f(x, x, t) + D + u_s - \ddot{x}_q + \Lambda \dot{e}]. \end{aligned} \quad (56)$$

将式(53)代入(56), 得

$$\begin{aligned} \dot{V} = & S^T (\ddot{e} + \Lambda \dot{e}) = \\ & S^T [-KS - \varepsilon \operatorname{sgn}(S) + D - D_h \operatorname{sgn}(S)] \leq \\ & -S^T K S \leq 0. \end{aligned} \quad (57)$$

由式(57)和 Lyapunov 稳定性理论可知, 该闭环系统全局渐近稳定. 根据滑模变结构理论, 得知在应用此控制律过程中可能存在抖振. K 越大, 趋近速率越快; ε 越大, 抖振越大. 因此增大 K 、减小 ε 可以削弱抖振.

空间系绳释放机构驱动电机转矩控制律稳定性由参数 K_p 和 K_d 决定, 选择合适的参数能够保证 PD 控制律的稳定.

3 数值仿真分析

设空间平台与目标在同一圆轨道上, 空间平台质量为 2000 kg, 操作机器人质量为 50 kg, 空间系绳释放初始绳长 $l_0 = 0.01$ m, 初始放绳速度 $\dot{l}_0 = 2$ m/s, 初始释放面内角 $\alpha_0 = \pi/4$ rad, 初始释放面外角 $\beta_0 = 0$ rad; 将操作机器人抽象为长方体模型的参数为 $l_1 = l_2 = l_3 = 0.8$ m, 空间系绳与操作机器人连接点 $l_x = l_y = 0$ m, $l_z = -0.4$ m; 设推力器推力误差为 $F \pm 0.02F$ (F 为期望推力控制力); 操作机器人的初始姿

态角 $\phi_{l0} = \theta_{l0} = \psi_{l0} = \pi/12 \text{ rad}$, 操作机器人的期望姿态角 $\phi_{lq} = \theta_{lq} = \psi_{lq} = 0 \text{ rad}$;

$$I = \begin{bmatrix} 8 & -0.0025 & -0.00032 \\ -0.0025 & 8 & -0.00086 \\ -0.00032 & -0.00086 & 8 \end{bmatrix};$$

$$A = \text{diag}(0.03, 0.03, 0.03, 0.2, 0.2, 0.2);$$

$$K = \text{diag}(0.1, 0.1, 0.1, 0.5, 0.5, 0.5);$$

$$\varepsilon = \text{diag}(1, 1, 1, 1, 1, 1)e^{-4};$$

推力器最大推力均为 1.5 N, 操作机器人所受的环境干扰

$$D_1 = \begin{cases} \sin(\Omega_r t) \times 10^{-3} \text{ N}, \\ 1.2 \sin(\Omega_r t) \times 10^{-3} \text{ N}, \\ 1.1 \sin(\Omega_r t) \times 10^{-3} \text{ N}, \\ [3 \cos(\Omega_r t) + 1] \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{m}, \\ [1.5 \sin(\Omega_r t) + 3 \cos(\Omega_r t)] \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{m}, \\ [3 \sin(\Omega_r t) + 1] \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{m}; \end{cases}$$

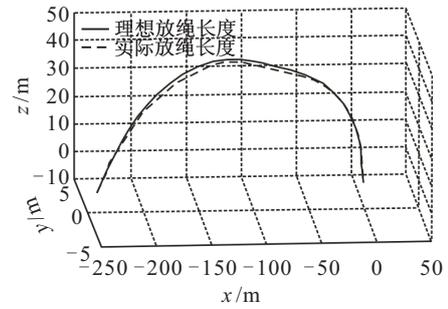
干扰上限

$$D_h = \begin{cases} 0.0015 + 0.05 \text{ N}, \\ 0.0015 + 0.05 \text{ N}, \\ 0.0015 + 0.1 \text{ N}, \\ 0.00004 + 0.001 \text{ N} \cdot \text{m}, \\ 0.00005 + 0.001 \text{ N} \cdot \text{m}, \\ 0.00004 + 0.001 \text{ N} \cdot \text{m}. \end{cases}$$

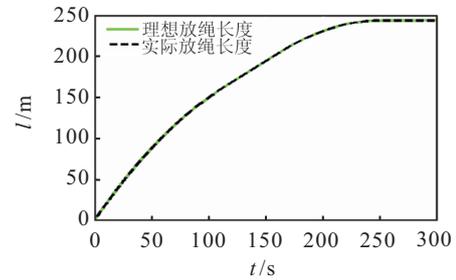
目标轨道参数和空间平台轨道参数中轨道高度为 622 km, 近地点幅角为 20° , 升交点赤经为 0° , 轨道倾角为 10° , 偏心率为 0° ; 真近点角分别为 0.002° 和 0° . 控制参数 $K_p = 0.1$, $K_d = 0.1$, 系绳及机构参数 $EA = 25997 \text{ N}$, $I_r = 7.72e^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, $\gamma = 1$, $d = 0.33 \text{ mm}$, $w_d = 0.06 \text{ m}$, $L_t = 300 \text{ m}$, $D_1 = 0.04 \text{ m}$, $C_d = 2e^{-6}$, $C_t = 0.0$, $T_l = 0.00034 \text{ N} \cdot \text{m}$.

图3(a)为在耦合协调控制情况下操作机器人在空间平台轨道坐标系下的释放轨迹. 可以看出, 考虑空间系绳释放机构特性的耦合协调控制方法可以使操作机器人沿已规划好的最优轨迹较为准确地逼近至目标位置, 虽然在逼近过程中会小范围偏离最优轨迹, 但末端控制精度在 $\pm 0.1 \text{ m}$ 之间, 符合控制精度要求. 图3(b)为释放绳长的比较, 其中理想释放长度为最优轨迹规划模型规划出的理想绳长, 可以看出, 实际绳长与理想绳长变化一致, 说明系绳释放机构控制效果良好.

图4(a)为操作机器人姿态角的变化, 可以看出, 操作机器人本体姿态通过协调耦合控制方法作用可以在 50 s 范围内从初始姿态 15° 跟踪至期望姿态 0° . 在此过程中, 操作机器人姿态运动会受到空间系绳张力干扰力矩、环境干扰力矩的影响, 说明该耦合协调

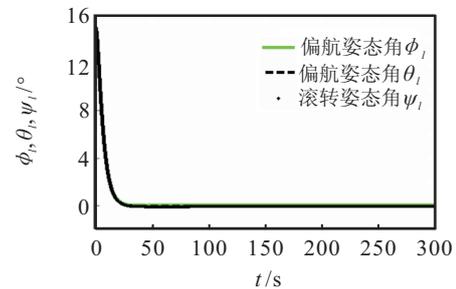


(a) 操作机器人被释放后逼近目标轨迹

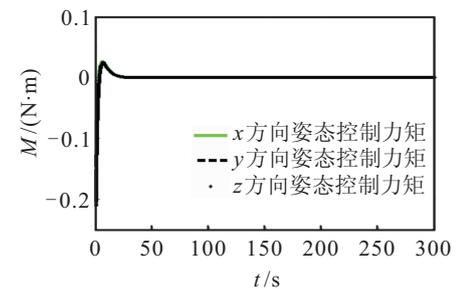


(b) 空间系绳释放长度变化

图3 操作机器人跟踪轨迹示意



(a) 操作机器人姿态角变化



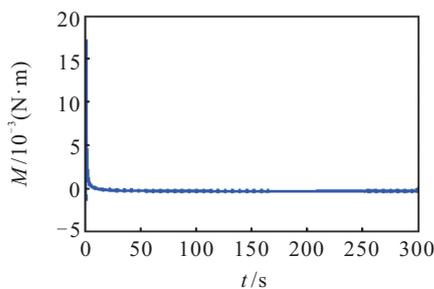
(b) 姿态控制力矩变化

图4 操作机器人姿态控制情况示意

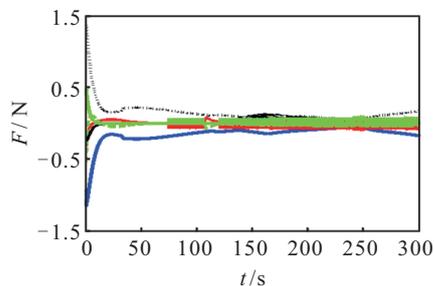
控制方法在存在干扰条件下的姿态跟踪控制上具有很好的跟踪控制效果, 精度在 $\pm 0.2^\circ$ 之间. 图4(b)为操作机器人姿态控制力矩的变化, 可以看出, 在 0~30 s 内, 操作机器人的姿态控制力矩在 $\pm 0.25 \text{ N} \cdot \text{m}$ 之间, 在 30 s 之后姿态控制力矩逐渐趋于零, 说明 0~30 s 是操作机器人姿态角调整控制期, 30 s 后操作机器人的姿态角已逐渐趋于期望姿态角, 控制过程结束, 这与图4(a)相对应.

图5(a)为系绳释放机构驱动电机转矩的变化, 可以看出, 在控制初始阶段, 滚轮驱动电机上的控制力矩保持在 $0.02 \text{ N} \cdot \text{m}$, 并呈逐渐减小的趋势, 在控

制后期, 驱动控制力矩在 $\pm 2 \text{ mN} \cdot \text{m}$ 之间波动. 图 5(b) 为 6 个推力器推力变化的示意图, 1~6 号推力与滚轮驱动电机驱动力矩共同控制操作机器人逼近目标时的轨道姿态运动, 可以看出, 1 号推力器推力保持在 $\pm 1 \text{ N}$ 之间, 2 号推力器推力保持在 $\pm 1.5 \text{ N}$ 之间, 3 号推力器推力保持在 $\pm 1 \text{ N}$ 之间, 4 号推力器推力保持在 $\pm 1.2 \text{ N}$ 之间, 5 号推力器推力保持在 $\pm 0.15 \text{ N}$ 之间, 6 号推力器推力保持在 $\pm 0.7 \text{ N}$ 之间. 在 6 个推力器及滚轮驱动电机共同作用下, 操作机器人达到了跟踪最优轨迹及跟踪期望姿态角的目的.



(a) 操作机器人姿态角变化



(b) 姿态控制力矩变化

图 5 操作机器人姿态控制情况示意

4 结 论

1) 提出一种空间绳系机器人跟踪逼近目标最优轨迹的协调位姿耦合控制方法, 在该方法中考虑了空间系绳释放机构动力学特性, 利用系绳释放机构驱动电机转矩及推力器推力控制实现了耦合位姿的有效跟踪.

2) 提出的协调耦合跟踪控制方法能充分利用空间系绳进行辅助控制, 与空间系绳张力控制方式相比更易于工程实现.

3) 对协调耦合跟踪控制算法进行了数值仿真实验, 结果表明空间绳系机器人利用该算法能有效跟踪已规划好的最优逼近轨迹和期望的姿态.

参考文献(References)

[1] Yuya N, Fumiki S, Shinichi N. Guidance and control of tethered retriever with collaborative tension-thruster control for future on-orbit service missions[C]. The 8th Int Symposium on Artificial Intelligence: Robotics and Automation in Space-ISAIRAS. Munich, 2005: 5-8.

[2] Masahiro N, Nenchev D N, Masaru U. Tethered robot casting using a spacecraft-mounted manipulator[J]. J of Guidance, Control, and Dynamics, 2001, 24(4): 827-833.

[3] Masahiro N. Attitude control of a tethered space robot by link motion under microgravity[C]. Proc of the 2004 IEEE Int Conf on Control Applications. Taipei, 2004: 424-429.

[4] Godard, Kumar K D, Tan B. Fault-tolerant stabilization of a tethered satellite system using offset control[J]. J of Spacecraft and Rockets, 2008, 45(5): 1070-1084.

[5] Osamu M, Saburo M. Coordinated control of tethered satellite cluster systems[C]. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conf and Exhibit. Montreal, 2001: 6-9.

[6] 徐秀栋, 黄攀峰, 孟中杰. 空间绳系机器人逼近目标协调控制方法[J]. 航空学报, 2013, 35(5): 1222-1231. (Xu X D, Huang P F, Meng Z J. Coordinated control method of space tethered robot for approaching targets[J]. Acta Aeronautica & Astronautica Sinica, 2013, 35(5): 1222-1231.)

[7] Kruijff M, van der Heide E J. YES2, the second young engineers satellite a tethered inherently-safe re-entry capsule[C]. The 53th Int Astronautical Congress of the International Astronautical Federation. Houston 2002: IAC-02-P.P.01.

[8] Carlo Menon, Michiel Kruijff, Antonios Vavouliotis. Design and testing of a space mechanism for tether deployment[J]. J of Spacecraft and Rockets, 2007, 44(4): 927-939.

[9] Joseph A Carroll. SEDS deployer design and flight performance[C]. AIAA Space Programs and Technologies Conference and Exhibit. Huntsville, 1993: 93-4764.

[10] Yosuke Nakamura, Hidekazu Hashimoto. Ground test of tether deployment and retrieval along optimal path with a tether reeling mechanism designed for micro-class satellites[C]. The 54th Int Astronautical Congress of the Int Astronautical Federation. Bremen, 2003: 435-442.

[11] Yuji Sakamoto, Tetsuo Yasaka. Study of low-cost orbit determination system for tethered satellites[J]. The J of Space Technology and Science, 2002, 16(1): 1-10.

[12] 周军. 航天器控制原理[M]. 西安: 西北工业大学, 2001. (Zhou J. The theory of spacecraft control[J]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2001.)

[13] Anil V Rao, David A Benson, Geoffrey T Huntington. Algorithm 902: GPOPS, a matlab software for solving multiple-phase optimal control problems using the gauss pseudospectral method[J]. ACM Trans on Mathematical Software, 2010, 37(2): 1-37.

[14] Gill Philip E, Murray Walter, Saunders Michael A. SNOPT: An SQP algorithm for large-scale constrained optimization[J]. SIAM J on Optimization, 2002, 12(4): 979-1006. (责任编辑: 孙艺红)