

空间绳系机器人逼近过程的位姿一体化控制

胡仄虹^{1,2}, 黄攀峰^{1,2,*}, 孟中杰^{1,2}, 马骏^{1,2}

1. 西北工业大学 航天学院 智能机器人研究中心, 陕西 西安 710072

2. 西北工业大学 航天飞行动力学技术重点实验室, 陕西 西安 710072

摘要: 逼近过程的协调控制一直是空间绳系机器人系统研究的重点, 为了弥补传统方法在控制精度和工质消耗等方面的不足, 首先, 基于 Hamilton 原理建立了一种考虑系绳分布质量和作用在系绳上分布力的新型位姿耦合动力学模型; 然后, 使用 hp 自适应伪谱算法求解了逼近过程中最省工质的轨迹和与之对应的理想输入; 最后, 通过 PD 控制器对系统真实状态进行调节使其跟踪上规划的理想轨迹, 从而实现了空间绳系机器人系统位置和姿态的闭环一体化控制。仿真结果表明: 在存在 0.1 m 初始长度偏差和 5° 初始角度偏差的情况下, 设计的控制系统能够实现空间绳系机器人逼近过程的有效控制; 与传统模型相比, 新型位姿耦合模型能够显著提高系统的控制精度; 与位姿分离控制方式相比, 一体化控制方式不仅能够避免产生过大的姿态扰动力矩, 而且能够大幅减少系统的工质消耗。

关键词: 空间绳系; 位姿一体化控制; 最优控制; Hamilton 原理; hp 自适应伪谱算法; PD 控制器

中图分类号: V448.234

文献标识码: A

文章编号: 1000-6893(2013)11-2635-10

随着航天技术的不断发展, 各国对于故障卫星维修、近距离目标捕获、轨道垃圾清理等新型在轨服务技术的需求日益迫切^[1]。对于目前广泛应用的“平台/基座+多自由度机械臂+机械手”构型的刚性空间机器人, 由于其操作距离近、碰撞风险高, 因而在非合作目标操作等方面有着较大的局限性。利用柔性系绳代替多自由度机械臂, 构成由“平台/基座+空间系绳+操作机构”组成的新型空间绳系机器人, 不仅能够大大增加系统的操作距离, 避免空间平台近距离的逼近和停靠机动, 减少工质消耗, 而且能够防止末端碰撞力向平台的传递, 从而大幅度提高空间平台的安全性^[2-3]。

空间绳系机器人的末端操作机构在执行在轨服务任务之前, 需要逼近到目标附近的一个指定位置并保持稳定的相对姿态, 因此如何控制末端

操作机构逼近目标及保持相对姿态是空间绳系机器人系统的关键技术之一。对于总质量和总体积都非常小的末端操作机构, 有限的工质非常宝贵, 因此在进行轨道和姿态控制时, 控制系统的工质消耗是首要考虑的因素之一。为了节省自身工质的消耗, 本文拟研究以“空间系绳+末端操作机构上的推力器”为基础的协调控制方法。

在空间绳系机器人系统的协调控制研究方面, Yuga 等^[4]提出一种分阶段利用系绳拉力及推力器进行协调控制绳系机器人飞行轨迹的方法, 节省了绳系机器人运动过程中的工质消耗; Masahiro 等^[5]提出了利用系绳拉力进行协调控制的方法, 建立了连接点与机器人之间的耦合动力学模型, 通过控制系绳连接点的位置来对系绳拉力的方向进行控制, 从而保证了对于末端操作

收稿日期: 2013-01-22; 退修日期: 2013-04-22; 录用日期: 2013-05-12; 网络出版时间: 2013-05-30 08:38

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20130530.0838.001.html

基金项目: 国家自然科学基金(11272256, 61005062); 航天飞行动力学技术重点实验室开放基金(2012afd022)

* 通讯作者. Tel.: 029-88460366-801 E-mail: pffhuang@nwpu.edu.cn

引用格式: Hu Z H, Huang P F, Meng Z J, et al. Integrated pose control of tethered space robot in approaching process. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013, 34(11): 2635-2644. 胡仄虹, 黄攀峰, 孟中杰, 等. 空间绳系机器人逼近过程的位姿一体化控制. 航空学报, 2013, 34(11): 2635-2644.

机构运动的准确控制,另外,他还提出一种利用“系绳+连杆”的方式来控制空间机器人的姿态^[6];Godard等^[7]提出通过控制两根系绳上辅助质量块对末端绳系卫星的姿态进行协调控制的方法,并提出了在一根系绳发生断裂故障后的协调姿态稳定方法;Mori和Matunaga^[8]针对卫星在面内的旋转运动,利用系绳张力及卫星上的推力器设计了一种协调控制方法,这种方法可以显著减少推力器工质消耗,还可改善控制精度;徐秀栋等^[9]提出了一种“位置规划+反作用飞轮姿态稳定”的协调控制方法,有效地减小了系绳对姿态的干扰,改善了系统的性能。

以上对于空间绳系机器人协调控制的研究虽然考虑了系绳,但都忽略了系绳的分布质量和作用在系绳上的分布力,并只考虑了轨道或姿态中一个方面,或将轨道和姿态分开进行控制。在实际操作过程中,系绳的分布质量和作用在系绳上的分布力必然会造成系统控制精度的下降;轨道与姿态之间的耦合,有可能会引起很大的干扰力,从而造成工质消耗的急剧增加,甚至会导致闭环系统的发散。因此,针对空间绳系机器人系统逼近过程中的协调控制问题,本文在利用Hamilton原理推导建立空间绳系机器人系统新型位姿耦合动力学模型的基础上,提出了一种利用系绳和推力器进行位姿一体化控制的方法,大大节省了末端执行机构的工质消耗,为其执行空间在轨服务做好了准备。

1 空间绳系机器人的耦合动力学模型

1.1 任务描述

对于图1中的空间绳系机器人系统,其执行在轨服务任务的流程为:首先由空间平台搭载柔性系绳和末端操作机构,在地面测控站的导引及平台制导控制单元的控制下逼近至与操作目标距离较近的指定位置(km级);然后由空间平台通过系绳主动释放末端操作机构,同时末端操作机构在自身制导控制单元的控制下自主逼近至距离目标非常近的位置(10 m以内,便于近视场相机捕获目标),并根据对目标卫星的操作位置进行自身姿态调整及稳定;最后由末端操作机构完成要求的在轨服务任务。

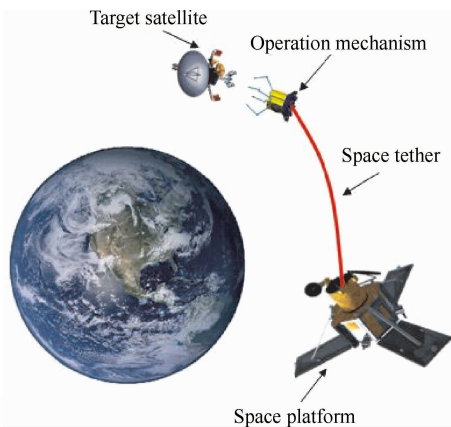


图1 空间绳系机器人系统示意图^[9]

Fig. 1 Sketch map of tethered space robot system^[9]

本文研究的是空间绳系机器人的末端操作机构在被释放后逼近目标过程中的位姿一体化控制问题。末端操作机构由于质量和体积上的严格限制,其轨道和姿态控制机构都仅仅为工作在PWM模式下的推力器(可以产生一定范围内连续变化的推力),推力器工作时需要消耗自身所携带的工质,所以利用系绳进行协调控制以减少推力器的工质消耗就显得非常重要。

1.2 系统描述

对于图1中的空间绳系机器人系统,平台的质量远大于系绳和末端操作机构的质量,因此系绳和末端操作机构的运动对于平台的影响可以忽略不计,所以本文在建模过程中将平台简化为质点,并假设系统的质心与平台的质心重合,且运行在近圆形的开普勒轨道上。对于空间系绳,由于它的长度远大于截面直径,因此本文忽略它的扭转刚度和弯曲刚度,并将它简化为一条长度可变的曲线段。另外,由于本文仅研究对于轨道平面内目标的逼近过程,因此忽略空间绳系机器人系统的面外运动和滚转运动,从而得到了如图2所示的系统简化示意图^[10-11]。

为了描述空间绳系机器人系统的运动,本文建立了3个坐标系:

1) 地心惯性坐标系 $Ox_e y_e z_e$, 原点 O 位于地球中心, x_e 轴指向系统轨道的升交点, z_e 轴指向轨道平面的法向(图中为垂直于纸面向外的方向), y_e 轴由右手定律给出。

2) 平台轨道坐标系 $Px_o y_o z_o$, 原点 P 位于平台的质心, x_o 轴沿轨道切向, 指向系统运动的方向, z_o 轴与原点 P 和地心 O 的连线重合, 指向地心, y_o 轴沿轨道平面负法线方向(图中为垂直于纸面向里的方向)。

3) 操作机构的本体坐标系 $Bx_B y_B z_B$, 原点 B 位于末端操作机构的质心, x_B 轴沿系绳连接点 C 和质心 B 连线的方向, y_B 轴沿轨道平面的负法线方向(图中为垂直于纸面向里的方向), z_B 的方向可由右手定律确定。

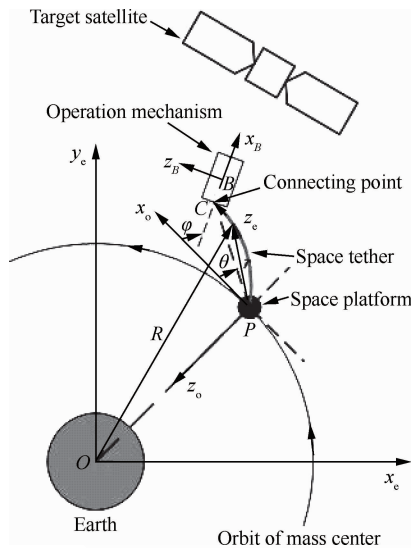


图2 空间绳系机器人系统简化示意图

Fig. 2 Simplified sketch map of tethered space robot system

为了便于描述系绳在空间的运动,引入自然坐标 s , 它表示系绳未变形时,系绳上一点与系绳某一端点之间的绳段长度,为了便于计算,本文统一取系绳存放在平台中的那一端为系绳自然坐标计算的起点,并规定 $\xi(t)$ 为释放点处系绳的自然坐标, L 为末端机器人处系绳的自然坐标,即系绳的总自然长度。于是系绳上点的应变 $\epsilon(s, t)$ 和切向量 $\tau(s, t)$ 分别满足:

$$\epsilon(s, t) = \left\| \frac{\partial \mathbf{R}}{\partial s} \right\| - 1 = \left\| \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial s} \right\| - 1 \quad (\xi \leq s \leq L) \quad (1)$$

$$\tau(s, t) = \frac{\partial \mathbf{R}}{\partial s} / \left\| \frac{\partial \mathbf{R}}{\partial s} \right\| = \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial s} / \left\| \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial s} \right\| \quad (\xi \leq s \leq L) \quad (2)$$

式中: \mathbf{R} 和 \mathbf{r} 为系绳上的点在地心惯性坐标系和平台轨道坐标系中的位置向量。为了便于表达,

后文中分别用 \mathbf{R}_P 、 \mathbf{R}_C 和 \mathbf{R}_B 分别表示点 P 、 C 和 B 在地心惯性坐标系中的位置向量,用 \mathbf{r}_P 、 \mathbf{r}_C 和 \mathbf{r}_B 分别表示点 P 、 C 和 B 在平台轨道坐标系中的位置向量。 \mathbf{r}_{PC} 为点 P 到点 C 的向量, \mathbf{r}_{CB} 为点 C 到点 B 的向量, \mathbf{r}_{OP} 为点 O 到点 P 的向量。另外,图2中 φ 为末端操作机构本体坐标系的 x_B 轴与轨道坐标系的 x_o 轴之间的夹角,它描述了末端操作机构的在轨道平面内的姿态; θ 为向量 \mathbf{r}_{PC} 与 x_o 轴之间的夹角,它表示 \mathbf{r}_{PC} 在平台轨道坐标系下的辐角。

1.3 动力学建模

空间绳系机器人系统在结构上可以分为释放出的系绳、空间平台、储藏的系绳和末端抓捕机构4部分,因此它的动能 T 满足:

$$T = \int_{\xi}^L \frac{1}{2} \mu \dot{\mathbf{R}}^T \dot{\mathbf{R}} ds + \frac{1}{2} m_P \dot{\mathbf{R}}_P^T \dot{\mathbf{R}}_P + \frac{1}{2} \mu \xi \dot{\mathbf{R}}_P^T \dot{\mathbf{R}}_P + \frac{1}{2} m_B \dot{\mathbf{R}}_B^T \dot{\mathbf{R}}_B + \frac{1}{2} I_B (\dot{\varphi} - \omega)^2 \quad (3)$$

式中: μ 为系绳的线密度; m_P 和 m_B 分别为空间平台和末端操作机构的质量; I_B 为末端操作机构绕 y_B 轴转动的转动惯量; ω 为系统运动的轨道角速度。系统的势能 V 满足:

$$V = \int_{\xi}^L \left(V_e - \mu \frac{GM}{\|\mathbf{R}\|} \right) ds - m_P \frac{GM}{\|\mathbf{R}_P\|} - \mu \xi \frac{GM}{\|\mathbf{R}_P\|} - m_B \frac{GM}{\|\mathbf{R}_B\|} \quad (4)$$

式中: G 为万有引力常数; M 为地球的质量; V_e 为系绳的弹性势能,其表达式为

$$V_e(s, t) = \frac{1}{2} EA \epsilon(s, t)^2 \quad (5)$$

式中: E 为系绳的弹性模量; A 为系绳的截面积。系统中的非保守力为系绳中的阻尼力和空间平台与末端操作机构上的控制力,故系统非保守力的虚功 δW 满足:

$$\delta W = \int_{\xi}^L (-N_D \delta \epsilon) ds + \delta \mathbf{R}_P^T \mathbf{F}_P + \delta \mathbf{R}_B^T \mathbf{F}_B + M_B \delta \varphi \quad (6)$$

式中: δ 为变分运算符; \mathbf{F}_P 、 \mathbf{F}_B 和 M_B 分别为作用在空间平台和末端操作机构上的机动力及末端操作机构上的控制力矩; N_D 为系绳中的阻尼力,其表达式为

$$N_D = \alpha EA \dot{\epsilon} \quad (7)$$

式中: α 为系绳的阻尼系数。

由 Hamilton 原理可知,空间绳系机器人系统的运动满足方程^[12-13]:

$$\int_0^t (\delta T - \delta V + \delta W) dt = 0 \quad (8)$$

式中: t 为系统时间变量。将式(3)、式(4)和式(6)代入式(8),通过分部积分运算进行化简可得:

$$\int_0^t \left\{ \int_{\xi}^L (-\mu \mathbf{A}^T \delta \mathbf{R} - \mathbf{n}^T \delta \mathbf{R}') ds + \delta \mathbf{R}_P^T \left[-(m_P + \mu \xi) \mathbf{A}_P - \mu \dot{\xi}^2 \frac{\partial \mathbf{R}(\xi)}{\partial s} + \mathbf{F}_P \right] + \delta \mathbf{R}_C^T (-m_B \mathbf{A}_B + \mathbf{F}_B) + \delta \varphi (-I_B \ddot{\varphi} + M_B) \right\} dt = 0 \quad (9)$$

式中: \mathbf{n} 为系绳中的张力矢量,其表达式为

$$\mathbf{n}(s, t) = E \mathbf{A} (\epsilon(s, t) + \alpha \dot{\epsilon}(s, t)) \boldsymbol{\tau}(s, t) \quad (10)$$

\mathbf{A} 为除万有引力外的机动力所引起的机动力加速度,其表达式为

$$\mathbf{A} = \ddot{\mathbf{R}} + \frac{GM}{\|\mathbf{R}\|^3} \mathbf{R} \quad (11)$$

\mathbf{A}_P 和 \mathbf{A}_B 分别为 \mathbf{R}_P 和 \mathbf{R}_B 处的机动力加速度。由变分的任意性可得:

$$\int_{\xi}^L (-\mu \mathbf{A}^T \delta \mathbf{R} - \mathbf{n}^T \delta \mathbf{R}') ds + \delta \mathbf{R}_P^T \left[-(m_P + \mu \xi) \mathbf{A}_P - \mu \dot{\xi}^2 \mathbf{R}'(\xi) + \mathbf{F}_P \right] + \delta \mathbf{R}_C^T (-m_B \mathbf{A}_B + \mathbf{F}_B) + \delta \varphi (-I_B \ddot{\varphi} + M_B) \equiv 0 \quad (12)$$

由于矢量 \mathbf{R} 中包含了系统的轨道运动,因而无法直接利用式(12)来描述空间绳系机器人系统逼近目标过程的运动,所以本文考虑将式(12)转换到平台轨道坐标系 $Px_o y_o z_o$ 下进行计算。由图2可知,

$$\mathbf{R} = \mathbf{r} + \mathbf{r}_{OP} \quad (13)$$

另外,由 C-W 方程可知,对于近圆形轨道,在距离较短(< 20 km)时,除万有引力外的机动力所引起的加速度满足:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \ddot{x} - 2\omega \dot{z} \\ \ddot{z} + 2\omega \dot{x} - 3\omega^2 z \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中: x 和 z 为点在轨道坐标系下的坐标,即 $\mathbf{r} = [x \ z]^T$ 。将式(13)代入式(12)可得:

$$\int_{\xi}^L (-\mu \mathbf{A}^T \delta \mathbf{r} - \mathbf{n}^T \delta \mathbf{r}') ds + \delta \mathbf{r}_P^T \left[-(m_P + \mu \xi) \mathbf{A}_P - \mu \dot{\xi}^2 \frac{\partial \mathbf{r}(\xi)}{\partial s} + \mathbf{F}_P \right] +$$

$$\delta \mathbf{r}_C^T (-m_B \mathbf{A}_B + \mathbf{F}_B) + \delta \varphi (-I_B \ddot{\varphi} + M_B) = 0 \quad (15)$$

为了便于对系绳进行离散处理,引入无量纲变量自然长度 \bar{s} , 令

$$\bar{s} = \frac{1}{l_0} (s - \xi) \quad (16)$$

式中: l_0 为平台释放的系绳的自然长度,满足 $l_0 = L - \xi$,从而将系绳的求解域由 $[\xi, L]$ 变换到 $[0, 1]$ 。另外,为了便于区分,将采用变量 \bar{s} 描述的位置矢量 \mathbf{r} 和机动力加速度 \mathbf{A} 分别记为 $\bar{\mathbf{r}}(\bar{s}, t)$ 和 $\bar{\mathbf{A}}$, 同时将采用变量 \bar{s} 描述的坐标 x 和 z 分别记为 \bar{x} 和 \bar{z} 。利用 \bar{s} 替换式(15)中积分变量可得:

$$\int_0^1 (-\mu l_0 \bar{\mathbf{A}}^T \delta \bar{\mathbf{r}} - \mathbf{n}^T \delta \bar{\mathbf{r}}') ds + \delta \mathbf{r}_P^T \left[-(m_P + \mu \xi) \mathbf{A}_P - \frac{\mu \dot{\xi}^2}{l_0} \mathbf{r}'(0) + \mathbf{F}_P \right] + \delta \mathbf{r}_C^T (-m_B \mathbf{A}_B + \mathbf{F}_B) + (-I_B \ddot{\varphi} + M_B) \delta \varphi = 0 \quad (17)$$

式中: $\bar{\mathbf{A}} = [\bar{A}_x \ \bar{A}_z]^T$, \bar{A}_x 和 \bar{A}_z 分别为机动力加速度 $\bar{\mathbf{A}}$ 沿轨道坐标的 x_o 轴和 z_o 轴的分量,它们满足:

$$\begin{aligned} \bar{A}_x &= \ddot{\bar{x}} + 2(1-\bar{s}) \frac{\dot{l}_0}{l_0} \dot{\bar{x}}' + (1-\bar{s})^2 \frac{\dot{l}_0^2}{l_0^2} \bar{x}'' + \\ &\quad (1-\bar{s}) \frac{\dot{l}_0}{l_0} \bar{x}' - 2(1-\bar{s}) \frac{\dot{l}_0^2}{l_0^2} \bar{x}' - \\ &\quad 2\omega \left[\dot{\bar{z}} + \frac{\dot{l}_0}{l_0} (1-\bar{s}) \bar{z}' \right] \\ \bar{A}_z &= \ddot{\bar{z}} + 2(1-\bar{s}) \frac{\dot{l}_0}{l_0} \dot{\bar{z}}' + (1-\bar{s})^2 \frac{\dot{l}_0^2}{l_0^2} \bar{z}'' + \\ &\quad (1-\bar{s}) \frac{\dot{l}_0}{l_0} \bar{z}' - 2(1-\bar{s}) \frac{\dot{l}_0^2}{l_0^2} \bar{z}' + \\ &\quad 2\omega \left[\dot{\bar{x}} + \frac{\dot{l}_0}{l_0} (1-\bar{s}) \bar{x}' \right] - 3\omega^2 \bar{z} \end{aligned}$$

而 \mathbf{A}_P 和 \mathbf{A}_B 的表达式不变。

1.4 动力学模型的离散

虽然式(17)描述了空间绳系机器人系统的运动,但由于它包含了连续系绳的运动,因而不能直接用来进行控制器的设计,需要进行离散处理。为此,本文引入了以下2个假设:

- 1) 假设空间系绳在逼近过程中可近似为一条直线,从而可以使用线性函数对系绳进行插值。
- 2) 假设系绳材料的弹性模量 $E \rightarrow \infty$, 从而可以认为系绳的应变 $\epsilon \rightarrow 0$ 。

由假设 1)可知,系绳上点的位置向量 $\bar{\mathbf{r}}$ 近似满足:

$$\bar{\mathbf{r}}(\bar{s}, t) \approx [1 - \bar{s} \quad \bar{s}]^T \begin{bmatrix} \mathbf{r}_P(t) \\ \mathbf{r}_C(t) \end{bmatrix} \quad (18)$$

由轨道坐标系的定义可知,平台质心 P 满足:

$$\mathbf{r}_P(t) \equiv [0 \quad 0]^T \quad (19)$$

另外,末端操作机构质心 B 的位置向量 \mathbf{r}_B 满足:

$$\mathbf{r}_B = \mathbf{r}_C + \mathbf{r}_{CB} = \begin{bmatrix} x_C + d \cos \varphi \\ z_C - d \sin \varphi \end{bmatrix} \quad (20)$$

式中: $d = |\mathbf{r}_{CB}|$ 为点 C 与质心 B 之间的距离。

将式(18)、式(19)和式(20)代入式(17)可得:

$$\begin{bmatrix} \delta x_C \\ \delta z_C \end{bmatrix}^T \left\{ -\mu l_0 \left\{ \mathbf{M} \begin{bmatrix} \ddot{x}_C \\ \ddot{z}_C \end{bmatrix} + \left(2 \frac{\dot{l}_0}{l_0} \mathbf{C}_1 + \mathbf{C}_2 \right) \begin{bmatrix} \dot{x}_C \\ \dot{z}_C \end{bmatrix} + \left[\left(\frac{\dot{l}_0}{l_0} - 2 \frac{\dot{l}_0^2}{l_0^2} \right) \mathbf{K}_1 + \frac{\dot{l}_0}{l_0} \mathbf{K}_2 + \mathbf{K}_3 \right] \begin{bmatrix} x_C \\ z_C \end{bmatrix} \right\} - \bar{N} \bar{\boldsymbol{\tau}} + \mathbf{R}_F \begin{bmatrix} F_{Bx} \\ F_{Bz} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_x \\ C_z \end{bmatrix} \right\} + [-I_B \ddot{\varphi} + M_B + C_\varphi] \delta \varphi = 0 \quad (21)$$

式中: \mathbf{M} 为系统的等效质量矩阵; \mathbf{C}_1 和 \mathbf{C}_2 为等效阻尼矩阵; \mathbf{K}_1 、 \mathbf{K}_2 和 \mathbf{K}_3 为等效刚度矩阵,其表达式分别为

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \frac{1}{3} + k & 0 \\ 0 & \frac{1}{3} + k \end{bmatrix}, \mathbf{C}_1 = \begin{bmatrix} -\frac{1}{3} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{3} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C}_2 = 2\omega \begin{bmatrix} 0 & \frac{-1}{3} - k \\ \frac{1}{3} + k & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{K}_1 = \begin{bmatrix} -\frac{1}{3} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{3} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{K}_2 = 2\omega \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{K}_3 = 3\omega^2 \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{3} - k \end{bmatrix}$$

其中: k 为末端操作机构与系绳的质量比,即:

$$k = \frac{m_B}{\mu l}$$

其中: l 为轨道坐标系原点 P 和系绳连接点 C 之间的距离,即 $l = |\mathbf{r}_{PC}|$ 。 \bar{N} 和 $\bar{\boldsymbol{\tau}}$ 分别为“直线假设”条件下系绳中张力的大小和单位方向向量,其表达式为

$$\begin{cases} \bar{N} = EA \left(\frac{l}{l_0} - 1 + \alpha \frac{\dot{l}_0 - \dot{l}_0}{l_0^2} \right), \\ \bar{\boldsymbol{\tau}} = [\cos \theta \quad -\sin \theta]^T \end{cases}$$

F_{Bx} 和 F_{Bz} 分别为控制力 \mathbf{F}_B 沿 x_B 轴和 z_B 轴的分量, \mathbf{R}_F 为对应的转换矩阵,其表达式为

$$\mathbf{R}_F = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix}$$

C_x 、 C_z 和 C_φ 分别为空间绳系机器人系统沿 x_0 轴和 z_0 轴平动及末端操作机构绕 y_B 轴转动的位姿耦合项,其表达式为

$$\begin{cases} C_x = m_R (d \dot{\varphi}^2 \cos \varphi + d \ddot{\varphi} \sin \varphi - 2\omega d \dot{\varphi} \cos \varphi) \\ C_z = m_R (-d \dot{\varphi}^2 \sin \varphi + d \ddot{\varphi} \cos \varphi + 2\omega d \dot{\varphi} \sin \varphi - 3\omega^2 d \sin \varphi) \\ C_\varphi = -d (p_x \sin \varphi + p_z \cos \varphi) \end{cases}$$

式中: p_x 和 p_z 为位姿耦合力沿 x_0 轴和 z_0 轴的分量,其表达式为

$$\begin{bmatrix} p_x \\ p_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -m_B (\ddot{x} - 2\omega \dot{z}) \\ -m_B (\ddot{z} + 2\omega \dot{x} - 3\omega^2 z) \end{bmatrix} + \mathbf{R}_F \begin{bmatrix} F_{Bx} \\ F_{Bz} \end{bmatrix}$$

由式(21)可知系绳连接点 C 的运动满足方程:

$$\begin{aligned} & -\mu l_0 \left\{ \mathbf{M} \begin{bmatrix} \ddot{x}_C \\ \ddot{z}_C \end{bmatrix} + \left(2 \frac{\dot{l}_0}{l_0} \mathbf{C}_1 + \mathbf{C}_2 \right) \begin{bmatrix} \dot{x}_C \\ \dot{z}_C \end{bmatrix} + \left[\left(\frac{\dot{l}_0}{l_0} - 2 \frac{\dot{l}_0^2}{l_0^2} \right) \mathbf{K}_1 + \frac{\dot{l}_0}{l_0} \mathbf{K}_2 + \mathbf{K}_3 \right] \begin{bmatrix} x_C \\ z_C \end{bmatrix} \right\} - \\ & \bar{N} \bar{\boldsymbol{\tau}} + \mathbf{R}_F \begin{bmatrix} F_{Bx} \\ F_{Bz} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_x \\ C_z \end{bmatrix} = \mathbf{0} \end{aligned} \quad (22)$$

末端操作机构的姿态运动满足方程:

$$-I_B \ddot{\varphi} + M_B + C_\varphi = 0 \quad (23)$$

为了进一步分离系绳的纵向运动和横向运动,将系绳连接点 C 的坐标写为极坐标形式有:

$$\begin{bmatrix} x_C \\ z_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l \cos \theta \\ -l \sin \theta \end{bmatrix} \quad (24)$$

将式(24)代入式(22)可得:

$$\begin{aligned} & -\mu l_0 \left\{ \begin{bmatrix} \ddot{l} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} + (\mathbf{M} \mathbf{R}_2)^{-1} \mathbf{M} \mathbf{R}_3 \begin{bmatrix} 2\dot{\theta} \\ \dot{\theta}^2 \end{bmatrix} + \right. \\ & \left. (\mathbf{M} \mathbf{R}_2)^{-1} \left(2 \frac{\dot{l}_0}{l_0} \mathbf{C}_1 + \mathbf{C}_2 \right) \mathbf{R}_2 \begin{bmatrix} \dot{l} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} + \right. \\ & \left. (\mathbf{M} \mathbf{R}_2)^{-1} \left[\left(\frac{\dot{l}_0}{l_0} - 2 \frac{\dot{l}_0^2}{l_0^2} \right) \mathbf{K}_1 + \frac{\dot{l}_0}{l_0} \mathbf{K}_2 + \mathbf{K}_3 \right] \mathbf{R}_1 l \right\} - \\ & (\mathbf{M} \mathbf{R}_2)^{-1} \left[\bar{N} \bar{\boldsymbol{\tau}} + \mathbf{R}_F \begin{bmatrix} F_{Bx} \\ F_{Bz} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_x \\ C_z \end{bmatrix} \right] = \mathbf{0} \end{aligned} \quad (25)$$

式中: \mathbf{R}_1 、 \mathbf{R}_2 和 \mathbf{R}_3 为对应的变换矩阵,它们满足:

$$\mathbf{R}_1 = \begin{bmatrix} \cos \theta \\ -\sin \theta \end{bmatrix}, \mathbf{R}_2 = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ -\sin \theta & -\cos \theta \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{R}_3 = \begin{bmatrix} -\sin \theta & -\cos \theta \\ -\cos \theta & \sin \theta \end{bmatrix}$$

另外,由假设 1)可知,系绳上的应变满足:

$$\varepsilon = \frac{l}{l_0} - 1 \quad (26)$$

由假设 2)可知 $\varepsilon \rightarrow 0$, 故 $l \rightarrow l_0$, 而本文将系绳的释放加速度 \dot{l}_0 作为控制输入之一, 因此有:

$$\dot{l} = \dot{l}_0 \quad (27)$$

于是式(25)中关于 \dot{l} 的部分就失去了意义, 从中抽离出来关于 $\dot{\theta}$ 的部分并进行整理可得:

$$m^* \ddot{\theta} + m_B d \ddot{\varphi} \cos(\varphi - \theta) = F_{\theta}^* \quad (28)$$

式中: m^* 和 F_{θ}^* 分别为空间绳系机器人系统沿 θ 正方向运动的等效质量和等效力, 它们满足:

$$\begin{cases} m^* = m_B + \frac{1}{3} \mu l \\ F_{\theta}^* = F_{Bx} \sin(\varphi - \theta) - F_{Bz} \cos(\varphi - \theta) + \\ m_B C_{2\theta} - 2m_B \dot{l} \dot{\theta} + 2m_B \omega \dot{l} + 3m^* \omega^2 \sin \theta \cos \theta \end{cases}$$

式中: $C_{2\theta}$ 为在对二阶项进行分离后, 系统沿 θ 正方向运动的位姿耦合项, 其表达式为

$$C_{2\theta} = d \dot{\varphi}^2 \sin(\varphi - \theta) - 2\omega d \dot{\varphi} \sin(\varphi - \theta) + 3\omega^2 d \cos \theta \sin \varphi$$

根据式(24)和式(27)对式(23)进行整理可得:

$$m_B l d \ddot{\theta} \cos(\varphi - \theta) + (I_B + m_B d^2) \ddot{\varphi} = M_{\varphi}^* \quad (29)$$

式中: M_{φ}^* 为系统绕 y_B 轴转动的等效力矩, 其表达式为

$$M_{\varphi}^* = F_M d_M + C_{2\varphi}$$

式中: F_M 和 d_M 为姿控单元提供的控制力和对应的力臂长度; $C_{2\varphi}$ 为在对二阶项进行分离后, 末端操作机构绕 y_B 轴转动的位姿耦合项, 其表达式为

$$\begin{aligned} C_{2\varphi} = & -F_{Bz} d + m_B d \dot{l}_0 \sin(\varphi - \theta) \\ & 2m_B d \dot{l} \dot{\theta} \cos(\varphi - \theta) - m_B d \dot{l} \dot{\theta}^2 \sin(\varphi - \theta) + \\ & 2\omega m_B d \dot{l} \cos(\varphi - \theta) + 2\omega m_B d \dot{l} \dot{\theta} \sin(\varphi - \theta) + \\ & 3\omega^2 m_B (d^2 \sin \varphi \cos \varphi + l d \sin \theta \cos \varphi) \end{aligned}$$

通过联立式(28)和式(29)可以求解得出系统运动的二阶项 $\ddot{\theta}$ 和 $\ddot{\varphi}$, 即

$$\begin{bmatrix} \ddot{\theta} \\ \ddot{\varphi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{\theta}(l, \dot{l}, \theta, \dot{\theta}, \varphi, \dot{\varphi}, \dot{l}_0, F_{Bx}, F_{Bz}, F_M) \\ f_{\varphi}(l, \dot{l}, \theta, \dot{\theta}, \varphi, \dot{\varphi}, \dot{l}_0, F_{Bx}, F_{Bz}, F_M) \end{bmatrix} \quad (30)$$

式中: f_{θ} 和 f_{φ} 为联立求解出的表达式。进一步可以得到系统的状态方程为

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{F}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \quad (31)$$

式中: \mathbf{x} 为系统的状态变量, 它满足:

$$\mathbf{x} = [l \quad \dot{l} \quad \theta \quad \dot{\theta} \quad \varphi \quad \dot{\varphi}]^T$$

\mathbf{u} 为系统的控制变量, 它满足:

$$\mathbf{u} = [\dot{l}_0 \quad F_{Bx} \quad F_{Bz} \quad F_M]^T$$

\mathbf{F} 为系统的状态函数, 它满足:

$$\mathbf{F} = [\dot{\theta} \quad f_{\theta} \quad \dot{\varphi} \quad f_{\varphi} \quad \dot{l} \quad \dot{l}_0]^T$$

从而得到了系统运动的简化模型, 该简化模型与传统的无质量杆模型相比, 考虑了系绳的分布质量和系绳上的科氏力及重力梯度力, 更加能够突出空间绳系机器人系统的运动特点。

2 最优控制器的设计

2.1 工质最省问题

将空间绳系机器人系统的逼近问题看做最优控制问题: 寻找最优控制变量 $\mathbf{u}(t) \in \mathbf{R}^4$, 在满足约束条件的情况下, 使得消耗的工质达到最少。

针对空间绳系机器人系统, 由于系绳的释放加速度主要由平台上的释放机构进行控制, 消耗的主要是平台所储存的电能(若需要系绳进行加速释放, 则需要末端推力器提供沿系绳方向的推力, 本文通过在规划过程中引入一定的约束强制要求 $\dot{l}_0 < 0$, 从而避免了加速释放的情况), 因此在分析系统工质消耗时只需要考虑另外 3 个控制量, 于是空间绳系机器人系统逼近目标过程中的性能指标 J 可以写为

$$J = \int_0^{t_f} \frac{1}{2} (F_{Bx}^2 + F_{Bz}^2 + F_M^2) dt \quad (32)$$

式中: t_f 为逼近过程的持续时间。

在约束方面, 空间绳系机器人系统在逼近目标过程中需要满足相应的动力学约束条件, 即状态方程式(31)。另外, 由于逼近过程中末端抓捕机构的姿态需要满足一定的要求, 因此系统需要满足状态约束:

$$\varphi_{\min} \leq \varphi \leq \varphi_{\max} \quad (33)$$

式中: φ_{\min} 和 φ_{\max} 分别为末端操作机构姿态角的下限和上限。由于释放机构的性能及推力器的上限等因素的限制, 因此系统的控制变量 $\mathbf{u}(t)$ 需要满足约束:

$$\mathbf{u}_{\min} \leq \mathbf{u}(t) \leq \mathbf{u}_{\max} \quad (34)$$

式中: \mathbf{u}_{\min} 和 \mathbf{u}_{\max} 分别为系统所能提供的控制变量的最小值和最大值。式(33)和式(34)构成了系统运动的路径约束条件。同时, 由于初始状态及末端交会条件的限制, 因此系统还需要边界约束条件:

$$\begin{cases} \mathbf{x}(t_f) = \mathbf{x}_f \\ \mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0 \end{cases} \quad (35)$$

式中: \mathbf{x}_0 为系统的初始状态; \mathbf{x}_f 为系统理想的终端状态。

2.2 hp 自适应伪谱算法

hp 自适应伪谱算法对经典的 Gauss 伪谱算法和有限元法进行了结合,相对传统的 Gauss 伪谱算法,它在求解复杂的非光滑问题时,精度更高且收敛速度更快。考虑到空间绳系机器人系统在逼近过程中,系绳的释放加速度和末端操作机构的推力都有可能发生的突变,因此本文采用 hp 自适应伪谱算法求解最省工质逼近问题。

针对式(32)~式(35)构成复杂的最优控制问题, hp 自适应伪谱算法首先将时域区间分为若干段,并在每段上选取一定数量的 Legendre-Gauss 点作为配点,然后在每个单元上利用 Lagrange 多项式逼近系统的状态变量和控制变量,并通过插值函数的微分和被积函数的高斯积分来近似系统的状态微分和性能指标,从而将连续的最优控制问题转化为离散的非线性规划问题,最后通过使用自适应的配点调整策略和相关的规划求解算法求解离散后的非线性规划问题,从而实现对于最优控制问题的求解,其具体步骤可参见文献[14]~文献[16]。在实际求解过程中,本文使用 GPOPS 软件包(Version 5.0)。

2.3 闭环控制器

通过伪谱算法求解最省工质问题,可以得到空间绳系机器人系统逼近目标的最优轨迹。为了保证系统能够沿着规划的轨迹逼近目标,本文设计了如图3所示的闭环控制系统,它将最优轨迹对应的状态值和输入值作为系统的理想状态和理想

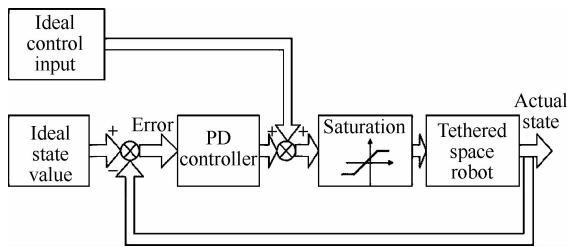


图3 闭环控制系统示意图

想输入,通过 PD 控制器对系统真实状态与理想状态之间的偏差进行转化,并以理想输入和 PD 控制器输出的和作为闭环控制器的输出。

对于空间绳系机器人系统,由于绳长 l 完全由释放加速度 \ddot{l}_0 进行控制,面内偏角 θ 主要由推力 F_x 和 F_z 进行控制,而末端操作机构的姿态角则主要由姿态推力器的推力 F_M 进行控制,因此系统的闭环控制律可以写为

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}^* + \mathbf{R}_d \mathbf{K}_{PD} (\mathbf{x} - \mathbf{x}^*) \quad (36)$$

式中: \mathbf{x}^* 和 \mathbf{u}^* 分别为最优轨迹所对应的理想状态值和理想输入值; \mathbf{R}_d 为控制器的分配矩阵,其表达式为

$$\mathbf{R}_d = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ \sin(\varphi - \theta) & 0 & 0 \\ \cos(\varphi - \theta) & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

\mathbf{K}_{PD} 为 PD 控制器的参数矩阵,它满足:

$$\mathbf{K}_{PD} = \begin{bmatrix} k_{p\theta} & k_{d\theta} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_{p\varphi} & k_{d\varphi} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & k_{pl} & k_{dl} \end{bmatrix}$$

式中: $k_{p\theta}$ 和 $k_{d\theta}$ 分别为 θ 通道的比例系数和微分系数; $k_{p\varphi}$ 和 $k_{d\varphi}$ 分别为 φ 通道的比例系数和微分系数; k_{pl} 和 k_{dl} 分别为 l 通道的比例系数和微分系数。

3 仿真验证

设某一空间绳系机器人系统运行在轨道高度为 500 km 的圆形轨道上,其末端操作机构的质量为 2 kg,转动惯量为 $0.1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$,系绳的线密度为 0.0045 kg/m ,系绳点 C 与质心 B 之间的距离为 0.3 m,姿态控制器的力臂为 0.2 m,系绳释放加速度范围为 $[-0.2, 0.1] \text{ m/s}^2$,推力器能够提供的最大推力为 200 mN。

为了防止控制系统轻易地进入深度饱和状态,在利用 hp 自适应伪谱算法进行求解时,设定系绳释放加速度的范围为 $[-0.20, -0.02] \text{ m/s}^2$,推力器的最大推力为 150 mN,姿态角的摆动范围为 $[-1^\circ, 1^\circ]$,末端抓捕机构的初始位置为 $[1 \ 0 \ 0]^T \text{ m}$,初始速度为 $[10 \ 0 \ 0]^T \text{ m/s}$,抓捕位置为 $[1 \ 000 \ 0 \ -1 \ 000]^T \text{ m}$,抓捕点处速度为 $[0 \ 0 \ 0]^T \text{ m/s}$,逼近过程的持续时间为 250 s。

为了验证控制系统的正确性,在进行闭环控

制时,引入 0.1 m 的系绳长度偏差,5°的面内摆角偏差和 5°的姿态角偏差,于是设定抓捕机构的初始位置为 $[1.0958 \ 0 \ -0.0959] \text{ m}$,初始速度不变。另外,取 PD 控制器的参数矩阵 \mathbf{K}_{PD} 为

$$\mathbf{K}_{\text{PD}} = \begin{bmatrix} 200 & 400 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 200 & 30 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 200 & 50 \end{bmatrix}$$

为了分析传统无质量刚性杆模型与本文提出的考虑系绳分布质量和分布力的模型之间差别,在相同的条件和要求下,使用 hp 自适应伪谱算法求解了两种模型所对应的最优控制律,并将求得的控制律代入本文所建立的模型中进行仿真,最终的结果如图 4 所示。通过仿真结果的对比可知,由于未考虑系绳的分布质量和作用在系绳上的分布力,直接使用无质量刚性杆模型所对应的最优控制律进行控制,会使得末端操作机构在逼近过程结束之后出现高达 174 m 的位置偏差,相对本文模型 3.34 m 的位置偏差,它不仅在数值上高出一个数量级,而且也远未达到系统对于逼近过程的精度要求($\leq 10 \text{ m}$)。

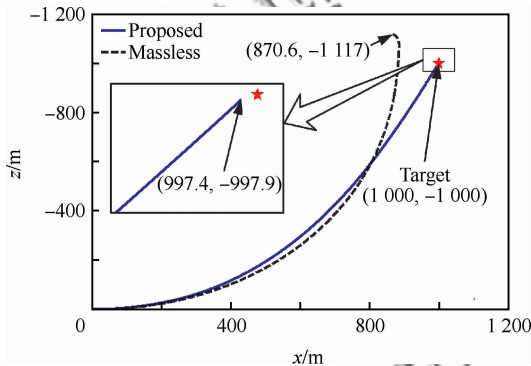


图 4 末端操作机构的轨迹

Fig. 4 Trail of terminal operation mechanism

为了对比“位置规划+姿态稳定”(采用无质量刚性杆模型)的控制方式与本文提出的位姿一体化控制(采用位姿耦合动力学模型)之间的不同,图 5 给出了使用 hp 自适应伪谱算法求解出的控制量,图 6 给出了两种控制方式工质消耗的对比如。由图 5 可知,两种控制方式在系绳控制方面都采用了“减速-保持-减速”的策略,在进行第 1 次减速时,由于 $|\theta - \varphi|$ 较小,两种控制方式都采用了 -0.2 m/s^2 的加速度进行减速,但考虑到 $|\theta - \varphi|$ 随着时间逐渐增大,位姿一体化控制的

减速过程持续的时间短了 2 s;在进行第 2 次减速时,由于 $|\theta - \varphi|$ 非常大,因此位姿一体化控制采用采用长时间缓慢减速的策略(从 150 s 开始加速度由 -0.02 m/s^2 逐渐改变为 -0.095 m/s^2),从而避免出现较大的姿态扰动力矩,而传统的方式依然采用了 -0.2 m/s^2 的加速度进行减速,这不仅会使得系统中出现很大的姿态扰动力矩,而且也需求解姿态控制力超出推力器的推力上限,从而使得闭环系统发散;另外,由于考虑末端执行机构的姿态和系绳的分布质量,位姿一体化控制所需要的位置控制力 F_{Bx} 和 F_{Bz} 要略大于传统的控制方式。由图 6 可知,使用位姿一体化控制,虽然 F_{Bx} 和 F_{Bz} 所消耗的工质要增大一些,但姿态控制器的工质消耗可以大大减少,总体上可以减少 40% 的工质消耗,这也验证了对于图 5 的分析。

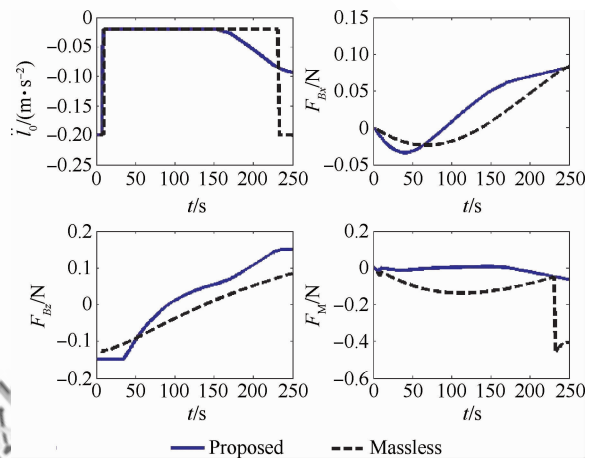


图 5 hp 自适应伪谱算法求解的控制律

Fig. 5 Control law solved by hp-adaptive pseudospectral method

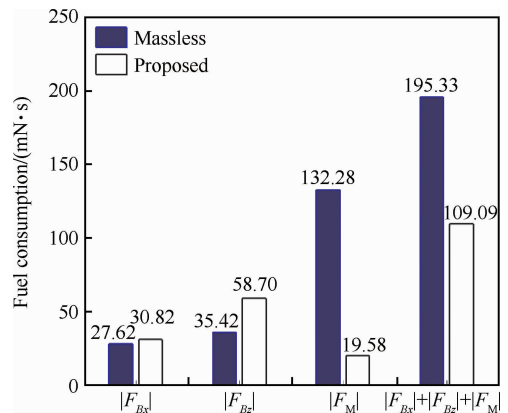


图 6 推力器的工质消耗

Fig. 6 Fuel consumption of thrusters

图 7 给出了系绳的初始长度 l 存在 0.1 m 偏差且初始面内摆角 θ 和初始姿态角 φ 都存在 5° 偏差的情况下,闭环系统的状态变化曲线和系统误差的变化曲线,图中 θ^* 、 φ^* 和 l^* 分别为面内摆角 θ 、姿态角 φ 和系绳长度 l 的理想值,由图可知, l 、 φ 和 θ 在闭环控制系统的作用下,都能够快速地克服系统的初始状态偏差,实现对于理想状态的稳定跟踪,从而验证了闭环控制系统的正确性。

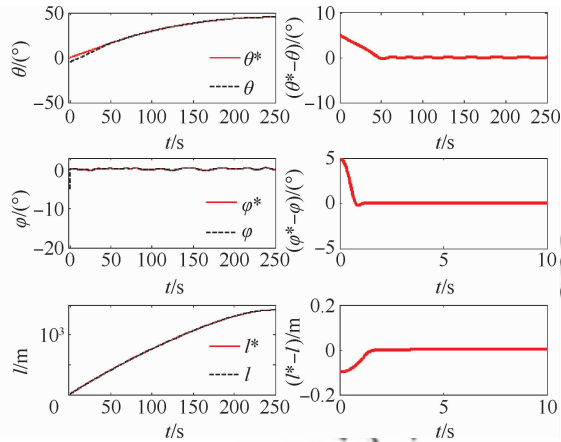


图 7 闭环系统的状态和误差变化曲线

Fig. 7 Curve of state and error in closed-loop system

4 结论

1) 在考虑系绳分布质量和分布力的情况下,利用 Hamilton 原理建立了空间绳系机器人系统的位姿耦合动力学模型,仿真结果表明,与传统的无质量刚性杆模型相比,本文所建立的模型能够显著减小控制系统的误差。

2) 利用 hp 自适应伪谱算法和 PD 控制器构建了空间机器人系统的位姿耦合控制器,仿真结果表明,与传统“位置规划+姿态稳定”的控制方式相比,本文的控制器不仅能够有效地节省系统的工质消耗,而且能够避免系绳产生过大的姿态扰动力矩,保证了系统的稳定。

3) 在系绳的初始长度存在 0.1 m 偏差且初始面内摆角和初始姿态角都存在 5° 偏差的情况下进行仿真,结果表明闭环控制系统能够很好地实现对于理想状态的跟踪。

参 考 文 献

[1] Cheng X Q, Yuan J P, Yao W, et al. Technology of

spacecraft on-orbit servicing. Beijing: Chinese Astronautic Publishing House, 2009: 94-97. (in Chinese)

陈小前, 袁建平, 姚雯, 等. 航天器在轨服务技术. 北京: 宇航出版社, 2009: 94-97.

- [2] Bischof B, Kerstein L, Starke J, et al. Roger-robotic geostationary orbit restorer. American Astronautical Society: Scientific Technology Series, 2005, 109: 183-193.
- [3] Nohmi M. Mission design of a tethered robot satellite "STARS" for orbital experiment. 2009 IEEE International Conference on Control Applications, 2009: 1075-1080.
- [4] Yuga N, Fumiki S, Shinichi N. Guidance and control of "tethered retriever" with collaborative tension-thruster control for future on-orbit service missions. The 8th International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space-ISAIRAS, 2005: 149-156.
- [5] Masahiro N, Nenchev D N, Aasaru U. Tethered robot casting using a spacecraft-mounted manipulator. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2001, 24(4): 827-833.
- [6] Masahiro N. Attitude control of a tethered space robot by link motion under microgravity. Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Control Applications, 2004: 424-429.
- [7] Godard, Kumar K D, Tan B. Fault-tolerant stabilization of a tethered satellite system using offset control. Journal of Spacecraft and Rockets, 2008, 45(5): 1070-1084.
- [8] Mori O, Matunaga S. Coordinated control of tethered satellite cluster systems. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, 2001: 6-9.
- [9] Xu X D, Huang P F, Meng Z J. Space tethered robot coordinated control method for approaching the target. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013, 34(5): 1222-1231. (in Chinese)
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. 航空学报, 2013, 34(5): 1222-1231.
- [10] Mankala K K, Agrawal S K. Dynamics modeling and simulation of satellite tethered systems. Transaction of the ASME, 2005, 127(2): 144-156.
- [11] Kuhn A, Steiner W, Zemann J, et al. A comparison of various mathematical formulations and numerical solution methods for the large amplitude oscillations of a string pendulum. Applied Mathematics and Computation, 1995, 67(1-3): 227-264.
- [12] Xu X D, Huang P F, Meng Z J, et al. Space tethered robot optimal trajectory planning for medium approaching range based on velocity impulse. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2012, 33(8): 1531-1539. (in Chinese)
徐秀栋, 黄攀峰, 孟中杰, 等. 基于速度增量的空间绳系机器人中距离逼近过程最优轨迹规划. 航空学报, 2012, 33(8): 1531-1539.

- [13] Krupa M, Poth W, Schagerl M, et al. Modelling, dynamics and control of tethered satellite systems. *Nonlinear Dynamics*, 2006, 43(1-2): 73-96.
- [14] Benson D A, Huntington G. T, Thorvaldsen T P, et al. Direct trajectory optimization and costate estimation via an orthogonal collocation method. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2006, 29(6): 1435-1440.
- [15] Garg D, Hager W W, Rao A V. Pseudospectral methods for solving infinite-horizon optimal control problems. *Automatica*, 2011, 47(4): 829-837.
- [16] Williams P. Optimal control of electrodynamic tether orbit transfers using timescale separation. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2010, 33(1): 88-98.

Control, and Dynamics, 2010, 33(1): 88-98.

作者简介:

胡仄虹 男, 硕士研究生。主要研究方向: 空间绳系机器人系统动力学建模及控制。

Tel: 029-88460366-803

E-mail: huzehong242@126.com

黄攀峰 男, 博士, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 空间机器人学, 空间遥操作, 导航、制导与控制。

Tel: 029-88460366-801

E-mail: pfhuang@nwpu.edu.cn

Integrated Pose Control of Tethered Space Robot in Approaching Process

HU Zehong^{1,2}, HUANG Panfeng^{1,2,*}, MENG Zhongjie^{1,2}, MA Jun^{1,2}

1. *Research Center of Intelligent Robotics, School of Astronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China*

2. *National Key Laboratory of Aerospace Flight Dynamics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China*

Abstract: The coordinated control of a tethered space robot in its approaching process has always been a focus of research. In order to compensate for the deficiency of traditional methods in precision and fuel consumption, a new pose coupling dynamic model is built in this paper which takes into consideration the distributed mass of the tether and the distributed force acting on the tether based on the Hamilton principle. Secondly, a hp-adaptive pseudospectral method is utilized to obtain the minimum-fuel trajectory and the corresponding ideal input. Finally, a PD controller is employed to ensure that the practical state can track the designed trajectory. Thus, an integrated closed-loop pose control of the tethered space robot is achieved. The simulation results show that in the case of existing 0.1 m initial length deviation and 5° initial angular deviation, the closed-loop controller designed in this paper can realize the effective control of the system state. Furthermore, compared with the massless rod model, the proposed pose coupling model can significantly improve the control precision of the system. Compared with the separate control of position and attitude, the integrated control can not only avoid large attitude disturbance torque, but also reduce fuel consumption considerably.

Key words: space tethers; integrated pose control; optimal control; Hamilton principle; hp-adaptive pseudospectral method; PD controller

Received: 2013-01-22; **Revised:** 2013-04-22; **Accepted:** 2013-05-12; **Published online:** 2013-05-30 08:38

URL: www.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20130530.0838.001.html

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (11272256, 61005062); Open Research Foundation of Science and Technology on Aerospace Flight Dynamics Laboratory (2012afdl022)

* **Corresponding author.** Tel.: 029-88460366-801 E-mail: pfhuang@nwpu.edu.cn