

# 不同重力环境下的柔性关节空间机械臂自适应鲁棒控制<sup>①</sup>

刘福才<sup>②</sup> 高静方 李倩

(燕山大学 工业计算机控制工程河北省重点实验室 秦皇岛 066004)

**摘要** 研究了柔性关节空间机器人在不同重力环境下的轨迹跟踪控制。首先建立了地面重力环境下和空间微重力环境下的柔性关节机器人模型,这两个模型均考虑了摩擦带来的影响,然后提出一种基于奇异摄动理论的自适应鲁棒控制柔性关节空间机械臂的方法。该方法为被控对象中的重力项设计了自适应律来实时估计补偿,并加入鲁棒项对逼近误差和其它干扰项进行补偿。用该方法设计了控制器系统,并对其进行稳定性分析和仿真研究。仿真结果表明,该控制器可以有效消除重力环境变化带来的影响,也可以有效抑制柔性关节引起的系统高频谐振等问题,具有很好的跟踪效果,对柔性关节空间机器人的轨迹跟踪控制具有重要的工程应用价值。

**关键词** 空间机械臂, 柔性关节, 重力, 奇异摄动, 鲁棒, 自适应

## 0 引言

随着对空间机器人控制精度要求的日益提高,对机器人的合理建模变得日益重要。研究对空间机器人的控制时,空间机器人的结构柔性问题不可忽略,除了杆的柔性外,关节柔性也会给控制带来不利影响,其中,也有摩擦力的影响。机器人关节中谐波减速器部件会给机器人的关节带来柔性,尽管目前空间机械臂上配置的大多是行星齿轮减速器,但关节柔性现象仍然存在。此外,空间机器人所处的重力环境的变化不可忽略,必须考虑机器人由地面到空间由于重力的消失导致的机械臂运动学及动力学变化。本文针对上述问题进行了研究,提出了一种基于奇异摄动理论的自适应鲁棒控制策略,并通过仿真验证了这一控制策略的有效性。

## 1 相关研究

Cetinkunt 等<sup>[1]</sup>强调了关节柔性对空间机械臂

控制系统控制性能的影响,指出忽略柔性影响的控制方法在实际应用中是受限制的或是不可行的; Ghorbel 等<sup>[2]</sup>指出,由于柔性关节动力学模型对每个自由度并不具有独立的控制输入,大多数针对刚性关节机器人的控制算法不能延伸到柔性关节的情况。柔性关节的存在给控制增加了难度,尤其是在对轨迹跟踪精度要求高的情况下。

目前已有很多文献针对空间机器人关节柔性问题提出了减小柔性振动的控制方法。谢立敏<sup>[3]</sup>等为柔性关节空间机器人设计了奇异摄动鲁棒控制器,控制器中引入速度反馈来抑制柔性关节引起的振动; Ulrich 等<sup>[4]</sup>基于奇异摄动方法并采用基于笛卡尔坐标的控制方案,设计了改进的简单自适应控制器(MSAC);张晓东<sup>[5]</sup>等提出了采用自适应模糊系统和逐步逆向设计相结合的控制方法,并通过实验证实了其良好的跟踪效果;梁捷<sup>[6]</sup>等采用基于奇异摄动法为慢子系统设计了非奇异模糊 Terminal 滑模控制器,以抑制关节柔性引起的系统弹性振动。但这些文献并没有考虑重力环境对柔性控制的影响。

<sup>①</sup> 863 计划和河北省自然科学基金(F2015203362)资助项目。

<sup>②</sup> 男,1966 年生,博士,教授,博士生导师;研究方向:空间机构运动行为分析与控制技术研究;联系人,E-mail: lfc@ysu.edu.cn  
(收稿日期:2014-09-12)

也有很多文献针对地面上的柔性关节机器人设计了控制器。张奇<sup>[7]</sup>等基于无源性理论为柔性关节机器人设计了控制器,该控制器具有算法简单、有效减小力矩抖动和稳态精度高的优点,但关节在加减速过程中跟踪误差较大。传统的奇异摄动方法受关节柔性的限制,刘业超<sup>[8]</sup>等设计了柔性关节补偿器,在一定程度上消除了关节柔性的对奇异摄动方法的限制;贾庆轩<sup>[9]</sup>等为柔性关节的单杆机械臂设计了基于扩张状态观测器的动态曲面控制算法。这些文献报道了针对地面重力环境下柔性关节机器人所进行的控制研究。

应用于空间作业的柔性关节机器人首先要经历地面装调的阶段,机械臂由地面到空间由于重力消失会导致机械臂的运动学及动力学模型发生变化,而在地面利用自由落体及飞机抛物线飞行只能进行短时微重力环境模拟,水槽、悬吊、气浮等手段模拟的真实性较差,因而,王文魁提出采用运动行为模拟代替环境模拟的概念<sup>[10]</sup>。因此对于空间机器人来说,不仅要求在空间微重力环境下可以达到跟踪控制要求,在地面重力环境下也需要满足控制要求<sup>[11,12]</sup>。由于重力环境的变化,机械臂由地面到空间的动力学发生变化,这也对控制器提出更高的性能要求,要求机械臂可以适应重力的改变。

针对这一问题,本文从地面装调和空间应用两个阶段对柔性关节机器人的轨迹跟踪问题进行了研究,提出一种基于奇异摄动理论的自适应鲁棒控制策略:首先建立地面重力环境和空间微重力环境下的柔性关节空间机器人模型,模型考虑了摩擦的影响,控制器通过自适应控制律在线估计空间机械臂所处环境的重力加速度来得到重力项的估计值,并加入了摩擦补偿项,对系统的不确定部分设计自适应鲁棒控制器。通过李亚普诺夫方法验证了控制系统的稳定性,仿真比较表明了控制器对柔性关节机器人轨迹跟踪的优良性能。

## 2 系统模型建立

根据 Spong 提出的简化模型<sup>[13]</sup>,电机和关节之间通过一个扭转弹簧连接,且假设弹簧是线性的,具

有常值系数。柔性关节机械臂及柔性关节局部示意如图 1 和图 2 所示。

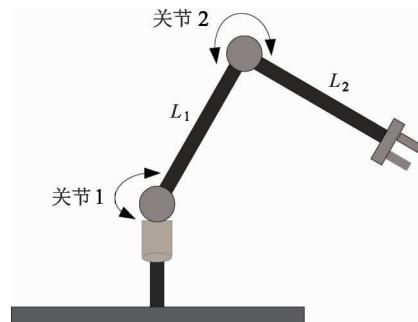


图 1 柔性关节机械臂

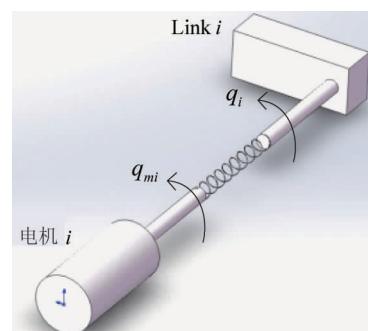


图 2 柔性关节简化模型

图中,  $\mathbf{q}_m$  为电机轴的角度移矢量,  $\mathbf{q}$  为关节转动的角度移矢量, 弹性连接轴振动矢量定义为  $\mathbf{q} - \mathbf{q}_m$ 。根据 Spong 理论得到的柔性关节机器人动力学模型如下:

$$\begin{aligned} J_m \ddot{\mathbf{q}} + \boldsymbol{\tau} &= \boldsymbol{\tau}_m \\ M(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} &= \boldsymbol{\tau} \\ \boldsymbol{\tau} &= \mathbf{k}(\mathbf{q}_m - \mathbf{q}) \end{aligned} \quad (1)$$

式中,  $\mathbf{q}$  为位移矢量,  $\boldsymbol{\tau}$  为作用在空间机械臂上的驱动力矩,  $\boldsymbol{\tau}_m$  为电机产生的驱动力矩。 $M(\mathbf{q}) \in \mathbf{R}^{n \times n}$  为系统的惯性矩阵,  $C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \in \mathbf{R}^{n \times n}$  为离心力和哥氏力矩阵, 杆的动力学和执行机构动力学通过弹性力矩项  $\mathbf{k}(\mathbf{q}_m - \mathbf{q})$  耦合。

在实际中摩擦力项不可忽略,因此需要考虑摩擦并合理建模。本文中选取摩擦力模型如下<sup>[14]</sup>:

$$\begin{aligned} \mathbf{F} = r_1 [\tanh(r_2 \dot{\mathbf{q}}) - \tanh(r_3 \dot{\mathbf{q}})] + r_4 \tanh(r_5 \dot{\mathbf{q}}) \\ + r_6 \dot{\mathbf{q}} \end{aligned} \quad (2)$$

式中,  $r_i > 0$ ,  $i = 1, 2, \dots, 6$

该摩擦力模型可以有效地描述实际柔性关节中摩擦力带来的影响。考虑摩擦影响,得到的柔性关节机器人空间阶段的模型为

$$\begin{aligned} \mathbf{J}_m \ddot{\mathbf{q}}_m + \boldsymbol{\tau} &= \boldsymbol{\tau}_m \\ \mathbf{M}(\mathbf{q}) \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{F} &= \boldsymbol{\tau} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{k}(\mathbf{q}_m - \mathbf{q})$$

空间机械臂在地面装调阶段应考虑重力带来的影响,在建模时拉格朗日函数增加了连杆的重力势能,得到的模型如下:

$$\begin{aligned} \mathbf{J}_m \ddot{\mathbf{q}}_m + \boldsymbol{\tau} &= \boldsymbol{\tau}_m \\ \mathbf{M}(\mathbf{q}) \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{F} + \mathbf{G} &= \boldsymbol{\tau} \\ \boldsymbol{\tau} &= \mathbf{k}(\mathbf{q}_m - \mathbf{q}) \end{aligned} \quad (4)$$

$\mathbf{G}(\mathbf{q}) \in \mathbf{R}^n$  为重力载荷向量矩阵,可写成如下形式:

$$\mathbf{G} = \varphi(\mathbf{q}) \mathbf{g} \quad (5)$$

### 3 控制器设计与分析

根据奇异摄动控制思想,将柔性关节模型转化为快慢两个子系统,然后针对这两个子系统分别设计控制器<sup>[15,16]</sup>

$$\boldsymbol{\tau}_m = \boldsymbol{\tau}_s + \boldsymbol{\tau}_f \quad (6)$$

式中  $\boldsymbol{\tau}_f$  是快变力矩,其作用是在突变情况下提供快速响应;  $\boldsymbol{\tau}_s$  是慢变力矩部分,作用于准稳态系统。

由动力学模型(式(3)或式(4)),可以得到关节力矩  $\boldsymbol{\tau}$  的方程

$$\mathbf{J}\mathbf{K}^{-1}\ddot{\boldsymbol{\tau}} + \boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{\tau}_s + \boldsymbol{\tau}_f - \mathbf{J}\ddot{\mathbf{q}} \quad (7)$$

引入参数  $\varepsilon$ ,取  $\mathbf{K} = \mathbf{K}_\varepsilon / \varepsilon^2$ ,其中  $\mathbf{K}_\varepsilon$  为正定对角阵,  $\varepsilon$  越小表示关节刚度越大,并选取

$$\boldsymbol{\tau}_f = -\mathbf{K}_v \dot{\boldsymbol{\tau}} = -\varepsilon \mathbf{K}_2 \dot{\boldsymbol{\tau}} \quad (8)$$

则式(7)可重写为

$$\varepsilon^2 \mathbf{J}\ddot{\boldsymbol{\tau}} + \varepsilon \mathbf{K}_\varepsilon \mathbf{K}_2 \dot{\boldsymbol{\tau}} + \mathbf{K}_\varepsilon \boldsymbol{\tau} = \mathbf{K}_\varepsilon (\boldsymbol{\tau}_s - \mathbf{J}\ddot{\mathbf{q}}) \quad (9)$$

令  $\varepsilon = 0$ ,得到关节力矩的准稳态表达式

$$\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{\tau}_s - \mathbf{J}\ddot{\mathbf{q}} \quad (10)$$

将式(10)分别代入式(3)和式(4)中得到准稳态方程可写为

$$\bar{\mathbf{M}}(\mathbf{q}) \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{F} + \varphi(\mathbf{q}) \mathbf{g} = \boldsymbol{\tau}_s \quad (11)$$

在地面时  $\mathbf{g} = 9.8$ ,在空间时  $\mathbf{g} = 0$ 。

对于准稳态系统,定义

$$\boldsymbol{e} = \mathbf{q} - \mathbf{q}_d \quad (12)$$

$$\boldsymbol{\eta} = \dot{\boldsymbol{e}} + \lambda \boldsymbol{e} \quad (13)$$

由式(11)可以得到

$$\bar{\mathbf{M}}(\mathbf{q}) (\ddot{\mathbf{q}}_d + \ddot{\boldsymbol{e}}) + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) (\dot{\mathbf{q}}_d + \dot{\boldsymbol{e}}) + \mathbf{F} + \varphi(\mathbf{q}) \mathbf{g} = \boldsymbol{\tau}_s \quad (14)$$

将式(14)整理成如下形式:

$$\bar{\mathbf{M}}(\mathbf{q}) \dot{\boldsymbol{\eta}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \boldsymbol{\eta} = \boldsymbol{\tau}_s + \mathbf{w} - \mathbf{d} - \mathbf{F} - \varphi(\mathbf{q}) \mathbf{g} \quad (15)$$

式中,

$$\mathbf{w} = \lambda (\bar{\mathbf{M}}(\mathbf{q}) \dot{\boldsymbol{e}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \boldsymbol{e}) \quad (16)$$

$$\mathbf{d} = \bar{\mathbf{M}}(\mathbf{q}) \ddot{\mathbf{q}}_d + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \dot{\mathbf{q}}_d \quad (17)$$

设计慢变部分的控制器为

$$\boldsymbol{\tau}_s = -\bar{\mathbf{M}}(\mathbf{q}) \mathbf{K}_d \boldsymbol{\eta} + \varphi(\mathbf{q}) \hat{\mathbf{g}} + \boldsymbol{\tau}_r - \mathbf{w} + \boldsymbol{\tau}_u \quad (18)$$

控制器中  $\varphi(\mathbf{q}) \hat{\mathbf{g}}$  是控制器对重力载荷向量矩阵的估计;  $\boldsymbol{\tau}_r$  是针对摩擦的补偿项,如式

$$\boldsymbol{\tau}_r = r_6 \dot{\mathbf{q}} + r_{01} \cdot \text{sgn}(\dot{\mathbf{q}}) \cdot \tanh(r_{02} \dot{\mathbf{q}}) \quad (19)$$

所示;  $\boldsymbol{\tau}_u$  是鲁棒项。

假设  $\|\dot{\mathbf{q}}_d\| \leq d_1$ ,  $\|\ddot{\mathbf{q}}_d\| \leq d_2$ ,  $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \leq c \|\dot{\mathbf{q}}\|$ , 则

$$\begin{aligned} \|\mathbf{d}\| &= \|\bar{\mathbf{M}}(\mathbf{q}) \ddot{\mathbf{q}}_d + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \dot{\mathbf{q}}_d\| \\ &\leq \|\bar{\mathbf{M}}(\mathbf{q})\| \|\ddot{\mathbf{q}}_d\| + c \|\dot{\mathbf{q}}_d\|^2 \\ &\leq \lambda_{\max} d_2 + c d_1^2 = \rho_1 \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \|\boldsymbol{\tau}_r - \mathbf{F}\| &\leq \|r_{01} \cdot \text{sgn}(\dot{\mathbf{q}}) \cdot \tanh(r_{02} \dot{\mathbf{q}})\| \\ &\quad + \|r_1 [\tanh(r_2 \dot{\mathbf{q}}) - \tanh(r_3 \dot{\mathbf{q}})]\| \\ &\quad + \|r_4 \tanh(r_5 \dot{\mathbf{q}})\| \\ &\leq r_{01} + r_1 + r_4 = \rho_2 \end{aligned} \quad (21)$$

令  $\rho = \rho_1 + \rho_2$ , 设计系统鲁棒项为

$$\boldsymbol{\tau}_u = -\frac{\boldsymbol{\eta} \hat{\rho}^2}{\|\boldsymbol{\eta}\| \hat{\rho} + \hat{\varepsilon}} \quad (22)$$

自适应律为

$$\begin{aligned} \dot{\hat{\rho}} &= -\beta(t) \hat{\rho} + \alpha \|\boldsymbol{\eta}\| \\ \dot{\beta}(t) &= -m \dot{\beta}(t) \\ \dot{\varepsilon} &= -\gamma \varepsilon \end{aligned} \quad (23)$$

将控制器表达式(18)代入到系统式(15)中,得到

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{M}}(\mathbf{q}) \dot{\boldsymbol{\eta}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \boldsymbol{\eta} &= -\bar{\mathbf{M}}(\mathbf{q}) \mathbf{K}_d \boldsymbol{\eta} + \varphi(\mathbf{q}) \hat{\mathbf{g}} \\ &\quad + \boldsymbol{\tau}_r + \boldsymbol{\tau}_u - \mathbf{d} - \mathbf{F} \end{aligned} \quad (24)$$

式中,  $\tilde{\mathbf{g}} = \hat{\mathbf{g}} - \mathbf{g}_0$ 。

选取李亚普诺夫函数为

$$V = \frac{1}{2} \tilde{g}^T \Gamma^{-1} \tilde{g} + \frac{1}{2} \boldsymbol{\eta}^T \bar{\mathbf{M}} \boldsymbol{\eta} + \frac{1}{\gamma} \varepsilon + \frac{1}{2} \tilde{\rho} \alpha^{-1} \tilde{\rho} + \rho^T \alpha^{-1} m^{-1} \beta \rho \quad (25)$$

其中  $\Gamma^{-1}$  和  $\bar{\mathbf{M}}$  都为正定对称矩阵, 所以  $V$  正定。

$$\dot{V} = \tilde{g}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{g}} + \boldsymbol{\eta}^T \bar{\mathbf{M}} \dot{\boldsymbol{\eta}} + \frac{1}{2} \boldsymbol{\eta}^T \dot{\bar{\mathbf{M}}} \boldsymbol{\eta} + \frac{1}{\gamma} \dot{\varepsilon} + \tilde{\rho} \alpha^{-1} \dot{\tilde{\rho}} + \rho^T \alpha^{-1} m^{-1} \dot{\beta} \rho \quad (26)$$

结合(24)式, 可化简为

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \tilde{g}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{g}} + \boldsymbol{\eta}^T \varphi(\mathbf{q}) \tilde{g} - \boldsymbol{\eta}^T \bar{\mathbf{M}} \mathbf{K}_d \boldsymbol{\eta} + \boldsymbol{\eta}^T (\boldsymbol{\tau}_r - \mathbf{F}) \\ &\quad - \boldsymbol{\eta}^T \mathbf{d} + \boldsymbol{\eta}^T \boldsymbol{\tau}_u + \frac{1}{2} \boldsymbol{\eta}^T (\dot{\bar{\mathbf{M}}} - 2\mathbf{C}) \boldsymbol{\eta} - \varepsilon \\ &\quad + \tilde{\rho} \alpha^{-1} (-\beta(t) \hat{\rho} + \alpha \|\boldsymbol{\eta}\|) - \rho^T \alpha^{-1} \beta \rho \end{aligned} \quad (27)$$

设计自适应律

$$\dot{\tilde{g}} = -\Gamma^{-1} \varphi(\mathbf{q}) \boldsymbol{\eta} \quad (28)$$

则

$$\tilde{g}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{g}} + \boldsymbol{\eta}^T \varphi(\mathbf{q}) \tilde{g} = \tilde{g}^T (\Gamma^{-1} \dot{\tilde{g}} + \varphi(\mathbf{q}) \boldsymbol{\eta}) = 0 \quad (29)$$

根据机器人动力学方程中系数矩阵的性质, 有

$$\dot{\bar{\mathbf{M}}} - 2\mathbf{C} = \dot{\mathbf{M}} - 2\mathbf{C} = 0 \quad (30)$$

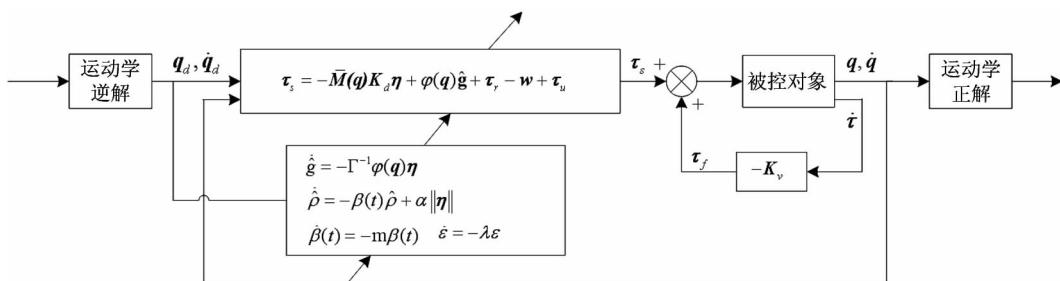


图 3 基于奇异摄动的柔性关节空间机器人自适应鲁棒控制结构框图

## 4 仿真研究

柔性关节带来的主要影响是系统抖振, 尤其在轨迹发生改变的位置。与其它类型的轨迹相比, 如圆或直线, 对正方形轨迹跟踪所需的控制要求更高, 因此文中选择跟踪正方形轨迹, 以便观察在轨迹突变处的跟踪情况。

机械臂的参数如表 1 所示, 摩擦模型的参数选择如表 2 所示。柔性关节模型中取  $\mathbf{J}_m = \text{diag}[1]$ ,  $k = \text{diag}[500] \text{ N} \cdot \text{m/rad}$ ; 期望轨迹是一个边长为

将式(29)和式(30)代入到式(26)中, 可以得到

$$\begin{aligned} \dot{V} &= -\boldsymbol{\eta}^T \bar{\mathbf{M}}(\mathbf{q}) \mathbf{K}_d \boldsymbol{\eta} + \boldsymbol{\eta}^T (\boldsymbol{\tau}_r - \mathbf{F}) - \boldsymbol{\eta}^T \mathbf{d} + \boldsymbol{\eta}^T \boldsymbol{\tau}_u \\ &\quad - \varepsilon - \tilde{\rho} \alpha^{-1} \beta \hat{\rho} + \|\boldsymbol{\eta}\| \tilde{\rho}^T - \rho \alpha^{-1} \beta \rho \\ &\leq -\boldsymbol{\eta}^T \bar{\mathbf{M}}(\mathbf{q}) \mathbf{K}_d \boldsymbol{\eta} + \|\boldsymbol{\eta}\| \rho - \frac{\|\boldsymbol{\eta}\|^2 \hat{\rho}^2}{\|\boldsymbol{\eta}\| \hat{\rho} + \varepsilon} - \varepsilon \\ &\quad + \|\boldsymbol{\eta}\| \hat{\rho} - \|\boldsymbol{\eta}\| \rho - \tilde{\rho} \alpha^{-1} \beta \hat{\rho} - \rho \alpha^{-1} \beta \rho \end{aligned} \quad (31)$$

因为

$$-\frac{\|\boldsymbol{\eta}\|^2 \hat{\rho}^2}{\|\boldsymbol{\eta}\| \hat{\rho} + \varepsilon} - \varepsilon \leq \|\boldsymbol{\eta}\| \hat{\rho} \quad (32)$$

代入式(31)中, 化简可以得到:

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq -\boldsymbol{\eta}^T \bar{\mathbf{M}}(\mathbf{q}) \mathbf{K}_d \boldsymbol{\eta} - \alpha^{-1} \beta (\rho^2 + \hat{\rho}^2 + \rho \hat{\rho}) \\ &= -\boldsymbol{\eta}^T \bar{\mathbf{M}}(\mathbf{q}) \mathbf{K}_d \boldsymbol{\eta} - \frac{1}{2} \rho \alpha^{-1} \beta \rho - \frac{1}{2} \tilde{\rho} \alpha^{-1} \beta \tilde{\rho} \\ &\quad - \frac{1}{2} \alpha^{-1} \beta (\rho + \tilde{\rho})^2 < 0 \end{aligned} \quad (33)$$

因此系统渐进稳定。

总的控制器为

$$\boldsymbol{\tau}_m = -\bar{\mathbf{M}}(\mathbf{q}) \mathbf{K}_d \boldsymbol{\eta} + \varphi(\mathbf{q}) \hat{\mathbf{g}} + \boldsymbol{\tau}_r - \mathbf{w} + \boldsymbol{\tau}_u - \mathbf{K}_v \dot{\boldsymbol{\tau}} \quad (34)$$

系统的控制结构框图如图 3 所示。

12.6m 的正方形。

表 1 平面二连杆空间机械臂仿真参数

| 杆号 | $a_i$ (m) | $b_i$ (m) | $m_i$ (kg) | $I_i$ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ) |
|----|-----------|-----------|------------|--|
| 1  | 2.25      | 2.25      | 1.5075     | 2.5439                                 |
| 2  | 2.25      | 2.25      | 1.5075     | 2.5439                                 |

表 2 摩擦模型参数

| $r_1$ | $r_2$ | $r_3$ | $r_4$ | $r_5$ | $r_6$ |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0.5   | 150   | 50    | 2     | 100   | 0.5   |

对本文所提方法和基于奇异摄动的 PD 控制方法做了仿真比较。首先忽略空间机器人的地面重力环境问题,即控制器中不考虑重力项:

$$\tau_m = -K_p e - K_d \dot{e} - K_v \ddot{\tau} \quad (35)$$

控制器参数取  $K_p = \text{diag}[270]$ ,  $K_d = \text{diag}[150]$ ,  $K_v = \text{diag}[0.07]$ 。仿真结果如图 4 和图 5 所示。

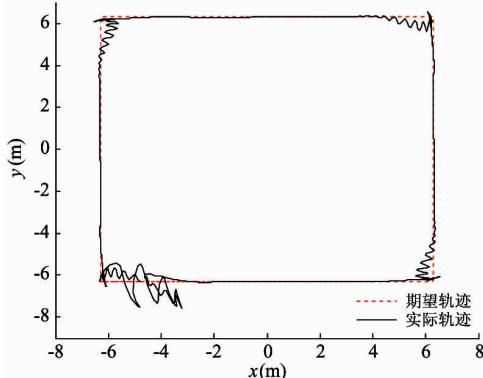


图 4 空间 PD 控制末端轨迹跟踪情况

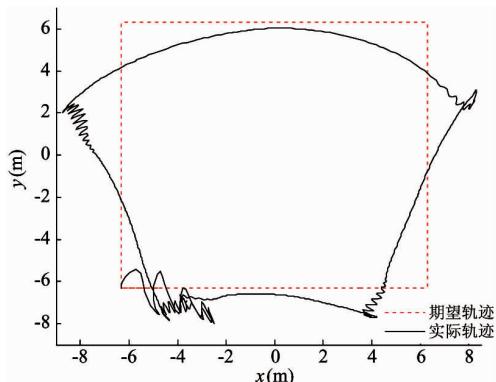
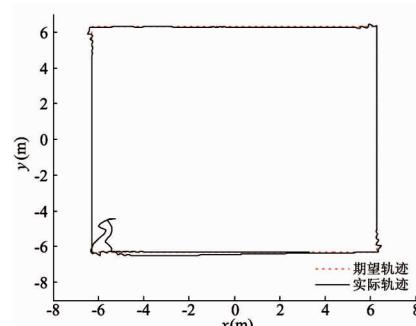
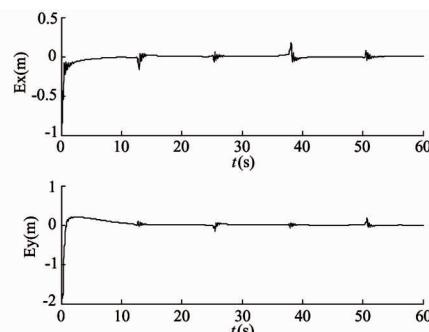


图 5 地面 PD 控制末端轨迹跟踪情况

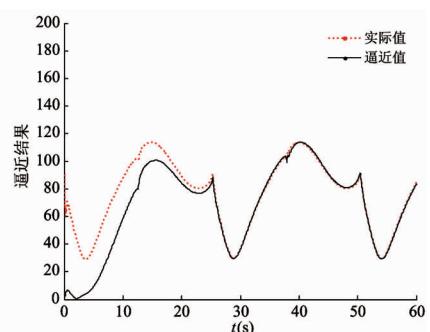
当控制器中增加了对重力项的估计时,表达式变为



(a) 地面末端轨迹跟踪情况



(b) 地面末端位置跟踪误差



(c) 地面重力情况下  $\|G(q)\|$  的逼近结果

图 8 基于奇异摄动的自适应鲁棒控制地面仿真结果

$$\tau_m = -K_p e - K_d \dot{e} + \hat{G} - K_v \dot{\tau} \quad (36)$$

仿真结果如图 6 和图 7 所示。

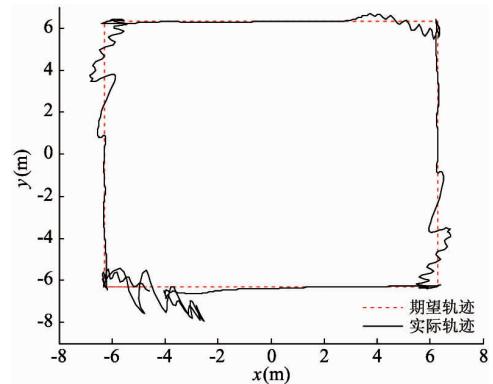


图 6 地面 PD 控制末端轨迹跟踪情况

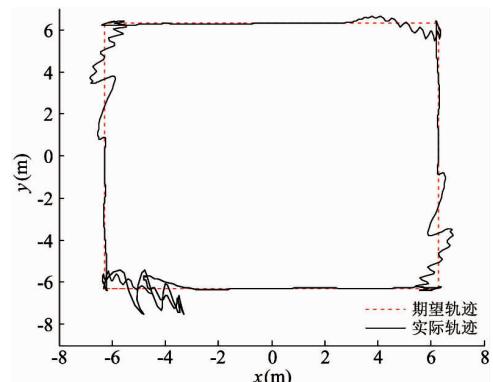


图 7 空间 PD 控制末端轨迹跟踪情况

在控制器中增加了对重力项的估计后,地面上可以大致跟踪上正方形,但每个拐角处存在较大误差,不能达到高精度轨迹跟踪的要求。

拐角处方向发生突变,要求控制器在最小偏差和调节时间下响应跟踪。采用本文的基于奇异摄动的自适应鲁棒控制策略对柔性关节空间机器人的轨迹跟踪仿真结果如图 8 和图 9 所示。

由图 8(a)和图 9(a)可知,无论在地面重力环境下还是空间微重力环境下,采用基于奇异摄动的自适应鲁棒控制的柔性关节空间机械臂可以很好地跟踪上正方形,柔性关节带来的抖振可以得到有效

抑制;由图 8(b)和图 9(b)可知,在每个拐角误差会有一个突变,但会迅速减小到零,实现高精度轨迹跟踪要求;由图 8(c)和图 9(c)可知,设计的自适应律可以精确逼近重力项。

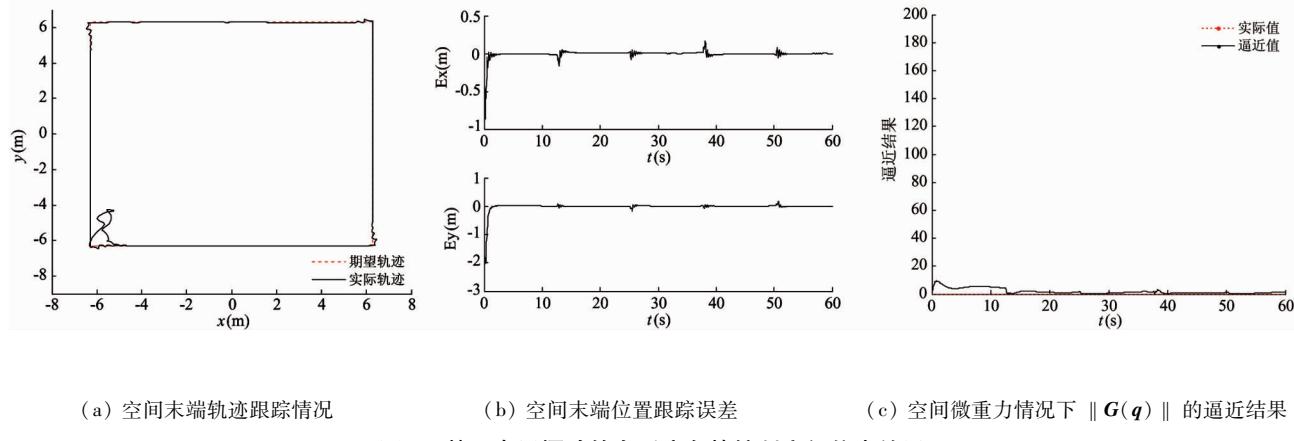


图 9 基于奇异摄动的自适应鲁棒控制空间仿真结果

仿真控制力矩的比较,如图 10~图 12 所示。

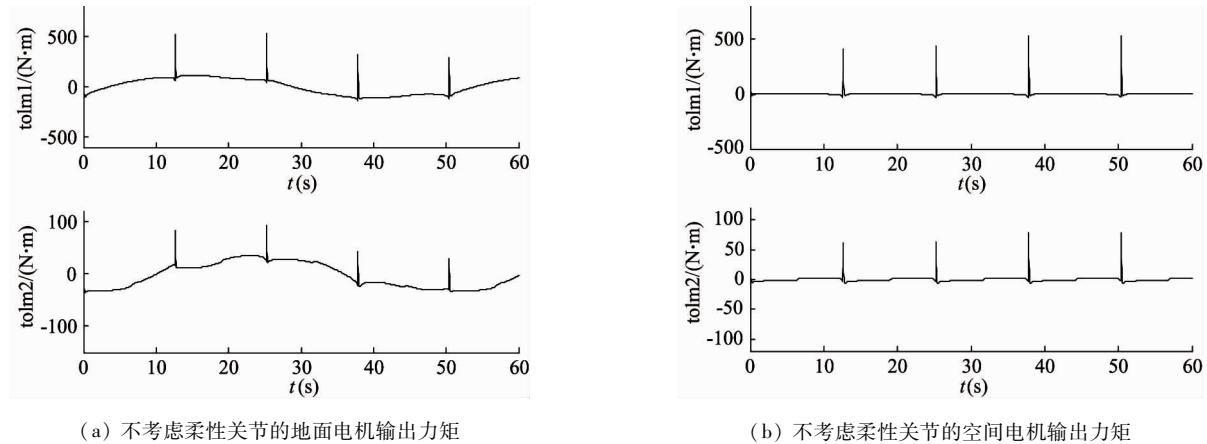


图 10 不考虑柔性关节时自适应鲁棒控制电机输出力矩

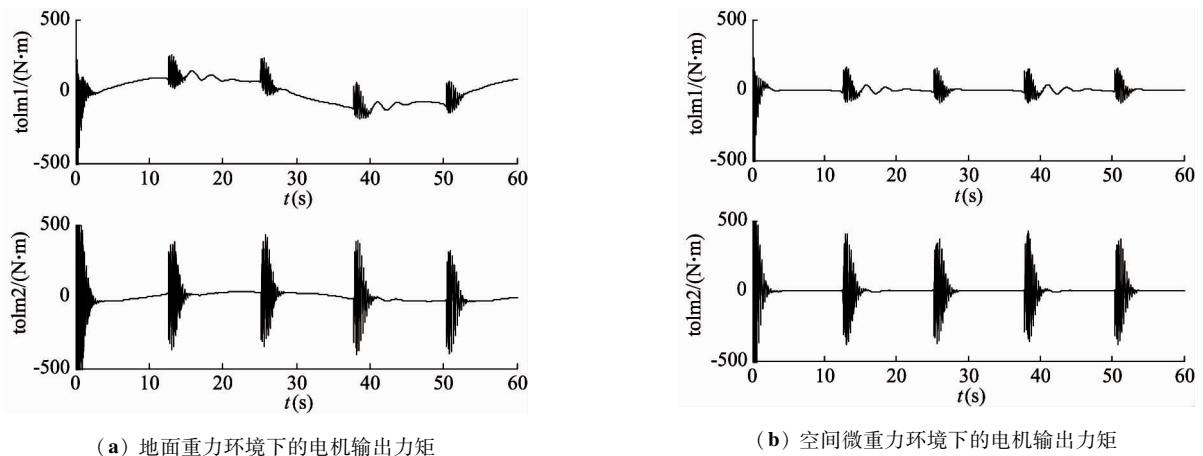
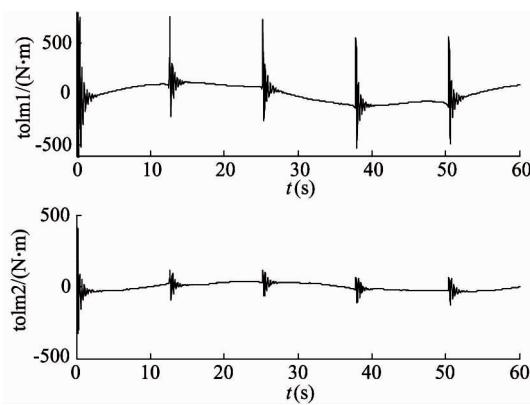
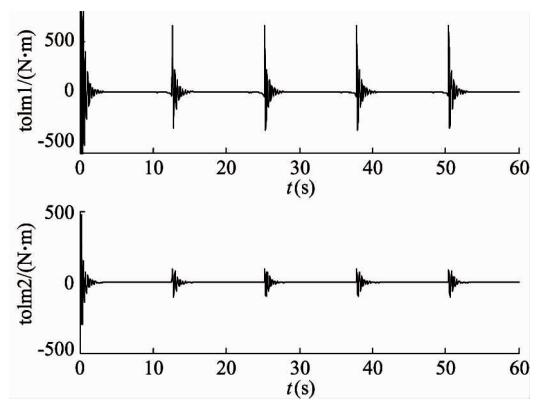


图 11 考虑柔性关节的 PD 与自适应控制电机输出力矩



(a) 地面两个电机输出力矩



(b) 空间两个电机输出力矩

图 12 考虑柔性关节的自适应鲁棒控制电机输出力矩

图 10 是不考虑柔性关节的影响时,采用本文的自适应鲁棒控制器(没有力矩反馈)的电机输出力矩曲线,图 11 是采用基于奇异摄动理论的 PD 与自适应控制时对柔性关节空间机器人仿真的电机输出力矩曲线,图 12 是使用本文控制器对柔性关节空间机器人仿真的电机输出力矩曲线。由图 10 和图 11、图 12 的对比可以得出:柔性关节的存在会给系统带来抖动的影响;而图 11 与图 12 的对比,可以得出本文的方法能够减小振荡影响,体现了其优越性。

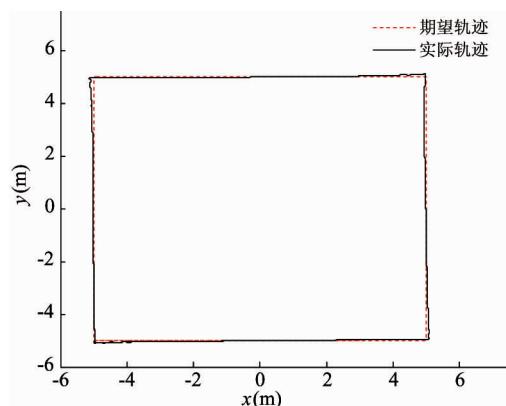
## 5 控制性能比较

在柔性关节机器人控制性能方面,对本文和文献[4]所提的改进的简单自适应控制方法进行了比较。文献[4]并没有考虑重力的影响,因此只分析

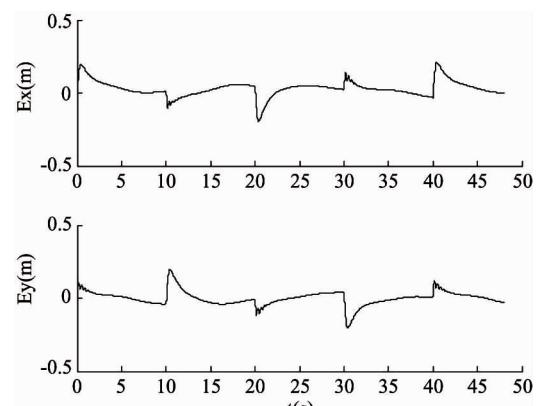
空间机械臂的微重力情况下的仿真,图 13 和图 14 分别是两种方法的末端跟踪情况。

## 6 结 论

本文建立了地面重力环境下和空间微重力环境下考虑摩擦影响的柔性关节空间机械臂的动力学模型,首先采用基于奇异摄动的 PD 控制方法对地面和空间的轨迹跟踪进行了仿真研究,仿真结果表明,在地面重力环境下完全跟踪不上期望轨迹;在控制器中加入重力自适应估计项后,空间和地面的跟踪效果仍然很差。本文提出了一种基于奇异摄动理论的自适应鲁棒控制方法,对重力项设计了自适应律来实时估计补偿,系统不确定性通过自适应鲁棒控制器进行补偿,利用李亚普诺夫方法证明了闭环系统的渐进稳定性。采用本文设计的控制器对两连杆

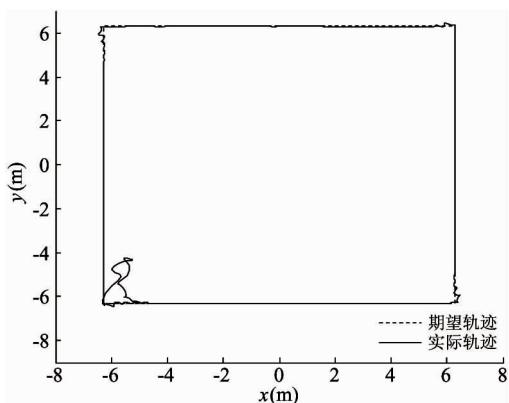


(a) 末端轨迹跟踪

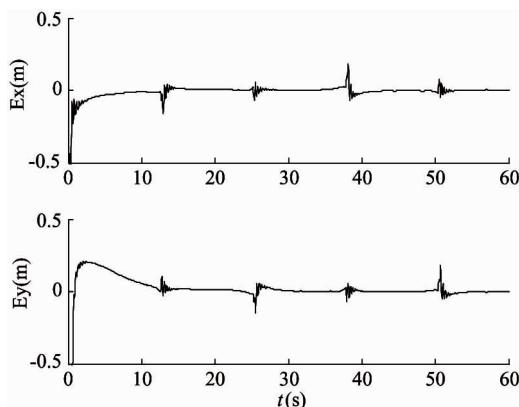


(b) 跟踪误差

图 13 简单自适应方法末端轨迹跟踪及跟踪误差



(a) 末端轨迹跟踪



(b) 跟踪误差

图 14 自适应鲁棒方法末端轨迹跟踪及跟踪误差

柔性关节机械臂进行了仿真验证,仿真结果表明,在不同重力环境下机械臂末端都可以跟踪上期望轨迹,突变情况下能够快速响应,具有良好的跟踪性能。

采用基于奇异摄动的自适应鲁棒控制方法有效解决了空间机械臂从地面装调到空间应用过程中重力环境变化的问题,有效抑制了柔性关节带来的抖动,它并没有完全消除。能否找到一种控制方法彻底消除柔性带来的抖振仍需要进一步研究。

#### 参考文献

- [1] Cetinkunt S, Book W J. Flexibility effects on the control system performance of large scale robotic manipulators. *Journal of the Astronautical Sciences*, 1990, 3(4) : 531-556
- [2] Ghorbel F, Hung J Y, Spong M W. Adaptive control of flexible joint manipulators. *IEEE Control Systems Magazine*, 1989, 9(7) : 9-13
- [3] 谢立敏, 陈力. 漂浮基柔性关节空间机器人奇异摄动鲁棒控制. *振动. 测试与诊断*, 2013, 33(4) : 597-601
- [4] Ulrich S, Jurek Z. Modeling and direct adaptive Control of a flexible-joint manipulator. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2012, 35(1) : 25-39
- [5] 张晓东, 贾庆轩, 孙汉旭等. 空间机器人柔性关节轨迹控制研究. *宇航学报*, 2008, 29(6) : 1865-1870
- [6] 梁捷, 陈力. 关节柔性的漂浮基空间机器人基于奇异摄动法的轨迹跟踪非奇异模糊 Terminal 滑模控制及柔性振动抑制. *振动与冲击*, 2013, 32(23) : 6-12
- [7] 张奇, 谢宗武, 刘宏等. 基于无源性理论的柔性关节控制器设计. *机器人*, 2013, 35(1) : 23-31
- [8] 刘业超, 金明河, 刘宏. 柔性关节机器人基于柔性补偿的奇异摄动控制. *机器人*, 2008, 30(5) : 460-466
- [9] 贾庆轩, 黄飞杰, 褚明等. 基于扩张状态观测器的柔性关节动态曲面控制. *高技术通讯*, 2013, 23(8) : 366-370
- [10] 王文魁. 空间机构运动行为模拟概念研究. *载人航天*, 2013, 19(5) : 59-66
- [11] 刘福才, 高娟娟, 王跃灵. 重力对空间机械臂运动控制的影响. *高技术通讯*, 2012, 22(9) : 944-950
- [12] 刘福才, 刘彩凤, 秦利等. 重力作用下的摩擦对空间机械臂运动控制的影响. *高技术通讯*, 2014, 24(1) : 65-71
- [13] Spong M W. Modeling and Control of Elastic Joint Robots. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 1987, 109(4) : 310-319
- [14] Makkar C, Dixon W E, Sawyer W G, et al. A new continuously differentiable friction model for control systems design, *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, Inst. of Electrical and Electronics Engineers, Piscataway, NJ, 2005. 600-605
- [15] 富立, 罗珍. 基于奇异摄动的捷联惯导伪圆锥误差补偿算法. *高技术通讯*, 2012, 22(3) : 282-288
- [16] 陈志勇, 陈力. 漂浮基带柔性铰空间机器人的动力学建模及奇异摄动控制研究. *中国机械工程*, 2011, 22(18) : 2151-2155

# Adaptive robust control of flexible-joint space manipulators under different gravity environments

Liu Fucai, Gao Jingfang, Li Qian

(Key Lab of industrial Computer Control Engineering of Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao 066004)

## Abstract

The trajectory tracking control of space flexible-joint robots under different gravity environments was studied. Firstly, with the friction influence being considered, the model of a flexible-joint robot in the ground gravity environment and the model of it in the microgravity environment were established, respectively, and then, a strategy for adaptive robust control of flexible-joint space manipulators based on the singular perturbation theory was put forward. The strategy designs an adaptive law for the controller to realize the gravity real-time compensation, and uses the robust controller to compensate the system uncertainty. The stability analysis and simulation study of the controller designed according to the proposed strategy were conducted, and the results showed that the controller not only adapted to the gravity environment change, but also solved the high frequency resonance or instability problems brought by flexible-joints, indicating the control strategy's good tracking effect and important engineering application value.

**Key words:** space manipulator, flexible-joint, gravity, singular perturbation, robust, adaptive