

自由漂浮空间机器人末端轨迹优化自适应控制

羊帆¹, 张国良^{1†}, 田琦¹, 王小建²

(1. 火箭军工程大学 控制科学与工程系, 西安 710025; 2. 中航飞机西安民机有限责任公司, 陕西 阎良 710000)

摘要: 惯性参数不确定情况下的自由漂浮空间机器人(FFSR)轨迹跟踪控制是当前FFSR自主控制研究的重点与难点之一. 针对该问题, 提出一种FFSR末端轨迹优化自适应跟踪控制方法. 该方法首先基于离散状态依赖黎卡提方程(DSDRE), 设计两级DSDRE优化跟踪控制器, 然后在控制器输出基础上, 通过求解有约束条件下的非线性优化问题实现FFSR惯性参数的辨识, 进而根据辨识结果调整控制器相关参数, 实现FFSR末端轨迹的优化自适应跟踪控制. 最后, 采用平面两连杆FFSR模型进行仿真, 验证了所提出方法的有效性.

关键词: 自由漂浮空间机器人; 跟踪控制; 参数辨识; 优化自适应控制

中图分类号: TP242

文献标志码: A

Optimal adaptive tracking control of effector trajectory for free-floating space robot

YANG Fan¹, ZHANG Guo-liang^{1†}, TIAN Qi¹, WANG Xiao-jian²

(1. Department of Control Science and Engineering, Rocket Force Engineering University, Xi'an 710025, China; 2. AVIC Aircraft Xi'an Commercial Aircraft Corporation LTD, Yanliang 710000, China)

Abstract: The effector trajectory control for the free-floating space robot(FFSR) with uncertain inertial parameters is one of hotpot about FFSR's control. Focusing on this problem, an optimal adaptive tracking control method is proposed. According to the discrete state dependent riccati equation(DSDRE), a two-stage DSDRE optimal controller is designed. By using the controller output and solving a nonlinear optimization problem, inertial parameter identification is solved. By using the result of inertial parameter identification, parameters of the two-stage DSDRE controller are adjusted in order to obtain the optimal adaptive tracking control method. Finally, simulations are carried out with the two-link planar FFSR model, which demonstrates the effectiveness of the propored method.

Keywords: free-floating space robot; tracking control; parameter identification; optimal adaptive control

0 引言

自20世纪80年代NASA提出在轨服务机器人概念以来,随着空间技术的不断发展和空间活动的不断增加,利用空间机器人代替人类完成复杂、危险的空间在轨服务任务,不断地受到广大研究者的关注.自由漂浮空间机器人(FFSR)由于其不需消耗额外能量稳定基座姿态,具有较好的长期在轨服务能力,成为目前空间机器人研究的主要对象^[1-2].

不同于地面机械臂系统,在轨运行的FFSR系统因轨道保持、变轨机动以及未知目标等多种因素,通常存在动力学参数不确定问题.故而,不确定惯性参数下FFSR的跟踪控制问题成为FFSR控制研究的重要方面,一些学者开展了相关研究并取得了丰硕的研

究成果.文献[3]采用非线性系统的输入输出精确线性化技术结合自适应控制理论,提出了规范形式扩展控制方法,实现了惯性参数不确定情况下的FFSR轨迹跟踪控制.但该方法需要获得基座和关节的加速度信息,存在一定的工程应用局限性.为解决此问题,文献[4]将低通滤波器引入FFSR动力学方程的两端对系统的状态方程进行积分降阶,改进了文献[3]所提出方法,从而避免加速度信号的测量.文献[5]研究了同时存在运动学和动力学参数不确定情况的自适应控制方法.与此同时,一些智能控制方法如神经网络^[6-7]、确定学习^[8]、模糊控制^[9]被研究者采用,通过设计补偿控制器的方式克服不确定惯性参数的影响.虽然上述研究成果能够实现FFSR的跟踪控制,

收稿日期: 2017-04-26; 修回日期: 2017-09-19.

责任编辑: 郭戈.

作者简介: 羊帆(1985—),男,工程师,博士生,从事先进控制理论、空间机器人技术的研究;张国良(1970—),男,教授,博士,从事先进控制理论与机器人技术等研究.

†通讯作者. E-mail: zhgl@sohu.com

但是研究成果多关心FFSR末端的跟踪精度而忽略了其能量优化. 对于空间机器人系统, 能量管理和优化使用是其工作性能的重要方面, 在控制器设计过程中应当予以考虑. 文献[10]虽然涉及了控制器的能量优化, 但需要获得精确的系统惯性参数. 因此, 研究存在不确定惯性参数的FFSR优化跟踪控制问题具有一定的理论研究价值和实际工程意义.

此外, 一些学者针对FFSR惯性参数辨识问题展开了大量的研究, 以解决规划和控制问题研究中由不确定惯性参数所带来的困难. 徐文福等^[11]采用PSO非线性优化方法及基于动量守恒方程的最小二乘辨识技术实现对FFSR在轨参数辨识. 进一步, 其在文献[12]中引入连杆递推辨识思想实现对FFSR各连杆惯性参数和质心位置的精确辨识, 但是所提出方法在递推过程中需要返回“标准辨识起始位置”, 降低了辨识效率. 刘正雄等^[13]采用递推差分进化算法针对惯性参数的在线辨识方法进行相关研究, 将差分进化思想与非线性最小二乘相结合. Thai等^[14]基于最小二乘方法, 通过自适应反力控制, 实现了FFSR捕获未知目标后的目标惯性参数辨识. Seyed等^[15]基于FFSR方程提出了空间机器人快速参数辨识方法. 上述方法虽能实现FFSR惯性参数的精确辨识, 但大多需要施加非受控激励力矩(不考虑末端运动而仅用于实现参数辨识的激励力矩), 这样一方面易造成辨识过程中FFSR末端运动的不可控性, 另一方面, 也降低了FFSR的工作效率.

针对能量优化条件下不确定惯性参数的FFSR末端跟踪控制问题, 本文基于文献[16]中状态依赖黎卡提方程(SDRE)方法, 通过设计优化标称和优化补偿两级SDRE控制器方法初步实现了不确定惯性参数下的FFSR末端轨迹优化跟踪控制. 但是, 因无法得到实际系统的惯性参数, 该方法在跟踪性能、鲁棒性以及FFSR工作空间范围等方面存在不足. 为此, 本文在文献[16]的研究基础上, 将FFSR参数辨识与优化控制相结合, 提出一种优化自适应轨迹跟踪控制方法, 以有效克服前述惯性参数辨识和优化跟踪控制存在的问题, 整合了两者的优势.

该方法具体思路为: 首先基于离散黎卡提方程理论(DSDRE), 设计FFSR的优化采样跟踪控制器; 其次, 将优化采样控制器的控制输出力矩作为FFSR惯性参数辨识的激励信号, 基于FFSR动力学方程与动量守恒方程将其参数辨识问题转化为非线性优化问题, 进而求解非线性优化问题获得系统惯性参数; 最后, 利用辨识结果更新优化采样控制器参数, 以提高

优化采样控制器性能.

1 模型与假设

FFSR一般由基座和机械臂组成, 由于基座处于漂浮状态, 系统无外力输入, 满足动量守恒, 基座运动与机械臂运动相耦合. 典型的空间机器人运动学和动力学模型为^[4-5]

$$\begin{cases} \mathbf{H}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{L}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} = \boldsymbol{\tau}, \\ \dot{\mathbf{y}} = \mathbf{J}^*(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}}_m. \end{cases} \quad (1)$$

其中: $\mathbf{q} = [\mathbf{x}_b, \mathbf{q}_m]^T$, $\mathbf{x}_b \in \mathbf{R}^{6 \times 1}$ 为基座的位姿向量, $\mathbf{q}_m \in \mathbf{R}^{n \times 1}$ 为关节角向量; $\mathbf{H}(\mathbf{q})$ 为系统惯性矩阵; $\mathbf{L}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ 为系统的科氏力与离心力矩阵; $\boldsymbol{\tau} = [0, \boldsymbol{\tau}_m]^T$ 为关节力矩输入向量.

考虑到FFSR系统由基座和机械臂两部分组成, 系统惯性矩阵 $\mathbf{H}(\mathbf{q})$ 和科氏力与离心力矩阵 $\mathbf{L}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ 又可分解为

$$\mathbf{H}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{bb} & \mathbf{H}_{bm} \\ \mathbf{H}_{mb} & \mathbf{H}_{mm} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{L}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_{bb} & \mathbf{L}_{bm} \\ \mathbf{L}_{mb} & \mathbf{L}_{mm} \end{bmatrix}.$$

其中: \mathbf{H}_{bb} , \mathbf{L}_{bb} 为基座的惯性矩阵及相应的科氏力与离心力矩阵; \mathbf{H}_{bm} , \mathbf{L}_{bm} 为基座与机械臂之间的耦合惯性矩阵及科氏力与离心力矩阵, 其满足

$$\mathbf{H}_{bm} = \mathbf{H}_{mb}^T, \mathbf{L}_{bm} = \mathbf{L}_{mb}^T;$$

\mathbf{H}_{mm} , \mathbf{L}_{mm} 为机械臂的惯性矩阵及相应的科氏力与离心力矩阵.

FFSR在轨工作时, 由于其姿态控制系统关闭, 工作过程中无外力输入, 由动量守恒原理, 系统(1)还满足

$$\mathbf{H}_{bb}\dot{\mathbf{x}}_b + \mathbf{H}_{bm}\dot{\mathbf{q}}_m = \mathbf{M}_0, \quad (2)$$

其中 \mathbf{M}_0 为系统的初始动量, 包括初始线动量和初始角动量.

FFSR在轨工作过程中, 因轨道保持、变轨机动以及捕获未知目标等多种因素导致其惯性参数无法在地面获得, 本文针对FFSR末端跟踪控制问题开展研究. 为简化分析过程且不失一般性, 作出如下假设.

假设1 系统初始动量为0, 即 $\mathbf{M}_0 = 0$, 同时忽略关节摩擦.

假设2 FFSR工作过程中, 基座位置、角度、线速度与角速度, 机械臂关节角及角速度可通过传感器精确获得, 即 \mathbf{x}_b , \mathbf{q}_m , $\dot{\mathbf{x}}_b$, $\dot{\mathbf{q}}_m$ 可测量.

假设3 \mathbf{x}_b , \mathbf{q}_m , $\dot{\mathbf{x}}_b$, $\dot{\mathbf{q}}_m$, $\ddot{\mathbf{x}}_b$, $\ddot{\mathbf{q}}_m$, \mathbf{y} , $\dot{\mathbf{y}}$ 均有界.

假设4 FFSR由匀质刚体组成, 工作过程中不考虑轨道扰动及微重力影响, 即式(2)始终成立.

2 FFSR的优化自适应跟踪控制

本文在文献[16]基础上设计FFSR的优化采样跟踪控制器;然后考虑FFSR的参数辨识问题;最后将优化跟踪控制与参数辨识相结合实现FFSR的自适应优化跟踪控制。

2.1 FFSR末端优化采样跟踪控制器设计

首先根据FFSR的参考模型设计标称优化控制律;然后根据参考模型输出与实际系统的输出导出误差方程,在误差方程的基础上设计第二级优化补偿控制器。

由FFSR运动学和动力学模型(1),可得

$$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{x}} = \boldsymbol{A}(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}})\boldsymbol{x} + \boldsymbol{B}(\boldsymbol{q})(\boldsymbol{\tau}_r + \boldsymbol{\tau}_d), \\ \boldsymbol{Y} = \boldsymbol{C}(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}})\dot{\boldsymbol{x}}. \end{cases} \quad (3)$$

其中: $\boldsymbol{A}(\boldsymbol{x}) = -\hat{\boldsymbol{H}}^{-1}\hat{\boldsymbol{L}}$, $\boldsymbol{B}(\boldsymbol{x}) = \hat{\boldsymbol{H}}^{-1}$, $\boldsymbol{C}(\boldsymbol{x}) = \boldsymbol{J}^*$, $\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{\tau}_r + \boldsymbol{\tau}_d$, $\boldsymbol{x} = \dot{\boldsymbol{q}}$, $\boldsymbol{Y} = \dot{\boldsymbol{y}}$. $\boldsymbol{\tau}_d$ 为由不确定惯性参数导致的干扰补偿力矩; $\hat{\boldsymbol{H}}$, $\hat{\boldsymbol{L}}$ 表示系统标称参数下的惯性矩阵及科氏力与离心力矩阵。

考虑系统不存在参数不确定时,即 $\boldsymbol{\tau}_d = 0$ 时,采用欧拉法对式(3)进行离散化可得

$$\begin{cases} \boldsymbol{x}_{k+1} = \boldsymbol{A}_d\boldsymbol{x}_k + \boldsymbol{B}_d\boldsymbol{\tau}_{rk}, \\ \boldsymbol{Y}_k = \hat{\boldsymbol{C}}_d\boldsymbol{x}_k. \end{cases} \quad (4)$$

其中: $\boldsymbol{A}_d = r\boldsymbol{A} + \boldsymbol{I}$, $\boldsymbol{B}_d = r\boldsymbol{B}$, $\hat{\boldsymbol{C}}_d$ 为标称参数下的广义雅克比矩阵, $\boldsymbol{x}_k = \boldsymbol{x}(kr)$, \boldsymbol{I} 为单位阵, r 为采样周期。

由SDRE相关理论可知,当 \boldsymbol{J}^* 可逆时, \boldsymbol{A}_d 、 \boldsymbol{B}_d 、 \boldsymbol{C}_d 为系统(4)的状态依赖系数(SDC)矩阵^[17]。

首先根据FFSR的标称参数设计标称优化控制器.为实现控制设计,定义滑模变量 z 。

定义1 滑模变量 \hat{z} 满足

$$\begin{cases} \hat{z}_k = \hat{e}_k + \lambda \hat{e}_k, \\ \hat{e}_k = \hat{\boldsymbol{y}}_k - \boldsymbol{y}_{rk}. \end{cases} \quad (5)$$

其中: \hat{e}_k 为期望末端运动轨迹与标称模型输出轨迹的误差, \boldsymbol{y}_{rk} 为期望跟踪轨迹, λ 为滑模增益,满足 $\lambda = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)$, $\lambda_i > 0$ 。

由式(4)和(5),标称系统的输出方程可写为

$$\hat{\boldsymbol{Y}}_k = \hat{z}_k + \hat{\boldsymbol{y}}_{rk} - \lambda \hat{e}_k. \quad (6)$$

由式(6)可重写系统(4)的期望跟踪轨迹如下:

$$\boldsymbol{Y}_{rk} = \hat{\boldsymbol{y}}_{rk} - \lambda \hat{e}_k. \quad (7)$$

设计目标函数为

$$\boldsymbol{J}(\boldsymbol{x}_k, k) = \frac{1}{2} \sum_{n=k}^{\infty} (\hat{z}_n^T \boldsymbol{Q} \hat{z}_n + \hat{\boldsymbol{\tau}}_{rn}^T \boldsymbol{R} \hat{\boldsymbol{\tau}}_{rn}). \quad (8)$$

由DSDRE方法,可设计标称优化控制律^[18-19]为

$$\hat{\boldsymbol{\tau}}_{rk}^* = -\boldsymbol{K}^{-1}(\hat{\boldsymbol{B}}_{dk}^T \boldsymbol{P}_{k+1} \hat{\boldsymbol{A}}_{dk} \hat{\boldsymbol{x}}_k - \boldsymbol{s}_k),$$

$$\boldsymbol{s}_k = \left[\frac{1}{2}(\hat{\boldsymbol{B}}_{dk} + \boldsymbol{I})(\boldsymbol{K}^{-1} \hat{\boldsymbol{B}}_{dk}^T \boldsymbol{P}_k - \boldsymbol{I}) \hat{\boldsymbol{A}}_{dk} + \boldsymbol{I} \right]^{-1} \hat{\boldsymbol{C}}_{dk}^T \boldsymbol{Q} \boldsymbol{Y}_{rk},$$

$$\boldsymbol{K} = \boldsymbol{R} + \hat{\boldsymbol{B}}_{dk}^T \boldsymbol{P}_{k+1} \hat{\boldsymbol{B}}_{dk}. \quad (9)$$

其中 \boldsymbol{P}_{k+1} 和 \boldsymbol{s}_k 是下述差分黎卡提方程的解:

$$\begin{aligned} & \hat{\boldsymbol{A}}_{dk}^T \boldsymbol{P}_{k+1} \hat{\boldsymbol{A}}_{dk} - \hat{\boldsymbol{A}}_{dk}^T \boldsymbol{P}_{k+1} \hat{\boldsymbol{B}}_{dk} \boldsymbol{K}^{-1} \hat{\boldsymbol{B}}_{dk}^T \boldsymbol{P}_{k+1} \hat{\boldsymbol{A}}_{dk} - \\ & \boldsymbol{P}_k + \hat{\boldsymbol{C}}_{dk}^T \boldsymbol{Q} \hat{\boldsymbol{C}}_{dk} = 0, \\ & -\boldsymbol{Y}_{rk}^T \boldsymbol{Q} \hat{\boldsymbol{C}}_{dk} + \frac{1}{2} \boldsymbol{s}_{k+1}^T \boldsymbol{K}^{\text{T}-1} \hat{\boldsymbol{B}}_{dk}^T \boldsymbol{P}_{k+1} \hat{\boldsymbol{A}}_{dk} - \\ & \boldsymbol{s}_{k+1}^T \hat{\boldsymbol{A}}_{dk} + \frac{1}{2} \boldsymbol{s}_{k+1}^T \hat{\boldsymbol{B}}_{dk} \boldsymbol{K}^{-1} \hat{\boldsymbol{B}}_{dk}^T \boldsymbol{P}_{k+1} \hat{\boldsymbol{A}}_{dk} + \boldsymbol{s}_k^T = 0. \end{aligned}$$

注1 关于 \boldsymbol{P}_{k+1} , \boldsymbol{s}_{k+1} 的求解,根据DSDRE理论,当 \boldsymbol{A}_{dk} , \boldsymbol{B}_{dk} , \boldsymbol{C}_{dk} 满足SDC条件时,可按照无限时间调节器理论方法求解上述黎卡提方程,此时认为 $\boldsymbol{P}_{k+1} = \boldsymbol{P}_k$, $\boldsymbol{s}_{k+1} = \boldsymbol{s}_k$ 。

注2 式(7)表明,若控制律(9)使得 $\hat{z}_k \rightarrow 0$, $t \rightarrow \infty$,则标称模型末端运动轨迹能够实现期望末端轨迹的跟踪. \boldsymbol{Q} 和 \boldsymbol{R} 为适当维数的正定矩阵。

当标称惯性参数与实际惯性参数存在误差时,为克服不确定惯性参数带来的影响需要在标称控制器的基础上设计优化补偿控制器。

由式(3)和(4)可知

$$\begin{cases} \boldsymbol{x}_{k+1} - \hat{\boldsymbol{x}}_{k+1} = \\ \boldsymbol{A}_d(\boldsymbol{x}_k)\boldsymbol{x}_k - \boldsymbol{A}_d(\hat{\boldsymbol{x}}_k)\hat{\boldsymbol{x}}_k + \\ [\boldsymbol{B}_d(\boldsymbol{x}_k) - \boldsymbol{B}_d(\hat{\boldsymbol{x}}_k)]\boldsymbol{\tau}_r + \boldsymbol{B}_d(\boldsymbol{x}_k)\boldsymbol{\tau}_d, \\ \boldsymbol{Y}_k = \boldsymbol{C}_d(\boldsymbol{x}_k)\boldsymbol{x}_k - \hat{\boldsymbol{C}}_d(\hat{\boldsymbol{x}}_k)\hat{\boldsymbol{x}}_k, \end{cases} \quad (10)$$

则可得误差方程

$$\boldsymbol{E}_{k+1} = \boldsymbol{A}_d(\hat{\boldsymbol{x}}_k)\boldsymbol{E}_k + \boldsymbol{B}_d(\boldsymbol{x}_k)\boldsymbol{U}_k. \quad (11)$$

其中

$$\begin{aligned} \boldsymbol{E}_k &= \boldsymbol{x}_k - \hat{\boldsymbol{x}}_k, \quad \tilde{\boldsymbol{A}}_d(\boldsymbol{E}_k) = \boldsymbol{A}_d(\boldsymbol{x}_k) - \boldsymbol{A}_d(\hat{\boldsymbol{x}}_k), \\ \tilde{\boldsymbol{B}}_d(\boldsymbol{E}_k) &= \boldsymbol{B}_d(\boldsymbol{x}_k) - \boldsymbol{B}_d(\hat{\boldsymbol{x}}_k), \\ \tilde{\boldsymbol{C}}_d(\boldsymbol{E}_k) &= \boldsymbol{C}_d(\boldsymbol{x}_k) - \hat{\boldsymbol{C}}_d(\hat{\boldsymbol{x}}_k), \\ \boldsymbol{U}_k &= \boldsymbol{\tau}_{dk} + \boldsymbol{B}_d^{-1}(\boldsymbol{x}_k)\tilde{\boldsymbol{A}}_d(\boldsymbol{E}_k)\boldsymbol{x}_k + \\ & \boldsymbol{B}_d^{-1}(\boldsymbol{x}_k)\tilde{\boldsymbol{B}}_d(\boldsymbol{E}_k)\boldsymbol{\tau}_{rk}. \end{aligned}$$

由式(5)可得

$$\boldsymbol{Y}_k - \hat{\boldsymbol{Y}}_k = \boldsymbol{z}_k - \hat{z}_k + \lambda(\hat{e}_k - \boldsymbol{e}_k), \quad (12)$$

构造误差补偿输出方程为

$$\boldsymbol{Y}_{Ek} = -\hat{\boldsymbol{C}}_d(\hat{\boldsymbol{x}}_k)\boldsymbol{E}_k. \quad (13)$$

其中: $\hat{\boldsymbol{C}}_d$ 为在标称惯性参数下的广义雅克比矩阵, \boldsymbol{C}_d 为实际系统的广义雅克比矩阵。

由式(11)和(13),可重构新的误差系统

$$\begin{cases} \mathbf{E}_{k+1} = \mathbf{A}_d(\hat{\mathbf{x}}_k)\mathbf{E}_k + \mathbf{B}_d(\mathbf{x}_k)\mathbf{U}_k, \\ \mathbf{Y}_{E_k} = -\hat{\mathbf{C}}_d(\hat{\mathbf{x}}_k)\mathbf{E}_k, \end{cases} \quad (14)$$

设计新的期望误差轨迹

$$\mathbf{Y}_{E_{rk}} = \lambda(\hat{\mathbf{e}}_k - \mathbf{e}_k) - \hat{\mathbf{C}}_k(\hat{\mathbf{x}}_k)\mathbf{E}_k, \quad (15)$$

及目标函数

$$\begin{aligned} J(\mathbf{E}_k, k) = & \\ & \frac{1}{2} \sum_{n=k}^{\infty} [(\hat{\mathbf{e}}_n - \mathbf{e}_n)^T \lambda^T \mathbf{Q}_E \lambda (\hat{\mathbf{e}}_n - \mathbf{e}_n) + \mathbf{U}_n^T \mathbf{R}_E \mathbf{U}_n]. \end{aligned} \quad (16)$$

类似于标称控制律设计,误差系统(14)的控制律为

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{U}}_{dk}^* = & -\mathbf{K}_E^{-1}(\hat{\mathbf{B}}_{dk}^T \mathbf{P}_{E_{k+1}} \hat{\mathbf{A}}_{dk} \hat{\mathbf{E}}_k - \mathbf{s}_{E_k}), \\ \mathbf{s}_{E_k} = & \left[\frac{1}{2}(\hat{\mathbf{B}}_{dk} + \mathbf{I})(\mathbf{K}_E^{-1} \hat{\mathbf{B}}_{dk}^T \mathbf{P}_{E_k} - \mathbf{I}) \hat{\mathbf{A}}_{dk} + \right. \\ & \left. \mathbf{I} \right]^{T-1} \hat{\mathbf{C}}_{dk}^T \mathbf{Q}_E \mathbf{Y}_{E_{rk}}, \\ \mathbf{K}_E = & \mathbf{R}_E + \hat{\mathbf{B}}_{dk}^T \mathbf{P}_{E_{k+1}} \hat{\mathbf{B}}_{dk}. \end{aligned} \quad (17)$$

其中 $\mathbf{P}_{E_{k+1}}$ 和 \mathbf{s}_{E_k} 为下述差分黎卡提方程的解:

$$\begin{aligned} & \hat{\mathbf{A}}_{dk}^T \mathbf{P}_{E_{k+1}} \hat{\mathbf{A}}_{dk} - \mathbf{P}_k + \hat{\mathbf{C}}_{dk}^T \mathbf{Q}_E \hat{\mathbf{C}}_{dk} - \\ & \hat{\mathbf{A}}_{dk}^T \mathbf{P}_{E_{k+1}} \hat{\mathbf{B}}_{dk} \mathbf{K}_E^{-1} \hat{\mathbf{B}}_{dk}^T \mathbf{P}_{E_{k+1}} \hat{\mathbf{A}}_{dk} = 0, \\ & -\mathbf{Y}_{E_{rk}}^T \mathbf{Q}_E \hat{\mathbf{C}}_{dk} - \mathbf{s}_{k+1}^T \hat{\mathbf{A}}_{dk} + \mathbf{s}_{E_k}^T + \\ & \frac{1}{2} \mathbf{s}_{E_{k+1}}^T \mathbf{K}_E^{-1} \hat{\mathbf{B}}_{dk}^T \mathbf{P}_{E_{k+1}} \hat{\mathbf{A}}_{dk} + \\ & \frac{1}{2} \mathbf{s}_{E_{k+1}}^T \hat{\mathbf{B}}_{dk} \mathbf{K}_E^{-1} \hat{\mathbf{B}}_{dk}^T \mathbf{P}_{E_{k+1}} \hat{\mathbf{A}}_{dk} = 0. \end{aligned}$$

进一步,可得优化补偿控制律为

$$\tau_{dk}^* = \mathbf{U}_k^* - \mathbf{B}_d^{-1}(\mathbf{x}_k) \hat{\mathbf{A}}_d(\mathbf{E}_k) \mathbf{x}_k + \mathbf{B}_d^{-1} \hat{\mathbf{B}}_d(\mathbf{E}_k) \tau_{rk}^*. \quad (18)$$

定理1 对于具有不确定惯性参数的FFSR系统(1),若满足假设1~假设4及相应的SDC条件,则存在组合控制律(9)和(18),使得FFSR末端运动轨迹渐近稳定跟踪期望轨迹.

证明 对于标称模型系统,其闭环系统可写为

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{x}}_{k+1} = \hat{\mathbf{A}}_{dk} \hat{\mathbf{x}}_k - \hat{\mathbf{A}}_{dk} \mathbf{F}_k \hat{\mathbf{x}}_k + \hat{\mathbf{B}}_{dk} \mathbf{K}^{-1} \mathbf{s}_k, \\ \mathbf{F}_k = \mathbf{K}^{-1} \hat{\mathbf{B}}_{dk}^T \mathbf{P}_{k+1} \hat{\mathbf{A}}_{dk}. \end{cases} \quad (19)$$

其中: $\hat{\mathbf{A}}_{dk} = \mathbf{A}_d(\hat{\mathbf{x}}_k)$, $\hat{\mathbf{B}}_{dk} = \mathbf{B}_d(\hat{\mathbf{x}}_k)$. 闭环方程(19)包含反馈项与前馈项,由于前馈项不影响 \mathbf{P}_k 的求解,闭环系统的稳定性仅与反馈项相关,可得参考模型下系统的闭环反馈方程为

$$\hat{\mathbf{x}}_{k+1} = \hat{\mathbf{A}}_{dk} \hat{\mathbf{x}}_k - \hat{\mathbf{A}}_{dk} \mathbf{F}_k \hat{\mathbf{x}}_k = \hat{\mathbf{A}}_{dk}(\mathbf{I} - \mathbf{F}_k) \hat{\mathbf{x}}_k. \quad (20)$$

定义Lyapunov函数

$$V(\hat{\mathbf{x}}_k) = \hat{\mathbf{x}}_k^T \mathbf{P}_k \hat{\mathbf{x}}_k. \quad (21)$$

其中: $V(\hat{\mathbf{x}}_k) > 0$, $\forall \hat{\mathbf{x}}_k > 0$, 并且有 $V(\hat{\mathbf{x}}_k) = 0$, $\hat{\mathbf{x}}_k = 0$. 进一步,可得

$$\begin{aligned} V(\hat{\mathbf{x}}_{k+1}) - V(\hat{\mathbf{x}}_k) \leq & \\ & -\hat{\mathbf{x}}_k^T [\hat{\mathbf{A}}_{dk}^T (\mathbf{I} - \mathbf{F}_k^T) \mathbf{P}_{k+1} \mathbf{F}_k \hat{\mathbf{A}}_{dk}] \hat{\mathbf{x}}_k. \end{aligned} \quad (22)$$

由 $\mathbf{R} > 0$, 可得 $V(\hat{\mathbf{x}}_{k+1}) - V(\hat{\mathbf{x}}_k) \leq 0$. 表明标称系统在标称优化控制律作用下可实现输出轨迹渐近稳定跟踪期望轨迹, 即有 $\lim_{t \rightarrow \infty} \hat{\mathbf{z}} = 0$.

类似地,跟踪误差补偿系统含有其闭环方程反馈部分,即

$$\mathbf{E}_{k+1} = \hat{\mathbf{A}}_{dk} \mathbf{E}_k - \hat{\mathbf{A}}_{dk} \mathbf{F}_{E_k} \mathbf{E}_k = \hat{\mathbf{A}}_{dk} (\mathbf{I} - \mathbf{F}_{E_k}) \mathbf{E}_k, \quad (23)$$

其中 $\mathbf{F}_{E_k} = \mathbf{K}_E^{-1} \hat{\mathbf{B}}_{dk}^T \mathbf{P}_{E_{k+1}} \hat{\mathbf{A}}_{dk}$.

定义Lyapunov函数

$$V(\mathbf{E}_k) = \mathbf{E}_k^T \mathbf{P}_{E_k} \mathbf{E}_k, \quad (24)$$

其中 $V(\mathbf{E}_k) > 0$, $\forall \mathbf{E}_k > 0$, 并且有 $V(\mathbf{E}_k) = 0$, $\mathbf{E}_k = 0$. 则有

$$\begin{aligned} V(\mathbf{E}_{k+1}) - V(\mathbf{E}_k) \leq & \\ & -\mathbf{E}_k^T [\mathbf{A}_{dk}^T (\mathbf{I} - \mathbf{F}_k^T) \mathbf{P}_{k+1} \mathbf{F}_k \hat{\mathbf{A}}_{dk}] \mathbf{E}_k. \end{aligned} \quad (25)$$

由于 $\mathbf{R}_E > 0$, 可得 $V(\mathbf{E}_{k+1}) - V(\mathbf{E}_k) \leq 0$. 说明控制律(17)使得误差系统(14)稳定, 进一步由式(12)和(13)可知 $\lim_{t \rightarrow \infty} (\mathbf{e}_n - \hat{\mathbf{e}}_n) = 0$, 表明实际系统输出轨迹能够跟踪标称模型输出轨迹.

至此,由式(22)和(25)可知存在组合控制律(9)和(18)使得FFSR末端运动轨迹能够渐近稳定跟踪期望轨迹. \square

2.2 惯性参数辨识

本文基于系统动力学方程及动量守恒方程,将FFSR的参数辨识问题转化为具有非线性约束的非线性优化问题,通过求解非线性优化问题实现对于FFSR的参数辨识.

存在不确定参数时FFSR动力学方程可重写为

$$\mathbf{F}_i(\mathbf{q}_i, \dot{\mathbf{q}}_i, \ddot{\mathbf{q}}_i, \boldsymbol{\theta}) = \tau_i - \mathbf{H}(\dot{\mathbf{q}}_i) \ddot{\mathbf{q}}_i - \mathbf{L}(\mathbf{q}_i, \dot{\mathbf{q}}_i) \dot{\mathbf{q}}_i, \quad (26)$$

系统动量方程亦重写为

$$\mathbf{G}_i(\mathbf{q}_i, \dot{\mathbf{q}}_i, \boldsymbol{\theta}) = \mathbf{H}_{bb}(\mathbf{q}_i) \dot{\mathbf{x}}_{bi} + \mathbf{H}_{bm}(\mathbf{q}_i) \dot{\mathbf{q}}_{mi}. \quad (27)$$

其中: $i = 1, 2, \dots, k$, 表示第*i*个数据采样; n 维列向量 $\boldsymbol{\theta} \in \mathbf{R}^+$ 为系统待辨识惯性参数向量. 根据式(1)、(2)、(26)和(27)可将FFSR参数辨识问题转化成如下非线性优化问题:

$$\min f(x) = \frac{1}{2} (\boldsymbol{\theta} - \boldsymbol{\theta}_0)^T (\boldsymbol{\theta} - \boldsymbol{\theta}_0).$$

$$\text{s.t. } \mathbf{F}_i(\mathbf{q}_i, \dot{\mathbf{q}}_i, \ddot{\mathbf{q}}_i, \boldsymbol{\theta}) = \mathbf{0};$$

$$\begin{aligned} G_i(q_i, \dot{q}_i, \theta) &= 0; \\ \theta &= [\theta_1, \dots, \theta_n]^T; \\ \theta_j &> 0, j = \{1, 2, \dots, n\}; \\ i &= \{1, 2, \dots, k\}. \end{aligned} \quad (28)$$

注3 在将参数辨识问题转化为非线性优化问题时,本文定义目标函数为 $\min f(x) = \|(\theta - \theta_0)\|^2/2$,其中 θ_0 是辨识过程中任意取定的参数初值.一般而言,虽然无法获得FFSR的精确参数,但在任务初始总能根据经验给出其估计值,此估计值即为 θ_0 . 目标函数的几何意义是,通过优化求解的参数值为满足约束条件且距估计值最近的参数值.

定理2 若 θ^* 为约束非线性优化问题(28)的解, $F_i(q_i, \dot{q}_i, \ddot{q}_i, \theta)$, $G_i(q_i, \dot{q}_i, \theta)$ 在 θ^* 连续可微,且有向量组 $\nabla F_i(q_i, \dot{q}_i, \ddot{q}_i, \theta^*)$, $\nabla G_i(q_i, \dot{q}_i, \theta^*)$ 线性无关,则 θ^* 为非线性优化问题(28)的全局极小值点.

证明 由 $\theta \in R^+$,若 $\lambda \in (0, 1)$,目标函数为

$$\begin{aligned} f(\lambda\theta_1 + (1-\lambda)\theta_2) - \lambda f(\theta_1) - (1-\lambda)f(\theta_2) &= \\ \frac{1}{2} \|\lambda\theta_1 + (1-\lambda)\theta_2 - \theta_0\|^2 - & \\ \frac{\lambda}{2} \|\theta_1\|^2 - \frac{1-\lambda}{2} \|\theta_2 - \theta_0\|^2 \leq & \\ -\frac{\lambda}{2} \theta_1^T \theta_0 - \frac{1-\lambda}{2} \theta_2^T \theta_0 < 0, & \end{aligned} \quad (29)$$

机械臂动力学方程可通过动力学回归矩阵实现参数线性化^[9,14],则式(26)可重写为

$$\begin{aligned} H_{bb}\ddot{x}_b + H_{bm}\ddot{q}_m + L_{bb}\dot{x}_b + L_{bm}\dot{q}_m &= \\ Y_b(q, \dot{q}, \ddot{q})\theta &= 0, \end{aligned} \quad (30)$$

$$\begin{aligned} H_{mb}\ddot{x}_b + H_{mm}\ddot{q}_m + L_{mb}\dot{x}_b + L_{mm}\dot{q}_m &= \\ Y_m(q, \dot{q}, \ddot{q})\theta &= \tau_m. \end{aligned} \quad (31)$$

同理,FFSR动量方程亦可利用回归矩阵转化为

$$H_{bb}\ddot{x}_b + H_{bm}\dot{q}_m = Y_p(q, \dot{q})\theta = 0. \quad (32)$$

则原非线性优化问题(28)可等价于凸二次规划问题

$$\begin{aligned} \min f(x) &= \frac{1}{2}(\theta - \theta_0)^T(\theta - \theta_0). \\ \text{s.t. } Y_{bi}(q_i, \dot{q}_i, \ddot{q}_i)\theta &= 0; \\ \tau_{mi} - Y_{mi}(q_i, \dot{q}_i, \ddot{q}_i)\theta &= 0; \\ Y_{pi}(q_i, \dot{q}_i)\theta &= 0; \\ \theta_j &> 0, j = \{1, 2, \dots, n\}; \\ i &= \{1, 2, \dots, k\}. \end{aligned} \quad (33)$$

当向量组 $\nabla F_i(q_i, \dot{q}_i, \ddot{q}_i, \theta^*)$, $\nabla G_i(q_i, \dot{q}_i, \theta^*)$ 线性无关,由K-T定理可知, θ^* 为非线性优化问题局部极小值点,同时根据凸优化理论可知其也是全局极小值点^[20-21]. □

由式(26)可知,为求解非线性优化问题(28)需要测量基座和关节的加速度信息,为了避免使用加速度信息,本文利用速度对加速度进行估计,进而使用加速度估计值作为数据,求解优化问题.加速度估计方程为

$$\ddot{q}_i^* = \frac{\dot{q}_{i+1} - \dot{q}_i}{r_{i+1}}, \quad (34)$$

r_{i+1} 表示第 $i+1$ 次数据采样与第 i 次采样之间的采样间隔,对于固定采样周期其为一常数.

由于采用式(34)估计加速度信息,不可避免地引入了数据误差.为了避免误差累计,本文在求解非线性优化问题时对数据采用加窗法,在进行优化求解时遗忘掉陈旧数据.这样一方面可以减少优化问题中约束方程的数量,降低求解复杂度;另一方面可以有效避免由加速度估计所带来的累计误差以及错误数据采样对辨识结果的影响.至此,通过求解非线性优化问题即可实现对惯性参数的辨识.关于非线性的优化问题,本文采用经典的内点法^[22]求解,此处不再赘述.

此外,当获得一定精度的辨识结果后,参数辨识精度的提高不再显著,不必继续进行参数辨识.本文设计一个评价函数,以避免当参数辨识结果达到一定精度后重复进行参数辨识.

定义2 FFSR惯性参数辨识评价函数

$$l_{n+1}(\hat{\theta}_n) = \|\dot{q}_{n+1} - \hat{q}_{n+1}\|^2 + \|q_{n+1} - \hat{q}_{n+1}\|^2. \quad (35)$$

其中: \hat{q}_{n+1} 和 \hat{q}_{n+1} 是利用参数辨识结果对 $N+1$ 时刻进行的关节输出预测,其满足

$$\begin{cases} \hat{q}_n = -H_n^{-1}(\tau_n - L_n \hat{q}_n), \\ \hat{q}_{n+1} = r \hat{q}_n + \dot{q}_n, \\ \hat{q}_{n+1} = \frac{r^2}{2} \hat{q}_n + q_n. \end{cases} \quad (36)$$

H_n 和 L_n 为根据 $\hat{\theta}_n$ 计算的相应惯性矩阵和科氏力与离心力矩阵.

当 $l_{n+1}(\hat{\theta}_n) \leq \epsilon$ 时,认为参数辨识结果已经达到一定精度,不再进行参数辨识.

2.3 FFSR末端自适应优化控制

基于两级DSDRE的FFSR末端采样优化控制器,虽然能够使得FFSR末端跟踪期望轨迹,但是由于采用补偿控制方法没有考虑到系统的参数辨识问题,在控制器的鲁棒性、跟踪性等方面存在不足;另一方面,不进行参数辨识也不利于FFSR复杂任务的控制实现.为此,将FFSR的末端优化跟踪控制与其惯性参数辨识相结合,实现FFSR的优化自适应跟踪控制.

首先利用两级DSDRE优化跟踪控制器输出作

为参数辨识激励力矩;然后,求解非线性优化问题(28)获得系统参数辨识结果;最后,根据参数辨识结果,修正标称模型参数以及控制器参数,实现FFSR的优化自适应控制器.

由式(9)和(18),考虑参数更新的优化自适应控制律为

$$\begin{cases} \hat{\tau}_{rk}^* = -K^{-1}(\theta_i) \hat{B}_{dk}^T(\theta_i) P_{k+1}(\theta_i) \hat{A}_{dk}(\theta_i) \hat{x}_k + \\ \quad K^{-1}(\theta_i) s_k, \\ \tau_{dk}^* = U_k^*(\theta_i) - B_d^{-1}(x_k, \theta_i) \tilde{A}_d(E_k, \theta_i) x_k + \\ \quad B_d^{-1}(\theta_i) \tilde{B}_d(E_k, \theta_i) \tau_{rk}^*. \end{cases} \quad (37)$$

定理3 对于具有不确定参数的FFSR系统(1),若满足假设1~假设4,且有惯性参数向量 θ_i 使得参考系统(4)与误差系统(14)满足SDC条件,则存在优化自适应控制律(37),使得FFSR末端运动轨迹渐近稳定跟踪期望轨迹.

证明 由式(22)和(25)可知,若惯性参数向量 θ_i 使得标称系统(4)与误差系统(14)满足SDC条件,则惯性参数 θ_i 并不影响 $V(\hat{x}_{k+1}) - V(\hat{x}_k) \leq 0, V(E_{k+1}) - V(E_k) \leq 0$,故而优化自适应控制律(37)仍能保证FFSR末端轨迹渐近稳定跟踪期望末端轨迹. \square

注4 因系统惯性矩阵 H 为正定矩阵,故 $B_{dk} = rH^{-1}$ 亦为正定矩阵,则系统SDC条件依赖于 $\hat{C}_{dk}(\hat{x}_k, \theta_i)$ 的奇异性;若 $\hat{C}_{dk}(\hat{x}_k, \theta_i)$ 奇异,则系统不满足SDC条件.

FFSR广义雅克比矩阵的奇异性与系统的动力学参数、关节角配置密切相关,为保证参数更新过程中 $\hat{C}_{dk}(\hat{x}_k, \theta_i)$ 始终可逆,引入如下参数更新函数:

$$\begin{cases} \hat{\theta} = \theta_i, \det[\hat{C}(\hat{x}_k, \theta_i)] \neq 0; \\ \hat{\theta} = \theta_i + \xi, \det[\hat{C}(\hat{x}_k, \theta_i)] = 0. \end{cases} \quad (38)$$

由于两级DSDRE优化控制器对惯性参数误差具有一定的鲁棒性,类似于阻尼导数法^[23],可选取一个惯性参数扰动向量 ξ ,以避免 $\hat{C}_{dk}(\hat{x}_k, \theta_i)$ 奇异. ξ 可根据GJM的结构适当选取.

同时,为保证参数更新过程收敛,在式(35)定义的评价函数基础上,定义参数更新规则函数.若满足规则函数条件,则进行参数更新,反之不进行参数更新.

定义3 FFSR惯性参数更新规则函数

$$g_{n+1} = l_{n+1}(\hat{\theta}_{n-1}) - l_{n+1}(\hat{\theta}_n); \quad (39)$$

$$\begin{cases} \hat{\theta}_n = \hat{\theta}_{n-1}, g_{n+1} \leq 0; \\ \hat{\theta}_n = \theta_n^*, g_{n+1} > 0. \end{cases} \quad (40)$$

其中 θ_n^* 为 N 时刻参数辨识结果.

整个控制流程如图1所示.

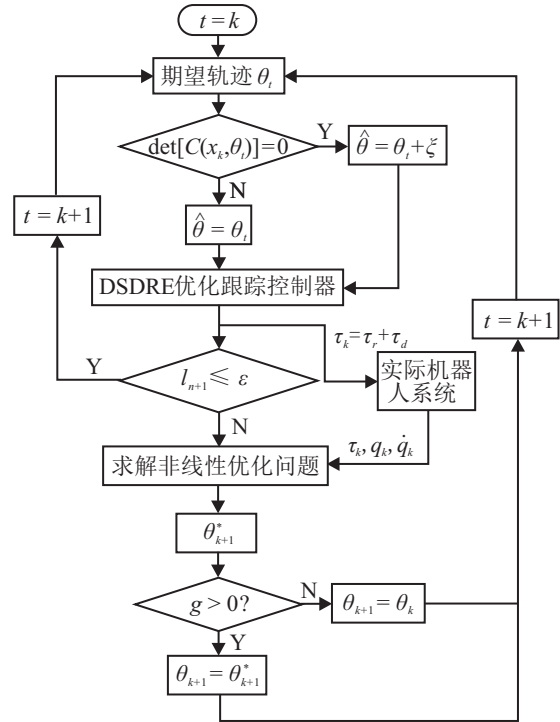


图1 FFSR优化自适应控制流程图

3 数值仿真

以如图2所示的典型平面两连杆空间机器人模型为例,验证所提出方法的有效性.

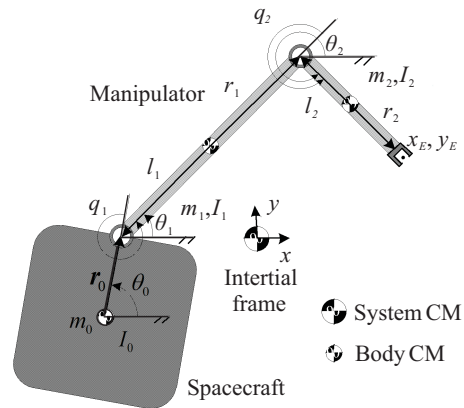


图2 平面两连杆FFSR示意图

为验证本文所提出方法的有效性,设定两连杆空间机器人标称模型参数如表1所示.

表1 空间机器人标称参数

link	l_i / m	r_i / m	m_i / kg	$J_i / (kg \cdot m^2)$
0	0.5	0.5	40	6.667
1	0.5	0.5	4	0.333
2	0.5	0.5	3	0.250

由于保持轨道、抓取目标以及变轨调姿等客观因素,造成FFSR系统的参数发生变化,其实际系统参数设定如表2所示.

FFSR期望末端轨迹为

表2 空间机器人实际参数

link	l_i/m	r_i/m	m_i/kg	$J_i/(kg \cdot m^2)$
0	0.5	0.5	25	5.667
1	0.5	0.5	5	0.433
2	0.5	0.5	10	0.750

$$\begin{cases} x = 0.28 \cos(0.1\pi t) + 1.05, \\ y = 0.28 \sin(0.1\pi t). \end{cases}$$

仿真时间为20 s,采样周期为0.02 s, $\lambda = \text{diag}(30, 30)$, $Q = Q_E = \text{diag}(90, 100)$, $R = R_E = \text{diag}(1, 1)$,评价函数精度阈值 $\epsilon = 1e^{-10}$.

3.1 参数辨识

图3~图5为FFSR基座与各连杆惯性参数辨识结果.图6为优化自适应控制过程中评价函数(37)的输出值.表3为参数辨识的最终结果.图3~图5表明,本文采用非线性优化方法求解系统惯性参数能够实现对FFSR系统惯性参数的辨识.表3进行了参数辨识结果与真值的对比,其最大辨识误差在真值的5%左右,最小辨识误差为0.01%.由图6可以看出,辨识方法的收敛速度相对较快,在0.6 s左右即可完成对惯性参数的辨识.

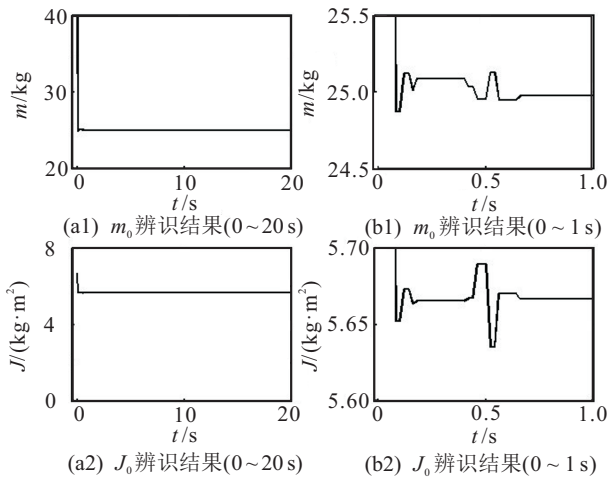


图3 m_0, J_0 辨识结果

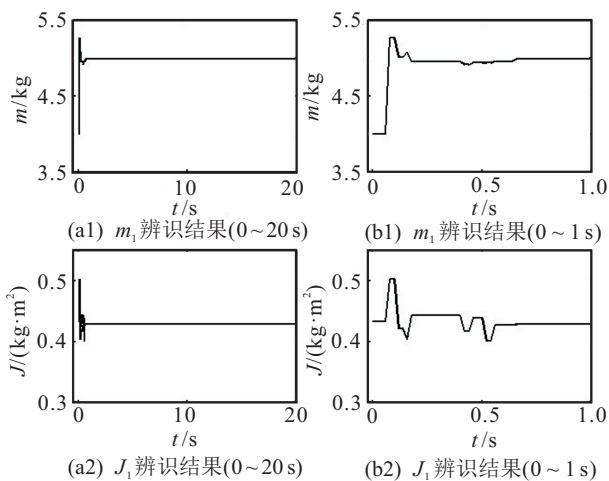


图4 m_1, J_1 辨识结果

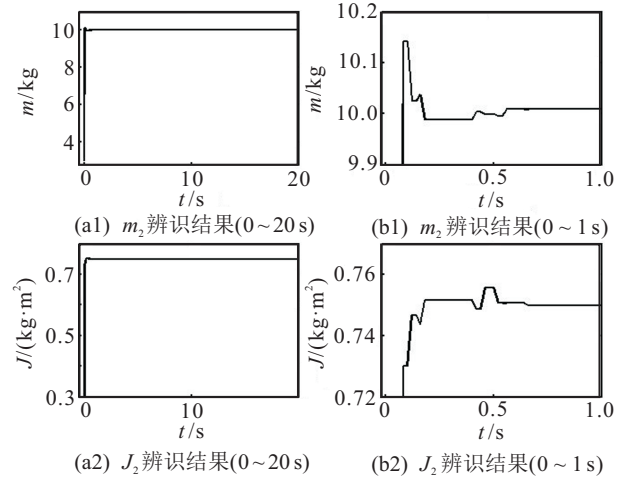


图5 m_2, J_2 辨识结果

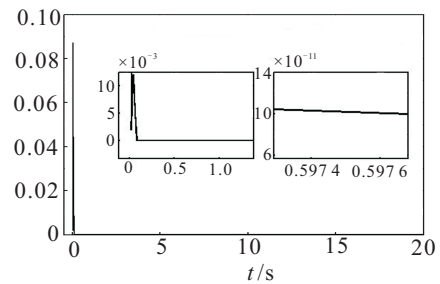


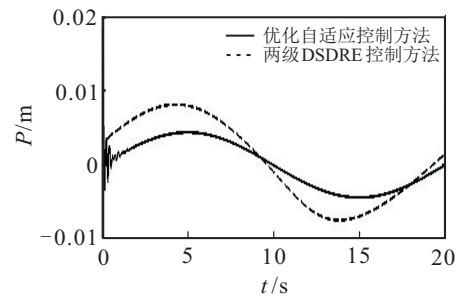
图6 评价函数输出

表3 参数辨识结果

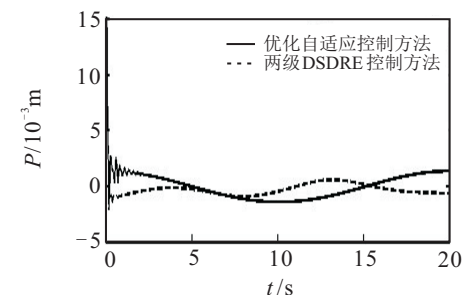
质量	辨识值	误差度/%	惯量	辨识值	误差度/%
m_0	24.9727	0.02	J_0	5.6663	0.02
m_1	5.2625	5.30	J_1	0.4283	1.08
m_2	10.1414	1.50	J_2	0.7499	0.01

3.2 跟踪性能

为验证本文所提出方法对两级优化控制方法在跟踪性能方面的改进,将本文方法与两级DSDRE优



(a) x方向位置误差曲线



(b) y方向位置误差曲线

图7 FFSR末端跟踪误差

化控制方法进行仿真对比,仿真结果如图7~图9所示。

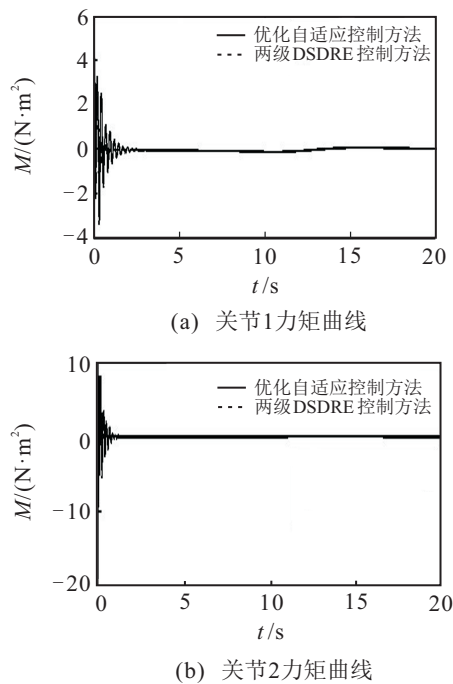


图8 FFSR控制力矩

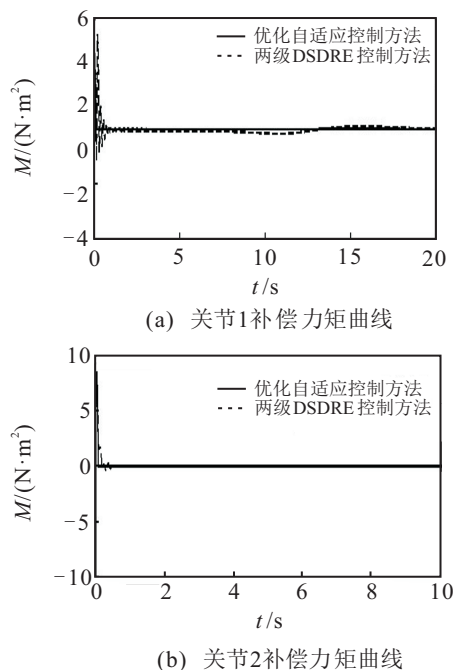


图9 补偿力矩

图8给出了本文方法和采用两级DSDRE优化控制方法的跟踪误差。结果表明,两种方法都能实现期望末端轨迹的跟踪,但是由于本文方法加入了惯性参数的辨识,使得跟踪精度相比采用DSDRE方法有明显的提升。其中,将误差峰值在 x 方向由原来两级DSDRE方法的0.013 m减小到0.004 5 m, y 方向由原来0.003 m减小到0.001 8 m,验证了本文方法对文献[16]中两级优化跟踪控制器在跟踪性能上的改进。但是,由图9中峰值力矩和振荡时间可以看出,两

级DSDRE优化控制器在控制力矩的优化上优于优化自适应控制方法。出现这种问题的主要原因是参数辨识结果对标称模型参数的更新引起了标称系统控制器跟踪误差的增大。

进一步,由图9补偿力矩的变化情况上看,虽然存在一定的参数辨识误差,但是在0.6 s后补偿力矩均小于 $10^{-4} \text{ N} \cdot \text{m}^2$,从侧面反映出参数辨识结果更新标称模型后,标称模型与实际系统在动力学特性上基本相同。

4 结论

本文将FFSR的优化跟踪控制与惯性参数辨识过程相结合,提出了一种优化自适应控制方法,并采用典型的平面两连杆FFSR模型进行仿真验证(采用平面两连杆模型的主要原因是为了简化运算,但本文所提方法并不仅限于平面两连杆模型)。仿真结果表明,该方法提高了两级DSDRE优化跟踪控制器的性能,同时克服了传统参数辨识过程中FFSR末端运动不可控问题,实现了对存在不确定惯性参数FFSR的末端优化自适应控制。

参考文献(References)

- [1] Flores-Abad A, Ma O, Pham K, et al. A review of space robotics technologies for on-orbit servicing[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2014, 68(8):1-26.
- [2] Xu W F, Liang B, Xu Y. Survey of modeling, planning, and ground verification of space robotic systems[J]. Acta Astronautica, 2011, 68(11/12): 1629-1649.
- [3] Gu Y L, Xu Y S. A normal form augmentation approach to adaptive control of space robot systems[C]. 1993 IEEE Int Conf on Robotics and Automation. Atlanta, 1993: 731-737.
- [4] Parlaktuna O, Ozkan M. Adaptive control of free-floating space robots in Cartesian coordinates[J]. Advanced Robotics, 2004, 18(9): 943-959.
- [5] Wang H, Xie Y. Passivity based adaptive Jacobian tracking for free-floating space manipulators without using spacecraft acceleration[J]. Automatica, 2009, 45(6): 1510-1517.
- [6] Abiko S, Yoshida K. Adaptive reaction control for space robotic applications with dynamic model uncertainty[J]. Advanced Robotics, 2010, 24(8/9): 1099-1126.
- [7] 史也. 空间机器人自主捕获目标的轨迹规划与控制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学航天学院, 2013. (Shi Y. Research on trajectory planning and control of Space Robot for autonomous capturing target[D]. Harbin: School of Astronautics Harbin Institute of Technology, 2013.)

- [8] 吴玉香, 王聪. 基于确定学习的机器人任务空间自适应神经网络控制[J]. 自动化学报, 2013, 39(6): 806-815.
(Wu Y X, Wang C. Deterministic learning based adaptive network control of robot in task space[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2013, 39(6): 806-815.)
- [9] 张福海, 付宜利, 王树国. 惯性参数不确定的自由漂浮空间机器人自适应控制研究[J]. 航空学报, 2012, 33(12): 2347-2354.
(Zhang F H, Fu Y L, Wang S G. Adaptive control of free-floating space robot with inertia parameter uncertainties. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2012, 33(12): 2347-2354.)
- [10] Wang M, Luo J, Walter U. A non-linear model predictive controller with obstacle avoidance for a space robot[J]. *Advances in Space Research*, 2016, 57(8): 1737-1746.
- [11] 徐文福, 何勇, 王学谦, 等. 航天器质量特性参数的在轨辨识方法[J]. 宇航学报, 2010, 31(8): 1906-1914.
(Xu W F, He Y, Wang X Q, et al. On orbit identification of mass characteristic parameters for spacecraft.[J] *J of Astronautics*, 2010, 31(8): 1906-1914.)
- [12] Xu W F, Hu Z H, Zhang Y, et al. On-orbit identifying the inertia parameters of space robotic systems using simple equivalent dynamics[J]. *Acta Astronautica*, 2017, 132(3): 131-142.
- [13] 刘正雄, 鹿振宇, 黄攀峰. 基于递推差分进化算法的空间机器人参数辨识[J]. 宇航学报, 2014, 35(10): 1127-1134.
(Liu Z X, Lu Z Y, Huang P F. Parameter identification of space robot based on recursive different evolution algorithm[J]. *J of Astronautics*, 2014, 35(10): 1127-1134.)
- [14] Thai Chau N-Huynh, Inna Sharf. Adaptive reactionless motion and parameter identification in postcapture of space debris[J]. *J of Guidance, Control, and Dynamics*, 2013, 36(2): 404-414.
- [15] Seyed Yaser Nabavi Chashmi, Seyed Mohammad-Bagher Malaek. Fast estimation of space-robots inertia parameters: A modular mathematical formulation[J]. *Acta Astronautica*, 2016, 127(10/11): 283-295.
- [16] 羊帆, 张国良, 原磊, 等. 自由漂浮空间机器人末端轨迹优化跟踪控制[J]. 宇航学报, 2016, 37(7): 67-74.
(Yang F, Zhang G L, Yuan L, et al. End-effector optimal tracking control of free-floating space robot[J]. *J of Astronautics*, 2016, 37(7): 67-74.)
- [17] Cimen T. State-dependent riccati equation(SDRE) control: A survey[J]. *The Int Federation of Automatic Control*, 2008, 41(2): 3761-3775.
- [18] Yoshida K, Ohsaki H, Iwase M. Optimality recovery of feedback control system based on discrete-time state dependent riccati equation[C]. *The 2012 IEEE Int Conf on Control Applications*. Dubrovnik, 2012: 463-469.
- [19] Fernando O, Jesus R, Riemann R. Optimal tracking for State-Dependent coefficient factorized nonlinear system[J]. *Asian J of Control*, 2014, 16(3): 890-903.
- [20] 韩崇昭. 应用泛函分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010.
(Han C Z. functional analysis for application[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2010.)
- [21] Dimitri P Bertsekas, Angelia Nedic, Asuman E Ozdaglar. Convex analysis and optimization[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2016.
- [22] 张光澄. 非线性最优化计算方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2005.
(Zhang G C. Computational methods for nonlinear optimization[M]. Beijing: Higher Education Press, 2005.)
- [23] Phouc L M, Martinet P. Damped least square based genetic algorithm with Gaussian distribution of damping factor for singularity-robust inverse kinematics[J]. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2008, 22(7): 1330-1338.

(责任编辑: 孙艺红)