

基于主动阻尼控制的柔性基座振动抑制

周政¹, 邹怀武², 储驻港¹, 钟楼¹, 汤奇荣¹

(1. 同济大学机械与能源工程学院 机器人技术与多体系统实验室, 上海 201804;

2. 上海市空间飞行器机构重点实验室, 上海 201108)

摘要: 针对安装在柔性基座上的空间机械臂运动过程中的振动问题, 提出了一种改进的主动阻尼控制方案; 利用参数辨识, 给出了惯性矩阵估计值的显式表达式, 并且在基座振动抑制控制律中加入了基座位移补偿项。对平面二连杆柔性基座机械臂进行仿真实验。结果表明: 原始的主动阻尼控制虽然能够保证在机械臂运动过程中基座的振动抑制, 但机械臂轨迹跟踪误差收敛较慢, 改进后的控制律能够更快地缩小轨迹跟踪误差, 整体的基座抑振效果更好。

关键词: 柔性基座; 振动抑制; 参数辨识; 主动阻尼控制; 轨迹跟踪

中图分类号: TP 241.2; O 328

文献标志码: A

DOI: 10.19328/j.cnki.2096-8655.2021.06.014

Flexible Base Vibration Suppression Based on Active Damping Control

ZHOU Zheng¹, ZOU Huaiwu², CHU Zhugang¹, ZHONG Lou¹, TANG Qirong¹

(1. Laboratory of Robotics and Multibody System, School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Shanghai Key Laboratory of Spacecraft Mechanism, Shanghai 201108, China)

Abstract: An improved active damping control scheme is proposed to solve the problem that the space manipulator mounted on a flexible base may lose its motion accuracy due to the base vibration. The explicit formulation of the estimated inertia matrix is given by parameter identification, and a base displacement compensation term is added to the classical vibration suppression control law. A two-link manipulator mounted on a flexible base is then considered and simulated. The results show that compared with the classical control law, the trajectory tracking error of the manipulator with the improved control law converges faster, and the overall base vibration suppression effect is better.

Key words: flexible base; vibration suppression; parameter identification; active damping control; trajectory tracking

0 引言

随着空间在轨服务技术的发展, 空间机械臂越来越多地被应用到航天器的维修、维护等任务之中。在空间站中, 为了增加机械臂的操作空间, 有时将其安装在移动基座上。移动基座先将机械臂移动至目标工作区域后锁紧, 再由机械臂进行更加精细的操作。然而机械臂在运动过程中会不可避免地对基座产生反作用力, 使得基座产生振动从而影响机械臂的操作精度^[1]。为了保证机械臂能够平稳操作, 需要消除或者补偿对基座的反作用力以及

力矩。对于柔性基座与机械臂系统的控制策略, 共有 3 类方法^[2]: 第 1 种方法, 从反作用力入手, 该方法通过规划 1 条对基座产生反作用力最小的路径或者设计控制输入, 从而有效地减少对基座的扰动, 比如耦合图^[3]、反作用零空间法^[4-5], 但这类方法在受到外部扰动、基座产生振动的情况下不再适用。第 2 种方法, 从机械臂控制入手, 利用机械臂的运动来消除基座振动^[6-7], 这种方法存在一系列的缺点, 比如控制方法的切换会带来力矩的突变, 从而使得末端偏离稳态位置, 对系统结构性能的要求也更高。

收稿日期: 2021-01-14; 修回日期: 2021-03-04

作者简介: 周政 (1997—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向机械臂多体动力学。

通信作者: 汤奇荣 (1982—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为群体机器人和机械臂多体动力学。

第 3 种方法,从基座的振动控制入手,通过设计系统输入,在实现机械臂轨迹跟踪的同时实现基座的振动控制,比如主动阻尼控制^[8]、惯性阻尼控制^[9-10]。惯性阻尼控制需要知道系统的频率特性,但不同的工作位置系统的频率特性不同。主动阻尼控制需要获取加速度反馈以及系统的惯性矩阵,但基座运动与机械臂运动可以得到有效解耦,系统可以保持良好的鲁棒性。

本文针对主动阻尼控制中系统惯性矩阵估计的问题,利用参数辨识的方法,以获取系统惯性矩阵较为准确的估计值,并在原始主动阻尼控制的基础上,添加基座位移补偿项以改进抑振效果。最后通过仿真验证,得到基座振动抑制以及机械臂关节空间轨迹跟踪结果。

1 柔性基座机械臂的动力学模型与参数辨识

1.1 柔性基座机械臂耦合系统建模

柔性基座机械臂系统简化模型如图 1 所示,系统由 1 个基座与 2 关节机械臂组成。

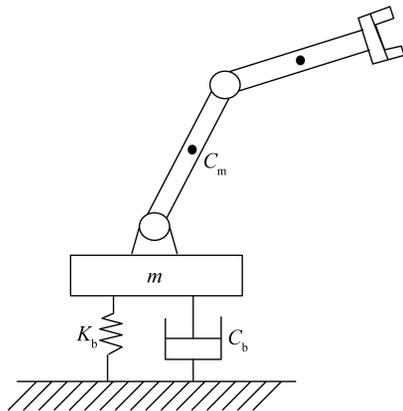


图 1 柔性基座机械臂系统

Fig.1 Flexible base manipulator system

根据文献[11],基座的柔性占主要因素,将机械臂视为刚性,柔性基座为弹簧-质量-阻尼系统,考虑平移位移,忽略旋转位移。图中, C_m 为机械臂的质心, m 为基座的质量, K_b 为弹簧的刚度系数, C_b 为阻尼系数。

基于这些假设,通过 Lagrange 方程建立动力学模型如下:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_b + \mathbf{M}_{b/m} & \mathbf{M}_{bm}(q) \\ \mathbf{M}_{bm}^T(q) & \mathbf{M}_m(q) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_b \\ \ddot{q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_b \dot{x}_b + C_{bm}(q, \dot{q}) \\ C_m(q, \dot{q}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_b & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_b \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{M}_m(q)$ 为机械臂惯性矩阵; $\mathbf{M}_{bm}(q)$ 与 $\mathbf{M}_{b/m}$ 为耦合惯性矩阵; \mathbf{M}_b 为基座质量; $C_m(q, \dot{q})$ 为机械臂非线性的速度相关项,如哥式力项和向心力项(不考虑重力项与摩擦); $C_{bm}(q, \dot{q})$ 为非线性的速度耦合项; C_b 和 K_b 为阻尼与刚度; τ 为驱动力矩; x_b 和 q 为基座位移与关节角度。

1.2 机械臂参数辨识

一般的机械臂动力学模型如下:

$$\mathbf{M}_m(q) \ddot{q} + C_m(q, \dot{q}) = \tau \quad (2)$$

这类模型可以转化为机械臂惯性参数的线性函数^[12],通过采集机械臂的运动数据,从而建立惯性参数的线性方程组,这样机械臂参数辨识的问题便转化为解线性方程组问题,即

$$\tau = Y(q, \dot{q}, \ddot{q}) p \quad (3)$$

式中: $Y(q, \dot{q}, \ddot{q})$ 为观测矩阵,矩阵中各个项由机械臂在广义坐标下的角度、角速度以及角加速度等构成; p 为所要辨识的惯性参数集。

此外,参数辨识的精度与机械臂运动轨迹有关,机械臂按照预定轨迹运动时需要到达尽可能多的位姿和更好的参数辨识效果^[13]。有限项傅里叶级数轨迹常作为机械臂参数辨识的激励轨迹,采用如下公式作为各个关节的激励轨迹:

$$q_i(t) = q_0 + \sum_{n=1}^N (a_{i,n} \sin(n\omega_i t) + b_{i,n} \cos(n\omega_i t)) \quad (4)$$

式中: $a_{i,n}$ 、 $b_{i,n}$ 、 q_0 分别为傅里叶级数正弦项、余弦项系数、关节补偿。

傅里叶函数的周期为 $2\pi/\omega_i$,在文献[14]中表明运动频率在 10 Hz 范围内时可以避免机械臂的柔性效应。本文中取 $N=3$, $\omega_i=0.2\pi$ 。

2 控制方案

2.1 机械臂与基座运动解耦

为了能够将机械臂的运动与基座运动解耦,从而分别对其控制,需要对机械臂的惯性矩阵进行估计。将估计值代入式(1)中的第 2 行,得到

$$\hat{M}_m \ddot{q} + (M_m(q) - \hat{M}_m) \ddot{q} + M_{bm}^T(q) \ddot{x}_b + C_m(q, \dot{q}) = \tau \quad (5)$$

式中: \hat{M}_m 为 $M_m(q)$ 的估计值。

此估计值可由之前参数辨识所获得的结果得出, 显示表达式为

$$\hat{M}_m = \begin{bmatrix} m_1 l_{c1}^2 + m_2 (l_1^2 + l_{c2}^2) + I_1 + I_2 & 0 \\ 0 & m_2 l_{c1}^2 + I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{p}_1 & 0 \\ 0 & \hat{p}_3 \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: m_1 和 m_2 为机械臂 1、机械臂 2 的质量; l_1 为机械臂 1 的长度; l_{c1} 和 l_{c2} 为关节 1 到机械臂 1 质心以及关节 2 到机械臂 2 质心的距离; I_1 和 I_2 为机械臂 1 与机械臂 2 的惯量; \hat{p}_1 与 \hat{p}_3 为所要辨识的惯性参数。

根据式(5), 动力学方程中惯性矩阵误差项、非线性的速度相关项等可以合并成一未知项 $N(q, \dot{q}, \ddot{q})$, 即

$$N(q, \dot{q}, \ddot{q}) = (M_m(q) - \hat{M}_m) \ddot{q} + M_{bm}^T(q) \ddot{x}_b + C_m(q, \dot{q}) = \tau_p - \hat{M}_m \ddot{q} \quad (7)$$

式中: τ_p 为前一个采样时刻点的力矩数据, 在采样频率很高的条件下, 可以认为 $\tau_p \approx \tau$ 。

文献[15]中提出利用光学编码器可以实现加速度的测量。利用前一个采样时刻点的力矩数据和加速度, 便可以计算出这一未知项 $N(q, \dot{q}, \ddot{q})$, 加入控制输入, 得到输入力矩为

$$\tau = \tau_p - \hat{M}_m \ddot{q} + u \quad (8)$$

结合式(1)与式(8), 将系统惯性矩阵求逆, 改写系统动力学方程为

$$\begin{bmatrix} \ddot{x}_b \\ \ddot{q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} H_{11} K_b & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_b \\ q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} H_{11} (C_b \dot{x}_b + C_{br}(\dot{q}, q)) \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12}(q) \\ 0 & \hat{M}_m^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ u \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中:

$$H_{11} = (M_b + M_{b/m})^{-1} \quad (10)$$

$$H_{12}(q) = (M_b + M_{b/m})^{-1} M_{bm}(q) \hat{M}_m^{-1} = H_{11} M_{bm}(q) \hat{M}_m^{-1} \quad (11)$$

由式(9)可见, 机械臂的运动与基座运动基本解耦, 两者的运动同时由控制系统输入 u 决定。

2.2 系统控制律设计

一个系统输入 u 需要同时控制 2 个变量 x_b 与 q ,

定义 u 由 2 个部分组成:

$$u = u_{\text{fast}}(q) + u_{\text{slow}}(x_b) \quad (12)$$

式中: $u_{\text{slow}}(x_b)$ 主要作用于基座运动; $u_{\text{fast}}(q)$ 主要用于机械臂运动。

机械臂轨迹跟踪控制律的设计利用经典的计算力矩法的思想得出

$$u_{\text{fast}}(q) = \hat{M}_m (K_P \bar{q} + K_D \dot{\bar{q}} + \ddot{q}_d) \quad (13)$$

式中: \bar{q} 为实际关节角度与理想轨迹的关节角度之间的误差; $\dot{\bar{q}}$ 为实际关节角速度与理想轨迹的关节角速度之间的误差; \ddot{q}_d 为理想轨迹的关节角加速度; K_P 、 K_D 分别为比例和微分增益系数。

相比基座运动的频率, 机械臂的运动控制频率高得多, 机械臂运动误差可以更快地得到收敛。此时 $u_{\text{slow}}(x_b)$ 可以当作一个常数, 原始的主动阻尼控制原理中基座运动控制输入为

$$u_{\text{slow}}(x_b) = -H_{12}^{-1}(q_d) K_{\text{bd}} \dot{x}_b \quad (14)$$

式中: K_{bd} 为阻尼控制系数。

机械臂运动过程中不免存在轨迹点导致基座位移速度 \dot{x}_b 的突变, 此时 $u_{\text{slow}}(x_b)$ 称为机械臂运动的误差项, 从而导致系统振荡或者收敛过慢。此时添加基座位移 x_b 的补偿项, 修正运动过程中的突变值, 得出改进的基座运动控制律为

$$u_{\text{slow}}(x_b) = -H_{12}^{-1}(q_d) K_{\text{bd}} \dot{x}_b + H_{12}^{-1}(q_d) H_{11} K_b x_b \quad (15)$$

最后合并 $u_{\text{fast}}(q)$ 和 $u_{\text{slow}}(x_b)$, 得到总控制律为

$$\tau = \tau_p - \hat{M}_m \ddot{q} + \hat{M}_m (K_P \bar{q} + K_D \dot{\bar{q}} + \ddot{q}_d) - H_{12}^{-1}(q_d) K_{\text{bd}} \dot{x}_b + H_{12}^{-1}(q_d) H_{11} K_b x_b \quad (16)$$

从控制律中可以看出, 当估计值 \hat{M}_m 为一个对角矩阵时, K_P 和 K_D 也设计为对角矩阵, 并且保证这些对角矩阵是正定矩阵的条件下系统可以保持稳定。基座抑振控制可以通过调节 K_{bd} 的大小来实现, 但过大的增益系数会导致闭环系统不能收敛, 本实验中通过单调测试逼近最佳的阻尼控制系数。

3 仿真试验及结果分析

考虑如图 1 所示的机械臂系统, 机械臂实际参数以及基座的等效模型参数见表 1。在仿真过程中, 机械臂的关节运动采用 5 阶多项式, 每个关节从 0 rad 运动到 2 rad, 初始和结束时刻速度与加速度为 0, 运动时间为 3 s, 并在 Simulink 中进行控制效果的验证。

表 1 机械臂系统参数

Tab.1 Parameters of the manipulator system

物体	质量/kg	惯量/(kg·m ²)	长度/m	到质心距离/m	阻尼系数/(N·s·m ⁻¹)	刚度系数/(N·m ⁻¹)
基座	5	—	—	—	0.005	500
机械臂 1	6	0.5	1	0.5	—	—
机械臂 2	6	0.5	1	0.5	—	—

3.1 参数辨识结果

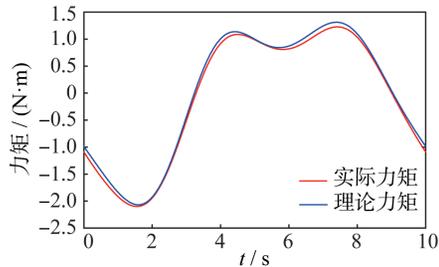
鉴于惯性参数集是非时变的,根据机械臂按照激励轨迹运动的数据,利用最小二乘法进行估计,辨识结果见表 2。

表 2 参数辨识结果

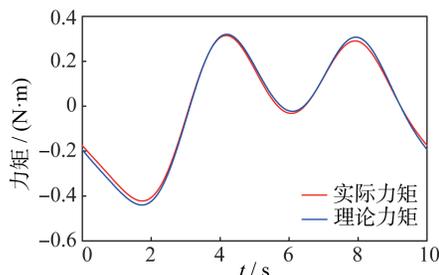
Tab.2 Results of the parameter identification

参数	\hat{p}_1	\hat{p}_2	\hat{p}_3
数值	5.843 4	2.431 4	2.251 2

此外,利用惯性参数的估计值进行力矩值计算,将各个关节的实际力矩与理论力矩进行对比,以验证辨识效果,对比结果如图 2 所示。关节 1 的平均力矩误差不超过 10%,关节 2 的平均力矩误差不超过 2%,动力学参数辨识的结果可以用作后续惯性矩阵的估计。



(a) 关节 1 实测与理论力矩对比



(b) 关节 2 实测与理论力矩对比

图 2 参数辨识效果验证

Fig.2 Verification of the parameter identification

3.2 基座抑振控制结果

由动力学参数辨识的结果可知, \hat{M}_m 和控制器

增益系数取值如下:

$$\hat{M}_m = \begin{bmatrix} \hat{p}_1 & 0 \\ 0 & \hat{p}_3 \end{bmatrix}, \quad K_p = \begin{bmatrix} 600 & 0 \\ 0 & 300 \end{bmatrix},$$

$$K_D = \begin{bmatrix} 300 & 0 \\ 0 & 300 \end{bmatrix}, \quad K_{bd} = 40 \quad (17)$$

不同控制律下的基座的位移图像如图 3 所示,可以清楚地看出机械臂关节运动给基座施加了一个用于抑制的阻尼力,根据参数辨识获取的惯性矩阵可以反映出系统的基本特性,以此设计的基座控制器抑振效果明显。此外添加基座位移补偿项后,虽然在机械臂运动过程中局部振幅变大,但在运动结束后的误差收敛速度明显优于改进前的控制律,同时稳态误差减小了不少。

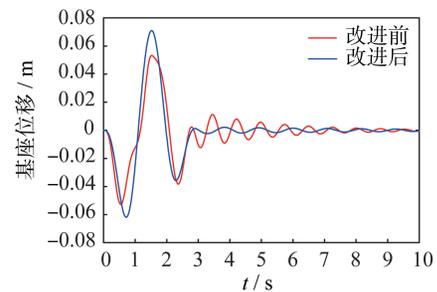


图 3 改进前后控制律下基座位移响应

Fig.3 Base displacement responses under the classical and improved control laws

机械臂关节轨迹跟踪误差的情况如图 4 和图 5 所示。

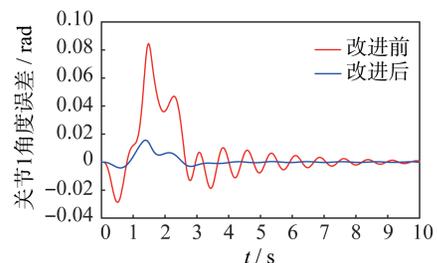


图 4 不同控制律下关节 1 角度误差对比

Fig.4 Angle errors of Joint1 under the classical and improved control laws

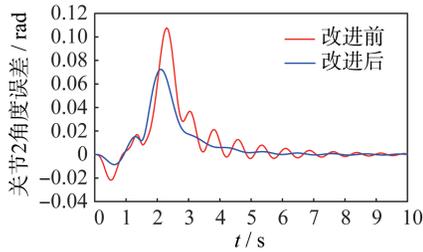


图 5 不同控制律下关节 2 角度误差对比

Fig.5 Angle errors of Joint2 under the classical and improved control laws

实际上用于基座抑振的机械臂关节运动是在一个范围内左右摆动,以此产生相当于阻尼的效果,并且摆动的范围很小,基本不影响机械臂的正常操作任务。图中也给出了控制律改进前后的关节角度误差对比,可见添加了基座位移补偿项后获得了更高的轨迹跟踪性能,误差收敛得更快,在运动结束的 3 s 左右就完成了基座抑振目标,而改进前需要更长的时间。

4 结束语

主动阻尼控制实质上是利用机械臂的左右摆动产生基座抑振的阻尼力,从而完成柔性基座的控制任务。这类方法控制律设计简单,并且能够保证关节空间轨迹跟踪精度。本文以 2 自由度机械臂与弹簧-质量-阻尼的耦合模型为基础,通过在原始的主动阻尼控制律中加入基座位移补偿量,并利用参数辨识的方法估计惯性矩阵。验证结果表明,改进后的控制律能够以更快的速度达到误差收敛,达到了柔性基座振动抑制的目的,证明了方法的有效性,对于拓展到空间大型柔性结构系统有较好的参考价值。

参考文献

- [1] TORRES M A. Modeling, path-planning and control of space manipulators: the coupling map concept [D]. Boston: Massachusetts Institute of Technology, 1993.
- [2] BECK F, GAROFALO G, OTT C. Vibration control for manipulators on a translationally flexible base [C]// Proceedings of International Conference on Robotics and Automation. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2019: 4451-4457.
- [3] TORRES M A, DUDOWSKY S, PISONI A C. Path-planning for elastically-mounted space manipulators: experimental evaluation of the coupling map [C]//

Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. Washington D. C., USA: IEEE Press, 1994: 2227-2233.

- [4] FUKAZU Y, HARA N, KANAMIYA Y, et al. Reactionless resolved acceleration control with vibration suppression capability for JEMRMS/SFA [C]// Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2009: 1359-1364.
- [5] 韩键美. 柔性机械臂最优抑振轨迹规划与跟踪控制研究[J]. 机械设计与制造, 2021(8): 25-30.
- [6] ZHANG Y W, LIU Y C, XIE Z, et al. Flexible base vibration suppression based on improved P-PED method [C]// Proceeding of the 11th World Congress on Intelligent Control and Automation. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2014: 3838-3843.
- [7] 李琳, 古智超, 张铁. 面向机器人笛卡尔空间的轨迹运动自适应抑振控制[J]. 振动工程学报, 2021, 34(3): 499-506.
- [8] LIN J, HUANG Z Z, HUANG P H. An active damping control of robot manipulators with oscillatory bases by singular perturbation approach [J]. Journal of Sound and Vibration, 2007, 304(1): 345-360.
- [9] GEORGE L E, BOOK W J. Inertial vibration damping control of a flexible base manipulator[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2003, 8(2): 268-271.
- [10] LEW J Y, TRUDNOWSKI D J. Vibration control of a micro/macro-manipulator system [J]. IEEE Control Systems Magazine, 1996, 16(1): 26-31.
- [11] LEW J Y, MOON S. A simple active damping control for compliant base manipulators [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2001, 6(3): 305-310.
- [12] 霍伟. 机器人动力学与控制[M]. 北京: 高等教育出版社, 2005: 87-119.
- [13] 程青松, 罗磊, 徐啸顺, 等. 基于傅里叶级数关节激励轨迹的 iiwa 动力学参数辨识[J]. 机电一体化, 2018, 24(5): 23-30.
- [14] HENSEN R H A, ANGELIS G Z, MOLENGRAFT M J G V D, et al. Grey-box modeling of friction: an experimental case-study [C]// Proceedings of 1999 European Control Conference. Washington D. C., USA: IEEE Press, 1999: 3148-3153.
- [15] BONITZ R G, HSIA T C. Robust internal-force based impedance control for coordinating manipulators-theory and experiments [C]// Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation. Washington D.C., USA: IEEE Press, 1996: 622-628.