

柔性双连杆机械臂脉冲力矩控制的数值仿真和实验研究

李晓光

李元春

(吉林职业师范学院电子工程系) (吉林工业大学信息科学与工程学院)

陆佑方

(中国科学院机器人学开放实验室, 沈阳)

摘要 在刚性双连杆机械臂控制方案的基础上, 提出了柔性双连杆机械臂的轨迹跟踪和振动抑制的脉冲力矩控制方案, 针对竖直平面双连杆柔性机械臂进行了数值仿真和实验研究。

关键词 柔性双连杆机械臂 轨迹跟踪 振动抑制 数值仿真 实验研究 脉冲力矩

中图分类号 TP13

0 引言

柔性机械臂的控制一般包括整体运动的控制和弹性振动的抑制。传统的控制方法对消除弹性变形引起的端点轨迹偏差及端点振动起到了一定的作用, 但目前柔性机械臂的控制很难用精确模型描述及实现实时控制^[1]。S. FM asri 等人^[2]提出了针对柔性非线性结构的振动控制的脉冲方法。该方法不需要预知结构的精确数学模型, 不需要状态重构, 实时控制很容易实现。另外脉冲控制不受结构非线性的限制, 适用于任何形式的结构或系统。I. R. Astranch 等人^[3]研究了一个由板状柔性体相叠的非线性结构的振动脉冲控制问题, 设计了脉冲作用方案, 给出了脉冲作用时间和脉冲大小的软硬件系统。当结构受到任意干扰作用时, 使振动维持在一定水平下, 一旦停止干扰作用, 脉冲控制将迅速阻尼残余振动。毕士华等人^[4]对水平运动的单杆柔性臂的振动提出了相应的脉冲力矩抑制方案并进行了数值仿真。本文针对柔性双连杆机械臂提出了基于刚体运动补偿反馈控制的脉冲力矩控制方案, 对脉冲力矩的发出时刻、宽度、高度、周期进行了初步研究, 并进行了数值仿真和实验研究。结果表明恰当的脉冲力矩触发形式可达到很高的控制精度并使过渡过程时间缩短。

收稿日期: 1997-12-18

李晓光, 男, 1965年11月生, 讲师, 博士研究生

1 柔性双连杆机械臂控制的基本方案

考虑如图 1 所示的在垂直平面运动的柔性双连杆机械臂, 把控制分解为刚性轨迹跟踪控制和弹性振动的抑制控制, 控制方案如图 2 所示。

对于轨迹跟踪控制, 可把柔性臂等效成刚性动力学系统。不考虑其由弹性引起的振动, 只是在实行刚性控制的基础上, 根据机械臂在空间的不同位姿所产生的准静变形以及脉冲力矩的影响对控制加以补偿。采用计算力矩法对轨迹跟踪控制器进行设计。可以根据振动的幅值、速度、频率来具体地产生脉冲力矩, 控制振动抑制。

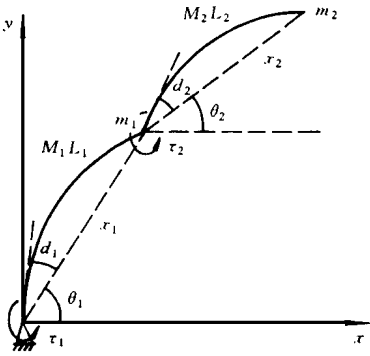


图 1 垂直平面双连杆柔性机械臂

Fig. 1 Vertical planar two-link flexible arm

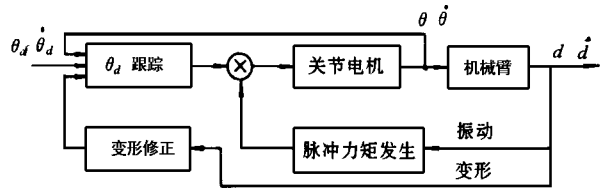


图 2 双连杆柔性机械臂控制方案

Fig. 2 The scheme of two-link flexible manipulator control

2 柔性机械臂振动的脉冲力矩抑制

如图 1 所示的柔性双连杆机械臂, 采用假设模态法, 取二阶模态建立系统的动力学方程为

$$\sum_{j=1}^6 m_{kj} \ddot{q}_j + \sum_{i,j=1}^6 \left[\frac{\partial m_{ki}}{\partial q_i} \dot{q}_i - \frac{1}{2} \frac{\partial m_{ij}}{\partial q_k} \dot{q}_i \dot{q}_j \right] + \sum_{j=1}^6 K_{kj} q_j + \frac{\partial V}{\partial q_k} = Q_k \quad (k = 1, 2, 3, 4, 5, 6) \quad (1)$$

写成矩阵形式 $M(q)\ddot{q} + N(q, \dot{q}) + Kq = Q$ (2)

式中 $M(q)$ 是 6×6 的广义惯性矩阵; q 为 6×1 的广义坐标; $N(q, \dot{q})$ 包括了系统的离心力、重力和哥氏力项; K 为 6×6 的刚度阵; Q 为 6×1 的广义力。

如果给静止状态的柔性机械臂施加一个正脉冲力矩, 脉冲宽度远小于机械臂的一个固有周期, 则脉冲力矩结束时对关节的角度和角速度影响很小, 即 $\theta, \dot{\theta} \rightarrow 0$ 。则式(2)可线性化为

$$M(t) \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \delta \end{bmatrix} + N(t) \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \delta \end{bmatrix} + K(t) \begin{bmatrix} \theta \\ \delta \end{bmatrix} = \tau(t) \quad (3)$$

式中 θ 为臂的刚性转角, $\theta = [\theta_1, \theta_2]^T$; δ 为柔性臂的弹性质量, $\delta = [d_1, d_2, f_1, f_2]^T$ 。

由于惯性矩 $M(t)$ 正定, 可将式(3)化为线性时变状态方程

$$\dot{x} = A(t)x + B(t)U(t) \quad (4)$$

其中 $x = (\theta_1, \theta_2, d_1, d_2, f_1, f_2, \dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2, \dot{d}_1, \dot{d}_2, \dot{f}_1, \dot{f}_2)^T$

$$A(t) = \begin{bmatrix} O_{6 \times 6} & I_{6 \times 6} \\ -M^{-1}(t)K(t) & -M^{-1}(t)C(t) \end{bmatrix}_{12 \times 12} \quad \text{制。}$$

$$B(t) = \text{双连} \begin{bmatrix} O_{6 \times 6} & O_{6 \times 6} \\ -M^{-1} & O_{6 \times 6} \end{bmatrix}_{12 \times 12} \quad U(t) = \begin{bmatrix} O \\ \tau(t) \end{bmatrix}_{12 \times 1}$$

如果忽略脉冲力矩对机械臂轨迹的影响,即认为脉冲力矩的轨迹响应 $\Delta\theta = \Delta\dot{\theta} = \Delta\ddot{\theta} = 0$, 只考虑弹性振动的响应, 则式(4)退化为线性定常状态方程

$$\dot{x}' = A'x' + B'V'(t) \quad (5)$$

其中

$$x' = (d_1, d_2, f_1, f_2, \dot{d}_1, \dot{d}_2, \dot{f}_1, \dot{f}_2)^T$$

$$V'(t) = [\tau(\tau_{s1} - \tau_{s2})/L_1, 2\pi(\tau_{s1} - \tau_{s2})/L_1, \pi\tau_2/L_2, 2\pi\tau_2/L_2]^T$$

$$A' = \begin{bmatrix} O_{4 \times 4} & I_{4 \times 4} \\ -M'^{-1}K' & O_{4 \times 4} \end{bmatrix}_{8 \times 8} \quad B' = \begin{bmatrix} O_{4 \times 4} & O_{4 \times 4} \\ -M'^{-1}e^1 & O_{4 \times 4} \end{bmatrix}_{8 \times 8}$$

τ_{s1}, τ_{s2} 为施加于机械臂关节上的力矩, M', K' 可表示如下

$$M' = \begin{bmatrix} \frac{M_1}{2} & & & O \\ & \frac{M_1}{2} & & \\ & & \frac{M_2}{2} & \\ O & & & \frac{M_2}{2} \end{bmatrix} \quad K' = \begin{bmatrix} \frac{\pi^4 K_1}{2L_1^3} & & & O \\ & \frac{8\pi^4 K_1}{2L_1^3} & & \\ & & \frac{\pi^4 K_2}{2L_1^3} & 6 \\ O & & & \frac{8\pi^4 K_2}{2L_1^3} \end{bmatrix}$$

从式(5)很容易解出弹性臂振动的脉冲力矩响应。如果给静止状态的柔性机械臂施加一个正脉冲力矩, 脉冲宽度远小于机械臂的一个固有周期。脉冲力矩结束时刻, 机械臂末端将获得一个相对刚体位置为负值的弹性位移和速度。由此可以想到, 如果在振动的柔性机械臂上施加一脉冲力矩, 使之产生的振动与原有的方向相反, 从而来抑制柔性臂的振动。设计的脉冲力矩为

$$\tau_{ij}(t) = \begin{cases} \epsilon_i S_{gn}(v_{pij}) |v_{pij}|^{n_{ij}} & t_{oj} \leq t \leq t_{oj} + \frac{T_d}{2} \\ 0 & \end{cases} \quad (i = 1, 2; j = 1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

式中 τ_{ij} 是第 i 个连杆第 j 个脉冲函数; ϵ_i 是与第 i 个连杆参数有关的系数; t_{oj} 是脉冲力矩触发时刻; T_d 是脉冲宽度; v_{pij} 是对应机械臂末端点的弹性振动速度。 n_{ij} 表示力矩脉冲形式, $n=0$ 表示库仑摩擦力矩, $n=1$ 表示粘性阻尼力矩, $n>1$ 表示非线性阻尼力矩。

脉冲力矩控制策略的硬件实现包括测振传感器、数据处理系统和脉冲力矩的实现设备等。软件系统包括脉冲力矩的触发时刻判定, 脉冲宽度、幅值和周期。

3 双连杆柔性机械臂振动的脉冲力矩抑制的数值仿真

图 1 所示的柔性双连杆机械臂基本参数为: 连杆质量 $M_1=2.1$ kg, $M_2=0.79$ kg; 连

杆集中质量 $m_1=12.1$ kg, $m_2=2.4$ kg; 连杆长度 $L_1=0.65$ m, $L_2=0.75$ m; 机械臂前两阶固有频率 $f_{11}=7.6$ Hz, $f_{12}=18.55$ Hz, $f_{21}=2.29$ Hz, $f_{22}=7.79$ Hz。

一般脉冲宽度取 $T_{di} \doteq (1/5 \sim 1/8) T_{il}$, 基本脉宽 $T_{d1}=0.08$ s, $T_{d2}=0.02$ s。经试验取 $n_{ij}=1$, 即采用粘性阻尼力矩效果最好。当 $n_{ij}=1$ 时, 由式(5)可得

$$\epsilon_{1j} = 0.27 \times 10^{-3} \text{ N s/m} \quad \epsilon_{2j} = 1.13 \times 10^{-3} \text{ N s/m}$$

采用粘性阻尼脉冲力矩仿真结果如图 3、图 4 所示。

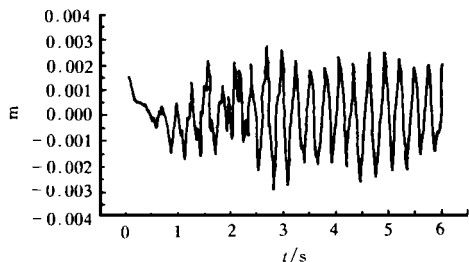


图 3 不加控制的机械臂端点振动

Fig. 3 Tip variables without impulse controls

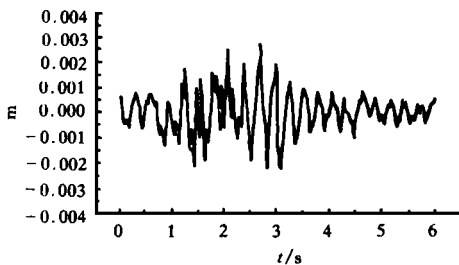


图 4 加控制的机械臂端点振动

Fig. 4 Tip variables with impulse controls

4 柔性双连杆机械臂脉冲力矩控制的实验研究

4.1 柔性臂的形变和振动量测量

柔性机械臂的变形量和振动量的测量是一个比较难而又十分重要的问题。本文采用了较常用的应变片传感器和与之相配的动态应变仪。为了提高精度、消除非线性误差, 采用了差动电桥电路

$$U_0 = \left[\frac{R_1 + \Delta R_1}{R_1 + \Delta R_1 + R_2 - \Delta R_2} - \frac{R_3 - \Delta R_3}{R_3 - \Delta R_3 + R_4 + \Delta R_4} \right] U \quad (7)$$

若电桥平衡, 则有

$$U_0 = \frac{\Delta R_1}{R_1} U \quad (8)$$

由模态展开法, 柔性机械臂的弹性振动可表示为

$$W(x, t) = \sum_{i=1}^{\infty} \Phi_i(x) \hat{q}_i(t) \quad (9)$$

略去高阶振动时, 上式可近似为

$$W(x, t) \approx \sum_{i=1}^2 \Phi_i(x) \hat{q}_i(t) \quad (10)$$

应变片输出是臂上某一点的应变, 且

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{K \Delta L}{L} = K \epsilon(x, t) \quad (11)$$

其中 K 为常数, $\epsilon(x, t)$ 为应变, 而 $\epsilon(x, t) = h W''(x, t) / 2$, 从而

$$\varepsilon(x, t) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 \phi_i''(x) \hat{q}_i(t) \quad (12)$$

为了提高精度, 一般要求机械臂贴应变片处具有如下特点: ①应变大, 即 $\phi_i''(x)$ 大; ②由应变片的输出构造机械臂振动信息时计算量小。

基于以上要求, 贴应变片的位置为: $x_1=0$, 即根部; $x_2=0.5L$, 即中间; $x_3=L$, 即端点。其中 L 为柔性臂的长度。

4.2 柔性机械臂脉冲力矩控制的实验研究

柔性双连杆机械臂实际实验曲线如图 5、图 6 所示。

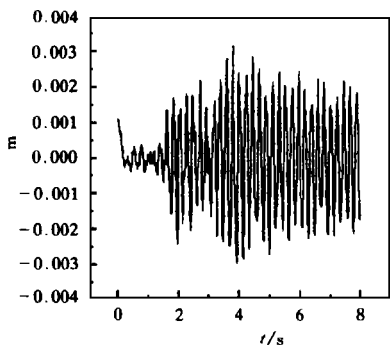


图 5 不加控制的机械臂总端点振动

Fig. 5 Tip variables without impulse controls

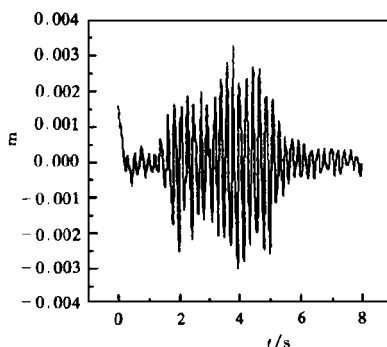


图 6 加控制的机械臂总端点振动

Fig. 6 Tip variables with impulse controls

5 结 论

(1) 在刚性双连杆机械臂控制方案的基础上, 对柔性双连杆机械臂的振动施加恰当的脉冲力矩控制, 可以使过渡过程时间缩短并能达到很高的控制精度。

(2) 脉冲力矩控制策略的硬件实现包括测振传感器、数据处理系统和脉冲力矩的实现设备等。软件系统包括脉冲力矩的触发时刻判定、脉冲宽度、幅值和周期的计算。

参 考 文 献

- 1 Baruh H, Tadikonda S S K. Issues in the dynamics and control of flexible robot manipulators. J. Guidance, 1989, 12(5): 659 ~ 668
- 2 Masi S F, Bekey G A, Gaughey T K. On-line control of nonlinear flexible structures. J. of Applied Mechanics 1982, 49: 877 ~ 884
- 3 Astraohan I R, Fournier R J. Vibration control of nonlinear flexible structure. AIAA 25th Aerospace Sciences Meeting, January, 1987
- 4 毕士华. 带有滑移/转动铰的平面柔性机械臂逆动力学与振动的主动控制. [学位论文]. 哈尔滨工业大学力学系, 1992

Study on Emulation and Experiment of the Impulse Torques Control of Two-link Flexible Manipulators

Li Xiaoguang

(Dept of Electronic Engineering, Jilin Vocational Teacher's College)

Li Yuanchun

(College of Information Sciences and Engineering, Jilin University of Technology)

Lu Youfang

(Robotics Lab SIA, Chinese Academy of Sciences, Shenyang)

Abstract In this paper, the method of the impulse torques control is established for vertical planar two-link flexible manipulators on the basis of rigid manipulators control. The variables of two-link manipulators are restrained when the tip trajectory of manipulator is being tracked with this method. Finally, the results of numerical emulation and experiment are shown in the paper.

Key words two-link flexible manipulator, vertical planar, trajectory tracking, impulses torques variables restrained, digital emulation, experiment