

基于脉冲整形的码垛机器人残余振动抑制研究

葛宏伟,史伟民,杨亮亮,许守金

(浙江理工大学机械与自动控制学院,杭州 310018)

摘要:为研究四轴驱动串联型码垛机器人的残余振动问题,首先使用 SolidWorks 软件设计了一种码垛机器人的三维模型,根据模型设计研发出了码垛机器人样机,该样机为柔性机构,易产生残余振动;其次运用拉格朗日方法求得各柔性驱动关节的动力学方程,得到相应的控制系统结构图;再次将模型导入 Matlab 软件中,通过 Simulink 模块对模型进行动力学仿真,模拟码垛机器人的运动过程;然后采用脉冲整形输入抑制残余振动;最后通过仿真和实验进行验证。仿真和实验结果均表明脉冲整形输入可以有效地抑制各驱动关节处的残余振动,进而提高系统的控制精度和稳定性。

关键词:码垛机器人;动力学分析;脉冲整形输入;残余振动抑制

中图分类号: TP242.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-3851 (2016) 01-0058-06 **引用页码:** 010502

0 引言

码垛技术是工业自动化领域中的一门新兴技术,随着工业领域对自动化需求的提升和现代物流行业的迅速发展,码垛机器人在长时间重复性的简单机械式工作中占有重要地位,可以实现自动、连续、高速、准确的码垛任务。码垛机器人应用领域正逐步拓展,在物流、包装、食品等行业得到了越来越广泛的应用,提高了生产效率和经济效益,故针对码垛机器人的设计改进和性能研究便具有重要意义。

工业领域中使用的码垛机器人种类多样,其中四轴驱动串联型码垛机器人是比较常见的类型,其具有机身小、质量轻、动作灵活、工作空间大等优点,可满足基本的空间码垛任务。但此类型机器人是典型的柔性机构,在运动过程中会发生变形,运动结束后柔性关节处存在残余振动^[1-2],这将严重影响码垛机器人控制精度和稳定性,为此需要对残余振动进行抑制。

残余振动的抑制方法包括结构优化和运动控制

等。在机械结构确定后,可通过设计运动控制器来控制系统的动态响应,如典型的 PID 控制器及脉冲整形输入等^[3-4],其中脉冲整形输入对残余振动的抑制效果较好^[5-7]。本文中结合使用 PID 控制器和脉冲整形输入,将参考轨迹与脉冲序列卷积的结果作为系统的输入信号,消去引起系统自然频率振动的频率部分,达到抑制码垛机器人残余振动目的,以提高系统的控制精度和稳定性。

1 模型简介

常见的四轴驱动串联型码垛机器人的三维模型由支座、底座、后臂、前臂、手掌、连杆等主要机构部分和直流伺服电机、位置传感器等主要控制部分组成,如图 1 所示。

底座由电机 1 控制转动;后臂由电机 2 控制转动;前臂由电机 3 控制转动;电机 2 和 3 装在底座两侧,且同轴心;手掌在双平行四边形机构(图 1 中实线四边形)作用下始终与底座面平行;手掌处装有电机 4,实现末端负载的转动控制。

收稿日期: 2015-04-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(51305404);国家科技支撑计划项目(2013BAF05B01)

作者简介: 葛宏伟(1990-),男,山东烟台人,硕士研究生,主要从事运动控制方面的研究。

通信作者: 杨亮亮, E-mail: yangliangliang@zstu.edu.cn

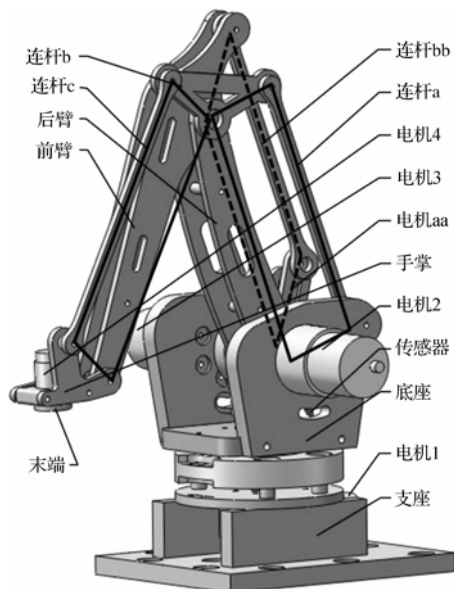


图1 四轴驱动串联型码垛机器人三维模型

为便于研究,将图 1 所示模型进行简化处理,简化后模型如图 2 所示。

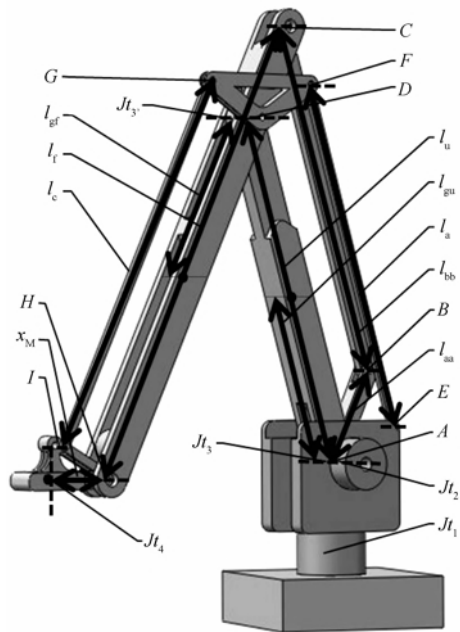


图 2 简化后的码垛机器人三维模型

注: A 为电机 2 转轴与后臂连接点, 模型的坐标原点, B、C、D、E、F、G、H、I 均为杆件连接点; 为连杆 ($i=aa, bb, a, b, c, u, f$) 长度, $m; l_{g_i}$ 为连杆 ($j=aa, bb, a, c, u, f$) 重心与转轴间距离, $m; x_M$ 为电机 4 转轴与前臂端点 H 间距离, $m; J_{tk}$ 为与电机轴相连转动关节 ($k=1, 2, 3, 3', 4$)。

2 残余振动分析

2.1 动力学方程

模型中由电机驱动旋转的转动关节均为柔性关节,单个柔性关节可以简化为介于电机与连杆间刚度为 K_T 、阻尼系数为 c_k 的扭力弹簧,是简单的二阶

系统。各柔性驱动关节的动力学方程可根据拉格朗日方法推导,拉格朗日函数^[8]定义为:

$$L = K - P \quad (1)$$

其中: L 为拉格朗日函数; K 为系统动能, 第 i 个柔性驱动关节的动能 $K_i = \frac{1}{2} m_i V_i^2 + \frac{1}{2} J_i \omega_i^2$, 其中 m_i 为质量, V_i 为速度, J_i 为转动惯量, ω_i 为转动角速度; P 为系统势能。

针对旋转关节的拉格朗日方程可表示为:

$$T_i = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_i} - \frac{\partial L}{\partial \theta_i} \right) \quad (2)$$

其中: T_i 为第 i 柔性驱动关节处所有外力矩之和, $N \cdot m$; θ_i 为第 i 柔性驱动关节对应连杆转动角度, ($^\circ$)。

根据图 2 中所示各机构的相关参数,可得系统的拉格朗日函数为:

$$\begin{aligned}
L = & (D_{11}^1 s_2^2 + D_{11}^2 c_3^2 + D_{11}^3 s_2 c_3 + D_{11}^4 s_2 + D_{11}^5 c_3 + D_{11}^6) \dot{\theta}_1^2 + \\
& D_{22} \dot{\theta}_2^2 + D_{33} \dot{\theta}_3^2 + D_{44} \dot{\theta}_4^2 + D_{12} c_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + D_{13} s_3 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3 + \\
& D_{23} s_2 s_{-3} \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3 - D_2 c_2 - d_3 s_3 - D_0 \quad (3)
\end{aligned}$$

$$D_{11}^1 = \sum_{i=u,bb,a} m_i l_{gi}^2/2 + \sum_{j=f,p,M} m_j l_u^2/2 + \sum_{k=b,c} m_k l_a^2/2 + \sum_{r=u,bb,a} J_r/2;$$

$$D_{11}^2 = \sum_{i=f, \text{aa}, \text{c}} m_i l_{gi}^2/2 + \sum_{j=p, M} m_j (l_l - l_{\text{aa}})^2/2 + \\ m_{\text{bb}} l_{\text{aa}}^2/2 + \sum_{k=f, \text{aa}, \text{c}} J_k/2;$$

$$\begin{aligned}
D_{11}^3 &= \sum_{i=f, j=u; i=c, j=d} m_i l_j l_{gj} + \sum_{k=p, M} m_k l_u (l_f - l_{aa}) - \\
&\quad m_{bb} l_{aa} l_{gbb}; D_{11}^4 = m_p l_{x_{gp}} - m_a l_{ga} x_E + \\
&\quad m_b l_a (x_E - x_{gb}) - m_c l_a (x_E - l_b) + (m_p + m_M) l_u x_M; \\
D_{11}^5 &= m_p (l_f - l_{aa}) x_{gp} - m_c (x_E - l_b) l_{gc} + (m_p + m_M) \\
&\quad (l_f - l_{aa}) x_M;
\end{aligned}$$

$$D_{11}^6 = m_{\text{p}} x_{\text{gp}}^2/2 + m_{\text{a}} x_{\text{E}}^2/2 + \sum_{i=\text{a,b,c}} m_i/y_{\text{E}}^2/2 + \sum_{j=\text{p,m}} m_j x_i^2/2 + m_{\text{b}}(x_{\text{E}} - x_{\text{gb}})^2/2 + m_{\text{c}}(x_{\text{E}} - l_{\text{b}})^2/2;$$

$$D_{22} = D_{11}^1; D_{33} = D_{11}^2; D_{12} = - \sum_{i=b,c} m_i l_a y_E - m_a l_{ga} y_E; D_{13} = m_c l_{gc} y_E; D_{23} = D_{11}^3;$$

$$D_2 = \sum_{i=u, \text{bb}, \text{a}} m_i l_{\text{gi}} g + \sum_{j=f, \text{p}, \text{M}} m_j l_{\text{u}} g + \sum_{k=b, \text{c}} m_k l_{\text{a}} g;$$

$$D_3 = - \sum_{i=f,c} m_i l_{gi} g - \sum_{j=p,M} m_j l_{fj} g + m_{aa} l_{gaa} g + \sum_{k=p,bb} m_k l_{ak} g;$$

$$D_0 = \sum_{i=a,b,c} m_i z_{Eg} - \sum_{i=p,b,M} m_j z_{gj} g.$$

其中: s_i 和 c_i 分别为 $\sin\theta_i$ 和 $\cos\theta_i$ 的缩写, s_{i-j} 为 $\sin(\theta_i - \theta_j)$ 的缩写; g 为重力系数, N/kg ; (x_E, y_E ,

z_E) 为 E 的空间坐标, (x_{gb}, y_{gb}, z_{gb}) 为连杆 b 重心相对 F 点的空间坐标, $(x_{gp/gM}, y_{gp/gM}, z_{gp/gM})$ 为手掌 / 负载重心相对 H 点的空间坐标。

将式(3)代入式(2),可得各驱动关节的拉格朗日方程为:

$$T_1 = 2(D_{11}^1 s_2^2 + D_{11}^2 c_3^2 + D_{11}^3 s_2 c_3 + D_{11}^4 s_2 + D_{11}^5 c_3 + D_{11}^6) \ddot{\theta}_1 + N_1(\theta, \dot{\theta}) \quad (4)$$

$$T_2 = 2D_{22} \ddot{\theta}_2 + N_2(\theta, \dot{\theta}) + G_3(\theta) \quad (5)$$

$$T_3 = 2D_{23} \ddot{\theta}_3 + N_3(\theta, \dot{\theta}) + G_3(\theta) \quad (6)$$

$$T_4 = 2D_{44} \ddot{\theta}_4 \quad (7)$$

$$\begin{aligned} N^1(\theta, \dot{\theta}) &= D_{12} c_2 \ddot{\theta}_2 + D_{13} s_3 \ddot{\theta}_3 - D_{12} s_2 \ddot{\theta}_2^2 + D_{13} c_3 \ddot{\theta}_3^2 + \\ &\quad 2(2D_{11}^1 s_2 c_2 + D_{11}^3 s_2 s_3 - D_{11}^5 s_3) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3 + \\ &\quad 2c_2 - 2D_{11}^2 s_3 c_3 - D_{11}^3 s_2 s_3 - D_{11}^5 s_3) \dot{\theta} \ddot{\theta}_3; \\ N_2(\theta, \dot{\theta}) &= D_{12} c_2 \ddot{\theta}_1 + D_{23} s_{2-3} \ddot{\theta}_3 - (2D_{11}^1 s_2 c_2 + \\ &\quad D_{11}^3 c_2 c_3 + D_{11}^4 c_2) \dot{\theta}_1^2 - D_{23} c_{2-3} \dot{\theta}_3^2; \\ N_3(\theta, \dot{\theta}) &= D_{13} s_3 \ddot{\theta}_1 + D_{23} s_{2-3} \ddot{\theta}_2 + (2D_{11}^2 s_3 c_3 + \\ &\quad D_{11}^3 s_2 s_3 + D_{11}^5 s_3) \dot{\theta}_1^2 + D_{23} c_{2-3} \dot{\theta}_2^2; \\ G_2(\theta) &= -D_2 s_2; G_3(\theta) = D_3 c_3. \end{aligned}$$

其中: $N_i(\theta, \dot{\theta})$ 为第 i 个柔性驱动关节的科氏力与离心力矩; $G_i(\theta)$ 为第 i 个柔性驱动关节的重力力矩; c_{i-j} 为 $\cos(\theta_i - \theta_j)$ 的缩写。

2.2 驱动关节控制系统

由式(4)~(7)可知,各关节的转动惯量分别为:

$$M_1 = 2(D_{11}^1 s_2^2 + D_{11}^2 c_3^2 + D_{11}^3 s_2 c_3 + D_{11}^4 s_2 + D_{11}^5 c_3 + D_{11}^6); \\ M_2 = 2D_{22}; M_3 = 2D_{33}; M_4 = 2D_{44}.$$

根据系统的拉格朗日函数建立各驱动关节的动力学模型,第 i 个柔性驱动关节的动力学模型可表示为:

$$\begin{cases} J_i \ddot{\theta}_{mi} + c_{mi} \dot{\theta}_{mi} + c_{li} \dot{\theta}_{di} + K_{Ti} \theta_{di} = \tau_{mi} \\ M_i \ddot{\theta}_i + N_i + c_{li} \dot{\theta}_i - c_{ki} \dot{\theta}_{di} - K_{Ti} \theta_{di} + \\ N_i(\theta, \dot{\theta}) + G_i(\theta) = 0 \end{cases} \quad (8)$$

其中: θ_{mi} 为电机轴的转动角度(未经减速比); $\theta_{di} = \theta_{mi}/r_i - \theta_i$; c_{mi} 、 c_{li} 分别为电机、连杆阻尼系数; τ_{mi} 为电机输出力矩(未经减速比)。

根据各柔性驱动关节的动力学模型,如式(8)所示,可得到各柔性驱动关节的系统控制框图如图3所示。

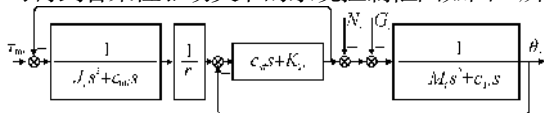


图3 柔性驱动关节的控制框图

时域分析过程中引入 PID 位置控制器,参考轨迹经过 PID 控制器后,得到电机输出力矩。PID 控制器的表达式为

$$\tau_{mi} = K_p(\theta_{ri} - \theta_{mi}) + K_i \int (\theta_{ri} - \theta_{mi}) + K_D(\dot{\theta}_{ri} - \dot{\theta}_{mi}) \quad (9)$$

其中: K_p 为比例系数, K_i 为积分时间常数, K_D 为微分时间常数, θ_{ri} 为参考轨迹, θ_{mi} 为电机经减速后输出角度。

在图3的基础上设计 PID 控制模块,得到如图4所示的控制框图。

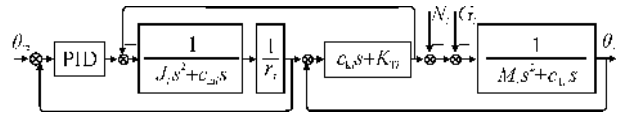


图4 引入PID控制器后柔性驱动关节的控制框图

引入 PID 控制器后,柔性驱动关节变为闭环反馈系统。

2.3 脉冲整形输入

脉冲整形输入是将脉冲序列与参考轨迹卷积形成的整形命令作为控制信号,除去引起系统自然频率振动的频率部分,从而消除柔性机构的残余振动。脉冲整形输入(PSI)可如下表示^[9]:

$$p(s) = [A_1 e^{-T_1 s} + A_2 e^{-T_2 s}] \theta_r(s) \quad (10)$$

其中: $A_1 = \frac{1}{1+K}$, $A_2 = \frac{K}{1+K}$ 为脉冲幅值; T_1 、 T_2 为脉冲周期, $T_2 - T_1 = \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1-\xi^2}}$; $K = e^{-\pi/\sqrt{1-\xi^2}}$;

ξ 为系统的阻尼系数, ω_n 为系统的自然频率; $p(s)$ 为经脉冲整形输入后的参考轨迹。

为满足快速响应和单位增益的要求,将 T_1 设为 0,并令 $A_2 = 1 - A_1$ 。

引入脉冲整形输入后,各柔性驱动关节的控制框图如图5所示。

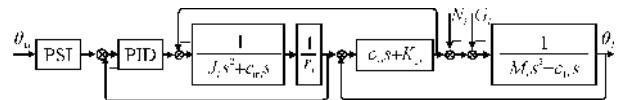


图5 引入脉冲整形输入后柔性关节的控制框图

由图5可知,脉冲整形输入为开环控制系统,其对残余振动的抑制效果还需要通过仿真和实验进行验证。

3 仿真与实验

根据图4和图5所示的各驱动关节系统控制框图,搭建码垛机器人的模型与平台,并进行仿真与实验。

仿真与实验过程中,各驱动关节的残余振动大

小用连杆实际转动角度与电机经减速后输出角度之差 $\delta(\theta_i - \theta_{mri})$ 来衡量。

3.1 Simulink 仿真模型

将 SolidWorks 中建好的模型导入 Matlab 软件中,通过 Simulink 模块对模型进行运动仿真并检测残余振动。

根据图 4 和图 5 所示的各关节控制框图进行仿真与实验。其中部分变量的值如下:

$$\theta_{r1}: 0 \sim 60^\circ, \theta_{r2}: 0 \sim 30^\circ, \theta_{r3}: 0 \sim 45^\circ, \theta_{r4}: 0 \sim -60^\circ;$$

$$J_1 = 0.1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2, J_2 = J_3 = 0.08 \text{ kg} \cdot \text{m}^2,$$

$$J_4 = 0.06 \text{ kg} \cdot \text{m}^2;$$

$$M_1 = 0.2858 \text{ kg} \cdot \text{m}^2,$$

$$M_2 = 0.1486 \text{ kg} \cdot \text{m}^2,$$

$$M_3 = 0.1645 \text{ kg} \cdot \text{m}^2,$$

$$M_3 = 0.1645 \text{ kg} \cdot \text{m}^2,$$

$$M_4 = 0.1450 \text{ kg} \cdot \text{m}^2;$$

$$r_1 = r_2 = r_3 = r_4 = 100;$$

$$c_{m1} - c_{m2} = c_{m3} = 1 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s},$$

$$c_{m4} = 0.8 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s};$$

$$c_{k1} = c_{k2} = c_{k3} = 0.1 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s},$$

$$c_{k4} = 0.15 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s};$$

$$K_{T1} = K_{T2} = K_{T3} = 200 \text{ N} \cdot \text{m},$$

$$K_{T4} = 250 \text{ N} \cdot \text{m};$$

$$c_1 = c_2 = c_3 = 0.2 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s},$$

$$c_4 = 0.15 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}.$$

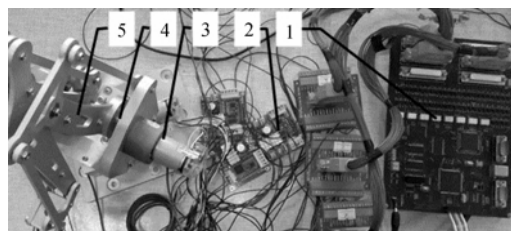
仿真过程中发现,弹簧和连杆的阻尼系数越小,系统振动越明显,故可通过机构优化,即提高系统阻尼来抑制振动^[9],但如此会增加各柔性关节的驱动力矩,消耗更多的能量。

为分析脉冲整形输入对负载运动稳定性的影响,在负载处添加检测模块,用于检测采用脉冲整形输入前后的运动信号。

3.2 实验平台

为进一步验证脉冲整形输入对码垛机器人残余振动的抑制效果,搭建如图 6 所示的码垛机器人控制平台。该控制系统包括工控机、运动控制卡、电机驱动器、带有光电编码器的直流电机、位置传感器和码垛机器人样机等。运动控制卡可实现脉冲整形输入和运动轨迹的插补,运动控制卡通过 PCI 总线与工控机相连。工控机发出的指令经运动控制卡后转变为电机输出力矩至驱动器,驱动器将运动指令转换为电流信号以驱动直流电机,同时光电编码器将电机的位置信号传给运动控制卡。位置传感器用于检测与电机相连连杆的转角信号,并传给运动控制

卡。电机的位置信号和连杆的转角信号,可通过工控机实时显示。



1. 运动控制卡 2. 电机驱动器 3. 带有光电编码器的直流电机 4. 位置传感器 5. 码垛机器人

图 6 码垛机器人控制平台

3.3 仿真与实验结果

3.3.1 Simulink 模型仿真结果

通过 Simulink 模型仿真得到的各柔性驱动关节的振动曲线如图 7 所示,0.5 s 以后视为残余振动。

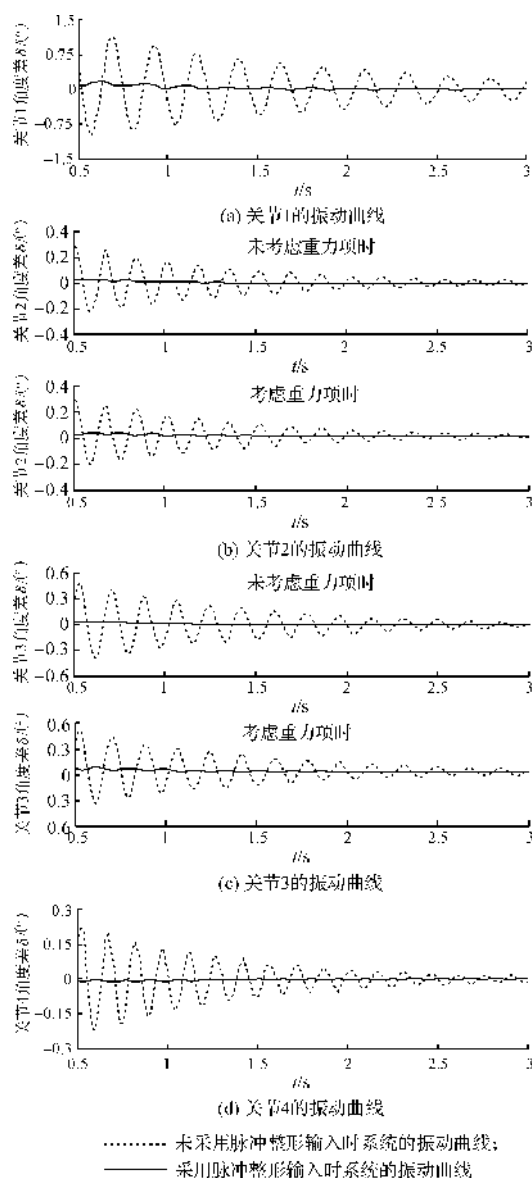


图 7 通过 Simulink 模型仿真得到的振动曲线

从图7中可知,采用脉冲整形输入时各驱动关节的振动曲线幅值明显变小,这说明脉冲整形输入很好的抑制了残余振动。由关节2和关节3的振动曲线(图7(b)和(c))可知,重力矩的存在使各关节的平衡位置整体移动,但对关节振动曲线的幅值影响较小,故可通过重力补偿后,抵消重力矩的影响。

通过对采用脉冲整形输入前后检测到的运动信号进行对比处理,可得到负载的位移、速度和加速度,如图8中(a)~(c)所示。

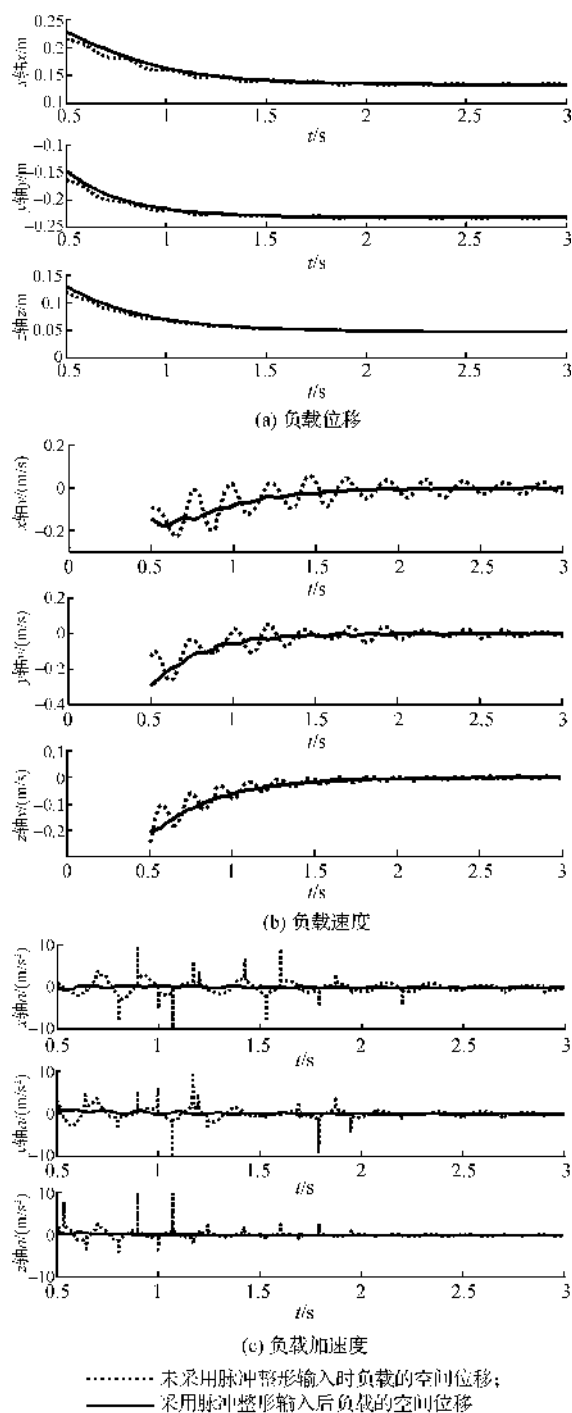


图8 末端负载运动曲线

由图8可知,采用脉冲整形输入后,负载的运动轨迹更为稳定,运动速度波动较小,且运动加速度不会出现突变的情况,如此可提高控制系统的稳定性和可靠性。

3.3.2 实验结果

通过实验得到的各驱动关节的振动曲线如图9所示,0.5 s以后视为残余振动。

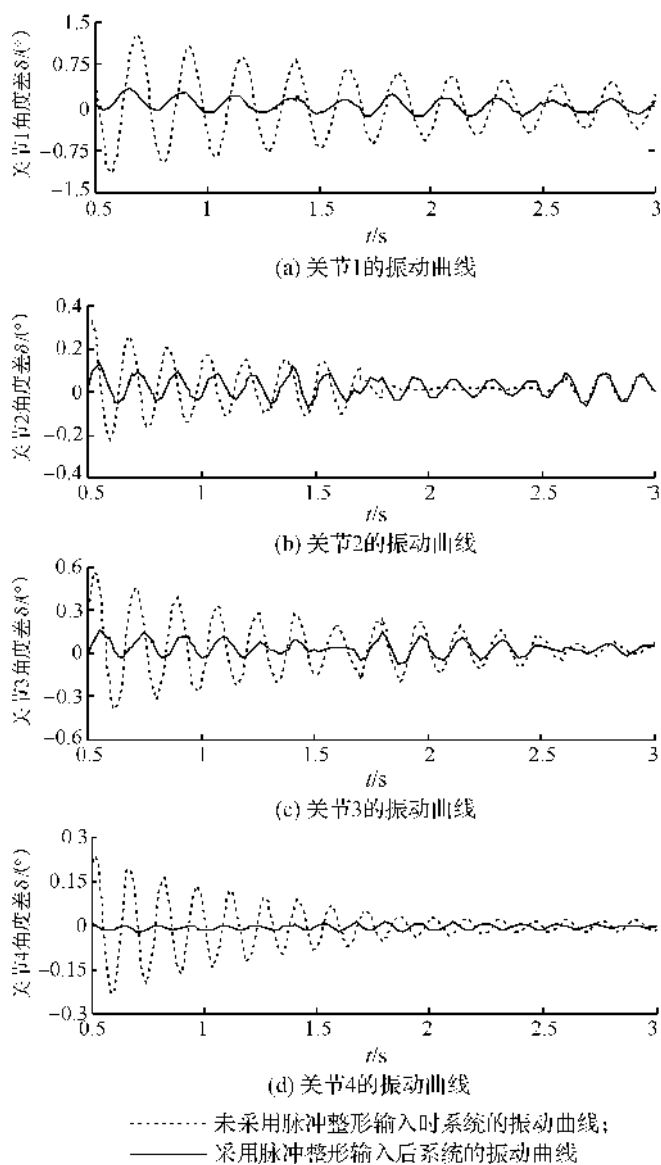


图9 通过实验得到的振动曲线

由图9可知,采用脉冲整形输入后系各驱动关节的振动曲线幅值明显减小,但因电机控制精度、杆件弹性变形及其它干扰因素等原因,实验得到的振动曲线中出现部分波动情况,不如仿真得到的曲线理想,但仍可说明脉冲整形输入较好的抑制了残余振动。

4 结 论

串联型码垛机器人中的柔性关节是其必不可少的组成部分,因而其在运动过程中出现的残余振动是无法避免的,这对码垛机器人的控制精度和稳定性提出了很大挑战。针对码垛机器人的残余振动抑制问题,本文建立了较为常见的串联型码垛机器人的三维模型,对模型进行运动仿真,检测残余振动的存在,引入脉冲整形输入来抑制残余振动,并通过仿真与实验进行验证。

仿真与实验结果表明,引入脉冲整形输入后,各柔性驱动关节的残余振动曲线幅值变小且效果明显,可见脉冲整形输入作为一种简单而有效的开环控制方法,应用于具有残余振动的码垛机器人系统,能够达到较好的控制效果,进而提高码垛机器人的控制精度和稳定性,使其能够更好的适应各种工作要求。

参考文献:

- [1] SINGER N C, SEERING P S. Preshaping command inputs to reduce system vibration[J]. Transactions of the ASME, 1992, 112: 76-81.
- [2] KAPILA V, TZES A, YAN Q. Close-loop input shaping for flexible structures using time delay control[J]. Transactions of the ASME, 2000, 122(9): 454-460.
- [3] 张铁民, 李成元. 带有反馈控制的柔性机械臂动态研究与振动控制[J]. 机械工程学报, 2000, 36(3): 47-50.
- [4] 董明晓, 宋传增, 梅雪松. PD 结合输入整形抑制单模态弹性机构振动仿真研究[J]. 机械工程学报, 2010, 46(13): 135-140.
- [5] 史伟民, 杨亮亮, 陶维, 等. 基于脉冲整形滤波的轨迹涂胶残余振动抑制研究[J]. 中国机械工程, 2011, 22(7): 860-863.
- [6] PARK J, CHANG P H. Learning input shaping technique for non-LTI systems[C]//American Control Conference, 1998. Proceedings of the 1998. IEEE, 1998, 5: 2652-2656.
- [7] LANE J, DICKERSON S L. Contribution of passive damping to the control of flexible manipulators [C]//Proceedings of the ASME International Computers in Engineering Conference, Las Vegas, NV. 1984: 175-180.
- [8] NINKU S B. 机器人学导论[M]. 孙富春, 朱纪洪, 刘国栋, 等, 译. 北京: 电子工业出版社, 2004: 108-114.
- [9] PARK J, CHANG P H, PARK H S, et al. Design of learning input shaping technique for residual vibration suppression in an industrial robot[J]. Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on, 2006, 11(1): 55-65.

Research on Residual Vibration Suppression of Robot Palletizer Based on Pulse Shaping

GE Hongwei, SHI Weimin, YANG Liangliang, XU Shoujin

(Faculty of Mechanical Engineering & Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: In order to study the residual vibration problem of series robot palletizer driven by four shafts, a three-dimensional model was designed by SolidWorks software, and the robot palletizer prototype was designed and developed according to the model. The prototype is a flexible mechanism, so residual vibration may be easily produced. Secondly, The dynamics equations of each actuating joint and the corresponding control system structure diagram were obtained by using the Lagrange method. Then, the model was imported in Matlab again. Dynamics simulation was conducted for the model through Simulink module to simulate motion process of robot palletizer. Then, pulse shaping input was adopted to suppress residual vibration. Finally, it was verified by simulation and experiment. The results show that pulse shaping input can suppress the residual vibration of each actuating joint effectively, and then improve the control precision and stability of robot palletizer.

Key words: robot palletizer; dynamics analysis; pulse shaping input; residual vibration suppression

(责任编辑: 康 锋)