

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2019.06.008

建筑钻孔机器人的振动与控制研究*

杨 扬¹, 陈 柏^{1*}, 王尧尧^{1,2}

(1. 南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016; 2. 浙江大学
流体动力与机电系统国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘要:针对建筑机器人在钻孔过程中由于钻头偏移引起振动的问题,对柔性关节机器人模型、钻削力、时延控制等进行了研究。提出了一种因钻头偏移而引起钻削力波动的理论,并引入 PD_TDC 控制方法来控制机器人的位姿来减少钻头偏移量,从而减少了振动;利用拉格朗日动力学方法,建立了柔性关节的机器人系统;利用动态前角的方法,建立了钻削力模型;基于 Matlab/Simulink 建立了三自由度特定位姿的平面进给机器人的仿真模型;利用 PD_TDC 控制方法,对进给过程中的转角偏移进行了快速的补偿。研究结果表明:该方法可以有效减小各关节转角的偏差,减小钻头偏移角度以及钻削力的变化范围,有效抑制振动,提高了孔的加工质量。

关键词:建筑机器人;动态前角;钻削力;时延估计

中图分类号:TH113.1;TH39;TP242

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2019)06-0596-06

Vibration and control of building drilling robot

YANG Yang¹, CHEN Bai¹, WANG Yao-yao^{1,2}

(1. College of Mechanical & Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. The State Key Laboratory of Fluid Power and Mechatronic Systems, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Aiming at the problem of vibration caused by drill bit offset in drilling process of construction robot, the model of flexible joint robot, drilling force and time delay control were studied. A theory of drilling force fluctuation caused by bit offset was proposed, and the control method of PD_TDC was introduced to control the position and pose of the robot to reduce bit offset and vibration. The robot system with flexible joints was established by Lagrange dynamics method, the drilling force model was established by dynamic front angle method, and the simulation model of planar feeding robot with three degrees of freedom and specific position was established based on Matlab/Simulink. The rotation offset in the feeding process was compensated quickly by PD_TDC control method. The results indicated that this method can effectively reduce the deviation of joint rotation angle, thus ensuring the reduction of bit offset angle, reducing the variation of drilling force, effectively suppressing vibration and improving the processing quality of holes.

Key words: construction robot; dynamic front angle; drilling force; time-delay control

0 引 言

上世纪 60 年代工业机器人开始得到发展^[1-4],如今,移动式作业机器人已经出现在建筑行业,用于砌

墙、贴瓷砖、钻孔等作业。

用移动式小车加上串联机械臂的建筑钻孔机器人,可以在室内各个位置自由钻孔,并且可以严格控制孔的质量。机器人系统柔性环节主要有两种:关节柔

收稿日期:2018-11-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51575256,51705243);江苏省自然科学基金资助项目(BK20170789);浙江大学流体动力与机电系统国家重点实验室开放基金资助项目(GZKF-201606)

作者简介:杨扬(1991-),男,辽宁铁岭人,硕士研究生,主要从事建筑机器人方面的研究。E-mail:lightning_108@163.com

通信联系人:陈柏,男,教授,博士生导师。E-mail:chenbye@126.com

性和杆件柔性。对于建筑机器人一般只分析其关节柔性带来的影响。对于关节柔性机器人模型,基于 Lagrange 方程,SPONG^[5]1987 年就推导出了考虑关节柔性的机器人模型;基于该模型,在关节处加入了刚度和阻尼,以切削力为外载荷;基于对前人两种切削力建模方法的总结,Minukhin^[6]提出了新的动态前角切削力建模方法,得到了切削力模型。

沈孝栋^[7]考虑关节柔性建立了机器人模型,根据数学和经验建立了钻削力模型,将两个模块联合进行了 Simulink 仿真,得出了转速越高钻削力波动越小,产生的振动越小。针对工业机器人钻孔过程中的振动,戎新萍^[8]提出了模糊控制的补偿办法,有效提高了孔的加工质量;KINSHEEL A^[9]采用力/位置控制来保证钻孔路径,仿真表明这种控制方法可以有效地改善钻孔的路径。

以上都是针对工业机器人某一固定位姿的研究,而建筑机器人为了轻便,其作业空间柔性更大,加工精度要求不高,采用机械臂自进给系统。因此,本文将提出一种因钻头偏移而引起钻削力波动的理论,并引入 PD_TDC 控制机器人的位姿来减少钻头偏移量,从而减少振动。

1 柔性关节机器人系统建模

1.1 柔性关节的简化

对于 SPONG 在对柔性关节的简化,对机器人的关节作出以下 3 个假设:

- (1) 关节变量的变形量是微小的,在其弹性范围允许范围内;
- (2) 转子/齿轮惯量是围绕转子旋转轴对称的,因此系统的重力势和转子质心的速度都与转子位置无关;
- (3) 转子的动能主要是由于其自身的转动,等效地,转子的运动是相对于惯性框架的纯旋转。

基于以上假设,就可以将串联机器人关节处的链接简化成一个刚度为 k_i 的扭转弹簧,其阻尼系数为 c_i 。该等效扭簧与一般扭簧相同,产生的弹性力矩与其弹性变形量成线性关系,阻尼力矩与其速度成一定的线性关系。串联机器人转动关节 i 的简化模型。

而对于建筑机器人,在其钻孔过程中,考虑机器人关节的柔性,钻孔过程中机器人关节在小范围内动态变化,系统产生振动。

1.2 钻孔机器人的动力学模型

研究建筑钻孔机器人的振动形式,先仅考虑平面内进给,选用典型的三关节机器人,其简化模型如图 1

所示。

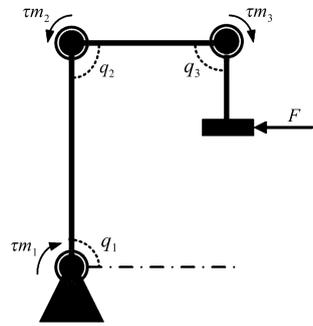


图 1 三关节机器人系统简化模型

这种简化模型与实际机器人动能差值极小。末端执行器采用悬挂式,机器人初始位姿设定如图 1 所示,在该平面内向右侧位移加工。假定所有连杆皆为刚性杆,质量分布均匀,且机器人柔性主要集中在由谐波器引入的关节处。

本研究用拉格朗日方法建立机器人动力学模型:

$$\begin{cases} M(Q)\ddot{Q} + H(Q)\dot{Q}^2 + K(Q)\dot{Q} + G(Q) = \tau + \tau_d \\ J_e\ddot{\theta}_e + \frac{1}{n}(\tau + \tau_d) = \tau_e \\ \tau = K_q\left(\frac{1}{n}\theta_e - Q\right) \\ \tau_d = J^T(Q)F \end{cases} \quad (1)$$

式中: τ_e —电机输入力矩; J_e —电机转子转动惯量; τ —关节驱动力矩; τ_d —钻削力矩; θ_e —电机转子的转动角度; Q —连杆的转动角度; $M(Q)$ —关节转动惯量; $H(Q)$ —向心力速度; $K(Q)$ —科氏力系数; $G(Q)$ —重力项; K_q —关节刚度矩阵; n —谐波减速器的减速比, $n > 1$; $J^T(Q)$ —力的雅克比矩阵。

2 钻削力模型

标准麻花钻尺寸参数示意图如图 2 所示。

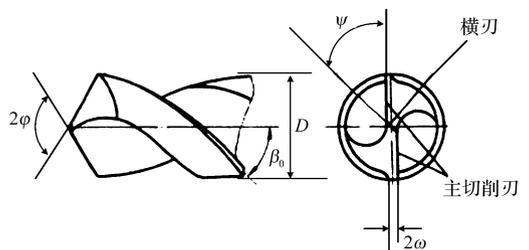


图 2 标准麻花钻尺寸参数示意图

由图 2 可知:钻削过程中的轴向力、切向力和扭矩来自主切削刃、副刃和横刃 3 部分。根据实验和生产经验,在钻削力数学建模中以主切削刃为主。

由于钻削过程中各点的钻削参数和几何参数都是在不断变化的,对主切削刃化分为微小的模块形成传统切削的斜角切削模型,用积分的方法比较准确。在对以往的 3 种钻削力预测模型的基础上,MINUKHIN I 提出了动态前角法。

对于某一处参与钻削的单元来说,其所处的半径为 r , 所以其微元可表示为:

$$dl = \frac{r}{\sin\varphi \sqrt{r^2 + \omega^2}} dr \quad (2)$$

而对于某一处参与钻削的单元在局部形成斜角切削,对于该斜角切削有:

$$\begin{cases} w = \sin^{-1} \frac{\omega}{r} \\ i = \sin^{-1}(\sin w \sin \varphi) \\ \beta_r = \tan^{-1} \left(\frac{2r}{D} \tan \beta_0 \right) \\ \gamma_d = \tan^{-1} \left(\frac{\tan \beta_r (\cos w + \sin w \tan w \cos^2 \varphi) - \tan w \cos \varphi}{\sin \varphi} \right) \\ \lambda_n = \frac{\pi}{6} + \frac{\gamma_d}{2} \\ \varphi_n = \frac{\pi}{4} + \frac{\gamma_d - \lambda_n}{2} \\ \varphi = \cot^{-1} (\cot \varphi_n \cos i - \tan \gamma_d (1 - \cos i)) \\ \lambda = \tan^{-1} \left(\frac{\cos \varphi - \cos \varphi_n + \tan (\lambda_n - \gamma_d) \sin \varphi_n}{\sin \varphi} \right) + \gamma_d \\ \theta_0 = \varphi + \lambda - \gamma_d \\ \varepsilon = \tan^{-1} (\tan w \cos \varphi) \end{cases} \quad (3)$$

式中: w —指定半径腹板角度; i —倾角; β_r —指定半径螺旋角; γ_d —动态前角; λ_n —正切摩擦角; φ_n —正切剪切角; φ —斜切剪切角; λ —斜切摩擦角; θ_0 —合理角; ε —分度角。

所以,总的切削力扭矩可以表示为:

$$dF_L = \frac{K_{TH} f \cos(\lambda - \gamma_d) \cos \varepsilon}{2 \sin \varphi \cos \theta_0} \left(\tan(\lambda - \gamma_d) \cos \varepsilon \sin \varphi - \frac{\sin \lambda \cos \gamma_d \sin i \cos \varphi}{\cos(\lambda - \gamma_d)} \right) - \sin i \cos \varphi + \sin \varepsilon \sin \varphi \frac{r}{\sqrt{r^2 - \omega^2}} dr \quad (4)$$

$$dT = \frac{K_{TQ} f \cos \varepsilon}{2 \sin \varphi \cos \theta_0} \left(\frac{\cos i}{\cos(\lambda - \gamma_d)} + \sin \lambda \cos \gamma_d \tan i \sin i \right) \frac{r^2}{\sqrt{r^2 - \omega^2}} dr \quad (5)$$

在钻削过程中,随着钻头的逐步进给,主切削刃切削半径逐渐变大,直到进入完全切削状态,此时 $r(t)$ 为:

$$r = \begin{cases} r_c^2 + 2\Delta \sqrt{(r_c^2 - \omega^2)} + \Delta^2, & r < \frac{D}{2} \\ D/2, & r \geq \frac{D}{2} \end{cases} \quad (6)$$

其中: $b_\psi = d_c / \sin \psi$; $r_c = b_\psi / 2$; $\Delta = t \cdot f \cdot N / 60 \cdot \tan \varphi$ 。

式中: t —时间; f —进给速度; N —钻头转速; K_{TH} —切削力引起的剪应力因子; K_{TQ} —扭矩引起的剪应力因子,两者都由经验获得。

由此就可以得到钻削力和扭矩关于时间 t 的函数,所以 $F_L = 2 \int_r^{r_c} dF_L, T = 2 \int_r^{r_c} dT$ 。

根据主切削刃产生的钻削力占总钻削力的比例,推测得出稳定钻削时的轴向力 $F_A = 2.5 F_L$, 扭矩 $T_A = 1.67 T$ (F_A, T_A —主切削刃全部参与钻削时的轴向力和扭矩)。

在此,本文仅考虑建筑机器人在机械臂自进给过程中,由于关节柔性所带来的振动。

钻头在钻削平面偏移的示意图如图 3 所示。

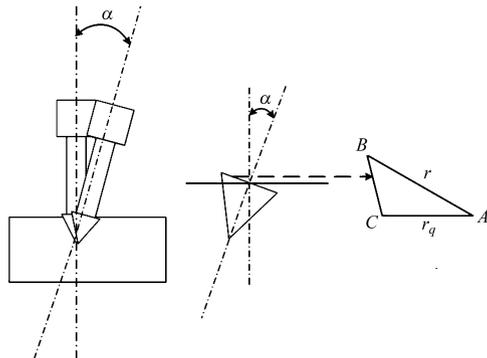


图 3 钻头在钻削平面偏移示意图

关节偏移之后,钻头的双切削刃中一个偏移,另一个仍然进行全半径切削,则其切削力和扭矩积分为:

$$\begin{aligned} A = \alpha, B &= \frac{(180 - 2\varphi)}{2} \\ \frac{AC}{\sin B} &= \frac{AB}{\sin C} \\ r_q &= \frac{r \sin B}{\sin C} \\ F_L &= \int_r^{r_c} dF_L + \int_{r_q}^{r_c} dF_L \\ T &= \int_r^{r_c} dT + \int_{r_q}^{r_c} dT \end{aligned} \quad (7)$$

在机器人进给过程中,需要实时的控制来保证关节运转角度的准确,减少振动,提高加工质量。

3 钻削力仿真

本文选取高速钢钻头对 Q235 结构钢进行钻削实

验。对于 Q235 结构钢的轴向力、扭矩等,工程中已经有了大量的实验数据^[10]。

高速钢钻头在 Q235 结构钢钻孔数据如表 1 所示。

表 1 高速钢钻头在 Q235 结构钢钻孔数据

<i>D</i> /mm	<i>F</i> /(mm·r ⁻¹)	<i>F</i> /N	<i>M</i> /(N·m)	<i>N</i> /(r·min ⁻¹)
5	0.08	676	1 010	1 782.5
	0.10	794	1 200	1 527.9
	0.12	902	1 390	1 336.9
	0.14	1 000	1 570	1 209.6
8	0.10	1 265	3 090	1 034.5
	0.12	1 440	3 570	915.2
	0.14	1 600	4 020	795.8

运用 MATLAB/Simulink 进行钻削过程的仿真。分别用 *D* = 5 mm, *f* = 0.10 mm/r, 和 *D* = 8 mm, *f* = 0.10 mm/r 进行钻削实验的仿真。

D = 5 mm, *f* = 0.10 mm/r 和 *D* = 8 mm, *f* = 0.10 mm/r 时, 钻削仿真数据如图 4 所示。

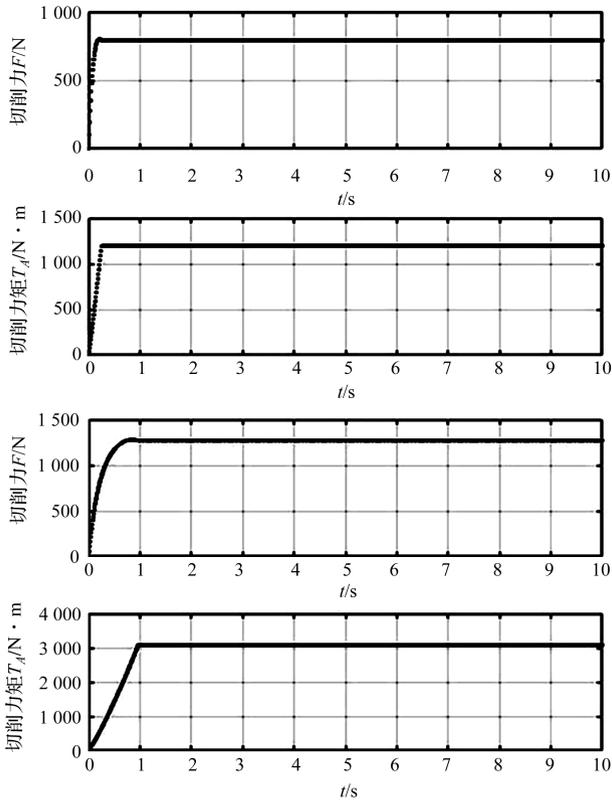


图 4 *D* = 5 mm, *f* = 0.10 mm/r 和 *D* = 8 mm, *f* = 0.10 mm/r 的钻削仿真数据

对比数据可知:钻削过程中,由于没有考虑到刀具的磨损、温度的变化、工件的变形等影响因素,结合文献[11-14]可知,切削力和力矩的变化符合总的变化趋势。

4 基于时延估计的 PD 控制

本文采用基于时延估计的 PD 控制器^[15-16]对建筑机器人钻削过程进行控制。

将机械臂动力学方程重写为:

$$\tau_m = \bar{M} \cdot \ddot{Q} + G \tag{8}$$

式中: \bar{M} —对常角矩阵, $\bar{M} \in R^{n \times n}$ 。

G 可表示为:

$$G = (J_m - \bar{M}(t))\ddot{Q} + D_m\dot{Q} + M(\ddot{q})\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + F(q, \dot{q}) - \tau_s \tag{9}$$

由于 *G* 中众多参数,做参数辨识存在困难,本文对 *G* 采用适当合理的估计,并对其进行控制,因此将公式简化为:

$$\tau_m = \bar{M} \cdot u(t) + \hat{G}(t) \tag{10}$$

$$u(t) = \ddot{Q}_d + K_D\dot{e} + K_P e \tag{11}$$

式中: $\hat{G}(t)$ —*G* 估计项; \ddot{Q}_d —关节期望加速度矢量; $\dot{e} = \dot{Q}_d - \dot{Q}$; $e = Q_d - Q$; K_D, K_P —为关节跟踪误差及其导数,均为常正对角矩阵,表示各个关节 PD 参数。

联立式(10,11)式可得:

$$\bar{M} \cdot (\ddot{e} + K_D\dot{e} + K_P e) = G(t) - \hat{G}(t) \tag{12}$$

假设 $\hat{G}(t) = G$, 由式(11,12) 可得系统的闭环误差方程为:

$$\ddot{e} + K_D\dot{e} + K_P e = 0 \tag{13}$$

由此可知该闭环系统是渐进稳定的。采用时延估计方法对参数项进行估计,即:

$$\hat{G}(t) = G(t - \Delta t) = \tau_m(t - \Delta t) - \bar{M} \cdot \ddot{Q}_d(t - \Delta t) \tag{14}$$

式中: Δt —系统的采样周期。

当 Δt 取值较小时,即可将下一时刻作为当前时刻,即满足:

$$G(t) \cong G(t - \Delta t) \tag{15}$$

联立式(13),可以得到基于时延估计的 PD 控制律为:

$$\tau_m = \bar{M} \cdot (\ddot{Q}_d + K_D\dot{e} + K_P e) + (\tau_m(t - \Delta t) - \bar{M} \cdot \ddot{Q}_d(t - \Delta t)) \tag{16}$$

从式(16)可知:

机械臂的动力模型精确程度主要与矩阵 $\hat{G}(t)$ 估计精确性、采样周期 Δt 有关,当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时,可认为式(15) 等号成立。

PD_TDC 建筑机器人控制框图如图 5 所示。

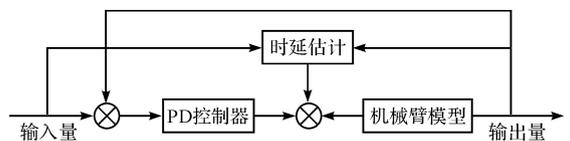


图 5 PD_TDC 建筑机器人控制框图

由图 5 可以看出:

整个控制分为两部分—PD 控制、时延估计控制。整个控制对于机器人快速运转也有很快的响应速度,

因此可知,面对未知的载荷控制效果好,鲁棒性强。

5 试验及结果分析

基于 MATLAB/Simulink 软件,本文搭建出三自由度机械臂的模型(其初始位姿如图 1 所示), $q_1 = -\pi/2$; $q_2 = \pi/2$; $q_3 = \pi/2$ 。

机械臂结构参数如表 2 所示。

表 2 机械臂结构参数

参数名称	数值
臂 1 等效质量/kg	5
臂 2 等效质量/kg	3
臂 3 等效质量/kg	1
臂 1 长度/m	0.6
臂 2 长度/m	0.4
臂 3 长度/m	0.2
电机转子等效质量/kg	1
电机转子等效转动惯量/($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)	000 198
臂 1 等效转动惯量/($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)	$8.1 \text{e} - 06$
臂 2 等效转动惯量/($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)	$4.3 \text{e} - 06$
臂 3 等效转动惯量/($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)	$2.2 \text{e} - 06$
关节刚度/(N/rad)	60 000
转速比	120

接着加入钻削力模块,并将钻头偏移引入。选用钻头为 $D=5 \text{ mm}$,给定进给量为 $f=0.10 \text{ mm}/\text{r}$,转速为 $N=1\ 500 \text{ r}/\text{min}$,钻削的工件材料为 Q235 结构钢。最后加入控制模块,先采用简单的 PID 控制观察控制效果,再采用 PD_TDC 控制观察控制效果。

PID 控制下的关节角度误差和钻削力变化如图 6 所示。

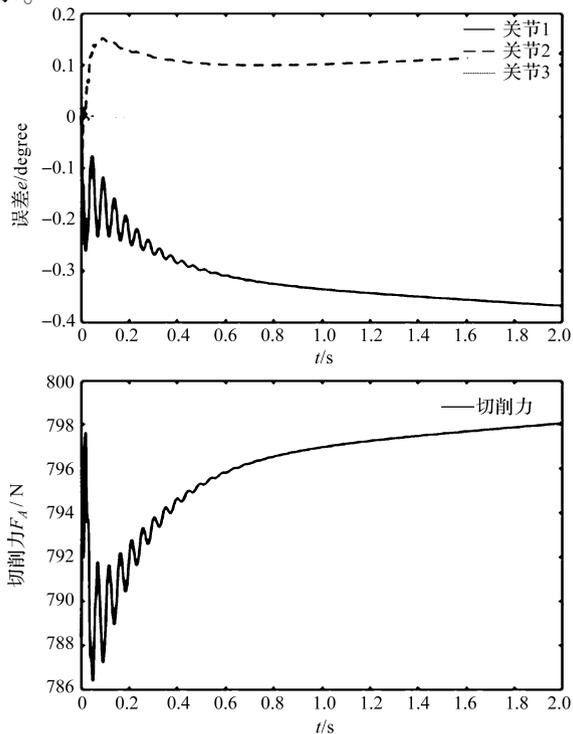


图 6 PID 控制下的关节角度误差和钻削力变化

PD_TDC 控制下的关节角度误差和钻削力变化如图 7 所示。

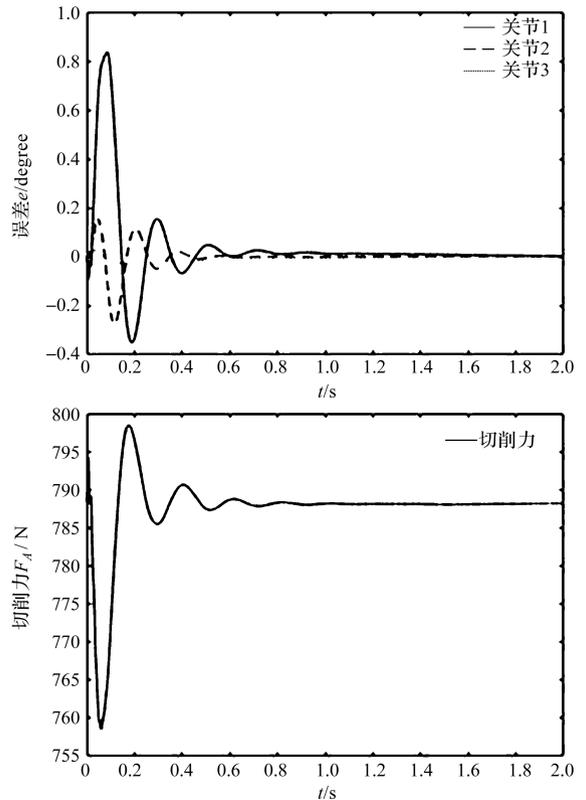


图 7 PD_TDC 控制下的关节角度误差和钻削力变化

由仿真效果图可以看出:

采用简单的 PID 仿真,虽然可将最大关节误差角度控制在 0.3° 左右,但初始响应阶段抖动明显,导致钻削力在初始阶段抖动明显,且关节角度误差没有趋近于零,最终钻削力调整时间在 $0.8 \text{ s} \sim 1 \text{ s}$ 左右。而采用 PD_TDC 控制,只有关节 1 的误差最大为 0.8° 左右,而关节 2 在 0.2° 以下,关节 3 误差不明显;而且在 0.5 s 后,关节 1、关节 2 和关节 3 的关节角度误差都趋近于零,反映在切削力上是在 0.4 s 之前有一个较大的波动,之后趋于稳定。

从控制方法的对比可以发现:

PID 的控制方法虽然误差角度控制得很好,但初期抖动大,响应时间慢 (0.8 s),并且钻头偏角误差一直存在,使得钻削力一直呈现变大的趋势,不利于钻削加工;而 PD_TDC 控制只在开始 0.5 s 内存在一个较大的波动,初期钻削力有 30 N 左右的波动,但是响应时间提高 37.5% ,之后加工过程中误差几乎为零,有利于钻削加工。

这也体现了 PD_TDC 控制具有更强的鲁棒性。

6 结束语

由于机器人关节处柔性的存在,在机械臂进给加工的过程中,会造成关节的转角偏移,形成振动。因此,本文采用的PD_TDC控制方法,用PD模块和时延模块,控制末端执行器的位姿,从而使得钻削力趋于稳定,有效地解决了钻头偏移造成的振动问题,可以更好地保证孔的加工质量。

参考文献(References):

- [1] 于军琪,曹建福,雷小康. 建筑机器人研究现状与展望[J]. 自动化博览,2016(8):68-75.
- [2] 刘长毅. 飞机自动化装配中的机器人制孔动力学研究[J]. 航空制造技术,2012(16):26-29.
- [3] 章定国. 柔性杆柔性铰机器人动力学分析[J]. 应用数学和力学,2006,27(5):615-623.
- [4] 周胜丰. 柔性机器人动力学建模和仿真[D]. 南京:南京理工大学机械工程学院,2003.
- [5] SPONG M W. Modeling and control of elastic joint robots [J]. **Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control**, 1987,109(1):310-319.
- [6] MINUKHIN I. An improved method of cutting forces prediction for the primary cutting edges of twist drills [D]. Montreal:Concordia University Department of Mechanical and Industrial Engineering,2013.
- [7] 沈孝栋,刘长毅,张柏寿. 考虑关节柔性的机器人制孔过程动力学仿真[J]. 机械设计与制造,2015(3):196-200.

- [8] 戎新萍,徐海璐,袁祖强. 制孔机器人在制孔过程中的振动抑制研究[J]. 机电工程,2017,34(6):591-595.
- [9] KINSHEEL A. Hybrid force /position control of robotic drilling system [C]. **Control, Decision and Information Technologies(CODIT)**, New York: IEEE,2014.
- [10] 高速钢钻头在结构钢上的钻孔的切削速度、轴向力、扭矩及功率。[DB/OL] <https://wenku.baidu.com/view/3130afcca1c7aa00b52acb56.html>
- [11] 沈孝栋. 制孔机器人在钻削力作用下变形与振动的研究[D]. 南京:南京航空航天大学机电学院,2015.
- [12] 阎思达,陈 雁,陈文卓. 加油机器人运动学研究[J]. 液气驱动与密封,2017(10):49-52.
- [13] 董丽华,刘大昕. 钻削力模型的建立及仿真[J]. 机械工程师,2003(7):27-30.
- [14] GLAA N, MEHDI K, ZITOUNE R. Numerical modeling and experimental analysis of thrust cutting force and torque in drilling process of titanium alloy Ti6Al4V[J]. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 2018,96(5-8):2815-2824.
- [15] WANG Y, LUO G, GU L, et al. Fractional-order nonsingular terminal sliding mode control of hydraulic manipulators using time delay estimation[J]. **Journal of Vibration and Control**, 2016,22(19):3998-4011.
- [16] WANG Y, GU L, XU Y, et al. Practical tracking control of robot manipulators with continuous fractional-order nonsingular terminal sliding mode[J]. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 2016,63(10):6194-6204.

[编辑:张 豪]

本文引用格式:

杨 扬,陈 柏,王尧尧. 建筑钻孔机器人的振动与控制研究[J]. 机电工程,2019,36(6):596-601.

YANG Yang, CHEN Bai, WANG Yao-yao. Vibration and control of building drilling robot[J]. **Journal of Mechanical & Electrical Engineering**, 2019,36(6):596-601.

《机电工程》杂志:<http://www.meem.com.cn>