

DOI: 10.3969/j.issn.2095-509X.2020.07.003

切削机器人任务空间的动力学优化

夏恩帅 张永贵 刘永平 牛 蓉

(兰州理工大学机电工程学院,甘肃 兰州 730050)

摘要: 针对六自由度切削机器人工作中的特点,首先利用切削机器人三维模型获取其动力学参数,建立了切削机器人动力学模型;其次分析了机器人的工作空间与任务空间,以及二者的相对位置关系;最后在动力学模型的基础上利用遗传算法得到任务空间在机器人工作空间的优化位姿,并对核心优化算法进行了调试和验证。运用 MATLAB 得到了机器人各关节驱动力矩、角位移、角速度和角加速度随时间变化的情况,基于仿真结果验证了切削机器人动力学优化的合理性。

关键词: 切削机器人; 动力学; 遗传算法; MATLAB

中图分类号: TP242.2

文献标识码: A

文章编号: 2095-509X(2020)07-0012-07

近年来,六自由度机器人由于其具有操作的机动性和灵活性,以及能够代替人类从事一些单调、繁重的工作,越来越受到各方的重视^[1]。

六自由度切削机器人动力学建模,采用牛顿-欧拉法可以得到效率很高的模型递归方程,非常适合数值计算,计算复杂程度也相对较低^[2]。本文以六自由度串联切削机器人为研究对象,首先运用 SolidWorks 软件建立其三维模型,获得切削机器人的动力学参数;然后以牛顿-欧拉法为理论方法建立切削机器人的动力学方程,同时分析切削机器人的工作空间,确定任务空间和机器人基坐标系的相对位置^[3];最后通过遗传算法得到切削机器人的最佳位姿。本文的研究成果可为六自由度串联切削机器人的动力学研究奠定理论基础。



图1 六自由度串联机器人三维模型

1 运动学模型的建立

运用 SolidWorks 软件建立的六自由度串联切削机器人三维模型如图1所示。

对图1所示的切削机器人,采用后置 D-H 法建立其连杆坐标系^[4],如图2所示,切削机器人的 D-H 参数见表1。

将表1中的参数 θ_i 、 α_i 、 a_i 、 d_i 代入齐次变换矩阵式(1)中,可得到机械臂相邻两个关节坐标系之

表1 六自由度串联切削机器人的 D-H 参数

连杆	关节角 $\theta_i / (^\circ)$	扭转角 $\alpha_i / (^\circ)$	连杆长度 a_i / mm	连杆偏移量 d_i / mm
1	0	-90	145	0
2	-90	180	870	0
3	0	-90	110	0
4	0	90	0	-1 025
5	0	-90	0	0
6	0	180	0	175

间的变换关系 A_i^{i-1} ,末端执行器与基坐标之间的齐次变换矩阵式(2)是由机械臂中从低序到高序的所有相邻坐标系之间的变换关系依次相乘而得:

收稿日期: 2019-12-06

基金项目: 兰州市科技计划项目(2018-4-29)

作者简介: 夏恩帅(1994—),男,硕士研究生,主要研究方向为工业机器人,602584016@qq.com.

通讯作者: 张永贵,男,研究员,zyg9568@163.com.

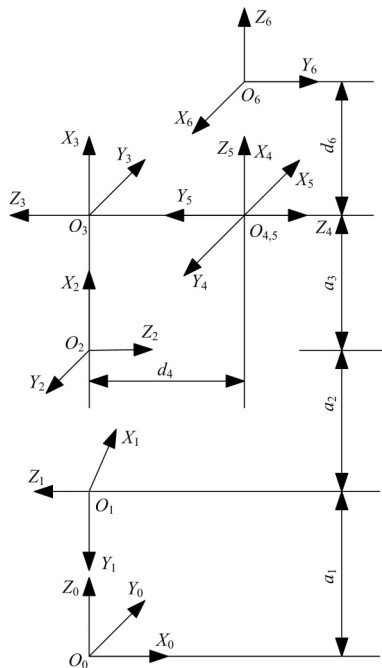


图 2 六自由度串联切削机器人后置连杆坐标系

$$A_i^{i-1} = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i \cos\alpha_i & \sin\theta_i \sin\alpha_i & a_i \cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i \cos\alpha_i & -\cos\theta_i \sin\alpha_i & a_i \sin\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_i^{i-1} & r_{i-1}^{i-1} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$T_6^0 = A_1^0 A_2^1 A_3^2 A_4^3 A_5^4 A_6^5 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: R_i^{i-1} 为坐标系 Σ_i 相对于 $\Sigma(i-1)$ 的姿态, 其为一个 3×3 的矩阵, 由 A_i^{i-1} 的前 3 行前 3 列构成; r_{i-1}^{i-1} 为坐标系 Σ_i 相对于 $\Sigma(i-1)$ 的位置, 用一个 3×1 的列矢量表示, 由 A_i^{i-1} 的第 4 列的前 3 行构成; $n_j, o_j, a_j (j=x, y, z)$ 分别为末端坐标系的坐标轴在机座坐标系中的方向余弦; $p_j (j=x, y, z)$ 为末端坐标系的原点在机座坐标系中的位置。

通过 MATLAB 中机器人工具箱的 link 等函数, 计算 $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6$ 均为 0 时末端执行器在机座坐标系中的位姿, 从而得到式 (3) 机器人的 MATLAB 模型如图 3 所示。

$$T_6^0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1125 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -850 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

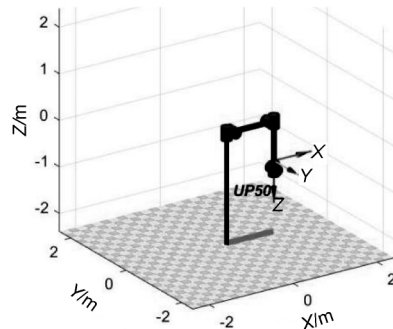


图 3 机器人 MATLAB 三维仿真模型

2 动力学模型的建立

为更好地了解机器人运动过程中各关节的速度、加速度和关节力矩等参数, 通过建立机器人动力学模型来分析研究机器人的动力学特征^[5]。本文运用牛顿-欧拉法建立六自由度串联切削机器人的动力学模型, 其力平衡方程 (Newton 方程) 和力矩平衡方程 (Euler 方程) 如式 (4) 所示:

$$\begin{cases} f_{ci} = d(m_i v_{ci}) / dt = m_i a_{ci} \\ n_{ci} = d(I_{ci} \omega_i) / dt = I_{ci} \epsilon_i + \omega_i \times (I_{ci} \omega_i) \end{cases} \quad (4)$$

式中: f_{ci} 为作用在杆件 i 上的外力合矢量; n_{ci} 为作用在杆件 i 上的外力矩合矢量; $m_i, v_{ci}, a_{ci}, \omega_i, \epsilon_i$ 分别为杆件 i 质心的质量、线速度、线加速度矢量、角速度和角加速度; I_{ci} 为杆件的惯性张量; t 为时间。对于杆件 i 则有以下公式:

$$\begin{cases} F_{ci} = f_i - f_{ci} \\ N_{ci} = n_i - n_{i+1} - (r_{ci} - r_{i-1}) \times f_i + (r_{ci} - r_i) \times f_{i+1} \\ f_i = F_{ci} + f_{i+1} \\ n_i = N_{ci} + n_{i+1} + (r_{i-1} - r_i + r_{i \rho i}) \times f_i - r_{i \rho i} \times f_{i+1} \end{cases} \quad (5)$$

式中: F_{ci} 为连杆的惯性力; N_{ci} 为连杆的惯性力矩; f_i, f_{i+1} 分别为连杆 $(i-1)$ 和 $(i+1)$ 作用在连杆 i 上的力; n_i, n_{i+1} 分别为连杆 $(i-1)$ 和 $(i+1)$ 作用在连杆 i 上的力矩; r_i, r_{i-1}, r_{ci} 为坐标系 i 和坐标系 $(i-1)$ 的原点及连杆质心的位置矢量; $r_{i-1} - r_i$ 为坐标系 $(i-1)$ 和坐标系 i 的原点之间的相对位置矢量; $r_{i \rho i}$ 为坐标系 i 的原点和杆件 i 质心之间的相对位置矢量。为了编程方便, 将 F_{ci}, N_{ci}, f_i, n_i 转换为在 i 坐标系中的表示, 分别为 $F_{ci}^i, N_{ci}^i, f_i^i, n_i^i$ 。根据式 (1) 求得, 则有:

$$\begin{cases} f_i^i = F_{ci}^i + R_{i+1}^{i+1} f_{i+1}^i \\ n_i^i = N_{ci}^i + R_{i+1}^{i+1} n_{i+1}^i + (R_{i-1}^{i-1} r_{i-1} - r_i + r_{i \rho i}) \times f_i^i \\ - r_{i \rho i} \times (R_{i+1}^{i+1} f_{i+1}^i) \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \mathbf{F}_{ci}^i = m_i \mathbf{a}_{ci}^i \\ \mathbf{a}_{ci}^i = \mathbf{a}_i^i + \boldsymbol{\varepsilon}_i^i \times \mathbf{r}_{i,ci}^i + \boldsymbol{\omega}_i^i \times (\boldsymbol{\omega}_i^i \times \mathbf{r}_{i,ci}^i) \\ \mathbf{N}_{ci}^i = \mathbf{I}_{ci} \boldsymbol{\varepsilon}_i^i + \boldsymbol{\omega}_i^i \times (\mathbf{I}_{ci} \boldsymbol{\omega}_i^i) \end{cases} \quad (7)$$

式(6)是机器人关约束与关节运动之间的递推关系式 $\mathbf{r}_{i,ci}^i$ 为连杆 i 的质心在 i 坐标系中的表示。根据式(5)~式(7)可知 \mathbf{f}_{i+1} \mathbf{n}_{i+1} 为外载荷作用在末端执行器上的力和力矩,从末端连杆向前递推,可以得到各关节的约束反力与反力矩。关节 i 的驱动力矩 τ_i 是关约束反力矩在关节轴上的分量 z_{i-1} 为关约束反力在关节轴上的分量,即: $\tau_i = \mathbf{n}_i^i z_{i-1}$ 。

3 机器人工作空间与任务空间分析

3.1 确定机器人工作空间

六自由度切削机器人的工作空间如图 4 所示,图 4 是根据六自由度切削机器人的相关参数通过 MATLAB 仿真得到的,图中的点为机器人末端执行器驻留过的痕迹点,总点数 $N = 30\ 000$ 。切削机器人各个关节的转角范围是: $\theta_1 = [-180^\circ, 180^\circ]$, $\theta_2 = [-90^\circ, 135^\circ]$, $\theta_3 = [-160^\circ, 280^\circ]$, $\theta_4 = [-360^\circ, 360^\circ]$, $\theta_5 = [-125^\circ, 125^\circ]$, $\theta_6 = [-360^\circ, 360^\circ]$ 。

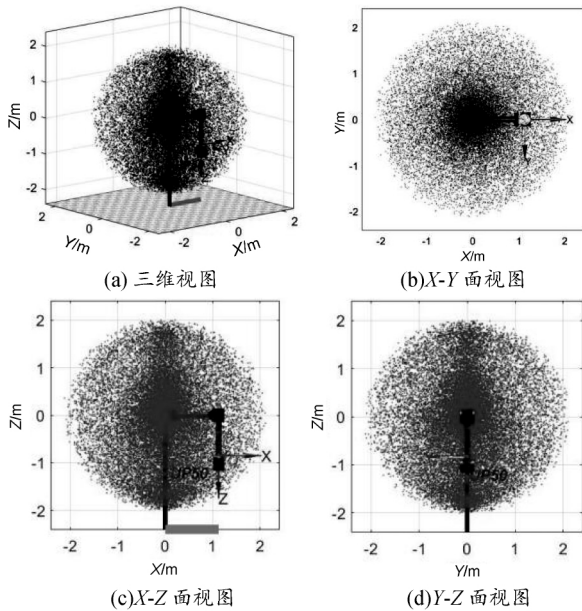


图 4 机器人工作空间

根据六自由度串联切削机器人的各杆件参数和 MATLAB 仿真模拟得到的机器人工作空间示意图可以知道,机器人工作空间上下边界之间的最大距离为 3 547 mm,左右边界之间的最大距离为 3 802 mm。

3.2 任务空间的描述

对于切削机器人来讲,铣刀安装在机器人执行器末端。根据切削机器人切削加工时的工艺要求,铣刀工作的空间为一个二维平面,因此切削加工时铣刀垂直于工件表面,并保持此姿态按照给定的运动规律来完成对工件表面的切削^[6]。本文以一个长 1.0 m、宽 1.0 m、高 0.3 m 的长方体的表面作为被切削工件表面为例,机器人任务空间如图 5 所示。机器人机座坐标系为 Σ_0 ,工件坐标系为 Σ_W ,机器人末端铣刀的附体坐标系为 Σ_Q ,上述几个坐标系的变换关系如式(8)所示:

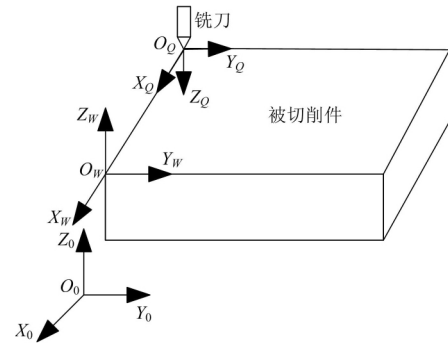


图 5 切削任务示意图

$$\mathbf{T}_6^0 \mathbf{T}_Q^6 = \mathbf{T}_W^0 \mathbf{T}_Q^W \quad (8)$$

$$\text{其中: } \mathbf{T}_W^0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_w \\ 0 & 1 & 0 & y_w \\ 0 & 0 & 1 & z_w \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{T}_Q^W = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & y \\ 0 & 0 & -1 & -a_p \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

式中: a_p 为铣刀在垂直方向的背吃刀量; \mathbf{T}_Q^6 为末端铣刀的附体坐标系在末端执行器坐标系中的位姿; \mathbf{T}_W^0 为工件坐标系在机座坐标系中的位姿; \mathbf{T}_Q^W 为末端铣刀的附体坐标系在工件坐标系中的位姿; x_w , y_w 和 z_w 为工件坐标系在机座坐标系中的姿态参数。

根据式(8)可以将该任务空间转换到在机器人的机座坐标系中,并可求解各任务点对应的关节位置。其任务空间表达式为:

$$m_w(\mathbf{R}, x, y, z, p) \in \left\{ \begin{array}{l} \mathbf{R} = \mathbf{R}_Q^W, -1 \leq x_w \leq 1 \\ -1 \leq y_w \leq 1, \\ z_w = -a_p, p = p_Q \end{array} \right\} \quad (9)$$

式中: $m_w(\cdot)$ 为任务空间的表达式; p_Q 为工件坐

标系中铣刀的移动速度; R 为 3×3 的铣刀姿态矩阵并保持不变; R_Q^W 是 T_Q^W 的前 3 行前 3 列组成的矩阵。

3.3 任务空间在工作空间中的描述

图 6 为工作空间与任务空间的 $X-Y$ 面和 $X-Z$ 面轮廓, 图 6(a) 中的实心方块为被切削工件的 $X-Y$ 面, 图 6(b) 中的实心图形为被切削工件的 $X-Z$ 面, 取 $(x_w, y_w, z_w) = (0.5, -0.5, -0.2)$ 。由图 6 可知, 任务空间完全在工作空间内, 被切削件的加工表面全部处于六自由度切削机器人的工作空间内。

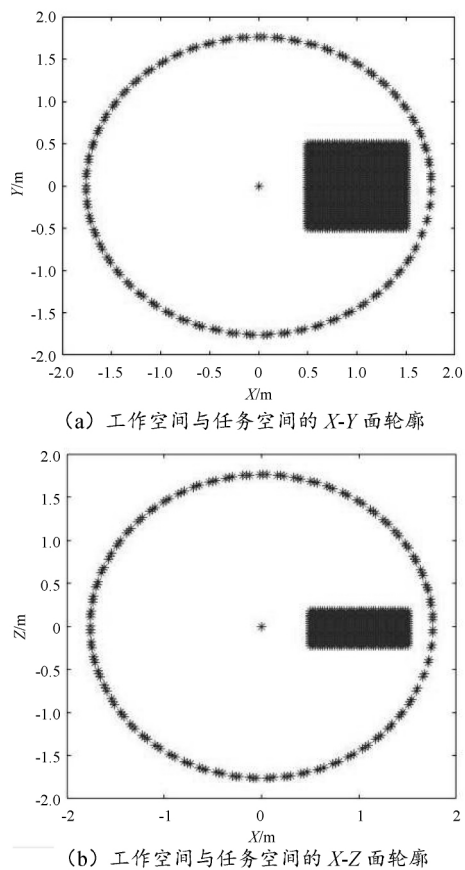


图 6 机器人工作空间与任务空间

4 基于动力学的任务空间位姿优化

切削机器人在其工作空间内进行切削加工时, 切削加工任务空间在机器人工作空间处于什么样的位姿, 会影响到机器人的工作状态^[7]。只有机器人自己先达到一个“舒服”的姿态, 才可以更好地去完成任务。这个“舒服”的姿态指的就是机器人末端铣刀在任务空间工作时在达到所要求的位姿、速度、加速度的同时, 机器人每个关节的驱动力矩 τ_i 的和 $\sum |\tau_i| (i=1, 2, \dots, 6)$ 为最小。

图 7 为切削机器人末端铣刀在工件表面工作

的示意图。被切削工件表面为边长 1 m 的正方形, 本文选用的铣刀外径 $D = 8$ mm, 在 AD 边、 BC 边各取 100 个点 (图 7 中 $a_1, d_1, a_2, \dots; b_1, c_1, b_2, \dots$), 每两点之间相距 10 mm, a_1 点距 AB 边 4 mm。以铣刀将要接触而未实际碰触工件表面时的位置点为起始点, 以铣刀完全离开工件表面时的位置点为终止点, 以此过程为一个单次的走刀轨迹 (如 a_1-b_1), 之后铣刀从 b_1 横移到 c_1 进行下一次走刀 (c_1-d_1), 如此往复, 按 $a_1-b_1-c_1-d_1-a_2-b_2 \dots$ 的轨迹顺序走刀, 直到铣刀从 d_{50} 点完全离开, 结束整个工件表面的铣削加工。

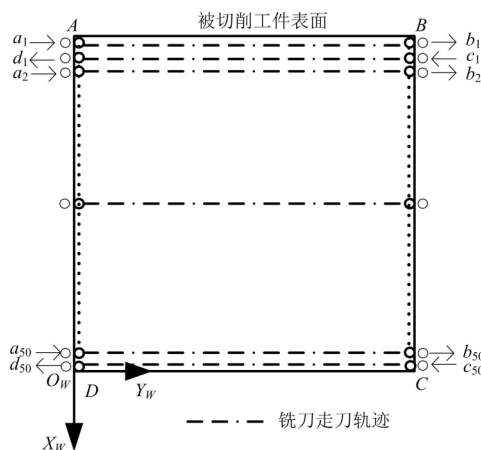


图 7 切削加工示意图

在铣削时, 温度、刀具材料、铣削液、齿轮进给量、铣削力系数等都影响着铣刀工作时的铣削力。本文铣刀采用高速钢, 工件材料为灰铸铁, 铣削力系数 $C_p = 30$, 铣刀外径 $D = 8$ mm, 铣削深度为 $t_1 = 6$ mm, 每齿进给量 $S_z = 0.4$ mm/齿, 铣刀齿数 $Z = 4$, 铣刀宽度 $B = 8$ mm, 铣削力 F 的计算公式为:

$$F = P_z = C_p t_1^{0.86} S_z^{0.72} D^{-0.86} B Z \quad (10)$$

式中: P_z 为铣削力, 也是切向力。

由式(10)可以计算得到铣削力 $F = 3\ 251$ N, 铣削时采用顺铣。

4.1 优化算法的描述与应用

由图 5 可知, 工件坐标系和机器人机座坐标系相互平行并且同方向, 本文采用遗传算法进行优化^[8]。优化的目的是在机器人工作空间中为工件的任务空间寻找一个平移后的最优位置, 并且在这个任务空间上, 切削机器人各关节的驱动力矩和最小。优化的目标变量为 (x_w, y_w, z_w) , 优化目标函数为 $\min F = \min \sum |\tau_i| = \min \sum |n'_i z_{i-1}|$ 。采用实数编程的方法对优化变量进行编码, 在 MATLAB 下

实现其算法^[9]。种群中的一个个体表示为 (x_w, y_w, z_w) , 遗传个体的适应度函数为 $f = |n_i^i z_{i-1}|$ 。在创建初始种群的时候, 设定以下参数: 种群规模 N 、变量个数 m 、迭代次数、交叉概率 p_c 、变异概率 p_m 及边界条件等^[10]。

一般 p_c 取 0.25 ~ 1.00, 本文取 0.80, 变异概率 $p_m = 0.05$, 运用两人竞赛选择法, 每次随机选择得到两个个体, 从这两个个体里选出适应度值小的个体作为新种群的个体, 一直到新种群被填满为止。为了防止其结果出现收敛于局部最优的情况, 每隔 10 代对种群重新进行一次初始化, 然后将前一代的最优个体放到新的种群中, 如果有更优个体出现, 则前一个自然会被淘汰^[11]。同时为保证最优个体在选择的过程中不被遗漏, 采用精英模型将最优个体保存。

在交叉和变异的过程中, 利用交叉算子和变异算子对父代种群 P_{k0} 进行作用, 并通过与给定的交叉概率 p_c 和变异概率 p_m 比较来判定是选择交叉还是选择变异, 若随机数 < 0.8 , 则对父代进行交叉操作, 若小于 p_m , 则进行变异操作。在执行交叉操作过程中使用算数交叉, 选择某一个体 i , 并用另一个选出的个体 u 与之交叉, 交叉算子如式(11)和(12)所示:

$$p_{k+1}(u, j) = p_{k0}(u, j)r_{ij} + p_{k0}(i, j)(1 - r_{ij}) \quad (11)$$

$$p_{k+1}(i, j) = p_{k0}(i, j)r_{ij} + p_{k0}(u, j)(1 - r_{ij}) \quad (12)$$

式中: $p_{k+1}(i, j)$ 为群体中第 i 个个体的第 j 位变量; $p_{k0}(\cdot)$ 为第 k 代群体中选择出的要继续繁殖的个体组成的父代; r_{ij} 、 r_{uj} 为随机数。

对每一个体 i 的每一位取一个随机数, 当随机数 < 0.05 时, 采用非均匀变异对该位进行变异操作, 使用的变异算子 $p_k(i, j)$ 如下:

$$p_k(i, j) = - [p_{k0}(i, j) - L_b(j)] \times r_x \times (1 - \frac{k}{k_{\max}}) + p_{k0}(i, j) \quad (13)$$

或

$$p_k(i, j) = [T_b(j) - p_{k0}(i, j)] \times r_x \times (1 - \frac{k}{k_{\max}}) + p_{k0}(i, j) \quad (14)$$

式中: $T_b(j)$ 和 $L_b(j)$ 为个体 i 第 j 位的上、下边界; k 和 k_{\max} 分别为当前代数和最大进化代数; 随机数 r_x 决定了变异算子是采用式(13)还是式(14), 其取值范围为 0 ~ 1, 当 r_x 大于 0.5 时, 采用式(13), 否则采用式(14), 对每一个需要变异的个体 r_x 都要重新选取。

为保证被切削件整体处于机器人切削工作空间内, 各个变量的取值区间分别为: $x_w \in [-1, 1]$, $y_w \in [-1, -0.5]$, $z_w \in [-1, 0]$ 。经过 300 代的优化计算, 得到优化结果为: $x_w = 0.5215 \text{ m}$, $y_w = -0.4689 \text{ m}$, $z_w = -0.2568 \text{ m}$ 。需要指出的是, 这个优化结果中的 (x_w, y_w, z_w) 是工件坐标系相对于机器人机座坐标系进行平移后最优的一个位姿矢量。为了工件安装的方便, 工件加工面与机器人基坐标系 $X - Y$ 面相平行。

4.2 优化算法的调试与验证

采用上述遗传算法进行任务空间位姿优化时, 为防止切削机器人末端执行器在某一位置时虽所有关节力矩和最小, 但其中某一个关节力矩超过允许力矩的情况发生, 采取如下措施: 当前代最优个体的函数值的绝对值大于设定值 K 时, 停止对遗传种群的选择操作、交叉操作和变异操作, 此时以本代最优个体 $X_a(j)$ 为中心按随机数 r 进行随机搜索, 用算子 $p(i, j)$ 重新初始化 (initialize) 种群:

$$p(i, j) = X_a(j) \pm r \frac{|f_{1, X_a}|}{n} \quad (15)$$

此时以 $|f_{1, X_a}|/n$ 为搜索步长, 计算每个个体的适应度函数值 f_1 , 从而得到满足条件的最优个体。对每一个体取随机数 r , 当 $r \geq 0.5$ 时, 式(15)取加号“+”, 否则取减号“-”。当 f_1 大于等于设定值 K 时, 整个过程结束。

当任务空间的坐标系原点分别处于 $(x, y, z) = (0.5, -0.5, -0.2)$ 点和 $(x_w, y_w, z_w) = (0.5215, -0.4689, -0.2568)$ 点时, 以切削机器人的末端执行器从初始位置到距离切削机器人基坐标系最远端的 b_1 点为一铣削过程, 对比两个过程中机器人各关节的力矩变化, 如图 8 所示。

六自由度切削机器人关节 1、2、3 的允许力矩分别为 $196 \text{ N} \cdot \text{m}$ 、 $196 \text{ N} \cdot \text{m}$ 和 $127 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。图 8 中 Torque01 为任务空间基坐标系原点在 $(x, y, z) = (0.5, -0.5, -0.2)$ 点时的力矩变化曲线, Torque02 为任务空间基坐标系原点在 $(x_w, y_w, z_w) = (0.5215, -0.4689, -0.2568)$ 点时的力矩变化曲线。由于篇幅有限且其余关节力矩较小, 因此其余关节力矩变化曲线不再一一给出。由图 8 中 Torque01 变化曲线可知, 关节 1、2、3 的最大力矩分别为 $17.5514 \text{ N} \cdot \text{m}$ 、 $113.8729 \text{ N} \cdot \text{m}$ 、 $11.0270 \text{ N} \cdot \text{m}$; 由 Torque02 变化曲线可知, 关节 1、2、3 的最大力矩分别为 $8.7334 \text{ N} \cdot \text{m}$ 、 79.4963

$N \cdot m$ 、 $10.1528 N \cdot m$ 。由此可以知道关节 1、2、3 的最大力矩都未超出其允许力矩。

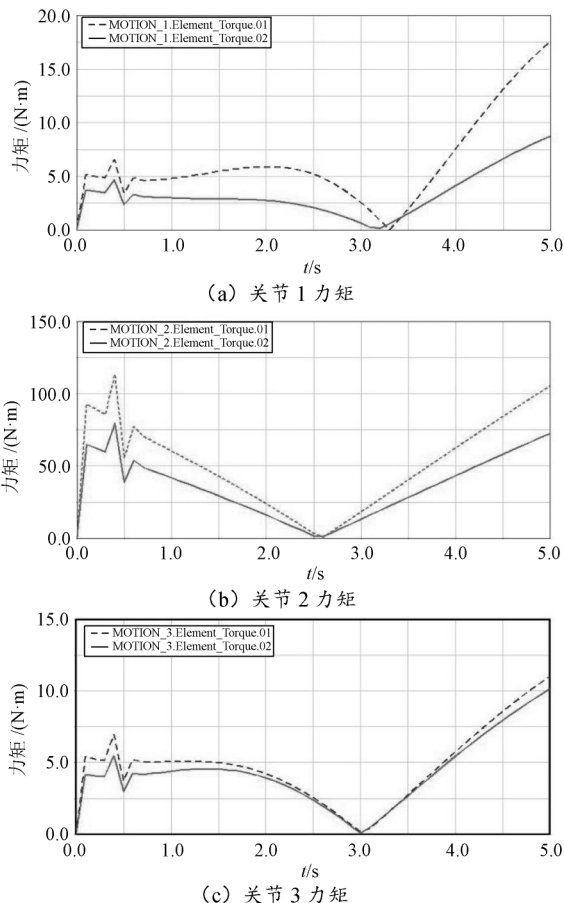


图 8 优化前后关节驱动力矩对比

通过对比可知,当机器人末端执行器到达 b_1 点时,优化算法后关节 1、2 和 3 的最大力矩相较于任务空间在优化前各减少 $8.8180 N \cdot m$ 、 $34.4036 N \cdot m$ 和 $0.8742 N \cdot m$;从整个过程来看,工件坐标系在优化后的坐标系上时,机器人前 3 个关节的力矩都相对较小,由此可以看出,任务空间的基坐标系在优化后的坐标上时切削机器人的动力学性能更好。

5 优化结果分析

以优化结果 $(x_w, y_w, z_w) = (0.5215, -0.4689, -0.2568)$ 为工件坐标系原点,铣刀沿 y 方向移动,切削点在工件坐标系中从 $(-1, 0, 0)$ 到 $(-1, 1, 0)$ 。在这个过程中,六自由度切削机器人关节角位移、关节角速度和角加速度的变化情况如图 9 所示。

通过图 9(a) 可以看出,各关节角位移曲线较为连续,变化幅度较小。图 9(b) 为关节角速度随

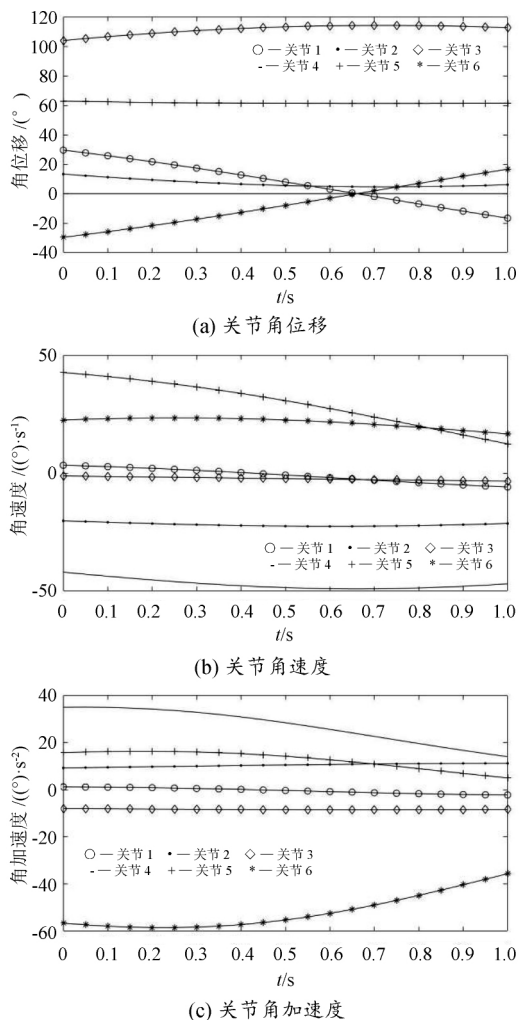


图 9 关节角位移、角速度、角加速度 MATLAB 仿真

时间的变化曲线,曲线较平滑,没有明显拐点。图 9(c) 为角加速度曲线,图中反映出的各关节角加速度变化较为平稳、连续。从图中可以看出,最大的角速度出现在关节 4 上,其值为 $-49.0492 (^\circ)/s$,最大的角加速度为关节 6 的 $-58.4832 (^\circ)/s^2$ 。最大角速度小于切削机器人关节 4 允许的最大角速度 $250 (^\circ)/s$,满足六自由度串联切削机器人对各关节的角速度和角加速度要求。

6 结束语

本文在获得六自由度切削机器人三维模型的基础上建立了其动力学模型,以各关节力矩和最小为目标函数,通过遗传算法得到了任务空间相对于机器人基坐标系的优化位姿参数。仿真结果表明,任务空间在优化后的坐标系上时,机器人各关节角位移、角速度和角加速度的曲线平稳、连续,末端执行器在任务空间的最远端 b_1 点时各关节力矩均较

小,动力学状态较好,达到了任务空间动力学优化的目的。本文的计算过程适用于多自由度机器人优化位姿的求解,也为多自由度切削机器人的动力学研究提供了一种较好的优化办法。

参考文献:

- [1] 陈浩. 工业机器人及智能制造发展现状分析[J]. 现代经济信息, 2018(17): 360.
- [2] 蔡自兴. 机器人学[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2009.
- [3] 严浩, 白瑞林, 吉峰. 一种改进的 SCARA 机器人动力学参数辨识方法[J]. 中国机械工程, 2017, 28(22): 2707-2713.
- [4] 刘强, 尹力. 一种面向数控工艺参数优化的铣削过程动力学仿真系统研究[J]. 中国机械工程, 2005, 16(13): 1146-1149.
- [5] 马丹妮, 李传江, 张自强. 基于遗传算法的七自由度机器人轨迹规划[J]. 实验室研究与探索, 2016, 35(9): 33-37.
- [6] 陈朋威, 岳盼薇. 基于 6 自由度的关节机器人动力学研究[J]. 重型机械, 2018(1): 45-47.
- [7] 姜如康, 黄梁松, 程晟, 等. 七自由度机器人动力学优化[J]. 机械设计与制造, 2013(12): 195-197.
- [8] 王鲁敏, 李艳文. 基于 MATLAB 的教学型机器人空间运动轨迹仿真[J]. 机械与电子, 2005(9): 37-41.
- [9] LI M. Stiffness based trajectory planning and feedforward based vibration suppression control of parallel robot machines[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2014, 74(8): 1045-1055.
- [10] 侯仰强, 王天琪, 岳建锋, 等. 基于多目标遗传算法的双机器人协调焊接路径规划[J]. 中国机械工程, 2018, 29(16): 1984-1989.
- [11] 林阳, 赵欢, 丁汉. 基于多种群遗传算法的一般机器人逆运动学求解[J]. 机械工程学报, 2017, 53(3): 1-8.

Dynamic optimization of cutting robot task space

Xia Enshuai, Zhang Yonggui, Liu Yongping, Niu Rong

(College of Mechanical and Electrical Engineering,

Lanzhou University of Technology, Gansu Lanzhou, 730050, China)

Abstract: According to the characteristics of the six-degree-of-freedom cutting robot at work, this paper first establishes the dynamic model of cutting robot, and obtains its dynamic parameters by using the three-dimensional model of cutting robot. Then it analyzes the work and task space of the robot, and the relative positional relationship between them. Finally, based on the dynamic model, it uses the genetic algorithm to obtain the optimized position of the task space in the robot workspace with the core optimization algorithm debugged and tested. MATLAB is used to get the driving torque, angular displacement, angular velocity and angular acceleration of each joint of the robot changing with time. The rationality of dynamic optimization of the cutting robot is verified based on the simulation results.

Key words: cutting robot; dynamics; genetic algorithm; MATLAB