

铣削机器人去除锻件裂纹的轨迹规划研究

张永贵, 李海龙

(兰州理工大学机电工程学院, 兰州 730050)

摘要: 针对铣削机器人去除锻件裂纹的问题, 进行了相关轨迹规划插补算法的研究。首先, 将离散的裂纹轨迹型值点用三次 B 样条曲线插值, 拟合的曲线就是机器人末端执行器的运动路径。其次, 提出了梯形速度控制算法, 将裂纹路径按照速度敏感点进行分段, 确定出每段曲线的加速段、匀速段、减速段的进给速度, 进而利用泰勒展开式确定出每个采样周期的插补参数; 同时, 用三次 B 样条曲线插补形成各坐标轴的运动增量。最后, 建立机器人运动学模型, 将笛卡尔空间的插补数据映射到机器人关节空间, 在分析机器人各关节位移、速度、加速度的基础上证明了这种插补算法在实际应用中的可行性。

关键词: 铣削机器人; 锻件裂纹; 三次 B 样条; 梯形速度

中图分类号: TH16; TG659 **文献标识码:** A

Trajectory Planning Research for Removing Forging Crack with Milling Robot

ZHANG Yong-gui, LI Hai-long

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: To solve the problem for removing forging crack with milling robot, The interpolation algorithm of the relevant trajectory planning is studied in this paper. Firstly, the discrete data points of the crack trajectory with Cubic B-spline curve interpolation, The fitting curve is the path of the robot's end-effector. Secondly, the trapezoidal velocity control algorithm is proposed, and the crack path is segmented according to the speed sensitive point, So it can ascertain feedrate of each segment of curve and the interpolation parameters of each sampling period are determined by the Taylor expansion; At the same time, cubic B-spline curve interpolation is used to form the motion increment of each coordinate axis. Finally, the kinematics model of the robot is established, The interpolation data of the Cartesian space is mapped to the robot joint space, Based on the analysis of the displacement, velocity and acceleration of the joints of the robot, the feasibility of the interpolation algorithm in practical application is proved.

Key words: milling robot; forging crack; cubic B-spline; trapezoidal speed

0 引言

大型锻件在锻造的过程中会产生裂纹, 多次锻造中裂纹的存在会影响锻件质量, 因此在每次锻后检查并去除裂纹非常重要。传统的去除方法是人工用角磨机打磨, 这种方法的缺点是效率低、环境嘈杂、工人劳动强度大, 采用铣削机器人加工可以代替人工, 在达到高效环保的同时, 对提升锻件质量具有现实意义。随着科学技术的不断发展, 工业机器人在切削加工领域得到了广泛地应用。工业机器人将末端执行器变为具有铣削、磨削、钻削、雕刻等功能的主轴系统, 就使机器人成为机加工机床^[1], 以机器人代替数控机床完成多轴切削加工具有作业范围大、安装空间小、集成度更高、经济效益和柔性更好等优点^[2]。工业机器人基本的插补方法有直线插补和圆弧插补, 然而锻件裂纹在空间中是一条自由曲线, 运用直线和圆弧插补方式在加工的过程中会产生较大的代码段^[3], 而且由于自由曲线的特殊性, 会使刀具在插补周期相邻处的速度和加速度不连续, 使工业机器人产生振动, 导致加工出的

零件表面不光滑, 因此在分析裂纹轨迹的基础上提出三次 B 样条曲线插补技术。在锻造的过程中, 裂纹并不会一定出现, 因此在每次锻后检查裂纹是否存在就成为主要问题。文献 [4] 给出了机器视觉识别裂纹轨迹的方法, 通过该方法能够给出一系列笛卡尔空间的离散坐标点, 用三次 B 样条曲线拟合这些离散点得到曲线 $p = p(u)$ 。在运动规划中, $u = u(t)$ 描述了铣削机器人的末端执行器的运动规律。当轨迹在笛卡尔空间被完全确定后, 通过机器人系统的逆运动学模型, 将轨迹转换到关节空间, 用速度、加速度等约束条件来控制机器人运动^[5]。

目前国内外常用的插补算法有等参数插补算法^[6]、恒速插补算法^[7]、基于精度要求的插补算法^[8], 这些插补算法都未考虑机床或机器人的加减速特性, 会影响加工质量。为了避免铣削机器人加工复杂曲线时在速度敏感点处发生速度突变引起的机器人末端执行器振动和切削加工的过切现象, 本文提出梯形加减速控制算法与三次 B 样条曲线插补的融合算法, 实现铣削机器人对复杂曲线的加工。

收稿日期: 2017-08-08; 修回日期: 2017-09-07

作者简介: 张永贵(1966—), 男, 兰州人, 兰州理工大学教授, 硕士研究生导师, 博士, 研究方向为工业机器人及其应用技术、珩磨加工工艺及其专家系统技术研究; 通讯作者: 李海龙(1987—), 男, 甘肃金昌人, 兰州理工大学硕士研究生, 研究方向为工业机器人及其应用技术, (E-mail) 411975624@qq.com。

1 机器人末端铣刀路径规划

机器人末端执行器的路径规划就是已知裂纹轨迹的一系列型值点,用三次 B 样条曲线插值这些型值点,得到 C^2 连续的几何路径。通过机器视觉识别的裂纹轨迹的型值点为 $Q_k = [X_k, Y_k, Z_k]$ ($k = 0, 1, \dots, n$) 运用三次 B 样条曲线来插值这些点;为每一点 Q_k 指定一个参数值 \bar{u}_k , 并且选定一个合适的节点矢量 $U = \{u_0, u_1, \dots, u_m\}$ 这样就可以建立一个系数矩阵为 $(n + 1) \times (n + 1)$ 的线性方程组:

$$Q_k = C(\bar{u}_k) = \sum_{j=0}^n N_{j,p}(\bar{u}_k) P_j \quad (1)$$

其中, $(n + 1)$ 个控制点 P_j 是未知量, $N_{j,p}(\bar{u}_k)$ 是 p 次规范 B 样条基函数, $j = 0, 1, 2, \dots, n$ 。由 de Boor-Cox 的递推公式:

$$\begin{cases} N_{j,0}(u) = \begin{cases} 1, & \text{若 } u_j \leq u \leq u_{j+1} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \\ N_{j,p}(u) = \frac{u - u_j}{u_{j+p} - u_j} N_{j,p-1}(u) + \frac{u_{j+p+1} - u}{u_{j+p+1} - u_{j+1}} N_{j+1,p-1}(u) \end{cases} \quad (2)$$

规定 $\frac{0}{0} = 0$, 计算一组基函数时需要事先指定节点矢量 U 和次数 p , p 次 B 样条曲线的节点矢量为 $U = [u_0, u_1, \dots, u_{n+p+1}]$ 。

1.1 参数值的选取

每一点 Q_k 对应的参数值 \bar{u}_k 以及节点矢量 U 的选取将影响到曲线的形状和参数化, \bar{u}_k 的选取方法有三种: 均匀参数化、弦长参数化、向心参数化; 通过对裂纹曲线的分析, 选用典型的弦长参数化法, 令 d 为总弦长:

$$d = \sum_{k=1}^n \sqrt{|Q_k - Q_{k-1}|} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{则 } \bar{u}_0 &= 0, \bar{u}_n = 1 \\ \bar{u}_k &= \bar{u}_{k-1} + \frac{|Q_k - Q_{k-1}|}{d}, k = 1, \dots, n-1 \end{aligned} \quad (4)$$

节点矢量 U 由式(5)得:

$$\begin{cases} u_0 = \dots = u_3 = \bar{u}_0, u_{n+4} = \dots = u_{n+6} = \bar{u}_n \\ u_{j+3} = \bar{u}_j, j = 0, 1, \dots, n \end{cases} \quad (5)$$

通过式(4)计算出每一点的参数值 \bar{u}_k , 代入式(5)计算出节点矢量 U 。将计算出的参数值 \bar{u}_k 和节点矢量 U 代入式(2)可计算出 B 样条曲线的基函数。

1.2 反算控制点

已知 $(n + 1)$ 个数据点 $Q_k, k = 0, 1, \dots, n$, 则有 $(n + 1)$ 个未知的控制点 P_k , 为了得到 P_k 的唯一解, 必须增加两个附加条件。由于曲线刚好在节点处插值于 Q_k , 因此开始的两个方程和最后的两个方程分别为:

$$\begin{cases} P_0 = Q_0 \\ P_1 = Q_0 + \frac{u_4 - u_1}{3} t_0 \\ P_{n+2} = Q_n \\ P_{n+1} = Q_n - \frac{1 - u_{n+3}}{3} t_n \end{cases} \quad (6)$$

式中: $t_0 = \frac{q_1 - q_0}{\bar{u}_1 - \bar{u}_0}, t_n = \frac{q_n - q_{n-1}}{\bar{u}_n - \bar{u}_{n-1}}$

式(6)的这 4 个方程可以直接求解, 由于每一个内节点处只有三个非零的三次基函数, 所以剩下的 $(n - 1)$ 个方程可写成如下形式:

$$Q_k = N_{k,3}(\bar{u}_k) P_k + N_{k+1,3}(\bar{u}_k) P_{k+1} + N_{k+2,3}(\bar{u}_k) P_{k+2}$$

其中, $k = 1, 2, \dots, n - 1$ 。

$$\text{令 } a_k = N_{k,3}(\bar{u}_k), b_k = N_{k+1,3}(\bar{u}_k), c_k = N_{k+2,3}(\bar{u}_k)$$

则可以得到三对角方程系统:

$$N P = R \quad (7)$$

式中, $N = \begin{bmatrix} b_1 & c_1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ a_2 & b_2 & c_2 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & a_{n-2} & b_{n-2} & c_{n-2} \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & a_{n-1} & b_{n-1} \end{bmatrix}$

$$P = [P_2^T \ P_3^T \ P_4^T \ \dots \ P_{n-1}^T \ P_n^T]^T$$

$$R = \begin{bmatrix} Q_1^T - a_1 P_1^T \\ Q_2^T \\ Q_3^T \\ \dots \\ Q_{n-2}^T \\ Q_{n-1}^T - c_{n-1} P_{n+1}^T \end{bmatrix}$$

对式(7)中的矩阵进行求解, 再加上式(6)中求解出的 4 个方程可得到三次 B 样条曲线的控制点 P_k , 已知裂纹轨迹的基函数和三次 B 样条曲线的控制点就完全确定了机器人末端执行器的运动路径。

2 插补算法

2.1 进给速度规划

在机器人铣削的过程中, 进给速度是影响加工质量的关键因素, 只有保证进给速度稳定, 才能保证裂纹去除的质量^[9]。假定参数曲线的几何路径为:

$$P(u) = P(X(u), Y(u), Z(u))$$

其中, 时间函数 u 是曲线参数, $u = u(t)$ 表示机器人末端的运动规律。当加工如图 1 所示的三次 B 样条曲线的裂纹轮廓时, 由于在曲线的极值点处会造成速度突变^[10], 如果采用传统的恒进给速度进行加工, 会在极值点处出现过冲和机器人振动等现象, 影响裂纹去除质量。

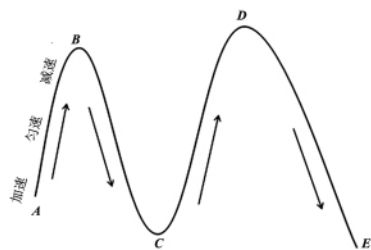


图 1 速度规划图

在分析上述问题以后, 提出梯形加减速控制方法。首先根据三次 B 样条曲线拟合出的路径找到曲率的极大值点, 然后依据曲率极值点对该曲线进行分段, 即图 1 所示的 B、C、D 三点, 据此曲线被分成 4 段。以 AB 段为例, AB 段分为加速、匀速、减速三个阶段, 在曲线段的起点处, 为提高加工效率必须尽可能地加速; 在运动到曲率的极大值之前, 必须进行减速; 在 AB 段大部分的加工路径都是恒进给速度。其它曲线段的加减速控制与 AB 段相同, 这种方法能够克服机器人末端刀具在曲线敏感点处由速度突变引起的振动和过冲现象, 保证了加工质量。

2.2 梯形速度的生成算法

对于一个给定的控制系统,进给速度 v 和加速度 a 由人工给定,采样周期 T_s 通常是一个恒量。首先根据数值计算方法计算每段曲线的长度,然后根据给出的进给速度 v 和加速度 a 计算总的运动时间。梯形速度分为加速阶段、匀速阶段、减速阶段,其中加速阶段的运动时间为:

$$t_a = \frac{v}{a} \quad (8)$$

一般情况下 $s > vt_a$, 总的运动时间为:

$$t_s = 2t_a + \frac{s - vt_a}{v} \quad (9)$$

其中, s 为每段曲线起始点和终点之间的距离, t_s 为总的运动时间。

令采样周期数为 k , v_k 为每个采样周期的进给速度,其中 $v_k = v(kT_s)$ 。当在加速阶段时, $t \leq t_a$

$$v_k = a \left(kT_s + \frac{T_s}{2} \right) \quad (10)$$

当在匀速阶段时, $t_a < t \leq t_s - t_a$

$$v_k = v \quad (11)$$

当长减速阶段时, $t_s - t_a < t \leq t_s$

$$v_k = -a \left(t_s - kT_s - \frac{T_s}{2} \right) \quad (12)$$

其中在减速阶段加速度 $a = -a_0$ 。根据式(10)~式(12)就可以计算出每个采样周期的进给速度 v_k 。

2.3 插补算法

三次 B 样条曲线插补的实质是在每个采样周期内求取满足进给速度要求的参数增量 Δu , 然后代入三次 B 样条曲线表达式进行计算,得到采样周期内各个坐标轴的增量值。插补的问题可以转换为利用 Taylor 展开公式求下一时刻 t_{k+1} 时参数 u_{k+1} 的值。

沿着三次 B 样条曲线 $P(u)$ 在每个插补周期的进给速度可以定义为:

$$v(t) = \left\| \frac{dP(u)}{dt} \right\| \quad (13)$$

式中, u 是关于时间 t 的函数,因此式(13)可以写成:

$$v(t) = \left\| \frac{dp(u)}{du} \frac{du}{dt} \right\| = \left\| p^{(1)}(u) \right\| \frac{du}{dt} \quad (14)$$

式中, $P^{(1)}(u)$ 表示三次 B 样条曲线的一阶导数,可以得到:

$$\frac{du}{dt} = \frac{v(t)}{\left\| p^{(1)}(u) \right\|} \quad (15)$$

$u(t)$ 二阶导数为:

$$\frac{d^2u}{dt^2} = \frac{A(t)}{\left\| p^{(1)}(u) \right\|^2} - \frac{v^2(t) \left(p^{(1)}(u) \cdot p^{(2)}(u) \right)}{\left\| p^{(1)}(u) \right\|^4} \quad (16)$$

式中, $A(t)$ 为每个采样周期的加速度, $t = kT_s$ 。由当前参数 u_k 利用 Taylor 展开公式计算出下一个插补周期的参数 u_{k+1} , 通过计算每一插补点的基函数和控制点相乘计算出插补点的坐标值。Taylor 展开公式为:

$$u_{k+1} \approx u_k + T_s \frac{du}{dt} \Big|_{t=u_k} + \frac{T_s^2}{2} \frac{d^2u}{dt^2} \Big|_{t=u_k} \quad (17)$$

由式(13)~式(17)可得到一阶、二阶三次 B 样条曲线插补公式分别为:

$$u_{k+1} = u_k + \frac{v_k T_s}{\left\| \frac{dp(u)}{du} \right\|_{u=u_k}} \quad (18)$$

$$u_{k+1} = u_k + \frac{v_k T_s}{\left\| \frac{dp}{du} \right\|_{u=u_k}} +$$

$$\frac{T_s}{2} \left(\frac{A_k}{\left\| \frac{dp}{du} \right\|_{u=u_k}} - v_k^2 \left[\frac{\left(\frac{dp}{du} \cdot \frac{d^2p}{du^2} \right)}{\left\| \frac{dp}{du} \right\|^2} \right] \right) \Big|_{u=u_k} \quad (19)$$

$$P(u_{k+1}) = \frac{(u_{k+1} - u_k)P^{(1)}(u_{k+1})}{T_s} \quad (20)$$

将计算出的曲线参数 u_k 和曲线 $P(u)$ 的一阶导数代入式(20)就可以计算出实际进给速度,通过实际进给速度和规划进给速度的对比来分析此种插补算法是否合理。

3 机器人运动模型的建立

对于机器人铣削来讲,将铣刀安装在机器人末端,控制机器人各关节按一定规律运动来完成工件表面的铣削。根据铣削工艺要求,铣削时铣刀垂直于工件表面,并且在铣刀的垂直方向给定一个进给量 h ,工作台的高度为 $1m$,然后以进给率规划的速度对工件表面进行加工。该铣削机器人任务空间可以描述如图2所示, Σ_0 为机器人的基坐标系, Σ_w 为工件坐标系, Σ_G 为铣刀的附体坐标系。

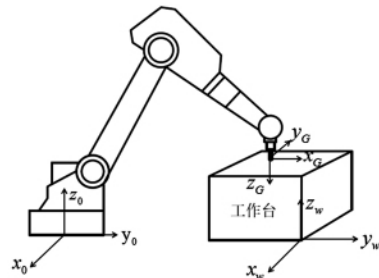


图2 铣削加工示意图

本文采用标准的 D-H 模型建立机器人杆件附体坐标系,如图3所示为机器人 D-H 坐标系。机器人相邻两连杆的位姿关系用一个 4×4 的齐次坐标矩阵来描述,相邻坐标的 D-H 变换矩阵为:

$${}^{i-1}A_i = Rot(z, \theta_i) Trans(z, \theta_i) Trans(x, a_i) Rot(x, \alpha_i)$$

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

将表1中的 D-H 参数带入相邻坐标的变换矩阵中,则机器人末端坐标系相对于基座系的位姿可以通过变换矩阵的连乘得到,其数学表达式为:

$${}^6T_0 = {}^0A_1 {}^1A_2 {}^2A_3 {}^3A_4 {}^4A_5 {}^5A_6 \quad (21)$$

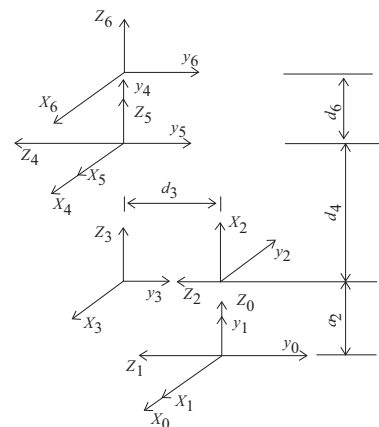


图3 机器人 D-H 坐标系

则位姿矩阵 0T_6 可以表示为:

$${}^0T_6 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (22)$$

式中, $n_x、n_y、n_z、o_x、o_y、o_z、a_x、a_y、a_z$ 表示机器人末端的姿态, $p_x、p_y、p_z$ 表示机器人末端的位置。

机器人刀具坐标系相对于工件坐标系的变换矩阵为式(23); 任务空间的工件坐标系相对于机器人基坐标系的变换矩阵为式(24); 机器人刀具坐标系相对于机器人附体坐标系的变换矩阵为式(25)。

$${}^wT_C = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & y \\ 0 & 0 & -1 & 1+h \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (23)$$

$${}^0T_W = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_{w0} \\ 0 & 1 & 0 & y_{w0} \\ 0 & 0 & 1 & z_{w0} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (24)$$

$${}^6T_C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_C \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (25)$$

式中, d_C 为末端铣刀的长度; h 为铣刀垂直的进给量; $x_{w0} = -0.6971\text{m}, y_{w0} = 0.0196\text{m}, z_{w0} = -0.9039\text{m}$; 因此, 机器人末端执行器相对于基坐标系的位姿 0T_6 可以表示为:

$${}^0T_6 = {}^0T_W \cdot {}^wT_C \cdot {}^6T_C^{-1} \quad (26)$$

将表 1 中的数据代入公式(26)中, 可以计算出机器人刀具每一个插补点的齐次坐标矩阵, 通过机器人逆解可以计算出机器人各个关节的位移量。

表 1 机器人 D-H 参数

关节 i	d	a	α	θ	参数
1	0	0	90	θ_1	$a_2 = 1.215$
2	0	a_2	0	θ_2	$d_3 = 0.07$
3	d_3	0	-90	θ_3	$d_4 = 1.288$
4	d_4	0	90	θ_4	$d_6 = 0.16$
5	0	0	-90	θ_5	
6	d_6	0	0	θ_6	

5 实例分析

针对锻件表面裂纹去除的方法研究, 为了验证算法的正确性, 假定机器视觉识别的裂纹轨迹的型值点如表 2 所示。

表 2 裂纹轨迹型值点

Q_k	
1 (0,0,1)	9 (0.2108, 0.0988, 1)
2 (0.0031, 0.0064, 1)	10 (0.2485, 0.1223, 1)
3 (0.0128, 0.0306, 1)	11 (0.2735, 0.1557, 1)
4 (0.027, 0.0732, 1)	12 (0.2952, 0.1907, 1)
5 (0.047, 0.1345, 1)	13 (0.3161, 0.2261, 1)
6 (0.0985, 0.201, 1)	14 (0.3661, 0.2923, 1)
7 (0.1054, 0.1962, 1)	15 (0.3854, 0.3019, 1)
8 (0.1896, 0.1056, 1)	16 (0.3968, 0.3012, 1)

首先将型值点代入式(3)~式(5)计算参数值 \bar{u}_k 和节点矢量 U , 然后将计算的结果代入式(2)计算出三次 B 样条曲线的基函数, 其中取步长 $\Delta u = 0.001$, $u \in [0, 1]$; 最后将已知条件代入式(7)计算控制点 P_k 。根据控制顶点和三次 B 样条基函数可求得机器人末端执行器的运动路径, 如图 4 所示。

该运动路径有两个速度敏感点, 如果采用恒进给速度进行加工得到的进给速度曲线如图 5 所示。

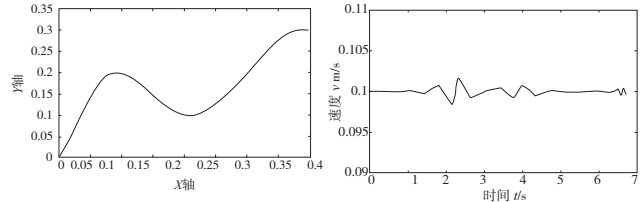


图 4 末端执行器运动路径

图 5 恒进给速度曲线

当机器人采用恒进给速度加工时, 在机器人运动到速度敏感点时由于自由曲线的特殊性会使机器人末端执行器速度突变引起机器人振动, 影响了切削加工质量。

因此采用梯形速度规划方法将机器人末端路径分为三段, 通过数值计算方法计算每一段曲线的长度, 计算的结果分别为 $L_1 = 0.2230, L_2 = 0.1697, L_3 = 0.2696$; 将每段曲线取 10 个型值点再次参数化, 求取每段曲线的控制点和基函数; 规定机器人末端在笛卡尔空间最大速度 $v = 0.1\text{m/s}$ 、最大加速度为 $a = 1\text{m/s}^2$, 采样周期 $T_s = 0.01\text{s}$, 将速度 v 、加速度 a 以及每段曲线长度分别代入梯形速度的生成算法中, 计算出每个采样周期的进给速度 v_k ; 将规划出的进给速度 v_k 代入到插补算法的计算公式中, 计算出每个采样周期的参数值 u_{k+1} ; 每个采样周期的参数值 u_{k+1} 可以确定机器人末端在笛卡尔空间的坐标和该点处 $P(u_{k+1})$ 的一阶导数, 通过公式(20)可以计算出机器人末端刀具的进给速度。根据以上的计算得到了机器人末端进给速度, 如图 6 所示。

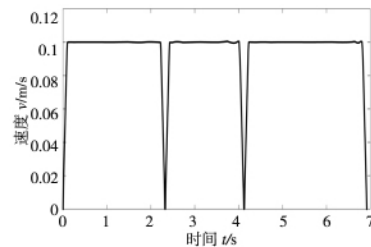


图 6 梯形速度曲线

从图 6 可以看出, 机器人末端执行器在速度敏感点处速度减至到零, 然后再经历加速、匀速、减速阶段, 该过程符合梯形速度规划要求, 从而避免了机器人在速度敏感点处由速度突变引起的机器人振动。

已知机器人末端在每个采样周期的位置和姿态, 就可以通过机器人逆解计算出机器人各个关节的位移变化量; 已知机器人末端的速度, 通过雅克比求逆可以计算出各关节角速度; 已知雅克比矩阵和二阶影响系

(下转第 9 页)

了相电流、电感与转子位置之间的关系,提出了一种基于相电流定位的永磁同步电机转子初始位置判断方法,并进行预标定;

(2) 由于电流的检测误差直接影响到转子初始位置的判断,传统的续电流不能完全反映相电流的真实值。本文提出了一种三级嵌套中断的电流采样方法,根据扇区关系实时切换,采集相电流的真实值;

(3) 双电阻采样存在电流采样盲区,本文深入分析了增大电流采样窗口的方法和相应的补偿策略;

(4) 搭建了空压机用永磁同步电机的实验平台,得出相电流与转子位置的实测关系图和位置误差估计图。

4 结论

永磁同步电机启动时必须判断转子的初始位置。按照基于电流定位的判断方法可以方便地得到静止时的转子位置信息,同时设计了一种三级中断嵌套的电阻采样法,能够采集真实的两相电流。最后实验结果表明,该方法能较为准确估计转子的初始位置,转子位置估计误差在 $\pm 5^\circ$ 之间,满足启动准确度要求。

[参考文献]

[1] 刘栋良,赵光宙. 无速度传感器永磁同步电动机反馈线性

控制研究[J]. 微电机,2006,27(9):1147-1149.

[2] 贾洪平. PMSM DTC 无传感器运行及传感器集成研究[D]. 杭州:浙江大学,2006.

[3] 李冉. 永磁同步电机无位置传感器运行控制技术[D]. 杭州:浙江大学,2012.

[4] 鲁家栋,刘景林,卫丽超. 永磁同步电机转子初始位置检测方法[J]. 电工技术学报,2015,30(7):105-111.

[5] 张兴志,郭建文. 永磁无刷直流电机电感参数测量及影响因素分析[J]. 微电机,2011,44(5):88-92.

[6] 黄招彬,游林儒,赵朋成. 永磁同步电机转子初始位置的静止型估计[J]. 电机与控制学报,2014,18(7):24-30.

[7] 王帆,陈阳生. 不同 PWM 模式下交流电机单电阻三相电流采样的研究[J]. 机电工程,2013,30(5):585-590.

[8] 袁雷,胡冰新,魏克银,等. 现代永磁同步电机控制原理及 MATLAB 仿真[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2016.

[9] 孟高军,余海涛,黄磊,等. 一种基于线电感变化特征的永磁同步电机转子初始位置检测新方法[J]. 电工技术学报,2015,30(20):1-9.

[10] Antti P, Janne S, Jorma L. Signal injection in sensorless PMSM drives equipped with inverter output filter [J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2008,44(5):1614-1620. (编辑 李秀敏)

(上接第4页)

数矩阵可以求解各关节角加速度。图7为各关节角位移、角速度、角加速度图。

从图7可以看出机器人各关节角位移、角速度、角加速度均连续变化,说明笛卡尔空间的轨迹规划符合加工要求。

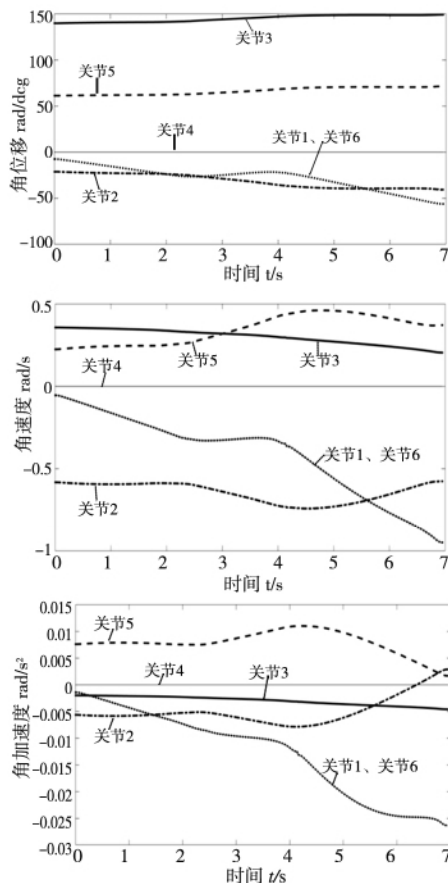


图7 各关节角位移、角速度、角加速度图

6 结论

本文针对铣削机器人去除大型锻件裂纹的方法,采用三次 B 样条曲线拟合裂纹轨迹,拟合的曲线为机器人末端加工的路径,通过对路径的分析采用加减速控制方法按照给定的插补周期进行三次 B 样条插补,该方法能够避免加工时机器人在速度敏感点发生速度突变。通过实例验证和仿真证明该方法有效可行,对于提高加工质量具有现实意义。

[参考文献]

[1] Yonghua Chen, Fenghua Dong. Robot machining: recent development and future research issues [J]. Original Article, 2013, 66:1489-1497.

[2] 谭民,王硕. 机器人技术研究进展[J]. 自动化学报,2013,39(7):963-972.

[3] 刘宇,戴丽,刘杰,等. 泰勒展开 NURBS 曲线插补算法[J]. 东北大学学报,2009,30(1):117-120.

[4] 蔺志敏. 基于机器视觉齿轮微观缺陷检测技术研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2015.

[5] Adel olabi, Richard bearee, Olivier GIBARU, et al. Feedrate planning for machining with industrial six-axis robots [J]. Control Engineering Practice, 2010, 18(5):471-482.

[6] 张伟. 三次参数曲线的一种等参数增量插补方法[J]. 武汉科技大学学报,2001,24(3):266-268.

[7] R V Fleisig, A D Spence. A constant feed and reduced angular acceleration interpolation algorithm for multi-axis machining [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture,2001,33(1):1-15.

[8] 陈伟华,张铁. 三次均匀有理 B 样条曲线插补算法的研究[J]. 机械设计与制造,2010(8):3-5.

[9] 郑焱,毕庆贞,王宇晗. 五轴联动数控加工进给率规划方法[J]. 组合机床与自动化加工技术,2011(7):1-8.

[10] 罗福源,尤有鹏,尹涓. NURBS 曲线 S 形加减速双向寻优插补算法研究[J]. 机械工程学报,2012,48(5):148-156.

(编辑 李秀敏)