doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.06.051

高速加工运动性能预测方法研究*

谢　东[1,2]　丁杰雄[1]　杜　丽[1]　王　伟[1]　宋智勇[3]

(1.电子科技大学机械电子工程学院, 成都 611731; 2.重庆科技学院电气与信息工程学院, 重庆 401331;
3.中航工业成都飞机公司数控加工厂, 成都 610092)

摘要: 为了考察数控机床参数约束的运动性能对加工质量和效率的影响,提出一种高速数控加工运动性能预测方法。以进给速度为主要研究对象,利用柔性加减曲线控制方式,考虑机床参数制约、段间转接速度约束,建立多轴联动加工进给速度状态方程。通过综合后续状态约束条件,简化动态规划状态和决策变量的求解,得到进给速度、加速度曲线的预估,并获取进给速度与约束参数、轴速度和约束轴的辨识关系,通过试件切削加工实验验证了所提方法的可行性。

关键词: 多轴加工　动态规划　加减速控制　进给速度　动态指标

中图分类号: TG659　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1000-1298(2014)06-0333-08

引言

在高速高精度五轴数控机床运动中,复杂型面采用逼近法拟合其曲面,会出现转折和拐点,但机床伺服性能不是无限大,其受制于刀具路径、几何特性、切削负载等机床动力学特性以及加速度等运动学特性的影响,从而导致表面切削速度不均匀,影响工件表面质量和轮廓精度[1-3],故进给速度、加速度等运动性能预测对复杂曲面表面切削精度均匀性研究以及表面质量的控制有着重要意义。

从进给速度控制可知,用插补算法直接将轨迹轮廓映射到进给速度指令是进给速度研究的一种方法[4-6]。除了常规的插补算法外,还必须考虑由微小段组成轮廓的总体进给速度规划问题[7-8],段间速度衔接问题[9-10],加减速方式选择[10-11],以及拐角过渡的处理问题[12]。这些研究以每一小路径段或整体轮廓为研究对象,从整体参数约束考虑,而非实际坐标运动轴参数约束以及轴运动速度转折约束考虑,且上述方法针对各自控制系统设计,与实际高档数控系统仍存在差距。而实际高档数控系统由于其算法组成的多样性,完全模拟其核心控制算法面临问题的复杂性。

本文从考察数控机床运动性能角度出发,提出一种轴速度和轮廓合成进给速度预测方法,在已知小线段各轴运行位移量情况下,采用 S 形柔性加减速算法,建立轴进给速度状态方程,推导段间转折处满足轮廓精度的轴进给速度约束,以进给速度最大为目标,采用时间最优的策略来求解各小线段运行速度和其决策控制变量加加速度,得到含加加速度、加速度、最大进给速度参数约束的轮廓进给速度和加速度曲线,来考察多轴联动高速加工数控机床的运动性能。

1　S 形加减速原理

数控系统把零件程序转换成要加工的形状轨迹、进给速度和其他的指令信息,连续把位置指令送给每个伺服轴。为了保证高速度和高精度,须根据被加工零件的形状轨迹选择最佳的进给速度,并在允许的误差范围内以尽量高的进给速度实施切削,特别在拐角处和小半径处,应能判别加工速度变化对精度的影响,使刀具在到达这样的点前使其自动减速,引入加减速度限制,保证运行过程的稳定是现代数控系统所必须的。

由于 S 形加减速的柔性控制能力被广泛使用在高档数控系统中,以满足不同伺服机构动态性能需求[13-15],本文以 S 形加减速度控制模式来建立预测模型。一般情况下,其加加速度 J 设为常数,速度曲线看似 S 曲线。完整加减速过程包括加加速、匀加速、减加速、恒匀速、加减速、匀减速和减减速 7 个阶段,为了减少加速时间,通常取消匀加速和匀减速阶

收稿日期: 2013-06-30　修回日期: 2013-08-08

*国家科技重大专项资助项目(2013ZX04001-021)

作者简介: 谢东,博士生,重庆科技学院副教授,主要从事精密机电测控技术和数控技术研究,E-mail: xiedongcq@126.com

通讯作者: 丁杰雄,教授,博士生导师,主要从事精密机电测控技术研究,E-mail: jxding@uestc.edu.cn

段,将其简化为 5 个阶段。

在 S 形的加减速度模式下,若其初始速度为 v_s,终点速度为 v_e,加加速度 J 为恒值,加速过程按照加加速和减加速方式升速,则其运动状态的表示为

$$\begin{cases} J = J_{\max} \\ A_{\max} = \dfrac{Jt}{2} \\ v_e = v_s + \dfrac{1}{4}Jt^2 \\ S = v_s t + \dfrac{1}{8}Jt^3 \end{cases} \tag{1}$$

式中 t——线段运行总时间

$J_{\max}$——加加速度设定最大值

$A_{\max}$——段内运行能够允许达到的加速度最大值,出现在线段中间位置。而其段初和段末的加速度为零,故其段间衔接时无冲击

2 动态规划速度衔接模型

由于高档数控系统的前瞻能力使其在多个微小直线段连接时,可采用过渡速度以提高其切削效率。各坐标轴运动时,在同一时刻被要求达到其目标点位,且能保持各自速度协调和下一步的衔接关系,本文利用动态规划方法来设计一种速度的预测模型。

动态规划是一种研究与时间有关的多阶段决策过程的方法[16],它将问题的整体按时间或空间特征分成若干前后衔接的时空阶段,把多阶段决策问题转换成前后关联的一系列单阶段决策问题,进而求出整体问题的最优决策序列。

设阶段数为 n 的多阶段决策过程,定义有阶段 $k=0,1,\cdots,n-1$,允许的策略为

$$U_{0,n-1}^* = (u_0^*, u_1^*, \cdots, u_{n-1}^*) \tag{2}$$

它能够作为最优策略的充分必要条件是对任意一个 $k \in (0, n-1)$ 和初始状态 $s_0 \in S_0$ 有

$$V_{0,n-1}(s_0, U_{0,n-1}^*) = \underset{U_{0,n-1} \in U_{k,n-1}(s_o)}{\text{opt}} \{ V_{0,k-1}(s_0, U_{0,k-1}) + \underset{U_{k,n-1} \in U_{k,n-1}(\tilde{s}_k)}{\text{opt}} V_{k,n-1}(\tilde{s}_k, U_{k,n-1}) \} \tag{3}$$

其中 $U_{0,n-1}^* = (U_{0,k-1}^*, U_{k,n-1}^*)$ $\tilde{s}_k = T_{k-1}(s_{k-1}, u_{k-1})$

$\tilde{s}_k$ 由初始状态 s_0 和子策略 $U_{0,n-1}^*$ 所决定的第 k 阶段状态,V 是指标性能函数,收益时取最大化,损失时取最小化。

在高速多轴微线段连续加工中,已知经过后置处理的数控代码,描述了从起点到终点的全过程,数控机床严格按照这样路径图行进,需要确定的是以多大的速度连续走完这些路径,以及未来的小线段运行速度。将问题用动态规划方式重新描述,以位移 S 作为目标量,进给速度 v 作为状态变量,加加速度 J 作为控制变量,则速度预测问题,按照动态规划方式对进给速度进行演算。

设刀具路径由若干小线段组成,如图 1 所示。

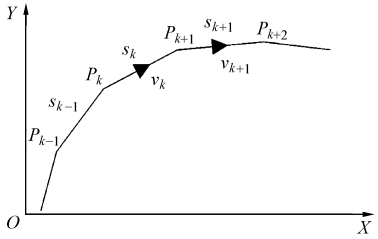

图 1 小线段连接示意图

Fig. 1 Segment connection diagram

图 1 中的第 k 段的初始速度 v_k,该段终点速度与下一段的初始速度相同为 v_{k+1},本段位移量为 s_k,此段加加速度为 J_k,列出 S 型加减速的速度、位移方程分别为

$$v_{k+1} - v_k = \frac{1}{4}J_k t_k^2 \tag{4}$$

$$s_k = v_k t_k + \frac{1}{8}J_k t_k^3 \tag{5}$$

消去方程中时间 t,得到

$$s_k = (v_{k+1} + v_k)\sqrt{\frac{v_{k+1} - v_k}{J_k}} \tag{6}$$

表示成为 v_{k+1} 的状态转移方程,记

$$v_{k+1} = T(s_k, v_k, J_k) \tag{7}$$

而 v_k 的状态方程可由 v_{k-1} 状态递推而来,则

$$v_2 = T(s_1, v_1, J_1)$$

$$v_3 = T(s_2, v_2, J_2) = T(s_2, T(s_1, v_1, J_1), J_2)$$

$$\vdots$$

$$v_k = T(s_k, v_{k-1}, J_k)$$

在连续加减速中,由式(5)得到其各微小段的阶段指标函数

$$t_k = f(s_k, v_k, J_k) \tag{8}$$

总指标函数

$$t_{1,n} = \sum_{k=1}^{n} t_k \tag{9}$$

采用动态规划的速度预测方式,求满足总指标 t 最小值的控制序列 $J \in \{J_1, J_2, \cdots, J_k\}$ 和最优状态 $v \in \{v_1, v_2, \cdots, v_k\}$,做出速度的预测,得出其控制变量 J 的曲线,状态变量 V 的曲线。

3 参数约束条件

如果仅看式(4)、(5)、(6),在已知初始速度 v_1 和终止速度 v_n 的情况下,要满足时间性能指标,控制变量 J 值越大越好。但实际高档数控系统的进给速

度由于线段连接关系，进给速度是难以稳定的。需建立小线段高速加工速度衔接数学模型，考虑线段衔接关系、线段长度、初始速度等约束条件，另外在转弯处还需通过转弯处加工路径和加工误差的数学模型实现平滑进给速度的控制[17]。

由于数控机床进给速度受动态参数 $J_{\max}$、$A_{\max}$、$V_{\max}$以及编程速度 V_{prog}的制约，存在的约束条件为

$$\begin{cases} -J_{\max} \leqslant J_k \leqslant J_{\max} \\ -A_{\max} \leqslant A_k \leqslant A_{\max} \\ v_k \leqslant \min(v_{\max}, v_{prog}) \end{cases} \tag{10}$$

式(10)表明，控制量 J_k和状态变化量 v_k都是受到约束的，即需满足约束的动态规划。

对于状态变化量 v_k的另一个强约束条件是相邻路径段转角处的转接角对进给速度的限制。当进给速度过大时，会导致在转接处出现因速度过冲而带来的轮廓误差。

如图 2 所示，设有 2 个连接的线段 $P_{k-1}P_k$，P_kP_{k+1}，在转接处保持轮廓线速度恒定情况下，各运动轴速度变化满足其加速度最大的制约。设过渡起始点为 P_a，终止点为 P_b，则 X 轴从 v_{ax}加速到 v_{bx}，Y 轴将会从 v_{ay}加速(或减速)到 v_{by}，以此类推。

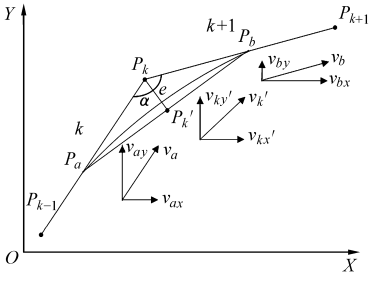

图 2　速度转接示意图

Fig. 2　Velocity connection schematic diagram

设在 k 点处，有最大允许误差 e，转接角为 α，则过渡起始点和终点到顶点 P_k的距离 P_aP_k为

$$l_{P_aP_k} \approx \frac{e}{\cos\alpha} \tag{11}$$

对于 X 轴来说，过渡过程中的位移量为

$$s_{gx} = (\boldsymbol{i}_{k+1} + \boldsymbol{i}_k) l_{P_aP_k} \tag{12}$$

式中　$\boldsymbol{i}_k$、$\boldsymbol{i}_{k+1}$——第 k 段和第 $k+1$ 段在 X 轴上的单位矢量

过渡时间设为 t_{gx}，则有

$$t_{gx} = \frac{v_{bx} - v_{ax}}{A_{x\max}} \tag{13}$$

在 t_{gx}走过的位移为

$$s_{gx} = \frac{1}{2}(v_{bx} + v_{ax}) t_{gx} \tag{14}$$

消去 t_{gx}得到 s_{gx}与速度、转接角之间关系

$$(\boldsymbol{i}_{k+1} + \boldsymbol{i}_k) \frac{e}{\cos\alpha} = \frac{v_{bx}^2 - v_{ax}^2}{2A_{x\max}} \tag{15}$$

由 $v_{bx} = \boldsymbol{i}_{k+1} v_b$，$v_{ax} = \boldsymbol{i}_k v_a$，$v_a = v_b$，则满足 X 轴加速度要求的转接的速度记为 v_a^x为

$$v_a^x = v_b^x = \sqrt{\frac{2eA_{x\max}}{\cos\alpha |(\boldsymbol{i}_{k+1} - \boldsymbol{i}_k)|}} \tag{16}$$

同理，可推导出满足 Y、Z 轴的 v_a^y、v_a^z为

$$v_a^y = v_b^y = \sqrt{\frac{2eA_{y\max}}{\cos\alpha |(\boldsymbol{j}_{k+1} - \boldsymbol{j}_k)|}} \tag{17}$$

$$v_a^z = v_b^z = \sqrt{\frac{2eA_{z\max}}{\cos\alpha |(\boldsymbol{k}_{k+1} - \boldsymbol{k}_k)|}} \tag{18}$$

式中　$\boldsymbol{j}$、$\boldsymbol{k}$——速度方向上在 Y、Z 轴上的单位矢量

$A_{x\max}$、$A_{y\max}$、$A_{z\max}$是各轴最大允许加速度参数，则衔接处由于最大允许加速度限制，其衔接处的最大速度不大于式(10)中计算所得最小值，即

$$v_a = v_b = \min(v_a^x, v_a^y, v_a^z) \tag{19}$$

当第 $k+1$ 和第 k 的速度方向矢量相等时即 $\boldsymbol{i}_{k+1} = \boldsymbol{i}_k$，$\boldsymbol{j}_{k+1} = \boldsymbol{j}_k$，$\boldsymbol{k}_{k+1} = \boldsymbol{k}_k$，表明在同一条直线上，则此时衔接速度保持其编程所需最大速度 v_{prog}。从式(15)看出，衔接处进给速度与两个线段间的夹角有关，也就是说与被加工对象的几何构造相对应的，夹角小，则两个线段走向一致，夹角大，则线段方向差别大。

4　进给速度求解

在进给速度求解方法问题上，采用双向扫描算法的小线段速度规划方法[18]，对加工路径的正反向扫描，通过满足小线段路径的几何特性和机床的物理限制等多种约束的衔接点进给速度的可行域求解进给速度；对速度规划后的残余长度，采用减速段中平摊处理，或采用空间直线与圆弧相互连接的计算公式再进一步计算[19-20]。上述方法计算工作量大，特别是需处理的段数较多时，资源占用大；另外其规划基于直线加速度情况，与高档数控系统还有一定差距。本文先确定转折处和编程进给速度约束，采用逆推解法来解决计算中的复杂性问题。

动态规划中在已知初始状态 v_1或者终止状态 v_n情况下，其求解方法分为逆推解法和顺推解法。

所谓逆推解法即为已知初始状态，利用规划得到从当前 k 阶段状态到最终的 n 阶段状态所得效益最大，即当前状态和决策变量，可使以后按此状态发展下去的阶段的最优函数值有最大收益。而顺推解法是在已知终止状态情况下，利用规划得到从第 1 阶段到当前 k 阶段状态所得效益最大。已知终止状态的顺推法和已知初始状态的逆推法在本质上是一样的，相当于把一个的起点看成另一个的终点。

设程序预读 N 段代码，在这 N 段代码中，需满足 5 个轴联动运动方式，即各轴同时完成自身应该

走的距离,并不超过自身约束,则各轴完成一个 S 形的加速度过程,将式(4)、(5)表示成为

$$v_{k,e}^{i} = v_{k,s}^{i} t_k + \frac{1}{4} J_k^i t_k^2 \tag{20}$$

$$s_k^i = v_k^i t_k + \frac{1}{8} J_k^i t_k^3 \quad (i \in \{X,Y,Z,A,C\}) \tag{21}$$

式中 s_k^i——各轴在第 k 段运行的长度

v_k^i——初始速度

J_k^i——各轴运动时的加加速度

t_k——本段运行时间

数控机床的协调运动,使得各轴的运动时间应该是一样的,对于各轴有不同的位移和初始速度,各轴 J 的取值是不一样的。根据上述约束条件要求,当某一轴的 J 达到极限时,其他轴的 J 值是不能超过其自身 J 的极限值。

J 值的选取需考察哪一个轴会达到其最大值情况,对于已知的线段长度而言,其加速和减速点状态表现应该满足一致性和协调性要求,即假设从起点 P_k 到终点 P_{k+1} 点,则对于同一直线段有

$$v_k^i = \frac{P_{k+1}^i - P_k^i}{l_{P_{k+1}P_k}} v_k = \frac{s_k^i}{s_k} v_k \tag{22}$$

式中 v_k——第 k 段的总体速度

v_k^i——各轴速度

代入式(20)可得

$$J_k^i = \frac{s_k^i}{s_k} J_{\max} \tag{23}$$

$J_{\max}$ 为本段最大合成加加速度,当 s_k^i 越长,其对应 J^{imax} 越大,则最大约束轴可由其对应最长位移的轴来确定,以此作为控制变量 J 的取值。

由于在动态规划状态方程求解中,在求出当前第 k 段的速度 v_k 时,除满足上述条件外,还需要对从第 k 到 n 段的性能指标进行计算,计算工作量是 $n-k$ 次,且解 3 次方程非常复杂。而在有多个后续状态约束下,按照上述方式的求解降低了计算效率,根据以时间最短、进给速度最大化为目标的预测目的,将当前段状态速度满足后续性能指标最优化的求解方法作一个优化,主要从以下 3 方面入手,以解决求解最优指标的复杂性。

(1) 假设在后续的微小线段中,存在路径长度和参数制约而产生的进给速度低于当前段速度情况时,当前段速度是否能满足其降速需要。

假设在 k 段后的 m 段速度降到零,以当前进给速度 v_k,运行 m 段后,在第 $k+m$ 段末速度为零。从上述论述可知,采用从第 $k+m$ 段开始反向递推到第 k 段,其对应速度记为 v_{kf},则需满足

$$v_k \leqslant v_{kf} \tag{24}$$

(2) 满足剩余位移量可以减速到零,即当前段规划速度 v_k 能够满足以最大加加速度方式到达终点时速度为零的距离,即

$$v_k \leqslant \left[\left(\sum_{j=k+1}^{n} s_j \right)^2 J_{\max} \right]^{\frac{1}{3}} \tag{25}$$

(3) 满足下一段的运行最低速度要求。由于有约束条件的限制,满足下一段最低速度降速要求就可。即以第 $k+1$ 段转折速度为初始速度,位移量为 S_{k+1},以最大加加速度,反向递推到当前速度 v_k,即

$$v_k \leqslant Tf(s_{k+1}, v_{k+1}, J_{k+1}) \tag{26}$$

上述 3 方面考虑可使求解最优值问题简化,减少计算工作量和规划的繁琐性,使动态规划实施过程效率得到提高。

5 进给速度预测仿真

以某试件型面作为研究对象进行实际速度预测。该试件为薄壁非连续光滑曲面,取其中一面精加工路径,其代码描述的 5 个轴位置指令增量位移如图 3 所示,利用 345 个程序段的精加工路径进行分析,G 代码对各轴指令是非连续,其对应各轴运动指令见图 4 所示。

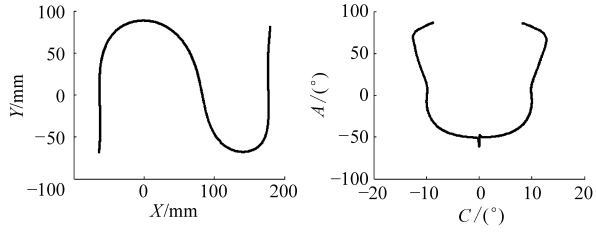

图 3 精加工路径指令描述图

Fig. 3 Specimen finishing path instruction

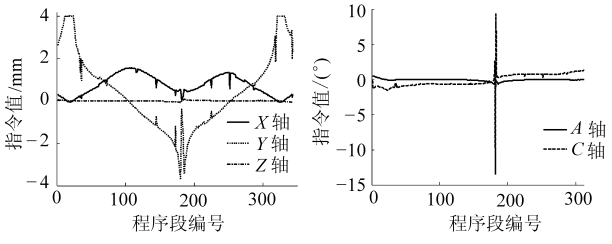

图 4 各轴位移指令图

Fig. 4 Displacement instruction of each axis

从指令曲线看出,由于由许多微小线段组成,使得其五轴联动加工指令都不连续。以微小线段各轴位移指令为已知量,对其各段运动速度进行规划。

首先是数据归一化处理,将各运动轴位移增量以及约束条件转化为脉冲数,以避免转动轴与平动轴计算时的单位换算关系,时间上以一个插补周期为时间单位来计算。以每段平均速度为各段运行速

度作为输出观察结果。

设置相关约束参数，其中各轴加加速度最大值 J_{max} 取 10 000 mm/s^3，加速度最大值 A_{max} 取 500 mm/s^2，速度最大值 V_{max} 取 15 m/s，程编速度设为 110 mm/s。

在动态规划的状态方程求解过程中，当 m 个后续减速段的取值选择不同时，得到的预测结果有较大差异，它主要表现在进给速度的最大值上，不同 m 取值下的速度曲线如图 5 所示。

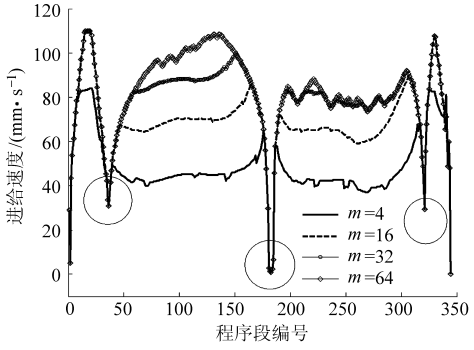

图 5　轮廓表面进给速度曲线

Fig. 5　Surface feed rate curve

当 m 取值较小时，为了保证当前段的速度 v_k 在经过 m 段后降到零，所以整体规划的速度是较小的。m 取值大时，整体速度高，但计算量大。

仿真结果表明，当 m 取值增加到某一值（这里是 64），速度曲线就已经达到最大值（即规划的最优值），再增加 m 的取值已经没有意义。无论 m 的取值如何，图 5 圆圈对应处，进给速度的跌落十分明显，这些进给速度跌落位置表明了刀具在此位置的速度大大低于其他位置，刀具在该位置点的进给速度低，停留时间长，加速度大且正负跳变，见图 7，是刀痕遗留的重点观察点位。

加加速度 J 的不同取值对进给速度也有着一定的影响，如图 6 所示，不同轴的 J 的调整，使其最终轮廓进给速度有差异。各轴的 J 值初始设置为 10 000 mm/s^3，选择后续规划段数 m = 32，分别设置 X 轴的 J_{xmax} 增加到 15 000 mm/s^3，或者 Y 轴的 J_{ymax}，X/Y 轴的 J_{xmax}、J_{ymax} 同时增加，以及 A/C 轴的 J_{amax}、J_{cmax} 同时增加，考察 J 变化对进给速度影响。当加加速度变化时，进给速度将跟随约束轴的不同而变化，约束轴作用位置不同，则其进给速度增大的表现位置是不同的。

从图 6 中看出，当只设置某一个轴的 J 值增加时，即图中对应 J_{xmax} 增加曲线或 J_{ymax} 增加曲线，发现只有在该轴起作用的程序段，整体速度有所提高，而其他位置并没有变化。

当 X、Y 两个主要限制轴的 J 值都增加时（J_{xmax} 和 J_{ymax} 增加对应曲线），发现则其整体进给速度在

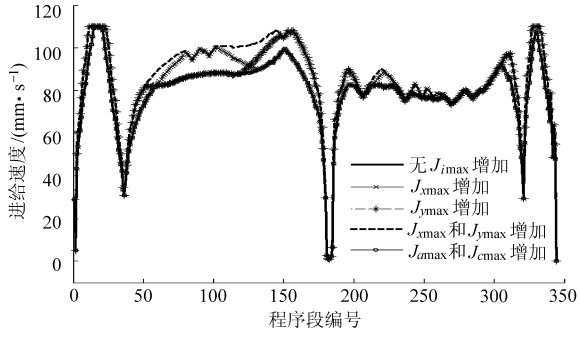

图 6　J 值增加时的进给速度曲线

Fig. 6　Feed rate curve of different J value increasing

局部点位会有提升，但其进给速度平稳性受到影响，速度变化会有明显增加。旋转轴 J 值变化对进给速度增加贡献不大，仿真实验表明无论 A、C 或者 AC 轴同时加大时，进给速度没有明显变化。

图 7 是在进给速度基础上得到的加速度曲线，可以看到，速度变化大对应的位置处，其加速度是较大，这些点位将会作为重点考察点位进行考察分析。图中 X、Y 分别对应 J_{xmax} 增加、J_{ymax} 增加，XY 对应 J_{xmax} 和 J_{ymax} 增加，AC 对应 J_{amax} 和 J_{cmax} 增加 4 种情况。

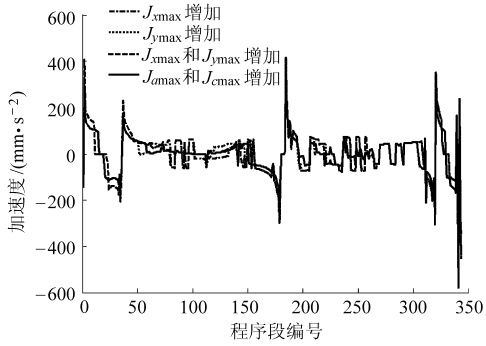

图 7　加速度曲线

Fig. 7　Acceleration curve

图 8 得到 4 种情况下的加加速度 J 控制量的变化图，图 9 是加加速度 J 在进给过程中起作用约束轴的分布。

图 9 可以看出，在 J 值变化时，各轴作用的变化差异还是比较大的，根据提出的 J 值作用规则，当对应某个 J 值增加时，它与其对应位移比值会发生变化，从而引起约束条件的改变。

从整体精加工路径的运动时间看到，采用不同的 m 值，其加工时间有一定差别。几种情况运行时间结果比较如表 1 所示。

从表 2 中看到，在 m 确定的情况下，J_{imax} 的调整时间得到了一定的缩短，但不显著。所以，加加速度的调整对加工时间的贡献不明显。

在五轴联动数控机床上进行了实际切削实验，切削加工示例如图 10 所示。

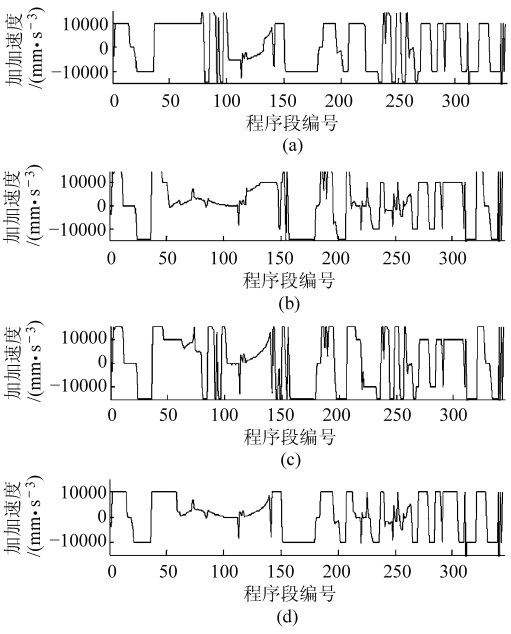

图 8 加加速度曲线

Fig. 8 Jerk curve

(a) J_{xmax}增加 (b) J_{ymax}增加

(c) J_{xmax}和 J_{ymax}增加 (d) J_{amax}和 J_{cmax}增加

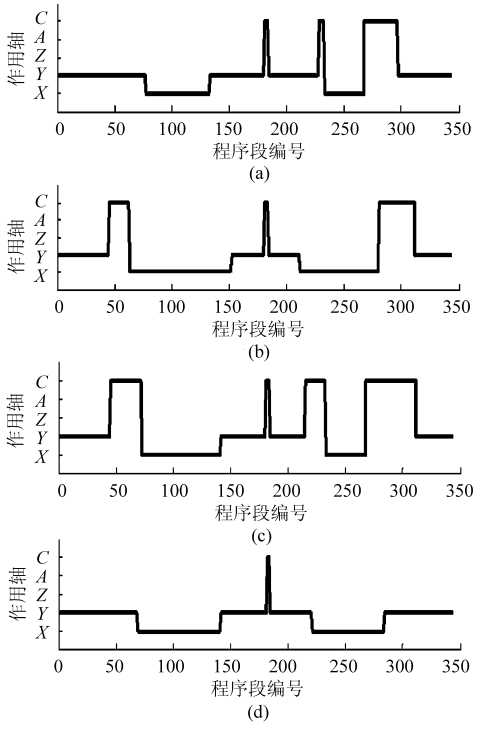

图 9 点位对应约束指标分布图

Fig. 9 Distribution of constraint indicator

(a) J_{xmax}增加 (b) J_{ymax}增加

(c) J_{xmax}和 J_{ymax}增加 (d) J_{amax}和 J_{cmax}增加

表 1 不同的 m 取值的加工时间

Tab. 1 Processing time in different m value

m	4	16	32	64
时间/s	34.348	30.600	29.623	29.415

由表 1 中可得,若规划中 m 取值小,表明其前瞻性不够,则整体速度低,运行时间长,但速度相对平稳。当 m 取值大时,时间短,但速度平稳性变差。

表 2 不同的 J_{imax}取值的加工时间

Tab. 2 Processing time in different J_{imax} value

J_{imax}/(mm·s^{-3})					
	J_{xmax}	15 000	10 000	15 000	10 000
	J_{ymax}	10 000	15 000	15 000	10 000
	J_{zmax}	10 000	10 000	10 000	10 000
	J_{amax}	10 000	10 000	10 000	15 000
	J_{cmax}	10 000	10 000	10 000	15 000
时间/s		29.487	29.072	28.872	29.623

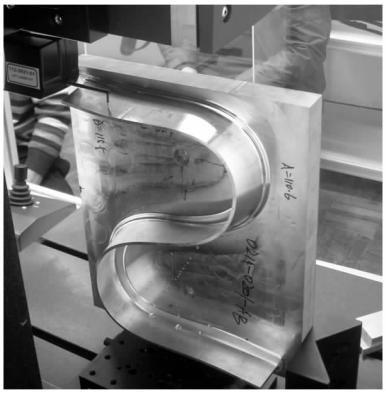

图 10 某试件切削加工示例

Fig. 10 Example of a specimen machining

按照 m 为 32 的速度最优预测模型进行比较。实际加工时间在几种 J 值调整中无明显变化,其时间为 36 s 左右(测量起止时间、起始和终止位置点引起偏差)。实际进给速度用各轴运动速度采样拟合,与本文模型整体进给速度变化趋势一致,且在图 5所示圆圈位置有速度跌落和刀痕出现。在试件刀痕点位置如图 11 所示,与实际切削结果吻合。切削实验中的刀痕见图 12 所示。通过实验验证本预测方法的可行和正确性。

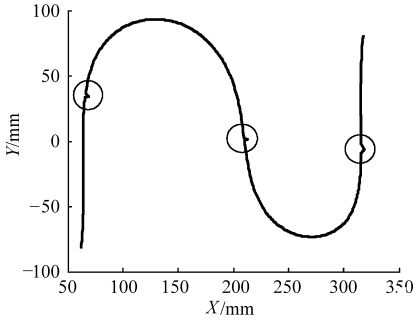

图 11 刀痕点位置

Fig. 11 Position of tool marks

6 结束语

针对高速微段连续加工提出一种运动性能的预测模型,采用了 S 加减速曲线,通过转折点位速度约束和编程速度约束,考虑各轴协调运动,利用动态规

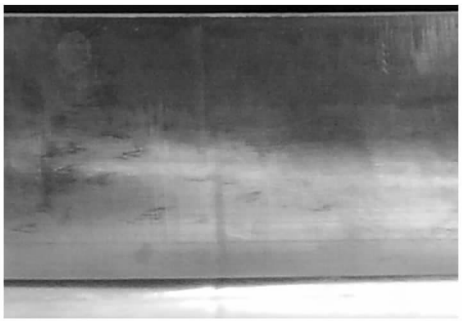

图 12　切削实验中的刀痕

Fig. 12　Tool marks in cutting test

划方法做出进给速度预测模型，考察了高速微段加工中机床动态参数加加速度、加速度、进给最大速度极限约束值对进给速度影响，分析出对于不同加加速度的轴作用分布。通过预测，发现零件几何构造和机床的动态参数设置对刀具进给速度影响大，当几何图形上转折大时，其进给速度的跌落大，并使速度平稳性受到影响，在特征位置表现出零件精度和表面质量下降。通过仿真和实验验证本预测方法的有效性，为复杂型面实际切削速度预估和由于动态特性引起的表面质量分析和精度分析提供重要依据。

参　考　文　献

1　Sencer B, Altintas Y, Croft E. Modeling and control of contouring errors for five-axis machine tools—part Ⅰ: modeling [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2009,131(3):031006.1 - 031006.8.

2　Sencer B, Altintas Y. Modeling and control of contouring errors for five-axis machine tools—part Ⅱ: precision contour controller design[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2009,131(3):031007.1 - 031007.10.

3　杨勇，张为民，杨涛. 基于 Kriging 元模型的机床进给驱动系统动态特性优化[J]. 农业机械学报，2013,44(5):288 - 293.
Yang Yong, Zhang Weimin, Yang Tao. Dynamic characteristic optimization of feed system based on Kriging metamodel [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(5):288 - 293. (in Chinese)

4　Kaan Erkorkmaz Y A. High speed CNC system design. Part Ⅰ: jerk limited trajectory generation and quintic spline interpolation [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2001,41(9):1323 - 1345.

5　Nam S H, Yang M Y. A study on a generalized parametric interpolator with real-time jerk-limited acceleration [J]. Computer-Aided Design, 2004,36(1):27 - 36.

6　Lavernhe S, Tournier C, Lartigue C. Kinematical performance prediction in multi-axis machining for process planning optimization [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008, 37(5 - 6):534 - 544.

7　Lee J N, Huang C B, Chen T C. Toolpath generation method for four-axis NC machining of helical rotor [J]. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 2008,31(2):510 - 517.

8　董伯麟，王治森，江韩. 高速高精度加工中 NURBS 曲线混合插补算法[J]. 农业机械学报，2008,39(6):174 - 179.
Dong Bolin, Wang Zhisen, Jiang Han. NURBS curve hybrid interpolator in high speed and high accuracy machining [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(6): 174 - 179. (in Chinese)

9　冷洪滨，邬义杰，潘晓弘. 三次多项式型微段高速自适应前瞻插补方法[J]. 机械工程学报，2009,45(6):73 - 80.
Leng Hongbing, Wu Yijie, Pan Xiaohong. Adaptive prospective interpolation method for high speed machining of micro line blocks based on the cubic polynomial model [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009,45(6):73 - 80. (in Chinese)

10　Jin Hung Chen, Syh Shiuh Yeh, Jin Tsu Sun. An S-curve acceleration/deceleration design for CNC machine tools using quintic feedrate functions[J]. Computer-Aided Design and Applications, 2011,8(4):583 - 592.

11　王宇晗，肖凌剑，曾水生. 小线段高速加工速度衔接数学模型[J]. 上海交通大学学报，2004,38(6):901 - 904.
Wang Yuhan, Xiao Lingjian, Zeng Shuisheng. An optimal feedrate model and solution for high-speed machining of small line blocks with look-ahead [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2004, 38(6):901 - 904. (in Chinese)

12　Ye Peiqing, Shi Chuan, Yang Kaiming, et al. Interpolation of continuous micro line segment trajectories based on look-ahead algorithm in high-speed machining [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2007,37(9 - 10):881 - 897.

13　俞鸿斌. 基于高速加工的加减速控制方法研究及实现[J]. 制造技术与机床，2008(4):44 - 48.

14　张得礼，周来水. 数控加工运动的平滑处理[J]. 航空学报，2006,27(1):125 - 131.
Zhang Deli, Zhou Laishui. Adaptive algorithm for feedrate smoothing of high speed machining [J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2006,27(1):125 - 131. (in Chinese)

15　朱晓春，屈波，孙来业，等. S 曲线加减速控制方法研究[J]. 中国制造业信息化，2006, 35(23):38 - 40.
Zhu Xiaochun, Qu Bo, Sun Laiye, et al. Study on the accelaration/decelaration control method for S-curve [J]. Manufacture Information Engineering of China, 2006,35(23):38 - 40. (in Chinese)

16　李端，钱富才，李力，等. 动态规划问题研究[J]. 系统工程理论与实践，2007(8):56 - 64.

17　李建刚，吴响亮，李泽湘，等. 连续加工路径的进给速度规划算法研究[J]. 哈尔滨工业大学学报，2009,41(3):29 - 32.
Li Jiangang, Wu Xiangliang, Li Zexiang, et al. A blended feedrate planning algorithm for continuous tool path [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2009,41(3):29 - 32. (in Chinese)

18　黄昕，李迪，李方，等. 基于双向扫描算法的小线段速度规划[J]. 计算机集成制造系统，2009,15(11):2188 - 2192.
Huang Xin, Li Di, Li Fang, et al. Micro line blocks velocity planning based on bidirectional scan algorithm [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2009,15(11):2188 - 2192. (in Chinese)

19　杨林，张承瑞，王科，等. 高速加工中的速度规划与段间连接[J]. 上海交通大学学报，2010,44(1):40 - 45.

Yang Lin, Zhang Chengrui, Wang Ke, et al. Speed planning and segment connection in high speed machining [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2010,44(1):40 - 45. (in Chinese)

20 陈良骥,冯宪章. 加工路径段进给速度的转接及加减速处理方法[J]. 农业机械学报, 2010,41(1):200 - 204.
Chen Liangji, Feng Xianzhang. Transiting and acceleration/deceleration methods for feed speed of machined path segment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2010,41(1):200 - 204. (in Chinese)

Prediction of High-speed Machining Kinematic Performance

Xie Dong[1,2] Ding Jiexiong[1] Du Li[1] Wang Wei[1] Song Zhiyong[3]

(1. *School of Mechanical, Electronic, and Industrial Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu* 611731, *China*

2. *School of Electric & Information Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing* 401331, *China*

3. *CNC Machining Factory, Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd., Chengdu* 610092, *China*)

Abstract: The kinematic performance of the CNC machine tool plays an important role on surface processing quality and contour accuracy of the workpiece in high-speed CNC machining. This paper proposes a kinematic performance prediction method to investigate the dynamic indicators of the CNC machine tool. The feed rate is taken as main researched object. By the control mode of flexible acceleration and deceleration, the equation of state is established considering the constraints of machine tool parameters and the segment connection velocity. The preloading follow-up constraint status is used to simplify the solving for state variable and decision variable of the dynamic programming. The feed rate curves and jerk curves are presented to identify the constraint parameters and constraint axes. The experiment of the specimen cutting is implemented to verify the feasibility of this method.

Key words: Multi-axis machining Dynamic programming Acceleration and deceleration control Feed rate Dynamic indicators

(上接第 346 页)

Surface Roughness of Titanium Alloy under Ultrasonic Vibration Milling

Wang Minghai Li Shiyong Zheng Yaohui

(*Key Laboratory of Fundamental Science for National Defense of Aeronautical Digital Manufacturing Process, Shenyang Aerospace University, Shenyang* 110136, *China*)

Abstract: The effects of processing parameters (amplitude, milling speed, feed per tooth) on surface quality machined by side blades in ultrasonic torsional vibration milling (UTVM) were investigated. Based on a series of UTVM experiments, the influence of single-variable processing parameter on surface quality of milled surfaces was obtained. Furthermore, the significance of these effects of each factor and interactive factors of processing parameters on surface roughness was studied by variance analysis and response surface methodology. Processing parameters were optimized and prediction model of surface roughness was established. The experimental results show that applied ultrasonic torsional vibration can obviously reduce surface roughness of milled surfaces, and the amplitude is the most significant factor of affecting surface roughness in UTVM, while the milling speed and feed per tooth are the second and the third, respecitively. Large amplitude and low milling speed are more likely to improve the roughness of the milled surfaces.

Key words: Ultrasonic torsional vibration Vibration milling Surface roughness Variance analysis Response surface methodology