

# 实轴空间综合约束下的数控加工速度前瞻策略

赵鹏<sup>1</sup>, 楼佩煌<sup>1</sup>, 刘明灯<sup>2</sup>, 满增光<sup>1</sup>

(1. 南京航空航天大学机电学院, 210016, 南京; 2. 南京四开电子企业有限公司, 210007, 南京)

**摘要:** 为了避免数控高速加工中由高曲率区域引起的机床驱动轴的运动突变、机床振动和工件过切,提出了基于实轴空间综合约束的数控加工速度前瞻控制策略. 该方法应用切削运动的S形曲线速度规划方案,对机床实轴运动数据进行速度、加速度、冲击约束检测,整体提前寻优确定S形速度前瞻的过程参数,并提出了速度规划节点分离法对切削路径进行分段独立S形曲线速度的规划. 仿真和试验表明,采用该方法进行速度前瞻处理时,可使加工速度平滑连续,不仅消除了各驱动轴运动突变引起的冲击振动,而且有效地解决了五轴数控加工中的速度控制问题,因此降低了曲面轮廓误差,满足了高速高精度的加工要求.

**关键词:** 数控; 前瞻控制; S形曲线; 速度规划

**中图分类号:** TP273 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2012)02-0064-06

## CNC Machining Velocity Look-Ahead Strategy Restricted by Machine Axis Drive Ability

ZHAO Peng<sup>1</sup>, LOU Peihuang<sup>1</sup>, LIU Mingdeng<sup>2</sup>, MAN Zengguang<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Nanjing SKY Electronics Enterprise Co. Ltd., Nanjing 210007, China)

**Abstract:** In high curvature region of high speed computer numerical control (CNC) machining, machine axis motion shock, mechanical vibration and cutting overshoots often occur. A novel CNC machining velocity look-ahead strategy based on machine axis drive ability constriction is proposed. The S-curve velocity planning is utilized, and the velocity planning parameters are achieved by checking the velocity, acceleration and jerk of the rotate axis and linear axis on the tool path. Then a velocity control node subsection is suggested to divide the cutting path into independent sections to implement the velocity planning independently. The simulation and experiments demonstrate that the strategy enables to smooth the cutting motions and obviously improve the machining surface quality, and 5-axis CNC velocity control is thus effectively solved to meet the high performance requirements in free-form surface machining.

**Keywords:** numerical control; look-ahead control; S-curve; velocity planning

由于在现代航空、航天、模具工业中大量采用了复杂曲线曲面的设计,因此大大提高了对数控系统曲面高速加工能力的要求. 传统数控系统对每一个数据段进行加减速控制,当加工速度提高时,碰到

微小路径段会因为来不及加减速而导致工件过切和机床振动,因此无法满足曲面高速加工的要求<sup>[1]</sup>. 现代数控系统对逼近曲面曲线的连续微小直线段链进行整体速度前瞻处理,实现了前瞻路径段内的速度

收稿日期: 2011-07-14. 作者简介: 赵鹏(1984—),男,博士生;楼佩煌(通信作者),男,教授,博士生导师. 基金项目: 江苏省科技支撑计划资助项目(BE2011182); 江苏省重大科技成果转化专项资金资助项目(BA2007071); 江苏省产学研前瞻性联合研究项目(BY2009102).

网络出版时间: 2011-12-02

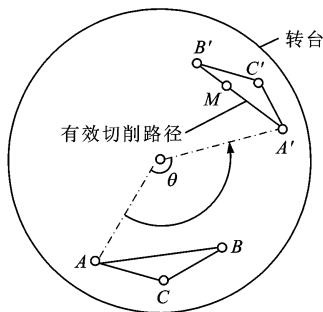
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcmw/detail/61.1069.T.20111202.1056.001.html>

平滑过渡. 文献[2]提出基于梯形速度曲线的前瞻控制,其计算简单,但存在的加速度突变会造成冲击,影响电机和机械系统的寿命. 文献[3-5]采用 S 形曲线速度规划方法对曲线路径进行速度前瞻处理,消除了加速度突变. 文献[6]根据加工路径段的特征,归纳了规划中可能出现的 8 种 S 形曲线的加减速方式. 但是,在上述研究中均未给出曲面加工的特殊性,也未提出五轴数控加工中的 S 形曲线速度前瞻控制中的过程参数标定方法,以及多速度拐点规划冲突的解决方案.

本文对五轴数控加工中的切削运动路径和机床驱动轴运动特性进行综合分析,提出了机床实轴空间综合约束下的速度前瞻控制策略,重点解决了在五轴数控系统中, S 形曲线速度规划中的过程参数难以确定的问题,并采用速度规划节点分离法对切削运动路径进行分段独立 S 形曲线速度规划,从而消除了多次前瞻带来的运动参数规划冲突. 通过仿真和试验证明了本文方法的有效性和实用性.

## 1 五轴数控加工路径的特性

在数控三轴加工中,刀具中心点运动路径直接表达了刀具相对零件轮廓的有效切削运动,而五轴加工中由于旋转轴转动产生的附加运动,其刀具中心点的运动路径实质上是由加工零件轮廓的有效切削路径和补偿旋转轴附加运动所构成的复合运动路径. 如图 1 所示,将工件放置于转台上,其初始位置为 A、B、C,以多轴方式开始加工时,刀具中心点位于 A,经过一段加工时间后,由于旋转台转过角度  $\theta$ ,工件随转台转至 A'、B'、C' 位置,刀具中心点位于 M. 在机床坐标系中,刀心点实际从 A 点运动到 M 点,但只有沿工件轮廓的运动 A'、M 才是刀具相对工件的有效切削运动. 在五轴加工中,工件轮廓的精度和表面质量由有效切削运动决定,而机床运动的



A、B、C:工件初始位置; $\theta$ :转台旋转角度;A'B'C':工件随转台旋转后的位置;M:刀具中心点位置

图 1 机床驱动轴运动和有效切削运动路径

稳定性和连续性则由各实际机床的驱动轴运动来决定.

五轴数控加工中的速度优化包括:①刀具相对工件的切削运动优化,因为切削运动平滑稳定可保证良好的表面质量,防止过冲造成的轮廓误差;②各机床驱动轴运动的优化,因为其运动平滑性直接和电机冲击、机床振动相关联,但是当切削速度恒定时,各驱动轴速度仍然可能不断变化.

机床驱动轴运动加速度连续可有效改善机床冲击. 各驱动轴运动路径可表示为以切削运动路径长度  $l$  为参数的曲线方程 ( $H_X(l), H_Y(l), H_Z(l), H_A(l), H_C(l)$ ), 设切削运动速度为  $v_c(t)$ , 加速度为  $a_c(t)$ , 则各驱动轴的速度和加速度分量为

$$v_*(t) = \frac{dH_*(l(t))}{dt} = \frac{dH_*(l)}{dl} \frac{dl}{dt} = H'_*(l)v_c(t) \quad (1)$$

$$a_*(t) = \frac{dv_*(t)}{dt} = v_c^2(t)H''_*(l) + a_c(t)H'_*(l) \quad (2)$$

式中: \* 代表任意驱动轴 X、Y、Z、A、C, 表示式(1)、(2)对各驱动轴均成立. 由式(1)、(2)可知, 若各驱动轴运动加速度连续, 需满足 2 个条件:①各个驱动轴运动路径二阶连续;②切削运动加速度连续.

计算机辅助制造系统(CAM)支持参数曲线数控代码输出,一些学者对微小直线段链的拟合平滑优化方法进行了研究<sup>[7-8]</sup>. 本文在研究过程中通过非均匀有理 B 样条(NURBS)曲线的拟合,实现了有效切削路径和机床驱动轴运动路径<sup>[9]</sup>的二阶连续. 如图 2 所示,待拟合刀具切削路径点集

$$P = \{P_0, P_1, P_2, \dots, P_n\}$$

拟合后的切削刀具路径为  $R(u)$ , 旋转轴路径通过 5 次样条曲线插值后,采用机床逆运动变换得到二阶连续的线性轴路径<sup>[3]</sup>,从而获得  $R(u)$  和平滑的驱动轴路径 ( $H_X(l), H_Y(l), H_Z(l), H_A(l), H_C(l)$ ), 其中曲线参数采用向心参数法求解<sup>[7]</sup>

$$\begin{aligned} u_0 &= 0; \quad u_i = \frac{l_i}{l_t} = u_{i-1} + \frac{l_i - l_{i-1}}{l_t} \\ l_i &= |P_0 P_i| = u_i |P_0 P_n|; \\ l_t &= |P_0 P_n| = \sum_{k=1}^n |P_k P_{k-1}| \\ i &= 1, 2, \dots, n \end{aligned}$$

式中: $l_i$  表示  $P_0$  到  $P_i$  的微小直线段的长度和,可近似为  $P_0 P_i$  的曲线总长度; $l_t$  表示本段内微小路径段的长度总和,可近似为拟合后 NURBS 曲线的总长度.

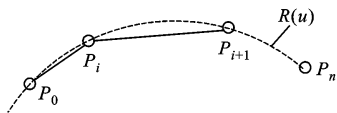


图 2 刀具路径点拟合示意图

为满足加速度连续条件,采用 S 形曲线加减速方法对切削路径进行速度规划<sup>[3,6]</sup>,完整的 S 形曲线速度中包含 7 个阶段,如图 3 中的虚线划分部分<sup>[6]</sup>).

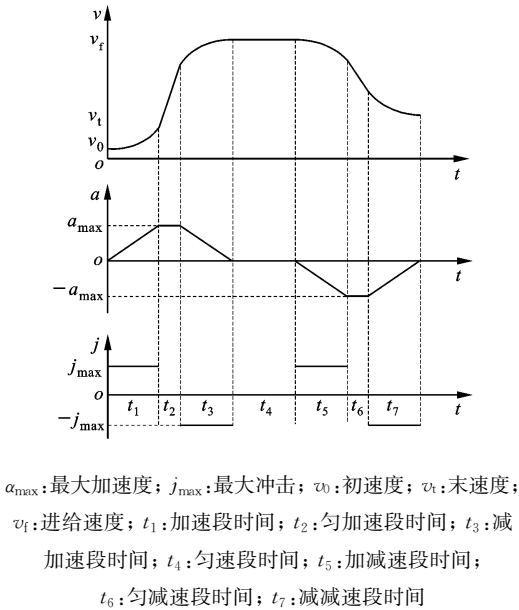


图 3 完整的 S 形曲线速度规划示意图

目前,在对五轴联动数控加工的 S 形曲线速度规划研究中,大多将切削运动简单的作为一维运动进行处理<sup>[2-6]</sup>,而复杂曲线切削的运动方向不断改变,导致速度规划的过程参数难以选择,且旋转轴的运动也限制了对切削运动规划的约束,使其无法体现出来.本文在实轴空间的综合约束下搜索规划过程参数,采用速度规划节点分离法对切削路径进行分段独立 S 形曲线速度规划,解决了传统逐点前瞻造成的规划参数矛盾,改善了由 S 形曲线速度的运算复杂性造成的低效率问题,因此满足了五轴高速数控加工的要求.

2 S 形曲线速度规划过程的参数选择

速度优化的目标是在切削运动平稳进行的同时,不超出各机床电机轴的驱动能力,在无机床冲击的情况下进行精密数控加工.以 S 形曲线速度规划切削运动轨迹,必须合理选择规划过程参数,即前瞻路径长度  $l_{\min}$ 、最大进给速度  $v_{\max}$ 、最大加速度  $a_{\max}$ 、

最大冲击  $j_{\max}$ 、速度拐点、当前点速度  $v_0$  和规划终点速度  $v_t$ . 本文采用在实轴空间的综合约束方法,在综合寻优的基础上搜索切削运动的规划过程参数.

2.1 动态前瞻路径长度求解

在速度规划中,前瞻路径长度必须满足当前加工速度,并按 S 形曲线速度减速到速度拐点限制值.由于而前瞻路径过长而导致运算量过大,影响了段处理速度,因此可根据当前点速度和驱动轴的约束特性来动态的调整前瞻长度,这样既避免了前瞻路径过长浪费资源,又避免了前瞻路径过短而无法达到要求的速度<sup>[2]</sup>.

前瞻路径长度需要满足极端情况下的减速过程,设机床驱动轴中加速度的限制轴为  $a_{* \min}$ ,冲击限制轴为  $j_{* \min}$ ,前瞻长度必须使  $v_0$  按  $a_{* \min}$ 、 $j_{* \min}$  (见图 4)以 S 形曲线速度经历  $t_5 \sim t_7$  后达到 0,即

$$l_{\min} = \frac{1}{2}(v_0 - 0)(t_5 + t_6 + t_7) \tag{3}$$

$$t_5 = t_7 = \frac{a_{* \min}}{j_{* \min}}; \quad t_6 = \frac{v_0}{a_{* \min}} - \frac{a_{* \min}}{j_{* \min}} \tag{4}$$

在当前点速度较小以至于无匀减速段时,为简化运算,计算前瞻路径长度时将  $v_0$  修正为  $v_0 = a_{* \min}^2 / j_{* \min}$ ,带入式(3)、式(4),计算的  $l_{\min}$  可满足加工最小前瞻路径长度的要求. 曲线的实际长度由文献[5]中的辛普森自适应积分法求得.

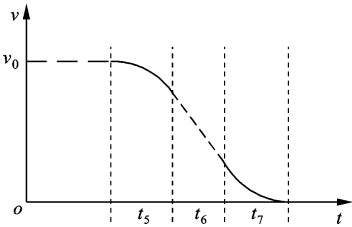


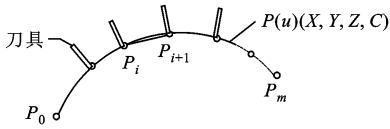
图 4 当前点 S 形曲线速度的减速曲线

2.2 实轴空间综合约束下的 S 形曲线速度规划参数

不同于梯形加减速规划,S 形的曲线速度加减速过程中不允许加速度突变,而在曲面加工中,加工进给方向不断改变,因此各切削路径微段内所允许的  $v$ 、 $a$ 、 $j$  不同,文献[3-5]中对每个曲线插补点应用独立的运动参数,难以对一段曲线路径进行整体规划处理,因此在 S 形曲线速度规划中,需要确定切削运动在前瞻路径长度内允许的参数. 由于映射到各实际机床轴上的运动参数不能超出各轴的驱动能力,因此需要在实轴空间的约束下,搜索切削运动速度规划的过程参数,运动参数值应不超过最大限制值. 为避免曲线路径求解运算的复杂性,可将前瞻路

径段内的曲线均匀离散为若干直线段,并搜索本段内允许的最大切削参数。

如图5所示,以当前路径段  $P_0P_m$  内两相邻点  $P_i, P_{i+1}$  为例,在实轴空间的综合约束下,计算  $\overline{P_iP_{i+1}}$  中  $v, a, j$  的限制值,特别是在五轴联动加工中,切削运动位移不仅包含线性轴的运动位移,还包含由旋转轴的角度位移产生的附加运动位移,因此五轴合成位移不是三维空间的轨迹,而是虚拟合成位移。通过计算当前路径段内的线性位移和角度位移,确定是否超出各轴运动的限制条件,最终求出整个前瞻路径段内的速度、加速度和冲击限制值<sup>[2]</sup>。



$P_0$ :当前插补点; $X, Y, Z, A, C$ :各实际机床轴坐标值;

$P_m$ :前瞻处理终点

图5 切削路径线性位移和角度位移的变化示意图

切削运动路径的合成位移为

$$\delta = ((X_{i+1} - X_i)^2 + (Y_{i+1} - Y_i)^2 + (Z_{i+1} - Z_i)^2 + K_A^2 (A_{i+1} - A_i)^2 + K_C^2 (C_{i+1} - C_i)^2)^{1/2}$$

式中: $K_A, K_C$  分别表示由  $A, C$  引起的运动位移转换系数; $A_i, C_i$  分别表示点  $P_i$  处的旋转轴角度。由  $X, Y, Z, C$  产生的分位移在本段位移中的比例系数为

$$k_X = \frac{X_{i+1} - X_i}{\delta}; k_Y = \frac{Y_{i+1} - Y_i}{\delta}; k_Z = \frac{Z_{i+1} - Z_i}{\delta}$$

$$k_A = \frac{K_A (A_{i+1} - A_i)}{\delta}; k_C = \frac{K_C (C_{i+1} - C_i)}{\delta}$$

$P_iP_{i+1}$  段内的限制运动参数为

$$v = \min\left(\frac{v_{*1}}{k_*}\right); a = \min\left(\frac{a_{*1}}{k_*}\right); j = \min\left(\frac{j_{*1}}{k_*}\right)$$

式中: $v_{*1}, a_{*1}, j_{*1}$  分别为各机床驱动轴的最大速度、最大加速度和最大冲击的限制值。将本次前瞻路径长度内的所有微线段的运动参数进行比较,选择最小的  $v, a, j$  作为本段路径前瞻的规划过程参数。

### 2.3 速度拐点判定方法

曲面加工实质是刀具以  $v(t)$  沿切削运动路径的运动过程,插补过程可看作曲线参数随  $t$  的变化,将  $u(t)$  进行二次泰勒展开<sup>[4,10]</sup>,得

$$u_{i+1} = u_i + \left. \frac{du}{dt} \right|_{t=t_i} T + \frac{1}{2} \left. \frac{d^2u}{dt^2} \right|_{t=t_i} T^2 + \xi_H \quad (5)$$

式中: $T$  为插补周期; $\xi_H$  为泰勒展开的高阶项。

在前瞻起点处,如果  $v_0$  小于本段路径的编程进给速度  $v_f$ ,切削运动速度首先以 S 形曲线速度加速到  $v_f$ ,然后以  $v_f$  作匀速运动。按式(6)进行插补运算,在插补过程中检测各插补点的运动参数是否超出机床实轴的驱动能力。文献[1,4]采用加工弦高误差限定方法计算  $R(u)$ ,但是没有考虑各驱动轴的运动路径和驱动能力对速度的约束,尤其在五轴联动的情况下,旋转轴可能成为限制速度的重要因素。本文根据机床实际轴不同的驱动能力进行综合评定,搜索速度拐点,并根据拐点约束进行速度自适应调整。若限制速度小于  $v_f$  的点为速度拐点,则判定条件为

$$v_*(l) = v_f H'_*(l) \leq v_{*max} \quad (6)$$

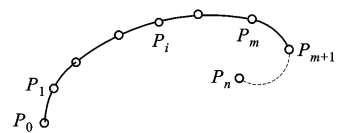
$$a_*(l) = v_f^2 H''_*(l) \leq a_{*max} \quad (7)$$

$$j_*(l) = v_f^3 H'''_*(l) \leq j_{*max} \quad (8)$$

当前点的各驱动轴运动必须同时满足以上条件,否则即为速度拐点。为利于规划计算,规定速度拐点处  $a=0, j=0$ ,则拐点处各轴的运动约束仅与  $v_f$  有关,并根据式(6)~式(8)求出最大的  $v_f$  值作为拐点限制速度。

## 3 S形曲线速度规划前瞻控制策略

确定 S 形曲线速度规划的过程参数后,对切削路径进行速度规划,如图6所示。在文献[11]中描述的梯形速度前瞻处理中,对搜索到的每一个速度拐点计算拐点限制速度,进行回溯规划。由于设定的前瞻路径长度在  $P_0, P_m$  间有  $P_i$  满足拐点减速的速度和长度条件,因此对  $P_m$  的速度限制不会影响  $P_0$  之前的已加工路径段的运动参数。如图7所示,在 S 形曲线速度规划中,虽然可以找到  $P_i$  满足减速规划的条件,但  $P_i$  的加速度难以在二次规划中保持一致,因此无法通过传统的拐点回溯方法找到合适的规划起点<sup>[12]</sup>。



$P_i$ :前瞻路径中的点; $P_n$ :数控代码的终点; $P_{m+1}$ : $P_m$  之后的点

图6 切削运动的前瞻过程

本文提出在前瞻过程中搜索速度规划节点,由规划节点将切削路径划分为若干个独立速度规划段,每个节点是上一规划段的终点,也是下一段的起点,各段内可以独立进行 S 形曲线速度规划,并且其运动曲线在速度节点处平滑连接,以满足切削运动

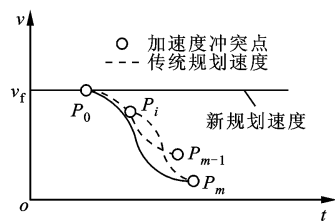


图 7 不同规划策略下的速度曲线示意图

的加速度连续要求. 前瞻处理的目标从传统的拐点搜索和回溯规划转变为速度节点的搜索和节点间的 S 形曲线速度规划.

在新的前瞻处理策略下, 前瞻处理起点为上个前瞻过程中确定的规划节点. 在这种模式下 (见图 6), 在前瞻处理路径  $P_0P_m$  中可能搜索到多个速度拐点, 但只能确立唯一规划节点, 即在前瞻路径段中最为限制的拐点, 如果路径段中无拐点, 则以本段前瞻路径终点为规划节点. 设  $P_i$  为  $P_0P_m$  段内发现的最能限制速度的拐点, 而本文前瞻路径段外的点  $P_{m+1}$  是另一速度拐点, 且  $v_{m+1} < v_i$ , 如果  $P_iP_{m+1}$  的路径长度不足以使  $v_i$  减速到  $v_{m+1}$ , 说明  $P_{m+1}$  对  $P_i$  的速度造成限制, 需要修正  $P_i$  的速度值, 则  $P_i$  不能判定为速度规划节点. 因此, 除了确定的前瞻长度外, 还需要对前瞻段内初步确定的速度节点进行附加减速段的前瞻处理, 以确定其后的限制点不会影响到该点的运动参数, 从而保证速度规划节点的稳定性.

以  $P_i$  为当前点, 可以得到  $P_i$  点的 S 形曲线速度的减速运动曲线. 在附加减速段前瞻路径中, 由式 (6)~式 (8) 计算运动中的轨迹点的限制速度, 与  $P_i$  点的减速曲线进行比较的结果如图 8 所示. 如果附加减速段中的轨迹点在减速曲线上方, 说明从点  $P_i$  有能力减速到该轨迹点的限制速度, 而速度值在减速曲线下方的轨迹点  $P_i$  则无法减速到该限制速度. 以该轨迹点取代  $P_i$  点作为新的速度节点, 按上述方法继续对其进行判定, 直到追加的前瞻区域中各点的限制速度均在规划节点的减速曲线上面为止. 通过新前瞻控制策略处理复杂的曲线轮廓切削运动速度的规划过程, 对加工过程进行速度前瞻, 其处理流程如图 9 所示.

#### 4 仿真和试验研究

本文在双转台立式铣床 SK5L-70100 上进行典型工件叶轮的五轴联动精加工, 使用通用五轴 CAM 软件 POWERMILL 设定的曲面精度为

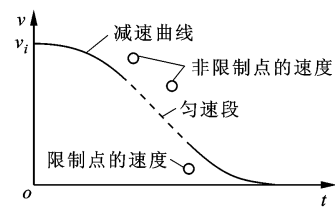


图 8 速度规划节点附加减速曲线判定示意图

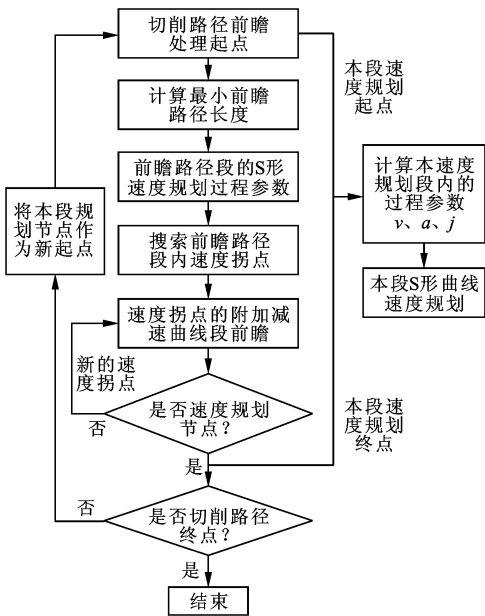


图 9 切削路径的速度规划流程

0.001 mm、弦高误差为 0.01 mm 的五轴数控代码, 选取其中任一个叶片边缘的路径进行速度处理仿真. 设切削进给速度为 3 000 mm/min, 各驱动轴加速度限制在  $10 \text{ m/s}^2$ , 冲击限制在  $1\,000 \text{ m/s}^3$ , 合成的切削运动速度曲线如图 10 所示. 将本文提出的速度前瞻控制策略在自主研发的五轴数控系统上实现. 在叶轮表面加工中采用传统微直线段链梯形的加减速方式, 其加工效果如图 11a 所示, 从零件表面可看出明显的加工纹路, 而采用本文的拟合曲线路径 S 形曲线速度规划处理后, 零件表面基本平滑, 其加工效果如图 11b 所示.

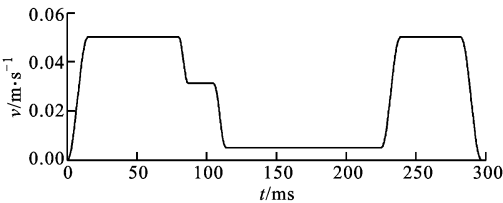
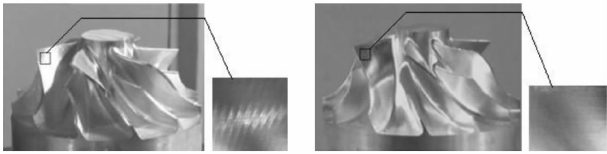


图 10 切削运动速度的曲线仿真图

叶轮的测量结果如表 1 所示. 其中, 叶轮的平均误差由三坐标测量仪测量叶片的上表面获得, 采用新前瞻控制策略, 系统加工过程中的 CPU 占用率



(a)传统加工效果 (b)本文加工效果

图 11 叶轮加工试验的零件表面效果对比图

为 60%左右,段处理速度为 20 000 段/s,可满足实时高速加工的要求.试验结果表明,采用新前瞻控制策略可有效减小由机床振动引起的表面振纹,从而得到平滑的表面质量,提高了机床的使用寿命.

表 1 叶轮在不同前瞻处理策略下的加工效果对比

| 速度模式 | 加工时间/min | 平均误差/mm | 表面粗糙度/ $\mu\text{m}$ |
|------|----------|---------|----------------------|
| 梯形   | 216      | 0.014   | 1.6                  |
| S 形  | 172      | 0.009   | 0.7                  |

5 结 论

本文提出了一种采用实轴空间综合约束的数控加工速度前瞻控制策略,对数控加工过程进行 S 形曲线速度规划,在保证零件切削运动平滑的同时,满足各机床实轴的驱动能力和加速度连续条件,消除了各轴运动突变引起的冲击振动.通过叶轮的仿真和试验,表明经过速度前瞻控制策略处理的叶轮零件加工速度平滑,显著提高了工件表面质量,降低了曲面轮廓误差,因此具有重要的工程应用意义.

参考文献:

[1] 任锬,傅建中,陈子辰. 高速加工中速度前瞻控制新算法研究 [J]. 浙江大学学报(工学版), 2006, 40(11): 1985-1988.

REN Kun, FU Jianzhong, CHEN Zichen. New look-ahead algorithm for velocity control in high speed machining [J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2006, 40(11): 1985-1988.

[2] 郑魁敬,钟海娜. 5 轴联动数控系统速度控制方法 [J]. 计算机集成制造系统, 2007, 13(5): 158-163.

ZHENG Kuijing, ZHONG Haina. Velocity control method of 5-axis simultaneous computerized numerical control system [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2007, 13(5): 158-163.

[3] ERKORKMAZ K, ALTINTAS Y. High speed CNC system design: part I Jjerk limited trajectory generation and quintic spline interpolation [J]. Machine

Tools & Manufacture, 2001, 41(9): 1323-1345.

[4] XU R Z, XIE L, LI C X, et al. Adaptive parametric interpolation scheme with limited acceleration and jerk values for NC machining [J]. Advanced Manufacturing Technology, 2008, 36(3/4): 353-354.

[5] WANG X, WANG J, RAO Z. An adaptive parametric interpolator for trajectory planning [J]. Advances in Engineering Software, 2010, 41(2): 180-187.

[6] 石川,赵彤,叶佩青,等. 数控系统 S 曲线加减速规划研究 [J]. 中国机械工程, 2007, 18(12): 1421-1425.

SHI Chuan, ZHAO Tong, YE Peiqing, et al. Study on S-shape curve acceleration and deceleration control on NC system [J]. China Mechanical Engineering, 2007, 18(12): 1421-1425.

[7] LIN K Y, UENG W D, LAI J Y. CNC codes conversion from linear and circular paths to NURBS curves [J]. Advanced Manufacturing Technology, 2008, 39(7/8): 760-773.

[8] YEH S S, SU H C. Implementation of online NURBS curve fitting process on CNC machines [J]. Advanced Manufacturing Technology, 2009, 40(5/6): 531-540.

[9] 赵鹏,楼佩煌,刘明灯,等. 基于 NURBS 曲线拟合的刀具路径优化方法 [J]. 计算机集成制造系统, 2011, 17(7): 1449-1455.

ZHAO Peng, LOU Peihuang, LIU Mingdeng, et al. Tool optimization method based on NURBS curve fitting [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2011, 17(7): 1449-1455.

[10] 梁宏斌,王永章,李霞. 自动调节进给速度的 NURBS 插补算法的研究与实现 [J]. 计算机集成制造系统, 2006, 12(3): 428-433.

LIANG Hongbin, WANG Yongzhang, Li Xia. Research and implementation of NURBS interpolation algorithm for adaptive feed speed [J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2006, 12(3): 428-433.

[11] 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): 125-130.

[12] SEKAR M, NARAYANAN V N, YANG S H. Design of jerk bounded federate with ripple effect for adaptive NURBS interpolator [J]. Advanced Manufacturing Technology, 2008, 37(5/6): 545-552.

(编辑 管咏梅)