

五轴联动加工中进给速度的控制算法

耿军晓^{1,2}, 李立伟², 李友刚³, 尹韶辉¹

(1. 湖南大学 国家高效磨削工程技术研究中心, 长沙 410082;
2. 郑州轻工业学院 机电工程学院, 郑州 450002;
3. 湖南长步道光学科技有限公司, 长沙 410202)

摘要: **目的** 研究刀具进给速度平稳性对五轴联动加工中复杂自由曲面表面粗糙度、轮廓精度的影响。**方法** 首先对五轴联动机床运动过程中的空间线性插补原理进行了分析, 推导出插补周期内各轴的分解速度数学模型。根据数控系统中不同的速度指令方式以及刀具在空间的实际运动距离, 分端铣和侧铣两种情况, 分别建立了刀具空间运动的实际速度计算模型, 然后根据机床各轴的最高速度及加速度约束条件, 对各轴分速度、分加速度进行校核处理, 最终求得刀具实际的合成速度。最后, 基于后置处理技术, 用开发的专用后置处理软件进行刀位源代码后置处理, 采用某叶轮试件进行了验证, 并对实验结果进行了分析。**结果** 在复杂曲面加工中, 稳定的表面进给速度会获得较高的表面质量及轮廓精度, 曲面曲率变化越大, 速度变化对加工质量的影响越大。在同等条件下切削, 刀具采用恒表面速度与采用恒进给速度相比, 获得的叶片进出汽边轮廓误差值由 0.1 mm 减小为 0.04 mm。**结论** 在五轴联动加工中, 越稳定的表面进给速度, 越能获得较高的表面质量和轮廓精度, 对于曲率变化较大的复杂曲面, 需要严格控制刀具的进给速度, 尽量获得稳定的表面速度以减少过切值, 从而提高零件表面质量。

关键词: 五轴联动; 线性插补; 表面进给速度; 表面质量

中图分类号: TG580 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)07-0008-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.07.002

Control Algorithm of Feed Rate in Five-axis Linkage Machining

GENG Jun-xiao^{1,2}, LI Li-wei², LI You-gang³, YIN Shao-hui¹

(1. National Engineering Research Center for High Efficiency Grinding, Hunan University, Changsha 410082, China;
2. School of Mechanical & Electronic Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China;
3. Hunan Chiopt Optical Technology Co., Ltd, Changsha 410202, China)

ABSTRACT: The work aims to study influence of tool feed rate smoothness on surface roughness and contour accuracy of complex freeform surfaces in five-axis machining. Firstly, the principle of spatial linear interpolation in operation of five axis machine tool was analyzed, and mathematical model was derived for velocity component of each axis in the interpolation period. According to different modes of velocity instruction and actual movement distance of the tool in the numerical control system, actual velocity calculation model was built for spatial movement of tool in terms of end milling and side milling. Then speed and acceleration component of each axis were checked and processed according to the maximum speed and acceleration

收稿日期: 2018-01-11; 修订日期: 2018-06-14

Received: 2018-01-11; Revised: 2018-06-14

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51675171, 51505434); 河南省教育厅科学技术研究重点项目 (13A460378)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (51675171, 51505434); Key Project of Science and Technology Research of Henan Provincial Education Department (13A460378)

作者简介: 耿军晓 (1979—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为精密超精密加工技术与装备。

Biography: GENG Jun-xiao (1979—), Male, Doctor, Research focus: precision and ultra-precision machining technology and equipment.

通讯作者: 尹韶辉 (1967—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为纳米制造、超精密加工、超微细加工和超高速加工。

Corresponding author: YIN Shao-hui (1967—), Male, Doctor, Professor, Research focus: nano manufacturing, ultra precision machining, ultra fine machining and ultra high speed machining.

constraints of each axis on the machine tool, and actual synthetic speed of the tool was finally obtained. Finally, based on post-processing technology, special post-processing software as-developed was used for source code post processing of cutter location, and an impeller test piece was used for verification, and experimental results were analyzed. In the process of complex surface machining, high surface quality and contour precision were obtained at stable surface feed rate. Changes in feed rate had great effects on machining quality if surface curvature changed greatly. Under the same cutting conditions, contour error of blade leading and trailing edge was reduced from 0.1 mm (at constant feed rate) to 0.04 mm (at constant surface speed). In five-axis machining, the more stable the surface feed rate is, the higher the surface quality and the contour precision are. For the complex surface exhibiting great curvature change, it is necessary to strictly control feed rate of tool and obtain stable surface speed as far as possible, so as to reduce overcut value and improve surface quality of parts.

KEY WORDS: five-axis linkage; linear interpolation; surface feed rate; surface quality

数控五轴联动机床是在三轴联动机床基础上增加了两个回转轴, 由于回转轴的参与, 刀具在运动过程中大大增加了空间自由度, 面对复杂曲面零件加工时刀具更加灵活, 对于有高精度要求的复杂曲面零件的加工具有无与伦比的优势^[1], 已广泛运用于航空、航天、船舶、汽车工业领域内复杂叶片、叶轮类零件的精密制造。但是, 由于增加两个回转轴使得机床的运动链更加复杂, 与传统的三轴机床相比, 产生了相应的原理性误差^[2-3]。由于回转轴的线性插补, 在五轴联动加工中, 加工复杂零件需要机床的五个轴完成连续插值, 当速度不是定值时, 可能会引起不均匀运动, 在这种情况下, 由计算机控制 (CNC) 的驱动器和机床传动系统会直接表现为轴的运动不均匀, 从而严重影响零件的表面质量。

针对五轴加工中的速度问题, 为提高复杂零件表面质量, 充分发挥五轴机床的高精度性能, 众多学者做了大量的研究工作。由于通用 CAM 软件编制的 G 代码程序是一个恒定的进给速度, 会导致五轴的进给速度不连续性, 降低表面质量, 因此有些作者把注意力集中在速率建模及优化上。B. Gassara 等^[4]建立速率模型用于圆弧插补中的速率评估, 减少加工周期, 提高表面质量。Firman Ridman 等^[5]通过速率优化, 缩短加工时间, 提高加工效率。P. Gray^[6]及 Xavier Beudaert 等^[7]在沿刀具路径上对任意具有跃度轴约束及切向跃度约束结构的节点运动进行平滑处理, 该方法已在三轴和五轴实现了线性插值 (G1) 和非均匀有理样条插补。Sung-Ho Nam 等^[8]提出一种实时跃度参数补偿方法, 可以在一系列直线和圆弧过渡区域产生平滑速率曲线。Amaia Calleja 等^[9]在五轴激光熔覆工艺中利用速度变化控制算法, 获得更均匀的熔覆结构。李永桥等^[10]基于后置处理技术, 在开发的后置处理器中设计了速度处理功能模块对进给速度进行处理, 处理后的 G 代码具有满足机床特性的进给速度值。周瑞红等^[11]基于 PROE 通用软件平台, 提出了进给速度控制技术和 G 代码程序后置处理方法, 获得的程序能有效提高零件形位精度和加工效率。也有学

者从数控系统控制方面入手, 基于伺服插补能力做了速度控制方面的研究, 如赵国勇等^[12]采用一种数控机床系统中关于跃度连续的加减速方法, 推导运动轮廓不同阶段方程, 获得更平滑的加速度和速度轮廓运动曲线, 且更具柔性, 并提高了工件表面质量。

纵观各学者的研究发现, 虽然研究成果均能有效提高零件表面质量, 但解决的均是局部拐角与直线区交接部位的速度控制。本文拟从五轴联动线性插补原理出发, 研究在整个刀具路径轨迹过程中能获得较均匀的表面进给速度的方法, 通过各运动轴在协同运动过程中的分速度与刀具整体合成速度的关系, 提出了基于各轴分速度、分加速度约束条件下, 获得恒定刀尖点速度控制方法, 来提高复杂曲面零件的轮廓精度。首先, 从通用软件前置处理获得的刀位源文件, 通过线性插补建立了各轴分速度、加速度模型, 然后基于后置处理技术开发了专用后置处理软件, 通过对刀位源文件的处理获得了具有动态变换的进给速度的 G 代码程序。最后通过具有复杂曲面结构的某叶轮^[13-15]试件的实际切削实验验证了该方法的正确性。

1 五轴进给速度线性插补策略

在五轴联动加工中, 加工曲面的刀具路径轨迹被离散成众多微小直线段, 通过数控系统线性插补的方式进行轨迹方向及坐标控制。为详细阐明五轴进给速度的插补过程, 本文以 AC 式双摆头数控机床为研究对象, 来说明五轴进给速度线性插补算法中速度的插补过程。

假设五轴联动加工两相邻数控程序中机床的坐标值分别为 $(X_i, Y_i, Z_i, A_i, C_i)$ 和 $(X_{i+1}, Y_{i+1}, Z_{i+1}, A_{i+1}, C_{i+1})$, 与之对应的刀位文件中刀位信息分别为 $(u_{xi}, u_{yi}, u_{zi}, p_{xi}, p_{yi}, p_{zi})$ 和 $(u_{xi+1}, u_{yi+1}, u_{zi+1}, p_{xi+1}, p_{yi+1}, p_{zi+1})$, 设在该程序段中刀具的进给速度为 F_s , 线性插补周期为 T , 机床各平动轴和回转轴的实际位移为 $(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z, \Delta A, \Delta C)$, 根据线性插补原理, 在该线段间刀具线性插补的合成位移为:

$$\Delta L = \sqrt{(\Delta X)^2 + (\Delta Y)^2 + (\Delta Z)^2 + (K_a \Delta A)^2 + (K_c \Delta C)^2} \quad (1)$$

式中: K_a 为 A 角的角度转换成位移长度的系数,

$$K_a = \frac{1}{180} \sqrt{\left(\frac{X_{i+1} + X_i}{2}\right)^2 + \left(\frac{Y_{i+1} + Y_i}{2}\right)^2}; K_c \text{ 为 } C \text{ 角的角}$$

度转换成位移长度的系数, $K_c = \frac{1}{180} \left(H + \left| \frac{Z_{i+1} + Z_i}{2} \right| \right)$

(H 为回转中心到工件坐标原点的距离); $\Delta X = X_{i+1} - X_i$, $\Delta Y = Y_{i+1} - Y_i$, $\Delta Z = Z_{i+1} - Z_i$, $\Delta A = A_{i+1} - A_i$, $\Delta C = C_{i+1} - C_i$ 。

根据线性插补原理, 各轴的插补周期相等, 则有:

$$\frac{|\Delta X|}{F_X} = \frac{|\Delta Y|}{F_Y} = \frac{|\Delta Z|}{F_Z} = \frac{|\Delta A|}{F_A} = \frac{|\Delta C|}{F_C} = \frac{\Delta L}{F_s} = T \quad (2)$$

其中, F_X (mm/min)、 F_Y (mm/min)、 F_Z (mm/min)、 F_A (°/min)、 F_C (°/min) 为机床各运动轴的速度, 由 (3) 式算得。

$$\begin{cases} F_X = \frac{|\Delta X|}{\Delta L} F_s \\ F_Y = \frac{|\Delta Y|}{\Delta L} F_s \\ F_Z = \frac{|\Delta Z|}{\Delta L} F_s \\ F_A = \frac{|\Delta A|}{\Delta L} F_s \\ F_C = \frac{|\Delta C|}{\Delta L} F_s \end{cases} \quad (3)$$

从公式 (3) 可以看出, 在五轴联动过程中, 刀具的速度实际是五轴的分速度合成, 其大小直接受五个轴分速度的影响。

2 五轴刀具进给速度控制算法

在五轴联动加工中, 程序中所给定的速度并不是切削过程中刀具接触点速度, 如图 1 所示。图中刀具中心点位置 P 的速度 F 为程序中给定的速度, V 为刀具与工件表面接触点速度。由于旋转轴的参与, 当程序进给速度 F 恒定时, 刀具接触点速度 V 会随着曲率的变化而变化, 导致不稳定的切削功率, 从而影响表面质量。因此, 需对程序进给速度进行优化控制, 从而获得较为稳定的表面接触点速度。

2.1 不同数控速度控制 G 代码下的速度算法

在数控系统中, 控制刀具进给速度 F 指令的刀具准备功能代码 G 代码有 G93 和 G94 两种模式, 不同的 G 代码指令模式下, 刀具的进给速度 F 代表的含义不同, 因此在研究刀具的速度控制方法时, 需要按照所控制的 G 代码模式分别讨论进给速度的控制算法。

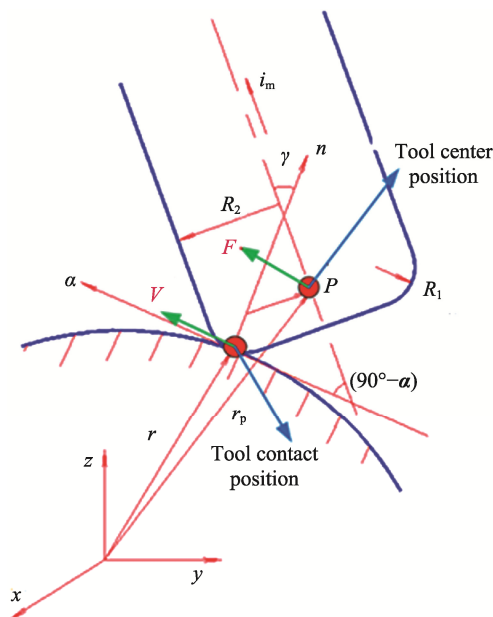


图 1 五轴切削示意图

Fig.1 Schematic diagram of five-axis machining

2.1.1 G93 模式

当刀具进给速度控制选择 G93 模式时, 进给速度 F (mm/min) 定义为相邻空间刀具坐标点刀具运动所用时间的倒数, 即:

$$F = \frac{1}{t} \quad (4)$$

式中: t (min) 为插补周期, 可由公式 (5) 获得。

$$t = \frac{\Delta d}{f_0} \quad (5)$$

式中: f_0 为根据工艺手册查得的进给速度; Δd 为机床各运动轴相对于工件的合成位移, 显然 $\Delta d \neq \Delta L$, Δd 的算法有下面两种情况。

1) 五轴端铣。在五轴端铣加工过程中, 刀具只有端部参与切削作用, 而且刀具与工件表面属于点接触的关系, 因此在这种情况下, 通常把刀具中心点的运动作为整个刀具的实际运动, 此时刀具相对于工件的实际运动距离 Δd 为刀位文件中任意两相邻刀心点的距离, 即:

$$\Delta d = \sqrt{(\Delta u_x)^2 + (\Delta u_y)^2 + (\Delta u_z)^2} = \sqrt{(u_{xi+1} - u_{xi})^2 + (u_{yi+1} - u_{yi})^2 + (u_{zi+1} - u_{zi})^2} \quad (6)$$

2) 五轴侧铣。在五轴侧铣加工过程中, 刀具是整个侧刃与工件表面接触, 此时刀具和工件是线接触的关系, 刀具相对于工件的实际距离 Δd 可分两种情况进行讨论。

(1) 6 倍刀具半径经验公式近似计算:

$$r_c = r_0 + 6R \quad (7)$$

式中: r_c 为刀具刀尖点空间位置 (x_c, y_c, z_c); r_0 为刀具刀心点的空间位置 (u_{xi}, u_{yi}, u_{zi}); R 为切削刀具的

半径。

(2) 计算刀具与工件的相对位移 Δd :

$$\Delta d = \frac{1}{2}(\sqrt{(\Delta u_x)^2 + (\Delta u_y)^2 + (\Delta u_z)^2} + \sqrt{(\Delta x_c)^2 + (\Delta y_c)^2 + (\Delta z_c)^2}) \quad (8)$$

综上所述, 当数控系统中采用 G93 模式时, 五

$$F = \frac{f_0}{\Delta d} = \begin{cases} \frac{f_0}{\sqrt{(\Delta u_x)^2 + (\Delta u_y)^2 + (\Delta u_z)^2}} & \text{(端铣)} \\ \frac{f_0}{\frac{1}{2}(\sqrt{(\Delta u_x)^2 + (\Delta u_y)^2 + (\Delta u_z)^2} + \sqrt{(\Delta x_c)^2 + (\Delta y_c)^2 + (\Delta z_c)^2})} & \text{(侧铣)} \end{cases} \quad (9)$$

2.1.2 G94 模式

当刀具进给速度控制选择 G94 模式时, 进给速度 F 定义为刀具的运动空间距离除以运动时间:

$$F = \frac{\Delta L}{T} \quad (10)$$

参考 G93 指令进给速度的控制算法, 当 G94 指

轴联动加工中刀具的进给速度 F 值可以由公式 (9) 来进行计算。

当刀位源文件中相邻空间刀位点的空间位置不变时, 公式(9)中的端铣加工速度计算式分母为零, 导致计算的进给速度趋于无穷大, 应根据机床伺服驱动能力进行限制。

令生效时, 进给速度 F 的控制算法如式 (11)。

因数控系统一般把($^\circ$)/min 处理成 mm/min, 为了简化计算, 可将式 (11) 中的系数 K_a 和 K_c 设置为 1, 并将计算出来的 F 值乘以一系数, 这样也可以通过调整该系数来调整进给速度, 如式 (12)。

$$F = \frac{\Delta L}{\Delta d} f_0 = \begin{cases} \frac{\sqrt{(\Delta X)^2 + (\Delta Y)^2 + (\Delta Z)^2 + (K_a \Delta A)^2 + (K_c \Delta C)^2}}{\sqrt{(\Delta u_x)^2 + (\Delta u_y)^2 + (\Delta u_z)^2}} f_0 & \text{(端铣)} \\ \frac{\sqrt{(\Delta X)^2 + (\Delta Y)^2 + (\Delta Z)^2 + (K_a \Delta A)^2 + (K_c \Delta C)^2}}{\frac{1}{2}(\sqrt{(\Delta u_x)^2 + (\Delta u_y)^2 + (\Delta u_z)^2} + \sqrt{(\Delta x_c)^2 + (\Delta y_c)^2 + (\Delta z_c)^2})} f_0 & \text{(侧铣)} \end{cases} \quad (11)$$

$$F = K_f \frac{\Delta L}{\Delta d} f_0 = \begin{cases} K_f \cdot \frac{\sqrt{(\Delta X)^2 + (\Delta Y)^2 + (\Delta Z)^2 + (\Delta A)^2 + (\Delta C)^2}}{\sqrt{(\Delta u_x)^2 + (\Delta u_y)^2 + (\Delta u_z)^2}} f_0 & \text{(端铣)} \\ K_f \cdot \frac{\sqrt{(\Delta X)^2 + (\Delta Y)^2 + (\Delta Z)^2 + (\Delta A)^2 + (\Delta C)^2}}{\frac{1}{2}(\sqrt{(\Delta u_x)^2 + (\Delta u_y)^2 + (\Delta u_z)^2} + \sqrt{(\Delta x_c)^2 + (\Delta y_c)^2 + (\Delta z_c)^2})} f_0 & \text{(侧铣)} \end{cases} \quad (12)$$

式 (12) 中: K_f 为调整系数, 可根据具体的工艺要求设定, 一般将 K_f 设置为 1。当刀位文件中相邻刀位点的坐标不变时, 公式 (12) 中的端铣加工速度计算式中分母为零, 导致计算的进给速度趋于无穷大, 应根据机床伺服驱动能力进行限制。

2.2 最大运动轴进给速度限制

在五轴机床设计时, 由于伺服驱动能力的限制, 实际机床中各运动轴的最大运动速度及最大加速度均有极限值限制, 当程序速度分解后, 某一轴超过其机床伺服能力会导致其他轴的实际最大速度衰减, 最终导致合成的表面速度降低, 从而引起不稳定的切削过程。因此, 在五轴联动过程中需要校核运动轴的进给速度, 保证进给速度在各运动轴的分速度不能超出最大速度, 同时程序段间的各轴加速度值也不能超出运动轴的最大加速度极限值。

2.2.1 最大速度限制

刀具进给速度 F 指令值是机床各轴运动分速度的合成运动速度, 代表程序中给定的进给速度。如果进给速度过大, 会导致机床某一轴的速度超出机床的伺服能力范围, 造成机床某一轴掉步而形成较大的加工误差。因此, 在实际加工应用中, 需要根据机床的极限速度指标对机床各轴的分速度、分加速度进行校核与修正, 即:

$$F_{Ai} \leq F_{A\max} \quad (A = X, Y, Z, A, C) \quad (13)$$

当各运动轴的分速度及分加速度超出了机床的允许范围时, 需要对进给速度 F 进行修正, 此时取机床运动轴的最大速度, 其余轴的实际速度根据限制轴的运动时间反求, 获得新的进给速度。进给速度 F 修正公式为:

$$F = \min \left\{ F_{A\max} \frac{\Delta L}{|\Delta A|} \quad (A = X, Y, Z, A, C) \right\} \quad (14)$$

2.2.2 最大加速度的限制

复杂自由曲面的曲率变化剧烈时,刀具在相邻空间刀位点间运动,会导致机床旋转轴角度的变化幅度较大,引起旋转轴频繁加减速,有可能超过其极限加速度,导致整个速度衰减,使运动轴产生不均匀运动,导致过切、欠切。为保证切削过程中刀具在工件表面平滑过渡,避免产生冲击,应对刀具在相邻空间区间的加速度进行限制,使机床运动轴的加速度在许用范围内。假设空间两相邻空间点的速度中第 i 个程序段各轴的速度分量为 F_{Ai} , 第 $i+1$ 个程序段各轴的速度分量为 F_{Ai+1} , 此时:

$$\begin{cases} F_{Ai} = F_i \frac{|\Delta A_i|}{\Delta L_i} \\ F_{Ai+1} = F_{i+1} \frac{|\Delta A_{i+1}|}{\Delta L_{i+1}} \end{cases} \quad (A = X, Y, Z, A, C) \quad (15)$$

两相邻程序段的速度变化需满足如下条件:

$$|F_{Ai+1} - F_{Ai}| \leq a_{A\max} \cdot T_s \quad (A = X, Y, Z, A, C) \quad (16)$$

式中: $a_{A\max}$ 为运动轴的极限加速度值; T_s 为数控系统的插补周期。当刀具空间相邻点间的实际速度能满足式(16)时,直接采用原始进给速度,当不满足时,需对 F_{Ai+1} 进行修正,其修正值如下:

$$F_{Ai+1} = a_{A\max} \cdot T_s / \left| \frac{|\Delta A_i|}{\Delta L_i} - \frac{|\Delta A_{i-1}|}{\Delta L_{i-1}} \right| \quad (A = X, Y, Z, A, C) \quad (17)$$

3 后置处理实现

根据计算的速度控制算法及机床的基本运动学模型,基于高级语言开发专用的后置处理软件,速度控制流程图如图2所示。首先,读取刀位文件相邻刀位点的坐标值和对应数控程序中的机床坐标值,接着计算线性插补程序段的合成位移 ΔL 和刀具相对工件的实际距离 Δd 。然后,判断进给速度格式,若 G93 生效时,采用式(9)计算进给速度;若 G94 生效时,采用式(12)计算进给速度。再次,根据程序中给定的进给速度计算机床各运动轴的分速度,通过机床的极限值判断各运动轴的分速度和加速度是否超出了机床的限制速度和限制加速度的最大值,如果超出了,则按照式(14)和(17)对进给速度进行修正。最后,判断文件是否处理完毕,处理完成后则输出进给速度。根据五轴刀具进给速度控制计算流程图,利用高级语言基于运动学模型开发专用后置处理软件,利用速度控制模块对进给速度控制算法进行验证,得到如图3所示的结果,由图3可得,进给速度根据加工零件曲面特性和机床的伺服能力来实现动态调整。

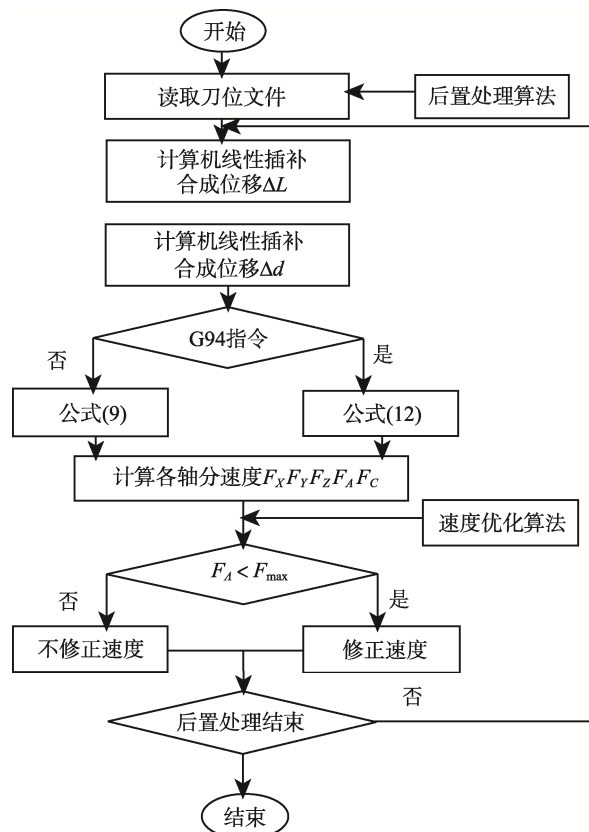


图2 五轴速度控制策略流程

Fig.2 Flow chart of control strategy of five-axis feed rate

| | |
|-----|---|
| N1 | G17 G90 DIAMOF;*GP* |
| N2 | T1 D1 M6; |
| N3 | M03 S6000; |
| N4 | G90 G00 G40 G55 X-16.735 Y-131.802 ;*GP* |
| N5 | G64; |
| N6 | FCGROUP (X, Y, Z, A, C); |
| N7 | SOFT; |
| N8 | G00 X-16.735 Y-131.802 Z121.059 A-69.809 C112.133; |
| N9 | G00 X-16.735 Y-124.965 Z118.545 A-69.809 C112.133; |
| N10 | G01 X-16.768 Y-124.522 Z118.269 A-69.809 C112.133 F520; |
| N11 | G01 X-16.802 Y-124.051 Z118.042 A-69.809 C112.133 F540; |
| N12 | G01 X-16.837 Y-123.56 Z117.865 A-69.809 C112.133 F560; |
| N13 | G01 X-16.874 Y-123.053 Z117.741 A-69.809 C112.133 F580; |
| N14 | G01 X-16.912 Y-122.536 Z117.671 A-69.809 C112.133 F600; |
| N15 | G01 X-16.934 Y-122.237 Z117.646 A-69.809 C112.133 F620; |
| N16 | G01 X-16.961 Y-121.86 Z117.615 A-69.809 C112.133 F640; |
| N17 | G01 X-16.988 Y-121.482 Z117.583 A-69.809 C112.133 F660; |
| N18 | G01 X-17.016 Y-121.104 Z117.552 A-69.809 C112.133 F680; |
| N19 | G01 X-17.043 Y-120.727 Z117.52 A-69.809 C112.133 F700; |
| N20 | G01 X-17.072 Y-120.339 Z117.488 A-69.809 C112.133 F720; |
| N21 | G01 X-17.1 Y-119.941 Z117.454 A-69.809 C112.133 F740; |
| N22 | G01 X-17.129 Y-119.554 Z117.422 A-69.809 C112.133 F760; |
| N23 | G01 X-17.156 Y-119.176 Z117.39 A-69.809 C112.133 F780; |
| N24 | G01 X-17.183 Y-118.798 Z117.358 A-69.809 C112.133 F800; |
| N25 | G01 X-17.211 Y-118.421 Z117.326 A-69.809 C112.133 F820; |
| N26 | G01 X-17.238 Y-118.043 Z117.294 A-69.809 C112.133 F840; |
| N27 | G01 X-17.265 Y-117.656 Z117.253 A-69.809 C112.133 F860; |
| N28 | G01 X-17.28 Y-117.281 Z117.194 A-69.809 C112.133 F880; |
| N29 | G01 X-17.277 Y-116.913 Z117.12 A-69.809 C112.133 F900; |

图3 进给速度处理结果

Fig.3 Processing results of feed rate

4 实验

为验证速度控制算法的有效性,本文采用具有高曲率变化的某叶轮试件进行验证。在UG软件编制刀

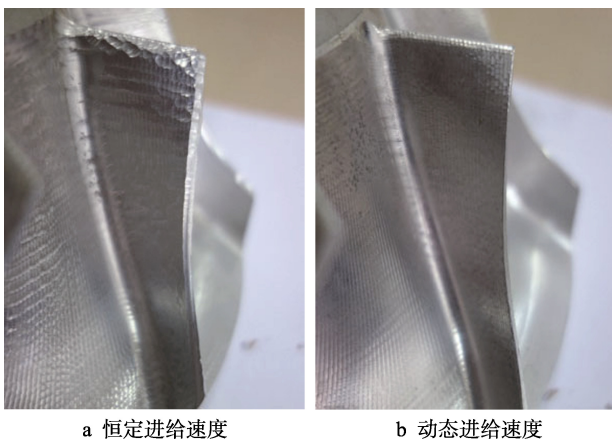
路轨迹时, 采用相同的残留高度及行距等工艺参数, 分二种速度控制算法进行切削加工实验(恒定进给速度及动态进给速度), 切削加工过程如图 4 所示, 实验结果如图 5 所示。从图 5 可以看出, 图 5a 中叶轮表面质量较差, 存在过切和欠切现象; 图 5b 中叶轮表面质量好, 整个型面光滑过渡, 这验证了动态进给控制速度方法在复杂曲面加工中能获得较高的表面粗糙度。

为了进一步直观比较两种加工方法, 分别取两种加工状态下叶片的同一截面, 通过三坐标采点实测, 然后拟合为曲线, 并与理论轮廓曲线比对。采用恒定进给速度时, 实测轮廓与理论轮廓的最大误差为 0.1 mm, 最大过切量为 0.06 mm; 采用动态进给速度时, 叶轮叶片的实测轮廓与理论轮廓的最大误差为 0.04 mm, 进汽边最大过切量降为 0.03 mm。



图 4 试件切削过程

Fig.4 Cutting process of impeller test piece



a 恒定进给速度

b 动态进给速度

图 5 叶轮切削加工后

Fig.5 Impeller after cutting: a) constant feed rate, b) dynamic feed rate

5 结论

1) 根据五轴联动线性插补原理, 可分析各运动

轴的速度计算模型并进行分析优化。

2) 基于相邻刀位点空间距离, 依据机床各轴的最大速度、加速度约束条件, 建立了可获得实际的刀具空间插补进给速度模型。

3) 基于后置处理技术, 利用机床的运动学模型, 加载动态速度控制优化算法, 可有效提高零件的表面质量。

参考文献:

- [1] 么居标, 曹著明, 孙红梅, 等. 复杂曲面五轴数控加工关键技术研究[J]. 机械设计与制造, 2017(7): 128-130.
YAO Ju-biao, CAO Zhu-ming, SUN Hong-mei, et al. The Research of Key Technology Based on Five Axis NC Machining of Complex Surface[J]. Mechanical Design and Manufacturing, 2017(7): 128-130.
- [2] 吴大中, 王宇晗, 冯景春, 等. 五坐标数控加工的非线性运动误差分析与控制[J]. 上海交通大学学报, 2007, 41(10): 1608-1612.
WU Da-zhong, WANG Yu-han, FENG Jing-chun, et al. Analysis and Control of the Nonlinear Errors in Five-axis NC Machining[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2007, 41(10): 1608-1612.
- [3] 杨旭静, 周元生, 陈泽忠, 等. 五轴数控加工中旋转轴运动引起的非线性误差分析与控制[J]. 机械工程学报, 2012, 48(3): 140-146.
YANG Xu-jing, ZHOU Yuan-sheng, CHEN Ze-zhong, et al. Analysis and Control of Tool Path Interpolation Error in Rotary Axes Motions of Five-axis CNC Milling[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(3): 140-146.
- [4] GASSARA B, BAILI M, DESSEIN G, et al. Feed Rate Modeling in Circular-Circular Interpolation Discontinuity for High-speed Milling[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 65: 1619-1634.
- [5] RIDWAN F, XU Xun, FREDERICK C L. Adaptive Execution of an NC Program with Feed Rate Optimization[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 63: 1117-1130.
- [6] GRAY P, BEDI S, ISMAIL F, et al. Comparison of 5-axis and 3-axis Finish Machining of Hydroforming Die Inserts[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2001, 17(8): 562-569.
- [7] BEUDAERT X, PECHARD P, TOURNIER C. 5-axis Tool Path Smoothing Based on Drive Constraints[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2011, 51(12): 958-965.
- [8] 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: 27-36.

- [9] CALLEJA A, TABERBERO I, EALO J A, et al. Feed Rate Calculation Algorithm for the Homogeneous Material Deposition of Blisk Blades by 5-axis Laser Cladding[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 74: 1219-1228.
- [10] 李永桥, 谌永祥, 陈强, 等. 关于后置处理器设计中进给速度处理方法的研究[J]. 机床电器, 2010(3):10-12.
LI Yong-qiao, CHEN Yong-xiang, CHEN Qiang, et al. Research on Processing Method of Feed Rate in Designing the System of Post Processor[J]. Machine Tool Electric Apparatus, 2010(3): 10-12.
- [11] 周瑞红, 成群林, 穆英娟, 等. 基于 Pro/E 的多轴联动数控加工进给速度控制技术研究[J]. 工艺与检测, 2009(1): 123-125.
ZHOU Rui-hong, CHENG Qun-lin, MU Ying-juan, et al. Research on Feed-rate Control for Multi-axis CNC Machining Technology based on Pro/E[J]. Technology and Test, 2009(1): 123-125.
- [12] 赵国勇, 赵玉刚, 赵庆志. 数控运动中加加速度连续的增加减速度[J]. 计算机集成制造系统, 2011, 17(2): 316-320.
ZHAO Guo-yong, ZHAO Yu-gang, ZHAO Qing-zhi. Acceleration & Deceleration Approach Based on Continuous Jerk in CNC Motion[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2011, 17(2): 316-320.
- [13] SUN Yu-wen, BAO Yu-rong. A Cutter Orientation Modification Method for Five-axis Ball-end Machining with Kinematic Constraints[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 67(1): 2863-2874.
- [14] CHEN K H. Investigation of Tool Orientation For Milling Blade of Impeller in Five-axis Machining[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011, 52(5): 235-244.
- [15] CHEN H P, KUO H H, TSAY D M. Removing Tool Marks of Blade Surfaces by Smoothing Five-axis Point Milling Cutter Paths[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209: 5810-5817.