

刀具摆角对复杂曲面轮廓精度的影响研究

吴志清¹, 唐清春²

(1. 广州工程技术职业学院, 广州 510075;
2. 广西科技大学 工程训练中心, 广西 柳州 545006)

摘要: **目的** 通过优化五轴联动加工中刀具摆角参数, 基于后置处理技术提高复杂零件表面加工的轮廓精度。**方法** 针对回转轴非线性运动造成的刀具姿态误差过大会导致零件轮廓精度低, 提出了一种摆角优化方法。首先, 对回转轴线性插补产生的刀具姿态误差进行分析, 控制回转角的摆动幅度大小和初始位置; 其次, 将线性插补后的刀轴矢量投射到理论上始末两点矢量构成的平面上获得新的插补矢量, 通过线性插补刀轴矢量来优化刀具空间姿态; 最后, 以某叶轮试件通过仿真及实际加工实验进行了验证。**结果** 通过摆角优化方法后, 叶片轮廓与理论轮廓的轮廓误差由 0.08 mm 减小到 0.04 mm, 最大过切量也由 0.03 mm 减小到 0.01 mm。刀具摆角优化后, 能大大提高复杂曲面零件的轮廓精度。**结论** 基于后置处理技术对五轴机床回转轴摆角进行优化, 在通用算法基础上加载角度优化算法, 开发专用的后置处理器处理 G 代码程序, 是一种提高复杂曲面加工轮廓精度的可行措施。实验验证了该方法的有效性。

关键词: 五轴联动; 姿态误差; 刀具摆角; 后置处理; 刀轴矢量

中图分类号: TG502 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)07-0139-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.07.019

Influence of Tool Angle on Contour Precision of Complicated Surface

WU Zhi-qing¹, TANG Qing-chun²

(1. Guangzhou Institute of Technology, Guangzhou 510075, China;
2. Engineering Training Center, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou 545006, China)

ABSTRACT: The work aims to improve contour precision of surface processing of complex parts based upon post processing technology by optimizing parameters of tool swing angle for five-axis linkage machining. A method of optimizing swing angle was proposed since excess tool posture error arising from non-linear motion of rotating shaft would lead to lower contour precision. First of all, tool posture error arising from linear interpolation of rotating shaft was analyzed to control swing amplitude and initial position of angle of revolution. Then a new interpolation vector was obtained as tool-axis vector after linear interpolation was projected onto the plane theoretically consisting of vectors in initial and end point. Finally, it was verified by performing simulation and actual experiment using an impeller specimen. After the swing angle optimization method was applied, contour error of blade contour and theoretical contour was reduced from 0.08 mm to 0.04 mm, and the maximum overcut volume was also reduced from 0.03 mm to 0.01 mm. After the tool swing angle was optimized, the contour precision of the complex surface parts could be greatly improved. Swing angle of five-axis machine tool is optimized based on post processing technology. Loading angle optimization algorithm is developed based upon general algorithm. Developing a dedicated post processor to

收稿日期: 2018-01-06; 修订日期: 2018-05-12

Received: 2018-01-06; Revised: 2018-05-12

基金项目: 广西教育厅项目 (0314101401)

Fund: Guangxi Education Department Project (0314101401)

作者简介: 吴志清 (1967—), 女, 硕士, 副教授, 主要研究方向为数控加工技术。

Biography: WU Zhi-qing (1967—), Female, Master, Associate Professor, Research focus: NC machining technology.

process G code program is a feasible measure of improving the contour precision of complicated curved surface. Effectiveness of the method is verified by experiments.

KEY WORDS: five-axis linkage; tool posture error; tool swing angle; post processing; tool axis vector

五轴联动机床在三轴联动机床基础上增加了两个回转轴, 扩大了刀具的空间自由度, 在复杂曲面零件的加工中更加灵活, 对于有高精度要求的复杂曲面零件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机床的运动链更加复杂, 产生了相应的原理性误差^[2-3], 最典型的就是刀具姿态误差。刀具姿态误差产生的原因是由于数控系统采用线性插补方式实现, 导致在插补过程中刀具与回转轴间存在插补误差, 从而不能保证加工状态中刀具轨迹始终按程序设计的路径来切削工件。

针对刀具姿态误差, 众多学者对其做了大量的研究工作, 解决刀具姿态误差的有效措施目前主要有两种: 方法一, 在路径轨迹规划的前置处理中解决; 方法二, 在后置处理中通过插入中间点、优化 G 代码程序的方式进行解决。对于方法一, 毕庆贞等^[4]提出了基于 GPU 的刀具可达性检测方法, 在刀具可行空间中进行刀轴可行性分析及刀具可达方向锥的计算; HO 等^[5]用等弧长逼近法生成加工轨迹, 通过约束弧长长度重新生成新的加工轨迹以避免干涉; WANG 等^[6]提出了通过构造可行域的方法, 控制刀具相邻点间的空间距离, 进而控制刀轴矢量平滑过渡。对于方法二, TAKEUCHI 等^[8-9]提出在前置文件基础上对刀位点进行线性加密, 通过限制最大线性误差值, 插入中间点, 缩小非线性误差; 唐清春等^[10-14]在前置文件基础上采用线性插补方法, 开发了专用后置处理软件, 并运用到实际工程。因此, 解决刀具姿态误差目前主要还是采用线性插补法, 线性插补在一定程度上可以解决姿态误差问题, 特别是曲率半径大、曲率变化小的复杂自由曲面能有效地提高轮廓精度, 但是对于曲率变化大、曲率半径小的自由曲面, 具有很大的局限性。

本文提出通过优化刀具摆角来解决刀具姿态误差, 从而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, 通过误差原理计算获得摆角理论修正模型, 然后根据误差限制条件计算实际摆角值, 最后通过叶轮^[15-17]试件在国产双摆头五轴机床 (AC 式) 上进行仿真实验以及实际切削实验, 验证了该方法的正确性。

1 刀具姿态误差原理及优化

1.1 回转轴的线性插补运动

根据 AC 式双摆头机床运动结构, 推导出在工件

坐标系下旋转轴角度与刀轴矢量对应的变换关系为:

$$\begin{cases} A = K_1 \cdot \cos^{-1}(u_z) & k_1 = (1, -1) \\ C = \arctan(u_x/u_y) - K_2\pi & k_2 = (0, -1) \end{cases} \quad (1)$$

设刀具相邻两点的刀轴矢量分别为 $T_s(t_{xs}, t_{ys}, t_{zs})$ 、 $T_e(t_{xe}, t_{ye}, t_{ze})$, 那么刀具在该处的角度分别为 (A_s, C_s) 、 (A_e, C_e) , 假设在两刀轴矢量之间插入 n 个值, 则有:

$$\begin{cases} \Delta A = (A_e - A_s) / n \\ \Delta C = (C_e - C_s) / n \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} A_{i+1} = \Delta A + A_i \\ C_{i+1} = \Delta C + C_i \end{cases} \quad (3)$$

式中: i 为当前点序号, $i=0, 1, \dots, n$ 。

由公式 (1) 可知, 空间运动的刀具在任意插补位置 i 的刀轴矢量 $T_i(t_{xi}, t_{yi}, t_{zi})$ 可以表示为:

$$\begin{pmatrix} t_{xi} \\ t_{yi} \\ t_{zi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin C_i \sin A_i \\ \cos C_i \sin A_i \\ \cos A_i \end{pmatrix} \quad (4)$$

1.2 旋转角误差分析

在刀具线性插补过程中, 回转角产生的姿态误差如图 1 所示, 其直观地表示了姿态误差的产生机理。假设图 1 中 O_s 、 T_s 分别代表起点坐标处的刀位点坐标位置及刀轴矢量方向, O_e 、 T_e 分别代表终点坐标处的刀位点坐标位置及刀具矢量方向, 其中 O_s 与 O_e 红色连线为一直线, 实际上是刀具的线性插补路径; T_s 与 T_e 的连线有两条, 其中红色线条代表理论刀轴矢量插补路线, 绿色线条代表实际刀轴矢量插补路线, 两者在中间位置产生的最大误差为 ε 。

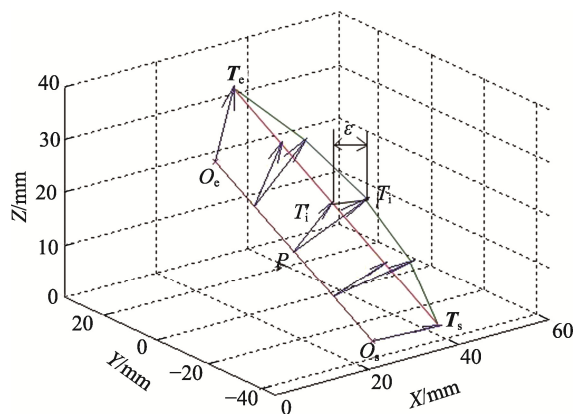


图1 刀具姿态误差分析
Fig.1 Tool posture error analysis

1.3 刀具姿态误差影响因素

当刀具回转角发生变化时, 参考图 1, 可以看出线性插补矢量跟刀轴矢量之间存在一个夹角, 其可以表示为:

$$\alpha(i) = \cos^{-1}(\mathbf{O}_i' \mathbf{O}_i) \quad 0 \leq \alpha(i) < \pi \quad (5)$$

$$\delta(i) = \left\| \begin{array}{c} \sin C_s \sin A_s + k \cdot (\sin C_e \sin A_e - \sin C_s \sin A_s) - \sin C_i \sin A_i \\ \cos C_s \sin A_s + k \cdot (\cos C_e \sin A_e - \cos C_s \sin A_s) - \cos C_i \sin A_i \\ \cos A_s + k \cdot (\cos A_e - \cos A_s) - \cos A_i \end{array} \right\|_2 \quad (7)$$

$$\delta_{\max} = \left\| \begin{array}{c} \sin C_s \sin A_s + k \cdot (\sin(C_s + \Delta C) \sin(A_s + \Delta A) - \sin C_s \sin A_s) - \sin(C_s + \Delta C/2) \sin(A_s + \Delta A/2) \\ \cos C_s \sin A_s + k \cdot (\cos(C_s + \Delta C) \sin(A_s + \Delta A) - \cos C_s \sin A_s) - \cos(C_s + \Delta C/2) \sin(A_s + \Delta A/2) \\ \cos A_s + k \cdot (\cos(A_s + \Delta A) - \cos A_s) - \cos(A_s + \Delta A/2) \end{array} \right\|_2 \quad (8)$$

从公式 (8) 可以看出, 刀具姿态的最大误差与 A 、 C 角的初始位置及两回转轴的转动幅度有关。在 AC 式双摆头五轴机床中, 根据机床的结构可知, C 角的运动取值范围为 $(-2\pi, 2\pi)$, A 角的运动取值范围为 $(-\pi/2, \pi/2)$, 由于 A 角的摆动范围较小, 其摆动幅度也较小, 因此主要以 C 角作为分析对象。分以下几种情况讨论:

情况一: 刀具姿态误差的大小会随双摆头五轴机床中 A 、 C 两个回转角的转动幅度比值大小的变换而变化。如果 A 、 C 两个回转角的转动幅度相等, 则刀具姿态会产生较小的误差。如图 2 所示, 当 A 角固定转动角为 2° , 刀具姿态误差随 C 角转动值变化而变化; 当 C 角转动值也为 2° 时, 误差最小。

情况二: 刀具姿态误差大小会随双摆头五轴机床中 A 、 C 两个回转角的转动幅度值的变化而变化。刀具姿态误差会随着 A 轴转动幅度绝对值的增大而增大, 随 A 轴转动幅度绝对值的减小而减小。另外, A 角的初始取值大小也会影响刀具姿态误差大小, 并在一定范围内规律变化, 如图 3 所示。

情况三: 当 A 、 C 角初始为 0 时, A 、 C 角的相邻点间的转动幅度越小, 刀具姿态误差越小, 如图 4 所示。

通过上述分析, 在实际加工中, 不仅要控制回转角的摆动幅度大小, 也要控制回转角的初始位置。

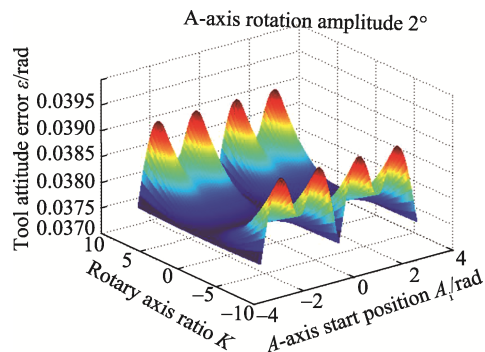


图 2 C 角转动幅度变化时刀具姿态误差分布
Fig.2 Tool attitude error distribution when the rotational amplitude of C angle changes

其单位偏差为:

$$\delta(i) = \left| \mathbf{O}_i' - \mathbf{O}_i \right| \quad (6)$$

根据公式 (2) 和公式 (3) 求出的 \mathbf{O}_i' 及 \mathbf{O}_i 带入公式 (6) 得公式 (7)。由于最大误差发生在中点位置, 进一步简化得公式 (8)。

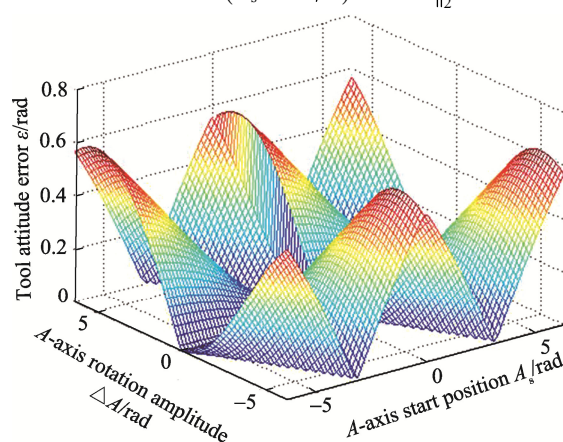


图 3 A 角的转动值以及初始角度值大小变化时刀具姿态误差图

Fig.3 Tool posture error diagram when rotation amplitude of angle A and initial angle value changes

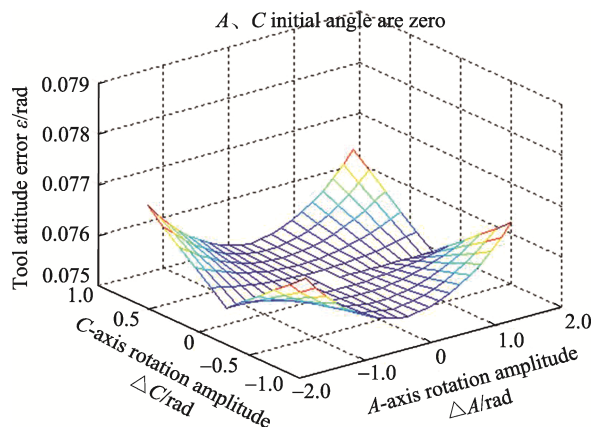


图 4 A 、 C 角初始值为零时刀具姿态误差分布
Fig.4 Distribution of tool posture error when initial angle of angle A and C is 0

1.4 刀具摆角优化方法

将线性插补后的刀轴矢量, 通过投射到由始末两点矢量构成的插补平面上, 获得新的插补矢量, 新的插补矢量将通过专用后置软件处理获得新的机床旋

转 A 、 C 角度值。

设 $O_w(X_w, Y_w, Z_w)$ 为工件坐标系, 假设空间运动刀具的任意相邻刀位点为 $M(O_s, T_s)$ 和 $N(O_e, T_e)$, 其中 O_s 和 O_e 为点坐标, T_s 和 T_e 为刀轴矢量。在刀具线性插补运动过程中, 假设刀具运动坐标 P 在插补中得到的刀轴矢量为 T_i , 将 T_i 投射到理想的刀具矢量平面上, 投射点的矢量为 T'_i , 对 T_i 及 T'_i 进行内积求模得到一个误差值。

$$\|T_i - T'_i\| = \varepsilon_i \quad (9)$$

根据矢量内积原则有:

$$(T_e - T_s) \cdot (T_i - T_s) = \|T_e - T_s\| \times \|T'_i - T_s\| \quad (10)$$

$$\|T'_i - T_s\| = (T_e - T_s) \cdot \frac{T_i - T_s}{\|T_e - T_s\|} \quad (11)$$

根据公式 (4) 可以得出投射矢量 T'_i 为:

$$T'_i = T_s + \frac{\|T_i - T_s\|}{\|T_e - T_s\|} \cdot (T_e - T_s) \quad (12)$$

设 T'_i 为 $T'_i(t'_{xi}, t'_{yi}, t'_{zi})$, 则根据公式 (4) 及公式 (3) 可得投射后的刀轴矢量:

$$\begin{cases} t'_{xi} = t_{xs} + \frac{\sqrt{(t_{xi} - t_{xs})^2 + (t_{yi} - t_{ys})^2 + (t_{zi} - t_{zs})^2}}{\sqrt{(t_{xe} - t_{xs})^2 + (t_{ye} - t_{ys})^2 + (t_{ze} - t_{zs})^2}} (t_{xe} - t_{xs}) \\ t'_{yi} = t_{ys} + \frac{\sqrt{(t_{xi} - t_{xs})^2 + (t_{yi} - t_{ys})^2 + (t_{zi} - t_{zs})^2}}{\sqrt{(t_{xe} - t_{xs})^2 + (t_{ye} - t_{ys})^2 + (t_{ze} - t_{zs})^2}} (t_{ye} - t_{ys}) \\ t'_{zi} = t_{zs} + \frac{\sqrt{(t_{xi} - t_{xs})^2 + (t_{yi} - t_{ys})^2 + (t_{zi} - t_{zs})^2}}{\sqrt{(t_{xe} - t_{xs})^2 + (t_{ye} - t_{ys})^2 + (t_{ze} - t_{zs})^2}} (t_{ze} - t_{zs}) \end{cases} \quad (13)$$

设 $K = \frac{\sqrt{(t_{xi} - t_{xs})^2 + (t_{yi} - t_{ys})^2 + (t_{zi} - t_{zs})^2}}{\sqrt{(t_{xe} - t_{xs})^2 + (t_{ye} - t_{ys})^2 + (t_{ze} - t_{zs})^2}}$, 则公式

(13) 可简化为:

$$\begin{pmatrix} t'_{xi} \\ t'_{yi} \\ t'_{zi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin C_s \sin A_s + k \cdot (\sin C_e \sin A_e - \sin C_s \sin A_s) \\ \cos C_s \sin A_s + k \cdot (\cos C_e \sin A_e - \cos C_s \sin A_s) \\ \cos A_s + k \cdot (\cos A_e - \cos A_s) \end{pmatrix} \quad (14)$$

2 仿真分析

2.1 未补偿时姿态误差分析

为验证刀具姿态误差的变化, 本文根据 AC 式双摆头五坐标机床的实际机床结构, 构建了刀具姿态误差学模型, 通过空间任意相邻的两点刀具运动坐标, 采用 MATLAB 仿真软件进行误差分布仿真, 可获得两点间的非线性误差分布图, 如图 5 所示。通过图 5

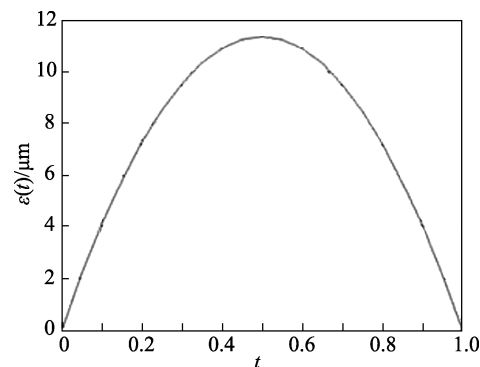


图 5 任意相邻刀位点姿态误差的分布

Fig.5 Posture error distribution of adjacent tool location points

可以看出, 任意相邻两点刀具的姿态误差最大值出现在两相邻刀位点的中点附近。

2.2 采用摆角补偿时姿态误差分析

为验证姿态误差的变换, 任意选取某程序中相邻两点刀位源代码为:

$r_1(251.9582, -24.0014, 11.4676, 0.327\ 437, -0.46340, 0.82343)$

$r_2(251.9564, -25.9912, 10.9845, 0.322\ 986, -0.480\ 14, 0.815\ 56)$

与之对应的机床运动坐标分别为:

$M_1(350.1895, -26.540, -18.3158, 29.3697, 19.1133)$

$M_2(348.852, -27.9707, -19.799, 30.4863, 18.8436)$

设 AC 式双摆头五轴机床主轴的摆动半径为 300 mm, 刀具的走刀速度为 3000 mm/min, 刀具的插补进给周期为 6 ms, 根据提出的摆角优化算法及线性插补算法, 利用 MATLAB 仿真软件进行仿真获得的仿真结果如图 6 所示。图 6 中分别采用四种情况进行分析对比, 线条 1 代表理论编程曲线姿态误差, 线条 2 代表未采用补偿时刀具姿态误差, 线条 3 代表采用线性插补时姿态误差, 线条 4 代表采用摆角优化方法的姿态误差。由图 6 可以看出, 刀具摆角优化算法的插补轨迹误差比线性法插补的小。

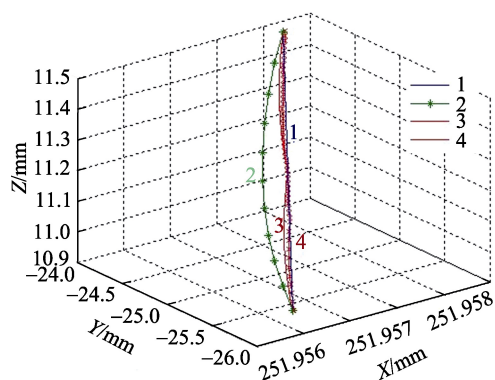


图 6 四种刀具姿态误差对比

Fig.6 Contrast of four kinds of tool posture error

2.3 虚拟仿真验证

利用 VERICUT 7.0 建立虚拟加工环境和刀具模型, 以某半闭式叶轮为例, 在 UG 软件编制刀路轨迹时, 精加工采用残留高度为 0.02 mm、曲面留 0.03 mm 的抛光余量, 切削刀具为 $\phi 10$ 的球头刀, 分别对三种算法下后置处理的 NC 代码进行仿真加工。仿真精加

工如图 7 所示, 可知未采用补偿的原始程序加工的叶轮叶片有明显残留, 经过线性插补算法补偿后的加工残留明显降低, 采用刀具摆角算法后的加工效果最好, 只在叶片进气边有少量的残留。根据仿真分析, 采用刀具摆角算法后, 仿真过程中的过切点和欠切点能得到很好的控制, 由此验证了该算法的正确性。

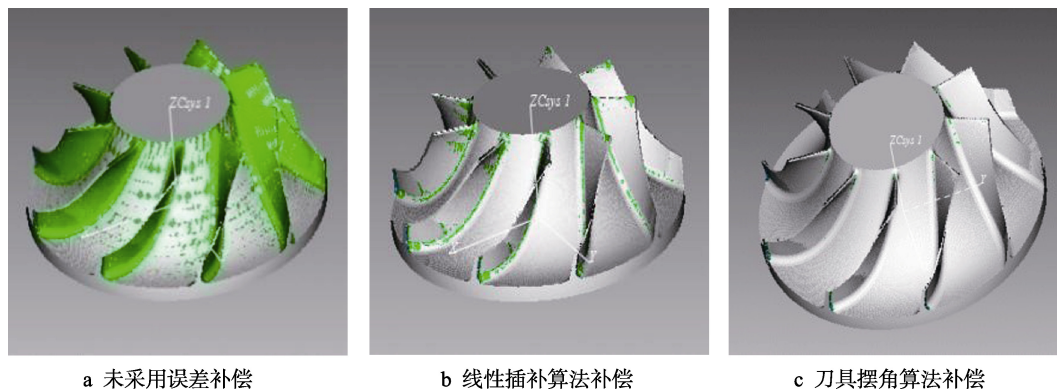


图 7 仿真误差对比图

Fig.7 Comparison of simulation error: (a) no error compensation simulation, (b) linear interpolation algorithm compensating simulation, (c) tool swing angle algorithm compensating simulation

3 叶轮加工及检测验证

为了对比效果, 以两种插补方法进行加工, 采用相同的转速、进给速度、残留高度及行距等工艺参数, 但在误差处理时分别采用线性插补和刀具摆角优化方法, 姿态误差判断值为 0.02。实验切削加工结果如图 8 所示。图 8 中的左侧叶轮采用刀具摆角优化方法, 右侧采用线性插补方法。从图 8 可以看出, 采用刀具摆角优化方法后, 流道刀路轨迹更流畅, 曲面的表面粗糙度也较好。

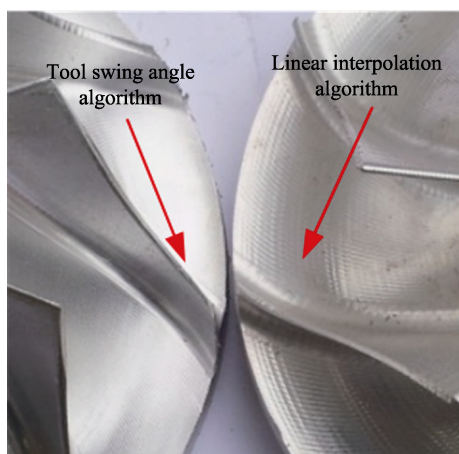


图 8 两种方法下流道加工对比

Fig.8 Comparison of two methods of flow pass processing

为了进一步直观地比较两种加工方法, 分别取两种加工状态下的叶片同一截面, 通过三坐标采点实测, 然后拟合为曲线, 与理论轮廓曲线比对。采用线

性插补方法后, 实测轮廓与理论轮廓的最大误差为 0.08 mm, 叶轮的叶片进气边存在少量过切, 最大过切量为 0.03 mm; 采用刀具摆角优化方法后, 叶轮叶片的实测轮廓与理论轮廓的最大误差为 0.04 mm, 进气边最大过切量降为 0.01 mm。对比结果如图 9 所示。

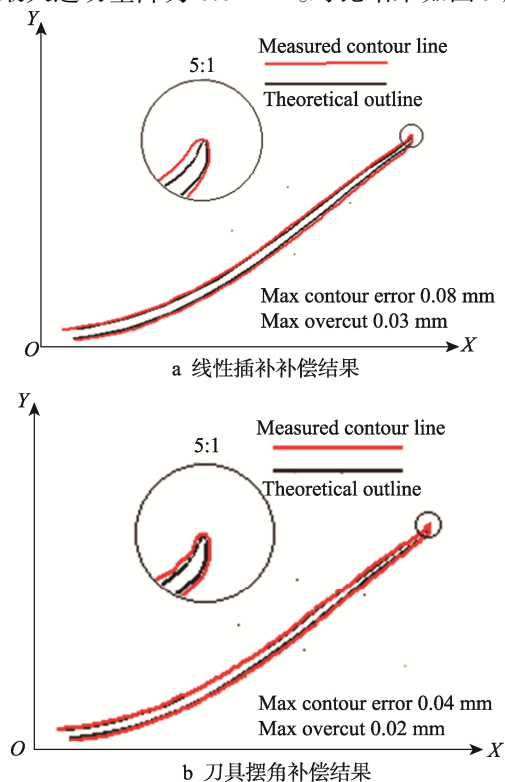


图 9 叶片实测数据

Fig.9 Measured data of blade: (a) linear interpolation compensation result, (b) tool swing angle compensation result

从图 9 看,采用刀具摆角优化方法下的叶片比线性插补方法下的叶片光滑。通过三坐标实测同一截面对比可以看出,采用刀具摆角优化方法后,实际加工的叶片轮廓与理论轮廓相比,叶轮的轮廓误差由线性

插补方法的 0.08 mm 减小到 0.04 mm,最大过切量也由 0.03 mm 减小到 0.01 mm,证明通过使用刀具摆角优化方法更能有效地控制刀具的姿态误差,从而提高零件的轮廓精度。具体的测量数据如表 1 所示。

表 1 两种方法切削测量数据对比

Tab.1 Comparison of two methods of cutting measurement data

	Blade contour error/mm	Flow path contour error/mm	Blade distribution angle/(°)	Max blade thickness/mm
Theory	$a_{+0.00}^{+0.03}$	$b_{+0.00}^{+0.03}$	40	1.857
Linear interpolation	$a_{-0.03}^{+0.08}$	$b_{-0.02}^{+0.06}$	$40 \pm 5'$	$1.875_{+0.03}^{+0.15}$
Tool swing angle interpolation	$a_{-0.01}^{+0.04}$	$b_{-0.01}^{+0.05}$	$40 \pm 5'$	$1.875_{+0.04}^{+0.10}$

总的来说,在切削过程中,采用刀具摆角优化算法后生产的 NC 代码,在加工过程中,曲率变化较大的叶片进气边以及流道未出现明显的过切、欠切现象,刀具在叶片翻边过程中未出现明显的颤动,过渡平稳,叶片内背弧曲面及过渡圆角处光滑,叶轮的轮廓误差达到工艺设计要求,验证了刀具摆角优化算法的正确性。最后完整的实物零件如图 10 所示。

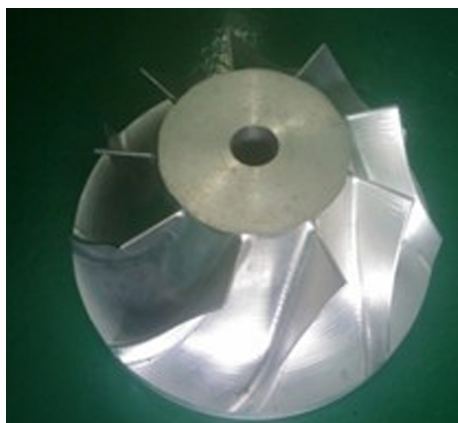


图 10 叶轮加工实物效果图

Fig.10 Effect picture of impeller machining

4 结论

1) 根据五轴联动原理,可分析出回转轴导致的刀具姿态误差模型并进行分析优化。

2) 基于相邻刀位点坐标及刀轴矢量,建立摆角优化模型,通过设置误差判断条件值,可获得插补坐标值及矢量值。

3) 基于后置处理技术,利用机床的运动学模型,加载摆角优化算法,可有效提高零件的轮廓精度。

参考文献:

[1] 周志雄,周秦源,任莹晖. 复杂曲面加工技术的研究现状与发展趋势[J]. 机械工程学报, 2010, 46(17): 105-

113.

ZHOU Zhi-xiong, ZHOU Qin-yuan, REN Ying-hui. Current Research and Development Trends of Complex Surface Machining Technology[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(17): 105-113.

[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 Non-linear Errors in Five-axis NC Machining[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2007, 41(10): 1608-1612.

[3] 杨旭静,周元生. 五轴数控加工中旋转轴运动引起的非线性误差分析及控制[J]. 机械工程学报, 2012, 48(3): 140-146.

YANG Xu-jing, ZHOU Yuan-sheng. 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] 毕庆贞,王宇晗,朱利民,等. 刀触点网格上整体光滑五轴数控加工刀轴方向的模型与算法[J]. 中国科学: 技术科学, 2010, 40(10): 1159-1168.

BI Qing-zhen, WANG Yu-han, ZHU Li-min, et al. Wholly Smoothing Cutter Orientations for Five-axis NC Machining Based on Cutter Contact Point Mesh[J]. Science China Technological Sciences, 2010, 40(10): 1159-1168.

[5] HO M C, HWANG Y R, HU C H. Five-axis Tool Orientation Smoothing Using Quaternion Interpolation Algorithm[J]. International Journal of Machine Tool and Manufacture, 2003, 43(12): 1259-1267.

[6] WANG Nan, TANG Kai. Automatic Generation of Gouge-free and Angular-velocity-compliant Five-axis Tool-path[J]. Computer Aided Design, 2007, 39(10): 849-852.

[7] CASTAGNETTI C, DUC E, RAY P. The Domain of Admissible Orientation Concept: A New Method for Five-axis Tool Path Optimization[J]. Computer Aided Design, 2008, 40(9): 938-950.

[8] TAKEUCHI Y, SHIMIZH H, IDEMURA T, et al. Five-axis Controlled Machining Based on Solid Mod-

- els[J]. Journal of the Japan Society for Precision Engineering, 1990, 56(2): 111-116.
- [9] CHO H D, JUN Y T, YANG M Y. Five-axis CNC Milling for Effective Machining of Sculptured Surfaces[J]. International Journal of Production Research, 1993, 31(11): 2559-2573.
- [10] 唐清春, 范超. 叶片五轴加工中非线性误差控制的研究[J]. 机床与液压, 2014, 42(2): 22-24.
TANG Qing-chun, FAN Chao. The Study on Controlling of No-linear Error of Blade Five-axis Machining[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2014, 42(2): 22-24.
- [11] 耿聪, 于东, 张晓辉. 五轴联动数控加工中的刀具轨迹控制算法[J]. 中国机械工程, 2010, 21(24): 2904-2909.
GENG Cong, YU Dong, ZHANG Xiao-hui. An Algorithm for Tool Path Control on Five-axis CNC Machining[J]. China Mechanical Engineering, 2010, 21(24): 2904-2909.
- [12] 樊留群, 齐党进, 沈斌, 等. 五轴联动刀轴矢量平面插补算法[J]. 机械工程学报, 2011, 47(19): 158-162.
FAN Liu-qun, QI Dang-jin, SHEN Bin, et al. Plane Interpolation of Tool Orientation Algorithm for Five-axis Circumference Milling[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(19): 158-162.
- [13] PLAKHOTNIK D, LAUWERS B. Graph-based Optimization of Five-axis Machine Tool Movements by Varying Tool Orientation[J]. Int J Adv Manuf Technol, 2014, 74(6): 307-318.
- [14] LIN T, LEE J W, BOHEZ E L J. A New Accurate Curvature Matching and Optimal Tool Based Five-axis Machining Algorithm[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2009, 23: 2624-2634.
- [15] SUN Yu-wen, BAO Yu-rong. A Cutter Orientation Modification Method for Five-axis Ball-end Machining with Kinematic Constraints[J]. Int J Adv Manuf Technol, 2013, 67(1): 2863-2874.
- [16] CHEN Kuan-hung. Investigation of Tool Orientation for Milling Blade of Impeller in Five-axis Machining[J]. Int J Adv Manuf Technol, 2011, 52(5): 235-244.
- [17] CHEN H P, KUO H H, TSAY D M. Removing Tool Marks of Blade Surfaces by Smoothing Five-axis Point Milling Cutter Paths[J]. J Mater Process Tech, 2009, 209: 5810-5817.