DOI: 10.3901/JME.2018.03.178

非模态回转轴旋转角的优化方法*

唐清春^{1,2} 尹韶辉^{1,3} 王永强¹ 张 健⁴

- (1. 湖南大学国家高效磨削工程技术研究中心 长沙 410082;
2. 广西科技大学工程训练中心 柳州 545006;
3. 长沙纳美特超精密制造技术有限公司 长沙 430100;
4. 吉林科技职业技术学院 长春 130123)

摘要: 针对使用非模态回转轴的双摆头五轴联动机床的转角在使用过程中受到局限的问题, 提出一种基于后置处理的旋转角度优化算法。根据旋转角的转动范围确定初始修正条件, 在保证刀具接触点坐标不变的情况下, 采用分区域限制对修正区的旋转坐标值进行优化。通过运动学模型的建立, 基于该类机床的基本后置处理算法, 结合 JAVA 语言, 开发出具有角度优化的专用后置处理器。某叶轮零件的仿真和实际加工结果表明, 本算法能够对加工中旋转角进行修正, 避免了由于结构原因造成的加工局限, 从而提高了机床的使用范围, 同时此法也为其他同类机床解决旋转角受限问题提供了一定的参考。

关键词: 非模态; 双摆头五轴机床; 旋转角; 后置处理; JAVA

中图分类号: TK263

Optimization Method for Rotation Angle of the Non Modal Rotary Shaft

TANG Qingchun^{1,2} YIN Shaohui^{1,3} WANG Yongqiang¹ ZHANG Jian⁴

- (1. National Engineering Research Center for High Efficiency Grinding, Hunan University, Changsha 410082;
2. Engineering Training Center, Guangxi Science and Technology University, Liuzhou 545006;
3. Changsha Nanometer Ultra-precision Manufacturing Technology Corp. Ltd., Changsha 430100;
4. Jilin Science & Technology Vocational Technical College, Changchun 130123)

Abstract: A rotation angle optimized algorithm based on post processing is proposed to overcome the problem that rotation angle of rotary shaft is limited in the use of the double pendulum head five axis machine tool with the non modal rotary shaft. According to the rotation range of the rotation angle to determine the initial correction condition, in the case that the tool contact point is fixed, the rotation coordinates of the correction area are optimized. Through the establishment of the kinematic model, a special post processor with angle optimization is developed using java language based on the basic post processing algorithm of the machine tool. Simulation and practical processing of an impeller part using the algorithm are carried on. Results show that it could revise the rotation angle in the processing so as to improve the scope of machine tools for the processing limitation due to structural reasons is avoided. This method also provides a certain reference to solve the problem of limited rotation angle for other similar machine.

Key words: non modal; double pendulum head five axis machine tool; rotation angle; post processing; JAVA

0 前言

五轴联动机床在传统的三轴机床上增加两旋转轴, 使得刀具的空间姿态更加自由, 针对航空、航天、模具等领域内复杂的曲面零件, 可在减少装

夹及刀具更换情况下有效的避免干涉, 在制造加工中有着不可替代的技术优势^[1]。然而, 由于增加两个回转轴, 机床的灵活性增加的同时, 相应也增加了机床结构的复杂性, 使得在实际具体加工中存在很多技术难点。由于五轴联动加工技术在复杂曲面制造中的重要地位, 国内外对五轴联动技术研究一直比较多, 主要集中在以下几个方面。一是非线性误差方面, 吴大中等^[2]提出了基于 GPU 的刀具可达

* 国家自然科学基金资助项目(51565006, 51675171)。20170611 收到初稿, 20171219 收到修改稿

性检测方法, 在刀具的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; 杨旭静等^[3]分析了回转轴的线性误差问题, 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运用到实际工程; CHO 等^[4-5]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。二是刀具轨迹规划方面, XAVIER 等^[6-7]提出了刀具局部拐角三次方 B 样条插补优化轨迹的方法, HWANG 等^[8]采用等弧长逼近法来控制刀具轨迹; WANG 等^[9]提出了通过构造可行域的方法, 控制刀轴矢量平滑过渡; CASTAGNETTI 等^[10]提出了通过构造可行方向锥来生成刀轴光顺轨迹的方法。三是刀具的刀轴矢量插补以及优化问题, 耿聪等^[11]提出了以旋转轴的转动幅度为限制条件进行旋转轴的位置修正; 樊留群等^[12]提出了刀轴矢量平面插补的方法来优化插补刀轴矢量。四是刀具误差补偿方面, 杨乐等^[13-14]利用刀具平面半径补偿, 通过空间坐标变换, 得到三维空间刀具半径补偿算法; TUNG 等^[15-16]针对多轴数控机床推导出刀位点, 结合运动变换算法, 为两类五轴机床开发出带刀具补偿功能的后置处理程序。

从以上文献可以看出, 目前热点主要集中在如何提高五轴联动加工精度方面做出的研究, 而对于非模态回转轴(两个回转轴均不能自由回转)的一些限制问题只见唐清春等^[17]提出了双摆头机床角度的选择, 而未进一步采用试验进行验证。在国外, 一般先进的数控机床都有成熟的数控系统以及后置处理软件配套, 因此, 在使用过程中系统以及软件已经充分考虑到了机床的结构问题。而目前国内, 众多的机床厂家由于技术能力有限并未开发相配套的后置处理软件, 而完全靠用户自身技术能力去实现。对非模态回转轴旋转角受限问题, 用户目前大多采用两种处理方式: 其一, 在工件上划分区域, 采用角度测量仪划线, 分次将工件旋转一定角度后装夹加工, 或者在工件下加载一辅助转台, 多次分度分区加工; 其二, 在建立工件模型编程时考虑机床的极限旋转角度, 以极限位为限制区划分加工区域, 按区域建立局部坐标系编程。上述两种方法均存在缺点, 方法一需要经常装拆工件, 产生定位误差或增加工装设备, 方法二编程繁琐, 划分区域可能会造成过渡残留区, 产生接刀痕迹。

为解决上述问题, 本文通过研究双摆头五轴机床的运动模型, 分析了同一刀触点 A、C 角变换关系, 针对非模态回转轴提出了一种角度优化方法, 该方法既不需要采用辅助回转台也不需要采用局部

坐标系, 通过区域编程, 基于后置处理技术, 在加工限制区通过优化 A、C 轴的摆角解决了 C 角不能 360°回转造成难以加工 360°区域的零件的实际问题。采用仿真与实际切削加工相结合, 试件采用一半闭式叶轮, 通过 CHEN 等^[18-21]提出的叶轮加工轨迹的生成及动态仿真方法, 完成切削过程仿真与切削加工。试验验证了该方法的有效性。

1 五轴双摆头运动学模型

如图 1 所示, 为(A-C)式双摆头龙门式五轴机床, 对其实际结构进行分析, 可以得出其刀具相对于工件的运动关系。在该五轴机床上存在有两条运动链, 一条是刀具运动链, 一条是工件运动链, 如图 2 所示。

图 1 五轴双摆头机床结构

图 2 刀具与工件的运动链

刀具运动链: 从床身到 Y 轴到 Z 轴到 C 轴到 A 轴到主轴到刀具 T。

工件运动链: 从床身到 X 轴到工作台到工件 W。通过运动链, 可以看出相关的运动副的相互关系, 工作台在 X 轴上做正负方向直线移动, 主轴紧固在 Y、Z、A、C 四个轴上, 在 Y、Z 方向上做直线运动, 以及在 A、C 方向上绕着 X 轴、Z 轴做旋转运动。A、C 两轴分别绕着 X、Z 回转和摆动, 其轴

线相交于一点, 为主轴的摆动中心, 设为 $O(X, Y, Z)$, $O(X, Y, Z)$ 到刀心点 $R_w(w_x, w_y, w_z)$ 的距离为 L , 包括摆长 K (摆动中心到主轴端面的距离) 以及刀具的长度 H 。以 $O(X, Y, Z)$ 建立名义坐标系 $O_m(X_m, Y_m, Z_m)$, 其与刀具坐标系 $O_t(X_t, Y_t, Z_t)$ 以及工件坐标系 $O_w(X_w, Y_w, Z_w)$ 各轴方向均相同, 假设机床在初始位置时, 刀位点位置 $R_w(w_x, w_y, w_z)$ 和刀轴矢量 $R_v(v_i, v_j, v_k)$ 的初始值为 $[0 \ 0 \ 0]^T$ 和 $[0 \ 0 \ 1]^T$, 旋转轴 A 、 C 的旋转角度分别用 α_A 和 α_C 表示; 建立如图 3 所示的双摆头(A-C)式五轴机床坐标变换简图。

图 3 五轴双摆头机床坐标变换

刀位坐标 $R_w(w_x, w_y, w_z)$ 和刀轴矢量 $R_v(v_i, v_j, v_k)$ 可由刀具坐标系通过平移及旋转变换到名义坐标系, 根据齐次变换矩阵, 可得

$$R_Z(\alpha_C) \times R_X(\alpha_A) \times \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}^T = \begin{pmatrix} v_i & v_j & v_k & 0 \end{pmatrix}^T \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & L & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times R_X(\alpha_A) \times R_Z(\alpha_C) + \begin{pmatrix} w_x & w_y & w_z & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X & Y & Z & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

式(1)、(2)中, 有关运动变换矩阵为

$$R_X(\alpha_A) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_A & \sin \alpha_A & 0 \\ 0 & -\sin \alpha_A & \cos \alpha_A & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$R_Z(\alpha_C) = \begin{pmatrix} \cos \alpha_C & \sin \alpha_C & 0 & 0 \\ -\sin \alpha_C & \cos \alpha_C & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

把式(3)、(4)代入式(1)得

$$\begin{pmatrix} v_i \\ v_j \\ v_k \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin \alpha_C \sin \alpha_A \\ \cos \alpha_C \sin \alpha_A \\ \cos \alpha_A \\ 0 \end{pmatrix} \quad (5)$$

解得

$$\begin{cases} \alpha_A = K_A \arccos(v_k) & K_A = (1, -1) \\ \alpha_C = \arccos\left(\frac{v_i}{v_j}\right) - k\pi & K_C = (0, 1) \end{cases} \quad (6)$$

将结果 α_A, α_C 代入式(2)解得

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} w_x \\ w_y \\ w_z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} L \sin \alpha_C \sin \alpha_A \\ -L \cos \alpha_C \sin \alpha_A \\ L \cos \alpha_A \end{pmatrix} \quad (7)$$

2 旋转角优化策略

理想状态下, 五轴双摆头机床的 A 、 C 旋转轴可以无限制的自由回转, 但实际的五轴联动数控机床的旋转轴都有一定的工作范围, 旋转角必须考虑具体的工作空间。

2.1 A 、 C 角的取值范围

由公式(6)知: A 角取值

$$\alpha_A = K_A \arccos(v_k) \quad K_A = \pm 1$$

可以得知 $-90^\circ \leq \alpha_A \leq 90^\circ$ 。 C 角取值

$$\alpha_C = \arctan(v_i / v_j) - k_c \pi \quad k_c = (0, 1)$$

根据图 4 所示, C 角的取值根据 v_i 、 v_j 矢量的取值变化进一步推导得

$$\begin{cases} C = 90^\circ - \arctan\left|\frac{v_i}{v_j}\right| & v_i \geq 0 \text{ 且 } v_j > 0 \\ C = 90^\circ + \arctan\left|\frac{v_i}{v_j}\right| & v_i \leq 0 \text{ 且 } v_j > 0 \\ C = 270^\circ - \arctan\left|\frac{v_i}{v_j}\right| & v_i \leq 0 \text{ 且 } v_j < 0 \\ C = 270^\circ + \arctan\left|\frac{v_i}{v_j}\right| & v_i \geq 0 \text{ 且 } v_j < 0 \end{cases} \quad (8)$$

图 4 C 角刀轴矢量变化

特定条件下, $v_j > 0$ 时

$$\begin{cases} C = 180^\circ & v_i < 0 \\ C = 0^\circ & v_i > 0 \end{cases} \quad (9)$$

根据机床设计原理, 模态回转轴双摆头五轴机床 A 角有角度限制, C 角可 360° 自由回转。由汉川 XH2420 双摆头五轴机床参数得知, A 角的摆动范围为 $\pm 90^\circ$, C 角的摆动范围为 $\pm 200^\circ$ 该机床属于非模态回转轴, C 角不能自由回转, 加工 360° 范围的零件会受到限制, 需要讨论角度的优化方法。

2.2 A、C 角优化算法

由式(6)及式(8)可知, A 角有两种取值可能、C 角有四种取值可能, 但由于 C 角摆动范围为 $\pm 200^\circ$, 不能自由回转, 在 360° 范围同一刀触点下 C 角取值变成两种可能, 如图 5 和图 6 所示。

图 5 A 角选择

图 6 C 角选择

当 $K_A=1$, $K_C=0$ 及 $K_A=-1$, $K_C=1$ 时, 刀位源文件计算出的 A 角两种取值为正负关系, C 角为减 π 关系, 如式(10)所示

$$\begin{cases} A = \gamma & C = \varphi \\ A_1 = -\gamma & C_1 = \varphi - \pi \end{cases} \quad (10)$$

将 A, C 与 A_1, C_1 所赋的值分别代入式(7)展开得

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} w_x \\ w_y \\ w_z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} K \sin \varphi \sin \gamma \\ -K \cos \varphi \sin \gamma \\ K \cos \gamma \end{pmatrix} \quad (11)$$

$$\begin{pmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} w_x \\ w_y \\ w_z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} K \sin(\varphi \pm \pi) \sin(-\gamma) \\ -K \cos(\varphi \pm \pi) \sin(-\gamma) \\ K \cos(-\gamma) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} w_x \\ w_y \\ w_z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} K \sin \varphi \sin \gamma \\ -K \cos \varphi \sin \gamma \\ K \cos \gamma \end{pmatrix} \quad (12)$$

观察式(11)与式(12), 结果相等。由此可知: 当求出一对已知角时, 将旋转角 A 变为负值, 旋转角 C 反向旋转 180° , 求出的机床运动坐标值不变, 也就是刀具接触点坐标不变。可见, 如果 C 角超过超限范围, 可将 C 角反向旋转 180° , 再将 A 角变为相反数即可解决机床加工的盲区问题。

2.3 基于后置处理的旋转角优化实施方法

根据上小节的分析, 提出了解决加工限制区的思路, 现进一步分析在后置处理中实现的具体优化步骤, 具体流程图如图 7 所示。

图 7 旋转角优化选择后置处理流程

后置处理过程中角度优化步骤如下。

(1) 设机床 C 轴的最大极限角为 ψ_j , C 轴实际的旋转限位角 ψ_s , $\psi_s < \psi_j$, $\psi_s \in (180^\circ, 360^\circ)$ $\psi_s < \psi_j$, 刀位源文件首行刀位点角度为 C_1 、次行刀位点角度为 C_2 。

(2) 根据式(8)逐行读取刀位源文件, 根据源文件计算出所有 C 角值, 找出最大值 $C_{\max}$, 比较 ψ_j 与 $C_{\max}$ 的大小。

(3) 如果 $C_{\max} > \psi_j$, 再次采用式(6)、(8)对刀位

源文件逐行计算,判断 C_1 与 C_2 的关系。

1) 如果 $|C_2 - C_1| < \psi_s$, C_2 与 C_2 不存在过象限问题,其处理步骤为:计算后的 A 、 C 角取值为: $C = C - 180^\circ$, $A = -A$,然后转化为NC代码。

2) 如果 $|C_2 - C_1| \geq \psi_s$, C_1 与 C_2 存在过象限问题,其处理步骤为:对 C 进行判断取值,如果 $C > 180^\circ$,输出 $C = C - 360^\circ$,否则输出原值。 A 值不变,然后转化为NC代码。

(4) 如果 $C_{\max} \leq \psi_j$,采用式(6)、(8)进行计算 A 、 C 角,计算后得到的角度转化NC代码。

3 仿真及试验验证

根据前面推导的机床运动变换方程式(6)、(7)以及提出的 A 、 C 角优化选择方法,本文通过高级语言JAVA,开发了该机床专用的后置处理软件,通过对UG软件的前置处理刀位源文件进行后置处理,处理的NC代码直接用于该机床加工使用。软件操作运算界面如图8所示。

图8 软件操作界面

3.1 数控程序验证

本文以某特型半闭式叶轮为加工实例,如图9所示。由该模型可以得知叶轮有9个流道,加工全部9个流道需要机床的 C 角旋转 360° 。按照如图所示建立的工件坐标系,不论顺时针加工还是逆时针加工,都存在两个限制区。

按照本文提出的优化方法,在UG软件里面处理刀具轨迹时按照正常方式设置,按照流道的区域直接对整个叶轮流道和叶片进行编程,然后生成合理的刀路轨迹。根据所建立的工件坐标系,本文选择8号流道的刀位源文件,因为按照正常加工顺序,限制区1和2上方属于不干涉区,不需要采用优化算法,而流道8处于限制区下方, C 角超过机床加工范围。根据8号流道的源文件,分别采用 A 、 C 角优化前及优化后的两种后置处理器分别进行后置

图9 半闭式叶轮模型

处理,后置处理的NC代码结果如图9所示。图10a为原始刀位文件。从图10b、10c可以看出, A 角度值满足机床要求, C 角度值在 $252^\circ \sim 321^\circ$ 区间,已经超过机床 C 角的转动范围; A 、 C 角度值都在机床的转角范围内,再进一步对比发现,图10b中 A 、 C 角度值跟图10c中存在一个关系, A 角变负, C 角差值为 180° ,刀具坐标值未变。

```
TOOL PATH/VARIABLE_CONTOUR_COPY, TOOL, D10
TLDATA/MILL, 10, 0.0000, 5.0000, 70.0000, 0.0000, 0.0000
MSYS/0.0000, 0.0000, -93.2373, 1.00000000, 0.00000000, 0.00000000
$$ centerline data
PAINT/PATH
PAINT/SPEED, 10
LOAD/TOOL, 0
SELECT/TOOL, 0
SPINDL/RPM, 3500, CLW
PAINT/COLOR, 186
RAPID
GOTO/59.1028, 24.6552, 78.4863, 0.9731476, -0.2301727, 0.0020669
PAINT/COLOR, 211
RAPID
GOTO/39.6398, 29.2586, 78.4450
PAINT/COLOR, 42
FEDRAT/MMPM, 2000.0000
.....
PAINT/COLOR, 31
GOTO/38.2278, 22.0695, 77.8408, 0.9737451, -0.2275866, 0.0049753
GOTO/38.4339, 21.7776, 77.5356, 0.9742805, -0.2251815, 0.0081446
GOTO/38.6328, 21.5087, 77.2099, 0.9747526, -0.2228890, 0.0115422
GOTO/38.8246, 21.2622, 76.8669, 0.9751615, -0.2209771, 0.0151361
GOTO/39.0097, 21.0372, 76.5091, 0.9755083, -0.2191490, 0.0188989
.....
GOTO/77.4113, -66.0265, 11.7069, 0.5074955, 0.6065663, 0.6119850
GOTO/77.5537, -67.8292, 11.7297, 0.5014996, 0.6173563, 0.6061100
GOTO/77.6413, -69.6407, 11.7538, 0.4958754, 0.6277329, 0.6000491
PAINT/COLOR, 37
.....
PAINT/COLOR, 211
RAPID
GOTO/85.9144, -61.1148, 29.3284
PAINT/SPEED, 10
PAINT/TOOL, NOMORE
END-OF-PATH
```

(a) UG 源代码

```
N2 G17 G90 DIAMOF ;*GP*
N4 G0 G54 X0 Y0 ;*GP*
N6 G64
N8 FGROUP(X, Y, Z, A, C)
N10 SOFT
N12 S3500 M03
N14 G00 X-37.601 Y-78.383 Z51.999 A89.882 C256.693 F2000
.....
N34 X-30.191 Y-77.680 Z32.589 A89.715 C256.845 F2083
N36 X-29.874 Y-77.268 Z33.173 A89.533 C256.985 F2085
N38 X-29.582 Y-76.825 Z33.752 A89.339 C257.114 F2087
N40 X-29.317 Y-76.356 Z34.325 A89.133 C257.232 F2089
N42 X-29.076 Y-75.863 Z34.890 A88.917 C257.339 F2091
.....
N3184 X97.632 Y-4.547 Z13.004 A51.094 C317.391 F2103
N3186 X99.085 Y-6.315 Z10.833 A51.463 C318.326 F2099
N3188 X100.439 Y-8.065 Z8.659 A51.850 C319.214 F2095
N3190 X101.740 Y-9.849 Z6.401 A52.267 C320.082 F2091
N3192 X102.963 Y-11.602 Z4.128 A52.691 C320.912 F2087
N3194 X104.094 Y-13.315 Z1.838 A53.127 C321.693 F2083
N3196 X104.836 Y-13.955 F2000
.....
N3212 G00 X105.294 Y-20.281 Z21.838
N3214 G01 Z200 F2000
N3216 M30
本处理使用了: 1秒
```

(b) 未加旋转角优化的数控程序

```

N2 G17 G90 DIAMOF ;*GP*
N4 G0 G54 X0 Y0 ;*GP*
N6 G64
N8 FGROUP (X, Y, Z, A, C)
N10 SOFT
N12 S3500 M03
N14 G00 X-37.601 Y-78.383 Z51.999 A-89.882 C76.693 F2000
.....
N34 X-30.191 Y-77.680 Z32.589 A-89.715 C76.845 F2083
N36 X-29.874 Y-77.268 Z33.173 A-89.533 C76.985 F2085
N38 X-29.582 Y-76.825 Z33.752 A-89.339 C77.114 F2087
N40 X-29.317 Y-76.356 Z34.325 A-89.133 C77.232 F2089
N42 X-29.076 Y-75.863 Z34.890 A-88.917 C77.339 F2091
.....
N3184 X97.632 Y-4.547 Z13.004 A-51.094 C137.391 F2103
N3186 X99.085 Y-6.315 Z10.833 A-51.463 C138.326 F2099
N3188 X100.439 Y-8.065 Z8.659 A-51.850 C139.214 F2095
N3190 X101.740 Y-9.849 Z6.401 A-52.267 C140.082 F2091
N3192 X102.963 Y-11.602 Z4.128 A-52.691 C140.912 F2087
N3194 X104.094 Y-13.315 Z1.838 A-53.127 C141.693 F2083
N3196 X104.836 Y-13.955 F2000
.....
N3212 G00 X105.294 Y-20.281 Z21.838
N3214 G01 Z200 F2000
N3216 M30
本处理使用了: 1秒

```

(c) 经旋转角优化的数控程序

图 10 后处理程序对比

3.2 虚拟仿真验证

本文采用美国 CGTech 公司开发的 Vericut 仿真软件进行虚拟加工。该虚拟仿真软件可真实模拟加工中刀具的切削以及机床各轴的运动情况, 具有过切、干涉检查等功能, 同时能进行程序校验、模型测量分析等功能。首先根据加工机床的特性建立虚拟的机床模型、控制系统、刀具库、加工坐标系等模块, 通过添加毛坯, 导入 NC 程序代码, 在计算机中仿真机床加工的过程。本文加工试验是在 XH2420 双摆头龙门五轴加工中心进行的, 该机床采用的是 SIEMENS840D 系统, 具有 X、Y、Z 三个直线轴和 A、C 两个旋转轴, X 轴、Y 轴、Z 轴最大行程分别为 6 050 mm、390 mm、1 050 mm, A 轴旋转范围为 $(-110^{\circ} \sim +110^{\circ})$, C 轴旋转范围为 $(-200^{\circ}, +200^{\circ})$, 主轴最高转速为 8 000 r/min。针对 XH2420 五轴机床的结构特性, 建立起 Vericut 机床虚拟仿真模型。

将上述处理好的数控程序, 虚拟机床模型导入仿真软件 VERICUT 中, 模拟仿真切削, 未优化的程序执行时, 仿真系统会提示超程报警, 优化后的程序通过图 11 b、11c 看出, 在加工 8 号流道时, 未出现刀具干涉、碰撞现象, 说明优化后的程序能满足要求。

(b) VRICUT 仿真

(c) 机床加工仿真

图 11 仿真图片

3.3 铣削加工验证

优化后的 NC 代码传输到该五轴机床进行实际加工, 加工过程中, 机床没有出现报警超程的错误信息, 且刀路平稳、无转刀、碰撞等现象。实际加工过程及加工后的实物图如图 12 所示。

(a) 正常区域加工

(b) 超限区域加工

(a) UG 刀路轨迹

(c) 加工后实物

图 12 实物加工

在图 12 中,图 12a 属于后置处理后角度不需要优化的区域,图 12b 属于后置处理后角度超过机床限制角优化角度的区域。

3.4 加工后零件检测分析

该零件加工时工艺参数设置为:轮廓留 0.05 mm 抛光余量,残留高度设置为 0.02 mm。通过上述方法完整加工出一个叶轮,采用三坐标测量仪对 9 个流道和叶片采取关键数据点检测,叶轮流道的轮廓误差都控制在 0.1 mm 以内,叶片的单面轮廓误差也控制在 0.1 mm 以内;具体数据如表 1 所示。经过检测,轮廓形状符合产品的设计要求,从实际效果上看,通过该优化算法后,叶轮能够实现 360°自由加工,加工后的效果理想,叶轮实物在加工后满足工艺要求。

表 1 叶轮理论与实例数据

参数	理论数据	数测数据
最大栅距/mm	68.797 1	68.606 3
最小栅距/mm	29.757 3	29.594 7
叶片轮廓误差/mm	0	≤0.1
流道轮廓误差/mm	0	≤0.1
叶片分布角/(°)	40	40±5'
叶片最大厚度/mm	1.857	2.013

3.5 试验结果讨论

通过上述仿真、实际铣削加工及检测,验证了本文提出的算法的有效性。虚拟仿真加工验证了提出的角度优化算法的正确性;开发的带有角度优化的专用后置处理软件能够应用于实际工程;通过叶轮的實際铣削加工,验证了该方法能解决该类机床由于结构原因难以加工 360°范围加工面技术问题。

目前,该方法虽然实现了对 360°范围加工面有效,但还存在一些不足之处,有待进一步完善。

该方法仅基于一个局部区域判断的原则,后置处理时是按照每个编程区域自动判断从而对受回转角限制的编程区域进行角度优化,对整体区域编程

只能判断出旋角度限制区,不能实现对整体编程区域实现自动分割为角度限制区和非限制区;对于诸如叶片类需要螺旋连续回转加工的零件,该方法不能处理,只能使用回转轴为模态类的五轴机床。

4 结 论

(1) 根据五轴联动机床运动模型,可分析出 A、C 回转角的取值关系并可进行多种组合优化选择。

(2) 基于同一刀触点下 A、C 角的变换关系,通过优化刀具走刀路径方向,可解决采用非模态回转轴结构的五轴机床加工角度受限的问题。

(3) 基于后置处理技术,利用机床的运动模型,加载角度优化算法,可快速有效的解决采用非模态回转轴结构的五轴机床加工需要 360°范围的复杂曲面时旋转角受限的技术问题,提高编程和加工效率。

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 Zhixiong, ZHOU Qinyuan, REN Yinghui. 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 Dazhong, WANG Yuhuan, FENG Jingchun, et al. Analysis and control of the non-linear 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及控制[J]. 机械工程学报, 2012, 48(3): 140-146.
YANG Xujing, ZHOU Yuansheng, CHEN Zezhong, 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] TAKEUCHI Y, SHIMIZH H, IDEMURA T, et al. Five-axis controlled machining based on solid models [J]. Journal of the Japan Society for Precision Engineering, 1990, 56(2): 111-116.
- [5] 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.
- [6] XAVIER B, SYLVAIN L. 5-axis local corner rounding of linear tool path discontinuities[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2013, 73: 9-16.
- [7] SNEHA T, YUSUF A. Local tool path smoothing for five-axis machine tools [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2015, 96: 15-26.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [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 Xiaohui. 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 Liuqun, QI Dangjin, 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] 杨乐. 五轴联动数控系统刀具半径补偿研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006. YANG Le. The research of cutter radius compensation of five-axis CNC system [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006.
- [14] 陈明君, 李凯, 李子昂. 五轴数控刀具半径补偿算法研究与数控仿真[J]. 工具技术, 2010, 44(3): 62-64. CHEN Mingjun, LI Kai, LI Ziang. Research of algorithm of cutting tool radius compensation in five-axis CNC and simulation of numerical control [J]. Tool Engineering, 2010, 44(3): 62-64.
- [15] TUNG C, TSO P. A generalized cutting location expression and postprocessors for multi-axis machine centers with tool compensation[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 50(9-12): 1113-1123.
- [16] TUNG C, TSO P. Inverse kinematics with 3-dimensional tool compensation for 5-axis machine center of tilting rotary table[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 110-116: 3525-3533.
- [17] 唐清春, 马忠亮, 刘谦, 等. (A-C)式双摆头五轴机床旋转角的选择及优化[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2015 (1): 16-18. TANG Qingchun, FAN Chao, LIU Qian, et al The selection of (A-C) double swing five-axis machine angle of rotation[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2015 (1): 16-18.
- [18] KUANG Hungchen. Investigation of tool orientation for milling blade of impeller in five-axis machining[J]. Int. J. Adv. Manuf. Technol., 2011 52(5): 235-244.
- [19] 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.
- [20] OZTURK E, TUNC LT, BUDAK E Investigation of lead and tilt angle effects in 5-axis ball-end milling processes[J]. Int. J. Mach. Tools Manuf., 2009, 49: 1053-1062.
- [21] DING Han, BI Qingzhen, ZHU Limin, et al. Tool path generation and simulation of dynamic cutting process for five-axis NC machining[J]. Huazhong University of Science and Technology Mechanical Engineering, 2010, 30 (10): 3408 -3418.

作者简介: 唐清春, 1972 年出生, 男, 博士研究生, 副教授。主要研究方向为数控多轴加工技术。

Email: gxtangqingchun@163.com

尹韶辉(通信作者), 1967 年出生, 男, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为超精密及微纳制造技术与装备。

E-mail: yinshaohui@hnu.edu.cn

王永强, 男, 1979 年出生, 博士, 讲师。主要研究方向为磁场辅助超精密加工。

E-mail: rancher_wong@126.com

张健, 男, 1989 年出生, 硕士。主要研究方向为数控多轴加工技术。

E-mail: gxliqq@163.com