

空间三维刀具误差补偿研究

唐清春, 周泽熙, 王玉涛, 谢栋

(广西科技大学 工程训练中心, 广西 柳州 545006)

摘 要: **目的** 研究空间三维状态下刀具误差补偿方法, 提高多轴加工复杂自由曲面表面轮廓精度。**方法** 首先对五轴加工中刀具与工件接触方式及刀具中心点、刀具接触点位置及矢量关系进行了分析, 推导出空间刀具误差补偿数学模型, 通过 MATLAB 初步对补偿算法进行了验证。基于双摆头式五轴机床运动学模型, 结合刀具误差补偿模型, 开发了带有刀具误差补偿功能的专用后置处理器。最后, 通过开发的专用后置处理软件进行 G 代码转换, 采用某叶片试件进行了仿真和实际切削实验, 并对实验结果进行了分析。**结果** 在复杂曲面加工中, 通过合理的刀具误差补偿方法, 可获得理论刀具尺寸下同样的表面质量及轮廓精度。刀具误差补偿值越小, 补偿效果越明显, 加工效果与理论结果越接近。叶片试件分别采用 $\phi 8$ 、 $\phi 9$ 、 $\phi 9.5$ 及 $\phi 10$ 刀具仿真加工, 与理论 $\phi 10$ 刀具加工的数据对比, 三种尺寸刀具补偿加工后的残留误差差值分别约为 0.08、0.06、0.04 mm, 其中 $\phi 9.5$ 的刀具误差补偿后的加工效果与理论结果最接近。**结论** 采用刀具空间误差补偿方法, 可获得与理论刀具一样的切削效果, 有效提高零件的表面质量, 不仅可以获得稳定的复杂零件轮廓精度, 还可以减少辅助时间。误差补偿效果与实际补偿值的大小有关, 补偿值越小, 补偿效果越好。

关键词: 五轴联动; 空间三维; 刀具误差补偿; 后置处理; 表面质量

中图分类号: TG502 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)07-0096-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.07.013

3D Tool Error Compensation

TANG Qing-chun, ZHOU Ze-xi, WANG Yu-tao, XIE Dong

(Engineering Training Center, Guangxi University of Technology, Liuzhou 545006, China)

ABSTRACT: The work aims to study the tool error compensation method in 3D state to improve the surface profile precision of multi axis machining complex free-form surface. The contact mode between tool and workpiece, the tool center point, the tool contact point position and the vector in the five axis machining were analyzed to deduce the mathematical model of space tool error compensation and the compensation algorithm was verified by MATLAB. Based on the kinematic model of five axis machine tools and combining with the tool error compensation model, a special post processor with the function of tool error compensation was developed. The G code was converted by the developed special post processing software. The simulation and actual cutting experiments were carried out with a blade sample and the experimental results were analyzed. From the results, the same surface quality and contour accuracy under the theoretical tool dimension could be obtained through reasonable tool error compensation method in complex surface machining. The smaller the tool error compensation value was, the better the compensation effect could be achieved and the closer the processing effect approximated to the theoretical result. The blade specimens were simulated for machining by $\phi 8$, $\phi 9$, $\phi 9.5$ and $\phi 10$, respectively. Compared with the theoretical machining data of $\phi 10$ tool,

收稿日期: 2018-01-19; 修订日期: 2018-03-30

Received: 2018-01-19; Revised: 2018-03-30

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51565006); 2016 年广西高校高水平创新团队及卓越学者计划资助项目

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51565006); Guangxi High Level Innovation Team and Scholar Program Funded Projects (2016)

作者简介: 唐清春 (1972—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为多轴加工技术。

Biography: TANG Qing-chun (1972—), Male, Ph. D., Assistant professor, Research focus: multi-axis machining technology.

the residual error values of tools in three dimensions after compensation machining were 0.08, 0.06 and 0.04 mm, respectively, and the error compensation machining of $\varnothing 5$ tool error was closest to the theoretical results. The same cutting effect as that of the theoretical tool can be obtained by 3D tool error compensation method to improve the surface quality of parts effectively. The error compensation method can be used to obtain stable contour accuracy of complex parts and reduce the auxiliary time. The error compensation effect is related to the size of the actual compensation value, so the smaller the compensation value is, the better the compensation effect can be achieved.

KEY WORDS: five axis linkage; 3D; tool error compensation; post processing; surface quality

数控五轴联动机床具有较高的自由度, 在面对复杂曲面零件的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^[1-2], 已广泛运用于航空、航天、船舶、汽车工业领域内复杂的叶片、叶轮类零件的精密制造。在五轴加工过程中, 零件的加工精度与刀具的参数设置有密切关系, 若刀具实际参数与理想设置不吻合, 会使刀具接触点坐标发生变化, 导致实际的加工零件轮廓偏离理想的轮廓, 降低零件面型精度。若使用刀具参数与编程刀具参数不一致, 传统的解决方法主要采用两种: 更换刀具; 根据实际刀具参数重新编制 G 代码程序。两种方法虽然都能解决刀具参数变化带来的加工零件精度降低的问题, 但都会增加机床辅助时间、刀具成本及编程人员的劳动强度。因此, 研究刀具误差补偿方法有切实的必要。

传统的二维刀具补偿方法是直接偏置一个刀具半径进行切削, 现有的 FANUC、SIEMENS、海德汉等数控系统均具备该功能。但在三维中, 刀具与工件的接触位置及刀具矢量方向呈动态变化, 传统的数控系统已无法完成刀具的三维误差补偿工作。因此, 如何比较经济有效地解决刀具三维误差补偿, 提高零件五轴加工面型精度, 仍然是目前研究的热点之一。

针对空间刀具误差补偿, 不少学者做了相应的系统研究, 不仅有基于平面投影法的五轴侧铣加工中刀具误差补偿研究成果^[3-5], 也有关于五轴端铣加工中的刀具误差补偿研究成果^[6-9], 同时还有学者基于数控系统研究了五轴加工中刀具的 RTCP 补偿功能^[10]。纵观各学者的研究, 发现这些研究都还处在实验室阶段, 并未针对专用五轴机床开发具有刀具误差补偿功能的专用后置处理软件应用于工程实践。

为切实解决刀具磨损导致的零件精度下降问题, 本文推导了刀具三维误差补偿模型, 并基于后置处理技术开发了专用的后置处理软件。首先, 分析刀具在 3D 切削过程中的接触方式, 然后根据刀具中心点、刀具接触点、刀轴矢量方向推导出刀具误差补偿数学模型; 其次, 在五轴机床基本运动学模型的基础上^[11-13], 采用高级语言开发出一款具有人机会话的专用后置处理软件, 该软件具有刀具 3D 误差补偿功能; 最后, 通过 UG 软件平台对某叶片进行刀具路径规

划^[14-16], 将后处理的 G 代码程序用于试件的仿真和实际切削, 验证了所提出方法的有效性。

1 空间刀具误差补偿原理

在五轴联动加工中, 刀具与工件的接触方式为点、线、面, 即刀具的侧刃或者端刃可能单独参与切削, 也可能同时参与切削。为便于进行误差模型推导, 仅考虑侧铣或端铣单一模式下刀具的误差补偿。刀具磨损后, 切削过程中刀轴矢量不发生变化, 但刀具接触点和刀具中心点均会发生偏移, 因此, 实施刀具三维误差补偿必须建立起刀具中心坐标与刀具接触点坐标及刀轴矢量的关系式, 同时还需确定刀具补偿方向向量。

本文以 UG 软件作为刀具轨迹规划, CLS 文件中包含了刀具中心坐标、刀具接触点坐标、刀轴矢量等信息, 其前置文件格式为 GOTO/ $X_o, Y_o, Z_o, L_x, L_y, L_z, \X_p, Y_p, Z_p , 其中(X_o, Y_o, Z_o)为刀具中心点坐标, (L_x, L_y, L_z)为刀轴矢量, (X_p, Y_p, Z_p)为刀具切触点坐标。NC 代码格式为 G01 $X_Y_Z_A_C_I_J_K_F$, 其中(X, Y, Z)值代表刀具中心点在切削过程中工件坐标系下的位置坐标, A 、 C 为两个旋转轴的旋转角度, I 、 J 、 K 为切触点到刀具中心的单位矢量, F 为进给率。

1.1 侧铣误差补偿模型

当刀具以侧铣方式切削工件时, 刀头不参与切削, 因此只考虑刀柄半径。本文以立铣刀为例进行半径补偿算法的推导, 其侧铣时与加工曲面的相互关系如图 1 所示。设 $P_s(P_{sx}, P_{sy}, P_{sz})$ 、 $P_e(P_{ex}, P_{ey}, P_{ez})$ 分别为首、末刀触点坐标, $\vec{L}_s(L_{sx}, L_{sy}, L_{sz})$ 、 $\vec{L}_e(L_{ex}, L_{ey}, L_{ez})$ 分别为首、末刀具中心点的刀轴矢量, 在加工过程中的瞬时刀触点、刀轴矢量分别为 $P_t(P_{tx}, P_{ty}, P_{tz})$ 、 $\vec{L}_t(L_{tx}, L_{ty}, L_{tz})$, 则空间任意刀具接触点单位法向矢量 \vec{N} 可以表示为:

$$\vec{N} = \begin{cases} \frac{\vec{L}_t \times (P_e - P_s)}{|\vec{L}_t \times (P_e - P_s)|} & \text{左刀补} \\ \frac{(P_e - P_s) \times \vec{L}_t}{|(P_e - P_s) \times \vec{L}_t|} & \text{右刀补} \end{cases} \quad (1)$$

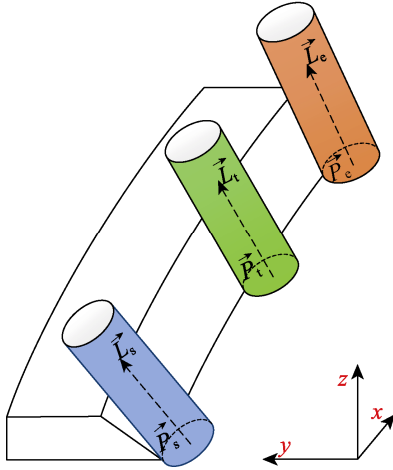


图1 侧铣
Fig.1 Flank milling

刀具中心点坐标 O_t 为:

$$O_t = P_t + R\vec{N} \quad (2)$$

其中 R 是刀具半径, 设 $\vec{Q} = R\vec{N}$, 此时 \vec{Q} 就是所求补偿向量。令 \vec{M} 表示走刀切向, 则有:

$$\vec{M} = \frac{P_e - P_s}{|P_e - P_s|} \quad (3)$$

则 \vec{Q} 可表示为:

$$\vec{Q} = \begin{cases} R \frac{\vec{L}_t \times \vec{M}}{|\vec{L}_t \times \vec{M}|} & \text{左刀补} \\ R \frac{\vec{M} \times \vec{L}_t}{|\vec{M} \times \vec{L}_t|} & \text{右刀补} \end{cases} \quad (4)$$

在加工过程中, 瞬时刀触点 P_t 可以表示为:

$$\begin{cases} P_{tx}(n) = P_{tx} + n(P_{ex} - P_{sx}) \\ P_{ty}(n) = P_{ty} + n(P_{ey} - P_{sy}) \\ P_{tz}(n) = P_{tz} + n(P_{ez} - P_{sz}) \end{cases} \quad (0 \leq n \leq 1) \quad (5)$$

为保证插补后的刀轴矢量位于理想平面, 刀具侧铣时常采用大圆插补方式, 此时刀轴矢量 \vec{L}_t 为:

$$\begin{cases} L_{tx}(n) = \frac{\sin(1-n)\alpha}{\sin \alpha} L_{sx} + \frac{\sin n\alpha}{\sin \alpha} L_{ex} \\ L_{ty}(n) = \frac{\sin(1-n)\alpha}{\sin \alpha} L_{sy} + \frac{\sin n\alpha}{\sin \alpha} L_{ey} \\ L_{tz}(n) = \frac{\sin(1-n)\alpha}{\sin \alpha} L_{sz} + \frac{\sin n\alpha}{\sin \alpha} L_{ez} \end{cases} \quad (0 \leq n \leq 1) \quad (6)$$

其中 $\alpha = \arccos(L_s, L_e)$, 则经过补偿后的刀具中心点轨迹 O_t 为:

$$\begin{cases} O_{tx} = P_{tx}(n) + Q_x(n) \\ O_{ty} = P_{ty}(n) + Q_y(n) \\ O_{tz} = P_{tz}(n) + Q_z(n) \end{cases} \quad (7)$$

1.2 端铣误差补偿模型

环形刀刀具结构介于球头刀和平底刀之间, 其特

例分别为球头刀和平底刀, 因此其可用于理想误差补偿模型的推导。

在多轴端铣切削过程中, 端铣时刀具与工件是点接触, 刀轴矢量动态变化, 如图2所示。其中, S 为加工曲面, R 为刀具半径, r 为圆角半径, \vec{L} 为刀轴矢量, \vec{N} 为刀具切触点的法向矢量, \vec{M} 为与刀具切触点的法矢 \vec{N} 共面且与刀轴矢量 \vec{L} 垂直的矢量, $P(x_p, y_p, z_p)$ 为曲面上刀具接触点坐标, $O(x_o, y_o, z_o)$ 为刀具中心点坐标, $O_p(x_{ip}, y_{ip}, z_{ip})$ 为刀尖点坐标。

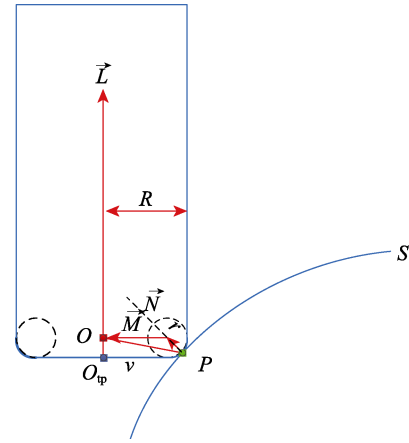


图2 端铣
Fig.2 End milling

分析空间工件坐标系中刀具的几何矢量关系, 向量 \vec{PO} 、 \vec{M} 可由以下公式表示:

$$\vec{PO} = r \times \vec{N} + (R-r) \times \vec{M} \quad (8)$$

$$\vec{M} = \frac{(\vec{PO} \times \vec{L}) \times \vec{L}}{|(\vec{PO} \times \vec{L}) \times \vec{L}|} \quad (9)$$

将式(9)代入式(8)可得 \vec{N} 关系式为:

$$\vec{N} = \frac{\vec{PO} \times |(\vec{PO} \times \vec{L}) \times \vec{L}| \times \vec{L} - (R-r)(\vec{PO} \times \vec{L}) \times \vec{L}}{r \times |(\vec{PO} \times \vec{L}) \times \vec{L}|} \quad (10)$$

当刀具半径 R 和圆角半径 r 分别改为 R' 和 r' 时, 刀具半径变化不会影响刀触点的坐标位置, 误差补偿后刀具中心轨迹方程可以表示为:

$$O' = P + r' \times \vec{N} + (R' - r') \times \vec{M} \quad (11)$$

刀尖点与刀心点同在刀具轴线上, 距离为 r , 因此误差补偿后刀尖点轨迹方程为:

$$O'_p = O' + r' \times \vec{L} \quad (12)$$

如当刀具圆角增加至等于刀柄半径时变为球头刀, 式(11)和式(12)可以按以下计算:

$$\begin{cases} O' = P + R' \times \vec{N} \\ O'_p = O' - R' \times \vec{L} \end{cases} \quad (13)$$

当刀具圆角半径为零时变为平底刀, 刀具中心点坐标和刀尖点坐标重合, 因此刀具中心轨迹方程为:

$$O' = P + R' \times \vec{M} \quad (14)$$

2 仿真实验

2.1 刀具误差补偿算法仿真分析

为了验证刀具空间误差补偿算法的有效性,本文采用 $\phi 20$ 的环形刀进行验证试验,试件采用某汽轮机叶片为试验对象,采用理论刀具和实际刀具补偿两种方式获得刀具路径轨迹,获得的刀具路径轨迹通过 MATLAB 软件进行虚拟轨迹仿真,仿真结果如图 3 所示,刀具参数如表 1 所示。

如表 1 所示, $\phi 20$ 环形刀的理论圆角半径为 5 mm,实际加工刀具的刀杆半径及圆角半径分别为 9、3 mm,相应的误差补偿值分别为 1、2 mm。图 3

是仿真模型中叶片刀具的路径轨迹。从图 3 可以看出,仿真模型中理论刀具中心轨迹与补偿后的刀具中心轨迹一致,执行刀具误差补偿后,刀具中心点位置发生了改变。为直观分析理论轨迹与补偿后轨迹,对 20 个采样数据点放大分析,可以很直观地看出理论刀具中心轨迹与补偿后的刀具中心轨迹方向一致,但位置发生明显改变,如图 4 所示。

表 1 实验刀具参数
Tab.1 Experimental tool parameters

Tool parameters	Tool radius R/mm	Fillet radius r/mm
Theoretical dimension	10	5
Actual dimension	9	3

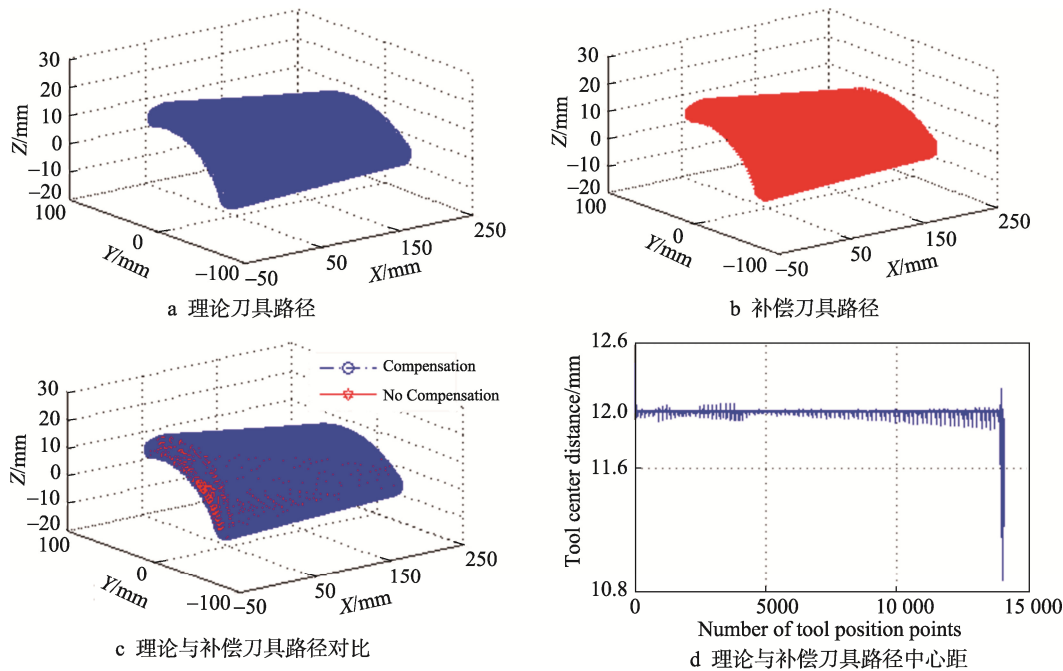


图 3 叶片试件刀具误差补偿对比

Fig.3 Comparison of tool error compensation of blade specimen: (a) theoretical tool path; (b) compensation tool path; (c) comparison between theory and compensation tool path; (d) center distance between theoretical and compensation tool paths

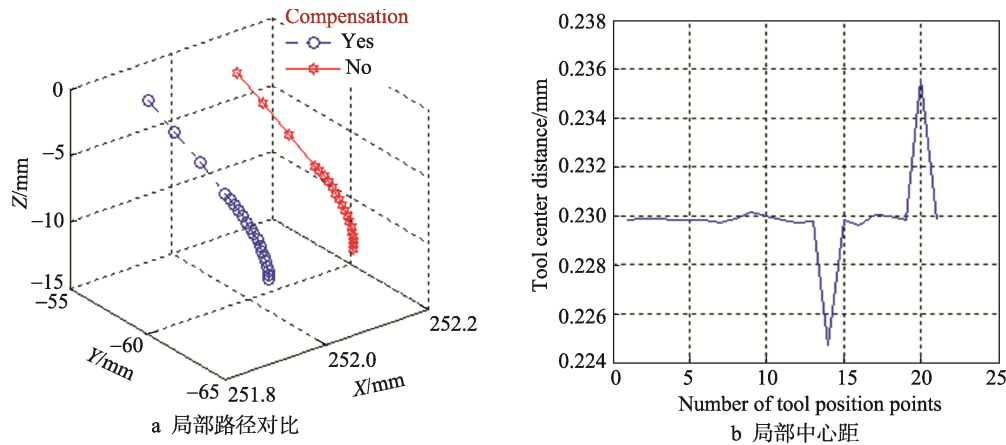


图 4 误差补偿局部示意图

Fig.4 Local schematic diagram of error compensation: (a) comparison of local tool path; (b) local center distance

2.2 误差补偿中刀具中心点轨迹变化规律

刀具在使用过程中,由于磨损会导致刀具半径及圆角半径都发生不同程度的变化,为进一步探讨误差补偿值大小对刀具中心轨迹点的影响,同样采用半径为 $\phi 10$ 的环形刀进行分析,分析误差补偿后刀具中心轨迹的影响规律。图5是刀具半径变化对补偿前后刀具中心点轨迹的影响规律,随着刀具半径的变化,补偿前后刀具中心点之间的距离呈线性递增趋势。图6是圆角半径对补偿前后刀具中心点轨迹的影响规律。当圆角半径一致时,刀具中心点位置不变,即刀具无磨损现象;随着圆角半径的变化,补偿前后刀具中心点距离呈线性递增关系。由图5、图6看出误差补偿后,刀具中心点位置会发生变动,再次验证了空间刀具误差补偿算法的正确性。

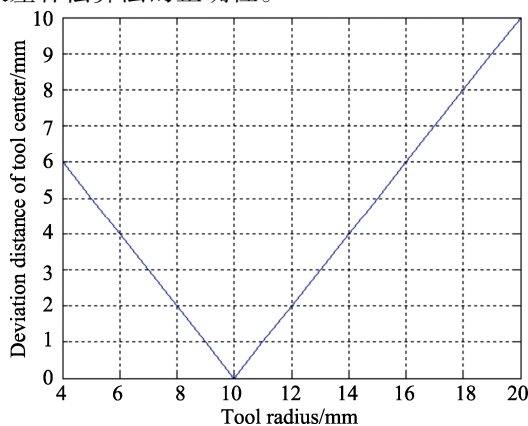


图5 刀具半径尺寸变化对刀具中心点轨迹的影响
Fig.5 Influence of tool radius change on tool center trajectory

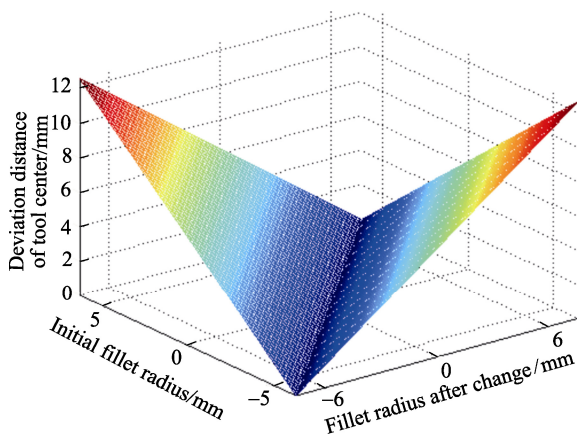


图6 圆角半径尺寸变化对刀具中心点轨迹的影响
Fig.6 Influence of fillet radius change on tool center trajectory

3 后置处理实现

后置处理是将通用软件产生的刀位源文件转化为NC代码的重要桥梁,是五轴加工中的关键技术之

一。将第1章节推导出的刀具侧铣及端铣误差补偿公式(7)、(11)、(12),与BV100五轴机床的基本运动学模型^[11-13]结合使用,使用JAVA高级语言 eclipse 模块开发了一款具有空间刀具误差补偿功能的专用后置处理软件,该软件不仅能进行常规的后置处理任务,还能进行3D刀具误差补偿,软件操作界面如图7所示。启动软件后,首先选取UG前处理生成的CLSF文件导入后置处理器,选取3D刀具补偿按钮后,根据加工使用的刀具,在空间刀具补偿界面输入实际刀具参数。运行软件后,系统将自动逐行识别源代码中的信息,并通过转换数学模型及误差补偿模型,自动补偿处理出数控机床所识别的NC代码。



图7 后置处理软件界面

Fig.7 Interface of post processing software

4 实验验证

4.1 仿真切削验证

为验证算法的有效性,本文以某叶片为测试件,基于UG平台,理论编程采用 $\phi 10$ 的球头刀进行曲面精加工轨迹规划,然后基于开发的专用后置处理器分别采用 $\phi 8$ 、 $\phi 9$ 、 $\phi 9.5$ 、 $\phi 10$ 的球头刀进行后置处理,并获得相应的G代码程序,其中 $\phi 8$ 、 $\phi 9$ 、 $\phi 9.5$ 后置处理时采用了刀具误差补偿。最后,处理得到的G代码程序在VERICUT软件中分别进行虚拟切削加工,通过残留量的对比来验证该方法的有效性。处理的G代码程序如图8所示。

由于理论编程使用 $\phi 10$ mm球头刀,误差补偿仿真加工使用的刀具分别是 $\phi 8$ 、 $\phi 9$ 、 $\phi 9.5$ 的球头刀。对比图8中补偿后的三组数据与标准数据,发现各自对应的程序中X、Y、Z数值接近,补偿刀具的尺寸越接近理论刀具,G代码程序的刀具中心坐标值的差别越小。

为了进一步验证采用空间刀具误差补偿算法的有效性,将上述空间刀具误差补偿前后的数控程序导入VERICUT7.2虚拟仿真软件,在同等条件下进行仿

<pre> N200 G01 X23.392 Y-185.422 Z142.289 A-57.755 C207.13; N201 G01 X19.568 Y-186.087 Z141.953 A-58.853 C197.116; N202 G01 X15.15 Y-187.259 Z140.896 A-59.984 C187.134; N203 G01 X10.291 Y-188.85 Z139.14 A-61.11 C177.216; N204 G01 X5.118 Y-190.769 Z136.719 A-62.202 C167.308; N205 G01 X-0.185 Y-192.901 Z133.714 A-63.218 C157.467; N206 G01 X-10.641 Y-197.448 Z126.273 A-64.922 C137.815; N207 G01 X-20.015 Y-201.964 Z117.493 A-66.06 C117.969; N208 G01 X-23.986 Y-204.129 Z112.81 A-66.386 C107.825; N209 G01 X-27.219 Y-206.114 Z108.258 A-66.508 C97.67; N210 G01 X-29.599 Y-207.89 Z104.026 A-66.423 C87.574; N211 G01 X-31.077 Y-209.467 Z100.224 A-66.137 C77.459; N212 G01 X-31.603 Y-210.832 Z96.997 A-65.662 C67.371; N213 G01 X-31.166 Y-211.984 Z94.439 A-65.012 C57.269; N214 G01 X-31.174 Y-212.157 Z94.067 A-65.074 C56.982; N215 G01 X-31.181 Y-212.331 Z93.692 A-65.137 C56.695; N216 G01 X-29.289 Y-211.908 Z94.559 A-65.11 C57.968; </pre>	<pre> N200 G01 X23.496 Y-185.923 Z142.417 A-57.758 C207.132; N201 G01 X19.672 Y-186.589 Z142.081 A-58.855 C197.118; N202 G01 X15.251 Y-187.76 Z141.025 A-59.987 C187.132; N203 G01 X10.393 Y-189.349 Z139.272 A-61.112 C177.218; N204 G01 X5.214 Y-191.258 Z136.865 A-62.199 C167.305; N205 G01 X-0.09 Y-193.397 Z133.852 A-63.218 C157.468; N206 G01 X-10.553 Y-197.94 Z126.42 A-64.919 C137.815; N207 G01 X-19.932 Y-202.46 Z117.636 A-66.059 C117.967; N208 G01 X-23.902 Y-204.624 Z112.954 A-66.384 C107.826; N209 G01 X-27.134 Y-206.615 Z108.39 A-66.509 C97.67; N210 G01 X-29.515 Y-208.386 Z104.168 A-66.422 C87.574; N211 G01 X-30.994 Y-209.961 Z100.372 A-66.134 C77.458; N212 G01 X-31.52 Y-211.334 Z97.128 A-65.663 C67.369; N213 G01 X-31.08 Y-212.485 Z94.571 A-65.014 C57.269; N214 G01 X-31.083 Y-212.659 Z94.194 A-65.077 C56.979; N215 G01 X-31.086 Y-212.832 Z93.819 A-65.14 C56.695; N216 G01 X-29.194 Y-212.403 Z94.701 A-65.109 C57.969; </pre>
a 理论程序	b $\phi 8$ 刀具补偿程序
<pre> N200 G01 X23.444 Y-185.676 Z142.348 A-57.758 C207.132; N201 G01 X19.621 Y-186.341 Z142.012 A-58.855 C197.118; N202 G01 X15.2 Y-187.512 Z140.957 A-59.987 C187.132; N203 G01 X10.343 Y-189.101 Z139.203 A-61.112 C177.218; N204 G01 X5.165 Y-191.01 Z136.797 A-62.199 C167.305; N205 G01 X-0.137 Y-193.148 Z133.783 A-63.218 C157.468; N206 G01 X-10.597 Y-197.691 Z126.351 A-64.919 C137.815; N207 G01 X-19.974 Y-202.211 Z117.567 A-66.059 C117.967; N208 G01 X-23.944 Y-204.374 Z112.885 A-66.384 C107.826; N209 G01 X-27.177 Y-206.366 Z108.322 A-66.509 C97.67; N210 G01 X-29.557 Y-208.137 Z104.1 A-66.422 C87.574; N211 G01 X-31.036 Y-209.711 Z100.303 A-66.134 C77.458; N212 G01 X-31.561 Y-211.085 Z97.059 A-65.663 C67.369; N213 G01 X-31.123 Y-212.235 Z94.503 A-65.014 C57.269; N214 G01 X-31.129 Y-212.411 Z94.125 A-65.077 C56.979; N215 G01 X-31.134 Y-212.584 Z93.75 A-65.14 C56.695; N216 G01 X-29.242 Y-212.154 Z94.632 A-65.109 C57.969; </pre>	<pre> N200 G01 X23.418 Y-185.552 Z142.314 A-57.758 C207.132; N201 G01 X19.595 Y-186.217 Z141.978 A-58.855 C197.118; N202 G01 X15.174 Y-187.389 Z140.922 A-59.987 C187.132; N203 G01 X10.317 Y-188.977 Z139.169 A-61.112 C177.218; N204 G01 X5.141 Y-190.886 Z136.762 A-62.199 C167.305; N205 G01 X-0.161 Y-193.024 Z133.749 A-63.218 C157.468; N206 G01 X-10.619 Y-197.566 Z126.317 A-64.919 C137.815; N207 G01 X-19.995 Y-202.086 Z117.533 A-66.059 C117.967; N208 G01 X-23.965 Y-204.25 Z112.851 A-66.384 C107.826; N209 G01 X-27.198 Y-206.241 Z108.287 A-66.509 C97.67; N210 G01 X-29.578 Y-208.013 Z104.065 A-66.422 C87.574; N211 G01 X-31.057 Y-209.587 Z100.269 A-66.134 C77.458; N212 G01 X-31.582 Y-210.96 Z97.025 A-65.663 C67.369; N213 G01 X-31.145 Y-212.111 Z94.468 A-65.014 C57.269; N214 G01 X-31.151 Y-212.286 Z94.091 A-65.077 C56.979; N215 G01 X-31.157 Y-212.46 Z93.716 A-65.14 C56.695; N216 G01 X-29.266 Y-212.03 Z94.598 A-65.109 C57.969; </pre>
c $\phi 9$ 刀具补偿程序	d $\phi 9.5$ 刀具补偿程序

图 8 G 代码程序

Fig.8 G code program: (a) theoretical procedure; (b) compensatory procedure of $\phi 8$; (c) compensatory procedure of $\phi 9$; (d) compensatory procedure of $\phi 9.5$

真加工。图 9、10、11 分别为 $\phi 8$ 、 $\phi 9$ 、 $\phi 9.5$ 球头刀的仿真加工与理论刀具仿真加工对比结果,发现未采用空间刀具半径补偿的残留量最多,其次是采用空间刀具半径补偿的残留量,理论编程刀具加工的残留量最少,具体数值见表 2。

从表 2 可以看出,刀具误差补偿后加工可以有效地减少残留数,同时最大残留值也会缩小,补偿后加工的残留误差差值分别控制在 0.08、0.06、0.04 mm 左右。刀具误差补偿值越小,残留数越接近理想残留数,达到理论编程刀具的加工效果。当半径补偿误差值在 1 mm 范围内时,加工效果较好。

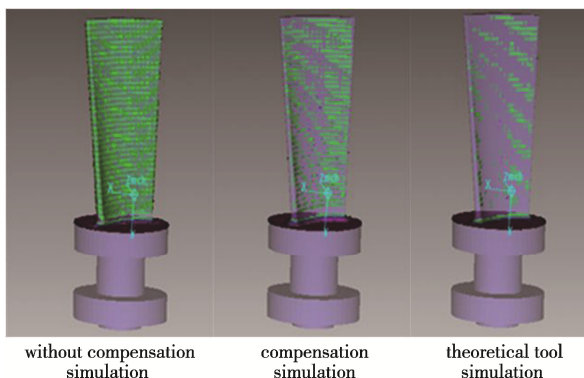


图 9 误差补偿切削结果与理论切削结果对比 ($\phi 8$)
Fig.9 Comparison of results between error compensation cutting and theoretical cutting ($\phi 8$):

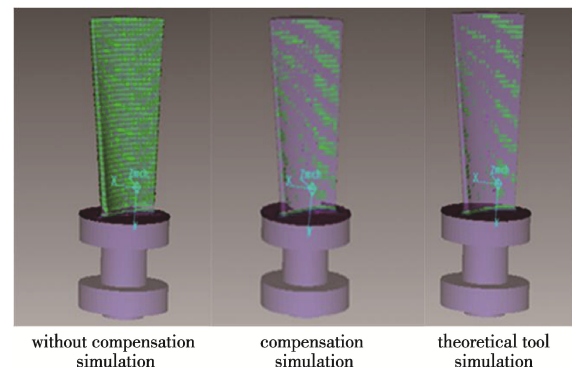


图 10 误差补偿切削结果与理论切削结果对比 ($\phi 9$)
Fig.10 Comparison of results between error compensation cutting and theoretical cutting ($\phi 9$):

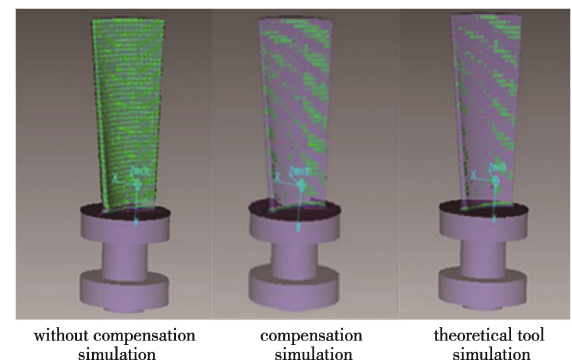


图 11 误差补偿切削结果与理论切削结果对比 ($\phi 9.5$)
Fig.11 Comparison of results between error compensation cutting and theoretical cutting ($\phi 9.5$):

表 2 理论与误差补偿结果对比
Tab.2 Comparison of results between theory and error compensation

Tool Parameter	$\phi 8$ (No)	$\phi 8$ (Yes)	$\phi 9$ (No)	$\phi 9$ (Yes)	$\phi 9.5$ (No)	$\phi 9.5$ (Yes)	$\phi 10$
Residual number	4035	2790	3374	2197	2894	2027	1735
Max residual/mm	3.989 823	3.726 312	3.884 792	3.707 551	3.827 628	3.688 023	3.644 247

4.2 切削验证

仿真切削验证后,为进一步验证刀具误差补偿算法的有效性,对叶片的实际切削加工进行实验,采用具有高曲率变化的某叶片试件进行验证。在 UG 软件编制刀具路径轨迹时采用 $\phi 10$ 的刀具,通过后置处理后,分两种方法进行切削加工实验($\phi 8$ 刀具误差补偿加工、 $\phi 10$ 刀具加工),切削加工过程如图 12 所示。从两种条件下叶片的切削过程看,刀具过渡平滑,采用刀具误差补偿的试验件与理论刀具加工结果基本一致,无明显的过切与残留,整个型面光滑过渡。两种实验结果轮廓误差控制在 0.05 mm 以内,从而验证了刀具误差补偿方法的有效性。



图 12 试件切削实验
Fig.12 Sample cutting experiment

5 结论

1) 根据刀具中心点、接触点的位置及矢量,可分析出刀具磨损或更换后刀具中心轨迹位置的变化关系,并依此建立误差补偿数学模型。

2) 基于基本的机床运动学模型,加载刀具空间误差补偿算法,在后置处理过程中可实现刀具误差的精确补偿,获得与理论刀具相近似的切削效果,可在降低生产成本的同时有效提高零件的表面质量。

3) 刀具 3D 误差补偿切削效果与实际误差补偿值的大小有关,补偿值越小,补偿效果越好。

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] 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 5-axis Circumference Milling[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(19): 158-162.

[3] 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. Research on Tool Radius Compensation of Five axis CNC System[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006.

[4] 胡自化,张平,杨冬香,等.三轴数控侧铣空间刀具半径补偿算法[J].机械工程学报,2007,43(5):138-144.

HU Zi-hua, ZHANG Ping, YANG Dong-xiang, et al. Tool Radius Compensation Algorithm for Three-axis NC Peripheral Milling[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(5): 138-144.

[5] 杨富枝,林浒,郑懿默,等.五轴侧铣加工空间刀具半径补偿研究[J].制造技术与机床,2010(11):82-88

YANG Fu-zhi, LIN Hu, ZHENG Liao-mo, et al. Research on The Space Tool Radius Compensation for Five-axis Flank Milling[J]. Manufacturing Technology and Machine Tool, 2010(11): 82-88.

[6] 洪海涛,于东,张立先,等.五轴端铣加工中3D刀具半径补偿研究[J].中国机械工程,2009(20):1770-1774.

HONG Hai-tao, YU Dong, ZHANG Li-xian, et al. Research on 3D Cutter Radius Compensation for 5-axis End Milling[J]. China Mechanical Engineering, 2009(20): 1770-1774.

[7] 陈良骥,王永章.五轴联动数控加工中的刀具补偿方法[J].制造技术与机床,2008(2):22-25.

CHEN Liang-ji, WANG Yong-zhang. Tool Compensation in Five-axis CNC Machining[J]. Manufacturing Technology and Machine Tool, 2008(2): 22-25.

[8] CHEN You-dong, WANG Tian-miao. Three-dimensional Tool Radius Compensation for Multi-axis Peripheral Milling[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2013, 26(3): 547-554.

[9] HABIBI M, AREZOO B, NOJEDEH M V. Tool Deflection

- and Geometrical Error Compensation by Tool Path Modification[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2011, 51: 439-449.
- [10] LIN Zhi-wei, FU Jian-zhong, SHEN Hong-yao, et al. On the Workpiece Setup Optimization for Five-axis Machining with RTCP Function[J]. Int J Adv Manuf Technol, 2014, 74: 187-197.
- [11] HUANG Ni, JIN Yong-qiao, BI Qing-zhen, et al. Integrated Post-processor for 5-axis Machine Tools with Geometric Errors Compensation[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2015, 94: 65-73.
- [12] GU Jie, AGAPIOU J S, KURGIN S. Error Compensation and Accuracy Improvements in 5-axis Machine Tools Using the Global Offset Method[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2017, 44: 324-331.
- [13] BOZ Y, LAZOGLU I. A Postprocessor for Table-tilting Type Five-axis Machine Tool based on Generalized Kinematics with Variable Feedrate Implementation[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 66: 1285-1293.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.