

文章编号:1671-8879(2018)01-0120-07

五轴数控加工 3D 刀具补偿及其后置处理方法

蔡安江,宋仁杰,杜金健,李 林

(西安建筑科技大学 机电工程学院,陕西 西安 710055)

摘 要:为解决五轴数控加工过程中,由于刀轴矢量不断变化,刀具补偿方向无法确定引起刀具在三维空间中无法补偿的问题,提出一种基于前置与后置处理的五轴数控加工 3D 刀具补偿方法。针对具备 3D 刀具补偿功能的数控系统,推导出五轴数控加工 3D 刀具补偿的补偿矢量与补偿后刀位点坐标的矢量计算方程,并基于前置三维软件(UG)的前置处理,建立了控制刀位文件格式的函数,实现了 UG 前置处理在五轴数控加工模块下输出包含切触点在内的刀位文件。根据 SIE-MENS 840D 数控系统实现 3D 刀具补偿的数字控制(NC)指令格式要求,以非正交摆头转台五轴数控机床为例,通过逆向运动学变换提出具体的后置处理方法。基于智能制造软件 IMSPost(后处理程序编辑器)平台和所提出的后置处理方法开发了专用后置处理器,自动获取了具有 3D 刀具补偿矢量信息的 NC 程序,基于仿真软件 VERICUT 平台对不同工况下整体叶轮仿真加工的结果进行对比。结果表明:当刀具因磨损发生尺寸变化时,采用提出的方法和开发的具有 3D 刀具补偿功能的后置处理器所获取的 NC 程序,可以将加工表面的欠切误差控制在 0.1 mm 以下,且无过切现象,有效地提高了五轴数控加工的精度和效率,避免了刀具磨损后发生刀具尺寸改变必须返回计算机辅助制造(CAM)系统重新生成刀位文件,以及再次进行后置处理的繁琐过程,验证了所提出的前置处理与后置处理方法的正确性和有效性。

关键词:机械工程;五轴数控加工;3D 刀具补偿;补偿矢量;刀位点坐标;数控系统;后置处理

中图分类号:TG659;TP391

文献标志码:A

Method on five-axis CNC machine 3D cutter compensation and post-process

CAI An-jiang, SONG Ren-jie, DU Jin-jian, LI Lin

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology,
Xi'an 710055, Shaanxi, China)

Abstract: In five-axis machining, as the tool axis vector changes, the tool compensation direction can not be determined resulting in the problem that the tool can not be compensated in the three-dimensional space. In order to solve this problem, a 3D tool compensation method for five-axis CNC machining was proposed based on pre-processing and post-processing. For numerical control systems with the 3D tool compensation function, the vector calculation equation about compensation vector and cutter location point coordinates after compensation in five-axis 3D tool compensation was derived. By creating the function which controls the cutter location file format

收稿日期:2017-07-21

基金项目:国家自然科学基金项目(51475352)

作者简介:蔡安江(1965-),男,上海市人,教授,博士研究生导师,E-mail:cai_aj@163.com。

in UG pre-processing, achieved that in the five-axis CNC machining module, the UG pre-processing could output the cutter location file including the contact point coordinates. According to the NC instruction format that SIEMENS 840D CNC system requests to achieve 3D cutter compensation function, a five-axis CNC machine tool with non-orthogonal table/spindle-tilting type was used as an example, and the specific post-processing method based on the inverse kinematic transformations was proposed. Based on IMSPost platform and post-processing method, a dedicated post-processor was developed. Then the NC code with 3D cutter compensation vector information could be auto-obtained. By using the VERICUT software, simulation results of integral impeller in different operating conditions were compared. The results show that when the tool size changes due to wear, adopting the proposed pre-processing method and the NC code obtained by the developed post-processor with 3D cutter compensation, the undercutting error can be controlled less than 0.1 mm without over-cutting phenomenon. It effectively improves the accuracy and efficiency of five-axis CNC machining, and avoids the complicated process that the programmer must return to CAM system to generate new tool paths and post-process cutter location data again because of tool size change due to wear, which verifies the correctness and validity of the proposed pre-processing and post-processing methods. 6 figs, 17 refs.

Key words: mechanical engineering; five-axis CNC machining; 3D cutter compensation; compensation vector; cutter location point coordinate; CNC system; post-process

0 引 言

五轴数控加工是实现复杂自由曲面加工的重要方式,已广泛应用于航空航天、兵器、船舶、汽车等制造领域。针对二维轮廓加工,目前数控系统都具备刀具长度和刀具半径补偿的功能,然而在五轴数控加工过程中,由于切触点和刀轴矢量方向均不断变化,刀具半径补偿功能较难实现^[1]。目前,众多国内外学者对 3D 刀具补偿技术进行了研究。针对具备五轴数控加工 3D 刀具补偿功能的数控系统,梁全等分析了前置输出的 CLS 文件格式与数控系统接受刀具补偿矢量的指令格式,通过后置处理解决了带刀具补偿矢量的五轴 NC 代码编程问题^[2-4];胡自化等介绍了侧铣加工的半径补偿方法^[5];陈良骥等研究了在 CNC 系统中 3D 刀具半径补偿的实现方法^[6];Tung 等针对带倾斜回转台的卧式机床,提出了通过后置处理实现三维刀具半径补偿方法^[7]。以上方法当刀具尺寸发生变化时均需重新进行后置处理,数控程序重用性差。徐汝峰等针对不具备五轴 3D 刀具补偿功能的数控系统,研究了如何通过后置处理来实现 3D 刀具半径补偿功能,但未对具备五轴 3D 刀具补偿功能的数控系统提出相关解决方法^[1,8-9]。目前国内外主要配置的数控系统(如 SIEMENS 840D 系统^[10-11]、Fanuc30i 系统和 Heiden-

hain iTNC530 系统等)均已具备 3D 刀具补偿功能,它们都自定义了接受 3D 刀具补偿矢量的 NC 指令格式。但 CAM 软件(如 CATIA、UG 等)生成的刀位文件经过后置处理得到的 NC 指令并不符合这些数控系统实现 3D 刀具补偿功能所定义的指令格式。

基于上述不足,本文针对具备五轴数控加工 3D 刀具补偿功能的数控系统,研究其基本原理及后置处理方法,解决如何生成具有 3D 刀具补偿矢量信息的 NC 程序,实现五轴数控加工 3D 刀具补偿。

1 3D 刀具补偿的基本原理

由于刀轴矢量不变,二维刀具半径补偿的实质只是将切触点的坐标按其表面的法向矢量进行偏置,再对刀具中心点编程;而在 3D 刀具补偿中,由于刀轴矢量不断变化,刀位点的补偿矢量与二维刀具半径补偿不同,是通过切触点表面的法向矢量、刀具方向和刀具几何尺寸计算得出^[11]。

下文分别对五轴数控加工中常用的端铣刀、球头铣刀和环形铣刀进行矢量分析,计算得出 3D 刀具补偿的补偿矢量及补偿后的刀位点坐标,见下页图 1。图中: P 为切触点, $O_P(x, y, z)$ 为刀具中心点,即刀位点, O_C 为刀心点, O_I 为刃口圆心, $P(p_x, p_y, p_z)$ 为切触点, R 为刀具半径, r, r_1 均为刃

口半径, $n(n_x, n_y, n_z)$ 为切触点表面的法向矢量, $l(l_x, l_y, l_z)$ 为刀轴矢量, $m(m_x, m_y, m_z)$ 为垂直于刀轴方向的矢量, $v(v_x, v_y, v_z)$ 为补偿矢量, 以上矢量均为单位矢量, k 为路径切线。

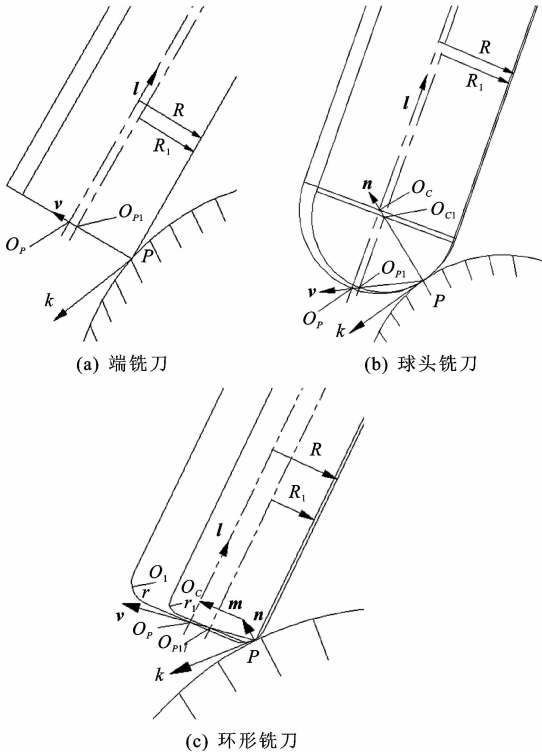


图 1 3D 刀具补偿模型

Fig. 1 3D cutter compensation models

1.1 端铣刀的补偿矢量及补偿后的刀位点坐标计算

当刀具为平底刀时, 刀具中心点 O_P 与刀心点 O_C 重合, 刀具的补偿向量为 v , 与切触点表面的法向矢量 n 重合。当刀具半径 R 变成 R_1 时, 刀位点 O_P 须沿 v 平移, 补偿量为 $\Delta R = R_1 - R$, 补偿后的刀位点 O_{P1} 坐标为

$$O_{P1} = O_P + \Delta R v \quad (1)$$

$$v = \frac{PO_P}{|PO_P|} \quad (2)$$

式中: PO_P 、 $|PO_P|$ 分别为 P 点到 O_P 点的矢量与长度。

1.2 球头铣刀的补偿矢量及补偿后的刀位点坐标计算

当刀具为球头铣刀时, 刃口半径与刀具半径相等, 当刀具半径由 R 变成 R_1 时, 为保持球头刀与曲面相切, 补偿矢量 v , 如图 1(b) 所示, 刀具中心点 O_P 须沿 v 进行平移, 补偿量为 $\Delta R = R_1 - R$, 则补偿矢量 v 可以通过切触点表面法向矢量 n 和刀轴矢量 l 计算得到

$$v = n - l \quad (3)$$

$$n = \frac{PO_C}{|PO_C|} \quad (4)$$

式中: PO_C 、 $|PO_C|$ 分别为 P 点到 O_C 点的矢量与长度。

则得到补偿后的刀位点坐标为

$$O_{P1} = O_P + v \Delta R = O_P + \Delta R n - \Delta R l \quad (5)$$

1.3 环形铣刀的补偿矢量及补偿后的刀位点坐标计算

当刀具为环形铣刀时, 刀具半径由 R 变成 R_1 , 刃口半径由 r 变成 r_1 。则沿矢量 n 的补偿量为 Δr , 沿矢量 m 的补偿量为 $\Delta R - \Delta r$, 沿刀轴矢量 l 的补偿量为 Δr 。

其补偿矢量 v 可以由刀轴矢量 l 、切触点表面法向矢量 n 和垂直于刀轴的矢量 m 计算得到, 即

$$v = n + m - l \quad (6)$$

则得到补偿后的刀位点 O_{P1} 坐标为

$$O_{P1} = O_P + (\Delta R - \Delta r)m + \Delta r n - \Delta r l \quad (7)$$

向量 m 、 n 都是未知量, l 为已知向量, 利用空间向量的性质可得到

$$m = \frac{(l \cdot PO_C)l}{|l \cdot PO_C|} \quad (8)$$

$$PO_C = O_P + l r - P \quad (9)$$

$$n = \frac{PO_1}{|PO_1|} = \frac{PO_C - O_1 O_C}{|PO_C - O_1 O_C|} = \frac{PO_C - (R - r)m}{|PO_C - (R - r)m|} \quad (10)$$

式中: PO_1 、 $|PO_1|$ 分别为 P 点到 O_1 点的矢量与长度; $O_1 O_C$ 、 $O_1 O_C$ 分别为 O_1 点到 O_C 点的矢量和长度。

以上分析了五轴数控加工 3D 刀具补偿的基本原理, 给出了五轴数控加工中常用 3 种刀具类型的刀具补偿矢量方程及补偿后刀位点坐标计算方程, 为实现具有 3D 刀具补偿功能的后置处理器开发提供了理论基础。

2 五轴数控加工 3D 刀具补偿后置处理的实现

2.1 UG 刀位文件及数控系统 3D 刀具补偿 NC 格式分析

五轴数控加工 3D 刀具补偿是在实际加工刀具尺寸发生变化的情况下, 让原规划的刀具中心点沿着补偿矢量方向进行一定的偏置, 从而保证切触点位置的正确^[3]。基于 UG 前置处理生成刀路轨迹时, 为满足五轴数控加工 3D 刀具补偿矢量计算所需要的刀位信息, 需要对 UG 控制刀位文件格式的函数进行修改, 使生成的 CLS 文件包含切触点

坐标。

UG 前置处理控制刀位文件格式的函数主要针对 CLS 文件中的关键字输出进行控制,如 GOTO、FEEDAT、RAPID 等。

勾选“非切削移动”对话框中的“输出切触点数据”,生成的 CLS 文件将含有切触点坐标,“GOTO”语句格式为

GOTO/X_₋,Y_₋,Z_₋,I_₋,J_₋,K_₋ \$ \$ X_{1_-},Y_{1_-},Z_{1_-}

其中:X_₋,Y_₋,Z_₋为刀具中心点在工件坐标系下的坐标;I_₋,J_₋,K_₋为刀轴矢量;X_{1_-},Y_{1_-},Z_{1_-}为工件坐标系下的切触点坐标。

对于具备五轴数控加工 3D 刀具补偿功能的数控系统 SIEMENS 840D,若已知切触点表面的法向矢量、刀具方向和刀具几何尺寸,则在已激活 3D 刀具补偿指令的前提下,SIEMENS 840D 数控系统可以计算出新刀具的补偿矢量和切触点 P 。

SIEMENS 840D 数控系统在实现五轴数控加工 3D 刀具补偿功能时(以摆头转台 BC 机床为例),要求的 NC 代码格式为

G1 X_Y_Z_ B₂_C₂_A₄_B₄_C₄_F_

要求的 NC 代码除了有机床坐标系下刀具中心点坐标 X 、 Y 、 Z 和 2 个旋转轴的旋转角度 B_2 、 C_2 外,还需提供切触点表面的法向矢量,通常切触点处的表面法向矢量以 A_4 、 B_4 、 C_4 表示。但是极少有 CAM 系统能够为每个 CNC 模块提供切触点表面的法向矢量^[11]。

切触点表面的法向矢量 n 可以通过式(2)、式(4)和式(10)计算得出。NC 代码中,机床坐标系下的刀具中心点坐标 X 、 Y 、 Z 及 2 个旋转轴的旋转角度 B_2 、 C_2 ,可以通过 CLS 文件中的刀尖点坐标和刀轴矢量运动学变换计算。

2.2 切触点法向矢量的计算

以环形铣刀为例,切触点表面的法向矢量 n 是切触点到刀口圆心的矢量。要通过式(10)计算出切触点表面的法向矢量,需知道 PO_c 矢量和 m 矢量,所以要计算 PO_c 矢量和 m 矢量。由式(9)可得 PO_c (a, b, c)矢量为

$$\begin{cases} a = x + r l_x - p_x \\ b = y + r l_y - p_y \\ c = z + r l_z - p_z \end{cases} \quad (11)$$

通过矢量计算可得 m 矢量的各分量为

$$\begin{cases} m_x = c l_x l_z - a l_z^2 - a l_y^2 + b l_x l_y \\ m_y = a l_x l_y - b l_x^2 - b l_z^2 + c l_y l_z \\ m_z = b l_y l_z - c l_y^2 - c l_x^2 + a l_x l_z \end{cases} \quad (12)$$

切触点表面的法向矢量 n 的各分量为

$$\begin{cases} n_x = a - \frac{(R-r)m_x}{\sqrt{m_x^2 + m_y^2 + m_z^2}} \\ n_y = b - \frac{(R-r)m_y}{\sqrt{m_x^2 + m_y^2 + m_z^2}} \\ n_z = c - \frac{(R-r)m_z}{\sqrt{m_x^2 + m_y^2 + m_z^2}} \end{cases} \quad (13)$$

对式(13)得到的矢量单位化后便可得到环形铣刀的法向矢量。与环形铣刀法向矢量计算相比,端铣刀与球头铣刀法向矢量的计算相对简单,通过式(11)也可以求得端铣刀与球头铣刀的法向矢量。当 $r=0$ 时,将求得的矢量单位化后便是端铣刀的法向矢量。当 $r=R$ 时,将求得的矢量单位化后就是球头铣刀的法向矢量。

2.3 非正交摆头转台五轴数控机床运动学变换

机床的运动学求解是根据机床的结构通过一系列的矩阵平移和旋转,将工件坐标系下的刀位点坐标转换成相应机床坐标系下的机床坐标^[12-14]。

图 2 为具有非正交旋转轴的摆头转台结构的五轴数控机床,除了 3 个平动轴 X 、 Y 、 Z 外,还有 2 个旋转轴 B' 、 C' 。轴 C' 为工作台的旋转轴,轴 B' 与 Y 轴不重合,而是 Y 轴朝 Z 轴正方向旋转 45° 。

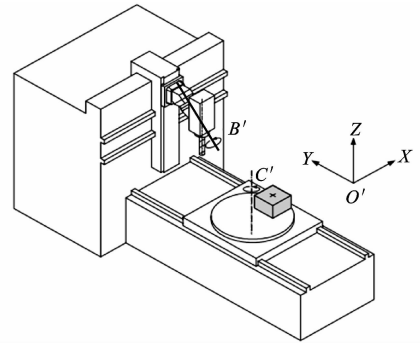


图 2 非正交摆头转台结构

Fig. 2 Structure of non-orthogonal of five-axis machine tools with nutating head

设工件坐标系为 $O_w X_w Y_w Z_w$, 刀具坐标系为 $O_t X_t Y_t Z_t$, 数控机床的坐标运动指的是刀具相对于工件的运动,所以坐标模型的运动关系即是刀具坐标系 $O_t X_t Y_t Z_t$ 到工件坐标系 $O_w X_w Y_w Z_w$ 之间的转换,则 B' 、 C' 摆头转台五轴数控机床的正向运动学方程为

$$\begin{bmatrix} l_x & x_1 \\ l_y & y_1 \\ l_z & z_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \text{Trans}(L_x, L_y, L_z) \text{Rot}(z, -C)$$

$$\text{Trnas}(X-L_x, Y-L_y, Z-L_z) \cdot \text{Rot}(\omega, -B) \begin{bmatrix} 0 & 0 & -L & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}^T \quad (14)$$

式中: L 为刀具摆长; B 、 C 分别为摆头和工作台转动角度; x_1 、 y_1 、 z_1 为工件坐标系下的刀位点坐标; L_x 、 L_y 、 L_z 为工件坐标系原点到机床坐标系原点的偏移矢量分量; $\text{Trans}(\cdot)$ 为平移运动的齐次坐标变换矩阵; $\text{Rot}(z, -C)$ 为绕机床 z 轴旋转 $-C$ 角度的齐次坐标变换矩阵; $\text{Rot}(\omega, -B)$ 为绕机床 ω 轴旋转 $-B$ 角度的齐次坐标变换矩阵。

由式(14)得到 B' 、 C' 摆头转台五轴数控机床的逆向运动学方程为

$$\begin{cases} X = \frac{\sqrt{2}}{2} L \sin(B) + (L_y - y_1) \sin(C) - (L_x - x_1) \cos(C) + L_x \\ Y = \frac{L}{2} [1 - \cos(B)] - (L_y - y_1) \cos(C) - (L_x - x_1) \sin(C) + L_y \\ Z = \frac{L}{2} [1 - \cos(B)] + L \cos(B) + z_1 \\ B = \arccos(2L_z - 1) \quad 0 \leq B \leq \pi \\ C = \arctan[2(\omega_1, \omega_2)] \quad -\pi \leq C \leq \pi \end{cases} \quad (15)$$

其中

$$\omega_1 = \frac{L_x}{2} [1 - \cos(B)] - \frac{\sqrt{2}}{2} L_y \sin(B)$$

$$\omega_2 = \frac{L_y}{2} [1 - \cos(B)] + \frac{\sqrt{2}}{2} L_x \sin(B)$$

通过建立非正交摆头转台五轴数控机床各运动轴坐标与刀位数据之间的关系,基于逆向运动学求解方法,可以得到非正交摆头转台五轴数控机床平动轴坐标与转动轴坐标^[15-16]。

3 3D 刀具补偿后置处理器的开发

基于 IMSpst(后处理程序编辑器)开发具有 3D 刀具补偿功能的后置处理器,需根据非正交摆头转台类五轴数控机床结构和配置的 SIEMENS 840D 数控系统程序格式进行设置、修改、子程序调用及宏程序编制等^[17]。宏程序编制实现后置处理的主要任务除刀位文件信息的读取、机床运动学变换求解、进给速度的校验、非线性运动误差校验外,还应完成切触点处表面法向矢量的求解。

SIEMENS 840D 数控系统自定义了五轴数控加工时实现 3D 刀具的补偿指令,即刀具长度补偿指令为 TRAORI 和半径补偿功能的命令为 CUT3DF。为实现 3D 刀具补偿功能,在调用 3D 刀

具补偿指令后,除需知道机床坐标系下刀具中心点坐标和 2 个旋转轴的旋转角度外,还需提供切触点处表面的法向矢量。当刀具尺寸发生变化,把变化量添加到数控系统刀具补偿量里,SIEMENS 840D 数控系统就可根据具有 3D 刀具补偿格式的 NC 代码自动进行补偿,从而提高了数控加工程序的重用性。

以球头铣刀为例,利用 IMSpst 平台的宏命令功能,基于后置处理算法,主要通过 GOTO/* 宏命令中编译宏程序实现刀具中心点坐标和旋转角度的输出;基于五轴数控加工 3D 刀具补偿矢量的矢量算法,可在 NORMAL/* 宏命令编译宏程序中实现切触点处表面法向矢量输出。NORMAL/* 宏命令中具体的代码如图 3 所示。

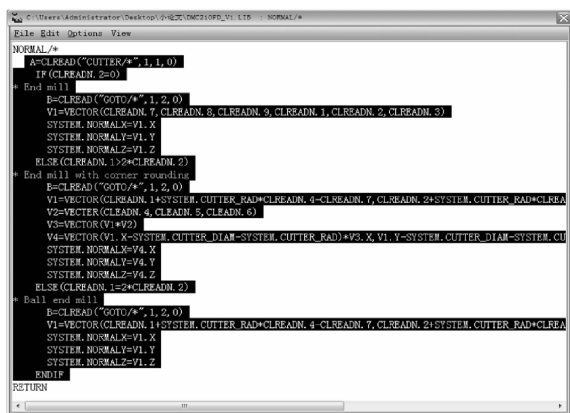


图 3 编辑 NORMAL/* 宏命令

Fig. 3 Edition of NORMAL/* macro command

4 仿真加工验证试验

为验证本文方法的有效性,以整体叶轮为例,基于 UG 的前置处理,生成含切触点坐标的整体叶轮 CLS 文件。通过基于 IMSpst 开发的后置处理器生成具有 3D 刀具补偿矢量的 NC 程序,在某航空企业生产使用的基于 VERICUT 构建的 DMU 210FD 虚拟仿真加工系统中进行了验证。

仿真加工验证主要对整体叶轮叶片在 3 种工况下的加工结果进行比较。

(1) 采用刀具半径及刀具切削部分的半径均为 $R=3$ mm 的球头铣刀(生成刀路轨迹所使用的刀具),仿真加工结果如下页图 4 所示。

(2) 采用刀具半径 $R=3$ mm、刀具切削部分的半径 $r=2.5$ mm 的球头铣刀,用来表示刀具更换或磨损后的刀具。仿真加工结果如下页图 5 所示。

(3) 采用刀具半径 $R=3$ mm、刀具切削部分的

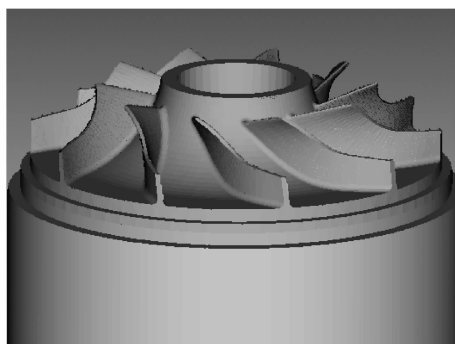


图 4 $R=3\text{ mm}$ 球头铣刀仿真加工结果

Fig. 4 Simulation result of ball-end-milling cutter ($R=3\text{ mm}$)

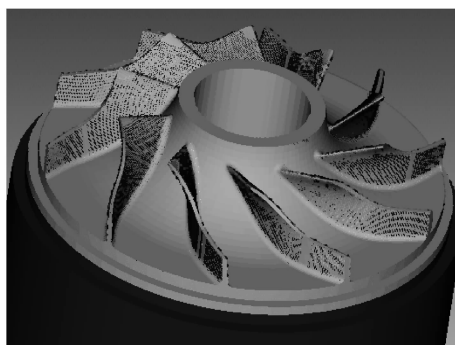


图 5 $R=3\text{ mm}, r=2.5\text{ mm}$ 球头铣刀仿真加工结果

Fig. 5 Simulation result of ball-end-milling cutter
($R=3\text{ mm}, r=2.5\text{ mm}$)

半径 $r=2.5\text{ mm}$ 的球头铣刀,设置刀具长度补偿值和刀具半径补偿值均为 0.5 mm ,同时激活 3D 刀具补偿指令。仿真加工结果如图 6 所示。

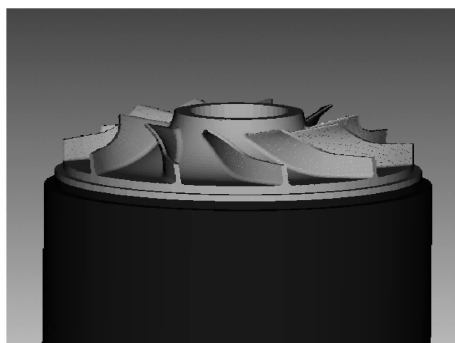


图 6 $R=3\text{ mm}, r=2.5\text{ mm}$ 的球头铣刀带补偿的仿真加工结果

Fig. 6 Simulation result of ball-end-milling cutter with compensation ($R=3\text{ mm}, r=2.5\text{ mm}$)

由图 5 可以看出,当刀具尺寸发生变化时,叶片表面有明显的欠切,且欠切误差都在 0.1 mm 以上,但无过切现象。由图 6 可以看出,在激活 3D 刀具补偿指令的情况下,即使刀具尺寸发生变化,工件的加工表面并没有出现过切和欠切现象。对比图 4 和图 6 可知,本文提出的 3D 刀具补偿及其后置处理方法有效。

5 结 语

(1)研究了五轴数控加工 3D 刀具补偿的基本原理,针对 3 种常用类型刀具分别推导出五轴数控加工 3D 刀具补偿的补偿矢量与补偿后刀位点坐标矢量计算方程,为实现五轴数控加工具有 3D 刀具补偿功能的后置处理器开发提供了理论基础。

(2)基于 UG 的前置处理,建立了控制刀位文件格式的函数,实现了在五轴数控加工模块下可输出包含切触点在内的刀位文件,解决了五轴数控加工 3D 刀具补偿后置处理所需的刀位信息问题,为具有 3D 刀具补偿功能的后置处理器的开发奠定了技术基础。

(3)以非正交摆头转台五轴数控机床为例,基于 SIEMENS 840D 数控系统实现 3D 刀具补偿的 NC 指令格式要求和逆运动学原理,提出了实现五轴数控加工 3D 刀具补偿功能的后置处理方法,并基于 IMSpost 平台开发了专用后置处理器。

(4)实例加工仿真结果验证了本文方法的正确性和有效性。该方法可以实现五轴数控加工具有 3D 刀具补偿,避免了刀具磨损后发生刀具尺寸改变必须返回 CAM 系统,重新生成刀位文件和再次进行后置处理的繁琐过程,从而缩短零件总加工时间,提高数控加工程序的可重用性,具有较强的实际应用价值。

(5)进一步研究可考虑基于图像处理方法,研究如何对加工中刀具的磨损量进行实时监测,并结合五轴数控加工 3D 刀具补偿算法,对实时磨损引起的刀具尺寸变化情况进行实时 3D 刀具补偿。

参考文献:

References:

- [1] 徐汝峰,陈志同. 基于后置处理五轴刀具半径补偿方法[J]. 机械工程学报, 2014, 50(13): 157-164.
XU Ru-feng, CHEN Zhi-tong. Method of five-axis tool radius compensation based on post-processor[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(13): 157-164.
- [2] 梁 全,王永章. 空间刀具半径补偿后置处理的研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2007(8): 14-16, 21.
LIANG Quan, WANG Yong-zhang. Study on the post processing of space radius compensation[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2007(8): 14-16, 21.

- [3] 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(15):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(15):1770-1774.
- [4] 黄秀文,高伟强,章晶,等. 五轴数控空间刀具半径补偿的实现[J]. 机电工程技术,2012,40(10):108-112.
HUANG Xiu-wen, GAO Wei-qiang, ZHANG Jing, et al. The realization of space tool radius compensation in 5-axis CNC machine[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2012, 40(10):108-112.
- [5] 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]. Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(5):138-144.
- [6] 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,2006(2):22-25.
CHEN Liang-ji, WANG Yong-zhang. Tool compensation in five-axis CNC machining[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2006(2):22-25.
- [7] TUNG C, TSO P L. Inverse kinematics with 3-dimensional tool compensation for 5-axis machine center of tilting rotary table[J]. Applied Mechanics & Materials, 2011, 110-116:3525-3533.
- [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] 陈天福,张平,饶宇辉. 五轴联动数控加工 3D 刀具半径补偿后置处理的实现[J]. 机床与液压,2013,41(5):56-58.
CHEN Tian-fu, ZHANG Ping, RAO Yu-hui. Research on three-dimensional radial tool compensation for five-axis milling[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2013, 41(5):56-58.
- [10] SIEMENS. SINUMERIK 810D/840D tool and mold manufacturing [M]. Berlin:SIEMENS,2004.
- [11] SIEMENS. Sinumerik 840D sl/840Di sl/840D/ 840Di/ 810D special functions: 3D tool radius compensation (W5),function manual[M]. Berlin:SIEMENS,2006.
- [12] SHE Chen-hua, HUANG Zhao-tang. Postprocessor development of a five-axis machine tool with nutating head and table configuration[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008, 38(7):728-740.
- [13] 王峰,林许,郑颺默,等. 五轴端铣 3D 刀补中运动突变的处理[J]. 机械工程学报,2013,49(13):108-115.
WANG Feng, LIN Hu, ZHENG Liao-mo, et al. Control algorithm for drastic motion during 3D cutter radius compensation in five-axis end milling[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(13):108-115.
- [14] 周续,张定华,吴宝海,等. 非正交双转台五轴机床后置处理通用方法[J]. 机械工程学报,2014,50(15):198-204.
ZHOU Xu, ZHANG Ding-hua, WU Bao-hai, et al. General method of post-processing for non-orthogonal five-axis machine tools with dual rotary tables[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(15):198-204.
- [15] LEE R S, SHE C H. Developing a postprocessor for three types of five-axis machine tools[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 1997, 13(9):658-665.
- [16] SORBY K. Inverse kinematics of five-axis machines near singular configurations[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2007, 47(2):299-306.
- [17] CAI A, LI B, GUO S, et al. The post processing developing of five-axis CNC machine[J]. Research Journal of Applied Sciences, Engineering & Technology, 2012, 4(14):2171-2175.

(上接第 104 页)

- [14] 王志强,徐瑞华. 基于复杂网络的轨道交通路网可靠性仿真分析[J]. 系统仿真学报,2009,21(20):6670-6674.
WANG Zhi-qiang, XU Rui-hua. Reliability simulation analysis of urban rail transit networks based on complex network[J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(20):6670-6674.
- [15] 陈峰,胡映月,李小红,等. 城市轨道交通有权网络相继故障可靠性研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2016, 16(2):139-145.
CHEN Feng, HU Ying-yue, LI Xiao-hong, et al. Cascading failures in weighted network of urban rail transit[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2016, 16(2):139-145.
- [16] 明玮. 城市轨道交通网络重点车站辨识及连通可靠性分析[D]. 北京:北京交通大学,2015.
MING Wei. The identification of important station and connectivity reliability of urban rail network [D]. Beijing:Beijing Jiaotong University, 2015.