DOI: 10.3901/JME.2014.13.157

基于后置处理五轴刀具半径补偿方法*

徐汝锋^{1,2,3} 陈志同²

(1. 山东理工大学机械工程学院 淄博 255049;

2. 北京航空航天大学机械工程及自动化学院 北京 100191;

3. 中航工业昌河飞机工业(集团)有限责任公司 景德镇 333000)

摘要: 为解决不具备五轴半径补偿功能数控系统端铣加工过程中刀具半径补偿问题,提出一种基于后置处理五轴刀具半径补偿方法。首先,研究五轴刀具半径补偿的基本原理,针对常用的三种类型端铣刀,如球头刀、平底刀和环形刀,分别推导出其刀具半径补偿方向和补偿后刀位点的矢量方程。其次,以摆头转台类五轴数控机床为例,建立前置刀位数据与机床各轴运动数据之间的关系方程,结合补偿后刀位点的矢量方程,推导出补偿后的刀位数据与机床各轴运动数据之间的关系方程。然后,利用 Visual C++ 6.0 开发出一种带有刀具半径补偿功能后置处理软件,该软件不仅可以直接生成半径补偿后的数控加工程序,而且可以生成带有半径补偿宏变量的数控加工程序。最后,以航空发动机叶片为例,利用 VERICUT 软件进行加工仿真,结果表明该方法的正确性和有效性。可见该方法能够方便实现不具备五轴半径补偿功能数控系统的五轴刀具半径补偿,避免刀具半径尺寸改变后必须返回 CAM 系统重新生成刀轨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和提高数控加工程序可重用性,具有较强的实际应用价值。

关键词: 五轴; 刀具半径补偿; 数控加工; 后置处理; 数控系统

中图分类号: TP391

Method of Five-axis Tool Radius Compensation Based on Post-processor

XU Rufeng^{1,2,3} CHEN Zhitong²

(1. School of Mechanical engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049;

2. School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191;

3. Changhe Aircraft Industries Group Co., Ltd, Jingdezhen 333000)

Abstract: In order to solve the problem of tool radius compensation in five-axis machining for the CNC systems without the function of five-axis tool radius compensation, a method of five-axis tool radius compensation based on post-processor is proposed. First, the basic principle of five-axis tool radius compensation is investigated. For three types of cutters (i.e. ball-end cutter, flat-end cutter, and torus cutter), tool radius compensation direction and vector equation of compensated cutter location (CL) point are derived, respectively. Second, a five-axis CNC machine tool with rotary head and table is used as an example. In terms of the relation equation between CL data and machine control data and vector equation of compensated CL point, a relation equation between compensated CL data and machine control data will be obtained. Then, a post-processing software with the function of five-axis tool radius compensation is developed using Visual C++ 6.0. And the post-processing software not only generates the compensated CNC program directly, but also generates the CNC program with macro variables of tool radius compensation. Finally, an aero blade surface is machined, and the machining process is simulated by using VERICUT software. Simulated results verify the correctness and effectiveness of the proposed method. Accordingly, the proposed method can easily implement the function of tool radius compensation for the CNC systems without the function of five-axis tool radius compensation, and avoid the complicated process that when the cutter radius changes, the programmer must return to CAM system to generate new tool paths and post-process CL data again. Further, the proposed method can shorten the total machining time of parts and enhance the reusability of CNC program, and will be widely applied in practice.

Key words: five-axis; tool radius compensation; CNC machining; post-process; CNC systems

0 前言

刀具补偿是现代计算机数控 (Computer

numerical control, CNC) 系统所具有的重要功能之一,可分为刀具半径补偿和刀具长度补偿两种。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^[1]。然而在五轴数控加工过程中,由于刀触点和刀轴矢量方向都不断变化,因此刀具半径补偿功能较难实现。国内外学者已对五轴数控加工中刀具半径补偿技术进行了大量研究,并

* 国家自然科学基金(51105026)、高等学校博士学科点专项科研基金(20111102110021)和山东省优秀中青年科学家科研奖励基金(BS2013ZZ002)资助项目。20130715 收到初稿,20140417 收到修改稿

在一些国外商用数控系统中进行了应用^[2]。

目前五轴刀具半径补偿技术的研究主要集中在三个方面:一是研究如何在数控系统中实现五轴刀具半径补偿功能^[3-9];二是假定数控系统具有五轴刀具半径补偿功能,且支持带刀具半径补偿矢量的程序段格式,此时要研究如何生成带有刀具半径补偿矢量的数控加工程序^[10-13];三是假定数控系统不具有五轴刀具半径补偿功能,则要研究如何通过后置处理来实现五轴刀具半径补偿功能^[13-19]。下文将分别从上述三个方面来综述其研究进展。

刘德福等^[3]研究三轴数控端铣加工中三维刀具半径补偿原理,并给出了数控系统中的实现方法。但该数控系统需要刀位文件提供切触点的位置矢量和单位法矢,因此数控加工程序中必须包含上述信息。陈良骥等^[4]分析了五轴联动数控加工编程标准 ISO6983 对数控系统刀具半径补偿功能支持的不足,研究如何在数控系统中实现五轴刀具半径补偿功能,并提出了一种刀具半径补偿矢量模式的编程方法,从而使数控系统具有五轴刀具半径补偿功能。但该方法仅适用于球头刀和平底刀,而由于环形刀具有两个半径补偿矢量,所以也无法实现其五轴半径补偿功能。毕俊喜等^[9]研究了摆头类五轴联动机床的刀具半径空间补偿问题,以球头刀为例给出五轴数控系统的刀具半径补偿原理,并基于南京四开数控系统开发出五轴半径补偿功能。以上几种具有空间刀具半径补偿功能的数控系统都需要专门的程序段格式,因此对数控加工程序都有不同的要求。

针对具有五轴刀具半径补偿功能的数控系统,主要研究如何获得带有半径补偿矢量的数控程序。梁全等^[11]针对目前UG软件的后置处理无法生成带有空间刀具半径补偿信息的数控加工程序,提出了一种空间刀具半径补偿后置处理方法,并开发了相应的五轴数控机床后置处理软件,能够生成带刀具半径补偿信息的数控程序。针对五轴端铣加工的三维刀具半径补偿的难题,洪海涛等^[12]研究了各种类型刀具的补偿矢量的计算方法,开发了一种双转台类型的五轴机床专用的后置处理程序,且能够输出带有补偿矢量的数控程序。黄秀文等^[13]以球头刀为例分析了空间刀具半径补偿原理以及刀具半径补偿矢量计算,针对五轴双转台数控机床开发出一套带空间半径补偿功能的专用后置处理软件,可以输出带有刀具半径补偿矢量的数控加工程序或刀具半径补偿后的数控加工程序。

而针对不具有五轴刀具半径补偿功能的数控系统,主要研究如何通过后置处理来实现五轴刀具半径补偿功能。杨乐^[14]在平面刀具半径补偿的基础上推导出了一种二维刀具半径补偿的通用公式,并结合空间变换原理,将三维空间内的刀位点投影到

二维平面内来确定半径补偿方向,得出三维空间刀具半径补偿算法,并编制了相应的后置处理程序来实现三维空间刀具半径补偿。陈明君等^[15]利用刀具二维半径补偿原理和空间坐标变换公式推导出刀具三维半径补偿算法。TUNG等^[16]针对多轴数控加工首先推导出刀具的刀位点表达式,然后针对特殊的六轴数控机床提出了一种运动学变换算法,最后以两种类型的五轴数控机床为例开发出带刀具补偿功能的后置处理程序。陈天福等^[19]建立空间刀具半径补偿的数学模型,推导出实现刀具半径补偿的算法,并编制出带刀具半径补偿的后置处理程序。但当刀具半径发生改变后,以上方法都必须对原刀位文件再次进行后置处理才能得到新的刀具半径补偿后的数控加工程序,因此数控加工程序的可重用性较差。

本文主要研究五轴端铣加工中刀具半径补偿的基本原理。针对不具备五轴半径补偿功能CNC系统,提出了一种基于后置处理五轴刀具半径补偿方法,通过结合数控系统的宏变量和数学运算功能,开发出一种带有刀具半径补偿功能的后置处理软件。该软件不仅可以根据刀具半径数值直接生成刀具半径补偿后的数控程序,而且也可以将刀具半径作为宏变量写入数控加工程序中,并通过修改宏变量的值即可得到刀具半径补偿后的数控程序。避免了重新返回计算机辅助制造(Computer aided manufacturing, CAM)系统生成刀具轨迹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和提高数控加工程序可重用性。

1 五轴刀具半径补偿的基本原理

在五轴端铣加工曲面过程中,常用刀具类型有球头刀、平底刀和环形刀等,为研究五轴刀具半径补偿的基本原理,下文将针对以上三种类型刀具分别推导其半径补偿方向和补偿后刀位点矢量方程。

1.1 球头刀半径补偿方向和补偿后刀位点矢量

如图1所示, S 为设计曲面, P 为表面上的切触点,球头刀在点 P 处与曲面 S 相切,球头刀的半径为 R , O 为刀心点, O_{pos} 为刀尖点, i 为切触点 P 处刀位的刀轴矢量, n 为切触点 P 处曲面的法矢量,以上两矢量均为单位矢量。假设球头刀半径发生改变,即半径由 R 变为 R' 时,为保持球头刀在切触点 P 处与曲面 S 相切,则刀心点 O 必须沿切触点 P 处的法矢方向进行平移。因此, n 为球头刀半径补偿方向矢量,补偿量 $\Delta R = R' - R$ 。于是,在工件坐标系 $O_w X_w Y_w Z_w$ 中补偿后刀心点 O' 的位置矢量为^[12]

$$r_{O'} = r_O + \Delta R \cdot n \quad (1)$$

式中 $n = \frac{PO}{\|PO\|}$;

$$PO = r_O - r_P = r_{O_{pos}} + R \cdot i - r_P。$$

而刀尖点实际上是由刀心点沿刀轴矢量反向偏移一个刀具半径，即 $r_{O_{pos}} = r_O - R \cdot i$ ， $r_{O'_{pos}} = r_{O'} - R' \cdot i$ ，所以在工件坐标系 $O_W X_W Y_W Z_W$ 中补偿后刀尖点 O'_{pos} 的位置矢量为

$$r_{O'_{pos}} = r_{O_{pos}} + \Delta R \cdot n - \Delta R \cdot i \quad (2)$$

图1 球头刀半径补偿原理示意图

1.2 平底刀半径补偿方向和补偿后刀位点矢量

如图2所示， S 为设计曲面， P 为表面上的切触点，平底刀在点 P 处与曲面 S 相切，设平底刀的半径为 R ， O_{pos} 为刀尖点(此时刀心点与刀尖点重合)， i 为切触点 P 处刀位的刀轴矢量， n 为切触点 P 处曲面的法矢量， m 为垂直于刀轴方向的矢量，以上三矢量均为单位矢量。假设平底刀半径发生改变，即半径由 R 变为 R' 时，为保持平底刀在切触点 P 处仍与曲面 S 相切，则刀尖点 O_{pos} 必须沿矢量 m 方向进行平移。因此， m 为平底刀半径补偿方向矢量，补偿量 $\Delta R = R' - R$ 。于是，在工件坐标系 $O_W X_W Y_W Z_W$ 中补偿后刀尖点 O'_{pos} 的位置矢量^[12]

$$r_{O'_{pos}} = r_{O_{pos}} + \Delta R \cdot m \quad (3)$$

式中 $m = \frac{PO_{pos}}{\|PO_{pos}\|}$;

$$PO_{pos} = r_{O_{pos}} - r_P。$$

1.3 环形刀半径补偿方向和补偿后刀位点矢量

如图3所示， S 为设计曲面， P 为表面上的切触点，环形刀在点 P 处与曲面 S 相切，设环形刀的外圆半径为 R ，圆角半径为 r ，环心圆半径为 R_c ， O 为刀心点， O_{pos} 为刀尖点， i 为切触点 P 处刀位的刀轴矢量， n 为切触点 P 处曲面的法矢量， m 为垂直

图2 平底刀半径补偿原理示意图

于刀轴方向的矢量，以上三矢量均为单位矢量。假设环形刀半径发生改变，即外圆半径由 R 变为 R' 、圆角半径由 r 变为 r' 和环心圆半径由 R_c 变为 R'_c 时，为保持环形刀在切触点 P 处仍与曲面 S 相切，则刀心点 O 必须沿切触点 P 处的法矢量 n 和垂直于刀轴方向的矢量 m 进行平移。因此，环形刀半径补偿方向矢量是由矢量 m 和 n 来确定，两个方向的补偿量分别为 $\Delta R_c = R'_c - R_c = \Delta R - \Delta r$ 和 $\Delta r = r' - r$ ，其中 $\Delta R = R' - R$ 。于是，在工件坐标系 $O_W X_W Y_W Z_W$ 中补偿后刀心点 O' 的位置矢量为^[12]

$$r_{O'} = r_O + (\Delta R - \Delta r) \cdot m + \Delta r \cdot n \quad (4)$$

式中，矢量 n 和 m 都是未知量，下面将给出其具体求解方法^[12]。

图3 环形刀半径补偿原理示意图

如图3所示，利用空间矢量叉积性质，则有

$$m = \frac{i \times (PO \times i)}{\|i \times (PO \times i)\|} \quad (5)$$

式中 $PO = r_O - r_P = r_{O_{pos}} + r \cdot i - r_P$ 。

而矢量 n 则为

$$n = \frac{PO_1}{\|PO_1\|} = \frac{PO - O_1 O}{\|PO - O_1 O\|} = \frac{PO - (R - r)m}{\|PO - (R - r)m\|} \quad (6)$$

至此, 已经求解出环形刀半径补偿方向的两个矢量, 而刀尖点实际上是由刀心点沿刀轴矢量反向偏移刀具半径, 即 $r_{O_{pos}} = r_O - r \cdot i$, $r_{O'_{pos}} = r_O - r' \cdot i$, 再联立式(4)可得到补偿后刀位点 O_{pos} 的位置矢量

$$r_{O_{pos}} = r_{O_{pos}} + (\Delta R - \Delta r)m + \Delta r \cdot n - \Delta r \cdot i \quad (7)$$

通过比较式(2)、(3)和(7)可以看出, 当 $r=R$ 时, 式(7)变为式(2); 当 $r=0$ 时, 式(7)变为式(3)。由此可见, 式(7)是上述三种类型刀具补偿后刀位点矢量方程的一般形式。以上分析了五轴端铣加工复杂曲面时刀具半径补偿的基本原理, 推导出刀具半径补偿方向和补偿后刀位点的矢量方程的一般形式, 为实现五轴刀具半径补偿的后置处理程序开发提供了理论基础。

2 五轴刀具半径补偿的具体实现方法

针对不具备五轴刀具半径补偿功能的 CNC 系统, 为实现其五轴刀具半径补偿, 以摆头转台类五轴数控机床为例, 给出五轴刀具半径补偿的具体实现方法。

2.1 摆头转台类五轴数控机床后置处理的坐标变换方程

以文献[20]中给出的五轴联动叶片机床为例, 如图 4 所示, 可以得到后置处理后机床各平动轴与前置刀位数据之间关系方程^[20]

$$\begin{cases} X = x + L \sin B + x_0 \\ Y = y \cos A + z \sin A + y_0 \cos A + z_0 \sin A \\ Z = -y \sin A + z \cos A + L \cos B - y_0 \sin A + z_0 \cos A \end{cases} \quad (8)$$

式中 L ——刀具摆长;

B ——摆头转动的坐标值;

A ——工作台转动坐标值;

X, Y, Z ——机床各平动轴的坐标值;

x, y, z ——工件坐标系中刀位点矢量分量;

x_0, y_0, z_0 ——工件坐标系原点相对于机床坐标系的偏移矢量分量。

由第 1 节的刀具补偿原理可知, 刀具半径补偿不影响刀轴矢量, 仅影响刀位点的位置矢量, 因此后置处理程序中的回转角是保持不变的。而刀具半径尺寸发生改变时, 只能通过补偿矢量方向来移动刀位点, 从而实现刀具的半径补偿。

2.2 补偿后刀位点计算公式

根据刀具尺寸改变后的刀具半径是常量还是变量的情况, 分别给出了两种情况的刀具半径补偿后刀位点计算公式。

图 4 五轴联动叶片机床

(1) 刀具尺寸改变后刀具半径是常量的情况。假设刀位文件中给出了刀位点 $O_{pos}(x, y, z)$, 切触点 $P(x_P, y_P, z_P)$, 刀轴矢量为 (i, j, k) , 以及刀具摆长为 L , 刀具半径为 R , 圆角半径为 r , 而刀具尺寸改变后刀位点为 $O'_{pos}(x', y', z')$, 刀具半径为 R' , 圆角半径为 r' , 且 R', r' 为已知常量。若刀具为环形刀, 即 $r < R$, 则由式(7)可推导出刀具半径补偿后刀位点 O'_{pos} 的计算公式

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} + \frac{R' - r' + r - R}{\sqrt{u^2 + v^2 + w^2}} \begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix} + \frac{r' - r}{\sqrt{l^2 + m^2 + n^2}} \begin{pmatrix} l \\ m \\ n \end{pmatrix} - (r' - r) \begin{pmatrix} i \\ j \\ k \end{pmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{cases} u = cik - ak^2 - aj^2 + bij \\ v = aij - bi^2 - bk^2 + cjk \\ w = bkj - cj^2 - ci^2 + aki \end{cases}$$

$$\begin{cases} a = x + ri - x_P \\ b = y + rj - y_P \\ c = z + rk - z_P \end{cases}$$

$$\begin{cases} l = a - \frac{(R-r)u}{\sqrt{u^2 + v^2 + w^2}} \\ m = b - \frac{(R-r)v}{\sqrt{u^2 + v^2 + w^2}} \\ n = c - \frac{(R-r)w}{\sqrt{u^2 + v^2 + w^2}} \end{cases}$$

(2) 刀具尺寸改变后刀具半径是变量的情况假设刀位文件中给出了刀位点 $O_{pos}(x, y, z)$, 切触点 $P(x_P, y_P, z_P)$, 刀轴矢量为 (i, j, k) , 以及刀具摆长为 L ,

刀具半径为 R , 圆角半径为 r , 而刀具尺寸改变后刀位点 $O'_{\text{pos}}(x', y', z')$, 刀具半径为 R' , 圆角半径为 r' , 且 R' 、 r' 为未知变量。若刀具为环形刀, 即 $r < R$, 则由式(7)可推导出刀具半径补偿后的刀位点 O'_{pos}

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_x \\ s_y \\ s_z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{pmatrix} R' + \begin{pmatrix} q_x \\ q_y \\ q_z \end{pmatrix} r' \quad (10)$$

$$\begin{cases} u = cik - ak^2 - aj^2 + bij \\ v = aij - bi^2 - bk^2 + cjk \\ w = bkj - cj^2 - ci^2 + aki \end{cases}$$

$$\begin{cases} a = x + ri - x_p \\ b = y + rj - y_p \\ c = z + rk - z_p \end{cases}$$

$$\begin{cases} l = a - \frac{(R-r)u}{\sqrt{u^2 + v^2 + w^2}} \\ m = b - \frac{(R-r)v}{\sqrt{u^2 + v^2 + w^2}} \\ n = c - \frac{(R-r)w}{\sqrt{u^2 + v^2 + w^2}} \end{cases}$$

$$\begin{cases} s_x = x + \frac{(r-R)u}{\sqrt{u^2 + v^2 + w^2}} - \frac{rl}{\sqrt{l^2 + m^2 + n^2}} + ri \\ s_y = y + \frac{(r-R)v}{\sqrt{u^2 + v^2 + w^2}} - \frac{rm}{\sqrt{l^2 + m^2 + n^2}} + rj \\ s_z = z + \frac{(r-R)w}{\sqrt{u^2 + v^2 + w^2}} - \frac{rn}{\sqrt{l^2 + m^2 + n^2}} + rk \end{cases}$$

$$\begin{cases} t_x = \frac{u}{\sqrt{u^2 + v^2 + w^2}} \\ t_y = \frac{v}{\sqrt{u^2 + v^2 + w^2}} \\ t_z = \frac{w}{\sqrt{u^2 + v^2 + w^2}} \end{cases}$$

$$\begin{cases} q_x = \frac{l}{\sqrt{l^2 + m^2 + n^2}} - \frac{u}{\sqrt{u^2 + v^2 + w^2}} - i \\ q_y = \frac{m}{\sqrt{l^2 + m^2 + n^2}} - \frac{v}{\sqrt{u^2 + v^2 + w^2}} - j \\ q_z = \frac{n}{\sqrt{l^2 + m^2 + n^2}} - \frac{w}{\sqrt{u^2 + v^2 + w^2}} - k \end{cases}$$

2.3 后置处理后机床平动轴的坐标值

根据刀具尺寸改变后刀具半径是常量还是变量, 可以分别求得后置处理后机床各平动轴的坐标值。当刀具尺寸改变后刀具半径为常量时, 将式(9)中刀具补偿后的刀位点 (x', y', z') 代入式(8), 则可以

得到机床各平动轴的坐标值

$$\begin{cases} X = x' + x_0 + L \sin B \\ Y = y' \cos A + z' \sin A + y_0 \cos A + z_0 \sin A \\ Z = -y' \sin A + z' \cos A - y_0 \sin A + z_0 \cos A + L \cos B \end{cases} \quad (11)$$

当刀具尺寸改变后刀具半径为变量时, 将式(10)中补偿后的刀位点 (x', y', z') 代入式(8), 则可以得到机床各平动轴的坐标值

$$\begin{cases} X = (s_x + x_0) + t_x R' + q_x r' + L \sin B \\ Y = (s_y + y_0) \cos A + (s_z + z_0) \sin A + (t_y \cos A + t_z \sin A) R' + (q_y \cos A + q_z \sin A) r' \\ Z = (s_z + z_0) \cos A - (s_y + y_0) \sin A + (t_z \cos A - t_y \sin A) R' + (q_z \cos A - q_y \sin A) r' + L \cos B \end{cases} \quad (12)$$

2.4 后置处理程序的编制

后置处理程序的实现主要包括基本参数输入, 刀位文件读取, 刀具半径补偿后刀位点计算, 机床运动变换求解, 以及数控加工程序输出。该后置处理算法设计流程如图 5 所示。

图 5 带刀具半径补偿的后置处理算法的流程图

在上述算法的基础上, 利用 Visual C++ 6.0 开发出一种带有刀具半径补偿功能的后置处理软件,

其软件界面如图 6 所示。该软件不仅可以根据刀具半径数值直接生成刀具半径补偿后的数控程序,而且也可以将刀具半径作为宏变量写入数控加工程序中,并通过修改宏变量的值即可得到刀具半径补偿后的数控程序。因此,当刀具的实际尺寸改变后,可以在数控加工程序中直接修改这些宏变量的值便能够实现五轴刀具半径补偿功能。由此可见,该方法能够增强了数控加工程序的通用性,弥补现有五轴数控系统在刀具半径补偿方面的不足,避免了因刀具实际尺寸改变后必须返回到 CAM 软件重新生成刀具轨迹和再次进行后置处理的繁琐过程,提高了数控加工程序可重用性。

图 6 后置处理软件界面

3 仿真验证

加工实例仿真的基本思想是对于给定的工件曲面和刀具,利用 UG/CAM 的多轴加工策略生成刀具轨迹,并生成含切触点的刀位文件,再利用本文提出方法生成带半径补偿宏变量的数控加工程序,最后通过修改数控程序中宏变量的值来得到不同半径补偿后的数控程序,并在 VERICUT 中进行加工仿真来验证该方法正确性和有效性。下面以某航空发动机叶片作为加工对象,如图 7 所示,利用加工仿真进行验证。

图 7 航空发动机叶片模型

假设刀具沿 u 向走刀,加工范围 $v \in [0.1, 0.9]$,

$u \in [0.0, 1.0]$,步长公差为 0.005 mm,刀轨行数为 21;采用 UG/CAM 多轴加工策略“相对于驱动”的刀轴控制方式,前倾角为 8° ,侧倾角为 0° 。若使用 D10R1 环形刀(即刀具直径为 10 mm,圆角半径为 1 mm)加工叶片曲面,则生成刀具轨迹如图 8 所示。通过勾选“机床控制”项中的“输出接触数据”生成包含切触点信息的刀位文件,如图 9 所示。利用第 2.4 节开发的后置处理软件可以生成带半径补偿宏变量的数控加工程序(若采用西门子数控系统,其宏变量为 R 参数^[2]),如图 10 所示。若令数控程序中宏变量 $R_1=0$ 、 $R_2=10$ 、 $R_3=1$ (即数控编程时刀具尺寸),其中 R_1 代表刀具摆长, R_2 代表刀具直径, R_3 代表刀具圆角半径,且在 VERICUT 软件中将刀具设为 D10R1(即实际加工时刀具尺寸),则仿真结果如图 11 所示,其中不同灰度表示不同加工误差值。若令数控程序中宏变量 $R_1=0$ 、 $R_2=10$ 、 $R_3=1$,且在 VERICUT 中将刀具设为 D9.5R0.5(此时实际加工刀具尺寸小于数控编程时刀具尺寸),则仿真结果将会出现两种情况:① 当刀具长度保持不变(忽略当刀具半径尺寸变小而引起的刀具长度变化),其结果如图 12a 所示;② 当刀具长度为实际长度(若实际加工中刀具半径尺寸变小,其刀具长度也会相应减少),结果如图 12b 所示。若令数控程序中宏变量 $R_1=0$ 、 $R_2=9.5$ 、 $R_3=0.5$,且在 VERICUT 中将刀具设为 D9.5R0.5(此时数控编程时刀具尺寸与实际加工时刀具尺寸保持一致),则仿真结果如图 13 所示。

图 8 D10R1 环形刀生成的刀具轨迹

```

...
GOTO/69.1000,15.1670,-3.3944,-0.0023497,0.3344340,0.9424163 $$ 69.1197,11.2695,
-2.0009
GOTO/69.1003,14.7741,-3.1892,-0.0046025,0.3343501,0.9424377 $$ 69.1216,10.8765,
-1.7960
GOTO/69.1017,14.5796,-3.0812,-0.0055945,0.3330092,0.9429070 $$ 69.1226,10.6800,
-1.6936
GOTO/69.1063,14.3912,-2.9552,-0.0061944,0.3271101,0.9449659 $$ 69.1234,10.4830,
-1.5920
...

```

图 9 含切触点信息的刀位文件


```

N0000 G90 G54 G641 S3000 M03
N0000 R1=0; 实际刀具摆长
N0000 R2=10; 实际刀具直径
N0000 R3=1; 实际圆角半径
N0001 G01 X=64.3362+0.4852*R2-0.0232*R3+R1*sin(0.3779)
Y=15.9819+0.1207*R2-0.0045*R3 Z=12.4714-0.0032*R2-0.8087*R3+R1*cos(0.3779)
B0.3779 A-19.5574 F1000
N0002 X=69.1124-0.0016*R2+0.0027*R3+R1*sin(0.3779) Y=13.0452+0.5000*R2-
0.8609*R3 Z=1.6406+0.0000*R2-0.0097*R3+R1*cos(0.3779)
N0003 X=69.1197-0.0024*R2+0.0041*R3+R1*sin(-0.1346) Y=11.2898+0.5000*R2-
0.8608*R3 Z=1.8832-0.0000*R2-0.0097*R3+R1*cos(-0.1346) B-0.1346 A-19.5382
N0004 X=69.1216-0.0026*R2+0.0045*R3+R1*sin(-0.2637) Y=10.8510+0.5000*R2-
0.8608*R3 Z=1.9439-0.0000*R2-0.0097*R3+R1*cos(-0.2637) B-0.2637 A-19.5332
...

```

图 10 带半径补偿宏变量的数控程序

图 11 $R_1=0$, $R_2=10$, $R_3=1$, D10R1 环形刀加工的仿真结果

(a) 假设刀长保持不变

(b) 假设刀长为实际长度

图 12 $R_1=0$, $R_2=10$, $R_3=1$, D9.5R0.5 环形刀加工仿真结果 图 13 $R_1=0$, $R_2=9.5$, $R_3=0.5$, D9.5R0.5 环形刀加工仿真结果

由图 11 可以看出, 大部分加工区域(白色区域)的误差小于 0.01 mm, 相邻两行刀轨之间最大误差在 0.05~0.07 mm 之间, 且加工表面无任何过切。由图 12a 可以看出, 加工表面的欠切误差都在 0.1

mm 以上, 且无任何过切区域; 而从图 12b 可以看出, 切触点附近区域都出现了 0.01~0.05 mm 不同程度的过切。从图 13 可以看出, 大部分加工区域(白色区域)的误差小于 0.01 mm, 相邻两行刀轨之间最大误差在 0.05~0.07 mm 之间, 且加工表面无任何过切。通过比较图 11 和图 13 中仿真结果可以看出, 两者的仿真结果几乎完全相同。可见, 当刀具半径尺寸发生变化时, 通过修改数控程序中宏变量的值便可以得到刀具半径补偿后的数控程序, 此时加工结果与具有五轴半径补偿功能机床一致。因此, 通过修改数控程序中宏变量的值即可方便实现那些不具备五轴半径补偿功能数控系统的刀具半径补偿, 避免刀具半径尺寸改变后必须返回 CAM 系统重新生成刀轨和再次进行后置处理的繁琐过程, 从而缩短了零件总加工时间和提高了数控加工程序可重用性, 具有较强的实际应用价值。

4 结论

(1) 研究了五轴刀具半径补偿的基本原理, 针对以上三种类型刀具分别推导出五轴刀具半径补偿方向和补偿后刀位点矢量, 归纳出补偿后刀位点的矢量方程的一般形式, 为实现五轴刀具半径补偿的后置处理程序开发提供了理论基础。

(2) 提出了一种基于后置处理五轴刀具半径补偿方法, 开发出一种带有刀具半径补偿功能的后置处理软件。该软件不仅可以按照刀具半径数值直接生成刀具半径补偿后的数控程序, 而且也可以将刀具半径作为宏变量写入数控加工程序中, 并通过修改宏变量的值即可得到刀具半径补偿后的数控程序。

(3) 实例加工仿真结果表明了本文提出方法的正确性和有效性。该方法可以方便实现不具备五轴半径补偿功能数控系统的刀具半径补偿, 避免刀具半径尺寸改变后必须返回 CAM 系统重新生成刀轨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和提高数控加工程序可重用性, 具有较强的实际应用价值。

参 考 文 献

- [1] 刘雄伟, 张定华, 王增强, 等. 数控加工理论和编程技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
LIU Xiongwei, ZHANG Dinghua, WANG Zengqiang, et al. NC machining theory and programming technology[M]. Beijing: China Machine Press, 2000.
- [2] Siemens. SINUMERIK 840D/840Di/810D/FM-NC programming guide advanced [M]. Siemens Automation Group, 2001.
- [3] 刘德福, 陈峰. 计算机数控系统三维刀具半径补偿研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2001(8): 9-11.

- LIU Defu, CHEN Feng. The research on 3D cutter radius compensation for computer numerical control system[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2001(8): 9-11.
- [4] 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 Liangji, WANG Yongzhang. Tool compensation in five-axis CNC machining[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2006(2): 22-25.
- [5] 杨富枝, 林浒, 郑颺默, 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): 82-84.
- YANG Fuzhi, LIN Hu, ZHENG Liaomo, et al. Research on the space tool radius compensation for five-axis flank milling[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2010(11): 82-84.
- [6] 郭自娟, 杨东升. 五轴侧铣加工空间刀具半径补偿算法的研究[J]. 小型微型计算机系统, 2011, 32(10): 2134-2139.
- GUO Zijuan, YANG Dongsheng. Research on cutter Radius compensation for 5-axis peripheral milling[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2011, 32(10): 2134-2139.
- [7] 李芝春, 王宇晗, 金永乔. 五轴侧铣加工 3D 刀具半径补偿研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2011(9): 1-3.
- LI Zhichun, WANG Yuhuan, JIN Yongqiao. Research on 3D cutter radius compensation for 5-axis flank milling[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2011(9): 1-3.
- [8] 许爱芬, 谢霞, 刘宁. 基于方向矢量的三维刀具半径补偿技术研究[J]. 机床与液压, 2011, 39(3): 33-37.
- XU Aifen, XIE Xia, LIU Ning. Study on 3D cutter radius compensation technology based on direction vector[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2011, 39(3): 33-37.
- [9] 毕俊喜, 李强, 张治务, 等. 五轴联动刀具空间半径补偿研究[J]. 机床与液压, 2003(5): 105-106.
- BI Junxi, LI Qiang, ZHANG Zhiwu, et al. The space radius compensation research of tools on five-axis linkage[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2003(5): 105-106.
- [10] SHE C H, CHANG C C. Development of a 3D cutter compensation postprocessor system for multi-axis machining[J]. Materials Science Forum, 2006, 505-507: 571-576.
- [11] 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.
- LIANG Quan, WANG Yongzhang. Study on the post processing of space radius compensation[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2007(8): 14-16.
- [12] 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 Haitao, YU Dong, ZHANG Lixian, et al. Research on 3D cutter radius compensation for 5-axis end milling[J]. China Mechanical Engineer, 2009, 20(15): 1770-1774.
- [13] 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, 41(10): 108-112.
- HUANG Xiuwen, GAO Weiqiang, ZHANG Jing, et al. The realization of space tool radius compensation in 5-Axis CNC machine[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2012, 41(10): 108-112.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] CHEN Youdong, WANG Tianmiao. Three-dimensional tool radius compensation for multi-axis peripheral milling[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2013, 26(3): 547-554.
- [19] 陈天福, 张平, 饶宇辉. 五轴联动数控 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 Tianfu, ZHANG Ping, RAO Yuhui. Research on three-dimensional radial tool compensation for five-axis milling[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2013, 41(5): 56-58.
- [20] 徐汝锋. 宽行加工刀位误差求解与刀轨规划技术研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2010.
- XU Rufeng. Research on tool position error calculation and tool path planning methods in 5-axis machining of sculptured surfaces[D]. Beijing: Beihang University, 2010.

作者简介: 徐汝锋, 男, 1980 年出生, 讲师。主要研究方向为复杂曲面多轴数控加工技术。

E-mail: xurufeng2003@126.com

陈志同(通信作者), 男, 1967 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为复杂曲面多轴数控加工技术、难加工材料切削试验自动化和切削参数优化技术。

E-mail: ztchen@buaa.edu.cn