

# 五轴数控机床后置处理算法研究

## Research on Five-Axis CNC Machine Post Processing Algorithm

中航工业哈尔滨飞机工业(集团)有限责任公司 王 旭

**[摘要]** 五轴数控加工技术基于五轴数控编程理论,对五轴机床的结构形式和运动特性进行分析,通过后置算法求解,得到后置处理坐标转换公式,并将前置处理产生的刀位数据文件(CLFS)转换成机床执行的CNC程序,再利用 Visual Basic 语言编程创建坐标转换界面,实现数控程序自动转换。

**关键词:** 五轴数控 Visual Basic 前置处理 后置处理

**[ABSTRACT]** Five-axis linkage CNC machining technology is the important foundation of mechanical processing, and is one of the important marks of a national industrial modernization level. Based on the five-axis CNC programming theory, structure and kinematic transformation of the five-axis CNC machine are analyzed for rearmounted algorithm solving and post processing coordinates transformation formula is obtained. And the cutter location data file (CLFS) generated by preprocessing is transformed into the CNC program of the machine implementation. Coordinate transformation interface is created by VB language, and the automatic conversion of CNC program is realized.

**Keywords:** Five-axis CNC Visual Basic Pre-processing Poster processing

五轴数控加工技术主要涉及到数控编程技术、后置处理技术和数控装备技术,这3种技术是实现五轴数控加工的主要过程。首先,将工件的几何模型导入到CAM数控编程软件中,利用CAM编程软件按照加工工艺要求生成合理的刀具加工路线,并且保存刀位文件。然后,利用机床后置处理技术将刀位数据生成精确的加工程序。最后,通过数控装备技术有效地执行数控加工程序。因此,实现高水平五轴数控加工技术的关键是数控编程技术和机床后置处理技术。目前,要想实现五轴编程,得到准确机床加工程序,需要解决以下几个关键技术<sup>[1-2]</sup>。

(1)零件的几何建模。五轴数控加工技术主要针对复杂的曲面几何模型。首先利用三维实体建模软件来完成几何建模。目前,应用比较广泛的建模软件包括UG、CATIA、Pro/Engineer等。

(2)加工工艺的合理规划。在数控加工技术中加工工艺起着关键作用,合理的加工工艺可以提高工件的加工质量,还可以提高生产效率。加工工艺的选择主要包括加工路线、选择刀具、控制刀轴方式、进给速度和主轴转速等。

(3)刀具轨迹生成。根据加工工艺要求生成合理的刀具加工轨迹,满足无干涉、无碰撞的要求,节省刀具运行时间,提高加工效率。对于复杂曲面模型利用CAM编程软件实现刀具轨迹生成,并且得到刀位数据文件,记录了刀具位置坐标和方向矢量。

(4)数控加工仿真。在数控CAD/CAM编程软件中生成刀具加工轨迹以后,要针对实体进行刀具加工轨迹确认。验证刀位数据对于通过后置处理转换的数控加工程序是十分必要的,特别是在多轴加工编程中,其作用更明显。在数控软件中模拟加工环境,可以有效避免加工程序在加工过程中可能出现的过切与碰撞等问题。

(5)后置处理。机床后置处理技术是根据五轴数控机床的结构特性和运动变换特点,通过计算得到的后置处理坐标转换公式,将在刀具轨迹生成过程中所产生的刀位数据文件转换成机床的数控加工程序。准确的后置处理可以保证加工程序的准确性、提高加工效率、保证加工质量,还可以提高机床运行过程中的可靠性能<sup>[3]</sup>。

本研究主要是以五轴联动数控机床结构特性和运动变换特点为依据,计算五轴数控机床后置处理坐标转换公式,将前置处理中所产生的刀位轨迹数据转换成数控机床所能执行的G代码指令,利用 Visual Basic 语言创建坐标转换界面,通过输入输出来完成数控程序的转换。

## 1 五轴数控机床的结构形式和运动变换

后置处理的主要功能是将刀具在工件坐标中运动的轨迹数据转化为机床坐标系中的值,首先要确定工件坐标系和机床坐标系的对应关系,将工件坐标系中的数据转换为机床坐标系中的数据。因此,根据具体机床的结构特性和运动变换关系,将前置处理刀位轨迹数据转换成机床各运动坐标轴的数值,最终转换成数控机床的CNC程序。由于机床的运动结构各不相同,通过变换得到的结果也不相同<sup>[4-8]</sup>。

一般5坐标数控机床是由3个联动坐标轴X、Y、Z和绕着X、Y、Z轴旋转的A、B、C中任意两个旋转坐标构成的,在加工中可以实现5坐标联动。加工过程中,机床主轴和工作台5个坐标同时做线性插补,使刀具按要求的空间轨迹运动,刀具能保持最佳的切削状态并有效避免刀具干涉,能高效高质量地完成对复杂零件的加工。由于5坐标机床结构多样性,加工方式的灵活性,要求用户必须根据具体的机床运动结构及数控系统指令格式,对刀具轨迹数据进行转换,生成数控5坐标专用机床能直接执行的加工程序。但是,根据旋转运动坐标轴的不同,5坐标机床在3坐标的基础上增加了2个旋转轴,主要包括以下几种基本类型:第一类是主轴在2个方向摆动实现转动(刀具双摆动),第二类是2个回转工作台实现转动(工作台双回转),第三类是1个回转工作台和另1个主轴摆动组合实现转动(刀具与工作台分别回转)。通过以上分类定义回转轴在轴线方向上不变为定轴,带“+”的轴为工件转动,相反为刀具旋转。本文研究的五轴数控机床属于一个工作台回转,一个刀具摆动的C'-B组合。在不考虑结构误差情况下,对于刀具摆动与工作台转动机床的后置处理算法,应确定刀具摆动半径及回转轴线在工件坐标系中的位置<sup>[4]</sup>。

根据机床结构,创建机床运动简图,如图1所示。其中 $O_w X_w Y_w Z_w$ 和 $O_t X_t Y_t Z_t$ 分别为工件和刀具固联的坐标系,其建立和机床结构图一致。 $O_{M2} X_{M2} Y_{M2} Z_{M2}$ 坐标系为与刀具摆动轴固定连接的坐标系,坐标系方向与机床坐标系一致,原点 $O_{M2}$ 为刀具轴线与回转轴线

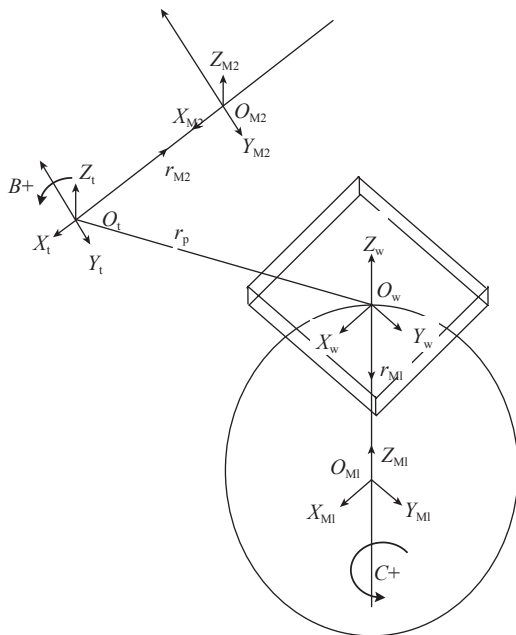


图1 机床运动简图

Fig.1 Diagram of machine movement

的交点,  $O_{M1} X_{M1} Y_{M1} Z_{M1}$  坐标系为与工作台回转轴  $C'$  固联的坐标系,方向与机床坐标系一致,原点  $O_{M1}$  可以在回转轴线上任意选取。在机床初始状态下,刀具轴线与  $X$  轴平行,工件坐标系的方向和机床坐标系的方向一致。设  $O_{M2} X_{M2} Y_{M2} Z_{M2}$  的原点  $O_{M2}$  到刀具坐标系原点  $O_t$  的距离为  $L$ ,经过测量得到  $L=351.475\text{mm}$ ,  $L$  为刀具的回转半径,则  $O_{M2}$  在刀具坐标系的位置为  $r_{M2}(-L, 0, 0)$ 。 $O_{M1} X_{M1} Y_{M1} Z_{M1}$  的原点  $O_{M1}$  在工件坐标系中的位置为  $r_{M1}(m_x, m_y, m_z)$ ,同样在刀具坐标系中,刀位点的位置矢量和刀轴矢量分别为  $(0, 0, 0)^T$  和  $(-1, 0, 0)^T$ ,记机床平动轴相对于初始状态为  $r_s(s_x, s_y, s_z)$ ,即 NC 程序中的  $X, Y, Z$  坐标值。回转轴  $C, B$  相对于初始状态为  $\theta_C, \theta_B$ ,即 NC 程序中  $C, B$  角度值。在工件坐标系中刀轴方向和刀位点矢量分别为  $r_p(p_x, p_y, p_z)$  和  $u(u_x, u_y, u_z)$ ,即 CLFS 文件中的 GOTO 点的位置  $(x, y, z, i, j, k)$ ,机床的运动过程通过  $O_t X_t Y_t Z_t$  相对于  $O_{M2} X_{M2} Y_{M2} Z_{M2}$  旋转,  $O_{M2} X_{M2} Y_{M2} Z_{M2}$  相对于  $O_{M1} X_{M1} Y_{M1} Z_{M1}$  的平移和  $O_{M1} X_{M1} Y_{M1} Z_{M1}$  相对于  $O_w X_w Y_w Z_w$  旋转的坐标变换,可以得到  $r_s(s_x, s_y, s_z), \theta_C, \theta_B$ 。根据机床运动链进行坐标变换,可得:

$$\begin{pmatrix} i \\ j \\ k \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \\ 0 \end{pmatrix} = \quad (1)$$

$$T(r_{M1}) \times R_Z(-\theta_C) \times T(r_s - r_{M1} + r_{M2}) \times R_y(B) \times T(-r_{M2}) \times (-1, 0, 0, 0)^T$$

$$\begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \\ 1 \end{pmatrix} = \quad (2)$$

$$T(r_{M1}) \times R_Z(-\theta_C) \times T(r_s - r_{M1} + r_{M2}) \times R_y(B) \times T(-r_{M2}) \times (0, 0, 0, 1)^T$$

其中,  $T$  和  $R$  分别为平移和回转运动的齐次坐标变换矩阵,回转轴线相对于工件坐标系的位置平移矩阵变换:

$$T(r_{M1}) = \begin{pmatrix} 1, 0, 0, m_x \\ 0, 1, 0, m_y \\ 0, 0, 1, m_z \\ 0, 0, 0, 1 \end{pmatrix}$$

回转工作台相对于工件的旋转矩阵变换,即  $O_{M1} X_{M1} Y_{M1} Z_{M1}$  相对于  $O_w X_w Y_w Z_w$  的旋转的坐标变换:

$$R_Z(-\theta_C) = \begin{pmatrix} \cos C, \sin C, 0, 0 \\ -\sin C, \cos C, 0, 0 \\ 0, 0, 1, 0 \\ 0, 0, 0, 1 \end{pmatrix}。$$

刀具回转中心相对于机床回转中心的平移矩阵变换,即  $O_{M2} X_{M2} Y_{M2} Z_{M2}$  相对于  $O_{M1} X_{M1} Y_{M1} Z_{M1}$  的平移:

$$T(r_s - r_{M1} + r_{M2}) = \begin{pmatrix} 1, 0, 0, s_x - m_x - L \\ 0, 1, 0, s_y - m_y \\ 0, 0, 1, s_z - m_z \\ 0, 0, 0, 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

刀具端点相对于刀具回转中心的旋转矩阵变换,即  $O_t X_t Y_t Z_t$  相对于  $O_{M2} X_{M2} Y_{M2} Z_{M2}$  旋转矩阵:

$$R_y(B) = \begin{pmatrix} \cos B, 0, \sin B, 0 \\ 0, 1, 0, 0 \\ -\sin B, 0, \cos B, 0 \\ 0, 0, 0, 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

刀具端点相对于刀具回转中心的平移矩阵变换,即  $O_t X_t Y_t Z_t$  相对于  $O_{M2} X_{M2} Y_{M2} Z_{M2}$  的平移矩阵变换:

$$T(-r_{M2}) = \begin{pmatrix} 1, 0, 0, L \\ 0, 1, 0, 0 \\ 0, 0, 1, 0 \\ 0, 0, 0, 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

由公式(1)得:

$$\begin{pmatrix} i \\ j \\ k \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos C \cos B, \sin C, \cos C \sin B, L \cos C \cos B + (s_x - m_x - L) \cos C + (s_y - m_y) \sin C + m_x \\ -\sin C \cos B, \cos C, -\sin C \sin B, -L \sin C \cos B - (s_x - m_x - L) \sin C + (s_y - m_y) \cos C + m_y \\ -\sin B, 0, \cos B, -\sin B \times L + s_z \\ 0, 0, 0, 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\cos C \cos B \\ \sin C \cos B \\ \sin B \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

由公式(2)得:

$$\begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos C \cos B, \sin C, \cos C \sin B, L \cos C \cos B + (s_x - m_x - L) \cos C + (s_y - m_y) \sin C + m_x \\ -\sin C \cos B, \cos C, -\sin C \sin B, -L \sin C \cos B - (s_x - m_x - L) \sin C + (s_y - m_y) \cos C + m_y \\ -\sin B, 0, \cos B, -\sin B \times L + s_z \\ 0, 0, 0, 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L \cos C \cos B + (s_x - m_x - L) \cos C + (s_y - m_y) \sin C + m_x \\ -L \sin C \cos B - (s_x - m_x - L) \sin C + (s_y - m_y) \cos C + m_y \\ -\sin B \times L + s_z \\ 0 \end{pmatrix} \quad (7)$$

由公式(3)得到工作台回转角度:

$$\frac{j}{i} = -\frac{\sin C}{\cos C} = -\tan C$$

$$C = -\tan^{-1}\left(\frac{j}{i}\right) \quad (5)$$

由公式(5)可知,在后处理算法中决定  $C$  角旋转正负的判断与刀轴方向矢量  $i, j$  有关。因此在前置处理所得的 CLFS 文件中,  $i, j$  都会出现正号、负号或者是零,也就是  $i, j$  将  $X, Y$  平面划分为 4 个象限来进行讨论,确定  $C$  角旋转的角度和方向。讨论分类:

(1)  $j=0, i \neq 0$ , 得  $C=0$ ;

(2)  $j \neq 0, i=0$ , 得  $\begin{cases} (j > 0, \rightarrow +\infty), C = -\frac{\pi}{2} \\ (j < 0, \rightarrow -\infty), C = \frac{\pi}{2} \end{cases}$ ;

(3)  $j \neq 0, i \neq 0$ , 得  $C = k\pi - \tan^{-1}\left(\frac{j}{i}\right), k = 0, 1, -1$ ,

$$\begin{pmatrix} i > 0, j > 0, C = -\tan^{-1}\left(\frac{j}{i}\right) < 0, k = 0 \\ i > 0, j < 0, C = -\tan^{-1}\left(\frac{j}{i}\right) > 0, k = 0 \\ i < 0, j < 0, C = k\pi - \tan^{-1}\left(\frac{j}{i}\right) > 0, k = 1 \\ i < 0, j > 0, C = k\pi - \tan^{-1}\left(\frac{j}{i}\right) < 0, k = -1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

由公式(3)得轴旋转角度:

$$i^2 + j^2 = \cos^2 B$$

$$\sqrt{i^2 + j^2} = |\cos B|$$

$$\frac{k}{\sqrt{i^2 + j^2}} = \frac{\sin B}{|\cos B|} = \pm \tan B$$

由于  $B \in \left(-\frac{\pi}{2}, 0\right)$  与  $B \in \left(0, \frac{\pi}{2}\right)$  时,  $\cos B > 0$ , 即  $i > 0$ 。

所以  $B$  在  $\left(-\frac{\pi}{2}, 0\right)$  和  $\left(0, \frac{\pi}{2}\right)$  内, 得到:

$$\frac{k}{\sqrt{i^2 + j^2}} = \tan B$$

$$B = \tan^{-1} \frac{k}{\sqrt{i^2 + j^2}} \quad (7)$$

当  $i < 0$  时,  $\cos B < 0$ , 可以得到:

$$\frac{k}{\sqrt{i^2 + j^2}} = -\tan B$$

$$B = -\tan^{-1} \frac{k}{\sqrt{i^2 + j^2}} \quad (8)$$

由公式(4)得到平动位移:

$$x_0 = p_x = L \cos C \cos B + (s_x - m_x - L) \cos C + (s_y - m_y) \sin C + m_x$$

$$y_0 = p_y = -L \sin C \cos B - (s_x - m_x - L) \sin C + (s_y - m_y) \cos C + m_y$$

$$z_0 = p_z = -\sin B \times L + s_z \quad (9)$$

整理得:

$$\begin{aligned} X &= s_x = (p_x - m_x) \cos C - (p_y - m_y) \sin C - \\ &\quad L \cos B + L + m_x \\ Y &= s_y = (p_x - m_x) \sin C + (p_y - m_y) \cos C + m_y \quad (10) \\ Z &= s_z = p_z + L \sin B \end{aligned}$$

由于机床与工件坐标系在回转轴线上重合,所以  $m_x = 0, m_y = 0$ ,可以得到:

$$\begin{aligned} X &= s_x = x_0 \cos C - y_0 \sin C - L \cos B + L \\ Y &= s_y = x_0 \sin C + y_0 \cos C \\ Z &= s_z = z_0 + L \sin B \end{aligned} \quad (11)$$

通过对五轴联动数控机床运动结构特性分析,得到了一个刀具摆动和一个工作台旋转的坐标变换数学表达式如公式(式(11))。其中,  $(x_0, y_0, z_0)$  为刀具前置处理 GOTO 语句中刀具轨迹数据坐标;  $B, C$  角度通过公式(6)~(8)求解。

## 2 利用 VB 语言创建后置处理坐标转换界面

后置处理坐标转换界面是基于 Visual Basic 6.0 平台开发的,利用 Visual Basic 6.0 语言编制用户界面转换程序。根据后处理算法求解得到的坐标转换公式(式(11)),得到可以操作控制后处理器进行导入初始文件数据,转换输出数控程序文件。在整个工序编辑过程中主要包括两个方面的内容:一个是后处理编辑器的操作属性,另一个就是数据转换的原则<sup>[9-10]</sup>。整个过程包括以下几个方面:

(1)定义系统运算过程中需要用的重要变量,在后处理编辑器中主要包括载入文件、数据转换、清空文档可操作的按键。根据公式(6)、公式(7)、公式(11)所示:定义已知变量  $x_0, y_0, z_0, i, j, k$  在刀具前置处理数据中与 GOTO 指令数据相对应,定义常量  $p_i, l$ , 定义未知变量  $x, y, z, b, c, f_c, f_b, f_k$ , 定义程序段号变量  $b_1, b_n, f_c, f_b$  表示存放弧度的角度。

(2)定义载入文件显示选择类型为 CLS 文件、TXT 文件以及所有文件。当选择错误文件格式时,自动退出查找文件,并在文本框中显示错误信息,当选择正确文件格式以后,按照定义的循环次序显示在 text1 文本框中。

(3)清空数据转换文本框,给变量赋值,定义字符串,定义字符串组。定义在前置处理文件中遇到 GOTO 语句时,如何显示数据。在这里遇到两种情况:一种是只在 GOTO 语句中显示 3 组数据代表  $x_0, y_0, z_0$ ,一种是在 GOTO 语句中显示全部 6 组数据  $x_0, y_0, z_0, i, j, k$ 。定义当数据转换时没有遇到 GOTO 语句时直接跳转继续转换。添加固定程序格式指令 %0000、N0010 G54、N0020 G17 G64 G90、N0030 M04 S1000、N0040 G01 X0 Y0 F1000、N0050 B0 C0,回车键换行。

(4)定义具体转换公式。将前面推导出的公式(6)、公式(7)、公式(8)、公式(11)定义在程序内。

单击启动选项可以操作后置处理界面,载入前置刀位数据,转换成数控程序如图 2 所示。

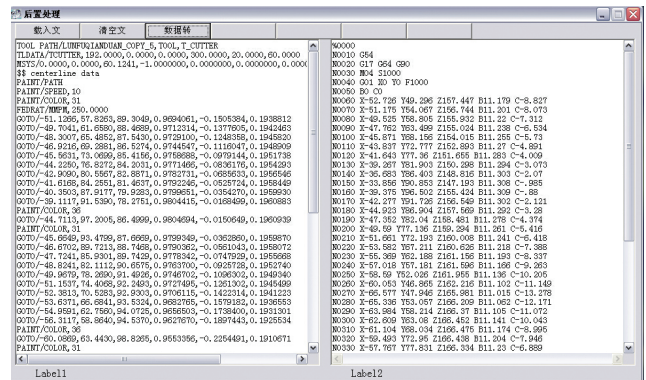


图2 后处理界面

Fig.2 Post processing interface

## 3 结论

五轴数控加工是当前数控技术领域的一个重要研究方向,是不可缺少的重要内容,代表着数控加工技术的发展方向和趋势。本研究根据机床的结构形式和运动变换进行后置算法求解,得到坐标转换公式。利用 Visual Basic 语言完成可操作的坐标转换界面,实现数控程序自动转换,最终将前置处理所产生的刀位运动数据(CLFS)转换成抛光机床的数控程序;将五轴数控理论在实际中应用,最终将前置处理产生的刀位文件转换成机床执行的 CNC 程序。

## 参考文献

- [1] 金荣. 五坐标联动数控技术. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1995.
- [2] 周济, 周艳红. 数控加工技术. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- [3] 庞继伟. 五轴数控铣削加工后置处理及加工编程研究[D]. 济南: 山东大学, 2007.
- [4] 王爱玲, 李梦群, 冯裕强. 数控加工理论与实用技术. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [5] 冯显英, 葛荣雨. 五坐标数控机床后置处理算法的研究. 工具技术, 2006, 40(4):44-46.
- [6] 刘雄伟. 数控加工理论与编程技术. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [7] 周艳红, 周济. 五坐标数控加工中的理论误差分析与控制. 机械工程学报, 1999, 35(5):54-57.
- [8] 明兴祖. 数控自动编程系统中后置处理的实现. 组合机床与自动化加工技术, 2002, 1:29-31.
- [9] 柴欣, 李惠然. Visual Basic 程序设计基础. 北京: 中国铁道出版社, 2003(8):45-80.
- [10] 占维, 刘伟. VB6.0 数据库应用编程 100 例. 北京: 中国铁道出版社, 2004.

(责编 叶枫)