

文章编号:1000-6893(2010)11-2288-07

直摆头与斜摆头五坐标机床数控加工程序 互换求解算法

田荣鑫¹, 任军学¹, 史耀耀¹, 李剑勋²

(1. 西北工业大学 现代设计与集成制造技术教育部重点实验室, 陕西 西安 710072)

(2. 中航工业陕西飞机工业(集团)有限公司, 陕西 汉中 723213)

An Inter-translation Algorithm of NC Program Between Perpendicular and Tilted Head 5-axis Machines

Tian Rongxin¹, Ren Junxue¹, Shi Yaoyao¹, Li Jianxun²

(1. The Key Laboratory of Contemporary Design and Integrated Manufacturing Technology, Ministry of Education, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

(2. AVIC Shaanxi Aircraft Industry (Group) Corporation Ltd., Hanzhong 723213, China)

摘要: 针对复杂结构零件五坐标加工设备变更带来的程序处理问题,分析讨论了直摆头-转台式和斜摆头-转台式两种五坐标机床之间的数控加工程序互换求解算法。根据不同的机床结构,建立了机床坐标系之间的对应关系;基于机床自动跟踪模式下的数控加工程序后置处理和逆后置处理方法,提出了机床之间数控加工程序的互换算法;采用单步距走刀时间不变的控制方式,给出了加工进给速度的互换算法,实现了程序转换对工艺参数的继承。实际应用验证表明,该算法可有效解决直摆头与斜摆头五坐标机床数控加工程序之间的互换问题。

关键词: 五坐标机床; 互换算法; 程序转换; 后置处理; 逆后置处理

中图分类号: V260.5; TP301.6 **文献标识码:** A

Abstract: With regard to the program translating problem brought by the change of 5-axis equipment in machining complex structural components, an inter-translation algorithm of numerical control (NC) program between perpendicular and tilted head 5-axis machines is presented. First, based on different structures of two 5-axis machines, the relationship between coordinates is established. Second, according to the post-processor and the inverse post-processor methods of NC program with automatic tracking, an inter-translation algorithm for 5-axis machine is proposed. Finally, with the control method of constant cutting time in a single step, an inter-translation algorithm of machining feedrate is given, which realizes the inheritance of program translation to cutting parameters. Experimental results indicate that the algorithm can effectively solve the inter-translation problem of NC program between the perpendicular and the tilted head 5-axis machines.

Key words: 5-axis machine; inter-translation algorithm; program translation; post-processor; inverse post-processor

在航空、航天领域中,许多复杂整体结构件如航空发动机整体叶盘、叶轮、机匣等,其数控加工多由五坐标机床完成,数控加工程序繁多。在生产加工中,由于各种原因,加工设备可能经常发生变更,但因为不同类型的五坐标机床结构不同,机床坐标系和旋转轴也不同,导致原数控加工程序不能直接在不同类型的机床上互换使用。工艺人员必须重新从加工工艺系统输出新设备的刀位文

件,经后置处理后获得新数控加工程序并进行加工验证。这不但费时费力,也可能在重新处理程序过程中出现错误导致零件报废。如何快速将已经过调整、优化和实用验证的数控加工程序转换为其他设备所能直接使用的程序,对保证数控加工的高效率和正确性非常必要。R. S. Lee等^[1]对3种类型的五坐标机床进行了研究,使用统一的坐标转换矩阵和逆向运动学方法获得了数控加工代码的解析方程;L. J. Chen^[2]提出了一种针对双摆工作台类型五坐标机床的运动学模型和后置处理算法;吴飞等^[3]对网络制造中的数控加工程序转换技术进行了研究;李铁钢^[4]对两台双摆主轴

收稿日期: 2010-05-24; 修订日期: 2010-07-26

基金项目: 国家“863”计划(2008BAF32B10); “高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项(2009ZX04014-053)

通讯作者: 田荣鑫 E-mail: trx@nwpu.edu.cn

头五坐标机床的数控加工程序在没有刀位文件情况下,采用坐标转换的方式完成了从 FPF-N/C 机床向 Fpm60 机床的五坐标数控加工程序转换;黄庆斌等^[5]完成了在两种数控系统之间的数控加工程序格式转换;卢红等^[6]对数控加工程序逆后置处理转换为刀位文件进行了研究;李薇等^[7]编制了从数控加工程序向自动编程工具(APT)命令文件逆向转换的软件。多数文献对数控加工程序逆后置处理和程序格式转换进行了探讨,但未对数控加工程序工艺参数处理进行研究。本文在保留原机床数控加工程序成熟参数的条件下,采用三维空间坐标求解的方式,进行数控加工程序的快速转换,从而保证复杂零件加工设备变更时数控加工程序的快速准备和调试。

1 数控加工程序转换过程分析

1.1 五坐标机床程序转换匹配性分析

数控加工程序的主体是数控机床各轴的坐标位置、进给速度和主轴转速,转换的主要任务就是将源机床的运动数据信息转化到目标机床。要进行数控加工程序转换,其前提条件是目标机床能够完成原数控加工程序所要求的各种运动。

以直摆头-转台式与斜摆头-转台式五坐标数控机床为对象,研究其数控加工程序互相转换的方法。直摆头-转台式五坐标机床如图 1 所示,其坐标轴为 X_s, Y_s, Z_s, B_s, A_s ,第 4 轴 B_s 绕 Y_s 轴旋转,第 5 轴 A_s 绕 X_s 轴摆动。其中,第 4 轴 B_s 可 360° 旋转,第 5 轴 A_s 摆动受机械结构限制,摆动区间为 $[A_{s1}, A_{s2}]$,其中 $A_{s1} < -90^\circ, A_{s2} > 0^\circ$ 。

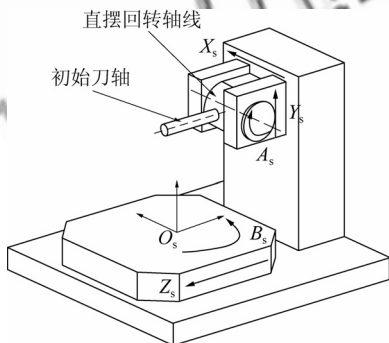


图 1 直摆头-转台式五坐标机床

Fig.1 5-axis machine with perpendicular head and table

斜摆头-转台式五坐标机床如图 2 所示,其坐标轴为 X_d, Y_d, Z_d, C_d, B_d ,第 4 轴 C_d 绕 Z_d 轴旋

转,第 5 轴 B_d 绕空间向量 $p(0, \sqrt{2}/2, \sqrt{2}/2)$ 摆动。其中,第 4 轴 C_d 可 360° 旋转,第 5 轴 B_d 的摆动区间为 $[0^\circ, 180^\circ]$,但由于其摆动中心向量 p 是图中所示的斜摆回转轴线,实际刀轴矢量绕 X_d 轴摆动范围是 $[0^\circ, 90^\circ]$ 。

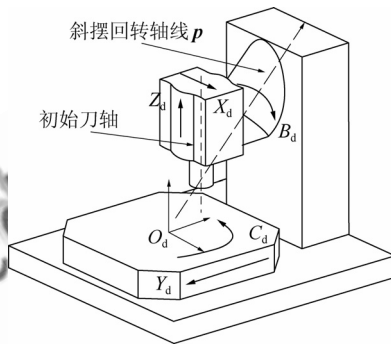


图 2 斜摆头-转台式五坐标机床

Fig.2 5-axis machine with tilted head and table

目标机床的直线轴匹配性按数控加工程序所需的行程进行匹配性判定;五坐标机床的第 4 轴均可 360° 连续无限制旋转,满足匹配性要求;第 5 轴行程范围受结构限制,必须按特征区域进行匹配性分析。设直摆头-转台式五坐标机床第 5 轴摆动角度为 α_s ,其行程可分成 3 个区间: $[A_{s1}, -90^\circ], [-90^\circ, 0^\circ], (0^\circ, A_{s2}]$,各区间和斜摆头-转台式五坐标机床的匹配性如下:

(1) 当 $\alpha_s \in [A_{s1}, -90^\circ)$ 时,斜摆头-转台式五坐标机床受结构限制,无法实现加工工具的空间姿态,所以当第 5 轴角度位于此区间时,直摆头机床数控加工程序不能向斜摆头机床转换。

(2) 当 $\alpha_s \in [-90^\circ, 0^\circ]$ 时,两机床之间的数控加工程序姿态可准确匹配,实现无差互换。

(3) 当 $\alpha_s \in (0^\circ, A_{s2}]$ 时,由斜摆头机床的结构可知,加工工具所需的空间姿态无法直接实现。当直摆头机床的数控加工程序中第 5 轴摆动角度全部位于 $(0^\circ, A_{s2}]$ 范围内时,可通过将第 4 轴 B_s 旋转 180° 的方式将第 5 轴角度变换到 $[-A_{s2}, 0^\circ]$,再进行数控加工程序转换;从斜摆头机床数控加工程序向直摆头机床转换时,无法直接将第 5 轴角度转换到 $(0^\circ, A_{s2}]$ 范围内。因此当 $\alpha_s \in (0^\circ, A_{s2}]$ 时,两机床之间的数控加工程序转换匹配性受限。

1.2 机床坐标系对应关系

两类机床在相同加工姿态下所建立的坐标系对应关系如图 3 所示。

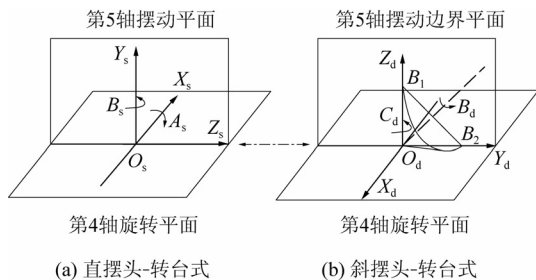


图3 机床坐标系对应关系

Fig. 3 Relationship between different machines' coordinates

直摆头-转台式五坐标机床第4轴 B_s 旋转平面为 $X_s O_s Z_s$, 斜摆头-转台式五坐标机床第4轴 C_d 旋转平面为 $X_d O_d Y_d$; 直摆头-转台式五坐标机床第5轴 A_s 摆动平面 $Y_s O_s Z_s$ 在坐标平面内, 斜摆头-转台式五坐标机床第5轴 B_a 摆动时, 刀轴矢量在半圆锥面 $B_1 O_d B_2$ 内变化, 刀轴矢量摆动边界 $O_d B_1$ 和 $O_d B_2$ 在坐标轴 Z_d 和 Y_d 上, 取坐标平面 $Y_d O_d Z_d$ 作为第5轴摆动边界平面。按第4轴旋转平面和第5轴摆动平面各自对应的方式确定两机床坐标轴的对应关系。首先, 机床旋转平面和摆动平面的公共坐标轴对应关系为

$$\left. \begin{aligned} \{X_s, Z_s\} \cap \{Y_s, Z_s\} &= \{Z_s\} \\ \{X_d, Y_d\} \cap \{Y_d, Z_d\} &= \{Y_d\} \end{aligned} \right\} \Rightarrow (Z_s \leftrightarrow Y_d)$$

其次, 第4轴旋转平面内剩余坐标对应关系为

$$\left. \begin{aligned} \{X_s, Z_s\} - \{Z_s\} &= \{X_s\} \\ \{X_d, Y_d\} - \{Y_d\} &= \{X_d\} \end{aligned} \right\} \Rightarrow (X_s \leftrightarrow X_d)$$

最后, 第5轴摆动平面内剩余坐标对应关系为

$$\left. \begin{aligned} \{Y_s, Z_s\} - \{Z_s\} &= \{Y_s\} \\ \{Y_d, Z_d\} - \{Y_d\} &= \{Z_d\} \end{aligned} \right\} \Rightarrow (Y_s \leftrightarrow Z_d)$$

1.3 五坐标机床控制模式分析

在摆头-转台式五坐标机床加工中, 工件随第4轴旋转, 刀具随第5轴摆动。以直摆头-转台式五坐标机床为例, 如图4所示, 当第4轴旋转某一角度时, 工件的加工点 P 在该轴旋转平面内沿以工作台中心为圆心的圆弧移动到 P' 点; 当第5轴摆动某一角度时, 刀尖点 T 在该轴的摆动平面内沿以摆动中心为圆心的圆弧移动到 T' 点。若要求在此过程中刀尖点 T 始终指向加工点 P , 那么机床必须在相应的第4轴旋转平面和第5轴摆动平面内移动。设加工坐标系相对机床坐标系的位

置矢量(简称位矢)为 $\mathbf{v}_0 = (x_0, y_0, z_0)$, 刀尖距离第5轴摆动中心距离为 l , 在加工坐标系下刀尖点的位矢为 $\mathbf{v} = (x, y, z)$, 第4轴旋转角为 ΔB_s , 第5轴摆动角为 ΔA_s , 则第4轴旋转平面内加工点的位移为 $\mathbf{v}_b = (\Delta x_b, 0, \Delta z_b)$, 在第5轴摆动平面内刀尖点的位移为 $\mathbf{v}_a = (0, \Delta y_a, \Delta z_a)$ 。

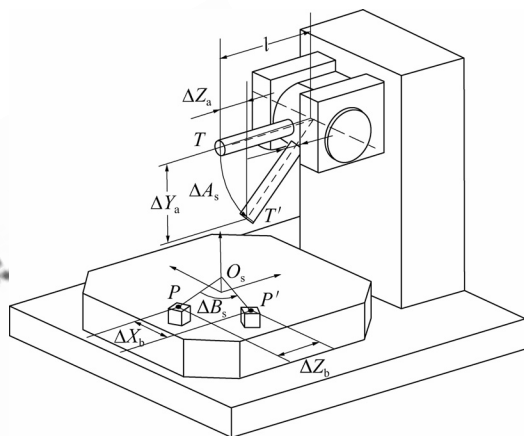


图4 直摆头-转台式五坐标机床的旋转运动

Fig. 4 Rotatory motion of 5-axis machine with perpendicular head and table

工件在第4轴旋转平面内绕 Y_s 轴旋转 ΔB_s , 运动变换矩阵 \mathbf{M}_b 为

$$\mathbf{M}_b = \begin{bmatrix} \cos \Delta B_s & 0 & -\sin \Delta B_s \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \Delta B_s & 0 & \cos \Delta B_s \end{bmatrix} \quad (1)$$

被加工点在第4轴旋转平面内的实际位移 \mathbf{v}_b 为

$$\mathbf{v}_b = (\mathbf{v} + \mathbf{v}_0)(\mathbf{M}_b - \mathbf{E}) \quad (2)$$

式中: \mathbf{E} 为单位矩阵。

刀具在第5轴摆动平面内绕 X_s 轴摆动 ΔA_s , 运动变换矩阵 \mathbf{M}_a 为

$$\mathbf{M}_a = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \Delta A_s & \sin \Delta A_s \\ 0 & -\sin \Delta A_s & \cos \Delta A_s \end{bmatrix} \quad (3)$$

刀尖点在第5轴摆动平面内的实际位移 \mathbf{v}_a 为

$$\mathbf{v}_a = [0 \ 0 \ -l \ 1](\mathbf{M}_a - \mathbf{E}) \quad (4)$$

为满足加工条件, 机床实际加工点应考虑两个旋转运动带来的位移, 实际加工点的位矢 \mathbf{v}' 为

$$\mathbf{v}' = \mathbf{v} + \mathbf{v}_b - \mathbf{v}_a \quad (5)$$

目前大多数五坐标机床控制系统可以采用自动跟踪的控制模式, 当机床第4轴旋转和第5轴摆动时, 通过其相应变换矩阵进行计算和补偿, 保证刀具切削点自动跟踪工件加工点运动。此时, © 航空学报杂志社 <http://hkxb.buaa.edu.cn>

五坐标机床的数控加工程序加工点坐标和刀位文件中的坐标值相同,直线轴坐标不再需要进行后置处理计算。

2 数控加工程序坐标转换算法

2.1 直摆机床旋转轴坐标与刀轴矢量转换算法

直摆头-转台式五坐标机床旋转轴如图 5 所示,第 4 轴旋转平面为平面 XOZ,第 5 轴摆动平面为平面 YOZ。以 O 点为起始点的刀轴矢量 \mathbf{I} 在平面 XOZ 内的投影为 \mathbf{I}' ,第 4 轴旋转角 b_s 为矢量 \mathbf{I}' 和平面 YOZ 的夹角,第 5 轴摆动角 a_s 为矢量 \mathbf{I} 和矢量 \mathbf{I}' 的夹角。

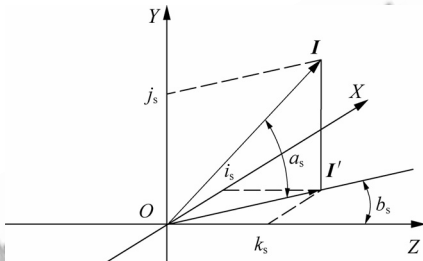


图 5 直摆头-转台式五坐标机床的旋转轴

Fig. 5 Rotatory axis of 5-axis machine with perpendicular head and table

将直摆头-转台式五坐标机床第 5 轴摆角约束在 $[-90^\circ, 0^\circ]$,其旋转轴角度和刀轴矢量 (i_s, j_s, k_s) 间的位置处理算法^[8]为

$$a_s = -\arctan \frac{j_s}{\sqrt{i_s^2 + k_s^2}} \quad (6)$$

当 $i_s^2 + k_s^2 = 0$ 时,取 $a_s = -90^\circ$ 。

$$\left. \begin{aligned} b_s &= \arctan \left| \frac{i_s}{k_s} \right| && i_s \geq 0, k_s > 0 \\ b_s &= 180^\circ - \arctan \left| \frac{i_s}{k_s} \right| && i_s > 0, k_s \leq 0 \\ b_s &= 180^\circ + \arctan \left| \frac{i_s}{k_s} \right| && i_s \leq 0, k_s < 0 \\ b_s &= 360^\circ - \arctan \left| \frac{i_s}{k_s} \right| && i_s < 0, k_s \leq 0 \end{aligned} \right\} (7)$$

当 $k_s = 0$ 时,取 $\arctan \left| \frac{i_s}{k_s} \right| = 90^\circ$ 。

根据式(6)和式(7),可得刀轴矢量和旋转角度之间的逆后置处理算法为

$$\left. \begin{aligned} i_s &= \cos(-a_s) \sin b_s \\ j_s &= \sin(-a_s) \\ k_s &= \cos(-a_s) \cos b_s \end{aligned} \right\} (8)$$

2.2 斜摆机床旋转轴坐标与刀轴矢量转换算法

斜摆头-转台式五坐标机床旋转轴如图 6 所示,设单位刀轴矢量为 \mathbf{I} ,刀轴矢量为 (i_d, j_d, k_d) 。第 5 轴摆动时,由于初始刀具轴线 OI_2 和摆动轴心 OO_1 不垂直,刀具轴线沿半圆锥面 $OI_2I_1I_3$ 运动,刀具轴线端点 I_1 落在圆锥的底边 $\widehat{I_2I_1I_3}$ 上,在第 5 轴摆动平面 $O_1I_2I_1I_3$ 内,第 5 轴摆动角度为 b_d 。在刀具轴线端点轨迹 $\widehat{I_2I_1I_3}$ 上取点 I_1 ,使刀具轴线 OI_1 的 Z 轴分量 k_d 和刀轴矢量 \mathbf{I} 的对应分量相等, OI_1 即为第 5 轴摆动后的刀具轴线。第 5 轴摆动时,刀具轴线 OI_1 在第 4 轴旋转平面 XOY 内的投影亦发生变化,投影角为 c_t ,在第 4 轴旋转平面内,刀轴矢量的投影为 \mathbf{I}' ,第 5 轴摆动后的刀具轴线投影为 OI_4 ,两投影间的夹角即为第 4 轴旋转角 c_d 。

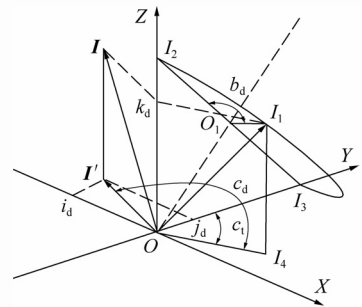


图 6 斜摆头五坐标机床第 5 轴

Fig. 6 The fifth axis of 5-axis machine with tilted head

由几何空间关系可得第 5 轴摆动角度和刀轴矢量关系为^[9]

$$\cos \angle I_1O_1I_2 = 2 | I_1I_4 | - 1 = 2k_d - 1 \quad (9)$$

$$b_d = \arccos(2k_d - 1) \quad (10)$$

刀轴矢量第 4 轴旋转平面内投影角 c_t 和刀轴矢量关系为

$$\tan \angle I_3OI_4 = \frac{\sqrt{2} \sin \angle I_1O_1I_2}{1 - \cos \angle I_1O_1I_2} = \sqrt{\frac{2k_d}{1 - k_d}} \quad (11)$$

$$c_t = \angle I_3OI_4 = \arctan \sqrt{\frac{2k_d}{1 - k_d}} \quad (12)$$

当 $k_d = 1$ 时,取 $c_t = 90^\circ$ 。

计入第 5 轴摆动投影角 c_t ,第 4 轴旋转角度 c_d 和刀轴矢量的后置处理算法为

$$c_d = c_t + \begin{cases} \arctan \left| \frac{i_d}{j_d} \right| & i_d \leq 0, j_d > 0 \\ -\arctan \left| \frac{i_d}{j_d} \right| & i_d > 0, j_d \geq 0 \\ -180^\circ + \arctan \left| \frac{i_d}{j_d} \right| & i_d \geq 0, j_d < 0 \\ 180^\circ - \arctan \left| \frac{i_d}{j_d} \right| & i_d < 0, j_d \leq 0 \end{cases} \quad (13)$$

当 $j_d = 0$ 时, 取 $\arctan \left| \frac{i_d}{j_d} \right| = 90^\circ$ 。

根据式(10)和式(13), 可得刀轴矢量和旋转角度之间的逆后置处理算法为

$$\left. \begin{aligned} i_d &= \frac{\sqrt{2}}{2} \sin b_d \cos c_d - \frac{1 - \cos b_d}{2} \sin c_d \\ j_d &= \frac{\sqrt{2}}{2} \sin b_d \sin c_d + \frac{1 - \cos b_d}{2} \cos c_d \\ k_d &= \frac{1 + \cos b_d}{2} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

2.3 数控加工程序坐标转换算法

设直摆头机床指令坐标为 $(x_s, y_s, z_s, b_s, a_s)$, 对应刀轴矢量为 (i_s, j_s, k_s) , 斜摆头机床指令坐标为 $(x_d, y_d, z_d, c_d, b_d)$, 对应刀轴矢量为 (i_d, j_d, k_d) 。两机床均在自动跟踪模式下, 直线轴坐标直接按照机床坐标系对应关系和坐标轴定义方向进行转换, 转换算法为

$$\left. \begin{aligned} [x_s \ y_s \ z_s] &= [x_d \ y_d \ z_d] \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \\ [x_d \ y_d \ z_d] &= [x_s \ y_s \ z_s] \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

机床坐标转换矩阵为

$$\mathbf{T}_{ds} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\mathbf{T}_{sd} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

两机床刀轴矢量 (i_s, j_s, k_s) 和 (i_d, j_d, k_d) 之间的对应关系与直线轴对应关系相同, 所建立的两机床旋转轴间递推关系为

$$\begin{cases} a_s & \xrightarrow{\text{逆后置处理}} & i_s & \xrightarrow{\mathbf{T}_{sd}} & i_d \\ b_s & \xrightarrow{\text{后置处理}} & j_s & \xrightarrow{\mathbf{T}_{ds}} & j_d \\ & & k_s & & k_d \end{cases} \begin{cases} i_d & \xrightarrow{\text{后置处理}} & b_d \\ j_d & \xrightarrow{\text{逆后置处理}} & c_d \end{cases}$$

依据此递推关系及式(8)、式(14)~式(17)可得两机床旋转轴之间的相互转换公式为

① 斜摆头到直摆头转换公式:

$$[a_s \ b_s \ 1] = [1 \ 1 \ 1] \cdot$$

$$\begin{bmatrix} -\arcsin \frac{1 + \cos b_d}{2} & 0 & 0 \\ 0 & c_d & 0 \\ 0 & -\arctan \frac{\sqrt{2} \sin b_d}{1 - \cos b_d} & 1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

当 $b_d = 0^\circ$ 时, 取 $b_s = c_d - 90^\circ$ 。

② 直摆头到斜摆头转换公式:

$$[b_d \ c_d \ 1] = [1 \ 1 \ 1] \cdot$$

$$\begin{bmatrix} \arccos(-1 - 2\sin a_s) & 0 & 0 \\ 0 & b_s & 0 \\ 0 & \arctan \sqrt{\frac{-2\sin a_s}{1 + \sin a_s}} & 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

当 $a_s = -90^\circ$ 时, 取 $c_d = b_s + 90^\circ$ 。

3 工艺参数的转换算法

数控加工程序工艺参数主要包括进给速度和主轴转速。数控加工程序在转换时, 由于机床结构的不同, 将引起坐标轴的实际移动距离发生变化, 为了保证转换前后实际切削进给速度的一致性, 需对其进给速度进行相应的转换。

笔者提出了数控加工程序转换前后单步距走刀时间相同的原则, 以保证转换前后刀具和工件的相对运动速度不变, 即

$$t = l_d / f_d = l_s / f_s \quad (20)$$

式中: t 为单步距走刀时间; f_s 为原数控加工程序段进给速度; l_s 为综合走刀距离; f_d 为转换后数控加工程序段的进给速度; l_d 为综合走刀距离。

设原机床数控加工程序两顺序刀位点为 $(x'_s, y'_s, z'_s, b'_s, a'_s)$ 和 $(x_s, y_s, z_s, b_s, a_s)$, 根据前述转换算法分别计算出转换后两刀位点 $(x'_d, y'_d, z'_d, c'_d, b'_d)$ 和 $(x_d, y_d, z_d, c_d, b_d)$ 。原程序段综合走刀距离为

$$l_s = \sqrt{|x'_s - x_s|^2 + |y'_s - y_s|^2 + |z'_s - z_s|^2 + |b'_s - b_s|^2 + |a'_s - a_s|^2} \quad (21)$$

转换后程序段的综合走刀距离为

$$l_d = \sqrt{|x'_d - x_d|^2 + |y'_d - y_d|^2 + |z'_d - z_d|^2 + |c'_d - c_d|^2 + |b'_d - b_d|^2} \quad (22)$$

根据转换前后单步距走刀时间相同的原理,可得

$$f_d = f_s \frac{\sqrt{|x'_d - x_d|^2 + |y'_d - y_d|^2 + |z'_d - z_d|^2 + |c'_d - c_d|^2 + |b'_d - b_d|^2}}{\sqrt{|x'_s - x_s|^2 + |y'_s - y_s|^2 + |z'_s - z_s|^2 + |b'_s - b_s|^2 + |a'_s - a_s|^2}} \quad (23)$$

进给速度转换后,与原数控加工程序相比,新数控加工程序每段的走刀时间 t 不变,工件和刀具的相对运动速度 f 也不变,工件和刀具的相对运动距离

$$l = ft \quad (24)$$

在工件和刀具相对运动距离不变时,刀具切削刃切削次数 n 也不变,每段程序的主轴转速

$$S = n/t \quad (25)$$

在 n 和 t 均保持不变时,程序段内的主轴转速也保持不变,直接采用原数控加工程序的主轴转速即可实现新程序对原程序工艺参数的继承。

4 算 例

基于本文算法开发的五坐标数控加工程序互换软件已在某航空发动机制造企业成功应用,实现了多种航空发动机整体叶盘、叶轮和机匣在设备变更时数控加工程序的快速有效转换。图 7 是使用此数控加工程序互换软件加工完成的整体叶盘。该整体叶盘原加工设备为直摆头-转台式 SAJO 12000P 五坐标机床,后改为斜摆头-转台式

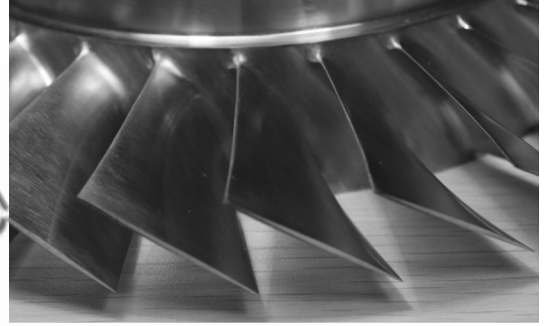


图 7 开式整体叶盘局部

Fig. 7 A part of open blisk

DMU 80P 五坐标机床进行加工。表 1 给出了该整体叶盘在 SAJO 机床上自动跟踪模式下数控加工程序的部分指令数据,以及向 DMU 机床转换后的结果。

表 1 所示指令数据所在的数控加工程序段在 SAJO 机床上加工时间为 95.5 min,转换到 DMU 机床上加工时间为 96.3 min,加工效率一致;转换前后的数控加工程序在两设备上所加工的整体叶盘精度均符合设计要求,加工结果表明本文提出的数控加工程序转换算法正确有效。

表 1 数控加工程序转换前后对比

Table 1 Contrast between translated NC program and former one

SAJO 12000P 五坐标机床上的数控加工程序	DMU 80P 五坐标机床上的数控加工程序
TRAORI	M128
S4000	S4000
...	...
G1 X-34.983Y9.100Z118.526A-77.954B3.536F1091	L X34.983Y118.526Z9.100B17.067C87.479F1137
G1 X-33.824Y9.118Z117.545A-77.913B4.027F1093	L X33.824Y117.545Z9.118B17.126C87.950F1142
G1 X-32.674Y9.153Z116.558A-77.918B4.588F1094	L X32.674Y116.558Z9.153B17.118C88.513F1147
G1 X-31.531Y9.203Z115.567A-77.963B5.158F1096	L X31.531Y115.567Z9.203B17.054C89.106F1152
...	...

5 结 论

(1) 在进行不同类型五坐标机床数控加工程序转换时,需进行转换匹配性分析。

(2) 转换过程中,不同机床间的坐标轴对应

关系由两机床旋转平面和摆动平面对应的旋转和摆动方式确定。

(3) 提出的直摆头与斜摆头五坐标机床数控加工程序互换求解算法,不仅可在不同机床之间进行直线坐标轴和旋转坐标轴的转换,还可以对

加工程序的进给速度进行转换,保证转换前后切削进给速度一致。

(4) 提出的加工程序转换算法,可通过中间虚拟机床扩展成多台五坐标机床间的程序转换算法,完成多台机床间数控加工程序的任意转换,增加机床使用的灵活性,提高数控加工效率。

参 考 文 献

- [1] Lee R S, She C H. Developing a postprocessor for three types of five-axis[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 1997, 13(9): 658-665.
- [2] Chen L J. Kinematics modeling and post-processing method of five-axis CNC machine[C]//Proceedings of the 1st International Workshop on Education Technology and Computer Science. 2009.
- [3] 吴飞,阮明,卢红. 在网络制造中数控转换和传输技术的研究[J]. 武汉理工大学学报,2004,26(10):74-76.
Wu Fei, Ruan Ming, Lu Hong. Research on transform and transmission of NC programs in networked manufacture environment[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2004, 26(10): 74-76. (in Chinese)
- [4] 李铁钢. 基于 VC 的数控机床转换程序设计[J]. 机械工程师,2009(2): 95-97.
Li Tiegang. The design of program converting software for NC machine tool based on VC[J]. Mechanical Engineer, 2009(2): 95-97. (in Chinese)
- [5] 黄庆斌,洪启祥,孙永刚,等. 不同数控系统后置程序转换软件的开发[J]. 金属加工,2008(15): 63-65.
Huang Qingbin, Hong Qixiang, Sun Yonggang, et al. The development of postprocessor translation software between different NC control systems [J]. Metal Working, 2008(15): 63-65. (in Chinese)
- [6] 卢红,周德生. 数控文件转换为刀位文件的研究与实现[J]. 组合机床与自动化加工技术,2006(7): 18-19.
Lu Hong, Zhou Desheng. Research and realization on transformation from NC to CL[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2006(7): 18-19. (in Chinese)
- [7] 李薇,张永岩. 基于 CATIA 的数控加工程序逆向转换软

件开发与应用[J]. 航空制造技术,2001(2): 55-57.

Li Wei, Zhang Yongyan. Development and application for conversion software of NC program based on CATIA[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2001(2): 55-57. (in Chinese)

- [8] 刘雄伟,张定华,王增强,等. 数控加工理论与编程技术[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. (in Chinese)
- [9] 田荣鑫,任军学,孟晓贤,等. 斜摆头五坐标数控加工机床的后置处理算法研究[J]. 机械设计与制造,2007(12): 117-118.
Tian Rongxin, Ren Junxue, Meng Xiaoxian, et al. Research of five axis postprocessor for numerical control machine with tilt head[J]. Machinery Design & Manufacture, 2007(12): 117-118. (in Chinese)

作者简介:

田荣鑫(1979—) 男,博士,工程师。主要研究方向:计算机辅助技术、现代集成制造技术。

Tel: 029-88460428

E-mail: trx@nwpu.edu.cn

任军学(1968—) 男,教授。主要研究方向:计算机辅助技术、现代集成制造技术。

Tel: 029-88495232

E-mail: rjx1968@nwpu.edu.cn

史耀耀(1959—) 男,教授,博士生导师。主要研究方向:机电控制及自动化,CAD/CAM。

Tel: 029-88492851

E-mail: shiyy@nwpu.edu.cn

李剑勋(1978—) 男,工程师。主要研究方向:航空动力系统设计与计算机辅助技术。

Tel: 0916-2886337

E-mail: wangln@shanfei.com

(编辑:蔡斐,杨冬)