互补式立卧转换五轴数控机床的后置处理

■ 淮海工业集团有限公司　（山西长治　046012）　杨兴隆　吴永钢　温玉光　崔　军

摘要：为最大程度提高数控机床的加工精度和范围，针对立卧转换五轴数控机床坐标转换关系，建立其运动学模型。通过对其立卧主轴转换互补加工原理的分析，推导出该型机床连续加工大曲率曲面的转角计算公式及其坐标转换公式，并根据推导结果，开发基于UG软件的后置处理程序，解决大曲率曲面在立卧转换数控机床加工范围不够大的难题。

1.立卧转换互补加工原理

立卧转换五轴机床的主轴分为两个——立轴和卧轴，利用45°斜滑台的滑动交替使用。工作台的行程范围为－20°～＋45°，与“摇篮式”五轴机床相比较，这么小的行程极大程度上限制了机床的加工范围。为了合理兼顾机床刚性和加工范围，数控系统厂商采取了互补加工的办法。

（1）平面互补加工　平面的法向矢量在－20°～＋45°范围内时，可以使用立主轴驱动旋转刀具加工零件，数控坐标平面为*XY*平面，由*Z*轴带动立主轴实现加工运动；当平面的法向矢量＞＋45°范围时，则使用卧主轴驱动旋转刀具加工零件，数控坐标平面为*ZX*平面，由*Y*轴带动卧主轴实现加工运动，如图1、图2所示。

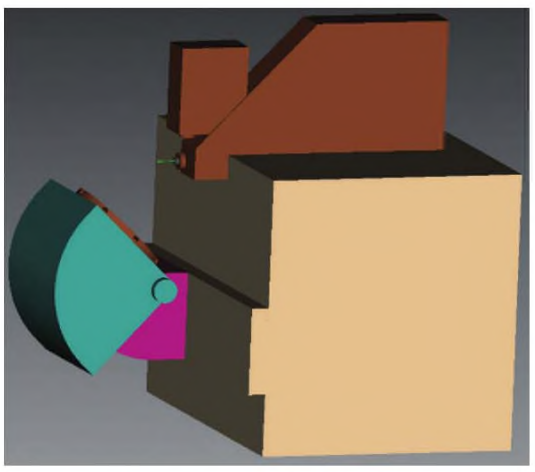


图1　立主轴加工

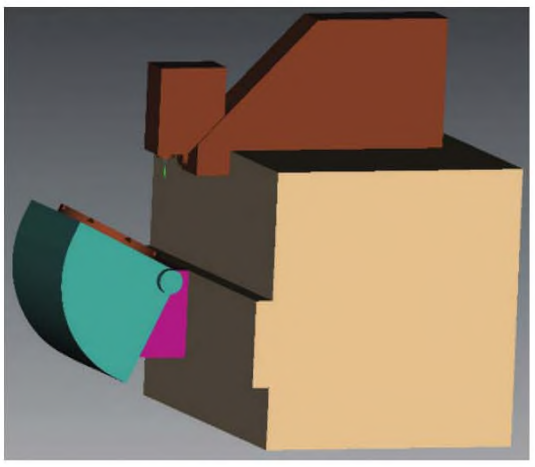


图2　卧主轴加工

虽然立主轴和卧主轴的交换是由45°斜滑台的滑动来完成转换动作，但是在转换前后，立主轴和卧主轴始终呈正交方式存在，所以立卧转换机床仍然属于正交机床。

由于立主轴和卧主轴的第四轴加工范围都是－20°～＋45°，所以法向矢量＞＋45°超出立主轴加工范围的平面特征却正好落入卧主轴的加工区间，举个例子：比如立主轴加工不了的法向矢量为46°的平面，正好可以把第四轴旋转到44°用卧主轴来完成加工；立主轴加工不了的法向矢量为110°的平面，正好可以把第四轴旋转到－20°用卧主轴来完成加工。这就相当于把第四轴的行程增加了65°，从而与“摇篮式”五轴机床的加工范围不相上下。

（2）互补加工几何解析　一般双转台五轴机床的后置处理主要是靠第四轴与第五轴偏置表中的数据来实现的，只要在偏置表中填入正确的偏置数据就可以了。但是在互补加工时，偏置数据只有在立主轴加工第四轴矢量范围在－20°～＋45°时有效。当第四轴的矢量＞45°时即变换成卧主轴，加工零件时就不可以使用由偏置表中数据算出来的坐

标，例如：当第四轴矢量需要是46°时，立主轴已经不能胜任，而是需要用卧主轴来加工第四轴矢量为44°的点。这时后置处理生成的X、Y、Z坐标是以第四轴为46°计算出来的，与编程员所需要的第四轴为44°的坐标截然不同。要想得到正确的坐标点，必须给后置处理器赋予一定的计算方法。

（3）主轴的处理　NX编程中，一个操作只用一把刀具，一般的后置处理也只生成一次换刀代码。但是在立卧转换联动加工时却需要在一个操作中生成若干多次换刀代码，只要第四轴矢量＞45°就需要一次卧轴更换代码，＜45°就需要一次立轴更换代码，所以妥善进行主轴立卧转换后置处理是必不可少的。

2.立卧转换几何分析

根据互补加工的原理，第四轴旋转角度＞45°时需要卧轴加工，且第四轴摆动角度互补为“90°－第四轴旋转角度值”，第五轴旋转角度互补为“180°＋第五轴旋转角度”。那么，只要按照互补后第四轴旋转角度值和第五轴旋转角度值求出其对应的三个线性轴（X、Y和Z）坐标，立卧转换加工即可实现。现在来分析一个随机点在确定了第四轴旋转角度值和第五轴旋转角度值后其对应线性坐标的几何转换过程。

观察图3，已知O_1点与O_2点在Y方向的距离是165.007mm，在Z方向的距离是125.138mm；$\angle AOB$为互补后的第五轴旋转角度，$\angle BO_1C$为互补后的第四轴旋转角度。将图4的XY平面看作第五轴（C轴）的旋转平面，将图5的YZ平面看作第四轴（A轴）的摆动平面，A点作为随机点。为了方便书写，将某一点的X方向坐标记为点x，Y方向坐标记为点y，如A点X方向坐标记为A_x，则A点的坐标转换计算步骤如下：

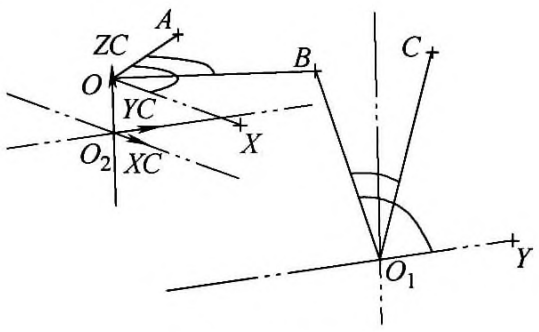


图3　轴测图

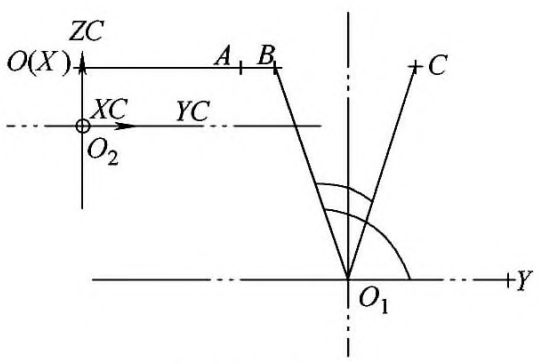


图4　XY平面

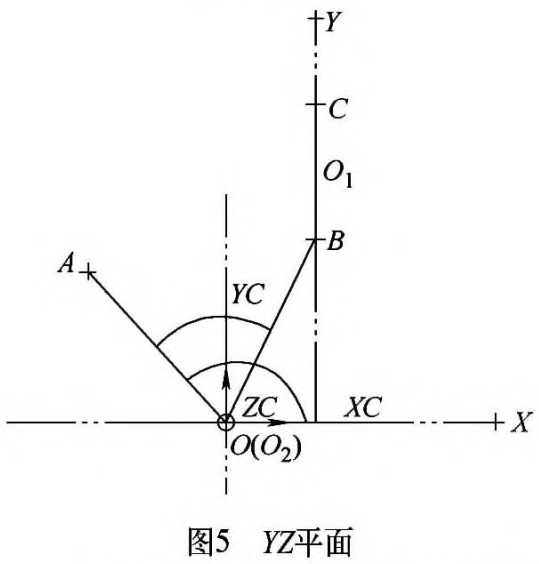


图5　YZ平面

1）从图4求出A点绕XY平面旋转$\angle AOB$（第五轴旋转角度）后的B点坐标。$OA=OB=\mathrm{SQRT}(A_yA_y+A_xA_x)$，$\angle AOX=\arctan(A_y/A_x)$，$\angle BOX=\angle AOX-\angle AOB$，$B_x=OB\cos\angle BOX$，$B_y=OB\sin\angle BOX$，$B_z=A_z$。

2）将B点转换到以O_1为坐标原点的YZ平面，用B_{x1}、B_{y1}、B_{z1}表示。$B_{x1}=B_x$，$B_{y1}=B_y-165.007$，$B_{z1}=B_z+125.138$。

3）求出B点绕YZ平面摆动$\angle BOC$（第四轴摆动角度）后的C点坐标。

$O_1B=\mathrm{SQRT}(B_{y1}B_{y1}+B_{z1}B_{z1})$，$\angle BO_1Y=\arctan(B_{z1}/B_{y1})$，$\angle CO_1Y=\angle BO_1Y-\angle BO_1C$，$C_x=B_{x1}$，$C_y=O_1B\cos\angle CO_1Y$，$C_z=O_1B\sin\angle CO_1Y$。

（4）将C点坐标转换回以O_2为坐标原点的原始坐标系，用C_{x1}、C_{y1}、C_{z1}表示。$C_{x1}=C_x$，$C_{y1}=C_y+165.007$，$C_{z1}=C_z-125.138$，C_{x1}、C_{y1}、C_{z1}的值即为随机点A的最终坐标。

3.后置处理编写

以Heidenhain数控系统为例进行后置处理编写。

1）新建双转台五轴后置处理，设置旋转轴参数，将第四轴的行程范围设置为－20°～＋110°，第四轴的行程设置为－3 600 000°～3 600 000°，清除换刀事件的所有用户定义程序和指令行，如图6矩形框所示。

2）点击“N/C Data Definitions”“Create”，新建如图7所示的立主轴换刀指令条“tool_change_1”。同样的方法新建卧主轴换刀的指令条“tool_change_2”，tool_change_2的内容如图8所示，其中字“T”的格式定义如图9所示。

3）在快速运动事件前插入用户自定义程序“PB_CMD_RAPID”，如图10所示。用户自定义程序一般用TCL语言编写，TCL语言中#号后的代码不参与编

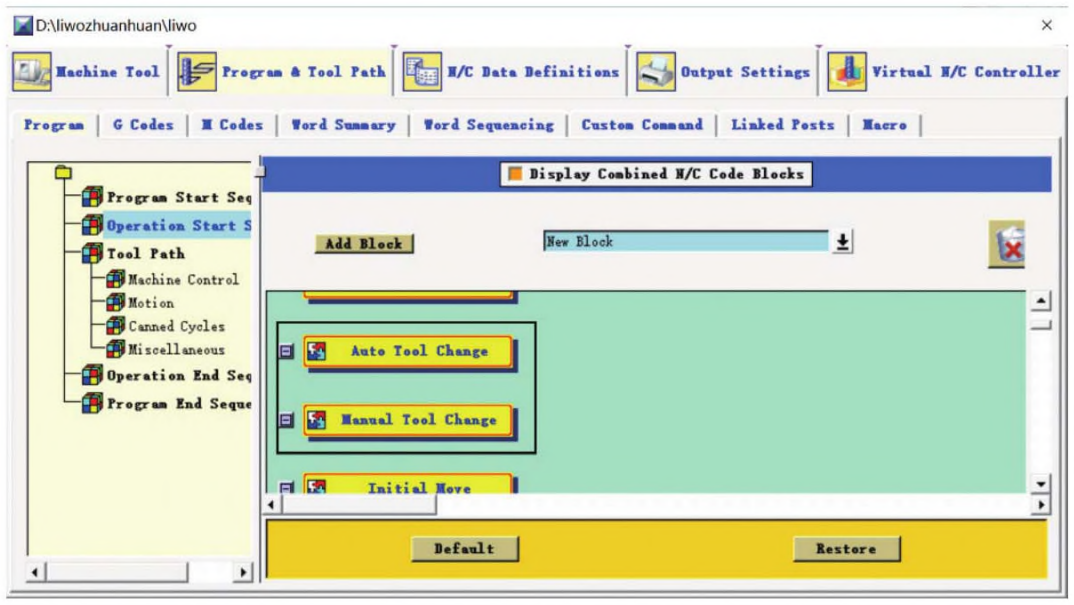


图6　清除换刀事件

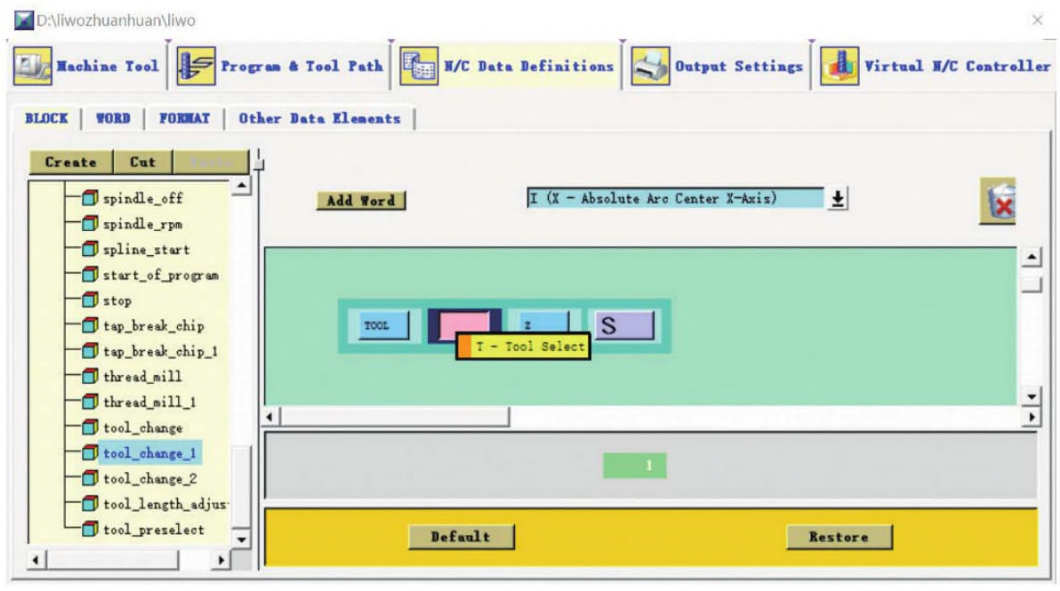


图7　新建立主轴换刀指令条

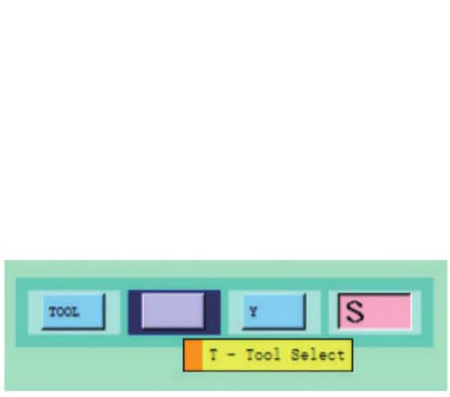


图8　卧主轴换刀指令条

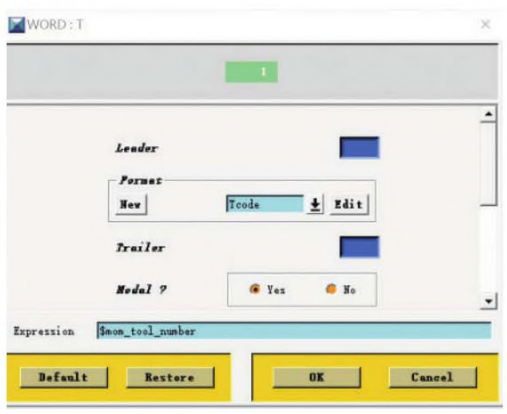


图9　字“T”的格式

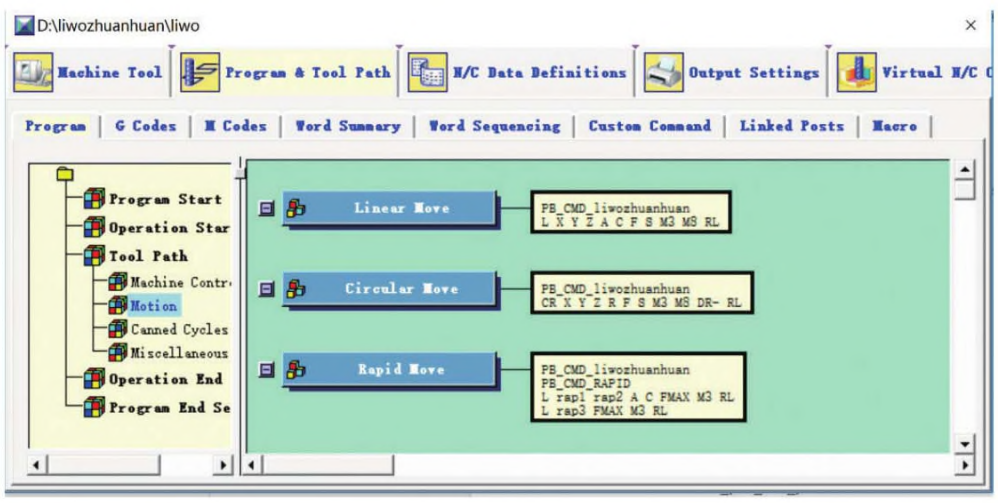


图10　插入用户自定义程序

译，常用来表示上一条代码的注释。

用户自定义程序“PB_CMD_RAPID”内容为：

```
global mom_cycle_spindle_axis mom_out_angle_pos
# 申明全局变量。变量mom_cycle_spindle_axis 和mom_out_angle_pos都是NX系统变量。变量mom_out_angle_pos代表旋转轴的输出角度，其中mom_out_angle_pos（0）代表第四轴的输出角度，mom_out_angle_pos（1）代表第五轴的输出角度；变量mom_cycle_spindle_axis代表主轴的坐标方向，mom_cycle_spindle_axis的值等于0代表主轴指向“YZ”平面，等于1代表主轴指向“ZX”平面，等于2代表主轴指向“XY”平面。
if {$mom_out_angle_pos(0) > 45 && $mom_out_angle_pos(0) <= 110 } {
# 当第四轴输出角度＞45°时处理以下情况。
set mom_cycle_spindle_axis 1
# 将主轴指向“ZX”平面。
WORKPLANE_SET
RAPID_SET
# 执行程序WORKPLANE_SET和RAPID_SET。这两个程序段默认存储在NX安装目录\NX 8.5\MACH\resource\postprocessor\ugpost_base.tcl文件中，可以直接调用。WORKPLANE_SET程序处理平面转换事宜，RAPID_SET处理快速运动时的平面转换事宜。
MOM_force Once Y
# 强制输出一次Y坐标。
} else {
set mom_cycle_spindle_axis 2
WORKPLANE_SET
RAPID_SET
MOM_force Once Z
}
```

如果第四轴输出角度＜45°，将主轴指向“*XY*”平面。

有了用户自定义程序PB_CMD_RAPID，后置处理就能在立卧转换时自动按不同的坐标平面处理双转台机床的快速运动事件，如图11、图12所示。

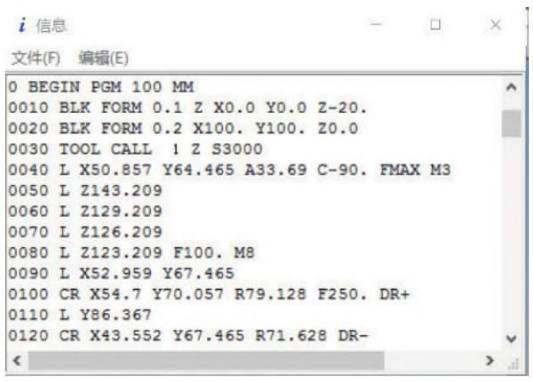


图11　立轴程序

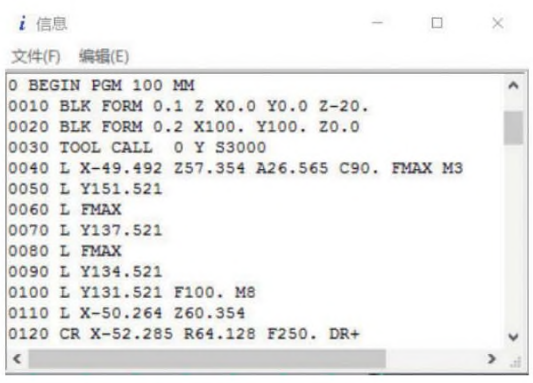


图12　卧轴程序

4）修改快速运动事件、线性运动事件的第四轴、第五轴输出字。将快速运动事件、线性运动事件的第四轴、第五轴输出字即*A*、*C*删除。如图13所示点击文本框右端箭头，选择“New Address”，增加新的*A*、*C*字。将*A*、*C*字的格式改为“coordinate”，表达式改为“$A、$C”，如图14所示。

5）在快速运动事件、线性运动事件和圆弧运动事件前插入用户自定义程序“PB_CMD_liwozhuanhuan”，如图10所示，并输入如下内容：

global A C

申明全局变量A、C，用于将PB_CMD_liwozhuanhuan中计算的第四、第五轴坐标值传递给快速运动事件、线性运动事件、圆弧运动事件。

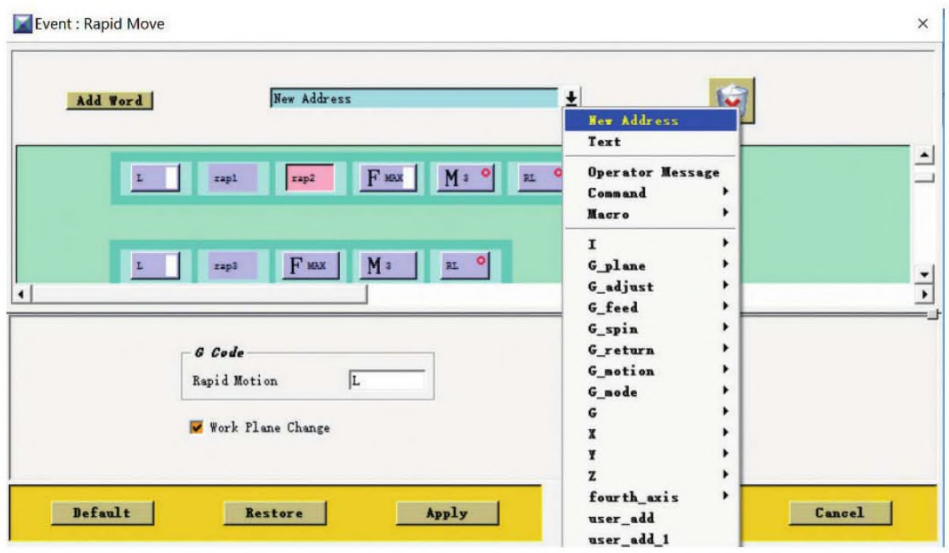


图13　增加新字



图14　改变*A*、*C*字的含义

global mom_out_angle_pos mom_prev_out_angle_pos mom_pos

全局变量mom_out_angle_pos和mom_prev_out_angle_pos mom_pos分别代表当前旋转轴输出坐标及上一个旋转轴输出坐标。

global mom_tool_number

全局变量mom_tool_number代表当前刀具的刀具号。

set tool_change “yes”

设置局部变量tool_change为“yes”，意思是默认换刀状态是“允许”。

if {$mom_out_angle_pos(0) > 45 && $mom_out_angle_pos(0) <= 110 } {

if {[info exists mom_prev_out_angle_pos] && $mom_prev_out_angle_pos(0) > 45 &&

$mom_prev_out_angle_pos(0) <=110} {

set tool_change “no”

}

如果当前第四轴输出角度＞45°且上一个第四轴输出角度＞45°，将局部变量tool_change赋值为”no”。意思就是如果当前第四轴输出角度和上一个第四轴输出角度都＞45°，那么就不输出立卧转换指令了，否则每一条加工程序都有一条立卧转换指令产生。

if {$tool_change == “yes” } {

MOM_force Once T S M_spindle

换刀状态是“允许”，强制输出一次刀具号、主轴转速和主轴旋转指令。许多数控系统都需要在换刀结束后输出一次刀具号、主轴转速和主轴旋转指令，但是后置处理认为这些指令是模态指令而不进行输出，这时就用这种办法解决。

```
MOM_do_template tool_change_2
```

```
# 执行步骤2定义的更换卧主轴指令条。
}
```

这段程序是一段自锁程序，非常有技巧也非常实用，很好地处理了加工程序重复输出不必要的换刀问题，不仅如此，它也可应用于处理许多其他问题，所以非常值得学习。

```
} else {
    set A $mom_out_angle_pos(0)
    set C $mom_out_angle_pos(1)
     if {[info exists mom_prev_out_angle_pos] && $mom_prev_out_angle_pos(0) > -20 && $mom_prev_out_angle_pos(0) <=45} {
        set tool_change “no”
       }
      if {$tool_change == “yes” } {
          MOM_force Once T S M_spindle
          MOM_do_template tool_change_1
       }
    }
}
```

#相反，如果当前第四轴输出角度和上一个第四轴输出角度＜45°，按照相同的办法处理立轴换刀事宜，因为当前第四轴输出角度＜45°是立轴状态，所以A、C值仍然保持初始后置处理的输出值。

6）在用户自定义程序“PB_CMD_liwozhuanhuan”中输入如下坐标转换内容：

```
global A C
global mom_out_angle_pos mom_mcs_goto mom_pos
```

申明全局变量。系统变量mom_mcs_goto代表零件原始放置时的坐标值；mom_pos代表零件在五轴机床后处理后的坐标值。

```
set DEG2RAD [expr 3.1415926535/180]
```

定义局部变量DEG2RAD为方便度数与弧度的计算，因为NX默认的三角函数计算是以弧度为标准的。

```
if {$mom_out_angle_pos(0) > 45 && $mom_out_angle_pos(0) <= 110 } {
```

当第四轴角度＞45°时进行卧轴坐标演化。

```
set c0 [expr (($mom_out_angle_pos(1)+180))]
```

计算互补后第五轴旋转角度。

```
set a0 [expr 90-$mom_out_angle_pos(0)]
```

计算互补后第四轴摆动角度。

```
set x1 $mom_mcs_goto(0)
set y1 $mom_mcs_goto(1)
set z1 $mom_mcs_goto(2)
```

为了简化书写，将零件被加工点的原始坐标赋值。

```
set r1 [expr sqrt($x1*$x1+$y1*$y1)]
```

和图3中的OA意义相同。

```
set c1 [expr atan($y1/$x1)/$DEG2RAD]
```

和图3中的$\angle AOX$意义相同。

```
if {$x1==0} {
  set x1 0.00001
 }
```

为了防止除数为零，当x1的值等于0时做不影响加工精度的适当演化。

```
if {$x1<0} {
  set c1 [expr $c1+180]
 }
```

因为当x1的值为负数时，反正切函数运算会产生象限差，所以应用条件语句加以修正。

```
set c2 [expr $c1-$c0]
```

和图3中的$\angle BOX$意义相同。

```
set x2 [expr $r1*cos($c2*$DEG2RAD)]
```

和图3中的B_x意义相同。

```
set y2 [expr $r1*sin($c2*$DEG2RAD)]
```

和图3中的B_y意义相同。

```
set y3 [expr ($y2-165.007)]
```

和图3中的B_{y1}意义相同。

```
set z2 [expr ($z1+125.138)]
```

和图3中的B_{z1}意义相同。

```
set r2 [expr sqrt($y3*$y3+$z2*$z2)]
```

和图3中的O_1B意义相同。

```
set a1 [expr atan($z2/$y3)/$DEG2RAD]
```

和图3中的$\angle BO_1Y$意义相同。

```
if {$y3==0} {
  set y3 0.00001
 }
```

同样的道理，为了避免除数为零现象。

```
if {$y3<0} {
  set a1 [expr $a1+180]
 }
```

修正反正切象限计算错误。

```
set a3 [expr $a1-$a0]
```

和图3中的$\angle CO_1Y$意义相同。

```
set y4 [expr $r2*cos($a3*$DEG2RAD)]
```

和图3中的C_y意义相同。

```
set z3 [expr $r2*sin($a3*$DEG2RAD)]
```

和图3中的C_z意义相同。

```
set y5 [expr $y4+165.007]
```

和图3中的C_{y1}意义相同。

```
set z4 [expr $z3-125.138]
# 和图3中的Cz1意义相同。
set mom_pos(0) $x2
set mom_pos(1) $y5
set mom_pos(2) $z4
# 用最终计算值覆盖掉默认后置处理生成的坐标值，并传递给快速运动事件、线性运动事件和圆弧运动事件。
set A $a0
set C $c0
#将互补后的第四轴、第五轴的角度值赋值给全局变量A、C，由A、C变量传递给快速运动事件、线性运动事件和圆弧运动事件。
```

至此，立卧转换双转台五轴机床后置处理完成。

4.后置处理正确性与可行性验证

立卧转换五轴数控机床的后置处理制作完成后，需要一个能反映立卧转换特性的大曲率曲面刀轨生成数控程序来检验制作的正确性，为此，笔者就图15所示零件在UG软件中建模并生成刀轨，图16是刀轨经互补式立卧转换后置处理生成的加工程序；图17是非立卧转换的通用后置处理生成的数控程序。

由立卧转换互补加工原理可知，在进行图15中曲面的加工时务必会存在第四轴坐标值从0°向90°的渐变，互补式立卧转换后置处理出来的数控加工程序在第四轴接近45°时将会有立主轴变为卧主轴的换刀指令生成；第四轴的坐标将会产生互补计算；第五轴的坐标值将累加180°。

经过图16与图17方框内的数据对比表明，互补式立卧转换后置处理的制作完整无误。将模型和数控程序导入VERICUT软件，仿真结果未出现过切与少切，最后将互补式立卧转换后置处理生成的数控加工程序上机试切，切削过程与设想完全吻合，加工表面衔接光滑，加工尺寸与设计尺寸吻合。

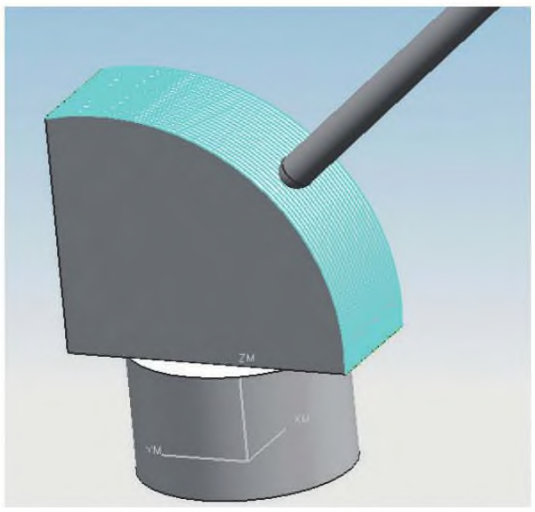


图15　试切零件模型及刀轨

```
0 BEGIN PGM VARIABLE_CONTOUR MM
BLK FORM 0.1 Z X0.0 Y0.0 Z-20.
BLK FORM 0.2 X100. Y100. Z0.0
TOOL CALL 6 Z S2000
M13
;BALL_MILL8 8.00
L X15.6 Y25.454 Z129.581 A14.267 C-180. F500
L Y6.705 Z115.211 A8.743
L Y-10.569 Z99.107 A3.22
L X-15.6 Y26.484 Z94.678 A2.304 C0.0
L Y43.16 Z107.237 A7.827
L Y60.968 Z118.133 A13.35
L Y79.746 Z127.265 A18.874
L Y99.311 Z134.546 A24.397
L Y119.491 Z139.912 A29.921
L Y140.089 Z143.309 A35.444
L Y160.924 Z144.708 A40.968
L Y181.791 Z144.095 A46.491
L Y202.502 Z141.477 A52.014
L Y222.87 Z136.877 A57.538
L Y242.696 Z130.339 A63.061
L Y261.805 Z121.921 A68.585
L Y280.011 Z111.704 A74.108
L Y297.149 Z99.783 A79.631
L Y313.064 Z86.266 A85.155
L Y307.941 Z86.019
L Y302.866 Z85.279
L X-14.1
```

图16　立卧转换后置处理生成的数控加工程序

```
BLK FORM 0.1 Z X.000 Y.000 Z-20.000
BLK FORM 0.2 X100.000 Y100.000 Z.000
L A0 C0 R0 F MAX
TOOL CALL 6 Z S2000
;BALL_MILL8 8.00
L X15.600 Y25.454 Z129.581 A14.267 C180.000 F500 M13
L Y6.705 Z115.211 A8.743
L Y-10.569 Z99.107 A3.220
L X-15.600 Y26.484 Z94.678 A2.304 C.000
L Y43.160 Z107.237 A7.827
L Y60.968 Z118.133 A13.350
L Y79.746 Z127.265 A18.874
L Y99.311 Z134.546 A24.397
L Y119.491 Z139.912 A29.921
L Y140.089 Z143.309 A35.444
L Y160.924 Z144.708 A40.968
TOOL CALL 6 Y S2000
L X15.600 Z118.850 A43.509 C180.000 F MAX
L Y194.892 F500
L X15.600 Z118.850
L Y171.518 Z115.470 A37.986
L Y148.573 Z109.857 A32.462
L Y126.280 Z102.061 A26.939
L Y104.836 Z92.155 A21.415
L Y84.448 Z80.232 A15.892
L Y65.303 Z66.402 A10.369
L Y47.576 Z50.792 A4.845
L Y31.436 Z33.550 A-.678
L Y17.028 Z14.832 A-6.202
L X14.100
```

图17　通用后置处理生成的数控程序

5.结语

本文简要介绍了立卧转换数控机床互补原理，分析了立卧转换几何角度的换算公式，并对该型机床进行了UG软件的后置处理自定义编制，使机床在立卧主轴转换加工曲面时，刀具加工点光滑过渡，满足加工要求。经过VERICUT仿真验证和机床切削检验，证明互补式立卧转换五轴数控机床的后置处理制作实用可行，可以有效解决大曲率曲面在立卧转换数控机床加工范围不够大的难题。

参考文献：

[1] 安杰．UG后处理技术[M]．北京：清华大学出版社，2003．
[2] 张磊．UG NX6后处理技术培训教程[M]．北京：清华大学出版社，2009．
[3] 于斐，王细洋．基于UG的MIKRON五轴加工中心后置处理的研究[J]．制造技术与机床，2008（08）：54-57．
[4] 冉启军，张玉峰．基于UG软件的五轴数控加工后置处理研究[J]．制造技术与机床，2011（06）：41-44．
[5] 刘磊．五轴联动加工中心基于UG-POST后置处理研究[J]．金属加工（冷加工），2013（21）：69-70．
[6] 陈德存．基于UG Post Builder的多轴加工中心后置处理的编写[J]．成组技术与生产现代化，2010（02）：56-59．

MW（收稿日期：20190903）