

# 虚拟轴数控加工中心摆角精度的补偿

## Compensation of the Swinging Angle in Virtual Axis Numeral Control Manufacturing Center

中航工业沈阳飞机工业(集团)有限责任公司 李 林

**[摘要]** 虚拟轴数控加工中心具有刚度高、惯量小、动态特性好的特点,可实现飞机大型铝结构件的超高速和高精度加工。由于并联机构运动学的非线性特性及各铰链间的藕合关系,使得并联三轴机床的摆角会产生误差。对 ECOSPEED 系列虚拟轴数控加工中心的 sprint Z3 型主轴头进行探索和研究,对其摆角精度进行补偿,达到了减少误差的目标。

**关键词:** 并联高速加工中心 飞机大型铝结构件 合格率 摆角精度补偿

**[ABSTRACT]** Virtual axis NC manufacturing center has the features of high stiffness, low inertia and high dynamic character, and is capable to achieve high speed and accuracy manufacturing on large-scale aircraft aluminium structure. Error on the swinging angle of parallel triaxial machine may occur due to nonlinear dynamics character of the parallel structure and the coupling relationship among the hinges. In this article, the author attempts to explore and research on type sprint Z3 in ECOSPEED series virtual axis NC manufacturing center. By compensating the swing angle accuracy, the author has achieved the goal of reducing error.

**Keywords:** High speed parallel manufacturing center Large-scale aircraft aluminium structure Percent of pass Swinging angle compensation

虚拟轴数控加工中心是并联三轴结构,与传统设备相比是个全新的突破。飞机大型铝结构件加工工艺复杂,壁板零件尺寸薄,生产要求精度高,对机床摆角的精度提出了严峻的挑战。虚拟轴数控加工中心摆角精度的补偿能够提高机床的生产效率和零件的合格率,因此,对其探索和研究显得尤为重要。

### 1 虚拟轴数控加工中心

串联机床的零部件制造误差、机械结构件的传动误差、受力造成的变形误差会相互叠加,影响了机床的加工精度;承重导轨产生的摩擦阻力也限制了机床的加工速度。虚拟轴机床生产厂家进行了一次全新的尝试,使

用软件和电子装置代替机械部件,减少了传统设备的叠加误差。伺服电机控制主轴头上各个连杆的长度,可以迅速实现位置变动,获得比传统设备更快的进给速度。主轴头上的线性导轨既是传动部件也是支撑部件,这样的结构提高了机床的整体刚性<sup>[1]</sup>。因此,虚拟轴数控加工中心的设计可谓是全新的突破,为数控加工技术带来了革命性的改变。

德国 DST 公司 ECOSPEED 系列虚拟轴数控加工中心在主轴头上面的开发研究非常成功。sprint Z3 型主轴头使用的是并联三轴结构<sup>[2]</sup>。以 DST 公司的 ECOSPEED 系列虚拟轴数控加工中心为例,对其摆角精度进行补偿和研究,见图 1。

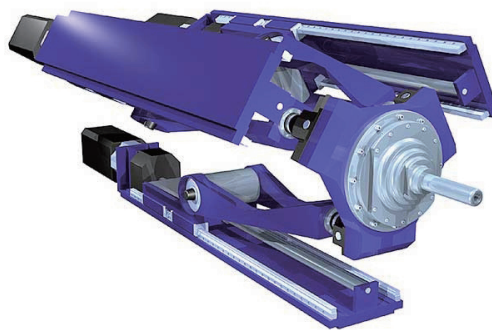


图1 ECOSPEED系列虚拟轴数控加工中心  
Fig.1 ECOSPEED series virtual axis NC machining center

### 2 虚拟轴数控加工中心运动学原理的推导

ECOSPEED 系列虚拟轴数控加工中心主轴头的轴向线性导轨在箱式圆柱体内壁上按照 120° 进行装配。

每个线性导轨上都有一个滑动块能够前后移动,3个万向球铰与滑动块前端相连,另一端与主轴端面平台相连接。轴向线性导轨上的3个滑块如果同步运动,则主轴沿着Z方向前后运动。如果3个滑块不同步运动,就合成出A轴和B轴在±40°范围内的摆动。

主轴端面平台的转动中心用o-xyz坐标系表示,在工作台上建立O-XYZ坐标系,两个坐标系方向一致,见图2。转动中心在工件坐标系的描述为:

$$Q = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}。$$

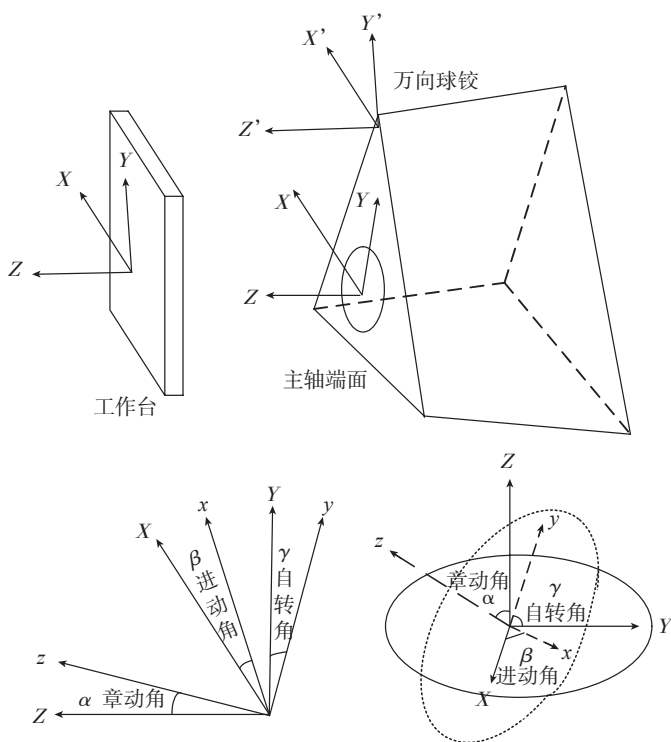


图2 虚拟轴数控加工中心主轴头的运动学模型  
Fig.2 Kinematics model of the spindle head of virtual axis NC machining center

用主轴端面的转动中心o-xyz坐标系相对于工件坐标O-XYZ坐标系的欧拉角来描述sprint Z3型主轴头的运动特性。首先设定o-xyz坐标系与O-XYZ坐标系重合。旋转主轴头,转动中心o-xyz坐标系发生转动,与O-XYZ坐标系的Z方向成α角,与旋转后的o-xyz坐标系的x轴成β角,与z轴成γ角。非线性齐次转换矩阵方程为<sup>[3]</sup>:

$$T \times Q = T(Z, \alpha)T(x, \beta)T(z, \delta) \times Q =$$

$$\begin{pmatrix} \cos \alpha \cos \delta - \sin \alpha \cos \beta \sin \delta \\ \sin \alpha \cos \delta + \cos \alpha \cos \beta \sin \delta \\ \sin \beta \sin \delta \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} -\cos \alpha \sin \delta - \sin \alpha \cos \beta \cos \delta & \sin \alpha \sin \beta \\ -\sin \alpha \sin \delta + \cos \alpha \cos \beta \cos \delta & -\cos \alpha \sin \beta \\ \sin \beta \cos \delta & \cos \beta \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}。$$

可以求出各个万向球铰在O-XYZ中的坐标。根据万向球铰的坐标得出虚拟轴数控加工中心的运动学方程为:

$$P = A_i B_i = \sqrt{(X_{A_i} - X_{B_i})^2 + (Y_{A_i} - Y_{B_i})^2 + (Z_{A_i} - Z_{B_i})^2}。 \quad (i=1,2,3)$$

可以看得出,虚拟轴数控加工中心的运动学方程的只有唯一的逆解。所以知道了刀具的位置,就可以确定3个Z轴的长度。当机床摆角出现偏差时,通过标准的测量工具进行校正。再应用机床的补偿文件,根据虚拟轴数控加工中心的运动学原理,对机床主轴头的摆角精度进行补偿。

### 3 虚拟轴数控加工中心 A/B 摆角精度的补偿

A/B摆角精度的补偿需要使用标准芯棒和千分表来校正。需要调用机床文件UMSCOSHLAG,使用机床R参数来进行运算和补偿。在MDI方式下输入指令:G0, A0, B0, UMSCOSHLAG(0)。系统将Z1/Z2/Z3的原点坐标值保存到R参数R11/R12/R13中,设定为基准参考值。在回原点方式下,选择USER AGREEMENT功能键,取消机床的Z1/Z2/Z3的原点参考点。

把标准芯棒装配在主轴头上,千分表安装在工作台上。使用手持单元,表针打在标准芯棒上,寻找主轴芯棒的径向最高点。沿着Z轴方向进行前后移动,观察千分表的指针变化,微调调整A/B轴角度,使偏差控制到2μm以内,A/B摆角基准位置测量完成,见图3。

完成A/B摆角基准位置测量工作后,在MDI方式下输入指令:UMSCOSHLAG(1),M02。机床系统将调整值与基准参考值输入,根据运动学方程进行计算。将换算结果转换为Z1/Z2/Z3轴的补偿值,记录在R参数R5/R6/R7中,再将补偿值输入到Z1/Z2/Z3轴参数MD34090中<sup>[4]</sup>。执行SIEMENS 840D系统NCK复位功能。在回原点方式下,选择USER AGREEMENT功能,恢复Z1/Z2/Z3原点参考点。完成了A/B摆角精度的补偿。

### 4 虚拟轴数控加工中心极限摆角精度的补偿

虚拟轴数控加工中心极限摆角的补偿工作,需要用到40°专用测量工具来进行测量(标准的正方体大理石作为底座,嵌套一个夹角为40°斜面直角三角体)。以A摆角40°、B摆角0°为例。将40°专用测量工具固定在工作台上,把千分表装配在主轴头上。表针打

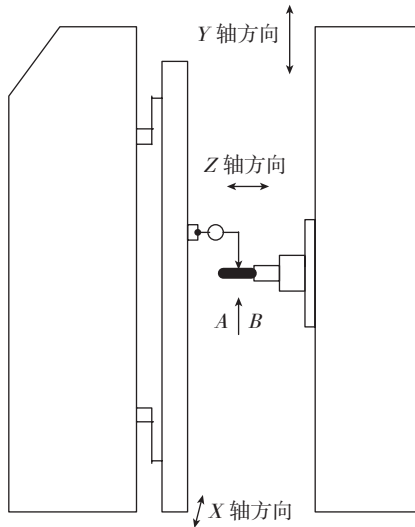


图3 虚拟轴数控加工中心A/B摆角基准位置的校准

Fig.3 Calibration of A/B angular benchmark position of virtual axis NC machining center

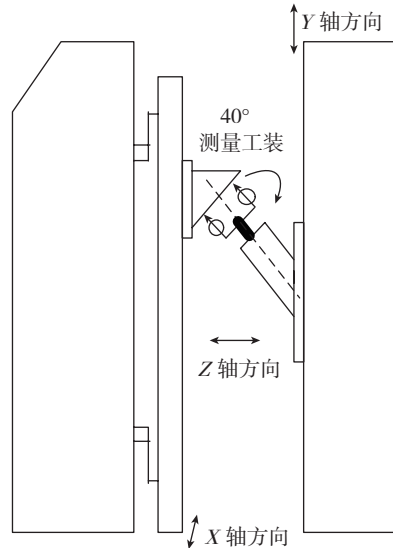


图4 虚拟轴数控加工中心极限摆角的校准

Fig.4 Calibration of virtual axis NC machining center limited angular.

在正方体底座的上直角边。移动X轴,观察千分表的读数。微调正方体大理石底座,使误差范围控制在 $1\mu\text{m}$ 以内。保证 $40^\circ$ 专用测量工具在X轴方向保持水平。再将表针打在正方体底座的侧表面,沿Y轴方向移动,对垂直方向进行校准,实现 $40^\circ$ 专用测量工具的装配。

将主轴头的A轴摆动 $40^\circ$ , B轴 $0^\circ$ ,方向与测量表面垂直。将当前的X/Y轴坐标值定位基准零点。将表针打在测量表面上,旋转千分表进行测量。使用手持单元微调X/Y轴,记录X/Y轴的调整数值,见图4。

如果X/Y轴测量值大于精度要求的理论值时,根据虚拟轴数控加工中心的运动学方程,按照测量的差值进行运算补偿。将补偿值写入USER DATA  $\rightarrow$  SCUD-CHANNEL USER DATA  $\rightarrow$  SEC-ORI-VALUE中。将SEC-APPLY的数值改为7,机床系统将SEC-APPLY参数变为3后补偿生效。补偿完成后进行验证测量,保证极限摆角精度控制到 $2.5\mu\text{m}$ 以内。依照此方法对另外3种极限摆角的情况( $A-40^\circ/B0^\circ$ 、 $A0^\circ/B40^\circ$ 、 $A0^\circ/B-40^\circ$ )进行补偿,测量结果见表1。

正是因为虚拟轴数控加工中心主轴头的特殊结构,所以极限摆角的补偿是虚拟轴数控加工中心所特有的。同时,也是保证机床摆角精度的重要工作。

## 5 结束语

本文以德国DST公司开发的ECOSPEED系列虚

表1 虚拟轴数控加工中心极限摆角的对比表

$\mu\text{m}$

角度	-X		+X		-Y		+Y	
	测量前	补偿后	测量前	补偿后	测量前	补偿后	测量前	补偿后
$A40^\circ/B0^\circ$	0	0	-3.2	-0.8	2.1	1.2	0	0
$A-40^\circ/B0^\circ$	0	0	1.3	0.5	4.7	2.0	0	0
$A0^\circ/B40^\circ$	0	0	0	0	1.4	0.8	2.7	0.6
$A0^\circ/B-40^\circ$	0	0	-1.9	-1	-4.2	-1.5	0	0

拟轴数控加工中心为分析对象,对虚拟轴数控加工中心的摆角精度补偿技术进行了初步探索和研究。通过对sprint Z3型主轴头的研究,推导出虚拟轴数控加工中心运动学原理;根据运动学原理对机床A/B轴的摆角精度进行补偿;根据运动学原理对机床极限摆角的精度进行补偿。虚拟轴数控加工中心一直是国外机床厂家的技术秘密。通过学习和研究,探索出了国际机床的先进技术。对深入了解虚拟轴数控加工中心的使用、保养及维护提供了一定理论基础,对机床的现场调试具有一定的实践指导意义。

## 参考文献

- [1] 李强,闫洪波,张玉宝. 并联机床发展的历史、研究现状与展望. 机床与液压, 2007, 35(3): 206-109.
- [2] 张云. 基于SIEMENS 840D系统对于虚拟轴挠度补偿的实现. 制造技术与机床, 2011(12): 181-183.
- [3] 汪劲松,白杰文,高猛,等. Stewart平台铰链间隙的精度分析. 清华大学学报, 2002, 42(6): 758-761.
- [4] 西门子. SINUMERIK 810D/840D 维修与调整. 北京: 西门子中国有限公司, 2004.

(责编 良辰)