



文章编号:1003-8728(2004)11-1265-03

## 不同类型 CNC 五轴工具磨床的运动参数转换原理

姚 斌<sup>1</sup>, 席文明<sup>1</sup>, 吴序堂<sup>2</sup>, 毛世民<sup>2</sup>( <sup>1</sup>厦门大学, 厦门 361005; <sup>2</sup>西安交通大学, 西安 710049)

姚 斌

**摘 要:**详细分析了 CNC 五轴立式砂轮平动工具磨床(P 型)和砂轮摆动工具磨床(B 型)的运动形式及其加工原理, 并将之与传统机床进行了比较;从所要求的同一个几何参数刀具具有相同的几何本质出发,给出了 P 型和 B 型 2 种类型 CNC 工具磨床的内在运动参数的转换关系。研究阐明了在刀具磨削成形的过程中,控制每个瞬时砂轮几何体和工件几何体在空间的相对位姿和相对运动趋势是精确成形的关键。

**关键词:**工具磨床,位姿,数控加工

中图分类号: TG5 文献标识码: A

### Transform Principle of Moving Parameters in Different CNC Five-Axis Tool Grinding Machines

YAO Bin<sup>1</sup>, XI Wen-ming<sup>1</sup>, WU Xu-tang<sup>2</sup>, MAO Shi-min<sup>2</sup>( <sup>1</sup> Xiamen University, Xiamen 361005; <sup>2</sup> Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

**Abstract:** This paper analyses the movement format and the machining principle of the CNC five axis tool grinding machines, the grinding wheel translating (P-type) and grinding wheel wiggling (B-type) types. In addition, this paper compares the characteristics of the P-type and B-type machines with the traditional tool grinding machine. Based on the fact that the cutter tools with the same type of geometrical characteristics share the same the geometrical essence, a transformation relationship in the inherent movement indexes between P-type and B-type of CNC tool grinding machines is formulated. Our research work points out the key controlling factors to approach the precision in the processes of grinding and shaping. The key factors in every moment are the relative spatial positions and the corresponding moving tendency between the grinding wheel and the cut piece.

**Key words:** Tool grinding machine; Position and attitude; NC manufacturing

利用 CNC 工具磨床加工回转刀具与传统工具磨床明显的差异是抛弃了传统机床上手摇滑台、以及特制的复杂工艺装备附件(如:凸轮靠模、非圆齿轮副等),机械结构大为简化;操作传统机床时由于受机构运动的限制,往往要辅以一定的手工操作才能完成对刀具刃带邻域的磨削,所有这些特殊机构和人为操纵所实现的特殊运动形式,在 CNC 工具磨床上都可以通过数控系统控制的联动轴之间的柔性协调运动轻松地实现,而且其联动轴之间的相对运动几乎可以任意指定,仅有机床的运动范围受机械结构尺寸的限制。

由于机械结构与控制系统之间的显著差异,CNC 工具磨床的加工原理和数学模型与传统工具磨床很不相同。比较而言,传统工具磨床机械结构复杂,但运动直观形象,成形原理相对简单,容易建立数学模型,此时,影响刀具加

工精度的主要因素是工艺装备精度、机床上各个运动副的运动精度和砂轮的几何精度。CNC 工具磨床尽管总体机械结构简单,各运动部件采用了高精度运动单元模块,但其成形原理复杂,建立数学模型困难,控制系统的精度和砂轮的几何精度成为刀具加工精度的主要因素。

#### 1 刀具成形的几何运动原理

从空间运动学的观点来看,机械加工的过程归根到底就是要控制每个瞬时刀具几何体相对工件几何体在空间的相对位姿和相对运动趋势的过程。2 个物体在空间的相对运动自由度有 6 个,即 3 个直线平动自由度和 3 个转动自由度,通过方程描述它们之间的关系,需要用 6 个参变数。对工具磨床而言,因为砂轮表面是回转面,因此,在描述刀刃磨削过程中的砂轮和工件之间相对位姿时,绕砂轮轴线的回转运动对二者之间的相对位姿没有影响,所以只需要有 5 个自由度就能够确定它们之间在空间中的相对位置。

收稿日期:2003-06-17

作者简介:姚 斌(1963-),男(汉),湖北,副教授,博士

E-mail: yaobin@xmu.edu.cn

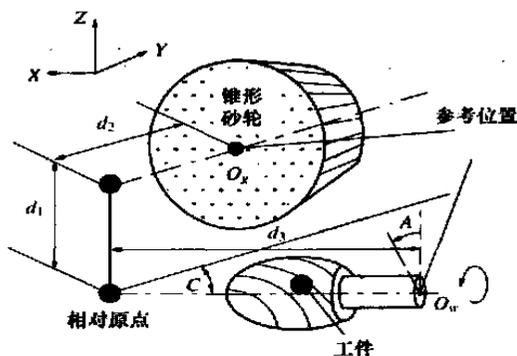


图 1 砂轮与工件的相对位置

图 1 中给出了锥形砂轮与工件之间的空间相对位置。选取砂轮大圆圆心  $O_g$  和工件轴线上一点  $O_w$  为各自实体的参考点,在  $O_w$  点建立工件刀刃曲线方程  $\bar{W}(u)$ ,  $u$  是刀刃曲线的参变量,在  $O_g$  点建立砂轮的回转面方程  $\bar{G}(v, w)$ ,  $v, w$  是砂轮表面的几何参变量(也包括对砂轮大端面的描述)。当用砂轮磨切工件刀刃  $\bar{W}(u)$  时,给出一定的约束条件  $f_i(u, v, w)$ ,  $i=1, 2, \dots$  为约束条件数。则建立如下方程组

$$\begin{cases} \bar{r}_1 = \bar{W}(u) \\ \bar{r}_2 = \bar{G}(v, w) \\ f_i(u, v, w) = 0 \end{cases}$$

式中:约束条件式  $f_i(u, v, w) = 0$  是由砂轮  $\bar{G}(v, w)$  与刀具的刀刃曲线  $\bar{W}(u)$  的共轭关系以及它们的几何参数建立的,以上关系确定了与  $u, v, w$  参数变量有关的砂轮与工件的相对位置(位姿),再根据机床的结构运动形式可以得到反映砂轮与工件相对自由度变化的机床运动参数  $X, Y, Z, A, C$ ,五轴联动工具磨床就是根据这个理论依据提出的。在机床运动设计中,如果既能使以上 5 个参数实现连续变化,又能保证它们之间给定的运动函数关系,就能实现加工中砂轮相对刀具的各种相对位置关系,从而得到所需要的刀具几何形状,多轴联动数控系统的柔性为灵活实现它们之间的相对位置和运动关系提供了保证。

## 2 五轴联动工具磨床的 2 种模型

尽管五轴联动数控工具磨床结构千变万化,抛开复杂的机械结构,仅考虑砂轮与工件之间的相对位置变化,五轴工具磨床的模型一般分 2 类,一类是图 2 所示砂轮平动 CNC 五联动工具磨床,称为 P 型,它包括了 3 根平动轴、2 个旋转轴,即:  $X$  为垂直于砂轮轴线的水平轴,实现横向进给运动;  $Y$  为平行于砂轮轴线的水平轴,实现纵向进给运动;  $Z$  为垂直于  $XY$  平面的垂直轴,实现磨头的垂直进给运动;  $A$  为工件回转轴,平行于  $XY$  平面,实现工件绕自身轴线的回转;  $C$  为工作台回转轴,平行于  $Z$  轴,实现工件相对砂轮轴心线在  $XY$  平面内摆动。

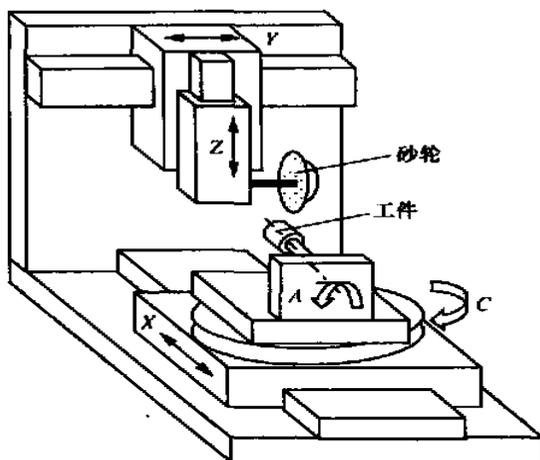


图 2 砂轮平动 CNC 五联动工具磨床(P 型)

另一类是砂轮摆动 CNC 五联动工具磨床,文中称为 B 型,如图 3 所示,也是 3 个移动轴,2 个旋转轴型的工具磨床,它的砂轮可摆动,工件仍然绕自己的轴线作回转运动。  $X$  为与砂轮轴线摆动平面垂直的水平轴,实现磨头横向移动;  $Y$  为与砂轮轴线摆动平面平行的水平轴,实现工件横向移动;  $A$  为与砂轮摆动轴心线垂直相交的水平轴,实现磨头在垂直于  $Y$  轴的平面内摆动;  $B$  为工件回转轴,与  $XY$  平面平行;  $Z$  为与工作台垂直的上下移动轴。

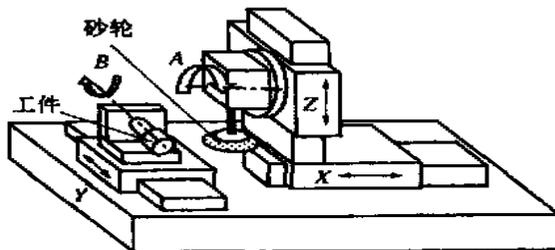


图 3 工件平动、砂轮摆动 CNC 五联动工具磨床(B 型)

图 4 是传统摇臂类机床工具磨床的概念模型,与之相比可见,五联动工具磨床有以下优点:

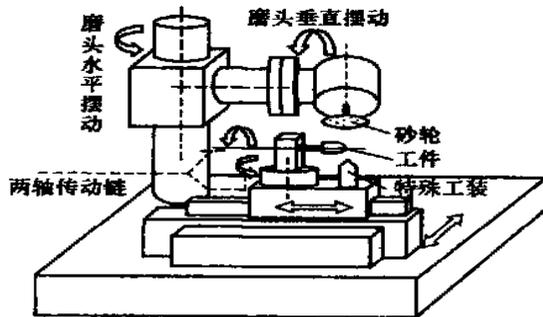


图 4 传统万能工具磨床模块图

传动链大为缩短,全部采用数控系统控制;结构形式

大大简化,取消手动滑台、特殊工艺装备等复杂的机械结构;静动态刚度大大提高,采用了直线滚柱阻尼导轨,砂轮主轴采用刚性支撑,而传统机床的磨头箱是悬臂式,导轨为带侧隙的镶条式 V 型导轨;加工精度大幅度提高,传统机床的几何尺寸加工精度一般为 0.02 mm(±0.01 mm),数控工具磨床的几何尺寸加工精度可达 0.001 mm;加工能力增强,范围广,加工灵活性更大;机床调整简单,实现了软调整等。

理论上只要保证数控加工中每个瞬时砂轮相对工件的位姿和相对运动趋势与传统机床相同,就可加工出相同的刀刃曲线和容屑槽曲面,这也是图 2 和图 3 这 2 种机床结构转换的运动理论基础。

### 3 P 型、B 型 CNC 工具磨床运动参数的确定

两类机床在加工过程中工件轴始终位于水平面内。在 P 型机床坐标系  $O-xyz(i, j, k)$  中(图 2),砂轮在机床中作  $y, z$  方向的平动,工件在机床中的位置由  $A, C$  和  $x$  轴确定。在图 3 所示 B 型机床上加工螺旋刀具时,砂轮作  $x, z$  方向的平动和  $A$  轴转动同时,工件的位置由  $y$  和  $B$  轴确定。

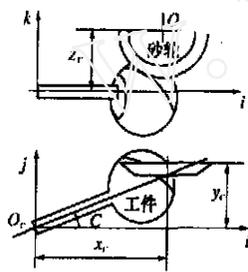


图 5 P 型机床运动参数的确定

若按照一定运动规律和计算原理得到加工刀位轨迹,也就确定了加工中各瞬时的砂轮和工件的相对位置,再根据不同的机床运动形式,转换为机床所需的机床运动参数和指令,就可以操纵数控机床加工了。当已知工件坐标系中的砂轮相对工件的位姿,设两坐标系原点相对位置为  $r_{sw} = \{x_{sw}, y_{sw}, z_{sw}\}$ ,砂轮坐标系原点(端面大圆圆心)在机床上的运动位置参数用  $\{x_c, y_c, z_c\}$  表示。对于 P 型工具磨床,砂轮和工件在机床坐标系中的相互位置见图 5,二者的相对转角为  $A$ (绕  $i$  轴)和  $C$ ,则刀位数据转化为机床坐标系  $\{G\}$  中的运动位置参数,即

$$\begin{cases} x_c = x_{sw} \cos C - (y_{sw} \cos A - z_{sw} \sin A) \sin C \\ y_c = x_{sw} \sin C + (y_{sw} \cos A - z_{sw} \sin A) \cos C \\ z_c = y_{sw} \sin A + z_{sw} \cos A \end{cases} \quad (1)$$

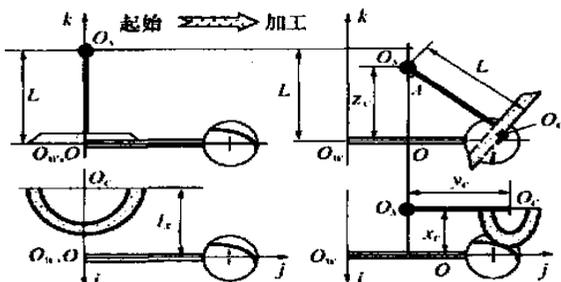


图 6 B 型机床运动参数的确定

对于 B 型工具磨床,砂轮和工件在机床坐标系中的相对位置见图 6,二者各自的转角为  $A$  和  $B$ (绕  $j$  轴)。假定工件坐标系  $\{W\}$  原点在  $O_w$ ,与机床原点  $O$  重合,砂轮摆动中心  $O_s$ ,砂轮摆杆长度为  $L$ 。砂轮中心与工件原点在  $z$  轴上的距离为  $l_x$ ,则加工中,摆杆中心在机床  $\{G\}$  上的运动位置参数为

$$\begin{cases} x_c = x_{sw} \cos B + z_{sw} \sin B \\ y_c = y_{sw} - L \sin A \\ z_c = -x_{sw} \sin B + z_{sw} \cos B + L \cos A \end{cases} \quad (2)$$

### 4 P 型与 B 型工具磨床的加工运动参数变换

在刀具制造中,由于数控软件的局限性(如在一些数控机床软件中不带专用螺旋槽加工的计算模块等)、通用数控系统的制约(非开放式的,无法在计算模块上进一步添加和开发),往往针对一种类型机床得到刀位计算轨迹数据后,想转换到另一种类型机床上去实现加工,此时,对 2 种不同结构的机床进行运动参数的转换是非常必要的。

设 P 型工具磨床的运动参数为  $x_p, y_p, z_p, A_p, C_p$ ,转变到 B 型工具磨床的运动参数为  $x_b, y_b, z_b, A_b, B_b$ ,首先工件和砂轮绕机床  $z$  轴转过  $C_p$  角,再绕  $x$  轴顺时针转过  $90^\circ$ ,此时可以得到

$$\begin{cases} B_b = A_p, A_b = C_p \\ x_b = z_p \\ y_b = x_p \cos C_p - y_p \sin C_p \\ z_b = -x_p \sin C_p - y_p \cos C_p \end{cases} \quad (3)$$

### 5 结束语

展示了 CNC 五轴工具磨床的 2 种通用类型——P 型和 B 型,分析了 2 种机床的运动形式,体现了加工刀具的运动参数的确定与机床的结构运动形式紧密相关。依据所要求的同一个几何参数刀具相同的几何本质,给出了 P 型和 B 型 2 种工具磨床的运动参数相互转换公式,反映了 CNC 工具磨床较传统工具磨床的柔性控制能力。

### [参考文献]

- [1] 姚斌. 基于几何参数主动控制的特种回转面刀具数控加工及其关键技术的研究[D]. 西安交通大学, 2003
- [2] 全荣. 五座标联动数控机床[M]. 湖南科学出版社, 1995
- [3] Rahman M, Jouko H, Kauko L. Modeling, measurement and error compensation of multi-axis machine tools. Part I: theory[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2000, 40(10)
- [4] Shatla M, Altan T. Analytical modeling of drilling and ball end milling[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2000, 98(1)