

数控磨削回转面刀具时机床联动轴数的确定

姚斌¹ 曾景华¹ 李建刚² 吴序堂²

¹ 厦门大学 ² 西安交通大学

摘要: 根据回转面刀槽螺旋面的成形原理, 阐释了回转面刀具数控磨削成形的过程实质上就是控制每一瞬时砂轮几何体与工件几何体在空间的相对位姿和相对运动趋势的过程; 分析了砂轮平动型和砂轮摆动型 CNC 工具磨床的运动形式, 讨论了机床联动轴数的确定原则并给出了计算实例。

关键词: CNC 工具磨床, 回转面刀具, 刀槽螺旋面, 联动轴数

Determination of Number of Motion Axes in NC Grinding of Rotary Cutter

Yao Bin Zeng Jinghua Li Jiangan *et al*

Abstract: According to the forming principle of rotary helical flute surface, it is explained that the shaping process of rotary cutters by NC grinding is virtually the process to control the relative position and attitude and the relative motion direction in the space between the grinding wheel body and workpiece body at the every moment. The motion modalities of CNC tool grinders with moving grinding wheel and swing grinding wheel were analyzed. The principle of determining the number of motion axes was discussed, and a calculating example was presented.

Keywords: CNC tool grinder, rotary cutter, helical flute surface, number of motion axes

1 引言

回转面螺旋刀具的刀槽曲面即使用数学表达式描述都相当复杂, 而利用现有的商用设计软件(如 Ug、Pro/ E、Cimatron 等)对其进行图形描述则更为困难。因此, 目前常用的 CAD/CAM 工程软件并不适合对数控磨削加工此类刀具的机床作业进行加工路径生成和仿真模拟, 也难以判定数控加工回转面刀具时的机床联动轴数。此外, NC 工具磨床联动轴数的选取与工件和砂轮的几何要素、加工工艺要求(如刀刃和刀槽分几次成形、有无特殊工艺装备等)以及机床的结构型式有关。本文研究数控加工时机床所用联动轴数的意义在于: 运动轴数越少, 相对运动副就越少, 机床的运动刚性和运动精度也就越高; 减少运动轴数可简化编程, 从而可在配置较低档数控系统的工具磨床上实现对刀具的加工, 以降低加工成本; 可为用户根据自身产品进行机床选型和设备投资提供可行性分析的技术依据。

2 CNC 工具磨床的基本加工原理

从空间运动学的观点来看, 机械加工的过程实质上就是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(position and attitude)和相对运动趋势的过程^[1]。图 1 给出了锥形砂轮与工件之间的空间相对位置。选取砂轮大圆的圆心 O_g 和工件轴

线上的一点 O_w 作为各自实体的参考点, 在 O_w 点建立工件(指被加工刀具体, 以下统称工件)的刀刃曲线方程, u 为刀刃曲线的参变量; 在 O_g 点建立砂轮的回转面方程, v, w 为砂轮表面的几何参变量(也包括对砂轮大端面的描述)。当用砂轮磨削工件刀刃时, 给出一定的约束条件 $f_i(u, v, w)$, $i = 1, 2, \dots$ 为约束条件数。则可建立如下方程组:

$$\begin{cases} r_1 = W(u) \\ r_2 = G(v, w) \\ f_i(u, v, w) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中, 约束条件式 $f_i(u, v, w) = 0$ 是根据砂轮回转面方程 $G(v, w)$ 与工件刀刃曲线方程 $W(u)$ 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 参变量有关的砂轮与工件的相对位置(位姿)。然后根据机床的结构运动形式, 即可得到反映砂轮与工件相对自由度变化的机床运动参数, 多轴联动工具磨床就是根据这个理论依据设计的。

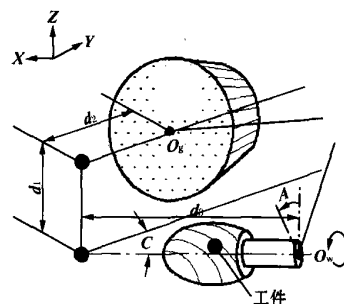


图 1 砂轮与工件的相对位置

3 常用 CNC 工具磨床的类型

尽管多轴联动数控工具磨床的结构型式各不相同,但抛开其复杂的机械结构,仅考虑砂轮与工件之间的相对位置变化,则多轴工具磨床一般可分为两种类型:

(1) 砂轮平动型 CNC 多联动工具磨床

此类工具磨床包括 3 个平动轴和 2 个旋转轴(见图 2),除了保证工件绕自身轴线作回转运动外,它们可根据用户的需要任意组合成各种联动方式。

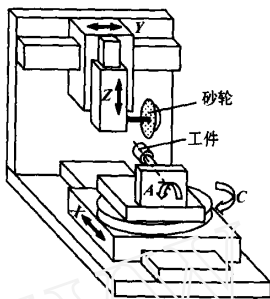


图 2 砂轮平动型 CNC 五轴联动工具磨床结构模型

(2) 砂轮摆动型 CNC 多联动工具磨床

此类工具磨床也有 3 个平动轴和 2 个旋转轴(见图 3),工件仍然是绕自身轴线作回转运动,但它的砂轮可作摆动。此类工具磨床也可根据不同的加工要求任意组合联动方式。

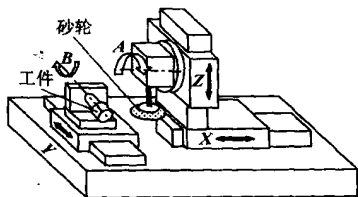


图 3 砂轮摆动型 CNC 五轴联动工具磨床结构模型

传统的摇臂类工具磨床的结构模型如图 4 所示。与之相比,多轴联动工具磨床的传动链较短,结构大大简化,取消了特殊工装等复杂的机械装置;与传统工具磨床采用悬臂式磨头箱相比,CNC 工具磨床的磨头采用刚性支撑,其静、动态刚度提高,加工能力、加工范围和灵活性增强,机床调整更为简单,可通过数控系统实现“软调整”。

尽管砂轮平动型和摆动型 CNC 工具磨床机械结构不同,但利用其柔性控制功能可以模拟传统工具磨床的一般复杂运动。从理论上说,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满足方程式(1),即可加工出相同的刀刃曲线和容屑槽曲面。

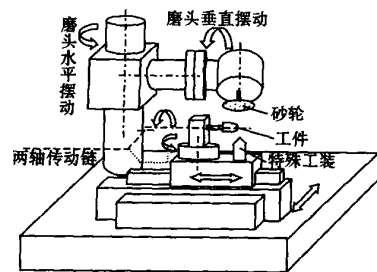


图 4 传统的万能工具磨床结构模型

4 机床加工所需联动轴数目的确定

在用盘形砂轮(碟形、碗形、平行砂轮或盘状成形砂轮)磨削加工回转面螺旋刀具时,通常采用砂轮的一个端面圆或大圆(碟形、碗形砂轮)来磨削前刀面槽形,采用砂轮的锥面或外圆柱面来磨削刀具的后刀面,或者采用成形砂轮的表面廓形来包络生成整个螺旋槽面^[2]。下面根据几何学原理来讨论选取最少联动轴数的判定原则。

根据文献^[3]中的螺旋刀刃曲线方程: $r(t) = \{ L + x(t), r(t) \sin \theta, r(t) \cos \theta \}$, 可作如下分析:

(1) 当 $\theta = 0$ 时,工件的刀刃为平面曲线,刀槽为直槽,加工时不需要角运动(图 1 所示的运动参数 A, C 参与联动即可成形。如果 $r(t)$ 也为常数,采用沿工件轴线(X 轴)方向的单轴加工即可;如果 $r(t)$ 是变化的(如锥度直槽、异形直槽等),加工中砂轮相对工件需作沿工件轴线和工件径向的直线运动,即机床需要有 X, Z 两个方向直线运动的联动功能。为了减少机床联动轴数,可对此类工件的加工配置特殊工装(工件倾斜、采用辅助靠模等),以实现砂轮相对工件径向的距离变化,加工中仍然采用沿工件轴线 X 方向的单轴加工方式。

(2) 当 θ 变化时,工件回转面为直纹面(如柱面、锥面等),其上各点的法线方向与工件轴心线的夹角为定值。通过机床轴的旋转(或利用特殊工装),总能使工件的槽底母线平行于刀具的单轴进给方向,从而具有如图 1 所示的 A, X 两轴联动,即工件相对于砂轮作绕自身轴线的角运动和沿自身母线方向的直线运动,即可加工出所需的螺旋槽面。对于锥度刀具的加工,这种方法仅适合小锥度(或螺旋槽非一次成形)的情况。然而在实际加工中,由于砂轮不断被磨损,为了保证工件的磨削精度,砂轮的回转轴心线至工件轴心线(两异面直线)的距离以及它们之间的夹角需要不断调整,砂轮廓形也要发生相应的修整变化,且制造商不会局限于仅生产一种产品,因此机床还应具有如图 1 所示的 d_1, d_2, d_3 和 C 轴方向

的手动调整功能。

(3)当 变化时,对于大锥度螺旋刀具、刀具螺旋槽要求一次成形或要求前角可控(前角的变化与图 1 中砂轮相对工件的 Y 向距离有关)的情况,除了需要角位移 A 和线位移 X 联动以外,另一个角位移——砂轮回转轴心线与工件回转轴心线的夹角(图 1 中的 C)也要发生实时变化,才能保证刃带宽度或控制前角不发生干涉,因此机床需要有三轴联动功能。

(4)对于要求一次成形但不要求控制前角的异形回转面螺旋刀刃(如球头刀刃、弧形刀刃等)的加工,除满足上述(3)的要求外,还必须增加图 1 所示的 Z 向线位移,即通过四轴联动才能满足加工要求,此时对容屑槽深度的变化和后角的控制要求并不十分严格。

(5)对于要求一次成形且前角可控的异形回转面螺旋刀刃的加工,需要利用 Y 向线位移来调整刀刃前角的大小,因此除满足上述(4)的要求外,还有必要增加如图 1 所示的 Y 向线位移,即采用五轴联动才能满足加工要求。

为了保证砂轮与工件在加工中的相对位姿要求,不同结构型式机床的砂轮和工件会有不同的运动方式,即在将工件坐标系中的刀位数据转换为机床坐标系下的运动参数时,机床的结构型式起着非常关键的作用。在数据转换中应注意,不同结构型式的机床需要采用的联动轴数也不同,根据几何学原理判定的最少联动轴数不一定是机床加工时的实际运动轴数。

在图 3 所示的砂轮摆动型工具磨床上加工螺旋角为 的一般圆柱螺旋线时,仅需将工件轴 A 绕摆动中心逆时针摆动 90° ,并给定两异面直线(砂轮轴心线和工件轴心线)的距离,即在加工中需要机床的 B 和 Y 两轴联动。

在图 2 所示的砂轮平动型工具磨床上加工螺旋角为 的一般圆柱螺旋槽时,需首先根据工件旋向将 C 轴调整到要求的位置,并保证 X 轴方向的移动量 X 和 Y 轴方向的移动量 Y 始终满足 $Y/X = \tan$ 的关系,以保证砂轮相对工件轴心线的空间位置保持不变,再加上工件的自转 A ,即加工时需要机床的 X 、 Y 、 A 三轴联动。如果为加工此类刀具而专门改变机床结构,将 X 轴移动副导轨置于 C 轴旋转机构之上,则在加工一般圆柱螺旋槽时, C 轴逆时针转过 后,仅需提供 X 和 A 两轴联动即可达到加工要求。因此,在进行机床运动结构优化设计时,要充分考虑被加工对象的几何特征。

5 计算实例

以下是根据图 2 所示五轴联动机床结构模型自行开发的刀具成形软件的一个计算实例。

加工对象为圆柱型旋转锉。已知:刀具直径 $d = 12\text{mm}$,螺旋角 $= 15^\circ$,刀刃长度 10.4mm ,刀刃齿数 24,前角 $= 5^\circ$,砂轮直径 $D = 75\text{mm}$,锥角 $= 60^\circ$ 。计算得到的部分刀位数据见表 1。局部齿的动态仿真结果如图 5 所示。

表 1 加工圆柱型旋转锉时联动轴的部分运动参数

X	Y	Z	A	C
77.1289	26.9486	41.4559	1.1305	0.3570
77.5662	27.1117	41.4559	1.1002	0.3570
78.0034	27.2748	41.4559	1.0699	0.3570
...
95.4930	33.7984	41.4559	- 0.1432	0.3570
95.9303	33.9615	41.4559	- 0.1735	0.3570

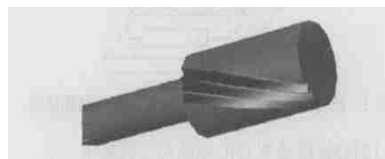


图 5 仿真加工的带局部齿的圆柱型铣刀实体

由表 1 可见,在 X 、 Y 、 Z 、 A 、 C 五个运动参数中, Y 、 C 轴的参数没有发生变化,因此在加工圆柱类刀具时机床需要三轴联动,从而验证了上节的推论是正确的。

6 结语

本文根据回转面刀槽螺旋面的成形原理,阐释了回转面螺旋刀具磨削成形的过程;分析了砂轮平动型 CNC 工具磨床和砂轮摆动型 CNC 工具磨床的运动形式,并与传统的工具磨床进行了比较;给出了确定机床联动轴数目的几何原则;同时说明,按此原则判定的运动轴数并非就是机床加工时的运动轴数,实际需要的运动轴数还应取决于机床的结构型式。

参考文献

- 1 蔡自兴. 机器人学. 北京:清华大学出版社,2000
- 2 姚 斌,吴序堂. 螺旋刀具的仿形制造. 工具技术,1996(5)
- 3 姚 斌,毛世民,聂 钢等. 数控加工特种回转面刀具时工艺参数的自动检测建模. 工具技术,2002(11)
- 4 肖金陵,周云飞,李作清. 数控万能工具磨床多轴联动加工中的轨迹干涉及其补偿问题. 精密制造与自动化,1996(2)

第一作者:姚 斌,副教授,博士,厦门大学机电系,361005 福建省厦门市