

五轴联动数控工具磨床的研发

■ 厦门金鹭特种合金有限公司（福建 361006） 李凌祥

摘要：为了实现对整体回转面硬质合金刀具的磨削加工，开发设计了一台合理的CNC五轴工具磨床；针对磨床的主要部件进行受力分析得出其结构符合刚性要求。建立了螺旋切削刃曲线和平面切削刃曲线的通用模型；从切削刃曲线几何特性中给出了判定磨削加工回转刀具所需联动轴数的方法。

与传统高速钢刀具相比，整体硬质合金刀具的特点是硬度高、脆性大，且工作曲面形状复杂，利用传统加工方法难以满足要求，一般采用数控工具磨床加工。而五轴联动数控工具磨床是高效、高质量磨削，制造精密、复杂形状刀具的高、精、尖关键设备，也是各类数控机床中结构较复杂、自动化程度高、精度和可靠性要求高的机电一体化高技术产品，对其研究开发具有相当大的技术难度。因此，五轴联动数控工具磨床为目前业界公认的精度及可靠度要求极高的工具机，全世界目前只有少数几家厂商具备研发生产能力。

1. 五轴联动数控工具磨床机模模型

如图1所示，工具磨床作为一

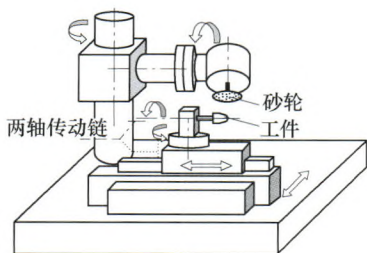


图1 传统万能工具磨床模块图

种高精密的数控装备，结构复杂，精度要求高。一般由机床的主运动部件（砂轮）、进给运动部件、辅助部件和机座等组成。图1为传统的万能工具磨床工作台结构形式。该结构属于摇臂式，磨头可以水平摆动和垂直摆动，磨头的转动采用两个齿轮传动链，为了能够完成较多的加工要求，工作台除了有直线传动之外，还在圆周方向上有进给运动和分度运动。但由于采用两轴传动链、多级齿轮传动的方式，且传动链长，故精度很难保证；另外，其结构复杂，制造装配工艺要求高，不易于维护。

通过对国内外机床工作台的典型结构进行分析后发现，一般层叠式工作台的优点是结构紧凑，而立柱式工作台可以使刚度得到较好的保证。图2、图3为设计的机床运动工作台结构模型和实体图，它综合了前两者布局合理和占用空间小的优点。其中X轴、Y轴和Z轴的运动方向相互垂直，带动砂轮的联动进给、更换和对刀；C轴是旋转轴，控制工作台的摆动；A轴是工作头，控制刀具的旋转角度；X轴、Y轴、Z轴、C轴和A轴可以实现联动，通过程序控制砂轮和刀具的相互运动位置，从而实现刀具的五轴联动，一次性磨削加工。

2. 关键零部件的受力分析

五轴工具磨床是精度要求很高的机床，关键零部件的刚性是决定精度的重要因素之一；在机床设计的过程中，设计人员对关键零部件作了应力分析，对工件施加一定的压力或力矩，观察各部位的受力变形情况，具体如

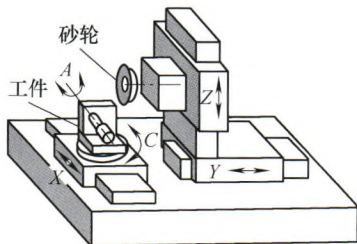


图2 CNC五联动工具磨床模型

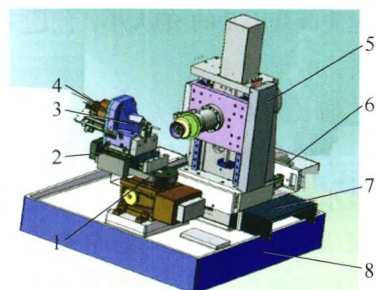


图3 CNC五联动工具磨床实体

1.C轴 2.U轴 3.棒料支撑 4.工作头(A轴)
5.Z轴 6.Y轴 7.X轴 8.机台底座

下。

(1) 机台底座的受力分析：
底座是铸造件（见图4），是整机的重要受力件，其刚性影响机床的加工精度，具体的受力分析如图5所示。向该工件施加规定的重力后，最大的变形量为0.4 μm，分析得知满足机台的刚性要求（见表1）。

(2) Z轴滑座的受力分析：Z轴滑座为铸造件（见图6），是Z轴的受力件，支撑着砂轮主轴和Z轴滑盖的上下运动，如果刚性不好，影响Z轴的行走平行精度，故它也是一个刚性要求较高的工件。具体的受力分析如图7所示。如表2所示，最大的变形量为0.0 026 μm，满足机台的刚性要求。

(3) X轴滑台的受力分析：X轴滑台也是一个受力较大的工件（见图8），主要是受Y轴的重力和Z轴的重力与加速度产生的冲击力，具体的受力分析情况如图9所示。如表3所示，最大的变形量为0.6 μm，符合机台的刚性要求。

综上所述，在3个主要的支撑零

部件施加两倍的支撑重物重力的压力，而最大的变形量都在1 μm内，可以确定刚性符合要求。

3. 螺旋切削刃曲线和平面切削刃曲线模型

在图10所示的工件坐标系 $O_w-x_wy_wz_w$ 中，回转刀具的切削刃曲线可看成是某一动点P在回转面上做螺旋运动形成的轨迹线，其轨迹方程 $r(t) = \{x, y, z\}$ 如下

$$x = x(t); y = -r(t)\sin \theta; z = r(t)\cos \theta \tag{1}$$

式中， t 是表示回转面轴向截形的参变量； θ 代表切削刃曲线上任意点绕轴心线转动的转角变量，也是 t 的函数，它们之间存在关系式 $\theta = f(t)$ ，式（1）给出的是切削刃曲线的通用表达式。

按照通常的螺旋角定义，螺旋角 β 为切削刃曲线上某点的切线与通过该点刀具回转体母线的夹角。如果用 T_0 、 T 分别表示通过P点的回转体母线和切削刃曲线的单位切矢，则有

$$T_0 = \{1, dy/dx, dz/dx\}/U \tag{2}$$

式中 $U = \sqrt{1+(dy/dx)^2+(dz/dx)^2}$ ；而且 $d_x = d_x(t)/d_t$,

$$T_0 = \{dx/dt, dy/dt, dz/dt\}/V \tag{3}$$

式中， $V = \sqrt{(dx/dt)^2+(dy/dt)^2+(dz/dt)^2}$

得到的回转面切削刃曲线任意一点处的螺旋角的通用表达式为

$$\beta(t) = \arccos(T_0 \cdot T) \tag{4}$$

得到特种回转面切削刃曲线上任意一点转角的通用表达式

$$r(t) = \{x(t), -r(t)\sin \theta, r(t)\cos \theta\} \tag{5}$$

式中， t_0 为初始参数值。

由切削刃曲线模型、刀槽深度就可以计算出磨削时砂轮相对刀具工件的姿势，由于篇幅有限，不再赘述。下面主要谈一下工具磨床在磨削刀具时联动轴数的确定方法。

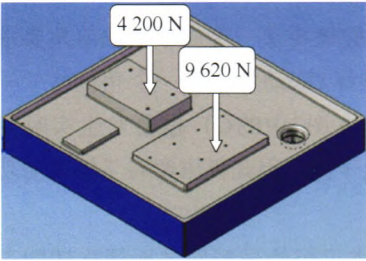


图4 底座的受力位置 and 大小

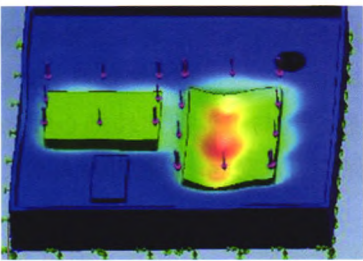


图5 底座受力后的变形情况

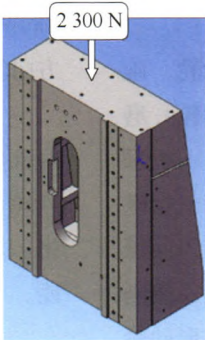


图6 Z轴滑座的受力位置 and 大小

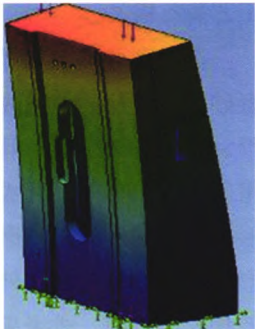


图7 Z轴滑座受力变形情况

表1 受力后的最大应力和最大变形量

名称	类型	最小	位置	最大	位置
应力	VON: von Mises应力	5.726 35 N/m²	(49.7151 mm, 189.375 mm, -1 201.72 mm)	262 404 N/m²	(112.047 mm, 119.457 mm, -447.222 mm)
变形量	URES: 合位移	0 mm	(143.938 mm, 6.00057 × 10 ⁻¹⁶ mm, -146.5 mm)	0.000 402 815 mm	(757.448 mm, 56 mm, -496.096 mm)

表2 受力后的最大应力和最大变形量

名称	类型	最小	位置	最大	位置
应力	VON: von Mises应力	0.0 868 172 N/m ²	(-13.163 mm, -233.95 mm, 113.847 mm)	263.902 N/m ²	(-71.456 9 mm, -128.834 mm, 219.291 mm)
变形量	URES: 合位移	0 mm	(-6.928 2 mm, -281.5 mm, 112 mm)	2.570 23 × 10 ⁻⁶ mm	(-149.286 mm, 259.73 mm, 276.3 mm)

表3 X轴滑盖受力后的最大应力和最大变形量

名称	类型	最小	位置	最大	位置
应力	VON: von Mises 应力	665.445 N/m ²	(374.065 mm, 306.121 mm, -47.218 9 mm)	2.60328e+006 N/m ²	(254.016 mm, 215.527 mm, -6.507 98 mm)
变形量	URES: 合位移	0 mm	(143.938 mm, 6.000 57 × 10 ⁻¹⁶ mm, -146.5 mm)	0.000 857 744 mm	(174.644 mm, 152.996 mm, -33.205 2 mm)

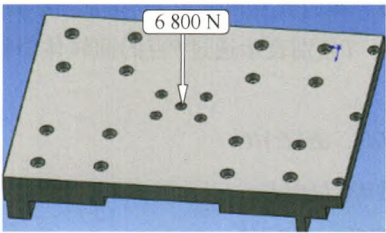


图8 X轴滑盖的受力位置和受力大小

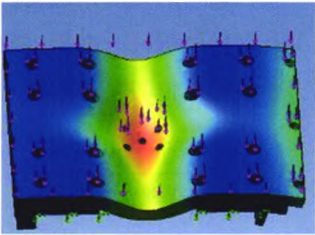


图9 X轴滑盖的受力变形情况

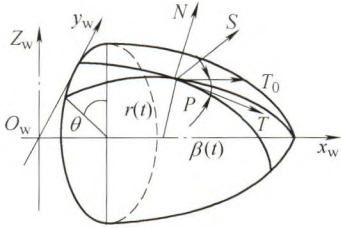


图10 螺旋刀刃曲线

4. 机床加工所需联动轴数的确定

数控加工刀具时，机床联动轴数的选取与工件和砂轮的几何要素、工艺流程和机床结构形式有关。从制造角度考虑，联动轴数与工艺流程的排布有关，与加工中切削刃和刀槽分几次成形、有无特殊工艺装备相关。

在用盘形砂轮（碟形砂轮、碗形砂轮、圆柱砂轮或成形砂轮）磨削加工回转面螺旋刀具时，一般采用砂轮的一个端面圆或大圆（指碟形砂轮和碗形砂轮）磨削前刀面槽形，用砂轮的锥面或外圆柱面磨削刀具的后刀面。或者采用成形砂轮的表面廓形来包络生成整个螺旋槽面。在这里，从几何方面来讨论选取最少联动轴数的判断方法。

以式（1）的螺旋切削刃曲线方程 $r(t) = \{x(t), -r(t) \sin\theta, r(t) \cos\theta\}$ 作如下分析：

（1）当 $\theta=0$ 时，切削刃为平

面曲线，刀槽为直槽，加工中工件不需要角运动参与联动就可成形，如果 $r(t)$ 也为常数，采用沿着工件轴线方向（X轴）的单轴加工即可。如果 $r(t)$ 是变化的（如锥度直槽或异形直槽等），加工中，砂轮相对工件需要有沿着工件轴线方向和工件径向的线运动，也就是机床要有两个线运动的联动功能。

（2）当 θ 是变化的，工件回转面为直纹面（如柱面、锥面），其上各点的法线方向与工件轴心线的夹角是定值，通过机床轴的旋转（或特殊工装）总能使工件的槽底母线平行于刀具的单轴进给方向，从而具有图2的A、X的两轴联动——即工件相对砂轮要做绕自身轴线的角运动和沿着自身母线方向的直线运动，就可以加工出所需的螺旋槽面。

（3）当 θ 是变化的，对于大锥度或螺旋槽要求一次成形，或前角要求的锥度螺旋刀具，除了要有角位移A和线位移X联动外，另一个角位移——砂轮回转轴心线与工件的回转轴心线夹角（图2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。因此机床要有三轴联动功能。

（4）对于要求一次成形，前角不要求可控的异形回转面螺旋切削刃（如球头切削刃、弧形切削刃等）加工，在步骤（3）的要求上，还必须加上一个图2所示的Z向的线位移，即四联动才能满足制造要求。此时容屑槽深度的变化和后角的控制也要求不甚严格。

（5）对于要求一次成形，前角可控的异形回转面螺旋切削刃加工，需要Y向线位移调整切削刃前角大小，因此在步骤（4）的要求上，加上一个图2所示的Y向的线位移还是有必要的，即五联动才能满足制造要求。本论文的研究就是立足于五轴联动机床上进行的。

（下转第57页）

臂钻床有很大的改进。这些性能指标,保证了气门阀座和导管底孔的同轴度和垂直度。在夹具设计中去掉了钻模板的导向功能,只保留了两个定位销作为加工中心的定位基点。在前一个方案的应用中,先后两次拧紧压紧螺钉,很难做到两个压紧螺钉力度的一致性,易引起缸盖的倾斜,导致同轴度和垂直度误差。采用如图4所示气缸压紧机构,保证两个夹紧点同时用力且力度一致,防止缸盖倾斜,在减轻工人的劳动强度的同时,保证了同轴度、垂直度的精度要求。

在气动夹具使用过程中,发现气动夹紧存在一些缺陷,如容易漏气,气流不稳定,易产生残次品。而液压传动具有工作平稳、冲击力小、便于频繁换向的优点,气动改为液压传动后,加工稳定性得以提高,降低了废品率。

在摇臂钻床上加工时,钻模板担任着导向功能,为保证加工精度,钻模板必须有足够的厚度。把切削刀具安装在有导向和限位功能

的接杆上,几部分连接在一起,如图5所示,安装和调试繁琐;多次连接降低了整体部件的刚度,降低了产品加工精度。

3. 加工工艺

采用数控机床加工,钻模板不再担负导向作用,厚度明显减小;取消导向限位接杆,仅保留铰刀,缩短刀具长度,刀具强度、刚度显著增强,确保了加工精度。

在加工工艺方面,我们进行了适当调整。精铣底面工序以往安排在加工气门阀座孔之前,而加工气门阀座和导管孔时容易对加工好的底面造成损伤,为消除这一弊端,

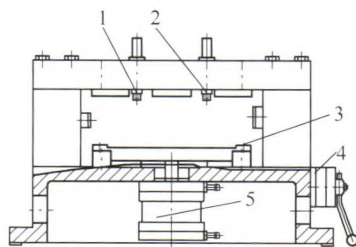


图 4
1. 菱销 2. 圆销 3. 顶板
4. 气动控制阀 5. 气缸

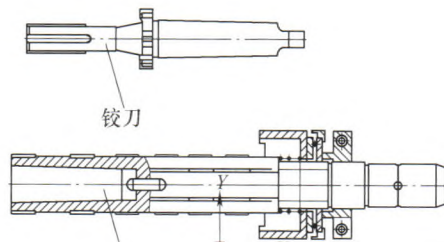


图 5

MW (收稿日期: 20140623)

(上接第48页)

为了确保加工中砂轮与工件的相对位姿要求,不同结构形式的机床会产生砂轮和工件的不同运动方式,即在将工件坐标系中的刀位数据转换成机床坐标系下的运动参数时,机床的结构形式是非常关键的。在转换中要注意,不同结构形式的机床所得到的联动轴数会不同,根据几何原则判定的最少联动轴数,不一定就是机床加工时的运动轴数。

5. 结语

论文为了科学地设计加工整体

硬质合金刀具的五轴联动数控工具磨床,对传统万能工具磨床进行了深入分析,设计出一种CNC五轴工具磨床,为保证精度对主要零部件进行了应力分析,得出其刚性符合要求,建立了通用的螺旋切削刃曲线与平面切削刃曲线模型,从切削刃曲线几何特性中给出了判定磨削加工回转刀具所需联动轴数的方法。

参考文献

- [1] 姚斌,席文明,吴序堂,等. 不同类型CNC五轴工具磨床的运动参

数转换原理[J]. 北京:机械科学与技术, 2004, 23 (11): 1265~1267.

- [2] 陶杰,徐增豪,胡剑峰,等. 国外数控工具磨床发展状况[J]. 精密制造与自动化, 2008 (3): 1~3.
[3] 姚斌,曾景华,李建刚,等. 数控磨削回转面刀具时机床联动轴数的确定[J]. 工具技术, 2004, 38 (10): 40~42.

MW (收稿日期20140831)

资助支撑项目:厦门市科技计划重大项目 (3502Z20131007)