

确保并联机床定位精度的 几项措施

Measures to Ensure Position Accuracy of Parallel Machine Tool

哈尔滨量具刀具集团有限责任公司 魏华亮



魏华亮

黑龙江省科顾委装备制造业专家组成员,现任哈尔滨量具刀具集团有限责任公司董事长、总经理。作为哈量集团科技创新的领军人物,在企业的发展、科技创新、新产品开发等方面取得了突出业绩,尤其在引进、消化、吸收、再创新的基础上研制的大型齿轮测量中心和新一代并联机床等多项科研成果填补了国内空白,达到国际领先水平。

哈尔滨量具刀具集团公司与哈尔滨工业大学联合研制的七轴联动、用于汽轮机叶片加工的并联机床结构如图1所示,6个致动器构成了标

介绍了并联机床定位精度的保障体制,该体制中多数环节是与传统机床一致的,有些则体现了并联机床的结构特点,如分辨率分析、结构参数标定及非线性误差控制等。通过实施上述措施,可以高效率地完成机床的标定工作,为该产品的产业化奠定了坚实的基础。

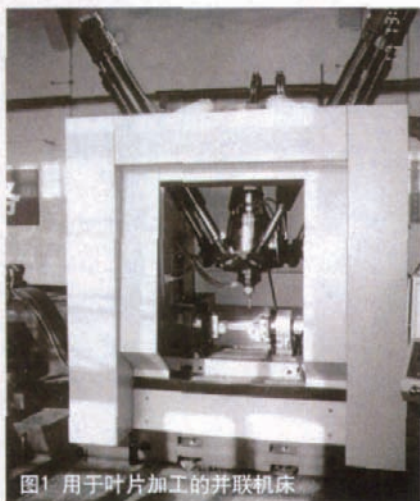
准的六自由度 Stewart 并联机构,电主轴装在并联机构的动平台上实现六自由度运动;另1个轴为卧式布置的回转轴,用于实现叶片的回转运动。

该并联机床最终定位精度的保证不是单靠一两个环节实现的,而是在机床的设计、制造、检验及标定等整个过程中,建立了一个由多环节构成的整体保障体制,下面将对各环节分别进行介绍。

设计阶段的分辨率分析

在机床设计阶段,分辨率分析是涉及精度问题的首要环节。对于传统数控机床,由于各驱动轴正交布置并且独立作用,因此驱动轴所能实现

的分辨率就是机床的分辨率;而由于并联机床各驱动轴是联合作用的,机床分辨率与各驱动轴分辨率之间的关系不是太直观,为此引入了输入至输出分辨率放大系数的概念,等于机构输入至输出雅可比矩阵所有元素平方和的平方根。另外,不同位置、不同姿态下的工作空间是不同的。我们对并联机床工作空间不同位置和姿态下的位置分辨率放大系数和姿态角分辨率放大系数进行采样分析,姿态角为 $\theta_x=0^\circ$ 、 $\theta_r=0^\circ$ 、 $\theta_z=0^\circ$ 时,工作空间各点处的位置分辨率放大系数 K_a 范围为 $1.87 \sim 1.90$ mm/mm、姿态角分辨率放大系数 K_p 范围为 $0.30 \sim 0.34$ °/mm,姿态角为 $\theta_x=25^\circ$ 、 $\theta_z=0^\circ$ 时, K_p 变



为 $2.17 \sim 3.47\text{mm/mm}$ 、 K_a 变为 $0.35 \sim 0.48^\circ/\text{mm}$ 。

从以上结果中可以看出：这台并联机床各位置、各姿态下的 K_p 和 K_a 变化均不是很大，选取较大的值作为机床各位置和姿态下通用的分辨率放大系数，即 $K_p=3.3\text{mm/mm}$ ， $K_a=0.45^\circ/\text{mm}$ ，根据设计要求机床的位置输出分辨率为 0.001mm ，角度输出分辨率为 0.001° ，则根据位置分辨率要求计算出的驱动杆分辨率上限为：

$$t_i = \frac{0.001}{3.3} \approx 0.0003\text{mm},$$

根据角度分辨率要求计算出的驱动杆分辨率上限为：

$$t_i = \frac{0.001}{0.45} \approx 0.0022\text{mm}.$$

取其中较小者作为要求驱动杆所能提供的分辨率上限，即 $t_i=0.0003\text{mm}$ 。

事实上，驱动轴丝杠导程为 6mm ，伺服电机反馈码盘分辨率为 $1/65536$ ，故驱动轴实际的分辨率为：

$$t_i = \frac{6}{65536} \approx 0.00009\text{mm}.$$

由于驱动轴的实际分辨率小于要求提供的分辨率，因此可以满足要求。根据这个分辨率来计算，本台机床理论上的位置分辨率可以达到 $3.3 \times 0.00009 \approx 0.0003\text{mm}$ ，理论上的姿态角分辨率可以达到 0.45

$\times 0.00009 \approx 0.00004^\circ$ 。

运动部分结构尺寸确定

1 虎克铰中心位置

该产品设计要求：上平台 6 个虎克铰旋转中心的准确坐标值及动平台虎克铰旋转中心的准确坐标值，上平台比较大，且虎克铰旋转中心在空间位置，因此，无法直接测量其尺寸。在研制过程中，先用数控机床加工动平台和虎克铰座的定位销孔，用三坐标测量机测出虎克铰座的定位销孔到旋转中心、旋转中心到其下定位面的距离，然后用 CAD 根据测得数据作图，求的各上虎克铰旋转中心的坐标点。产品动平台较小，故可直接在三坐标测量机上测量，即可得到各下虎克铰的旋转中心的位置。

2 虎克铰轴线与伸缩杆轴线相交精度

设计要求虎克铰轴线与伸缩杆轴线必需相交，试制时在虎克铰转轴外端加工一与轴线重合的工艺孔，装配时用定位芯杆定位，经检测，其偏移量不超过 0.015mm 。

3 伸缩杆长度

机床复位时，6 根伸缩杆长度必须有其精确值，为保证这一尺寸，特地设计了一专用检具；先将检具在一标准样件上调零位，然后将其置于伸缩杆上，转动丝杠使其对零，在三坐标测量机上测量 2 虎克铰中心距离并记录下来。联机调试时，仍用这个检具进行单杆长度调整。从而得出机床复位时的各杆长度。

从以上过程可见，这种标准检具虽然简单却起着很大作用（见图 2）。

试制结果证明，采用以上方法确定的结构尺寸，完全可以满足标定前

的要求。

驱动轴复位长度的保证

这台并联机床的复位方式与其他形式的数控机床一样，也是上电之后各驱动轴先找各自的零位信号，系统再将各轴在零位信号处对应的长度（复位长度）传给各驱动轴。显然，复位长度的准确性对并联机床精度的影响是决定性的。

实际工作中，最容易导致复位长度变化的因素是零位信号混淆的情况。由于驱动轴的复位信号一般来自于伺服电机所带码盘的零位信号，当通过丝杠将旋转运动转换成直线运动时，显然沿着杆长方向每个螺距内都会有一个零位信号，为了区分出真正的复位信号，还必须安装粗定位开关，即复位时先找粗定位开关，然后将其后面的零位信号作为复位信号（见图 3）。粗定位开关与复位信号之间的距离不能太大也不能太小，最佳距离为 $S = (0.3 \sim 0.7)T$ ，这是因为粗定位开关有其触发域值范围，若 S 过于接近于 0

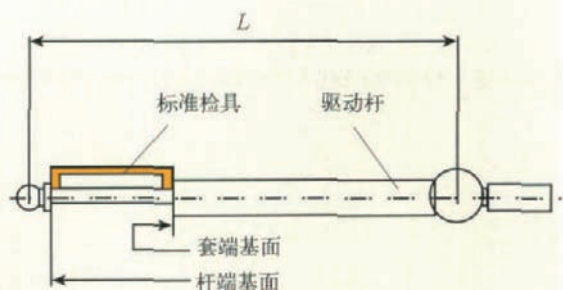


图2 杆长的测量

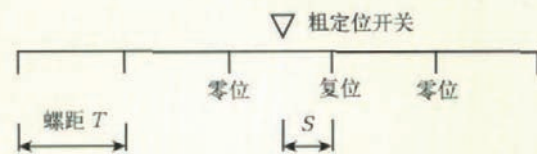


图3 粗定位开关安装位置

或 T 的话，当粗定位信号的强弱突然发生变化时，很容易将前面或后面的零位误检测为复位位置。采用“粗定位信号—复位信号—粗定位

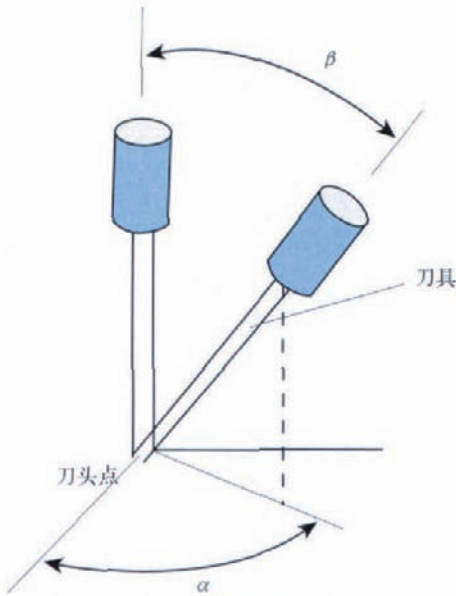


图4 聚点性精度的概念

信号”的复位方式，即在完成复位之后又找了一次粗定位信号，其目的在于测出复位信号与粗定位信号之间的距离。在机床调试完成时，系统中会将正常情况下复位信号与粗定位信号之间的距离记录下来，平时机床复位时都会将新测出的距离与系统中的记录进行比较，如果发现二者的差别较大，说明可能出现

了复位信号混淆的情况，或者是驱动杆松动了等其他问题，系统就会自动报警。

标定项目的选择

并联机床活动平台具有6个自由度，它的定位精度也是6维意义下的定位精度，标定项目的选择必须能体现这个特点。

选择2个标定项目：一是并联机床活动平台平动(各姿态角为0)时的空间定位精度；二是在空间任意位置让刀具做向各方向不同角度定点摆动时，刀头点保持在定点位置能力的空间聚点性精度，如图4所示，当 α 角和 β 角任意变化时，刀头点的位置应该是不动的。如果既能保证活动平台平动时的定位精度，又能保证在定点处刀头点的位置不随姿态角变化而偏移，实际上就保证了并联机床在自由度下的定位精度。

标定实例

以下是将机床恢复原始参数之后重新进行的一次标定试验，标定工

具是量块和接触式测头，标定的检测内容为平动时的定位精度和摆动时的空间聚点性精度测量，共进行了2轮标定。

未标定之前，平动时的定位误差最大约为0.30mm，定点摆动误差最大达0.50mm左右。经过两轮标定之后，平动定位误差降至0.015以下，

而定点摆动误差降为0.02mm左右。需要说明的是，这项试验给定的定位误差是实际测得的，没有按国家标准进行数据处理，同时，由于是采用量块作为标准量，也无法将定位误差分解为单向定位误差和双向定位误差，也不宜作为验收机床的精度指标，但这种方法方便、快捷，完全可以作为机床校准过程中的工具。通过第二

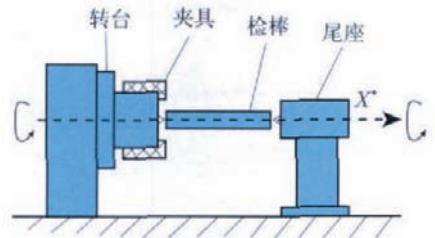


图5 回转轴线的测量

轮标定后的机床，用激光干涉仪按国家标准GB/T17421.2要求的方法进行检验，结果如表1所示。

回转轴位置的确定

这台并联机床除了6根并联轴外，还有一个联动的回转轴。

对回转轴的测量采用的是一根圆柱型的标准检棒(见图5)，测量时用接触式测头在检棒的表面测一系列点，然后用最小二乘法算出回转轴线 X^* 的位置。

修正过程中，如果发现修正之后的坐标系 X^* 、 Y^* 和 Z^* 与修正之前的坐标系 X' 、 Y' 和 Z' 有较大的差异，系统会认为中间产生了差错，就会自动提示报警。

结束语

本文介绍了并联机床定位精度的保障体制，该体制中多数环节是与传统机床一致的，有些则体现了并联机床的结构特点，如分辨率分析、结构参数标定及非线性误差控制等。通过实施上述措施，可以高效率地完成机床的标定工作，为该产品的产业化奠定了坚实的基础。

(责编 依然)

表1 数控轴线的定位精度及重复定位精度检测

检验项目	允差/mm	结论		检测工具	
双向定位精度 A	0.022	X轴	0.015	激光干涉仪 执行标准: GB/T17421.2 机床检验通则第二部分数控轴线的定位精度和重复性定位精度的确定。	
		Y轴	0.0105		
		Z轴	0.0068		
单向定位精度 A↑和A↓	0.016	X轴	A↑		0.0135
			A↓		0.0151
		Y轴	A↑		0.0068
			A↓		0.0105
		Z轴	A↑		0.0049
			A↓		0.0080
			E↓	0.0126	
Y轴	E↑	0.0026			