

# 数控机床加工精度成因及综合分析

四川长征机床集团有限公司 (自贡 643020) 刘文化

## 1. 影响机床制造精度的因素分类

作为机床的制造企业,着重关注的是由机床本身引起的加工精度问题。在机床上制造工件,由机床本身产生的偏差,可划分为系统误差和随机误差(见图1)。

其中定位精度、反向误差、重复精度属于机床的位置精度。



图1

对一切有定位功能的机床,特别是数控及加工中心机床来说,位置精度是一个重要的指标。

## 2. 数控机床直线进给轴运动误差分析

数控机床及加工中心,作为排除加工时人为具体干预为自动机床,它的加工精度是由形成工件轮廓表面的刀尖点相对于工件的运动轨迹实现的。在排除机床刚性等系统误差、负荷变换等随机误差因素后,机床空载的几何精度、位置精度状况是加工精度的基础。

机床刀具与工件间的相对运动轨迹是由机床各进给轴联合实现的,制造和检测机床本身的精度则是从各基础的进给轴开始的。构成加工中心的最基础的进给轴是直线进给轴,直线运动的误差体现在运动部件上的有代表性的一点(如刀尖点、工件中心点或工作台中心点等)的运动偏差,运动中的此代表点是个空间的矢量,它与理论位置的偏差可分解为6个分量,即沿空间X、Y、Z三维坐标方向的3个线性误差,以及绕3个坐标方向的3个倾斜角度误差。两种误差的形成机理不同,线性误差是运行中运动部件的平移偏差造成的,而倾斜误差是运动部件位置旋转(偏摆)造成的。线值误差用偏离理想位置的直线长度值衡量,倾斜误差则需按偏离原方向的绕坐标轴的转角值,用比值、微角或微弧衡量。

例如,机床检测点从A点沿X轴正方向运动距离n,在理想没有误差的情况下,应运动到位于X轴线上的B'点,然而由于误差的存在,实际运动点位于如图2所示的B点。

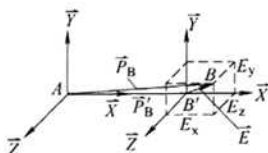


图2 从A点运动到B点

由此可得到

$$\vec{P}_B = \vec{P}'_B + \vec{E} = n\vec{X} + \vec{E}$$

式中  $\vec{X}$ ——X轴方向的单位矢量;

$\vec{E}$ ——与X轴运动方向有关的实际的位置误差或体积误差(包括1个线性定位误差 $E_X$ , 2个直线度误差 $E_Y$ 、 $E_Z$ , 3个转动、俯仰、偏转角位移误差)。

事实上, $\vec{E}$ 可以用更通用的式子表示如下

$$\vec{E} = E_X\vec{X} + E_Y\vec{Y} + E_Z\vec{Z}$$

式中  $\vec{X}$ 、 $\vec{Y}$ 、 $\vec{Z}$ ——沿各轴方向的单位矢量;

$E_X$ 、 $E_Y$ 、 $E_Z$ ——分别是沿着X方向运动时产生的误差 $\vec{E}$ 在X、Y、Z三个方向上的误差分量。

## 3. 数控机床直线进给轴运动误差的检测

在加工中心几何精度的检测项目中,各直线运动轴的直线度的检测项目,一般是采用了平尺和千分表,测试了运动点在垂直于该运动轴的两个坐标轴上的线性偏差,对应于图2中 $E_Y$ 、 $E_Z$ (对于较长的坐标也用准直仪)。

在加工中心几何精度的检测项目中,各直线运动轴的角度偏差的检测项目,一般采用精密水平仪(测试两个垂直面内的角度偏差),或光学角度测量仪(测试水

平面内的角度偏差),测试了运动点绕三个空间坐标的倾斜偏差。

对于数控机床而言,在数控系统的控制下,机床运动点沿运动坐标轴方向实际位移的偏差,构成了机床运动点的第6个误差分量,这个误差分量的检测项目即是机床的定位精度,这是数控机床有别于普通机床的一项重要精度,它与机床的几何精度中其他5个误差分量共同对机床切削精度产生重要影响,尤其在对孔系加工中的孔距误差具有决定性影响。

以上项目检测了构成机床运动点偏差的全部共6个误差分量。

在数控机床上,由于各进给坐标轴传动链上驱动装置刚性不足造成的误差,以及各机械传动副的间隙等误差的存在,将造成各坐标轴在不同的运行条件下定位的不确定性,以及在由正向运动转为反向运动时形成反向偏差,从而影响到机床定位精度这项误差分量的评判。故此,在数控机床精度的检测中,将机床沿运动轴方向的位置精度划分为定位精度、重复定位精度以及反向差值。

直线运动轴的重复定位精度及反向差值可以在规定位置用百分表或千分表进行检测,目前多采用双频激光干涉仪对包括定位精度在内的全部位置精度进行检测和分析处理,利用激光干涉测量原理,以激光实时波长为测量基准,提高了测试精度并增强了适用范围。

#### 4. 数控机床直线进给轴位置精度的补偿

在对数控机床位置精度进行准确检测的基础上,通常的数控系统还能对定位精度和反向差值进行补偿,从而进一步提高机床加工精度。

在数控系统的内存中设有若干个地址,存储各轴反向间隙值及各轴行程内的系列螺距误差值,随着机床运行位置的变化,各轴适时进行螺距误差的补偿,提高运动的定位精度;而当机床的某个轴被指令改变了运动方向时,数控装置会自动读取该轴的反向间隙值,对坐标位移指令进行补偿修正,使机床准确定位在指令位置上,消除或减少反向偏差对机床精度的不利影响。

对于FANUC Oi、FANUC 18i等数控系统,还有用于快速运动(G00)和低速切削进给运动(G01)的两种反向间隙补偿可供选用。根据进给方式的不同,数控系统自动选择使用不同的补偿值,兼顾了快速定位精度和切削时的插补精度,完成较高精度的加工。

#### 5. 整机运动精度的中间制造和装配环节精度保障

在机床制造和装配的中间过程中,对构成进给轴运动的基础部件(如导轨、丝杠)的精度控制是确保机床进给轴运动精度的基础。

以数控机床惯用的直线导轨为例,在机床零件加工制造完成后,检测了导轨安装面的直线度和两根导轨安装面间的平行度;在部件装配的过程控制中,检测了导轨安装后滑块运动的直线度和两根导轨间的平行度。

在允许的足够小的偏差情况下,直线导轨安装后能吸收一定的安装面误差;由两根直线导轨正确地设计和组装后的运动部件,还能够进一步将组装时产生的垂直度、平面度、平行度等误差平均化吸收,获得更高的运动精度。当然,在这种误差的吸收过程中,直线导轨滚动块的滚动阻力将有一定程度的增大,需要严格按照直线导轨制造商许可的安装误差进行控制。

#### 6. 提升机床加工精度的综合保障手段

提升机床的加工精度是个综合性的问题,在机床制造精度方面,对机床精度进行的检测项目设置是为了全面准确地测试机床加工的精度,各个项目检测了机床误差的不同方面,它们既是对同一台机床的检测,很多项目更是对机床同一个动作不同侧面的检测,因此各项目间具有有机的联系。机床整机的精度检测更是与零部件精度的检测直接相关。

以提升数控机床直线轴位置精度为例,虽然通过数控系统的补偿可以提升该直线轴的位置精度,但在进行激光测量和系统补偿前,必须确保机床几何精度的相当等级,被补偿轴还必须在确保重复定位精度达到相当等级的前提下进行螺距补偿。只有这样才能使位置精度的检测数据真实反映机床的运动精度。为了在数控机床精度检测标准中体现出这一原则,数控机床的检测技术条件需要对补偿前的最大反向间隙值、反向间隙的不一致性、最大螺距误差做明确限定(见表1)。

表1 数控机床补偿前最大反向间隙值、反向不一致性、最大螺距误差参考值 (单位:mm)

| 数控机床补偿前(全闭环时,不用光栅尺) |       |       |              |       |
|---------------------|-------|-------|--------------|-------|
| 机床类型                | 反向间隙  |       | 螺距误差最大允许值    |       |
|                     | 最大允许值 | 不均匀度  | 行程范围         | 允许值   |
| 加工中心                | 0.030 | 0.010 | ≤500         | 0.050 |
|                     |       |       | >500~1 250   | 0.07  |
|                     |       |       | >1 250~2 000 | 0.12  |
|                     |       |       | >2 000       | 0.24  |

机床进给轴驱动电动机负载电流的监控也是一个重要的手段。进给轴导轨直线度、平行度等几何精度的误差、传动丝杠平行度等安装精度误差,以及传动副的阻力状况等,将对进给轴驱动电动机的负载电流形成一个综合的影响。合理地监测和控制电动机负载电流值的大小,是对数控机床制造精度(见表2)的评价。

表2 数控机床补偿前驱动电动机  
允许空载电流参考值

| 数控机床补偿前驱动电动机空载电流允许值 |                                     |
|---------------------|-------------------------------------|
| 1                   | 水平轴线运动时的空载电流应小于驱动电动机额定电流的30%        |
| 2                   | 带有平衡装置的垂直轴线运动时的空载电流应小于驱动电动机额定电流的50% |
| 3                   | 不带平衡装置的垂直轴线运动时的空载电流应小于驱动电动机额定电流的60% |
| 4                   | 被测轴线为重向时的空载电流正反向差值应小于驱动电动机额定电流的30%  |
| 5                   | 全行程电流的变化率应不大于额定电流的10%               |

从导轨安装面的直线度、平行度,到直线导轨安装后滑块运行的直线度、相互间平行度,到运动部件的直线度,再到该轴线运动的位置精度,所有这些检测数据具有内在的因果关联,数控机床的制造过程中需要合理地确定各步骤的精度控制目标。

在数控机床实际制造过程中,除了对检测精度不超过允差的控制外,直线度、平行度、位置精度,包括驱动电动机负载电流值都可以在检测过程中绘制出对应于全行程各位置点的数值曲线,当其中一项精度指标不能达到规定范围时,可以通过多组精度曲线对照分析,运用排除、筛选、关联等分析策略,寻找到影响精度指标的主要原因。

## 7. 结语

从影响加工精度的机床制造精度的成因,可以看到构成机床精度检测的各项间的有机联系,只有对包括中间制造环节精度在内的各精度项目进行综合控制,才能确保机床最终的加工精度。同时,通过各精度项目间检测误差的关联性分析,还可以对影响机床精度指标的原因作深入的综合分析。MW

(收稿日期:20100812)

# 轴承锁道中心距的测量

江西飞龙钻头制造有限公司 (宜春 336000) 程华卫

牙轮钻头广泛应用于矿山开采,其使用寿命的长短与钻井成本有着密切的关系。我公司是全国最大石油钻头生产企业之一,其中牙轮体是矿用钻头的主要零件(见图1),其轴承锁道圆弧中心到牙轮体端面尺寸的加工精度是影响着钻头寿命重要数据之一,如何在加工中准确、快捷的对其检测,不仅对生产率的提高有着十分重要的作用,而且对钻头寿命的提高、钻井成本的降低,起着至关重要的作用。

通过研究与讨论,在实际应用中方案如下:我们将报废的深度尺进行改造(见图2),即在深度的左端铆上一钢球,其中心与深度尺的零位相重合,钢球的直径可以比轴承锁道的半径大些,在测量时,将改造后的深

度尺贴紧牙轮右端面,钢球卡在轴承的锁道圆弧上,这

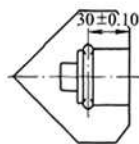


图1 牙轮体

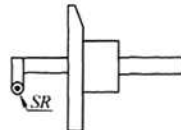


图2 深度尺

时钢球的中心线与轴承锁道的中心重合,轴承锁道的中心距可以非常直观在卡尺上读出。该量具在实际使用当中,对不同规格的牙轮体进行轴承锁道的中心距测量,都具有通用性,对操作工人的技术要求不高,非常实用可靠。MW

(收稿日期:20100802)