

高精度模具加工机的组态结构 最佳化设计与分析

艾格玛科技嘉兴墩丰机械工业有限公司 (浙江 314001) 王世明 廖宏伟

由于目前的机床其立柱大多为一字形,且在主轴头部重量不轻的情况下,由于惯性效益使得模具加工机的高速加工过程中,主轴往往在进行反向运动时,发生振动现象进而产生顿刀并在模具表面留下刀痕。虽然采用了搭配头部配重与链条/链轮组的设计,但也相对增加了机身所负荷的重量,且其配重与主轴头部之间的对准亦相当困难,在链条/链轮组不够精密的情况下,其改善效果亦不明显。

目前市场上机床的立柱均为方形设计,而机床业者大都是以改变肋型及肋厚的方式,希望能够提升机器结构静动态刚性与减轻机器重量,但改善结果亦有限,往往使得多数机床之第一模态共振频率仅能达到 50~60Hz 左右。若欲真正有效提升机器刚性,实有赖于创新的组态结构设计,故此研究中提出一 U 形之立柱结构,配合 C 形立柱设计,大幅提升机器动态刚性并具有轻量化结果,将有效提升机床的切削动态性能与精度。研究中亦对支撑架做一最佳组态设计的分析,以减轻支撑架的重量且保持原有的动态刚性。

一直以来国内外许多研究学者都致力于机器结构刚性优化的设计研究,其主要目的即希望透过分析来改善机械结构的静动态刚性,以提升加工时的动态精度。机床结构设计的传统作法是根据经验进行的,为了获得较高的动态性能,通常简化其结构造型到相当粗略的程度,或是只分析其静动态作为动态刚性的推论。近年来,由于有限元素分析方法迅速发展,计算机技术的长期的进步,以及辅以成熟的动态实验设备及分析技术,使得机床在加工过程中由于动态作用力造成的问题,可以在设计阶段行进分析及最佳化规划,预先获得预定动态性能的机台结构。20 世纪 70 年代至 80 年代有相当多的研究,建立了有限元素法分析结构动态特性的基础。

研究中首先针对艾格玛原始设计蓝图建立其有限

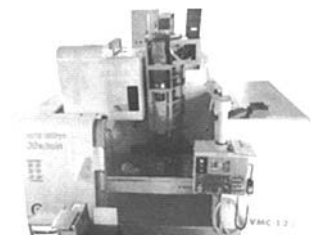
元素分析模型,并以 ANSYS 软件进行模态分析与动柔度分析,另外再依据分析结果进行结构优化设计,以使其第一模态频率与其相对应的动柔度值达到所设定的要求,并利用 ANSYS 工程分析软件进行模态分析与动柔度分析以期达到较高的第一模态频率与良好的动态刚性。此外,目前业界的机床机身均为方形的结构体,而本研究中提出一 U 形的机身结构配合 C 形立柱结构的新型设计,将可更加提高其模态频率且改善动态刚性,有效提升机床的加工性能与精度。另外,也将透过调校控制器参数,以了解其参数特性并提高机器性能,使其与所设计的结构最佳化机型相辅相成。

1. 结构分析

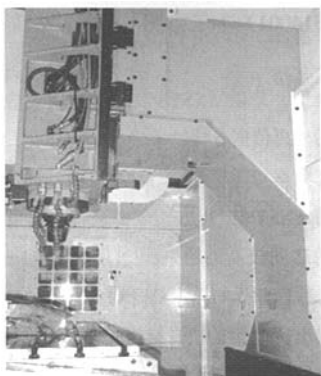
图 1 为艾格玛的原始设计实机图,研究中首先将结构实体模型网格化,以建立网格化的有限元素模型(图 2),并采用 ANSYS 工程分析软件为应用工具。依序建立分析实体模型,选用元素及定义材料特性,定义网格化的元素大小,规划元素节点位置。同时针对结构中较易产生较大应力的部分建立较密的网格,再进行模态与动柔度分析。

2. 结构优化

结构优化的重点在于轻量化的同时,也提高其静动态刚性。为避免机床因切削力等外力激振产生振动而影响加工精度,因此需利用结构设计提高模态共振频率及动态刚性,动态刚性主要针对动柔度分析,设计的标准值为 $3 \times 10^{-7} \text{ m/N}$,动柔度值愈小代表其当受力时所产生的变形量愈小。根据分析,原始结构其第一模态振动频率仅达 55Hz,且动柔度值为 $7 \times 10^{-7} \text{ m/N}$,研究中希望能提高其共振频率达到 100Hz 左右及低于标准值的动柔度值。根据实际机床条件,材料采用铸铁,密度为 7280 kg/m^3 ,弹性系数为 172GPa,浦松氏比为 0.28。以



(a) 整机图



(b) 立柱及主轴部分图

图1 C形立柱式机床实机图

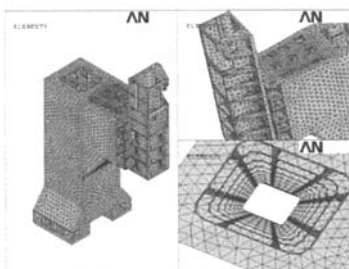


图2 原始设计机型之网格化模型图

下为原始机型与改良机型的设计分析。

(1) 原始机型——O1型与H1型 图3(O1型)为将传统一字形设计改为C形立柱式设计的原始机型,由于其设计所分析的结果显示模态频率及动柔度分析均不

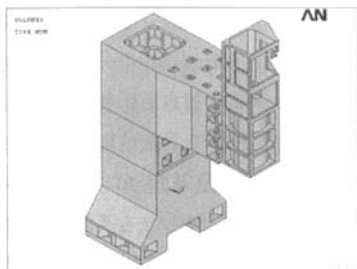


图3 O1型设计之有限元素分析模型

具有理想的结果,故又在O1型设计上加上支撑架的补强结构而为H1型。

图4为H1型设计的C形立柱式机身与主轴头部组态图,左半图显示支撑架的补强结构设计,右下图显示立柱的肋型结构设计,右上图显示出减轻主轴头部重量的轻量化结构设计。图5为其前六个模态的振型图。

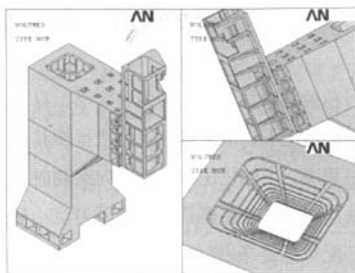


图4 H1型设计的有限元素分析模型

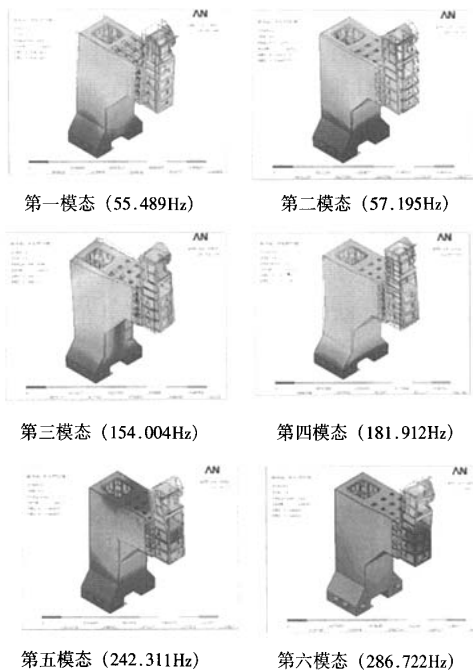


图5 H1型设计的前六模态振型图

动柔度分析上是使主轴头部分别在上、中、下三个位置时,在其主轴头部底部分别施以仿真之X方向切削力215N及Z方向切削力430N,来观察施力点前两模态的动柔度值,其施力示意图如图6所示,为使机床有足够刚性,动柔度设计的标准值为 $3 \times 10^{-7} \text{m/N}$,在此均列出为主轴头部在最上方位置时的动柔度图,图7为

H1 型设计的模态—动柔度图, 由图中可知只有 Z 方向动柔度值 (6.83×10^{-7} 、 6.48×10^{-7} m/N) 大于标准值 3×10^{-7} m/N, 其代表承受切削力时机台易于 Z 方向产生大的挠度变形误差。

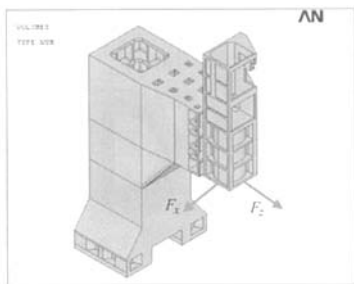


图6 动刚度分析施力示意图

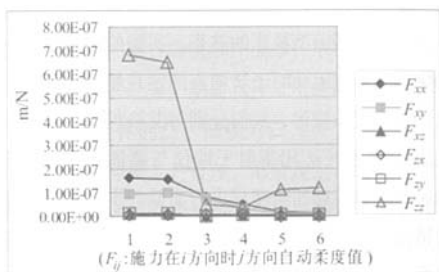


图7 H1 型设计的模态—动柔度图

(2) 创新机型——H15 型 由于所设计的原始机型 (H1 型) 其过低的第一模态频率 (55.489Hz) 极易引发机床共振, 图 8 所示为一改良机型 (H15 型), 其与 H1 型的不同点在于机身部分, H15 型的机身下半部不再是整个挖空的结构, 而是含有数层的水平与垂直隔板的结构, 右上图为将机身下半部结构 1/4 删除 (透视图), 以为了能更清楚了解内部结构, 右下图为其上视图, 且在机身的两侧加上支撑块以减轻机身的变形。此结构设计经由 ANSYS 软件分析后, 将其前六个模态振型及频率列出如图 9 所示, 由图可知第一模态频率明显的提高

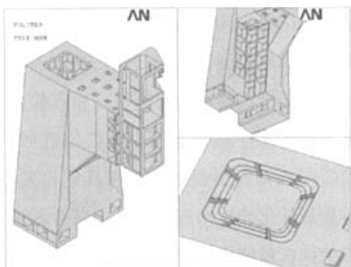


图8 H15 型设计之机身与主轴头部结构图

至 83.356Hz, 而图 10 为 H15 型设计的模态—动柔度图, 其动柔度值相较于 H1 型机台而言则略为降低。

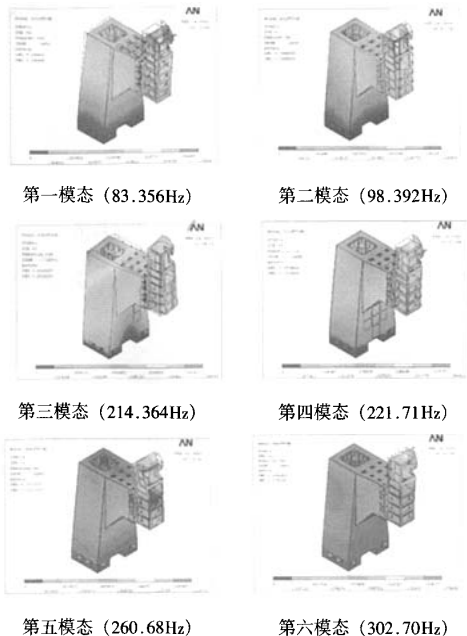


图9 H15 型设计的前六模态频率与振型图

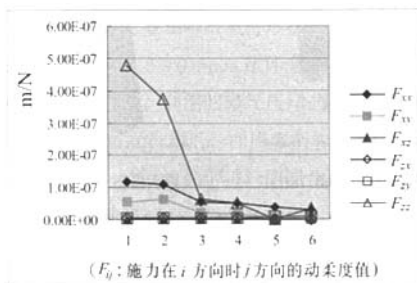


图10 H15 型设计的模态—动柔度图

(3) 改良机型——C03 型 此设计有一重大改变, 即是将一般传统式机床机身所采用的方形设计改为 U 形之设计, 其机身及主轴之结构图如图 11 所示, 此设计可有效地将第一模态的振频提高至 95Hz 以上, 而其前六个模态频率与振型图如图 12 所示, 而图 13 为 C03 型设计的模态—动柔度图, 图中可看出动柔度最大值约为 2.5×10^{-7} m/N 小于标准值 3×10^{-7} m/N, 足见此设计在模态频率及动柔度方面均有良好的改进。

(4) 创新机型——C04 型 此设计将一般传统式机床机身所采用的方形设计改为类似半圆弧的设计, 与 C03 型设计不同之处在于 C03 型设计从其上视图看来是

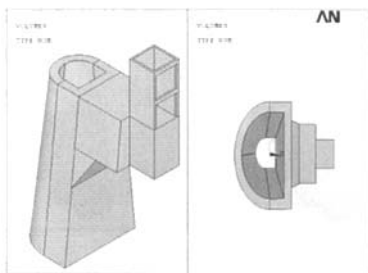


图 11 C03 型设计的机身与主轴头部结构图

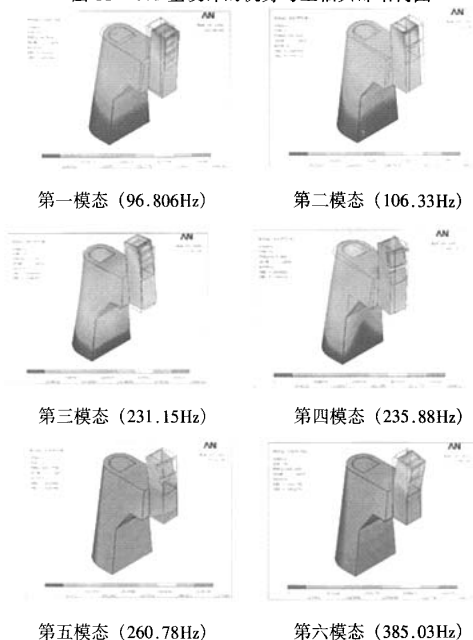


图 12 C03 型设计的模态频率与振型图

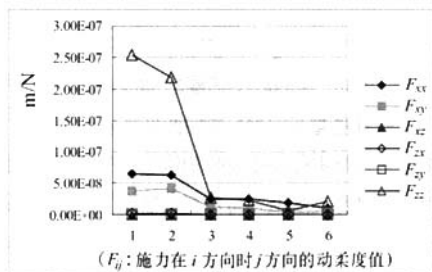


图 13 C03 型设计之模态一动柔度图

一半圆形与一“ $\cap$ ”形的组合,而 C04 型将“ $\cap$ ”形的两边改为圆弧式设计,其结构图如图 14 所示,此设计可将第一模态的振频提高至 97Hz,而其动柔度值同样的均小于标准值 $3 \times 10^{-7} \text{ m/N}$,足见此设计在模态频率及动柔度方面亦有良好的改进。同样地,分别改变三角支

撑架的垂直位置、水平位置及机身厚度,发现其改变设计结果的变化趋势与 C03 型的结果相差不大,但 C03 型设计的重量都相对的较轻,所以设计时应以 C03 型为较合适的设计。

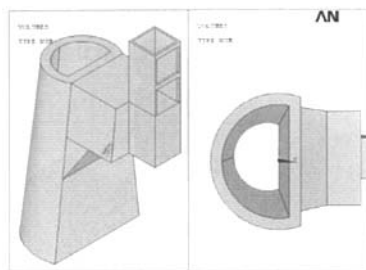


图 14 C04 型设计的机身与主轴头部结构

3. 实验验证

为了比较新旧型机床的差别,实验的部分主要针对 Z 轴快速正反向运动时于转向点的定位精度、速度误差与振动加速度作探讨,我们分别对艾格玛传统机床与新型机床(H1 型)运用雷射干涉仪与频谱分析仪配合运动加速度规与振动加速度规进行实验,实验结果着重在定位精度、瞬时响应特性及振动值作讨论,以验证所设计 C 形立柱式机床具有较优良的机器性能。

4. 结果与讨论

目前业界中的 CNC 机床普遍为一字形机身结构,此结构使得主轴头部体积过大且过重,极易造成于 Z 轴方向高速进给反向时产生顿刀的情形,甚而影响工件的表面精度与轮廓精度,而本研究提出一新型机床组态——C 形立柱式机床,由于其 C 形立柱式的设计,可降低主轴头部体积与重量,也省去了传统机床所需的配重设计,也有更佳的高速运动特性。透过结构优化设计,本研究提出了 U 形立柱的设计,其可大幅有效的将机床第一模态频率由 55.489Hz 提升至 95Hz 以上,且结构各方向动柔度值均得到改善。

经由实验的结果,新型机床在定位精度、瞬时响应特性及振动量方面均得到良好的改善,这也验证了所设计的新型机床可提升机器的动态刚性。而在控制器参数部分已实际掌握了多个参数的特性,如位置回路增益、速度回路增益与前馈控制参数等。在其它相关研究中,也对控制参数最佳化的技术进行探讨,结合了组态结构最佳化与参数调校最佳化技术,将可使机器的高速加工特性进一步的提升。❄️ (收稿日期:20060520)