基于有限元分析的卧式加工中心立柱优化设计

沈阳机床股份有限公司 陈冉 毕岩

基于 SolidWorks Simulation 有限元分析，通过对 HMC80e 产品的立柱进行静、动态特性分析，根据立柱的最大变形量和一阶固有频率为基础，找出立柱的薄弱部分进行优化设计，并对比分析，在保证立柱刚度及固有频率的基础上显著地减小了立柱的质量，提高机床性能，降低系统成本。

一、引言

HMC80e 卧式加工中心采用双交换工作台，既可加工较大零件，又可分度回转加工。适用于多工作面零件多工序加工，还特别适合于箱体孔的调头镗孔加工，广泛应用于汽车、内燃机、航空航天、家电和通用机械等行业。

二、立柱静、动态特性分析

图 1 为 HMC80e 整机结构布局，其主要铸件为床身、立柱和主轴箱。主轴箱和立柱通过直线导轨连接，由丝杠驱动沿立柱上下移动，作为主轴箱的主要支撑部件和承载部件，立柱的静动态性能将会影响到刀具，进而影响到加工中心的加工精度和机床的稳定性。

若立柱重量过大，其自身惯性会直接降低机床的响应速度，加速时间以及快移速度都会受到影响。因此，在保证其静动态性能的前提下对立柱进行减重，可提高机床的响应速度以及运行速度，亦可降低机床的生产成本。

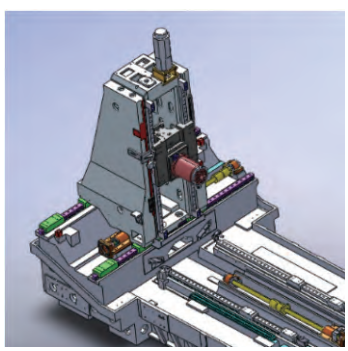

图 1 HMC80e 整机结构布局

该立柱的简化实体模型如图 2 所示，材料选择 HT300 灰铸铁。其强度高、耐磨性好。立柱高度为 2200mm，宽度为 870mm，顶部厚度为 115mm，底板厚度为 80mm，外壁板厚度为 30mm，内部筋板厚度为 20mm，总重量为 2.1t。内部结构如图 3 所示。

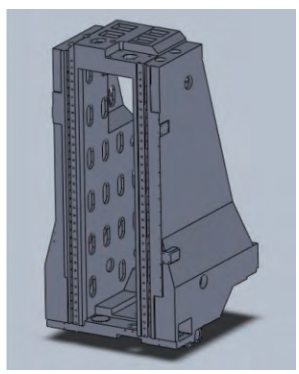

图 2 立柱结构图

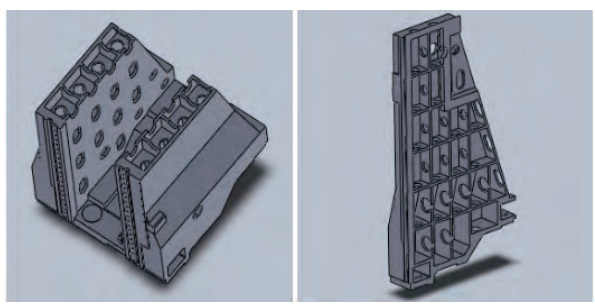

图 3 立柱结构图

1. 立柱静态结构分析

图 4 为当主轴箱在行程中点时，立柱和主轴箱组合简化

投稿邮箱 | cadcam@idnovo.com.cn IMCHINA@idnovo.com.cn

模型，对此模型进行静态分析。主轴端部分别沿坐标轴X、Y和Z向施加 10000N 的力，在立柱的底部施加固定约束，运用 SolidWorks Simulation 软件分析立柱在切削力作用下的应力和位移（图 5、图 6）。

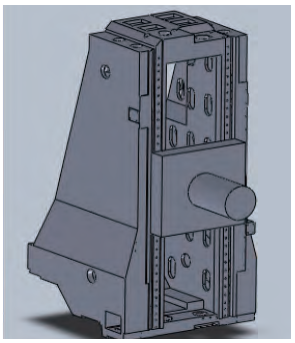

图 4 立柱主轴箱简化模型

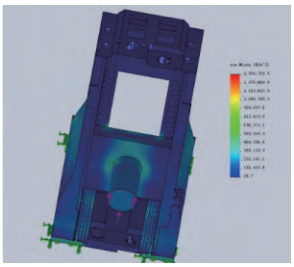

图 5 立柱应力图

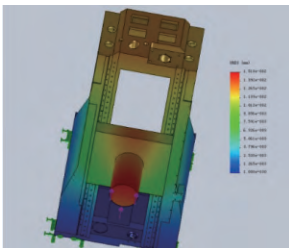

图 6 立柱变形图

表 1 应力计算结果

名称	最大	位置
应力	1.39272e+006N/m²	(280mm,1943.5 mm,1111 mm)
位移	0.0151825mm	(−18.6302mm,1001.39mm,−552.986mm)

表 1 为分析结果，从计算结果可以看出，立柱的最大应力 1.392MPa ＜ 250MPa（材料的屈服极限），可见立柱刚性足够。而且立柱的最大变形量为 15 μm，变形较小。

2. 立柱线性动态结构分析

当机床高速加工工件时，若工作频率达到系统的固有频率，则会引发共振，严重磨损刀具，影响机床的加工精度，并影响机床寿命。固有频率主要由本身结构所决定。立柱作为关键部件，有必要对其进行有限元分析，若其固有频率与机床的工作频率区间重合，则需要整改优化，使固有频率避开机床的工作频率，进而提高系统的性能和稳定性。用动态分析可以确定该立柱的固有频率和振型。利用 Simulation 对立柱进行动分析，立柱的底部施加固定约束，不施加载荷，得到其前四阶振型图，如图 7～10 所示。

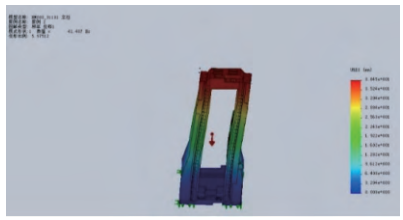

图 7 一阶振型图

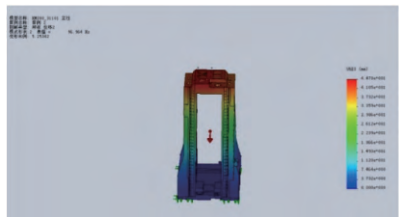

图 8 二阶振型图

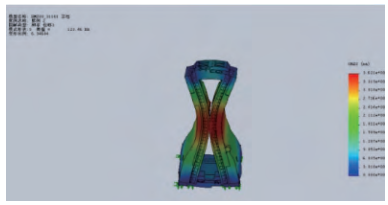

图 9 三阶振型图

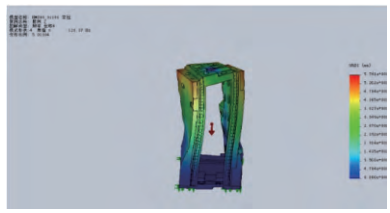

图 10 四阶振型图

表 2 四阶频率表

频率数	赫兹	秒
1	41.407	0.02415
2	96.964	0.010313
3	123.46	0.0080996
4	128.37	0.0077897

从分析结果可以看出，立柱的一阶固有频率为 41.4Hz，在机床的工作频率范围内（约 0.2Hz～50Hz）。因此在实际工作过程中，当主轴转速到达一定速度，容易引起加工过程中的共振，严重影响加工精度。因此，在优化中应尽量提高

其一阶固有频率，以避开机床工作频率范围，避免共振。

三、立柱优化设计

根据以上有限元分析的结果，立柱各项都远小于材料的极限值，原有结构设计过于保守，使其质量过大，因此现对其进行优化设计。由静力分析可知立柱的变形主要集中在立柱上端的中部，由一阶振型分析可知立柱刚度最薄弱的位置为两侧的中上部。因此我们在两个薄弱部位增加筋板的数量，其它部分则可适量减少外壁厚或内部筋板厚度，并且不改变立柱的整体尺寸，不会影响立柱与其它零件的装配关系。

优化尺寸如表 3 所示，优化后立柱模型如图 11 所示。立柱高度为 2200mm，宽度为 830mm，顶部厚度为 115mm，底板厚度为 80mm，外壁板厚度为 25mm，内部筋板厚度为 15mm。机床立柱的材料为 HT300，总重量为 1.8t，内部筋板和出砂孔结构如图 12 所示。

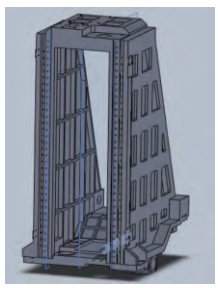

图 11 优化后立柱模型

表 3 优化尺寸

名称	初始值	改动范围
壁厚	30mm	(20—25) mm
筋板厚	25mm	(15—20) mm
除砂孔长	ϕ50	70mm
除砂孔宽		40mm
顶部筋格数	4 个	5 个

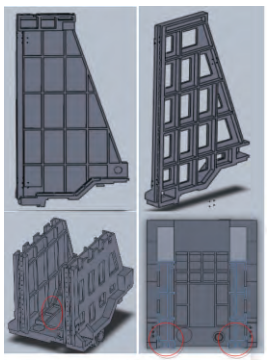

图 12 新立柱内部筋板及除砂孔

首先，从铸造工艺方面考虑，新立柱结构除砂孔增大，更利于铸件排沙，同时也有效减轻了立柱的重量。其次，考虑到立柱是移动部件，原始立柱方案中立柱重量太大，不利于机床传动，图示新方案不但减轻了重量，还将筋板直接布置在直线导轨后面，增加了对直线导轨的支撑，进而增加了整体强度。立柱的底板由原来的实心筋板改为图 12 所示的带筋格的筋板，整体尺寸没变，在没改变立柱整体刚性的情况下，有效减轻了立柱的重量。

按照之前的方法以及条件对新立柱模型进行静、动态特性分析。过程不再赘述，得到以下数据，如表 4、5 所示。

表 4 应力计算结果

名称	最大	位置
应力	6.61813e+006 N/m^2	(−280mm,1943.5mm,983.5mm)
位移	0.020445mm	(18.6303mm,1001.39mm, −552.982mm)

表 5 四阶频率表

频率数	赫兹	秒
1	55.992	0.043494
2	98.256	0.012011
3	135.214	0.011209
4	143.06	0.010982

立柱的最大应力 6.618MPa ＜ 250MPa，远小于屈服极限。立柱的最大变形量为 20μm，并且发生在立柱的顶部。而且机床实际工作过程中，所受到的切削载荷明显小于实验载荷。所以立柱的变形量在许可范围之内。优化后立柱的 1 阶与 2 阶的低阶固有频率得到了一定的提高，并且 1 阶固有频率值为 55.992Hz 已经高于最大工作频率，由表 3 可以看出，优化后立柱的质量减少了 200kg，约为总质量的 9.5%。在保证立柱刚度的情况下，提升了一阶固有频率，并降低了立柱的质量。

四、结语

本文以卧式加工中心 HMC80e 产品立柱作为研究对象，利用 SolidWorks Simulation 有限元分析，对立柱进行了静力分析和模态分析，找出了立柱的薄弱环节，进行改进优化。并对结果进行有限元分析，取得了较好的效果。

投稿邮箱 | cadcam@idnovo.com.cn IMCHINA@idnovo.com.cn