

基于有限元的立式加工中心床身性能分析

胡勔,魏宏波

(宝鸡文理学院 机械工程学院,陕西 宝鸡 721016)

摘要:以 VMC850B 立式加工中心床身为研究对象,以最大变形量为目标,对 4 种典型工况进行分析与比较,以刀具位于工件右侧的工况作为首要考虑条件,对床身进行了静动态特性分析。选用 8 种常见材料,运用层次分析法对床身铸造材料进行优化分析。优化前后床身的静动态性能结果表明:在保持床身原有结构及设计前提下,玄武岩纤维树脂混凝土材料整体静动态性能最优,可直接运用于现有结构中,满足机床静动态性能要求,可为其他研究提供理论基础。

关键词:有限元;典型工况;玄武岩纤维树脂混凝土;加工中心;床身;静动态特性

中图分类号:TG659 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2020)02-0038-04

Performance Analysis of Vertical Machining Center Bed Based on Finite Element Method

HU Xu, WEI Hongbo

(College of Mechanical Engineering, Bao Ji University of Arts and Sciences, Baoji 721016, China)

Abstract: The VMC850B vertical machining center bed is taken as research object, and the maximum deformation is taken as the goal. Four typical working conditions are analyzed and compared. When the tool is located on the right side of the workpiece, which is taken as the primary consideration, the static performance of the bed is analyzed. 8 kinds of common materials are selected and the optimization analysis of the casting materials of the machine bed is carried out by using the analytic hierarchy process. The results show that in the original structure and design of the bed, the static and dynamic performance of the basalt fiber reinforced polymer concrete material is the best. It can be directly used in the existing structure, it meets the static and dynamic performance requirements of the machine tool. The theoretical basis is provided for other research.

Keywords: finite element; typical working condition; basalt fiber reinforced polymer concrete; machining center; bed; static and dynamic characteristics

0 引言

机床作为高速切削的机器,刀具在高速切削中所产生的振动会降低机床的可靠性和精度,因此有必要在典型工况下对机床进行静动态分析。铣削是工件加工的常用环节,在加工过程中,工件和刀具的位置不同导致切削力的方向不一,从而会对结构静动态分析结果产生较大影响。本文以铣削为例,探讨不同工况对床身变形的影响。

机床性能的提高目前有优化机床结构和采用新型材料两种方式。采用新型材料制造机床是近年来一个热点,包括采用碳纤维、碳纤维、玻璃纤维、钼纤维混凝土来制造机床基础件^[1-4],其中玄武岩纤维树脂混凝土(BFPC)经济效益好、产能高、材料性能好,因此成为了研究热点材料^[5-6]。优化机床结构主要以筋板优化和整体结构拓扑优化为研究热点,以 VMC850B 立式加工中心床身为研究对象,结合典型工况,运用层次分析法对比各种

材料的优劣。

1 床身的典型工况分析

VMC850B 立式加工中心工作范围广泛,其切削的多样性决定了工况的多样性。根据“极限工况原则”、“危险工况原则”和“典型切削位置加权原则”^[7],确定床身典型工况如下:将机床处于铣削条件下,取最大主轴转速、满刀状态、最大刀具直径,同时选取刀具在工件的前、后、左、右 4 种方向为加工方式,总计 4 种工况进行分析。

VMC850B 加工中心床身在刀具满刀状态下,受到立柱、刀具库、主轴箱的自重压力,作用面位于立柱和床身的结合处。受到工作台、工件最大质量、滑台的自重压力以及切削力的作用,作用面位于导轨的安装面(假定压力均匀分布),设定床身的 8 个地脚螺栓为固定约束。其零部件质量如表 1 所示。

基金项目:陕西省教育厅基金资助项目(16JK1051);宝鸡文理学院研究生创新科研项目(YJSCX18YB35)

第一作者简介:胡勔(1996—),男,安徽宣城人,硕士研究生,研究方向为机床基础件有限元分析及优化。

表1 机床基础零部件质量表

名称	质量/kg
立柱	1 155
工作台组件	900
工作台最大承重量	600
刀库	192
主轴组件	80

由表1可以计算立柱和床身的结合面受到的压力 $G_1 = 13984.6 \text{ N}$, 总面积 $S_1 = 0.14873 \text{ m}^2$ 。

分析过程中,假设压力面为均匀分布,则

$$P_1 = \frac{G_1}{S_1} = 94\,026.8 \text{ Pa} \quad (1)$$

P_1 为两个结合面均布压力,方向竖直向下。

现选取硬质合金端铣刀,加工材料为碳钢,切削力经验公式^[8]为

$$F_c = 7\,753 a_p f_z^{0.75} a_e^{1.1} z d_o^{-1.3} n^{-0.2} K_{Fc} \quad (2)$$

机床为圆盘刀库,满刀状态最大刀具直径 $d_o = 112 \text{ mm}$,最大转速 $n = 8000 \text{ r/min}$,切削深度 $a_p = 2.5 \text{ mm}$,切削宽度 $a_e = 90 \text{ mm}$,齿数 $z = 16$,主偏角选为 60° ,切削系数 $K_{Fc} = 1.0$,进给速度 $f_z = 0.2 \text{ mm/z}$ 。

选取加工状态为顺铣。因为逆铣时切削分力使工件离开机床工作台面方向,往往同夹紧力方向相反,使工件处于不稳定状态,所以这种逆铣方法较少使用^[9]。由经验公式推导出切削力 $F_c = 4703 \text{ N}$,考虑到铣刀磨损后,其切削力会增大 $30\% \sim 40\%$,则总切削力 $F_{cm} = 1.4F_c = 6584 \text{ N}$,端铣刀在端面上的切削力可以分解为轴向力 F_a 、进给力 F_{af} 、垂直进给力 F_{av} ,各分力取最大值。可得:

$$F_a = 0.55F_c = 3\,621 \text{ N} \quad (3)$$

$$F_{af} = 0.4F_c = 2\,634 \text{ N} \quad (4)$$

$$F_{av} = 0.85F_c = 5\,596 \text{ N} \quad (5)$$

考虑到工作台及其承重量,则床身垂直方向受力:

$$F_{aa} = 18\,621 \text{ N} \quad (6)$$

F_{aa} 方向为沿着机床坐标系 z 轴负方向,垂直向下。此外,床身还受到铣削进给力 F_{af} 和垂直进给力 F_{av} ,方向分别为沿着进给方向和垂直于进给方向。刀具不同位置下的受力二维图如图1所示。由于轴向力方向一致,在图1故未标注。刀具位于工件右侧工况三维图如图2所示。

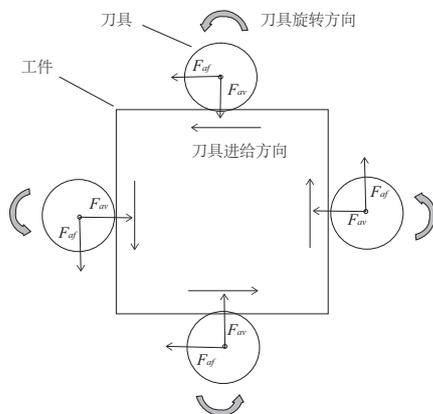


图1 刀具不同位置的受力分析图

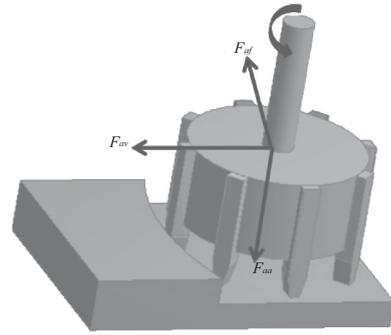


图2 刀具位于工件右侧的工况三维图

通过仿真计算,不同工况最大变形量如表2所示。当刀具位于工件右侧时,其变形量最大为 $7.309\,0 \times 10^{-6} \text{ m}$,增长百分比最大为 $+20.0\%$ 。得出:在以经验公式为切削条件时,应把刀具位于工件右侧时为首要考虑条件。

表2 不同工况最大变形量表

工况位置	最大变形量 $\times 10^{-6} / \text{m}$	百分比 / %
刀具位于工件前方	6.091 1	0
刀具位于工件左侧	7.206 0	+18.3
刀具位于工件后方	6.354 7	+4.3
刀具位于工件右侧	7.309 0	+20.0

2 床身结构的有限元分析

2.1 床身的静力学分析

床身质量 1497 kg ,由 HT300 材料铸造而成,其弹性模量为 $1.3 \times 10^5 \text{ MPa}$,泊松比 0.24 ,密度为 $\rho = 7.3 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。选择刀具位于工件右侧工况进行分析,铣削分力 F_{af} 和 F_{av} ,方向分别为沿着图3所示 x 轴负方向和 z 轴的负方向, F_{aa} 轴向力沿着 y 轴负方向垂直向下。加载面为床身导轨结合面,设定压力均匀分布,得到床身应变云图如图3所示。

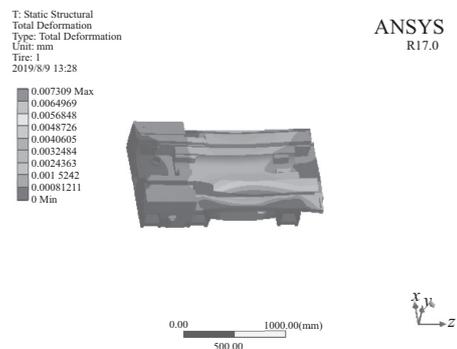


图3 床身应变云图

由图3可知,床身的最大变形量为 $7.309 \times 10^{-6} \text{ m}$,最

大变形处在导轨一侧处。

2.2 床身的模态分析

床身是一个连续的实体,质量和弹性均呈现为连续分布,因此床身拥有无穷阶模态。但是结构的动态性能主要取决于其低阶模态。所以在实际工程应用中可以取前3阶模态作为主要参考指标^[10],床身模态分析如表3所示,各坐标轴方向如图3所示。

表3 床身模态分析结果表

阶数	频率/Hz	振型描述	最大变形量/mm
1	438.49	床身左右绕z轴扭曲振动	1.888 8
2	479.64	床身上下绕x轴振动	3.002 2
3	513.35	床身导轨前端绕x轴振动	4.662 0

通过表3及分析云图放大比例后可知,床身的导轨安装面变形较大,呈现绕z轴扭曲振动和绕x轴翻转振动。

3 床身材料性能分析

3.1 材料参数分析

在床身结构形状及尺寸不变的情况下,为进一步提高其静动态特性,对床身的材料进行优化分析。在床身铸造常见材料中,选取了3类,共8种材料作为参考。表4中材料参数参阅GB/T9439-199B及文献[11]所得。

表4 各材料物理参数表

编号	材料	杨氏模量 $\times 10^{11}/\text{Pa}$	密度/ (kg/m^3)	泊松比
A	HT300	1.3	7 300	0.25
B	结构钢	2.0	7 850	0.3
C	HT100	1.08	7 100	0.22
D	HT150	1.16	7 000	0.22
E	HT200	1.48	7 200	0.31
F	HT250	1.38	7 280	0.22
G	HT350	1.45	7 300	0.27
H	BFPC	0.46	2 450	0.25

因为低阶模态特性基本决定了结构的动态性能,所以模态分析取前3阶模态频率的加权平均值, f 为加权模态, f_i 为*i*阶模态^[12]。

$$f = 0.7 \times f_1 + 0.2 \times f_2 + 0.1 \times f_3 \quad (7)$$

将表4参数导入仿真软件,得出8种材料对床身的总变形、质量、加权固有频率如表5所示。

表5 材料对床身影响详细参数

编号	材料	总变形/ μm	质量/kg	频率/Hz
A	HT300	7.039	1 477.40	454.258
B	结构钢	4.761	1 588.70	540.355
C	HT100	8.775	1 436.90	421.400
D	HT150	8.170	1 416.70	439.842
E	HT200	6.434	1 457.10	484.875
F	HT250	6.867	1 473.30	470.420
G	HT350	6.561	1 477.40	478.639
H	BFPC	20.656	495.83	466.430

3.2 选择最优材料

床身材料选择的目的是在许用变形量的范围内,尽可能地减少质量,提高静动态特性,所以各指标的优化目标如表6所示。

表6 优化目标

优化目标名称	目标要求
床身质量	越小
床身最大变形量	许用范围内
前3阶加权固有频率	越大

多个优化需通过一定的方法确定最终的一两个方案作为结果。这种方法一定是直观、高效的。进行优化就需要相应的优化指标。优化过程中通常具有多个评判要素,本文采用一种基于层次分析法的数学优化方法,通过判定矩阵值的大小来确定材料的优劣性,数值越大材料越优^[13]。从表5可以得知,结构钢在加权频率上最高,BFPC材料变形量最大但质量最低。在实际运用中,往往某种材料不能同时兼具各项指标,因此本文运用层次分析法对8种材料按照表6的优化目标选取最优解。层次模型有3层,分别为:总目标层、准则层、方案层。总目标层为:在许用变形量的范围内,减少床身质量,提高加权固有频率。准则层:床身质量、床身最大变形量、加权固有频率。

在满足床身强度的前提下,床身质量越小越好。也就是床身质量的倒数越大越好。给出A、B、C、D、E、F、G、H 8种材料的质量倒数矩阵如式(8)所示。

分别比较8种材料的质量倒数。即以A质量为除数,其他为被除数。即A的质量倒数除以A的质量倒数为第1行第1列数据,A的质量倒数除以B的质量倒数为第1行第2列数据,以此类推,得到矩阵式(9):

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{1\ 477.4} & \frac{1}{1\ 588.7} & \frac{1}{1\ 436.9} & \frac{1}{1\ 416.7} & \frac{1}{1\ 457.1} & \frac{1}{1\ 473.3} & \frac{1}{1\ 477.4} & \frac{1}{495.83} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} 1.000\ 0 & 1.075\ 3 & 0.972\ 6 & 0.958\ 9 & 0.986\ 3 & 0.997\ 2 & 1.000\ 0 & 0.335\ 6 \\ 0.929\ 9 & 1.000\ 0 & 0.904\ 5 & 0.891\ 7 & 0.917\ 2 & 0.927\ 4 & 0.929\ 9 & 0.312\ 1 \\ 1.028\ 2 & 1.105\ 6 & 1.000\ 0 & 0.985\ 9 & 1.014\ 1 & 1.025\ 3 & 1.028\ 2 & 0.345\ 1 \\ 1.042\ 8 & 1.121\ 4 & 1.014\ 3 & 1.000\ 0 & 1.028\ 5 & 1.040\ 0 & 1.042\ 8 & 0.350\ 0 \\ 1.013\ 9 & 1.090\ 3 & 0.986\ 1 & 0.972\ 3 & 1.000\ 0 & 1.011\ 1 & 1.013\ 9 & 0.340\ 3 \\ 1.002\ 8 & 1.078\ 3 & 0.975\ 3 & 0.961\ 6 & 0.989\ 0 & 1.000\ 0 & 1.002\ 8 & 0.336\ 5 \\ 1.000\ 0 & 1.075\ 3 & 0.972\ 6 & 0.958\ 9 & 0.986\ 3 & 0.997\ 2 & 1.000\ 0 & 0.335\ 6 \\ 2.979\ 7 & 3.204\ 1 & 2.898\ 0 & 2.857\ 2 & 2.938\ 7 & 2.971\ 4 & 2.979\ 7 & 1.000\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

分别求式(9)各列的和,得到矩阵式(10):

$$[9.997\ 3 \quad 10.750\ 5 \quad 9.723\ 3 \quad 9.586\ 6 \quad 9.860\ 0 \quad 9.969\ 6 \quad 9.997\ 3 \quad 3.355\ 2] \quad (10)$$

将矩阵式(9)第1行各列的数据分别除以矩阵式(10)对应列的数据,所得结果求代数平均和,依次对矩阵

$$[0.100\ 0 \quad 0.093\ 0 \quad 0.102\ 8 \quad 0.104\ 3 \quad 0.101\ 4 \quad 0.100\ 3 \quad 0.100\ 0 \quad 0.298\ 0] \quad (11)$$

矩阵式(11)则是床身质量的优先级矩阵。以此类推,最大总变形量优先级矩阵如式(12)所示,加权固有频率

$$[0.130\ 3 \quad 0.192\ 6 \quad 0.104\ 5 \quad 0.112\ 3 \quad 0.142\ 5 \quad 0.133\ 6 \quad 0.139\ 8 \quad 0.044\ 4] \quad (12)$$

$$[0.120\ 9 \quad 0.143\ 9 \quad 0.112\ 2 \quad 0.117\ 1 \quad 0.129\ 1 \quad 0.125\ 2 \quad 0.127\ 4 \quad 0.124\ 2] \quad (13)$$

分别将质量、最大总变形、加权固有频率权重比例设置为1:1:1。分别将对应的优先级矩阵乘以对应的权重比例,得到最终的优先级矩阵式(14)。

$$\begin{aligned} [A\ B\ C\ D\ E\ F\ G\ H] &= [0.100\ 0 \quad 0.093\ 0 \quad 0.102\ 8 \quad 0.104\ 3 \quad 0.101\ 4 \quad 0.100\ 3 \quad 0.100\ 0 \quad 0.298\ 0] \times \frac{1}{3} + \\ & [0.130\ 3 \quad 0.192\ 6 \quad 0.104\ 5 \quad 0.112\ 3 \quad 0.142\ 5 \quad 0.133\ 6 \quad 0.139\ 8 \quad 0.044\ 4] \times \frac{1}{3} + \\ & [0.120\ 9 \quad 0.143\ 9 \quad 0.112\ 2 \quad 0.117\ 1 \quad 0.129\ 1 \quad 0.125\ 2 \quad 0.127\ 4 \quad 0.124\ 2] \times \frac{1}{3} = \\ & [0.117\ 1 \quad 0.143\ 2 \quad 0.106\ 5 \quad 0.111\ 2 \quad 0.124\ 4 \quad 0.119\ 7 \quad 0.122\ 4 \quad 0.155\ 5] \end{aligned} \quad (14)$$

鉴于以上结果,可从式(14)判断出0.1555数值为最大,即采用BFPC材料对于床身的整体静动态效果的提升最好。将BFPC材料导入模型中,重新仿真,将结果与原模型材料HT300仿真结果进行比较,如表7所示。其床身质量减少了-66.4%,前3阶加权固有频率提高了+2.7%,最大变形量为20 μm ,在其许用变形量范围之内^[14]。

表7 优化前后结果比较

目标函数	原设计	优化设计	结果比较
床身质量/kg	1 477.40	495.83	-66.4%
最大变形量/ μm	7.039	20.656	+193.5%
前3阶加权固有频率/Hz	454.258	466.430	+2.7%

4 结语

1) 静力学分析发现,在相同加工条件、不同工况下,床身最大变形量有较大差别,当刀具位于工件右侧时,变形量最大。为保证仿真有效性,应采用刀具位于工件右侧工况为首要考虑条件。

2) 运用层次分析法,合理地比较了8种材料的静动态特性。通过最终优先级矩阵得出:在保持床身原有结构不变的前提下,BFPC总体性能优于其他材料,可以直接运用于现有结构中,并可保证其静态性能在许用要求之内,但是针对不同类型机床还需进一步验证。

参考文献:

- [1] 徐平,肖振,谈海南,等. 钢纤维树脂混凝土填充结构机床基础件研究[J]. 机械设计,2013(5):52-55.
- [2] HYUN Surk Kim, KYU Yeol Park, DAI Gil Lee. A study on the epoxy resin concrete for the ultra precision machine tool bed[J]. Journal of Materials Processing Tech, 1995, 48(1):649-655.
- [3] 赵雪峰. 钢纤维混凝土在机床床身中的应用研究[D]. 大连:大连理工大学,2008.
- [4] 王涛. 机床用碳纤维增强树脂矿物复合材料的制备与性能研究[D]. 济南:山东大学,2014.
- [5] 于英华,陈宇,王焯,等. 玄武岩纤维树脂混凝土的切削性能研究[J]. 混凝土,2017(6):93-96.
- [6] 于英华,梁宇,沈佳兴,等. 玄武岩纤维增强树脂混凝土机床基础件结构设计及其性能仿真分析[J]. 机械设计,2017(1):71-75.
- [7] 马超,马雅丽,赵宏安,等.VHT800立式车铣加工中心立柱结构静态优化及轻量化设计[J]. 组合机床与自动化加工技术,2011(3):11-15.
- [8] 浦艳敏,牛海山,衣娟. 现代数控机床刀具及其应用[M]. 北京:化学工业出版社,2018.
- [9] 杨晓. 数控铣刀选用全图解[M]. 北京:机械工业出版社,2015.
- [10] 王开德,韩凯凯. 基于ANSYS Workbench的磨床立柱结构分析与优化设计[J]. 制造业自动化,2018(10):64-69.
- [11] 吴晓,杨立军,孙晋. 用双模量理论分析灰铸铁拉伸与扭转的破坏实验[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版),2011(3):51-54.
- [12] 罗辉,陈蔚芳,叶文华. 机床立柱灵敏度分析及多目标优化设计[J]. 机械科学与技术,2009,28(4):487-491.
- [13] 陈航军,吴永明,姜莉莉,等. 层次分析法在夹具概念设计优化中的应用[J]. 机电工程技术,2007(2):47-48.
- [14] 张彤,王传洋. 龙门加工中心两段三导轨超长床身精度控制研究[J]. 煤矿机械,2017(9):34-36.

收稿日期:2020-01-16