

# BFPC 床身工艺孔灵敏度分析及优化

胡勔,魏宏波

(宝鸡文理学院 机械工程学院,陕西 宝鸡 721016)

**摘要:**为提高玄武岩纤维树脂混凝土结构的静动态性能,以 VMC850B 立式加工中心床身为例,基于有限元,采用灵敏度分析和蒙特卡洛法对床身 7 个工艺孔进行分析。忽略孔的质量影响后,在前 3 阶加权固有频率提高了 1% 的同时,其  $x$  方向变形减少 5%。研究表明:玄武岩纤维树脂混凝土的静态性能不足可以通过合理设计床身孔的大小和位置来提高。

**关键词:**灵敏度分析;玄武岩纤维树脂混凝土;工艺孔;床身

**中图分类号:**TG659 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2021)02-0033-03

## Analysis and Optimization of Technical Hole Sensitivity of Bed

HU Xu, WEI Hongbo

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

**Abstract:** To improve the static and dynamic properties of basalt fiber reinforced polymer concrete bed, taken VMC850B vertical machining center bed as an example, sensitivity analysis and Monte Carlo method were adopted to analyze 7 process holes in the bed. Regardless of the influence of hole quality, the weighted natural frequency of the first 3 orders increased by 1%, while the deformation in  $x$  direction decreased by 5%. The research shows that the static performance of basalt fiber reinforced polymer concrete can be improved by reasonable designing of the size and position of bed hole.

**Keywords:** sensitivity analysis; basalt fiber reinforced polymer concrete; process hole; bed

## 0 引言

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的一个热点,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<sup>[1-4]</sup>,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,因此成为了材料研究的热点<sup>[5-6]</sup>。

玄武岩纤维树脂混凝土的轻质型优越性,被广泛研究,其动态性能良好且轻质化,但是其明显相对于灰铸铁材料其静态性能不足。沈佳兴等人以机床龙门框架组件为原型,于英华等人以数控车床斜床身为原型,均通过拓扑优化来改变其原有结构,以此来提高 BFPC 结构静态性能<sup>[7-8]</sup>。本文以 VMC850B 加工中心床身为原型,探讨孔的尺寸优化对于 BFPC 床身静态性能改善的效果。原床身采用 HT300 材料铸造,这里不再阐述。

## 1 灵敏度分析原理

优化设计的主要目标是在一定约束条件下,达到预设的目标,例如静动态性能好、质量轻、形状合理、经济成本低等。灵敏度设计是在约束条件下,通过数学方法计算其一阶偏导数,寻得优化目标与参数的关系<sup>[9]</sup>。它的定义

为:当函数  $F(x)$  被若干个参数  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$  表示时,参数的一阶灵敏度  $S$  即为一阶偏导数,表示为

$$S = \frac{\partial F(x)}{\partial x} \quad (1)$$

各个参数的一阶灵敏度的正负反映出参数与输出结果的正负相关性。其大小反映参数与输出函数的相关程度,则可通过判定值的大小来确定参数的重要性。

在 BFPC 床身灵敏度分析中,初步设定其质量、最大变形量和  $x$  方向最大变形为函数(优化目标),参数为床身内部选取的工艺孔。

## 2 概率设计方法

ANSYS 概率设计系统是利用一定的样本,采用某种数学方法来评估系统输出的大小和特性。本文采用蒙特卡洛法(Monte-Carlo),因为其方法简单,易于应用。设定函数为

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (2)$$

式中:  $x_1, x_2, \dots, x_n$  为输入的随机变量;  $y$  为输出的结果。根据大数定律,可以把样本输出的平均值作为实验结果的数学期望<sup>[10]</sup>。

$$\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i \quad (3)$$

则样本标准差作为实验估计精度。

**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的有限元分析及优化。

$$S_y^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2 \quad (4)$$

通过设定求解模型,采用一定抽样方式后,求解出最终函数(优化目标)解的近似值,解的精度则为其样本标准差。最终解对各个参数的偏导数即为灵敏度。

### 3 床身结构有限元分析

#### 3.1 床身结构的建立及模型的原比例导入

立式加工中心是以铣削、旋切大螺纹孔和各种曲面加工为主,具有铣削和镗削的功能,并且配有自动换刀系统的统称。本文以 VMC850B 立式加工中心的床身为模型。进行有限元分析和优化的基础是建立合适的三维模型。床身作为重要的基础件之一,结构较为复杂,为了数据的完整性和真实性,本文在采用 Solidworks 三维软件对床身 1:1 比例建模后,保留所有细小尺寸,未采用简化处理。

模型按原比例分析,虽然加大了计算机仿真的时间和工作量,但计算机的费用成本与企业效益相比,相对很低,故采用完整模型分析。床身的三维模型如图 1 所示。

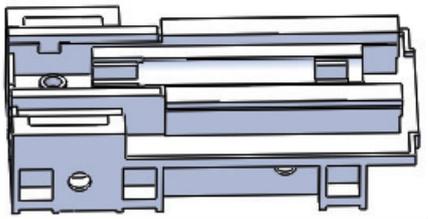


图 1 床身的三维模型

#### 3.2 材料属性、网格划分和边界条件

##### 1) 材料属性的设置

床身质量为 495.83 kg,采用 BFPC 材料,其弹性模量为  $4.6 \times 10^{10}$  MPa,泊松比为 0.25,密度  $\rho = 2.45 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。

##### 2) 有限元网格的划分

采取智能划分网格,在主要尺寸中设置 Relevance Center 为 Medium,单元尺寸设置为 15 mm,Smoothing 为 Medium,Transition 为 Fast。生成节点 260 202 个,单元 146 061 个,网格尺寸评价标准中,采用正交性评价标准,得到平均数值为 0.759 49,网格划分达到良好<sup>[11]</sup>。

##### 3) 边界条件的施加

工作台以及承重量和切削力均作用于床身导轨结合面,设定压力均匀分布。设定床身底面固定,采用经验公式计算切削力,这里不再详细阐述切削力计算。

#### 3.3 床身的静力学分析结果

加工中心的床身在设计中要保证在外部载荷中有较强的抵抗能力,这就要求床身具有一定的强度。线性静力学分析是用来分析结构在给定静力载荷作用下的响应。其方程式为

$$\mathbf{K}\{u\} = \{F\} \quad (5)$$

其中:  $\mathbf{K}$  为常值;  $\{F\}$  为静力载荷,不考虑随时间变化的

载荷,不考虑惯性的影响<sup>[12]</sup>。根据上文对床身进行前处理后,得到床身应变云图如图 2 所示。

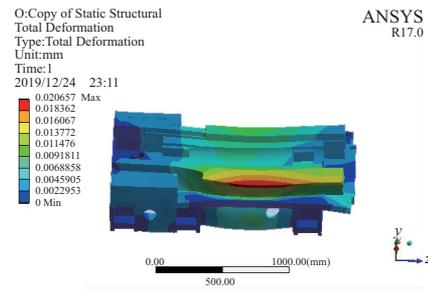


图 2 床身应变云图

由图 2 可知,床身的最大变形量为  $20.657 \times 10^{-6} \text{ m}$ ,最大变形发生在导轨一侧处。

#### 3.4 床身的模态分析结果

床身在外部载荷不断变化中要具有一定的抵抗能力,具有足够的刚度,通过模态分析可以确定其结构的固有频率和振动频率<sup>[13]</sup>。

动力学运动方程为

$$\mathbf{M}\{\ddot{x}\} + \mathbf{K}\{x\} = \{0\} \quad (6)$$

式中:  $\mathbf{M}$  为质量矩阵;  $\mathbf{K}$  为刚度矩阵。构件在没有激励情况下表现为自由振动,其位移函数为

$$x = X \sin \omega t \quad (7)$$

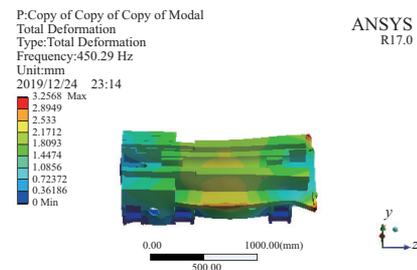
代入方程后可得

$$(\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M})\{X\} = \{0\} \quad (8)$$

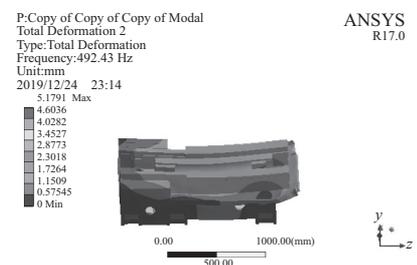
则特征值为  $\omega_i^2$ ,  $\omega_i$  就是自振圆频率,自振频率

$$f = \omega_i / 2\pi \quad (9)$$

床身为单个实体,因此床身具有任意阶模态。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<sup>[14]</sup>。模态分析的目的是得出其固有频率,并避免结构发生共振。图 3 为床身前 3 阶固有频率图,表 1 为床身模态分析。



(a) 第1阶振型云图



(b) 第2阶振型云图

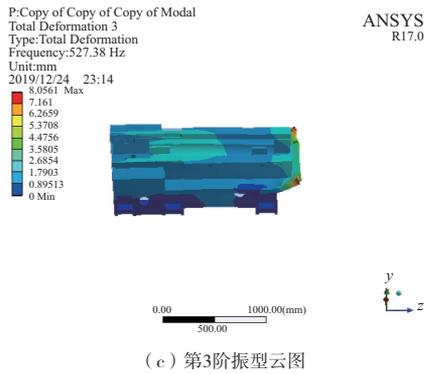


图3 床身前3阶振型云图

表1 床身模态分析结果表

模态	频率/Hz	振型描述	最大变形量/mm
1	450.29	床身左右绕z轴扭曲振动	3.256 8
2	492.43	床身上下绕x轴扭曲振动	5.179 1
3	527.38	床身导轨前端绕x轴扭曲振动	8.056 1

表1振型可通过放大比例后看出。通过图2和图3分析可知,床身底部静态特性良好,床身的导轨安装面变形较大。

工艺孔可以起到减轻质量、合理均匀受力的作用。但是为了考虑铸造工艺,比如成型时的热变形问题、成型后的表面精加工等,所以工艺孔往往是对称结构或者大小相同。BFPC作为一种混凝土,常温下便可固化,且模板使用后清理简单,浇筑成型难度低,因此可以通过合理设计孔的大小和位置来提高静态特性<sup>[15]</sup>。

## 4 床身工艺孔尺寸优化

以床身内部工艺孔的优化为切入点,通过灵敏度分析探讨其对结构参数( $x$ 敏感方向最大变形量、前3阶加权固有频率、质量)的影响。床身有多个工艺孔,选取 $t_1-t_7$ 这7个主要工艺孔进行分析(孔径均采用直径为单位),孔的初始值通过实际测绘得出, $t_1-t_6$ 孔大小相同且对称分布,如图4所示。因为低阶模态特性基本决定了结构的动态性能,所以设计加权公式如下<sup>[16]</sup>:

$$f = 0.7 \times f_1 + 0.2 \times f_2 + 0.1 \times f_3 \quad (10)$$

其中: $f$ 为加权模态; $f_i$ 为 $i$ 阶模态。

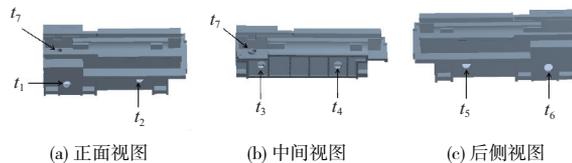


图4 孔结构分布图

经计算得出床身质量灵敏度、 $x$ 方向变形灵敏度、前3阶加权固有频率灵敏度,如表2所示。灵敏度值 $>0$ ,则表示随着该尺寸的增大,优化目标随之增大;尺寸减小,优化目标随之减小。

表2 床身质量、 $x$ 方向总变形及前3阶加权固有频率灵敏度

工艺孔/mm	质量/%	$x$ 方向变形/%	加权固有频率/%
$t_1$	-51.7	-10.0	9.1
$t_2$	-36.2	13.7	7.7
$t_3$	-28.9	7.8	-16.4
$t_4$	-36.3	42.7	6.7
$t_5$	-36.6	-57.2	38.6
$t_6$	-36.3	17.3	2.4
$t_7$	-28.9	2.4	63.2

由表2可知孔越大质量越小。根据床身孔实际情况,将各个孔变量设计范围放到最大。由表3可知,孔的最值比较对床身质量影响较小,可忽略不计。故质量不再作为优化目标。

表3 孔大小与床身质量

孔径最值	$t_1$ /mm	$t_2-t_7$ /mm	质量/kg
最小值	0	0	499.14
最大值	100	120	494.30

以 $x$ 方向总变形灵敏度、前3阶加权固有频率为优化目标,选取7个孔的最值范围为输入参数。通过计算,最终筛选数据得到最优尺寸并圆整,如表4所示。

表4 设计变量参数 单位:mm

工况	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_4$	$t_5$	$t_6$	$t_7$
初始	80	100	100	100	100	100	100
优化	99.5	42.9	48.7	45.9	119.7	24.3	17.4
圆整	100	43	49	50	120	24	17

将数据重新插入当前设计点,重建模型,重新进行静态分析。在经过孔的优化后,结果显示:忽略孔的质量影响后,其前3阶加权固有频率提高了1%,同时 $x$ 方向变形减少5%(表5)。

表5 孔优化前后的BFPC床身性能参数

方案	$x$ 方向变形( $\times 10^{-7}$ )/mm	前3阶加权固有频率/Hz
优化前	15.45	466.80
优化后	14.69	470.20

## 5 结语

1)灵敏度分析表明,所有工艺孔的大小跟床身质量成负比例关系。不同位置工艺孔对 $x$ 方向变形的灵敏度正负不一。BFPC结构的静态性能不足可通过设计孔大小和位置来提高。

2)BFPC密度较低,床身工艺孔的大小对质量影响较小。由表5可得,工艺孔大小对于床身固有频率提高不明显,但是可以明显提高静态性能。在对BFPC结构的孔优化时,可以直接采用最大变形量作为优化目标。

(下转第39页)

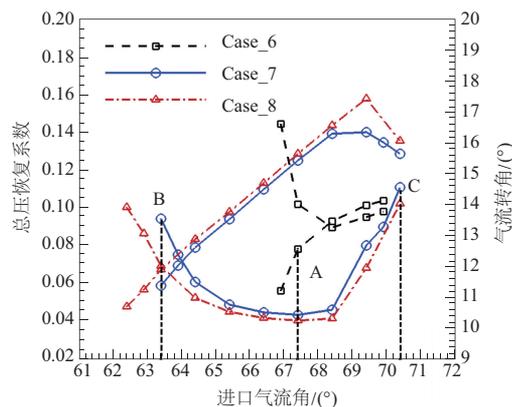


图7 优化前后叶栅特性线对比

## 4 结语

本文采用优化设计方法进行大密流比高亚音静子叶型和转子叶型设计,得出如下结论:

1) 以设计工况点参数为目标进行单工况优化不仅可有效提高设计工况性能,也可有效提高非设计工况性能;但单工况优化非设计工况性能可能会略低于多工况优化。

2) 对于大密流比高亚音静子/转子叶型,载荷沿弦向分布较均匀,不呈前加载特性,与可控扩散叶型载荷分布有明显的差异。

3) 对于大安装角转子叶型,压力面在与吸力面尾缘配合部位适当凸起,可抑制吸力面尾缘流动分离。

### 参考文献:

- [1] 徐全勇, 阙晓斌, 吴锋. 可控扩散叶型的扩稳优化[J]. 航空动力学报, 2017, 32(7): 1762-1768.
- [2] PAGE J H, HIELD P, TUCKER P G. Inverse design of 3D multistage transonic fans at dual operating points[J]. Journal of Turbomachinery, 2014, 136(4): 041008.

- [3] KORAKIANITIS T, HAMAKHAN I A, REZAIENIA M A, et al. Design of high-efficiency turbomachinery blades for energy conversion devices with the three-dimensional prescribed surface curvature distribution blade design (CIRCLE) method[J]. Applied Energy, 2012, 89(1): 215-227.
- [4] SIEVERDING F, RIBI B, CASEY M, et al. Design of industrial axial compressor blade sections for optimal range and performance[J]. Journal of Turbomachinery, 2004, 126(2): 323-331.
- [5] STEPHENS H. Supercritical airfoil technology in compressor cascades; comparison of theoretical and experimental results[J]. AIAA Journal, 1979, 17(6): 594-600.
- [6] STEINERT W, EISENBERG B, STARKEN H. Design and testing of a controlled diffusion airfoil cascade for industrial axial flow compressor application[J]. Journal of Turbomachinery, 1991, 113(4): 583-590.
- [7] 赵峰, 桂幸民. 低雷诺数效应对某可控扩散叶型性能的影响[J]. 航空动力学报, 2006, 21(2): 285-289.
- [8] SENTHIL K R, KAMBLE S, SWAMY K, et al. Effect of axial velocity density ratio on the performance of a controlled diffusion airfoil compressor cascade[J]. International Journal of Turbo & Jet-engines, 2015, 32(4): 305-317.
- [9] DORFNER C, HERGT A, NICKE E, et al. Advanced nonaxisymmetric endwall contouring for axial compressors by generating an aerodynamic separator—part I: Principal cascade design and compressor application[J]. Journal of Turbomachinery, 2011, 133(2): 021026.
- [10] 周正贵, 邱名, 徐夏, 等. 压气机/风扇二维叶型自动优化设计[J]. 航空学报, 2011, 32(11): 1987-1997.
- [11] HOBBS D E, WEINGOLD H D. Development of controlled diffusion airfoils for multistage compressor application[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1984, 106(2): 271-278.
- [12] RECHTER H, STEINERT W, LEHMANN K. Comparison of controlled diffusion airfoils with conventional NACA 65 airfoils developed for stator blade application in a multistage axial compressor[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1985, 107(2): 494-498.

收稿日期: 2020-01-13

(上接第 35 页)

### 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, 30(5): 52-55.
- [2] KIM H S, PARK K Y, LEE D G. A study on the epoxy resin concrete for the ultra-precision machine tool bed[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1995, 48(1/2/3/4): 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, 王烨, 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, 34(1): 71-75.
- [7] 沈佳兴, 徐平, 于英华, 等. BFPC 机床龙门框架组件优化设计及综合性能分析[J]. 机械工程学报, 2019, 55(9): 127-135.
- [8] 于英华, 孙苗苗, 徐平, 等. BFPC 数控车床斜床身拓扑优化设计

- 及其性能分析[J]. 机械科学与技术, 2018, 37(7): 1034-1040.
- [9] 丛明, 房波, 周资亮. 车-车拉数控机床拖板有限元分析及优化设计[J]. 中国机械工程, 2008, 19(2): 208-213.
- [10] 陆凌云. 基于仿真实验的灵敏度分析方法及工具研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [11] 梁赛, 杨冰, 吴亚运, 等. 有限元方法中实体单元选择策略研究[J]. 机械制造与自动化, 2019, 48(2): 79-83.
- [12] 付稣昇. CAE 分析大系: ANSYS Workbench 17.0 数值模拟与实例精解[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2017.
- [13] 杨玉萍, 张森, 季彬彬, 等. 数控立式加工中心床身筋板结构设计与分析[J]. 机械设计与制造, 2013(12): 38-40.
- [14] 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, 40(10): 64-69.
- [15] 梁宇. BFPC 机床基础件材料、结构及其成型模具设计[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2015.
- [16] 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.

收稿日期: 2020-01-17