

文章编号: 1673-5196(2021)05-0053-06

基于灰色理论的数控机床复合结构床身 优化设计及其性能分析

郭润兰*, 邓文强, 李典伦

(兰州理工大学 机电工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 为探索提高数控机床的综合性能,以某卧式加工中心铸铁床身为原型,设计了一种钢板-混凝土复合结构床身.采用正交实验、灰色关联和组合赋权相结合的方法对其结构进行优化并得到了最优的参数组合,对复合结构床身进行有限元仿真分析,并将结果与原型铸铁床身比较.结果表明:在床身质量仅增加 2.3%的情况下,复合结构床身的最大静应力和最大静变形分别降低了 51.3%和 82.9%;前三阶固有频率提高了 143.9%、156.8%和 148.7%; x 轴导轨和 z 轴导轨中心节点在 x 、 y 、 z 方向上的最大振幅降低了 97.6%、97.1%、94.0%和 99.6%、97.9%、85.4%;导轨滑块连续在导轨表面摩擦 1800s 时导轨的最大热-结构耦合变形量降低了 7.3%.

关键词: 复合结构床身; 正交实验; 灰色关联分析; 组合赋权; 多目标优化

中图分类号: TG502 **文献标志码:** A

Optimization design and performance analysis of CNC machine tools composite structure bed based on grey theory

GUO Run-lan, DENG Wen-qiang, LI Dian-lun

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Lanzhou Univ.of Tech., Lanzhou 730050, China)

Abstract: To improve the comprehensive performance of CNC machine tools, a steel-concrete composite structure bed is designed, based on a certain horizontal machining center cast iron bed. The method of orthogonal experiment, grey theory and combination weighting is used to optimize its structure, the optimal parameter combination is obtained. Finally, the finite element simulation analysis of the composite structure bed is carried out, and the results are compared with the prototype cast iron bed. The results show that: when the bed mass is increased by 2.3%, the maximum static stress and the maximum static deformation of the composite structure bed are reduced by 51.3% and 82.9%, respectively. The first three natural frequencies are increased by 143.9%, 156.8% and 148.7%, respectively. The maximum amplitudes of the center nodes of x -axis guide rail and z -axis guide rail in x , y and z directions are decreased by 97.6%, 97.1%, 94.0% and 99.6%, 97.9% 85.4%. When the sliding block of the guide rail continuously rubs on the guide rail surface for 1 800 second, the maximum thermal-structural coupling deformation of the guide rail is reduced by 7.3%.

Key words: composite structure bet; orthogonal experiment; grey relational analysis; combination weighting; multi-objective optimization

随着制造业的飞速发展,现有的机床越来越难满足高速高精的加工要求.作为机床基础件,床身结构的强度、刚度和稳定性对机床加工精度有重要影

响.为满足新的加工要求,需要尽量提高床身的静态、动态刚度和热性能^[1].

近年来,国内外学者为提高机床的综合性能作了大量的研究与尝试,形成的方法包括优化机床结构和应用新材料、新结构制造机床两种^[2].应申舜等^[3]采用模态验证法对某拉床床台进行了优化,陈永亮等^[4]采用 Kriging 代理模型对某高速铣床主轴

收稿日期: 2020-04-22

基金项目: 国家自然科学基金(51965037, 51565030)

通讯作者: 郭润兰(1963-),女,山西山阴人,教授.

Email: llggrl@126.com

箱进行了优化,刘成颖等^[5]采用元结构二次优化方法对某卧式加工中心的床身进行了优化,徐平等^[6]提出用钢纤维树脂混凝土制造机床基础件,任秀华等^[7]提出用钼纤维树脂矿物复合材料制造机床床身,Kono等^[8]提出用钢和碳纤维增强塑料复合材料来制造机床主轴。

优化机床结构的技术相对成熟,得到了广泛的应用,但较难从根本上改善机床的性能,现阶段取得的效果几乎接近极限^[9]。因此,应用新材料、新结构制造机床逐渐成为了研究的热点,现有研究^[10-11]表明,采用钢板-混凝土复合结构制造机床基础件是一种可行的方法,但这种结构在应用上缺乏明确的设计依据,制造的机床基础件无法获得满意的性能,因此,本文设计了一种钢-混凝土复合结构床身,并通过正交实验、灰色关联、组合赋权方法对床身的结构参数进行多目标优化,从而提高机床床身的综合性能。

1 复合结构床身静力学分析

1.1 复合结构床身设计

本文参照的 HMC630 卧式加工中心,其结构模型如图 1a 所示。根据该卧式加工中心铸铁床身,在不改变床身关键尺寸、结构及功能完整性的前提下,利用钢板-混凝土复合结构对其进行重新设计。床身外层用 45 号钢焊接,内部分布加强钢筋并用 C30 混凝土填充,机床导轨底部埋入混凝土并与外层钢板连接。该床身初定钢板厚度 $t=11\text{ mm}$,导轨预埋深度 $h=45\text{ mm}$,其局部结构如图 1b 所示。

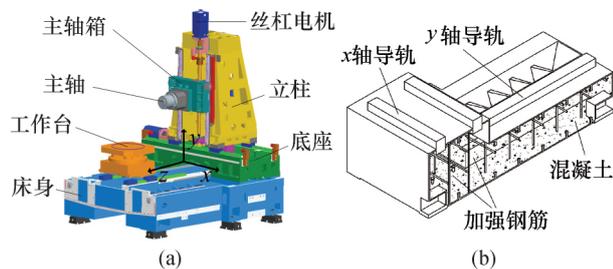


图 1 HMC630 卧式加工中心结构模型和床身内部结构示意图

Fig.1 Structure model of HMC630 horizontal MC Schematic diagram of the internal structure of the machine tool bed

1.2 工况分析及参数计算

选取典型工况,研究该卧式加工中心床身的受力情况,查表得其铣削力经验公式如下:

$$F_c = \frac{10c_p a_p^{0.86} f_z^{0.74} BZ}{d_0^{0.86}} K K_1 \quad (1)$$

$$F_t = (0.35 \sim 0.40) F_c \quad (2)$$

$$F_f = (0.80 \sim 0.90) F_c \quad (3)$$

$$F_v = (0.75 \sim 0.80) F_c$$

式中: c_p 为工件材料对铣削力的影响系数; a_p 为铣削深度; f_z 为每齿进给量; d_0 为铣刀直径; K 为刀具前角对铣削力的影响系数; K_1 为铣削速度对铣削力的影响系数; F_t 为横向铣削分力; F_f 为纵向铣削分力; F_v 为垂直铣削分力。

最后求得: $F_c=2\ 064\text{ N}$, $F_t=774\text{ N}$, $F_f=1\ 755\text{ N}$, $F_v=1\ 600\text{ N}$ 。 x 轴导轨上表面和侧面所荷载荷为 $F_1=27\ 100\text{ N}$, $T_1=310\text{ N}\cdot\text{m}$; z 轴导轨上表面和侧面所荷载荷为 $F_2=15\ 600\text{ N}$, $T_2=702\text{ N}\cdot\text{m}$ 。

1.3 复合结构床身静力学分析

分析时对模型作适当简化,忽略混凝土与钢板结合部参数对有限元结果的影响。45 号钢的密度为 $7\ 850\text{ kg/m}^3$,泊松比为 0.30,弹性模量 200 GPa ,阻尼比为 0.004,比热容为 $434\text{ J}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$,导热系数为 $60.5\text{ W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$,线膨胀系数为 $1.2\times 10^{-5}\text{ K}^{-1}$;C30 混凝土的密度为 $2\ 300\text{ kg/m}^3$,泊松比为 0.18,弹性模量 30 GPa ,阻尼比为 0.015,比热容为 $780\text{ J}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$,导热系数为 $0.72\text{ W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$,线膨胀系数为 $1.4\times 10^{-5}\text{ K}^{-1}$ 。

床身静力学分析结果如图 2 所示。由图可知,复合结构床身最大静应力为 $1.738\ 9\text{ MPa}$,发生在地脚螺栓安装模块上;最大静变形为 $2.371\ 1\ \mu\text{m}$,发生在机床 z 轴导轨上。

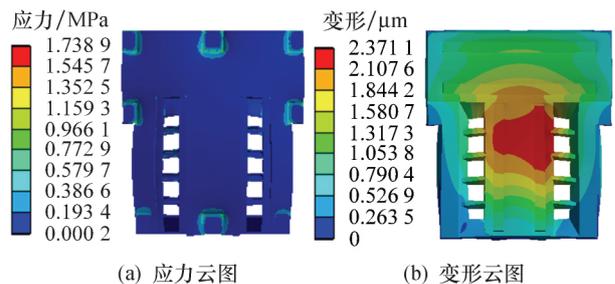


图 2 应力云图和变形云图

Fig.2 Stress and deformed cloud diagram

2 复合结构床身多目标优化设计

2.1 优化设计方法及流程

本文采用正交实验、灰色关联和组合赋权相结合的方法对该复合结构床身进行多目标优化,具体优化流程如图 3 所示。

2.2 实验因素和评价指标的确定

选取外层钢板厚度、导轨预埋深度和加强钢筋结构作为实验因素,选取最大静应力、最大静变形、一阶固有频率和质量作为评价指标,对复合结构床身进行多目标优化设计。本文设计了如图 4 所示的

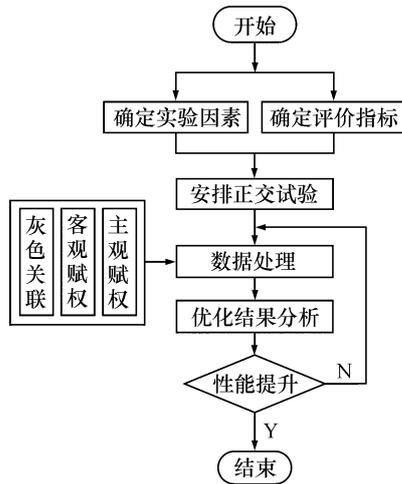


图 3 优化设计流程

Fig.3 Process of optimal design

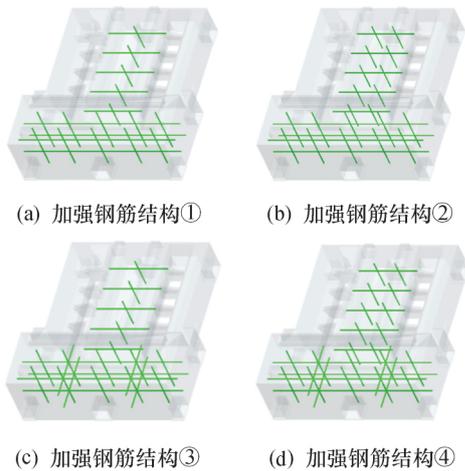


图 4 床身加强钢筋结构布置方案

Fig.4 Scheme of reinforcing steel structure inside the machine tool bed

4 种加强钢筋结构来研究其对床身性能的影响,其中钢筋结构③为初始设计.

2.3 正交实验设计

各实验因素在合适范围内选取 4 个水平,设计了如表 1 所列的 $L_{16}(4^3)$ 正交实验,各实验方案的有限元仿真结果如表 2 所列.

2.4 基于灰色系统理论的数据处理

本文对复合结构床身进行了 16 次仿真实验,而实际的参数组合有 64 种,这构成了一个小样本、数据匮乏的不确定性系统^[12].灰色关联法是根据因素之间发展趋势的相同或差异程度来评价因素间关联度的方法,恰好能够解决这种不确定性系统的多目标优化设计问题^[13].

2.4.1 灰色关联法

根据灰色关联法,以实验方案的仿真数据建立

表 1 正交实验设计

Tab.1 Orthogonal experimental design

实验因素				实验因素			
序号	加强钢筋结构	外层钢板厚度 d/mm	导轨预埋深度 h/mm	序号	加强钢筋结构	外层钢板厚度 d/mm	导轨预埋深度 h/mm
1	①	7	35	9	③	7	45
2	①	9	40	10	③	9	50
3	①	11	45	11	③	11	35
4	①	13	50	12	③	13	40
5	②	7	40	13	④	7	50
6	②	9	45	14	④	9	35
7	②	11	50	15	④	11	40
8	②	13	35	16	④	13	45

表 2 仿真实验结果

Tab.2 Simulation experimental results

序号	仿真实验结果			
	最大静应力 σ/MPa	最大静变形 $\delta/\mu m$	一阶固有频率 f/Hz	质量 m/kg
1	1.717 7	2.397 2	328.34	6 677.8
2	1.740 9	2.287 6	331.80	6 878.3
3	1.403 3	2.194 6	334.54	7 077.4
4	1.413 8	2.110 3	337.01	7 275.0
5	1.724 0	2.386 9	327.78	6 701.7
6	1.741 9	2.278 5	331.23	6 902.3
7	1.403 3	2.186 8	333.95	7 101.3
8	1.400 6	2.132 5	338.46	7 210.4
9	1.719 2	2.374 6	327.48	6 724.6
10	1.759 2	2.267 8	332.78	6 925.2
11	1.405 7	2.207 4	335.76	7 035.7
12	1.415 0	2.124 0	338.05	7 233.3
13	1.709 9	2.365 2	326.89	6 748.6
14	1.761 2	2.291 3	332.51	6 860.6
15	1.403 7	2.198 6	335.18	7 059.7
16	1.416 0	2.116 1	337.49	7 257.2

评价指标的初始矩阵,并对初始初始矩阵进行无量纲、规范化处理后得到矩阵

$$A = \begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & a_{1,3} & a_{1,4} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & a_{2,3} & a_{2,4} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{16,1} & a_{16,2} & a_{16,3} & a_{16,4} \end{bmatrix} \quad (5)$$

构造参考矩阵 $K = [k_1, k_2, k_3, k_4]$, $k_j = \max(a_{1,j}, a_{2,j}, \dots, a_{16,j})$, 记 ξ_{ij} 为第 i 个比较序列与 K 中第 j 个指标的关联系数,即

$$\xi_{ij} = \frac{\min_i \min_j |k_j - a_{ij}| + \rho \max_i \max_j |k_j - a_{ij}|}{|k_j - a_{ij}| + \rho \max_i \max_j |k_j - a_{ij}|} \quad (6)$$

式中: $i=1, 2, \dots, 16; j=1, 2, 3, 4; \rho$ 为分辨系数,一般取 $\rho=0.5$.

由式(6)处理后得到关联系数矩阵

$$\xi = \begin{bmatrix} \xi_{1,1} & \xi_{1,2} & \xi_{1,3} & \xi_{1,4} \\ \xi_{2,1} & \xi_{2,2} & \xi_{2,3} & \xi_{2,4} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \xi_{16,1} & \xi_{16,2} & \xi_{16,3} & \xi_{16,4} \end{bmatrix} \quad (7)$$

2.4.2 组合赋权法

本文采用基于熵值法和层次分析法的组合赋权法对已有数据进行处理,步骤如下:

计算第 j 项指标下第 i 个数据的比重

$$a'_{ij} = a_{ij} / \sum_{i=1}^{16} a_{ij} \quad (8)$$

计算第 j 项指标的熵值

$$e_j = -\frac{1}{\ln 4} \sum_{i=1}^4 a'_{ij} \ln a'_{ij} \quad (9)$$

计算客观权重 w'_j

$$w'_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{i=1}^4 (1 - e_j)} \quad (10)$$

按照层次分析法确定主观权重 w''_j 后,对主、客观权重进行组合,组合权重为

$$w_j = \frac{w'w''_j}{\sum_{i=1}^4 w'_jw''_j} \quad (11)$$

2.4.3 计算各实验方案关联系数

$$\gamma = \zeta w \quad (12)$$

式中: w 为 $w_j (j=1,2,3,4)$ 组成的组合权重系数矩阵, γ 为目标函数灰色关联度矩阵.

2.5 最优参数组合的确定

由式(8~11)得到各优化目标的组合权重 $w' = [0.264\ 8, 0.510\ 9, 0.123\ 4, 0.100\ 9]$.

由式(5~12)得到各实验方案的灰色关联度,如表 3 所列.由表 3 得到各因素水平的平均灰色关联度,如表 4 所列.由表 4 可知,复合结构床身的最优参数组合为:加强钢筋结构②,外层钢板厚度 $d = 13\ \text{mm}$,导轨预埋深度 $h = 50\ \text{mm}$.

为验证优化效果,对优化后复合结构床身进行有限元仿真,结果如表 5 所列.由表 5 可知,相比优化前,复合结构床身的质量增加了 2.7%,最大静应力和最大静变形分别下降了 18.7%和 11.0%,一阶固有频率提高了 3.1%.

由组合权重 w 可知,最大静应力、最大静变形、一阶固有频率和质量组合权重分别为 0.264 8、0.510 9、0.123 4 和 0.100 9.优化时应重点考虑降低床身的变形和应力,然后考虑减少床身质量.因此,在其他 3 项指标得到较好优化后,床身质量反而有小幅增加.这是由各优化目标的组合权重 w 所决定的.综上所述,优化结果达到了预期目标,优化效果较好.

表 3 各实验灰色关联度

Tab.3 Gray correlation degree of each experiment

序号	仿真实验因素			关联度
	加强钢筋结构	外层钢板厚度 d/mm	导轨预埋深度 h/mm	
1	①	7	35	0.412 0
2	①	9	40	0.437 9
3	①	11	45	0.699 4
4	①	13	50	0.890 0
5	②	7	40	0.406 0
6	②	9	45	0.439 1
7	②	11	50	0.705 2
8	②	13	35	0.866 9
9	③	7	45	0.405 2
10	③	9	50	0.449 6
11	③	11	35	0.692 2
12	③	13	40	0.862 1
13	④	7	50	0.404 2
14	④	9	35	0.437 6
15	④	11	40	0.699 6
16	④	13	45	0.875 0

表 4 各因素水平的平均关联度

Tab.4 Average correlation of each factor level

加强钢筋结构	关联度	外层钢板厚度/ mm	关联度	导轨预埋深度/ mm	关联度
①	0.609 8	7.00	0.406 9	35	0.602 2
②	0.610 1	9.00	0.441 0	40	0.601 4
③	0.602 3	11.00	0.699 1	45	0.604 7
④	0.604 1	13.00	0.873 5	50	0.612 2

表 5 复合结构床身优化前后有限元分析结果

Tab.5 Finite element analysis results of composite structure bed before and after optimization

参数	最大静应力 σ/MPa	最大静变形 $\delta/\mu\text{m}$	一阶固有频率 f/Hz	质量 m/kg
优化前	1.738 9	2.371 1	326.70	7 082.8
优化后	1.413 5	2.109 8	336.97	7 276.7
变化率/%	-18.7	-11.0	3.1	2.7

3 优化后复合结构床身性能分析

3.1 静力学分析及模态分析

分析时,复合结构床身材料参数设置同 1.3 节的内容,铸铁的密度为 $7\ 200\ \text{kg}/\text{m}^3$,泊松比为 0.28,弹性模量 $110 \times 10^9\ \text{Pa}$,阻尼比为 0.006,比热容为 $447\ \text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$,导热系数为 $52\ \text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$,线膨胀系数为 $1.2 \times 10^{-5}\ \text{K}^{-1}$.

有限元分析结果如表 6 所列.由表 6 可知,相比原型铸铁床身,复合结构床身质量有小幅增加,但其最大静应力和最大静变形都有了大幅降低,前三阶固有频率也得到了明显提高.

表 6 复合结构床身与原型铸铁床身性能

Tab.6 Performance between composite structure machine tool bed and prototype cast iron machine tool bed

参数	质量 <i>m</i> /kg	最大 静应力 σ /MPa	最大 静变形 δ / μ m	一阶固 有频率 f_1 /Hz	二阶固 有频率 f_2 /Hz	三阶固 有频率 f_3 /Hz
原型铸铁	7 113.6	2,903.5	12,317.0	138.16	139.66	155.89
复合结构	7 276.7	1,413.5	2,109.8	336.97	358.58	387.71
变化率/%	2.3	-51.3	-82.9	143.9	156.8	148.7

3.2 谐响应分析

分析时,取机床 x 轴和 z 轴导轨中心节点为研究对象,设置的频率范围包含两种结构床身的前三阶固有频率.复合结构床身的阻尼比由钢和混凝土对整体刚度的贡献率确定^[14],查阅相关标准^[15],最后确定复合结构床身的阻尼比取 0.03,原型铸铁床身的阻尼比取 0.006.

谐响应分析结果如图 5 所示.由图 5 可知,原型铸铁床身 x 轴和 z 轴导轨中心节点 x 、 y 、 z 方向的最大振幅为 4.13、540.91、381.47 μ m 和 164.57、953.72、65.18 μ m;复合结构床身 x 轴和 z 轴导轨中心节点 x 、 y 、 z 方向的最大振幅为 0.10、15.79、22.70 μ m 和 0.59、20.19、9.52 μ m;相比原型铸铁床身,复合结构床身 x 轴和 z 轴导轨中心节点 x 、 y 、 z 方向的最大振幅分别降低了 97.6%、97.1%、94.0% 和 99.6%、97.9%、85.4%.

3.3 热态性能分析

3.3.1 热源分析计算

本文主要考虑工作台与 z 轴导轨、立柱与 x 轴导轨的摩擦生热以及环境温度对床身的影响.导轨热流密度的计算公式为

$$q = \frac{2\mu Fv}{JS} \quad (13)$$

式中: μ 为摩擦系数,取 0.075; F 为导轨摩擦面所受的载荷,N; v 为导轨滑块的移动速度; J 为热功当量, $J=4.2 \text{ J/cal}$; S 为导轨摩擦表面积, mm^2 .

本文参照的 HMC630 卧式加工中心,其允许的最大线性移动速度为 18 m/min,计算时取最大值 $v=0.3 \text{ m/s}$.

x 轴导轨表面的热流密度

$$q_x = \frac{2\mu Fv}{JS} = 1.344 2 \times 10^{-3} \text{ W/mm}^2$$

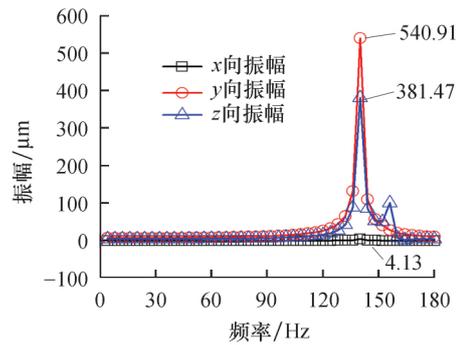
z 轴导轨表面的热流密度

$$q_z = \frac{2\mu Fv}{JS} = 9.163 5 \times 10^{-4} \text{ W/mm}^2$$

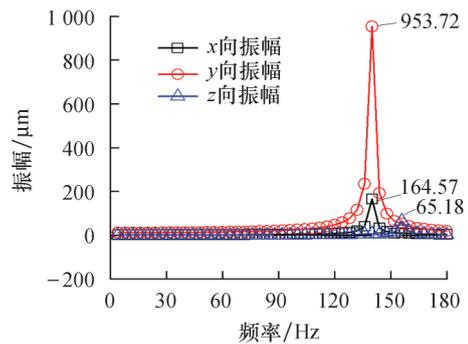
根据努谢尔特准则、普朗特准则和葛拉晓夫准则计算床身各表面对流换热系数,结果如表 7 所示.

3.3.2 热及热-结构耦合分析

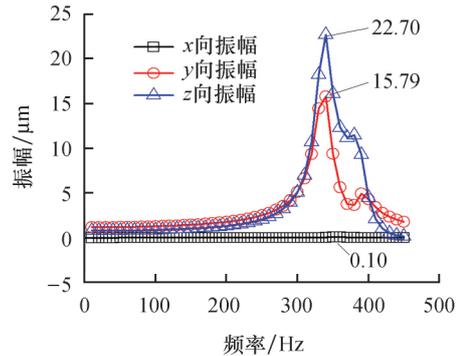
在 0~3 600 s 内取样 15 个时间点,对复合结构床身和原型铸铁床身导轨的热及热-结构耦合性能



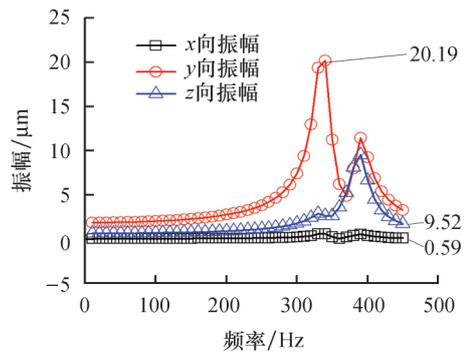
(a) 原型铸铁床身x轴导轨



(b) 原型铸铁床身z轴导轨



(c) 复合结构床身x轴导轨



(d) 复合结构床身z轴导轨

图 5 床身导轨中心节点频响曲线

Fig.5 Frequency response curve of the center node of the machine tool bed rail

表 7 对流换热系数

Tab.7 Convective heat transfer coefficient

位置	位置	特征尺寸/mm		换热系数/(W·m ⁻² ·K)	
		原型铸铁	复合结构	原型铸铁	夹芯结构
床身侧壁	C	505	450	2.174 4	2.237 9
床头侧壁	D	338	725	2.403 9	1.986 4
床身表面	E	1 387	1470	2.144 2	2.144 2
床头表面	F	1 150	1020	2.144 2	2.144 2
导轨表面	G	90	90	2.945 7	2.945 7

进行有限元仿真.分析时,床身初始温度和环境温度均设为 22 ℃.

本文采用顺序耦合的方式进行两种结构床身的热-结构耦合性能分析,复合结构床身和原型铸铁床身导轨的时间-最高温度曲线和时间-最大耦合变形曲线分别如图 6 所示.由图 6 可知,0~1 920 s,铸铁床身导轨的最高温度略高于复合结构床身的;1 920~3 600 s,复合结构床身导轨的最高温度略高于原型铸铁床身的;0~3 600 s,复合结构床身导轨的最大热-结构耦合变形量均小于铸铁床身的.

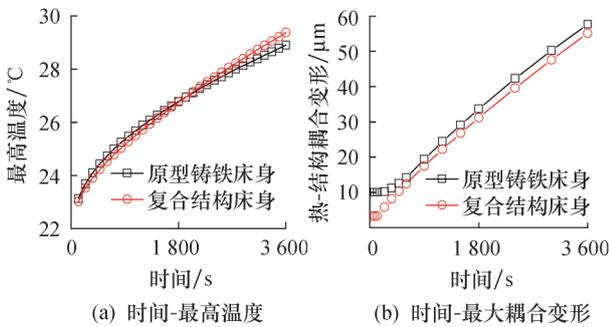


图 6 时间与最高温度和最大耦合变形的曲线

Fig.6 Time maximum temperature and maximum coupling deformation curve

受实际工况影响,该卧式加工中心单个工序的加工时间基本上不超过 1 200 s,在此时间范围内,复合结构床身导轨的最高温度和最大耦合变形量均低于铸铁床身的.1 920 s 后,虽然复合结构床身导轨的最高温度略高于铸铁床身的,但是其最大耦合变形量始终低于铸铁床身的.因此,该复合结构床身的热性能要优于原型铸铁床身的.

4 结论

1) 以某卧式加工中心铸铁床身为原型,设计了一种钢板-混凝土复合结构床身,研究了该复合结构床身的静力学性能,分析出其最大静应力和最大静变形的大小和发生位置.

2) 采用正交实验方法,综合考虑主、客观赋权对评价结果的影响,利用灰色关联法得到床身的最

优参数组合,有效地减少了实验次数.

3) 对优化后的复合结构床身进行了有限元仿真分析,并将结果与原型铸铁床身比较.结果表明:在床身质量仅增加 2.3% 的情况下,复合结构床身的最大静应力和最大静变形降低了 51.3% 和 82.9%;前三阶固有频率提高了 143.9%、156.8% 和 148.7%,*x* 轴和 *z* 轴导轨中心节点 *x*、*y*、*z* 方向上的最大振幅分别降低了 97.6%、97.1%、94.0% 和 99.6%、97.9%、85.4%;0~3 600 s,复合结构床身的最大热-结构耦合变形均小于原型铸铁床身的.由此说明钢板-混凝土复合结构床身具有更好的静态、动态刚度和热稳定性.

参考文献:

[1] 米 洁,甄 真,杨庆东,等.高精度加工中心床身结构拓扑优化研究[J].机械设计与研究,2019,35(2):113-116.

[2] MOHRING H C,BRECHER C,ABELE E,et al.Materials in machine tool structures [J].CIRP Annals - Manufacturing Technology,2015,64 (2):725-748.

[3] 应申舜,林绿高,计时鸣.基于模态参数验证的机床结构件优化设计 [J].浙江大学学报(工学版),2018,52(10):1880-1887.

[4] 陈永亮,刘 双,王汉涛,等.基于 Kriging 代理模型的主轴箱稳健设计 [J].天津大学学报,2011,44(12):1111-1117.

[5] 刘成颖,谭 锋,王立平,等.考虑机床动态性能的床身元结构二次优化方法 [J].农业机械学报,2015,46(11):399-404.

[6] 徐 平,肖 振,谈海南,等.碳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.

[7] 任秀华,张建华,张 超,等.碳纤维含量对机床用树脂矿物复合材料力学性能影响 [J].机械设计与研究,2015,31(2):125-128.

[8] KONO D,MIZUNO S,MURAKI T,et al.A machine tool motorized spindle with hybrid structure of steel and carbon fiber composite [J].CIRP Annals-Manufacturing Technology,2019,68(1):389-392.

[9] 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.

[10] MOHRING H C.Composites in production machines [J].Procedia CIRP,2017,66:2-9.

[11] SUH J D,LEE D G.Design and manufacture of hybrid polymer concrete bed for high-speed CNC milling machine [J].International Journal of Mechanics and Materials in Design,2008,4(2):113-121.

[12] 吴俐俊,袁志成,苑昭阔.基于正交设计和灰色关联理论的板式省煤器优化 [J].同济大学学报(自然科学版),2017,45(11):1694-1700.

[13] 邱自学,鞠家全,任 东,等.基于正交试验-组合赋权-灰色关联的机床横梁优化设计 [J].振动与冲击,2017,36(12):105-111.

[14] 周国伟,张志强,李爱群,等.混合结构时程分析中的阻尼比计算研究 [J].振动与冲击,2012,31(16):117-121,127.

[15] 中国建筑科学研究院.混凝土结构设计规范:GB 50010-2010 [S].北京:中国建筑工业出版社,2010.