

基于 ICM 法的龙门式加工中心焊接横梁 结构与优化

赵德宏,季晓俊,陆 峰,吴 畏,闫广宇

(沈阳建筑大学机械工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘 要 目的 分析异型石材锯铣复合加工中心的工况,提出一种焊接式横梁的结构设计与优化方法,以提高关键部件横梁的动、静态特性。方法 将横梁焊接工作过程中的各肋板作为独立单元,建立数学模型,设置边界条件,应用连续体 ICM 拓扑优化方法,对横梁肋板结构优化和肋板的分布进行设计规划。结果 应用 ICM 法改进设计的异型石材锯铣加工中心横梁,在保证加工精度要求的前提下,其整体质量可以降低 24.18%,生产成本较低约 6.91%。结论 该 ICM 拓扑优化方法有效地降低了优化求解规模和约束数目,计算效率得到提高,打破了传统经验设计的单一化,为今后的制造业结构轻量化设计提供了一种新思路。

关键词 异型石材加工中心;焊接横梁;ICM 拓扑优化;动、静力学分析

中图分类号 TH12

文献标志码 A

Design and Optimization of Gantry Machining Center Welding Crossbeam Structure Based on the ICM

ZHAO Dehong, JI Xiaojun, LU Feng, WU Wei, YAN Guangyu

(School of Mechanical Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: The aim of this paper is to analyze the working condition of the multi-type stone sawing milling center, study the structure design and optimization method of a welded beam, and improve the dynamic and static characteristics of key component beams. Therefore, a kind of welding cross-beam structure design and optimization method are studied, through each floor crossbeam welding in the process of working as an independent unit, establish the mathematical model, and use continuum ICM topology optimization method, to optimize the structure of the crossbeam floor and plan the distribution of floor. Applying this method to improve design of special shape stone and milling machining center crossbeam, and meeting the machining accuracy, its overall quality reduce 24.18%, and reduce production costs by about 6.91%. This ICM topology optimization method

收稿日期:2016-05-16

基金项目:国家十二科技支撑计划项目(2011BAJ02B07);教育部创新团队项目(IRT_15R45);辽宁省教育厅科学研究项目(L2015447);沈阳市科技项目(F16-234-7-08);高档石材数控加工国家(地方)联合工程实验室开放基金装备与技术(SJSC-2015-2)

作者简介:赵德宏(1980—),男,副教授,博士,主要从事数控加工装备设计及理论研究。

reduces the size of optimization and the number of constraints, improves the computational efficiency, and breaks the simplification of traditional empirical design, which provides a new idea for the light quantitative design of manufacturing structure in the future.

Key words: heterotypic stone processing center; welding crossbeam floor; ICM topology optimization; dynamic and statics analysis

龙门式机床作为现代制造业中应用最广泛的一种机床,具有结构刚度高、加工效率高、加工跨距大等优点。其中,横梁是龙门式加工中心的重要部件,决定着整个机床的性能。现阶段大量的焊接结构件^[1]已经取代了传统的铸件结构件,其原因是:焊接结构件生产周期短、质量轻、所需设备相对简单(不需木模制作和熔炼设备)、改型快等优点,尤其是在制造大型复杂的结构件时深受制造商的青睐。横梁结构的传统设计方法是经验设计,通过大量的实践积累而来,随着拓扑优化方法的发展,已经渗透在横梁的整体和局部设计,这推动了结构设计多样化、产品高性能化进程。

连续体结构拓扑优化^[2]在制造业领域应用日益广泛,在实现智能化、自动化、产业化具有重要的意义。它是一种根据约束、载荷及优化目标寻求结构内材料最佳分配的优化方法。连续体结构拓扑优化方法发展历史悠久, Bendsoe 等最早提出了均匀化方法,通过引入微结构以孔尺寸为参数,改变了拓扑结构^[3]。随后 Mlejnek 等根据均匀化方法提出了变密度法,以结构柔度最小为目标建立变密度拓扑优化模型,解决了多工况下结构拓扑优化问题^[4]。谢亿民^[5]等改进并提出了渐进结构优化法,通过从模型中删除无效材料,使结构趋于优化,但是它迭代次数较多,计算效率较低。随后,隋允康等^[6]研究了频率、位移约束等拓扑优化,提出了独立连续映射(ICM)。ICM 法至今在三维结构的几何形状的优化设计中还广泛运用,它吸取了变厚度法和变密度法不需要构建微结构的优点,克服了变密度法无法处理多工况的问题,降低

了解决规模和约束数目,计算效率得到提高。基于此,笔者以异型石材锯铣加工中心的横梁为研究目标,建立 ICM 连续体结构拓扑优化模型,利用 ANSYS 对横梁肋板整体进行结构,在高转速、低精度的实际工况约束下,分析比较 5 种不同肋板数横梁的静刚度和前六阶固有频率,得出了最优的横梁结构,并验证其动、静态特性以及实际加工的经济成本。

1 ICM 方法结构拓扑优化模型的建立

ICM 方法将给定的初始设计区域离散成适当和足够多的子区域,形成若干单元组成的基结构,在 i 单元子域内拓扑变量 t_i 认为是一种常数, t_i 的取值为 0~1,表示从有到无的过渡状态,从而将离散的模型映射成连续模型^[7-9]。在 ICM 方法基础上,笔者提出以质量最小为目标函数,约束条件为结构变形量最小也等价于结构的刚度最大的拓扑优化方法,其模型如下:

$$\begin{cases} \text{find } t = (t_1, \dots, t_N)^T, \\ \text{Min } M = \sum_{i=1}^n f(t_i) m_i^0, \\ \text{s. t. } \sigma_i \leq f(t_i) \bar{\sigma}_i^0, \\ 0 \leq t_i \leq 1, (i = 1, \dots, N). \end{cases} \quad (1)$$

式中: t_i 为单元 i 的独立连续拓扑变量 ($i = 1, 2, \dots, n$); σ_i 为单元 i 的 Von. Mises 应力; $\bar{\sigma}_i^0$ 为单元 i 的固有许用应力; m_i^0 为单元 i 的固有质量; n 为单元总数; $f(t)$ 为过滤函数,单元性质参数识别采用如下公式:

$$\begin{cases} m_i = f_m(t_i) m_i^0, \\ \bar{\sigma}_i = f_\sigma(t_i) \bar{\sigma}_i^0, \\ k_i = f_k(t_i) k_i^0. \end{cases} \quad (2)$$

式中: $m_i, \overline{\sigma_i}, k_i$ 分别为单元质量、单元许用应力、单元刚度; $m_i^0, \overline{\sigma_i}^0, k_i^0$ 分别为单元固有质量、单元固有许用应力、单元固有刚度。

应用感性准则方法计算 i 单元的应力拓扑解: $t_i^{(V+1)} = f^{-1}(\sigma_i/\overline{\sigma_i}^0)$. 力学意义上来看, $t_i^{(V+1)}$ 反映了单元应当保留为“有”的权数值, 反映了对传力作用的大小. 采用“过滤”和“取舍”来决定单元的删除与保留^[10].

(1) 过滤. 借助于 $f(t_i)$ 表示 t_i 对 0 或 1 的靠近程度, 也就是计算相应的单元在“有”与“无”转换过程中的状态.

(2) 取舍. 亦称为“反演”, 执行单元的删除与保留. 由连续型变量向离散型变量的反演是借助于 $f(t_i^{(V+1)})$ 同阈值 $D^{(V+1)}$ 的比较而实现的, 其算法为

$$t_i = \begin{cases} 1, & f(t_i^{(V+1)}) \geq D^{(V+1)}, \\ 0, & f(t_i^{(V+1)}) < D^{(V+1)}. \end{cases} \quad (3)$$

2 横梁拓扑优化设计

横梁结构设计应在满足机床工作性能的前提下, 考虑其工艺和加工质量, 满足焊接件的要求, 同时提高整体的静刚度和动态特性, 达到轻量化设计. 通过使用 ICM 拓扑优化对横梁肋板进行设计以及合理布置肋板数量来设计横梁.

2.1 横梁负载分析及肋板拓扑优化设计

笔者的研究对象是某异型石材锯铣复合加工中心^[11], 如图 1 所示. 该结构为龙门式机床, 能够实现六轴运动和五轴联动, 主要进行异型石材曲线、曲面锯铣复合加工. 该机床由床身、工作台、横梁、立柱和主轴单元构成, 根据它的工况分析, 横梁部件承载着加工产生的切削力、自身重力、移动部件和固定部件相对运动时导轨面间的摩擦力等, 因此横梁结构特性直接影响机床的工作性能. 在优化过程中应将机床设置为常态下的负载条件, 则横梁受到自身和滑鞍以及上面组件的重力的作用.

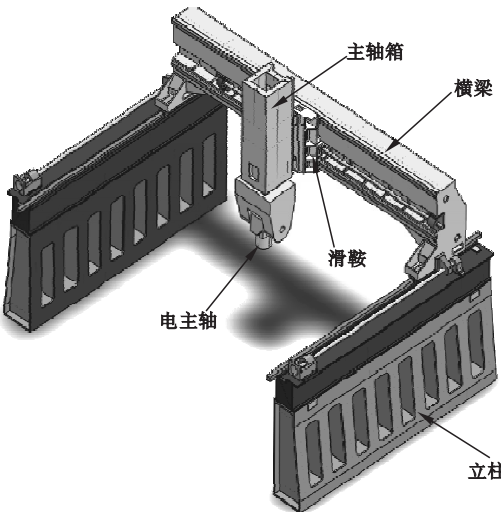
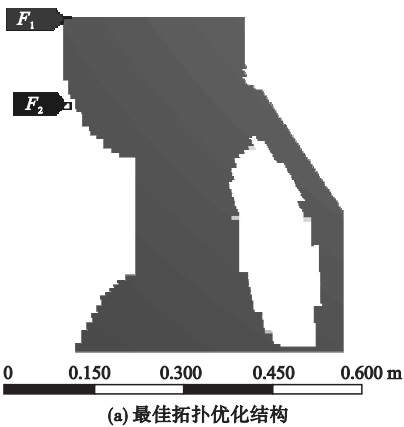
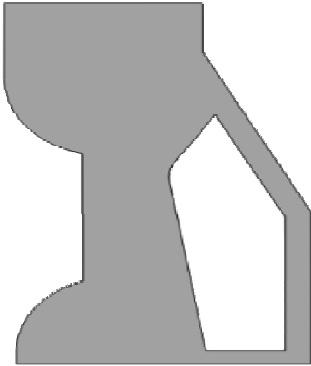


图 1 异型石材加工中心结构简图
Fig. 1 Structure diagram of heterotypic stone processing center

该横梁实际长为 4 504 mm, 整体分析效率低、耗费长, 结果不稳定, 故笔者选择一部分为研究对象, 即选择横梁肋板进行拓扑优化分析^[12-15]. 通过分析, 肋板采用底面固定, 所受的力来自于上、下导轨结点向下的重力 F_1 、 F_2 . 优化的目标函数为肋板的重量, 约束函数: 应力小于 343 MPa (该材料为 16Mn, 屈服极限为 343 MPa), 通过使用 ANSYS 软件进行优化计算, 经迭代 16 次, 取 ISOsurface (等值面) = 0.52, 得到结果如图 2(a) 所示. 根据拓扑图密度^[16]单元的重要程度重新设计肋板结构, 优化后肋板结构如图 2(b) 所示.





(b) 拓扑优化后模型

图 2 横梁肋板结构拓扑优化

Fig. 2 Topologize the structure of crossbeam rib

经过 ANSYS 分析,对肋板优化前后比较如表 1 所示.由表可知:根据拓扑优化得到的肋板重量减少了 25.80%,达到了轻量化设计的目的,应力提高了 12.15%,结构更加稳定,复合设计要求.

表 1 肋板优化前后比较

Table 1 The comparison results of the crossbeam rib

| 模型 | 质量/kg | 最大变形量/mm | 最大应力/MPa |
|---------|--------|----------|----------|
| 原肋板 | 24.273 | 0.154 | 4.542 |
| 拓扑优化后肋板 | 18.011 | 0.144 | 5.170 |

2.2 肋板的焊接工艺

该横梁结构材料为 16Mn,具有综合性能高、低温性能强、冷冲压性能稳定、焊接性能和可切削性能好的特点.肋板在横梁中承受抗弯曲和抗扭转,根据《焊接件通用技术条件》(JB/T5000.3—1998)规定,焊接方式选择角焊接^[17],所有焊缝为满焊,焊接宽度不能低于最小厚度的 0.7 倍.焊接处理过程为焊接,时效处理,粗加工,二次时效处理,精加工.

2.3 优化后肋板的布置

将优化得到的肋板与横梁结构结合,保证其他条件不变的情况下,改变肋板在横梁内的数量,来分析得到横梁的整体变形量和固有频率与肋板个数之间的变化关系.笔者设计出肋板数分别为 3、4、5、6、7 个的横梁,

使用 SolidWorks 分别对其建模,然后在 ANSYS 上进行静态和模态分析,这 5 种横梁结构的静力学分析得到的最大变形量如图 3 所示.由图可知,肋板数从 3 个增加到 5 个时,横梁的整体最大变形量呈大幅度减少的趋势,从 5 个增加 7 个时,最大变形量减少的幅度变小,几乎呈直接趋势,因此肋板数选择 5~7 个为最佳.

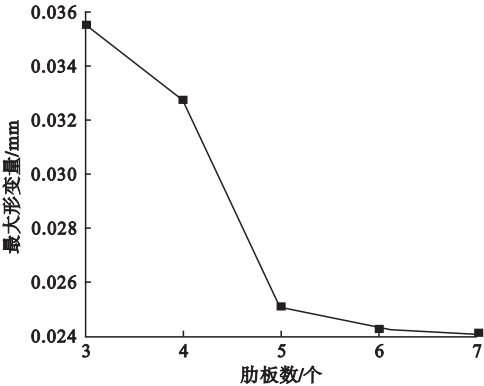


图 3 3~7 个肋板数横梁变形量

Fig. 3 The crossbeam deformation of 3~7 rids

通过模态分析^[18]得出这 5 种不同横梁的前六阶固有频率的对比折线图,如图 4 所示.由图可知,这 5 种横梁的前两阶固有频率变化不明显,从 3 到 6 阶时,横梁的固有频率随着肋板数的增加逐渐增大,在六阶频率时趋势略明显,肋板数达到 5 个左右时,固有频率最大,随后开始缓慢减小.

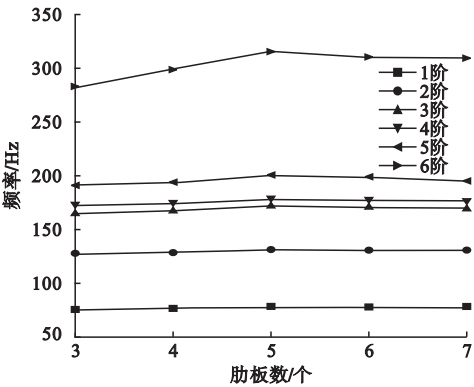


图 4 3~7 个肋板数横梁前六阶固有频率

Fig. 4 The inherent frequency of the six stages of 3~7 rids

根据该频率曲线的走势,结合图4的变化情况,可以得出肋板数为5个时,横梁的静、动态性能相对较好,因此建立新横梁如图5所示。

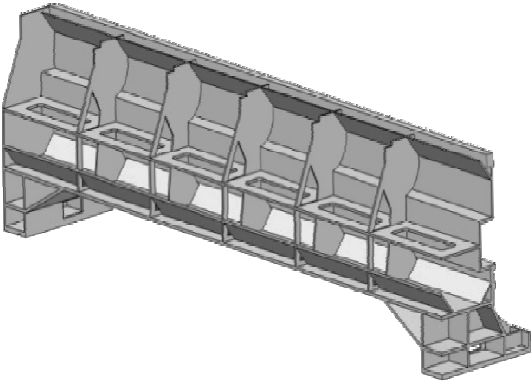


图5 横梁内部布局

Fig. 5 The crossbeam internal layout

3 优化后横梁的特性验证

3.1 动、静态特性验证

静特性态分析中,正确地确定载荷是确保有限元结果准确性的前提。图6为横梁组件,它主要是由横梁、滑鞍和主轴箱构成,根据横梁受力分析如图7所示。

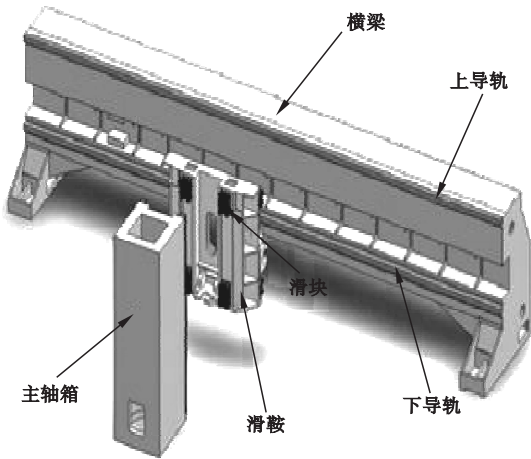


图6 横梁组件

Fig. 6 The crossbeam component

横梁的受力集中分布在六个滑块A、O、B、A'、O'、B'上,当刀架在横梁中间位置,主轴箱向下伸出最长时为危险工况。该机床采用的是金刚石锯片进行锯切加工,影响锯切

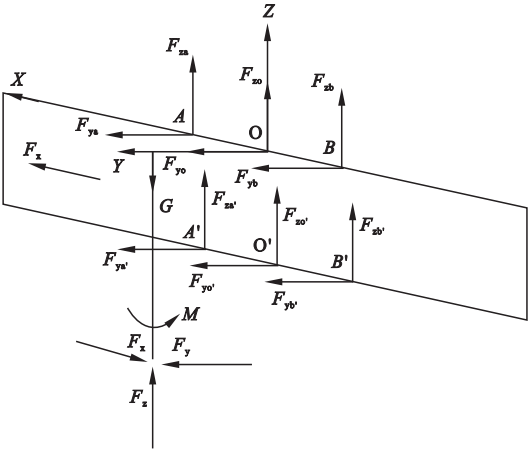


图7 横梁组件力学简图

Fig. 7 The mechanical diagram of crossbeam component

加工效率的主要参数有切削速度 v_c 、刀具进给速度 v_f 和切削深度 a_p ,利用正交试验^[19]设计的方法通过对锯切加工中的工艺参数进行试验研究,结合组件的受力关系总结出了切削力与切削速度 v_c 、刀具进给速度 v_f 和切削深度 a_p 之间的关系:

$$\begin{cases} F_x = 0.028 v_c^{-0.307} v_f^{1.520} a_p^{0.286}, \\ F_{ya} + F_{yo} + F_{yb} + F_{ya'} + F_{yo'} + F_{yb'} = \\ F_y = 1.634 v_c^{-0.0624} v_f^{0.660} a_p^{0.474}, \\ F_{za} + F_{zo} + F_{zb} + F_{za'} + F_{zo'} + F_{zb'} = \\ F_z = 0.155 v_c^{-0.238} v_f^{1.126} a_p^{0.695}. \end{cases} \quad (4)$$

根据参数 $v_c=40\text{ m/s}$, $v_f=5\,000\text{ mm/min}$, $a_p=20\text{ mm}$,可得主轴端在危险工况的受力情况:

$$\begin{cases} F_x = 8\,917\text{ N}, \\ F_y = 1\,475\text{ N}, \\ F_z = 7\,389\text{ N}. \end{cases} \quad (5)$$

将 Soildworks 简化后的横梁组件三维模型导入 ANSYS 中,材料属性以及有限元单元的选择如表2所示。

对横梁组件进行静刚度分析,横梁优化前后的静态分析和模态分析对比分析结果见表3,优化后横梁的总位移云图结果如图8所示。

表 2 有限元设置

Table 2 The finite element layout

| 材料 | 弹性模量/MPa | 泊松比 | 密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) | 长度/mm | 结构单元 | 网格划分类型 | 单元数量/个 |
|------|------------------|------|--------------------------------------|-------|----------|--------|--------|
| 16Mn | 2.12×10^5 | 0.31 | 7 870 | 15 | Solid187 | 自由网格划分 | 39 177 |

表 3 横梁优化前后的静态分析和模态分析对比结果

Table 3 The comparison results of static analysis and modal analysis of the crossbeam optimization

| 模型 | 工况 | 质量/ kg | 最大变形量/mm | | | | 最大应 力/MPa | 固有频率/Hz | | | |
|-------|---------|-----------|----------|-------|-------|-------|--------------|---------|--------|--------|--------|
| | | | X 向 | Y 向 | Z 向 | 总位移 | | 1 阶 | 2 阶 | 3 阶 | 4 阶 |
| 铸造横梁 | 主轴端处于 3 | 104.1 | 0.039 | 0.007 | 0.020 | 0.052 | 7.171 | 50.23 | 77.35 | 98.08 | 101.59 |
| 优化后横梁 | 横梁中间 | 2 353.4 | 0.033 | 0.006 | 0.016 | 0.044 | 5.063 | 77.56 | 131.04 | 172.23 | 178.04 |

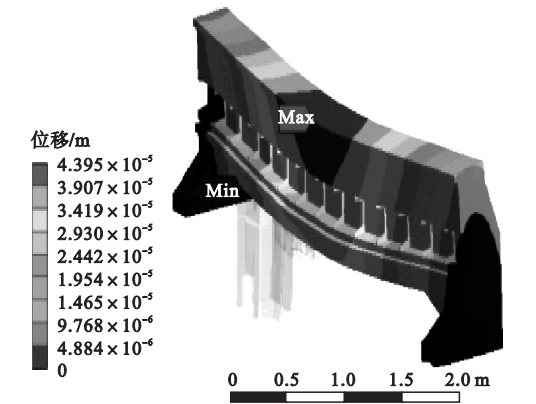


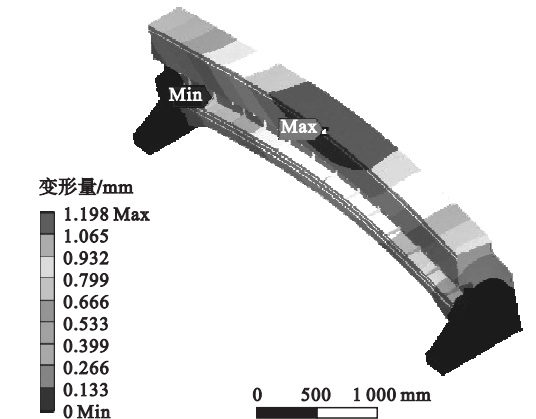
图 8 横梁组件中优化后横梁的总位移云图

Fig. 8 The total displacement contourplot of optimized beam in beam assembly

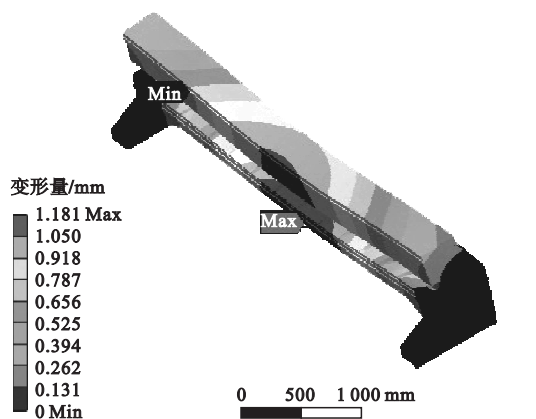
由图 8 和表 3 可知,优化后的横梁在自重和外载的作用下最大变形量为0.044 3 mm,

比铸造横梁减少了 15.13%,根据石材加工工艺技术要求,允许最大弯曲挠度为 0.1 mm,故横梁满足静刚度要求.横梁前四阶固有频率都得到了提高,总重量减轻了 24.18%,优化效果较好.优化后横梁的前四阶振型情况如图 9 所示.

由图 9 可知:优化后的振型均为整体振型,第 1 阶振型为横梁沿 Z 向振动,第 2 阶振型为横梁沿 X 向振动,第 3 阶振型为横梁右端呈扭摆动,第 4 阶振型为横梁左端呈扭摆动并且中部沿 Z 向轻微振动,经过以上的振动分析得出优化后的横梁大都以弯曲和摆动为主,有效地减小振型的位移,从而保证了横梁上部工作头的加工精度和稳定性.



(a) 第1阶振型



(b) 第2阶振型

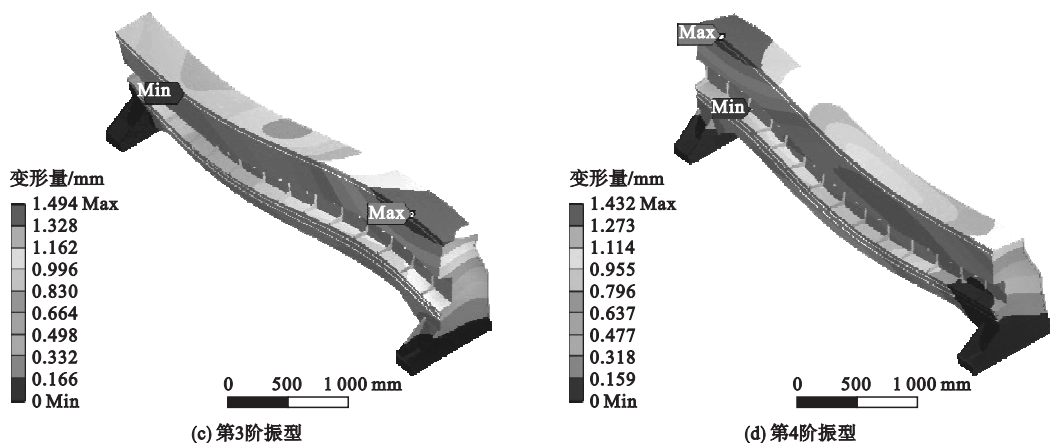


图9 优化后横梁前六阶振型云图

Fig. 9 The six stages vibration mode plot of optimized crossbeam

3.2 制造成本比较

优化后的横梁结构用料比例减少,根据制造业的材料选用以及焊接结构成本计算^[20]和《全国机电工业铸件出厂价计算办法》总结出焊接成本和铸造成本的主要构成:焊接成本=加工成本+二次回火成本+材料成本;铸造成本=铸件材料成本+(总工时费用成本/总工时)×每吨用的工时费+木型费。其中,焊接加工成本包括焊条/焊丝、焊剂、人工费、电费、焊接设备折旧费等。

结合成本的构成和焊接横梁实际制造情况,该横梁生产成本大约4.38万元,比铸造横梁的制造成本4.72万元,降低了6.91%左右,因此优化后的焊接横梁对机床生产和经济效益的提高起着决定性的作用。

4 结 论

(1)连续体ICM拓扑优化方法成功的应用于焊接横梁结构中,使得设计具有算法简单、收敛速度快和稳定性好的特点。

(2)在危险工况下,对横梁进行静、动态分析,优化后横梁不仅在整体质量上减少了24.18%,生产成本降低了6.91%,而且结构静刚度和固有频率得到了提高,改善了原结构的振动特性,表明拓扑优化得到了较好的结果。

参考文献

- [1] 胡喜磊. 焊接结构件的疲劳分析与研究[D]. 太原:太原科技大学,2013.
(HU Xilei. Fatigue analysis and research of welding structure [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Science and Technology, 2013.)
- [2] 夏天翔,姚卫星. 连续体结构拓扑优化方法评述[J]. 航空工程进展,2011(1):1-11.
(XIA Tianxiang, YAO Weixing. Review on continuum structure of topology optimization method [J]. Aviation engineering progress, 2011 (1):1-11.)
- [3] DORMIEUX L, LEMARCHAND E, KONDO D, et al. Strength criterion of porous media: application of homogenization techniques [J]. Journal of rock mechanics and geotechnical engineering, 2017, 9(1):62-73.
- [4] 王思文,陈敏志,张旭明. 基于自适应有限元的双向渐进结构优化法[J]. 科学技术与工程,2013,13(13):3786-3789.
(WANG Siwen, CHEN Minzhi, ZHANG Xuming. Bi-directional evolutionary structural optimization method based on adaptive finite element analysis [J]. Science technology and engineering, 2013, 13(13):3786-3789.)
- [5] 谢亿民,左志豪,吕俊超. 利用双向渐进结构优化算法进行建筑设计[J]. 时代建筑,2014(5):20-25.
(XIE Yimin, ZUO Zhihao, Lü Junchao. Architectural design through bi-directional evolutionary structural optimization [J]. Time architecture, 2014(5):20-25.)
- [6] 隋允康,边炳传. 屈曲与应力约束下连续体结构的拓扑优化[J]. 工程力学,2008(8):

- 6-12.
(SUI Yunkang, BIAN Bingchuan. Topology optimization of continuum structures under buckling and stress constraints [J]. Engineering mechanics, 2008(8): 6-12.)
- [7] 易桂莲. 移植 ICM 方法拓展的结构拓扑优化 SIMP 方法[D]. 北京: 北京工业大学, 2014.
(YI Guilian. Expanded SIMP method for structural topology optimization by transplanting ICM method [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2014.)
- [8] 尚珍. 结构拓扑优化中不同过滤函数间关系的探讨[J]. 力学与实践, 2011(2): 52-57.
(SHANG Zhen. Structural topology optimization in the relationship between different filter function [J]. Mechanics and practice, 2011(2): 52-57.)
- [9] 李芳, 张建润, 卢熹. 基于 ICM 法的零件拓扑优化方法应用研究[J]. 电子机械工程, 2008(1): 40-42.
(LI Fang, ZHANG Jianrun, LU Xi. Application study of ICM based topology optimization [J]. Electronic mechanical engineering, 2008(1): 40-42.)
- [10] MU Xuan, ZHANG Ke, ZHAO Dehong. The topological optimization design of cross beams structure of shaped stone turning-milling CNC (HTM50200) [J]. Advanced materials research, 2013, 697: 2725-2728
- [11] 吴玉厚, 赵德宏. 异型石材数控加工装备与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
(WU Yuhou, ZHAO Dehong. Special shape stone CNC processing equipment and technology [M]. Beijing: Science Press, 2011.)
- [12] 王晓煜, 贾振元, 杨帆. 龙门加工中心横梁部件的拓扑优化设计与分析[J]. 制造技术与机床, 2009, 11: 64-68.
(WANG Xiaoyu, JIA Zhenyuan, YANG Fan. The topological optimization design and analysis for gantry machine tool crossbeam component [J]. Manufacturing technology and machine tool, 2009, 11: 64-68.)
- [13] 饶柳生, 侯亮, 潘勇军. 基于拓扑优化的机床立柱筋板改进[J]. 机械设计与研究, 2010, 26(1): 87-92.
(RAO Liusheng, HOU Liang, PAN Yongjun. Improvement of the rib plate in machine tools column based on topology optimization [J]. Machine design and research, 2010, 26(1): 87-92.)
- [14] SOKOLOWSKI J, ŻOCHOWSKI A. Shape and topology sensitivity analysis for elastic bodies with rigid inclusions and cracks [J]. Advanced structured materials, 2010, 1: 75-98.
- [15] 张森. 基于灵敏度和有限元分析的龙门加工中心横梁结构轻量化设计[D]. 江苏: 南通大学, 2014.
(ZHANG Sen. Light weight design of gantry machining center crossbeam based on sensitivity and finite element analysis [D]. Jiangsu: Nantong University, 2014.)
- [16] 王珍, 康琳, 单洪, 等. 基于随机几何的网络拓扑密度控制模型研究[J]. 计算机应用研究, 2017, 34(1): 170-172+176.
(WANG Zhen, KANG Lin, SHAN Hong, et al. Research on network topology density control based on stochastic geometry [J]. Application research of computer, 2017, 34(1): 170-172+176.)
- [17] 苏延浩. 立角焊自动焊接机床结构设计[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2015.
(SU Yanhao. Structure design of an automatic machine for vertical fillet welding [D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2015.)
- [18] 吴玉厚, 吴岗, 张珂, 等. 异型石材多功能数控加工中心关键部件的模态分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2009, 25(1): 165-169.
(WU Yuhou, WU Gang, ZHANG Ke, et al. Modal analysis of key components of multi-function CNC machine tool for irregularity stone [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2009, 25(1): 165-169.)
- [19] 李希朝. 基于正交实验的花岗石高效锯切技术实验研究[D]. 济南: 山东大学, 2010.
(LI Xichao. The orthogonal experiment of granite sawing experiment research based on technology of high efficiency [D]. Ji'nan: Shandong University, 2010.)
- [20] 秦路, 罗宇. 基于有限元模型的焊接结构成本计算方法[J]. 热加工工艺, 2016, (15): 208-211.
(QIN Lu, LUO Yu. Cost estimation of welding structure based on finite element model [J]. Hot working technology, 2016(15): 208-211.)