

文章编号: 1006-2343 (2010) 01-087-06

基于拓扑优化的机床立柱筋板改进

饶柳生, 侯 亮, 潘勇军

(厦门大学 机电工程系, 厦门 361005, E-mail: hliang@xmu.edu.cn)

摘要: 在拓扑优化的基础上, 提出根据拓扑优化结果改进筋板布局的方法, 并结合案例, 构造了基于相对密度法的连续体结构动力学拓扑优化设计数学模型, 以结构的相对密度为设计变量, 分别以柔度最小化、一阶固有频率最大化为目标和两者结合的多目标进行拓扑优化。在采用多目标优化时, 对两个目标用加权和方法进行折衷处理, 通过设置权值来确定两者在优化中所起作用大小。优化后得出不同的密度云图, 根据密度云图所示材料分部, 改进筋板布局, 达到提高机床动、静态特性的目的。

关键词: 拓扑优化; 机床立柱; 筋板; 密度云图; 多目标

中图分类号: TH16 **文献标识码:** A

Improvement of the Rib Plate in Machine Tools Column Based on Topology Optimization

RAO Liu-sheng, HOU Liang, PAN Yong-jun

(Department of Mechanical and Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: By means of topology optimization technique, an approach doing improving the layout of rib plates directed by the outcome of topology optimization is proposed herein. In consideration of actual engineering scenarios, the mathematical models of structural dynamic characteristic topology optimal design on continuum structures were established, then this model carries out topology optimization of pillar structures by making the relative density of the structure as the design variables with minimizing the compliance, maximizing the first order natural frequency as the objectives and a combination of the two as a multi-objective respectively. When optimizing with multi-objective, compromise programming method is adopted to process the two objectives and the effects of the two objectives are determined by the weight. After optimization, different density nephograms are created. With the aid of the material distribution shown in density nephogram, the layout of rib plate is re-engineered and the static and dynamic performance of the investigated machine tool is therefore remarkably enhanced.

Key words: topology optimization; column; rib plate; density nephogram; multi-objective

在机床各部件设计中, 引入仿真技术可大大缩短机床开发周期, 提高其性能。随着机床向高精度方向发展, 对机床动、静态特性要求也越来越高。影响机床特性的因素有很多, 除了选取合理的尺寸, 提高接触面的刚度外, 合理的布置筋板也是提高机床刚度的重要方法。文献 [1] 结合拓扑优化结果, 改进筋板布局, 提高了机床的动、静态特性。目前拓扑优化多集中在单目标优化方面^[1,2], 但在实际的运用中, 存在许多多个目标需要同时优化的例子, 单目标拓扑优化往往满足不了结构强度要求^[3], 随着理论研究的深入以及计算机、CAE 软件技术的快速发展, 出现了一些多目标优化的方法, 如 optistruc 优化模块中的尺寸优化、形状优化等, 但是这些都不能得到材料的最佳分布情况, 存在一定的局限性。

机床立柱对机床特性影响很大, 特别是大尺寸的立柱,

对机床精度有决定性影响。现在以机床立柱为研究对象, 借助有限元分析软件 hyperworks 中优化模块 optistruc, 通过设置单优化目标和多优化目标进行拓扑优化。并根据优化结果和实际筋板布置经验, 更改板筋布局, 使机床部件动静特性都有一定程度提高。

1 拓扑优化方法简介

拓扑优化是一种数学方法, 能在给定的空间结构中生成优化的形状及材料分布, 其目的在于用最少的材料得到结构的最佳性能。拓扑优化的研究是从最具代表性的桁架开始的, 拓扑优化理论的解析方法可追溯到由 Michel 提出的 Michel 桁架理论^[4]。但此后多年人们在这个领域没有取得大的研究进展, 直到 1964 年 Dom Gomory, Greenberg 等人提出了基结构法^[5], 将拓扑优化引入到数值计算领域, 才使拓扑优化活跃起来。常见的连续体结构的拓扑优化方法有均匀化法、渐近结构优化法和相对密度法。

下面主要介绍基于相对密度法的 SMP 方法的拓扑优化的运用。相对密度法^[6]是受均匀化方法的启发而产生的, 其

收稿日期: 2009 - 08 - 31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (70772093); 福建省高等学校新世纪优秀人才支持计划资助项目; 厦门市科技计划项目 3502 Z 20090003

基本思想是人为地引入一种假想密度在 0~1 之间可变的材料,0 和 1 分别代表空和实,并假定材料的宏观弹性常量与其密度成非线性关系。优化过程中以单元设计变量的大小来决定单元的取舍。相对于其他优化方法,相对密度法设计变量少、计算求解过程简单,但是会在优化过程中产生许多介于 0 和 1 之间的单元,给制造带来困难。SMP 方法是在相对密度基础上引入惩罚因子来解决这个问题,实际工程中多采用 SMP 法来解决问题。

2 基于 SMP 法的连续体拓扑优化数学模型

2.1 静力拓扑优化数学模型

在静载荷的条件下,为了使结构变形最小,常常以结构的刚度最小化为目标进行优化。但在处理该类问题时,通常把刚度最大问题等效为柔度最小问题来研究,而柔度可用应变能来定义。以柔度最小化为目标,以有限元网格划分后各个单元的相对密度为设计变量^[2,7],采用设计区域的体积作为约束的数学优化模型的推导过程如下。

查相关资料,柔度定义为,

$$C = U^T F \tag{a}$$

式中: U 为位移矢量, F 为所受力, C 为结构柔度。结构在受力不变的情况下,柔度越小,变形越小。根据相关资料,应变能定义为,

$$S = \frac{1}{2} U^T F, \quad S \text{ 为应变能} \tag{b}$$

比较公式 (a) 和 (b) 可知,结构的柔度是结构应变能的 2 倍。在相同受力情况下,最小化应变能就是最小化柔度。因为结构总应变能等于每个离散单元应变能之和,所以有

$$S = \sum_{e=1}^N S_e, \quad S_e \text{ 为单元应变能} \tag{c}$$

$$C = \sum_{e=1}^N C_e, \quad C_e \text{ 单元柔度} \tag{d}$$

根据胡克定理有

$$F = KU, \quad K \text{ 为结构刚度矩阵} \tag{e}$$

将公式 (e) 代入公式 (a) 得

$$C = U^T KU \tag{f}$$

$$C^e = u_e^T k_e u_e \tag{g}$$

式中: u_e 为单元位移; k_e 为优化后单元刚度矩阵,将 (g) 代入 (d) 可得:

$$C = \sum_{e=1}^N u_e^T k_e u_e \tag{h}$$

SMP 方法有如下两个假设: (1) 离散单元中材料的属性 (如弹性模量) 是常数,设计变量定义为离散单元的相对密度 x_e ,如果初始单元密度为 x_0 ,为优化后单元密度,那么有 $k_e = x_e k_0$; (2) 离散单元的材料属性为指数变化,如果 k_0 是初始单元刚度矩阵,那么有 $k_e = (x_0/x_e)^p k_0$ 。

根据以上两个假设以及公式 (h),以最小化结构柔度为目标,优化后的体积作为约束,可得优化数学模型:

$$\begin{aligned} \text{Minimize } C(x_e) &= \sum_{e=1}^N (x_e)^p u_e^T k_0 u_e \\ \text{Subject to } \frac{V}{V_0} &\leq 1, \quad V = \sum_{e=1}^N x_e V_e \\ 0 < x_{\min} &\leq x_e \leq x_{\max} \leq 1 \end{aligned} \tag{1}$$

在优化时,如果某单元的设计变量 x_e 接近在 x_{\max} 时,该单元

保留,反之若该单元的设计变量 x_e 接近 x_{\min} 时,该单元将被删除,直到满足条件体积约束条件。为 0 至 1 之间一数值, V_0 为设计区域原体积, V 为优化后的体积。 x_{\min} 为单元相对密度下限, x_{\max} 为单元相对密度上限。 e 为单元编号, p 为惩罚因子,惩罚因子是对中间密度单元项进行惩罚,以尽量减少结构中间密度单元的数目,使结构单元密度尽可能趋近 0 或 1,从而避免棋盘格现象。

2.2 动力拓扑优化数学模型

结构在振动时,高阶模态的振幅较小,对结构影响较小,低阶模态能反映结构的动态特性。以一阶固有频率最大值作为目标,体积为约束,在无阻尼振的情况下,结构优化的数学模型^[1]如下:

$$\begin{aligned} \text{Max } \omega_1(x_e) &= \frac{\phi_1^T K \phi_1}{\phi_1^T M \phi_1} \text{ Subject to } (K - \omega_1^2 M) \phi_1 = 0 \\ \frac{V}{V_0} &\leq 1, \quad V = \sum_{e=1}^N x_e V_e, \quad \omega_1 = \omega_1(x_e) \\ K &= \sum_{e=1}^N k_e, \quad M = \sum_{e=1}^N m_e \\ 0 < x_{\min} &\leq x_e \leq x_{\max} \leq 1 \end{aligned} \tag{2}$$

固有频率为设计变量 x_e 的函数,在优化时,如果某单元的设计变量 x_e 接近在 x_{\max} 时,该单元保留,反之若该单元的设计变量 x_e 接近 x_{\min} 时,该单元将被删除,直到满足条件体积约束条件。 ω_i 为各阶模态固有频率值, ϕ_i 为第 1 阶特征值 ω_i 相关的特征向量, M 为结构质量矩阵, m_e 为单元质量矩阵。其它参数含义和说明同静力拓扑优化数学模型。

2.3 多目标拓扑优化方法

在日常工作中,单目标的优化往往不能满足需要。但是当设计目标中含有多个子目标时,各个子目标之间可能会有冲突,不能同时达到最优。也就是说某个设计点对子目标 A 为最佳,对子目标 B 则未必是最佳,反之亦然。例如柔度最小时,固有频率不一定最大,固有频率最大时,柔度不一定最小。如果所有的子目标之间均没有冲突,将很容易求得问题的最优解,使所有目标函数同时达到最优。

传统的多目标优化问题采用线性加权法和法将多目标问题转化为单目标问题求解,但对于非凸优化问题来说,该方法不能确保得最优解。运用折衷规划法和功效函数法^[8-10]对多个子目标进行进行处理,将目标优化问题转换为单目标优化问题。

折衷规划法的基本思想是合理地把多个子目标结合成一个单目标。但是在合并时会遇到两个问题,一是当各子目标的性质不同时,直接合并各个子目标并不合理,另一个问题是设计者对各个子目标重视程度可能不同。第一个问题解决方法为在结合各子目标之前先将各子目标函数正规化,让目标函数值在 0 和 1 之间变化,第二个问题解决方法为在结合各子目标之前给每个子目标加上权重。

功效函数法是根据多目标规划原理,对每一项目标确定一个理想值和不允许值,计算各子目标实现理想值的程度,并以此确定各子目标的分数,再经过加权平均进行综合,从而评价被研究对象的综合状况。

结合以上两方法对柔度进行处理,可得到多工况下柔度拓扑优化目标函数:

$$\min C(x_e) = \left\{ \sum_{k=1}^m w_k^q \left[\frac{C_k(x_e) - C_k^{\min}}{C_k^{\max} - C_k^{\min}} \right]^q \right\}^{\frac{1}{q}} \quad (3)$$

式中: m 为载荷工况总数; w_k 为第 k 个工况的加权值; q 为惩罚因子, $q \geq 2$; $C_k(x_e)$ 为第 k 个工况的柔度目标函数; C_k^{\max} 、 C_k^{\min} 分别为第 k 个工况柔度目标函数的最大值(不允许值)和最小值(理想值)。目标函数值 C 越接近 0, 目标函数中子工况的柔度越接近其最小值, 当 C 值为 0 时, 结构在子工况下柔度都达到最理想状态。但实际情况下, 结构很难达到此状态, C 值只能接近 0, 子工况柔度会达到一个折衷值。

文中所举例子为单个工况, 为公式 (3) 的特例。

对于考虑多阶固有频率的优化问题, 也采用相同法进行处理, 这里只以一阶固有频率最大化为优化目标进行优化。

运用折衷规划法和功效函数法对柔度和一阶固有频率进行处理, 将多目标转化为单目标, 目标函数如下:

同时考虑柔度和固有频率的多目标拓扑优化目标函数^[8,9,10]如下:

$$\min R(x_e) = \left\{ w^2 \left[\sum_{k=1}^m w_k \frac{C_k(x_e) - C_k^{\min}}{C_k^{\max} - C_k^{\min}} \right]^2 + (1-w)^2 \left[\frac{\max - (x_e)}{\max - \min} \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

式中: $R(x_e)$ 为综合目标函数; w 为柔度目标函数的权重; \max 、 \min 分别为一阶固有频率目标函数的最大值(理想值)和最小值(不允许值), 用来消除量纲, 其他参数说明同式 (3)。R 值越接近其最小值 0, 子工况柔度和结构一阶固有频率越接近其最大值, 结构越接近最优状态。用 optistruct 中的自定义函数功能来定义本文中所提的多目标优化函数作为目标, 取柔度权重 0.5, 频率目标权重 0.5。

3 模型分析与拓扑优化

3.1 原模型静力和模态分析

本文以某型号落地镗铣加工中心的立柱为分析对象, CAD 模型如图 1 所示:

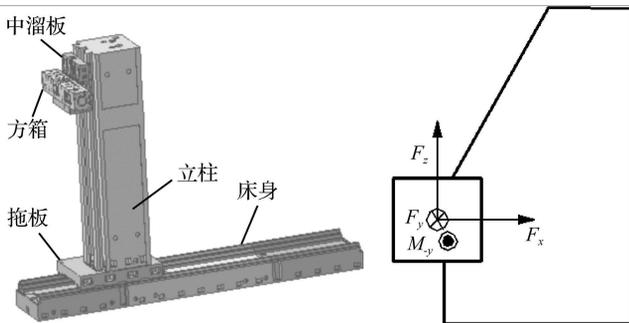


图 1 机床总装配图

图 2 机床加载示意图

为了方便加载, 节省计算时间, 只取立柱、中溜板和方箱为分析对象, 立柱下端为螺栓约束。受力示意图如图 2 所示, 机床铣头受水平 F_x 为 4 520 N, 竖直向上 F_z 为 15 065 N, 向里 F_y 为 8 286 N 和 y 负方向力矩大小为 936 000 N·mm。立柱高 5 100 mm, 前后端距离为 1 310 mm, 左右侧距离为 1 260 mm。材料为铸钢, 密度为 $7.25 \times 10^{-9} \text{ t/mm}^3$, 弹性模量为 $1.45 \times 10^5 \text{ Mpa}$, 泊松比为 0.25。接触面对机床的加工精度有很复杂的影响, 现主要研究机床立柱对加工精度及固有频率的影响, 忽略接触面的影响, 接触部分作刚性处理, 将三个部

件看成一个体。取中溜板位于最上方且方箱伸出最长的极限位置进行计算, 如图 3 所示, 立柱四侧筋板均采用井字形均匀布局, 如图 4 所示。通过 solidworks 建模导入 hypemesh 进行前处理, 得出四面体单元 590 043 个, 节点 186 035 个。调入 optistruct 模块对原模型进行静力和模态分析, 得出最大变形 0.238 7 mm, 变形图如图 5 所示, 查看生成的 out 文件, 可得前阶固有频率, 其中一阶固有频率为 22.67 Hz, 柔度为 $2.2775 \times 10^3 \text{ J}$ 。最大变形过大, 动刚度也较差, 不符合设计要求, 立柱筋板需要重新布置。将分析原模型得到的一阶固有频率和柔度作为多目标优化函数 (4) 中的不允许值 \min 和 C_k^{\max} , 为进一步多目标拓扑优化作准备。以此结果为基础进行拓扑优化, 机床的一阶固有频率会在原模型基础上增大, 柔度会在原模型基础上减小。

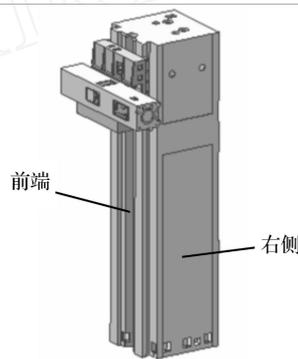


图 3 三部件装配图

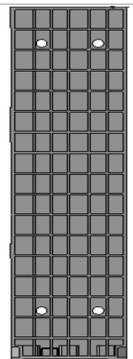


图 4 筋板布局图

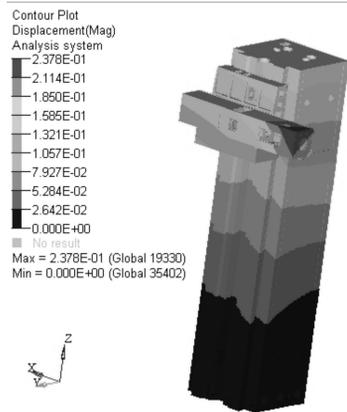


图 5 原模型受力变形图

3.2 拓扑优化

下面讨论利用拓扑优化所得结果对机床筋板布局进行改进, 提高机床的动、静态特性。分别以静态柔度最小, 一阶固有频率最大为目标进行拓扑优化, 并利用 OptiStruct 中提供的自定义函数来定义方程 (4), 把定义好的函数设为响应进行多目标拓扑优化, 最后得出优化迭代图和密度云图。拓扑优化对设计区域是比较敏感的, 优化区域的设置直接影响到优化的效果, 在优化设计的时候要尽量取较大的设计区域。本文所举例子中, 在立柱原模型基础上向内增加立柱板厚至筋板高度, 立柱原模型外壳、中溜板和方箱为非设计区域, 增加的部分为设计区域, 如图 6 所示。在 optistruct 中建立拓扑优化模型, 并设置相关控制参数进行优化。

以静态最小柔度为目标, 许可材料体积分数 0.3, 经过

15步迭代,静态最小柔度达到最小,得出迭代图(图7)和密度云图(图8),通过查看优化运算后生成的 out 文件,可得优化后结构的柔度为 1.3598E3J,将该值作为多目标优化函数(4)中柔度的理想值 C_k^{min} ,为多目标优化作准备。

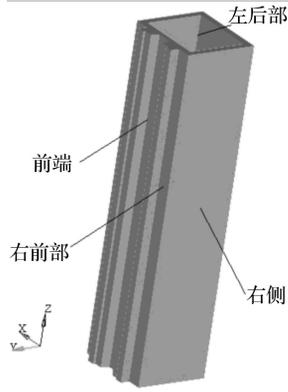


图 6 设计区域

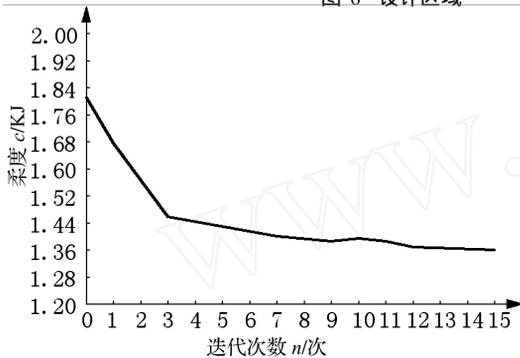


图 7 最小柔度目标迭代图

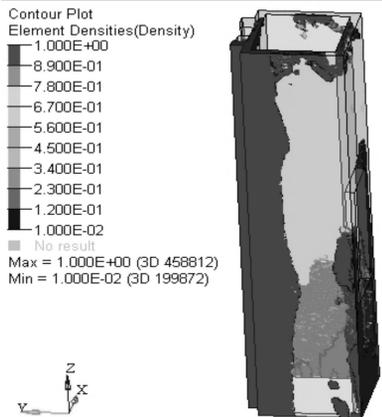


图 8 密度云图

以一阶固有频率最大为目标,许可材料体积分数为 0.3,经过 10次迭代,一阶固有频率达到最大,得出迭代图(图9)和密度云图(图10)。通过查看优化运算后生成的 out 文件,可得优化后结构的一阶固有频率为 28.0264 Hz,将该值作为多目标优化函数(4)中一阶固有频率的理想值 C_k^{max} ,为多目标优化作准备。

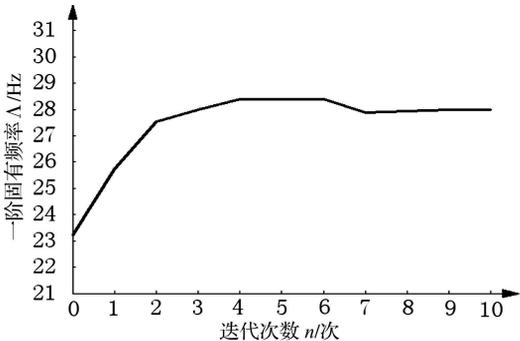


图 9 一阶频率迭代图

以自定义的函数为目标函数,设权值为 0.5,以自定义目标函数最小化为目标,许可材料体积分数为 0.3,经过 25次迭代,得出柔度迭代图(图11),一阶固有频率迭代图(图12),自定义目标函数值迭代图(图13)和自定义目标函数密度云图(图14)。查看优化后生成的 out 文件,可得优化后结构柔度为 1.8406E3J,一阶固有频率为 27.9050 Hz。

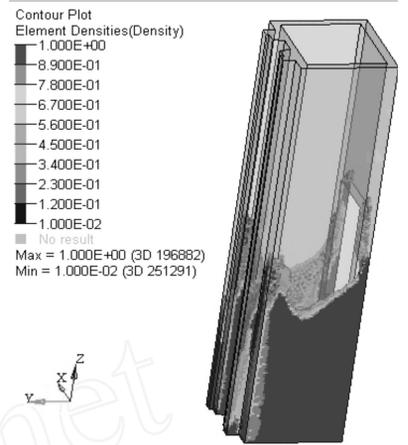


图 10 密度云图

化后生成的 out 文件,可得优化后结构柔度为 1.8406E3J,一阶固有频率为 27.9050 Hz。

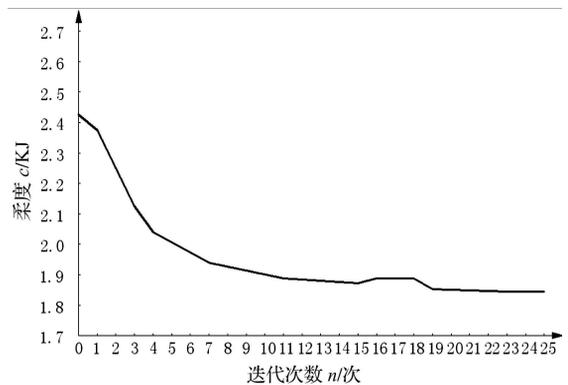


图 11 最小柔度迭代图

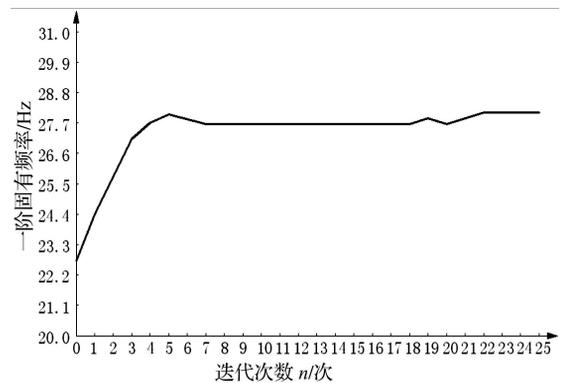


图 12 一阶频率迭代图

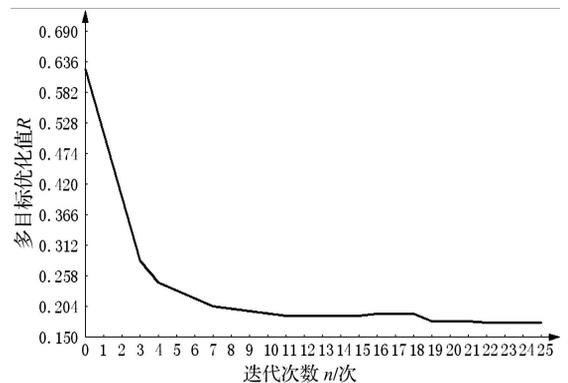


图 13 多目标函数迭代图

迭代图中纵坐标为优化目标,横坐标为迭代次数。密度图中红色和蓝色部分(可视部分)为拓扑优化设计变量相对密度相对较大值(接近 1),是要保留的材料。透明部分为拓扑优化设计变量相对密度为较小值(接近 0),为要去除的部分。密度图中所示材料分布情况,为下一步的机床筋板设计给出思路。

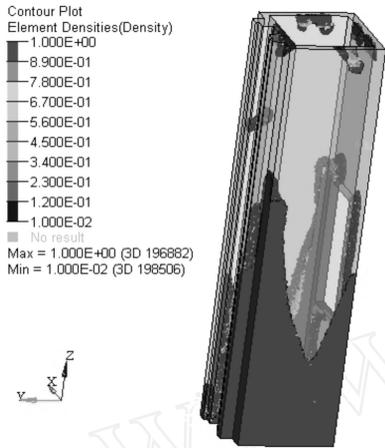


图 14 密度云图

最后将新模型导入 hypemesh进行计算,变形图如图 16 所示,和图 5 比较,两模型在受相同力的情况下,整体变形趋势相同,最大变形位置都位于方箱最右端,新模型最大变形在原模型基础上减小了 34.27%。查看生成的 out 文件可得前几阶固有频率,优化前后模型分析结果如下表所示:

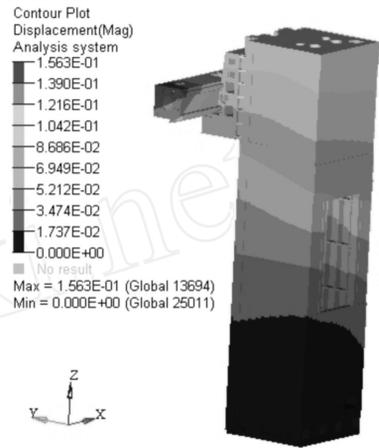


图 16 优化模型受力变形图

4 筋板布局改进

根据图 8 所示,优化设计区域材料主要分布在立柱顶端、右前部和左后部,下端后部材料较少。图 8 是以柔度最小化为目标优化后所得密度云图,结构优化后其柔度达到最小,从迭代图 7 也可以看出,所以图 8 所示材料分布对机床静刚度影响较大。从图 10 可知,优化后设计区域材料只分布在下半部分,下端后部分布材料较少。图 10 是以一阶固有频率最大化为目标优化后所得密度云图,优化后结构的一阶固有频率达到最大,所以图 10 所示设计区域材料对机床动刚度影响较大。这也和现实经验相符,结构材料越多地集中在约束位置,结构越稳定。图 14 可以看作是图 8 和图 10 的综合,这也跟优化中所用到折衷规划法、功效函数法理论相符。

根据密度云图 14 和相关筋板布置经验对原立柱筋板作如下修改:(1)减少立柱上部横向筋板,增大下部横向筋板。(2)减少下部后端筋板。(3)在立柱上部加一圈横向筋板。(4)立柱右前部筋板加密,左后部下端筋板加密。设计区域各部分标识如图 6 所示,修改后筋板布局如图 15 所示。

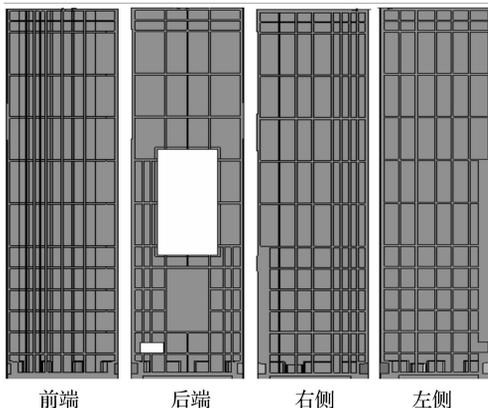


图 15 立柱四周筋板布局图

优化前后模型分析结果对比表

	最大变形 /mm	一阶固有频率 /Hz	二阶固有频率 /Hz	三阶固有频率 /Hz	质量 /kg
原模型	0.237 8	22.675 8	23.567 3	49.509 6	10 240
优化模型	0.156 3	23.161 8	24.146 8	50.382 2	10 565
比较	- 34.27%	+2.14%	+2.46%	+1.76%	+3.17%

从上表可知,在质量仅增加 3.17% 的情况下,机床的精度有很大的提高,前三阶模态也有不同程度的提高,从而也证明了上述的方法对改进机床动、静态特性是有效的。

5 结论

通过折衷规划法和功效函数法,把柔度最小化和一阶固有频率最大化两个优化目标转化为多目标优化问题,建立合理的拓扑优化数学模型。利用 CAE 分析软件 Hyperworks 中的 optistruct 优化模块对机床立柱进行拓扑优化,得到筋板的最佳材料分布。从而指导了立柱筋板的结构设计以及布局,大大提高了机床的设计效率。以某机床厂的落地镗铣加工中心设计优化为实例,验证了该方法的有效性。

参考文献

[1] 汪列隆,朱壮瑞. 基于相对密度机床立柱结构的动力学拓扑优化[J]. 机电工程, 2008, 25(4): 34~38

[2] Wei Wu, Da-Zhi Yang, Ying-Ying Huang, Topology optimization of a novel stent platform with drug reservoirs[J]. Medical Engineering and Physics, 2008, 30(9): 1177~1185.

[3] 金炜枫. 轻质材料微结构的多目标拓扑优化设计[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2007.

[4] Prager W. A note on discretized michell structures[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1974, 3(3): 349~355.

[5] Dom W, Gomory R, Greenberg H. Automatic design of optimal structures[J]. J. Design Mechanique, 1964, 3(1): 25~52

- [6] B Hassania, E Hinton. A review of homogenization and topology optimization [J]. Computers and Structures, 1998, 69 (6): 707 ~ 717.
- [7] Kong-Tian Zuo, Li-Ping Chen, Yun-Qing Zhang. Study of key algorithms in topology optimization [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2007, 32 (7 - 8): 787 ~ 796.
- [8] 范文杰, 范子杰, 苏瑞意. 汽车车架结构多目标拓扑优化方法研究 [J]. 中国机械工程, 2008, 19 (12): 1505 ~ 1508.
- [9] T Y Chen, S C Wu. Multiobjective optimal topology design of

structures [J]. Computational mechanics, 1998, 21 (16): 483 ~ 492.

- [10] 熊 辉. 用折衷规划进行路面管理的多目标优化 [J]. 北京理工大学学报, 2006, 26 (9): 793 ~ 797.

作者简介: 饶柳生 (1982 -), 男, 硕士生, 主要研究方向: 机械结构分析与优化。

(上接第 86 页)

从图 6 和图 7 可以看出, 采用 180# 的砂轮磨削表面较为光滑, 缺陷较少; 采用 120# 的砂轮磨削表面凹坑和凸起, 磨削表面较为粗糙。这主要由于在磨削过程中, 采用的砂轮颗粒度越大表示砂轮的颗粒越细, 同时参与切削的磨粒数越多, 则磨削后表面的质量越好越光滑, 则表面粗糙度越小。

图 8 为磨削轴向进给速度为 0.250 mm/s 的试样表面微观形态图, 图 9 为磨削轴向进给速度为 0.750 mm/s 的试样表面微观形态图。

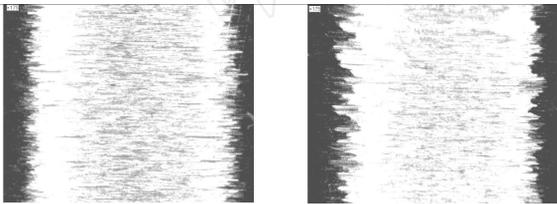


图 8 $f=0.250 \text{ mm/s}$

图 9 $f=0.750 \text{ mm/s}$

从图 8 和图 9 中可以看出, 进给速度为 0.250 mm/s 的磨削表面较为光滑, 进给速度为 0.750 mm/s 的磨削表面存在凹坑和凸起, 表面波动较大较为粗糙。在磨削过程中, 由于进给速度增大, 一方面会使得砂轮磨粒与试样表面上任意点的接触次数减少, 从而导致表面粗糙度增大; 另一方面由于进给速度增大, 使得磨屑宽度与磨屑厚度之比变大, 导致磨削中的剪切力增大, 使得磨削的材料撕裂, 大片脱离, 从而出现凹坑, 导致表面粗糙度增大。

3.2.3 磨削参数的优化

从正交试样的结果进行分析, 在砂轮线速度为 30 m/s 的情况下, 得出试样表面的残余应力的最为优化的磨削条件为 3 112, 即工件转速为 460 r/min, 磨削深度为 0.010 mm, 轴向进给速度为 0.750 mm/s, 砂轮颗粒度为 180#, 试样的表面粗糙度的最为优化的磨削条件为 2 132, 即工件转速为 230 r/min, 磨削深度为 0.010 mm, 轴向进给速度为 0.250 mm/s, 砂轮颗粒度为 180#。综合以上两种指标, 磨削深度和砂轮颗粒度对指标的影响一致; 工件转速对试样表面的残余应力影响较大, 对试样表面的粗糙度影响不大, 所以主要考虑工件转速对残余应力的影响; 而进给速度对试样表面的残余应力几乎没有影响, 进给速度对试样的表面粗糙度影响最大, 则主要考虑进给速度对表面粗糙度的影响。综合上述因素, 确定试样表面质量最为优化的磨削条件为 3 132, 即工件转速为 460 r/min, 磨削深度为 0.010 mm, 轴向进给速度为 0.250 mm/s, 砂轮颗粒度为 180#。采用此磨削条件下的试样进行

抗硫化氢应力腐蚀试验, 效果明显, 试验结果比较稳定, 磨削表面的残余拉应力控制在 200 MPa 以下, 表面粗糙度控制在 0.300 μm 以下, 硫化氢应力腐蚀试验的成功通过率由原先的不到 50% 提高至超过 90%。

4 结 论

从以上的研究中主要得出以下结论:

- (1) 从理论上分析, 试样磨削的表面质量受工件转速 v_w 、磨削深度 a_p 、轴向进给速度 f 和砂轮的颗粒度影响。
- (2) 试样表面的残余应力受磨削深度 a_p 的影响最大, 其次是磨削的工件转速 v_w 和砂轮颗粒度 D , 几乎不受轴向进给速度 f 的影响。
- (3) 试样的表面粗糙度受磨削砂轮的颗粒度 D 影响最大, 其次是进给速度 f , 受工件转速 v_w 和切削深度 a_p 影响较小。
- (4) 试样表面质量最为优化的磨削条件为工件转速为 460 r/min, 磨削深度为 0.010 mm, 进给速度为 0.250 mm/s, 砂轮颗粒度为 180#, 试样的抗硫化氢应力腐蚀试验成功通过率提高至超过 90%。

参考文献

- [1] 陶勇寅, 杜则裕, 李云涛. 管线钢硫化氢应力腐蚀的影响因素 [J]. 天津大学学报, 2004, 4 (37): 358 ~ 362.
- [2] NACE Standard TM0177 - 2005 Item NO. 21212. Laboratory Testing of Metals for Resistance to Sulfide Stress Cracking and Stress Corrosion Cracking in H_2S Environment [S]. Houston: NACE International, 2005.
- [3] Field M, Kahles J F. Review of Surface Integrity of Machined Components [M]. CIRP Ann, 1971.
- [4] 方博武. 金属冷热加工的参与应力 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1991.
- [5] 任敬心, 康仁科, 史兴宽. 难加工材料的磨削 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.
- [6] 任敬心, 孟庆国. 磨削残余应力的有限元计算 [J]. 磨料磨具与磨削, 1995, 3 (87): 31 ~ 35.
- [7] Hedworth J, Stowell M J. The measurement of strain - rate sensitivity in superplastic alloys [M]. Mat Sci, 1971.
- [8] 李伯民, 赵 波. 现代磨削技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [9] 陈明君, 董 申, 李 旦, 等. 脆性材料超精密磨削时影响表面质量因素的研究 [J]. 机械工程学报, 2001, 3 (37): 1 ~ 10.

作者简介: 柏文锋 (1985 -), 男, 硕士研究生; 主要研究方向: 制造技术与设备自动化。