

龙门导轨磨床横梁的多目标优化

Multi-objective Optimization of Beam Gantry Rail

Grinder

范以撒, 母德强, 杨君

(长春工业大学 机电工程学院 吉林 长春 130012)

摘要: 以多工况下的应变能和结构振动固有频率为优化目标函数, 对龙门导轨磨床横梁部件的筋板进行多目标拓扑优化, 得到其概念设计形状, 并根据拓扑优化结果进行重新设计。再对重新设计的筋板进行多目标参数化优化, 对比优化前后横梁的动静态特性, 质量减少 9.6%, 总变形量减少 21%, 第一阶固有频率提高 20%。利用 OptiStruct 实现了构件轻量化、动静态特性明显提高的设计目标。

关键字: 拓扑优化; 多目标优化; 横梁; 固有频率; 动静态特性; OptiStruct

Abstract : Taking strain energy under multiple conditions and natural frequencies of structure as the objective function of optimization. The conceptual design shapes of the gantry rail grinder cross beam internal ribs was obtained using multi-objective topology optimization. According to the results of topology optimization, redesigned the beam internal ribs. Then, multi-objective parametric optimization was implemented to the redesigning ribs. Compared with the dynamic and static characteristics before optimization, the quality of the beam decreased by 9.6%, the total deformation decreased by 21% and the first order natural frequency raised by 20%. Our research realized the component design goal of lightweight and obviously improving the dynamic and static characteristics.

Keyword: Topology optimization; Multi-objective optimization; Cross beam; Natural frequency; Dynamic and static characteristics; OptiStruct

1 前言

横梁部件作为龙门导轨磨床的重要部件, 承担了横梁上所有挂件的重量, 所以对横梁的静态刚度要求很高; 同时横梁连接着十字滑枕和磨头, 在加工过程当中对横梁的抗振性要求也同样苛刻, 因此提高横梁的动态特性也显得尤为重要^[1]。

对龙门导轨磨床横梁的优化使应变能和固有频率满足一定的要求前提下, 尽量使结构轻量化, 这属于典型的以应变能最小和特征值最大作为优化目标函数的多目标拓扑优化问题^[2]。目前大多研究是以柔度为目标函数的单目标拓扑优化问题, 或者是在以柔度为目标函数得到优化结果后, 对新的拓扑结构进行一些简单的固有频率分析^[3,4]。由于结构柔度和固有频率之间的不一致性和不可公度性^[5]。上面提到的方法很难得到龙门导轨磨床的最优拓扑结构

文章使用 HyperWorks 有限元软件的结构优化模块 OptiStruct, 对优化过程进行分析处理。实现了龙门磨床横梁的多目标拓扑优化, 得到了同时满足多工况条件下应变能最小和振动低阶固有频率最高的横梁拓扑结构。

2 多目标拓扑优化理论

2.1 静态拓扑目标函数

应变能最小时的拓扑优化就是结构刚度最大化问题,就是在设计域内寻找使结构刚度最大时的材料分布形式。通常把多个工况下的刚度拓扑优化问题转化为多工况下的柔度最小问题,再把柔度问题转化为应变能问题。本文采用线性加权法定义目标函数,分别在 X、Y、Z 三个载荷的工况下建立,目标函数如下^[6]:

$$\min C(x) = \sum_{i=1}^n w_i C_i(x)$$

式中: x 为设计变量, $C_i(x)$ 为各工况下的弹性应变能最小值, w_i 为权系数。 $\sum_{i=1}^n w_i = 1$

这种方法只能得到一个非劣解,但是不能保证非凸化问题中得到的都是非劣解。因此做出如下的转化^[7]。

$$\min C(x) = \left[\sum_{i=1}^3 w_i^n \left(\frac{C_i(x) - C_i^{\min}}{C_i^{\max} - C_i^{\min}} \right)^n \right]^{1/n}$$

$C(x)$ 代表应变能; $m=3$ 表示载荷工况数; w_i 表示第 i 工况的权重, n 惩罚因数 $n \geq 2$,

$C_i(x)$ 表示第 i 个工况的弹性应变能; C_i^{\max} , C_i^{\min} 表示第 i 个工况的弹性应变能的最大及最小值。

2.2 动态拓扑优化函数

模态越高阻尼值越高,对振型的影响就比较小。通常对模态分析主要关心的是对振型影响较大的低阶模态上。一阶固有频率最大为目标函数建立有限元模型,为了提高立柱的固有频率,本文采用如下频率公式^[8]

$$\Lambda = \begin{cases} \Lambda_0 + \left(\frac{1}{\alpha} \sum_{i=1}^m w_i (\lambda_{u_i} - \lambda_{0_i})^n \right)^{1/n} \\ \Lambda_0 + \exp \left(\frac{1}{\alpha} \sum_{i=1}^m w_i \ln |\lambda_{u_i} - \lambda_{0_i}| \right) \end{cases}$$

其中 λ_{u_i} 是一个给定值, u_i 为第 i 阶固有频率。 w_i 表示权重; Λ_0 是调节系数。在本文分析

中取: $n=2$, $\Lambda_0=0$, $\lambda_{0_i}=105$, $\alpha=5$ 有

$$\min \Lambda = \left[\frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 (105 - \lambda_i)^2 \right]^{1/2}$$

2.3 同时考虑应变能和固有频率的多目标拓扑优化函数

构件的多目标拓扑优化是以龙门导轨磨床横梁的体积作为约束，同时考虑应变能目标和动态振动固有频率目标的双目标拓扑优化。多目标拓扑优化的目标函数根据折衷规划法和平均频率法获得：

$$\min U(x) = \left\{ \gamma_1^2 C(x)^2 + \gamma_2^2 \left(\frac{\Lambda_{\min} - \Lambda(x)}{\Lambda_{\max} - \Lambda_{\min}} \right)^2 + (1 - \gamma_1 - \gamma_2)^2 D(x)^2 \right\}^{1/2} \quad (5)$$

$U(x)$ 表示目标函数， γ_1 ， γ_2 为权重， Λ_{\max} ， Λ_{\min} 为各阶固有频率的最大值，最小值，用来消除量纲。

3 龙门导轨磨床横梁筋板的拓扑优化

由于横梁部件为多筋板中空的结构，横梁的外形尺寸由于涉及到与其他部件的连接，所以不能轻易改动，本文主要对内部筋板的形状和厚度尺寸进行优化。原横梁内部筋板如图 1 所示：

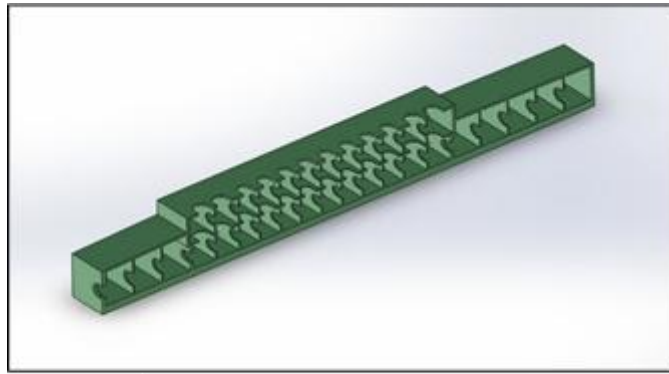


图 1 原磨床横梁筋板几何图

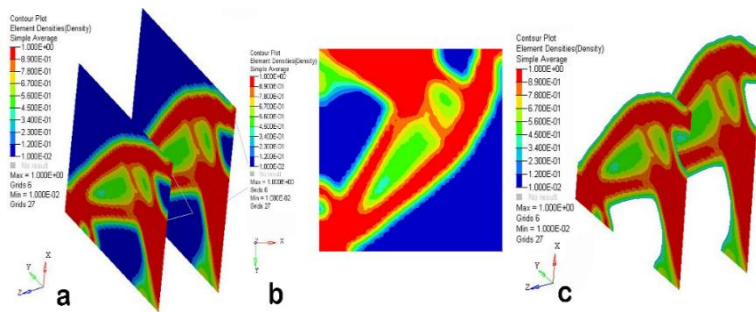


图 2 模式重复优化结果

从上图所示可以看出内部的筋板分布情况，由于只针对筋板进行优化，考虑到加工的方便，在建立拓扑优化有限元模型时采用 HyperWorks 中提供的模式重复功能建立两个筋板的模型，同时应用模式重复将两个筋板联系起来，以达到模拟内部筋板的优化过程。本文采用上述的模式重复建立有限元模型。

由于横梁的外形决定了筋板的高度不同，分别建立两个筋板的有限元模型，代表了横梁不同位置的筋板。以每个筋板的体积为原来的 50%作为约束，以应变能最小和平均固有频率最大为目标函数。并通过建立两个面的模式重复进行拓扑优化，优化结果如图所示图 2 所示。

表 1 优化前后固有频率

固有频率	第一阶	第二阶	第三阶	第四阶	第五阶
优化前/HZ	13	20	34	45	83
优化后/HZ	15	21	63	82	92
提高/%	8	5	85	82	11

从表中可以看出，优化前后横梁五阶固有频率的变化，第一，二，五阶固有频率都有一定的提高，分别提高了 8%，5%，11%，第三，四阶固有频率有巨大的提高，分别提高了 85%，82%，通过优化取得了比较好的优化效果。

4. 拓扑优化结果重新设计

根据拓扑优化结果，对原横梁内部筋板进行重新设计。对重新设计的横梁部件建立有限元模型分析动静态特性，同时与原横梁部件的动静态特性对比。重新设计的静态变形云图如图 5 表,2 所示

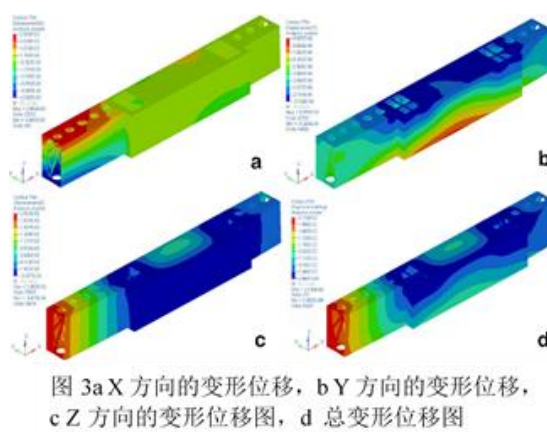


图 3a X 方向的变形位移, b Y 方向的变形位移, c Z 方向的变形位移图, d 总变形位移图

表 2 横梁的静态变形量

变形方向	X 方向	Y 方向	Z 方向	总变形
变形量/ μm	5.6	9.8	2.06	21.42

由龙门导轨磨床横梁的静态分析云图可知，横梁 X 方向的变形量是 5.60 μm ，Y 方向的变形量是 9.80 μm ，Z 方向的变形量是 2.06 μm ，从横梁的总变形位移云图可以看出总变形达到 21.42 μm 。

5 横梁多目标尺寸优化

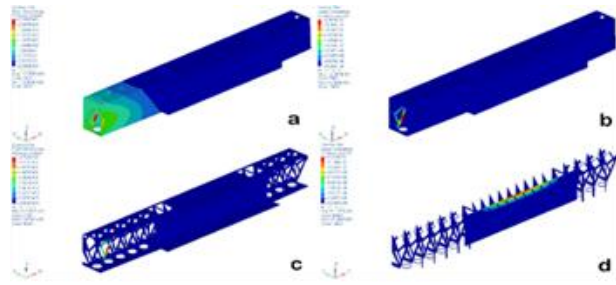


图 4 横梁拓扑优化后四阶固有频率

将重新设计的横梁模型导入到有限元软件在进行参数优化,以总质量小于 9 t 作为约束,目标函数与对筋板拓扑优化的参数相同,共建立了 27 个参数变量,通过设置尺寸优化卡片,使每次厚度的变化量为 1 mm,这样设置考虑到便于加工,建立的有限元模型如。提交 OS 求解器求解,迭代 30 次之后目标函数达到收敛。得到前 4 阶固有频率如图 4 所示:与原横梁部件固有频率进行对比,如表 3 所示。

表 3 优化前后横梁固有频率对比

固有频率	第一阶	第二阶	第三阶	第四阶
原横梁/ HZ	76	106	108	135
优化后/ HZ	91	110	115	145
提高/ %	20	4	6	7

从表 3 所示的结果看,通过对横梁筋板的拓扑优化,根据拓扑优化结果对横梁进行重新的设计,再对新设计的横梁进行参数优化,得到最终优化结果。与原横梁的前 4 阶固有频率对比,固有频率分别提高了 20%, 4%, 6%, 7%, 其中第一阶固有频率提高最大,实现了提高横梁部件动态特性的目的。

表 4 位移量优化前后对比

最大位移值	原横梁/ μm	优化后/ μm	降低/ %
X 方向变形	3.6	2.3	36
Y 方向变形	8.5	6.6	22
Z 方向变形	23.5	18.4	22
总变形	24.0	19.0	21

优化前后的横梁静态特性对比,如表 4,优化后横梁在 X 方向的变形量减小最大,为 36%,在 Y 方向上变形量减小了 22%,Z 方向上最大变形从 23.5 μm 减小到 18.4 μm ,减小了 22%,总的变形量减小了 21%。优化后变形量得到很大降低,横梁的静态特性得到提高,可以提高机床的加工精度。

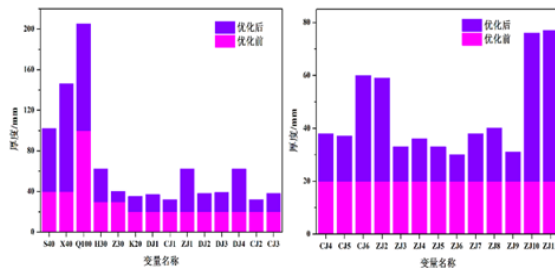


表 5 优化前后设计变量变化图

经过多目标尺寸优化之后,得到优化后各个设计变量的壳单元厚度值如图 5 所示。

通过与原横梁对比,静态位移在各个方向的变形都有所减小,可见通过优化,重新设计的横梁静态刚度得到了提高,总位移减小了 21%。对新设计的横梁进行参数优化,通过迭代运算最后保留的材料的总质量为 8.6 t,原横梁的总质量为 9.52 t,可以计算出来总质量减少了 9.6%。

6 结论

文章利用 OptiStruct 优化龙门导轨磨床横梁部件的筋板,利用多目标拓扑优化和施加重复约束模式得到内部筋板的拓扑优化形状,并根据优化质量分布云图对横梁部件内部筋板重新设计。再对重新设计的横梁进行多目标尺寸优化,得到优化结果与原横梁的动静态特性进行对比。在质量减少了 9.6%的情况下,总变形量减少了 21%;第一阶固有频率提高了 20%,实现了动静态特性得到明显的提高,结构轻量化设计的目的。

7 参考文献

- [1] 王艳青, 仲高艳, 常永标等.大型五轴联动加工中心横梁结构设计[J].机床与液压 2012,40(13):114-117.
- [3] 刘庆, 侯献军.基于 HyperMesh/OptiStruct 的汽车零部件结构拓扑优化设计[J].装备制造技术, 2008, 10:42-44.
- [4]上官文斌, 蒋翠翠, 潘孝勇.汽车悬架控制臂的拓扑优化与性能计算[J].汽车工程, 2008, 30(8):709- 712
- [5] 刘加光, 陈义保, 罗震.连续体结构的模糊多目标拓扑优化设计方法研究[J].系统仿真学报, 2007, 19(5):1095-1099.
- [6] 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(12): 1505-1508.
- [7] Rao.S.S ,T.I.Freiheit. A Modified Game Theory Approach to Multiobjective Opimization[J]. Journal of Mechanical Design .1991,113:286-291
- [8] Ma Zheng-Dong , Noboru Kikuchi, Hsien-Chie Cheng.Topological Design for Vibrating Structures[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering.1995 , 121:259-280