文章编号:1005-0523(2013)06-0078-06

基于Hypermesh的立式加工中心立柱结构的拓扑优化

周新建[1],王若飞[1],吴智恒[2],阮 航[1],胡维东[1]

(1. 华东交通大学载运工具与装备教育部重点实验室,江西 南昌 330013;2. 广东省工业技术研究院,广东 广州 510651)

摘要:立柱是立式加工中心影响加工精度和结构特性的关键部位,它的固有频率等动力学特性对整机特性影响非常大。通过有限元分析软件HyperWorks中优化模块OptiStruct对GSVM6540L2机床立柱进行单目标拓扑优化和多目标拓扑优化,并根据优化结果和经验对立柱进行了改进,提高了立柱的静动态特性和整机的静动态特性。

关键词:立式加工中心;立柱;HyperWorks;拓扑优化

中图分类号:TG502 **文献标志码**:A

拓扑优化的研究领域主要分为连续体拓扑优化和离散结构拓扑优化。连续体拓扑优化是把优化空间的材料离散成有限个单元(壳单元或者体单元),离散结构拓扑优化是在设计空间内建立一个由有限个梁单元组成的基结构,然后根据算法确定设计空间内单元的去留,保留下来的单元即构成最终的拓扑方案,从而实现拓扑优化[1]。

由整机模态、振型和静刚度分析也可知,床身、工作台、床鞍对整机振型影响不是很明显,立柱和主轴箱对整机振型影响较大,尤其是如果立柱的结构设计不合理,并且立柱和床身的结合面处刚性较差,通过结果分析得知立柱对刀具和工件的贡献度最大,因此有必要对立柱进行改进[2-3]。

1 建立融入结合部特性的整机有限元模型

在工程分析中,对拓扑优化的研究主要集中在单目标函数方面,而在实际工程应用中,需要同时考虑多个目标函数和多个约束的情况;但是在多目标优化中,由于目标函数含有多个子目标,各个子目标的最优解可能出现对立局面,很难同时达到最优;例如在以柔度和固有频率为子目标的多目标优化中,当子目标柔度最小时,另外一个子目标频率不一定最大;而当子目标固有频率最大时,子目标柔度未必最小,所以这种不能得到全局最优解的拓扑优化是很难满足实际工程需要的。本论文利用折衷规划法结合平均频率法对各个子目标进行处理得到多目标优化的综合目标函数,可以有效地求出多目标函数的最优解,并且各个子目标之间不发生冲突,则优化的结果会使得所有子目标同时达到最优。因此以相对密度为设计变量,体积为约束、考虑柔度最小、几阶低阶固有频率最大、同时考虑柔度最少和几阶低阶固有频率为目的的多目标拓扑优化数学模型分别如下:

$$\begin{cases} \text{Find: } X=\{x_1,x_2,.....,x_n\}^T\subset R^n \\ \text{Min}C_1 \quad C_1=\{\sum_{k=1}^{m}w_k^q(\frac{C_k(x_i)-C_k^{\min\ q}}{C_k^{\max}-C_k^{\min}})\}^{\frac{1}{q}} \\ \text{Subject_to} \quad \frac{V}{V_0}\leqslant\Delta \quad V=\sum_{i=1}^{N}x_iv_i \\ 0\leqslant x_{\min}<x_i<x_{\max}\leqslant 1 \end{cases} \tag{1}$$

收稿日期:2013-09-10

基金项目:广东省工业攻关项目(2009A010200009)

作者简介:周新建(1963—),男,教授,博士,主要研究方向为载运工具计算机辅助工程。

中国知网 https://www.cnki.net

$$\begin{cases} \text{Find: } X=\{x_1,x_2,.....,x_n\}^T\subset R^T \\ \text{Max}\Lambda(\rho)\quad \Lambda(\rho)=\lambda_0+s(\sum_{i=1}^{f}\frac{w_i}{\lambda_i-\lambda_0}) \\ \text{Subject_to}\quad \frac{V}{V_0}\leqslant\Delta\quad V=\sum_{i=1}^{n}x_iv_i \\ 0\leqslant x_{\min}<x_i\leqslant x_{\max}\leqslant 1 \end{cases} \tag{2}$$

$$\begin{cases} \text{Find:}X=\{x_1,x_2,...,x_n\}^T\subset R^n\ \ i=1,2,3...n \\ \text{Min}S(x_i):\ \{w^2[\sum_{k=1}^{m}w_k\frac{C_k(x_i)-C_k^{\min}}{C_k^{\max}-C_k^{\min}}]^2 \\ \qquad +(1-w)^2[\frac{\Lambda_{\max}-\Lambda(x_i)}{\Lambda_{\max}-\Lambda_{\min}}]^2\} \\ \text{Subject_to}\quad \frac{V}{V_0}\leqslant\Delta,\ V=\sum_{i=1}^{n}x_iv_i,M=\sum_{i=1}^{n}m_i \\ \qquad \rho=x_i\rho_0,\ k_i=(x_i)^pk_0,\ M=\sum_{i=1}^{n}m_i \\ \qquad 0<x_{\min}<x_i<x_{\max}<1 \end{cases} \tag{3}$$

在式(1)中 C_1 为静态多工况刚度拓扑优化目标函数;(2)中,$\Lambda(\rho)$ 为动态固有频率拓扑优化目标函数;式(3)中,$S(x_i)$ 为同时考虑多工况刚度和频率要求的多目标拓扑优化函数;m 为载荷工况的个数;z 为固有频率的阶数;w_k,$C_k^{\max}$,$C_k^{\min}$,$C_k(x_i)$,$\Lambda_{\max}$,$\Lambda_{\min}$,$\Lambda(x_i)$,q 分别为第 k 个工况的加权值、第 k 个工况的柔度目标最大值、第 k 个工况柔度目标函数最小值、第 k 个工况的柔度目标函数、平均频率目标函数的最大值、平均频率目标函数的最小值、平均频率目标函数、惩罚因子($2<q<4$)。从式(3)中的目标函数可以看出,当 $S(x_i)$ 越接近最少值0,各个工况下的柔度目标函数越接近同工况下柔度目标函数的最少值,同样,待优化的各低阶固有频率目标函数也达到其固有频率目标函数的最大值。

简化了的机床三维模型通过数据接可精确的转换为有限元模型;考虑到有限元分析软件的计算精度及速度等因素,要使转化后的复杂模型能直接用于有限元分析,还需要在HyperMesh中对模型再一次进行适当的简化[4-5]。本文在HyperMesh中对机床模型进行了一系列的等效与简化,提高了网格质量,便于有限元计算分析;同时在模型中融入结合面参数,使机床大件各个结合面通过等效弹簧刚度与等效阻尼链接形成完整的整机模型,见图1。

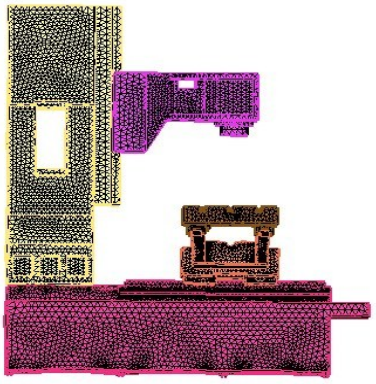


图1　网格划分后的机床整机模型

Fig.1　The machine tool model after meshing

1.1　实常数定义

本文需要定义实常数的单元为弹簧阻尼单元combin14,根据需要定义为一维单元,并设置其刚度及阻尼值。

1.2　材料特性的定义

本文机床的材料为HT200,查机械设计手册得其弹性模量为120 GPa,泊松比为0.25,密度为7 200 kg·m^{-3}。工作台为钢,其弹性模量为210 GPa,泊松比为0.3,密度为7 850 kg·m^{-3}。

1.3　坐标系的选择

HyperWorks中有多种坐标系,可以建立如下的坐标系:

1)总体和局部坐标系。用来定位几何形状参数(节点、关键点等)的空间位置。

中国知网　https://www.cnki.net

2）显示坐标系。用于几何形状参数的列表和显示。

3）节点坐标。定义单元的自由度方向和节点结果数据的方向。

4）单元坐标系。确定材料特性主轴和单元结果数据的方向。

5）结果坐标系。用来列表、显示节点或单元结果。

为了方便建立硬点，选择总体坐标系，并以导入的整机模型坐标系为总体坐标系。

2 拓扑优化的步骤

2.1 基于最少柔度的单目标优化设计和多目标优化设计

结构拓扑优化[6-7]对设计区域比较敏感，其优化的效果也直接受设计区域设置的影响，因此在优化设计的时候要尽量地取较大的设计区域。在立柱模型中，把立柱外壳作为非设计区域，立柱里面的筋板作为设计区域，在立柱上加3种工况（大小均为2 000 N，分别为X，Y，Z向）对其进行静力学分析，然后再以相对密度为设计变量、体积为约束条件，柔度最小为目标函数对其分别进行优化。

2.2 动态固有频率拓扑优化

动态固有频率拓扑单目标优化一般是分别以低阶的几阶重要频率中的某一阶最大化为目标函数，并将结构体积的百分数作为约束函数[8]。当以其中某一阶次的固有频率最大化为目标函数且此阶频率达到最大时，其它阶次的频率可能降到一个较低的值，甚至比迭代前的频率值还要低，这样可能会导致几阶频率之间出现相互调换次序，从而导致目标函数出现振荡问题。而采用平均频率作为低阶固有频率拓扑优化的目标函数时可以很好的克服目标函数出现振荡的问题，并且在Control Card里面设置MODETRAK卡片，当几阶低阶频率发生交替时，平均频率作为目标函数仍然保持光滑，而且可以避免模态震荡现象的出现，其模态对比表分别如下所示（见表1）。

表1 迭代前后模态对比

Tab.1 Modal comparison before and after iteration

迭代次数/次	第一阶模态/Hz	第二阶模态/Hz	第三阶模态/Hz	第四阶模态/Hz
0	67.510 41	125.630 2	168.399 5	228.746 8
5	69.254 60	131.542 7	192.336 5	243.068 2

2.3 基于最小柔度和最大低阶固有频率的多目标优化

最少柔度和最大频率的多目标拓扑优化是同时考虑静态多刚度目标和动态振动频率目标的联合拓扑优化，它是以由折衷规划法结合平均频率法得到同时考虑最少柔度和最大频率的目标函数，并将结构体积的百分数作为约束函数对其进行优化[9]，其模态对比表见表2。

表2 迭代前后模态对比

Tab. 2 Modal comparison before and after iteration

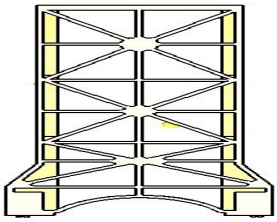
迭代次数/次	第一阶模态/Hz	第二阶模态/Hz	第三阶模态/Hz	第四阶模态/Hz
0	67.607 99	124.684 4	140.963 7	189.731 9
30	68.735 72	126.291 7	186.356 7	242.219 2

3 立柱修改前后静动态特性对比

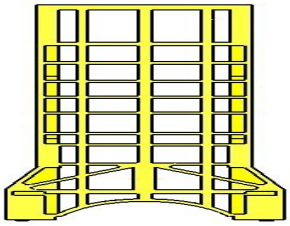
3.1 立柱修改前后板筋结构模型对比

综合分析立柱结构多目标优化结果和单目标优化结果并结合立柱的振型分析对立柱板筋结构进行修改（筋板厚度略微降低、纵向肋板加宽、环向筋板增加），其修改前后的板筋结构图（如图2(a)，2(b)）所示。

中国知网 https://www.cnki.net



（a）立柱修改前的板筋结构模型



（b）立柱修改后的板筋结构模型

图2　立柱修改前后的板筋结构模型

Fig.2　Ligament structure model before and after the column modification

3.2　立柱修改前后相对静刚度对比

表3　立柱修改前后相对静刚度对比

Tab. 3　Column relative stiffness comparison before and after modification

方向	修改前静刚度/(N·mm^{-1})	修改后静刚度/(N·mm^{-1})	修改后/修改前(比值)
*X*向	25 893	28 386	1.096
*Y*向	14 056	15 201	1.082
*Z*向	53 172	56 899	1.070

3.3　立柱修改前后动态特性对比

立柱修改前后动态特性对比见表4。

表4　立柱修改前后动态特性的改变

Tab. 4　The dynamic characteristics before and after the column modification

方向	修改前		修改后		修改前后比值(后/前)	
	频率/Hz	幅值/mm	频率/Hz	幅值/mm	频率/Hz	幅值/mm
*X*向	117.5	2.172E−3	/	/	/	/
	/	/	120	2.25E−3	/	/
	300	2.055E−02	300	1.912E−3	1	0.093
	/	/	485	4.334E−4	/	/
	/	/	712.5	3.28E−4	/	/
	/	/	920	3.1E−4	/	/
*Y*向	62.5	2.522E−2	62.5	6.352E−3	1	0.252
	375	1.072E−2	/	/	/	/
	/	/	385	1.4351E−3	/	/
	/	/	712.5	2.208E−2	/	/
	/	/	782	2.952E−3	/	/
	/	/	/	/	/	/
*Z*向	62.5	4.989E−3	62.5	1.257E−3	1	0.252
	375	1.462E−3	/	/	/	/
	/	/	412.5	1.183E−3	/	/
	415	6.576E−4	/	/	/	/
	/	/	712.5	4.636E−3	/	/
	/	/	782.5	8.081E−4	/	/

中国知网　https://www.cnki.net

由表5和表6可知，X向：立柱修改前的静刚度、最高动态振幅值分别为25 893 N·mm^{-1}，2.055×10^{-5} m，修改后的静刚度、最高动态振幅分别为28 386 N·mm^{-1}，2.25×10^{-6}m，修改后静刚度提高9.6%、动态特性提高了1−0.225/2.055=89%；Y向：立柱修改前的静刚度、最高动态振幅值分别为14 056 N·mm^{-1}，2.522×10^{-5} m，修改后的静刚度、最高动态振幅分别为15 201 N·mm^{-1}，2.2082×10^{-5}m，修改后静刚度提高8.2%、动态特性提高了9.52%；Z向：立柱修改前的静刚度、最高动态振幅值分别为53 172 N·mm^{-1}，4.989×10^{-6} m，修改后的静刚度、最高动态振幅分别为56 899 N·mm^{-1}，4.636×10^{-6} m，修改后静刚度提高7%、动态特性提高了7.076%。

4 立柱修改前后整机综合静动态对比

将修改后的立柱在Pro/e中重新装配成整机，导入HyperMesh中进行网格划分，添加弹簧阻尼单元、定义材料特性、定义是常数、施加约束、载荷，在导入ANSYS中进行静动态特性分析。

立柱修改前后整机静动态特性对比如表5，表6所示。

表5 立柱修改前后整机静态特性对比

Tab. 5 Static characteristics of the whole column before and after modification

方向	修改前静刚度/(N·mm^{-1})	修改后静刚度/(N·mm^{-1})	修改前后比值/(后/前)
X	9 439.55	10 758	1.1397
Y	14 460	15 805	1.093
Z	11 900	13 031.3	1.090 5

表6 立柱修改前后整机动态特性对比

Tab. 6 Dynamic characteristics of the whole column before and after modification

方向	修改前谐响应峰值/mm	修改后谐响应峰值/mm	修改前后比值/(后/前)
X	0.026 352 2	0.018 855 5	0.716
Y	0.096 888 8	0.017 079 9	0.176
Z	0.115 831 0	0.019 471 2	0.168

由表5、6可知，修改后，立式数控加工中心整机相对静刚度在3个方向上均有提高，分别提高：X方向13.97%，Y方向9.3%，Z方向9.05%；整机动态特性提高：X方向28.4%，Y方向82.4%，Z方向84.2%。

5 结语

本文针对单目标优化的最小柔度拓扑优化问题的优化准则算法和最大低阶频率拓扑优化问题的优化准则算法进行了推导，同时对其柔度、频率分别建立了单目标优化及多目标优化的数学模型，以及建立了基于柔度最少和几阶低阶固有频率最大为目的的多目标拓扑优化数学模型，并分别对其进行了拓扑优化，通过分析立柱结构单目标和多目标拓扑优化结果并结合立柱的振型分析对立柱板筋结构进行了修改；并计算了立柱优化前后的静动态特性和优化后机床整机的静动态特性。

参考文献：

[1] 谢涛. 结构拓扑优化综述[J]. 机械工程师，2006(8)：22-25.
[2] 尹玉珍，蒋素清. 立式铣削加工中心立柱结构的拓扑优化[J]. 中国制造业信息化，2008，10(9)：34-36.
[3] 蒋素清，杜娟. 基于HyperMesh的立式加工中心结构拓扑优化[J]. 计量测试与检定，2008，18(1)：13-16.
[4] 于开平，周传月，谭惠丰. HyperMesh 从入门到精通[M]. 北京：科学出版社，2005：83-114.
[5] 冯杰，陈蓓蓓. 基于 Hyperworks 的汽车背门扭转模态频率灵敏度分析[J]. 华东交通大学学报，2012，29(5)：80-82.
[6] 许素强，夏人伟. 结构优化方法研究方法综述[J]. 航空学报，1995，16(4)：385-396.
[7] 杨德庆，刘正兴，隋允康. 连续体结构拓扑优化的ICM方法[J]. 上海交通大学学报，1999，6(6)：734-736
[8] 张兴朝，徐燕申. 机床龙门式立柱结构参数化动态优选设计[J]. 吉林工业大学自然科学学报，2001(8)：5-9.
[9] 郑赟韬，方杰，蔡国飙. 应用于工程设计的多目标优化方法比较[J]. 北京航空航天大学学报，2006，32(7)：860-864.
[10] 严云. 基于ANSYS参数化设计语言的结构优化设计[J]. 华东交通大学学报，2004，21(4)：52-55.

中国知网 https://www.cnki.net

Topological Optimization of Column Structure in Vertical Machining Center Based on Hypermesh

Zhou Xinjian[1], Wang Ruofei[1], Wu Zhiheng[2], Ruan Hang[1], Hu Weidong[1]

(1.Key Laboratory of Conveyance and Equipment of the Ministry of Education, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2.Guangdong General Research Institute for Industrial Technology, Guangzhou 510651, China)

Abstract: Column, as a key component in vertical machining center, affects machining accuracy and structural properties, whose dynamic characteristics like natural frequency have large impact on the whole machine features. In this paper, single-objective and multi-objective topology optimization have been conducted on the column of GSVM6540L2 vertical machining center by the module OptiStruct in the finite element analysis software HyperWorks. According to the optimization results and experience, the static and dynamic characteristics of the column and the whole machine are improved.

Key words: vertical machining center; column; HyperWorks; topology optimization

(上接第61页)

Simulation and Modeling of High Speed Railway Traction Power Supply System Based on Simulink

Liu Shibing, Yuan Lin

(School of Electrical and Electronic Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: Based on the composition of high-speed railway traction power supply system, the whole traction power supply system can be abstracted into an electrical system consisting of the power supply, traction substation, traction network and electric locomotives. By modeling these components in the MATLAB/Simulink software, this paper establishes the traction power supply system simulation model. The simulation results verify the correctness of the proposed model.

Key words: traction power supply system; MATLAB / Simulink; simulation model

中国知网　https://www.cnki.net