

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2019.02.008

高精度拉床动特性分析与结构优化研究*

陈国金¹, 林绿高², 龚友平¹, 陈 昌¹, 袁以明¹

(1. 杭州电子科技大学 机械工程学院, 浙江 杭州 310018;

2. 浙江畅尔智能装备股份有限公司, 浙江 缙云 321404)

摘要:针对动载荷导致拉床加工精度降低的问题,在确定拉床结构的自振频率和相应振型基础上,对其结构进行了优化设计,提高了结构系统的动力学性能,从而提高了拉床加工精度。首先构建了该拉床的数字化仿真设计模型,得出了拉床的主要阶模态和瞬态响应,瞬态响应选取选择拉床上3个典型位置(床台顶部、主溜板顶端、液压缸顶端)进行了计算,并主要计算了在拉削时由于冲击载荷的作用而产生的加速度瞬态响应;根据模态分析和瞬态分析结果,选取均匀法对拉床结构进行了拓扑优化设计,优化时设置了5项结构拓扑优化指标,最终得到了拉床的综合结构优化设计方案;在此基础上,搭建了优化后的拉床原型系统及实验测试平台,并对该拉床进行了实验测试。测试及研究结果表明:优化后拉床质量减轻了15%,拉削点的位移从0.168 mm降低至0.152 mm,位移量减少了10%,提高了加工精度。

关键词:拉床;动特性分析;拓扑结构优化

中图分类号:TH113.1;TG57

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2019)02-0153-05

Dynamic characteristics analysis and structure optimization of high precision broaching machine

CHEN Guo-jin¹, LIN Lv-gao², GONG You-ping¹, CHEN Chang¹, YUAN Yi-ming¹

(1. School of Mechanic Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China;

Zhejiang CHR Intelligent Equipment Co., Ltd., Jinyun 321404, China)

Abstract: Aiming at the machining accuracy problems affected by dynamic load of broaching machine, the natural frequencies and corresponding vibration modes of broaching machine structure were determined, and the structure was optimized to improve the dynamic performance of the structure system and the broaching precision. Firstly, the digital simulation design model of the broaching machine was constructed, and the main order modes and transient responses of the broaching machine were obtained. The transient response was calculated by choosing three typical positions of the broaching machine, the top of the bed, the top of the main chute and the top of the hydraulic cylinder. The acceleration transient response caused by the impact load during broaching was calculated also. According to the results of modal analysis and transient analysis, the uniform method was selected to optimize the structure of broaching machine. Five structural topology optimization indexes were set up to optimize the broaching machine structure. Finally, the optimal design scheme of broaching machine was obtained. On this basis, the optimized broaching prototype system and experimental test platform were built, and the broaching machine was tested experimentally. The test results indicated that the quality of broaching machine is reduced by 15%, the displacement of broaching point is reduced from 0.168 mm to 0.152 mm, the displacement is reduced by 10%, and the machining precision is improved.

Key words: broaching machine; dynamic characteristics analysis; structural topology optimization

收稿日期:2018-08-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51675148);浙江省重点研发计划资助项目(2018C01021)

作者简介:陈国金(1961-),男,浙江宁波人,博士,教授,博士生导师,主要从事智能制造技术及装备方面的研究。E-mail:chenguojin@163.com

0 引 言

拉床是一种效率高,并适宜于大批量金属材料切削加工的机床^[1]。由于其加工成本低,且加工尺寸和形状精度较高,且易实现自动化以及操作维修便捷,现代制造业企业中拉床的应用非常普遍^[2]。国外在机床结构优化领域的研究主要集中在机床数字化设计与仿真分析、机床结构拓扑优化等方面。美国 Catholic 大学 BIANCHI G 等学者^[3]提出了一种基于数学模型的新方法,该方法可以用来模拟仿真机床零部件的结构特性,从而对机床的布局 and 数量进行了优化。

国内机床结构的研究主要集中在机床结构静力学、结构非线性分析、拓扑优化、模态分析和动力学分析等方面^[4]。陈昌金等^[5]首先用三维数字化建模软件 Pro/E 构建了数控深孔螺旋拉床整机的数字化模型,然后运用 Mechanica 模块对该型机床的关键零部件进行了结构静力学仿真分析,对主轴联轴器结构的进行了结构静力载荷变形分析,理论上确定了主轴与拉杆的间隙选择;上海理工大学陈叶林等人^[6]提出了机床床身优化设计的另一种新的理论研究方法,采用折衷法建立多目标模型,并应用遗传分析法求解目标函数,对机床结构应用密度法进行了拓扑分析和优化;天津大学的张学玲、钟伟弘等人^[7]提出了一种数控机床床身结构的动态设计方法和流程,该方法以床身固有模态频率为优化目标,得出了一种对床身结构优化设计的改进方案,而且他们对各方案的优缺点进行了对照研究。

现代拉床正向着高速度、高精度、大功率和智能化这 4 个方向发展,而且对拉床动态特性的要求也越来越高。拉床的结构与动力学性能是决定拉削精度、生产效率、加工能力的关键因素。

本文将 LG7120KT 立式外拉床为实例,首先构建其数字化设计模型,然后对其动态特性进行分析,得出拉床的主要阶模态和瞬态响应,通过对拉床进行结构拓扑优化设计,得出拉床的结构优化设计方案,最后进行实验证明。

1 拉床基本结构及工作方式

拉床用拉刀进行通孔、平面及成形表面的加工。在拉削时,拉刀使被加工表面一次切削成形,所以拉床只有主运动,没有进给运动。切削时,拉刀作平稳的低速直线运动。拉刀承受的切削力很大,通常由液压或数字伺服系统来驱动。安装拉刀的滑座通常由液压缸

的活塞杆带动。

切削速度较低,拉削过程平稳,切削层厚度均匀,因此可以获得较高的加工精度(平面的位置准确度可控制在 0.02 mm ~ 0.06 mm 范围内)及较小的表面粗糙度(小于 Ra 0.62 mm),拉刀的使用寿命也较长。拉床工作时,粗、精加工可在拉刀通过加工表面的一次行程中完成,因此生产效率高,通常可以达到铣削加工效率的 3 ~ 8 倍。拉床的主要参数是额定拉力,常见为 50 kN ~ 400 kN。拉床有内(表面)拉床和外(表面)拉床两类,有卧式的,也有立式的。

拉床由床身、底座、床台、主刀夹座、副刀夹座、拉刀等组成,拉床的床身、床台、底座、油箱都用钢板焊接而成钢性好,其中,床身、底座和床台是拉床的主要受力部件,对拉床性能的发挥起决定性作用^[8]。

拉床基本结构如图 1 所示。

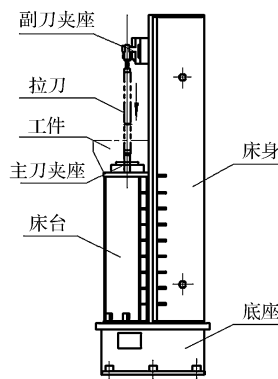


图 1 拉床基本结构

2 动态特性分析

模态分析可以用来确定结构的自振频率和相应振型,为结构设计提供依据,避免在动力载荷作用下发生共振现象。因此,模态分析是结构动态分析的重要内容。系统动态性能的分析首先是结构的模态分析,包括结构的固有频率和相应振型。在工程实际中,往往只需求出前几阶的固有频率和振型,因为一般只有前几阶固有频率才有引起共振的可能。

2.1 边界条件及外载荷施加

在分析中,本文使用底角螺栓将拉床限制在地面上。为了更好地限制拉床在 X、Y、Z 这 3 处的转动自由度和移动自由度,所以通过在底座与地面重合的表面加上固定约束来达到要求。

拉床工作过程中,主油缸驱动主溜板上下运动,拉刀通过螺栓连接固定在主溜板表面;将所要加工的物件放置在工作面板上,用夹具固定工件;拉刀对工件加工则通过主溜板的移动。为了使分析简化,本文选取

拉刀切削工件的工况,分别在工作台和主溜板上施加 rigids 单元模拟拉刀和工件的接触点位置,在两个 rigids 中心施加两个大小相同,方向相反的载荷 200 kN。

2.2 拉床模态分析

本文采用 HyperWorks 软件对 LG7120KT 型拉床数字化模型进行动态仿真分析,构建拉床的数字化模型。拉床的主体结构主体材料为 HT250 铸造而成,拉床的约束施加过程和结构静力分析相似,施加载荷时除了考虑重力的影响,还考虑工作负载情况。

求解方法采用 BlockLanczos 方法计算,获取该拉床的前 6 阶模态结果,其中第 1 阶模态如图 2 所示。

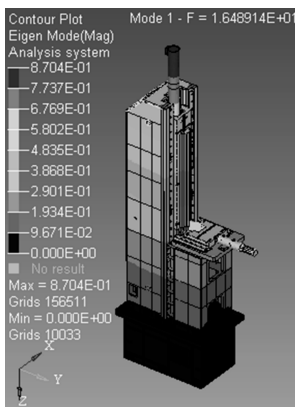


图 2 拉床第 1 阶模态分析结果云图

1-6 阶模态数值如表 1 所示。

表 1 拉床前 6 阶模态数值

阶次	f/Hz	阶次	f/Hz
1	16.49	4	63.59
2	21.12	5	64.80
3	57.68	6	65.58

2.3 拉床瞬态响应分析

拉床上的 3 个响应点如图 3 所示。

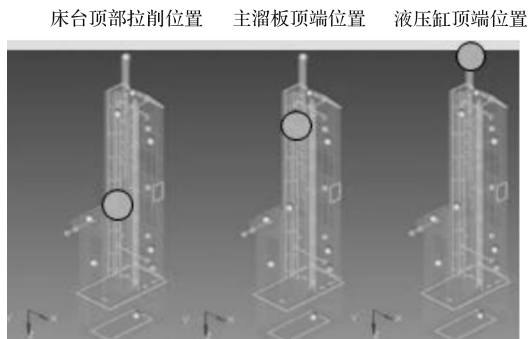


图 3 拉床上的 3 个响应点

选择拉床上 3 个位置,第 1 个位于床台顶部拉削位置处,第 2 个位于主溜板顶端,第 3 个位于液压缸顶端,计算在拉削时由于冲击载荷的作用而产生的位移

瞬态响应和加速度瞬态响应。

在 HyperWorks 中有一个 OptiStruct 求解器,通过在 HyperGraph 中查看 3 个位置处的加速度瞬态响应的波形图,如图 4 所示。

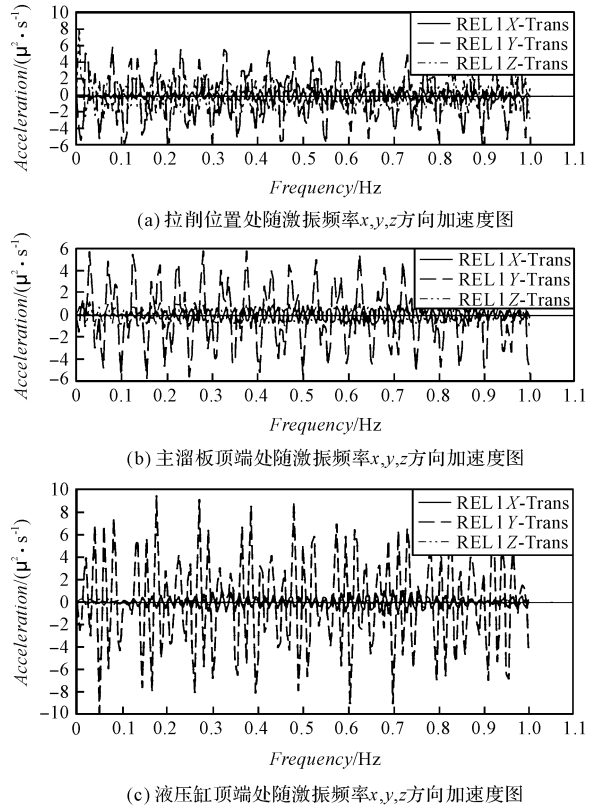


图 4 拉床典型位置加速度瞬态响应
横坐标 - 激振频率;纵坐标 - 振荡加速度幅值

其中:直线为 x 方向幅值,单点划线为 y 方向加速度幅值,双点划线为 z 方向加速度幅值,由于拉床切削时受力主方向为竖直方向,也就是 y 方向。由图 4 的各个位置子图可以看出:沿 y 方向加速度幅值最大。

由图 4 可以看出:拉床在 3 个位置附近振动加速度还具有另外一个共同点,即它们的波形很相似,且都具有良好的周期性;液压缸顶端处的振动位移和振动加速度最大。

3 结构拓扑优化设计

拓扑优化是对模型结构形状进行优化的一种方式,常用的拓扑优化方式有均匀化方法、密度法、变厚度法和拓扑函数描述法等。与传统的优化设计相比,拓扑优化不需要给出参数和优化变量的定义,用户只需要给出结构的参数(材料特性、模型、载荷等)和省去的材料。本文主要采用均匀化进行拉床结构拓扑优化设计。

3.1 均匀化结构拓扑优化设计

均匀化方法是一种经典的拓扑优化方法,由 BENDSOE 等人于 1988 年提出,其基本思想是:在组成拓扑结构中引入微结构,首先对设计区域进行有限元离散划分,然后采用周期性的微结构描述整体模型单元,在优化过程中以微结构的几何尺寸作为设计变量,把弹性模量、材料密度等参量表示成微结构几何尺寸变量的函数。

拓扑优化主要由 3 个步骤组成:(1)拓扑优化建模和参数设定;(2)拓扑优化迭代计算;(3)结果后处理。整个优化过程不是一次就能够完成的,某些优化参数需要经过反复的修改迭代,以获取最优值。

拓扑优化过程如图 5 所示。

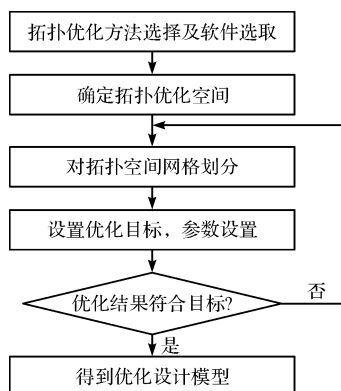


图 5 拉床结构拓扑优化过程

3.2 结构拓扑优化指标设置

在拉床设计中,本文通常关心拉削点的精度。除了拉刀装配精度、工人调试时产生的误差外,机床本身的振动对实际拉削起到至关重要的影响。通过前面的有限元分析可知,避开固有频率并且提高数值可以起到减弱振动的作用,所以本研究选取整机的前二阶模态作为优化指标;考虑到拉床 LG7120kt 整体高度约为 6 m,从外观上可以归于细长结构一类,对于顶端的刚度也需考量。综上所述,提取拉床拓扑优化分析中的 5 个指标作为优化指标。

(1)原拉床拉刀切削点的最大位移为 0.168 mm,工作台的最大位移为 0.120 mm,在优化参数设定中,将拉刀上的工作点位移响应上限设置为 0.15 mm,工作台上的工作点位移响应的上限设置为 0.10 mm;

(2)拉床顶端刚度 X 向位移量 2.694 mm,在优化参数设定中,顶端刚度 X 向位移量下限设置为 2 mm;

(3)拉床顶端刚度 Y 向位移量 3.020 mm,在优化参数设定中,顶端刚度 Y 向位移量下限设置为 3 mm;

(4)拉床的一阶全局模态频率为 16.489 Hz,在优

化参数设定中,一阶全局模态频率下限设置为 25 Hz;

(5)拉床的二阶全局模态频率为 21.121 Hz,在优化参数设定中,二阶全局模态频率下限设置为 35 Hz。

3.3 拓扑优化计算结果分析

定义目标函数 Min MASS,即所选择的优化目标为质量最轻、体积最小。根据上述指标,通过 HyperWorks 软件对拉床拓扑结构优化求解计算,得到每个指标的优化结果,并最终对多个目标进行整合,得到所有指标综合优化结果,如图 6 所示。

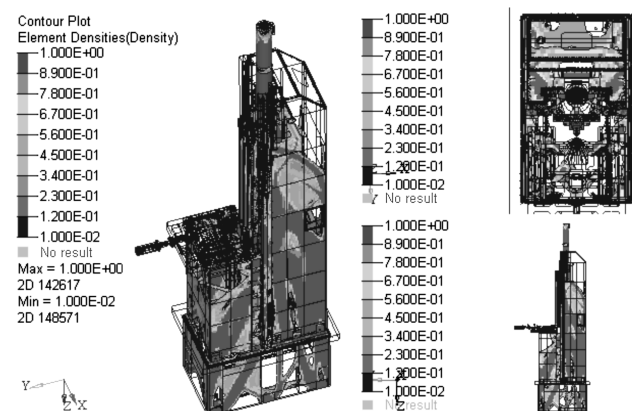


图 6 所有指标综合优化结果

3.4 结构优化设计方案

在上述拉床结构基础上,通过改变筋板设计、增加床身床台间加强件、减薄床身侧板厚度、减少床身和主溜板上端材料、截短床身上端部分两层立板并补齐缺口、减小床身后板厚度并缩小观察孔大小、去掉床身上端和顶板的部分结构等措施来实现最终的结构拓扑优化设计;结合拉床 LG7120kt 实际拉削工况和其生产工艺,最终提出结构优化设计方案。

结构优化设计方案模型与原模型的基础分析对比如表 2 所示。

表 2 拉床优化前后性能指标及比较

性能指标	拉削点位 移/mm	顶端位移/mm		重量/kg	
		X 向	Y 向	总重量	床身重量
优化前	0.168	2.69	3.02	8 168	3 417
优化后	0.152	2.72	3.12	7 651	2 900
优劣	减少 10%	降低 1%	降低 3%	减重 517 kg, 减少 6%	减重 517 kg, 减少 15%

由表 2 可以看出:结构优化设计方案模型在拉削点位移从 0.168 mm 降低至 0.152 mm,位移量减少了 10%,相较于原模型,采用新结构后拉床的加工精度更高;本文中的结构优化设计方案主要针对床身进行优化,总共减重 517 kg,达到了减重的目的,节省了材料。同时,可以根据拓扑优化结果,类似的优化方案可以推广至床台和底座,减重效果将更加明显。

4 实验验证

为了验证优化设计后拉床的各项瞬态响应指标是否满足设计要求,本研究对拉床整机设计了模态测试系统,依靠动态测试技术对系统进行测量,由系统的输入输出数据经信号处理,采用模态参数识别的方法对实测到的每一个传递函数进行模态参数识别,从而得到被测系统的固有特性。

测试系统由以下设备组成:LW139.138-40 激振器、PCB 208C02 力传感器、MB500VI 功率放大器、阻抗头、PCB 333B30 加速度传感器、24 通道 SCADAS III-305 数字式采集系统仪器、计算机为主的硬件、LMS Test. Lab 7.0 模态分析软件系统所组成。

实验模态分析共分为4个步骤:

(1)搭建实验装置,对检测件进行固定,然后将传感器进行安装并连接到数据采集系统,对测量系统进行调试等操作过程;

(2)数据采集,这一过程将会多加考虑频响函数;

(3)组建识别系统,记录测量出来的数据,根据其输入及输出的对照判断其振动属性;

(4)得到数据之后和实验的数据进行对照并进行分析和验证。

做实验之前,笔者通过细尼龙绳将试验件悬空挂置。为了将优化后的结果与试验在无条件束缚下进行比较,选运动幅度最小的点作为支承点(该实验采用悬挂点为支撑点)。试验采用力锤在试件测点13沿Z正方向激振,有效激振为10次激振的平均值,获取该激励点的系统稳态图,并分别提取模态。

有限元模态计算所得结果与模态实验所得结果的对比如表3所示。

表3 优化后拉床前6阶固有频率实验值对比

阶次	固有频率 优化前	固有频率 优化后	阶次	固有频率 优化前	固有频率 优化后
1	16.49	17.78	4	63.59	62.67
2	21.12	22.32	5	64.80	65.23
3	57.68	59.28	6	65.58	67.21

表3显示:各阶误差均在5%以内,这说明两者吻合很好,模态实验测出的固有频率可信度高,并且所建立的有限元模型很好地反映了实际机床结构本身;优化后的整机模型参数设置与原整机一致,一阶模态和

二阶模态都有所提高,说明该结构相较于原模型,在确保模型的精度的同时刚性更佳。

5 结束语

采用数字化设计软件,本文对LG7120KT型拉床进行了瞬态分析和频响分析,并用试验测试方法验证了仿真设计的结果,揭示了拉床在静载荷和动载荷作用下的应力、位移分布规律;在此基础上,本文还对LG7120KT型机床进行了拓扑优化(主要对拉床床身进行了结构优化设计),这对改善改款拉床的整体性能以及同类型的机床优化设计具有重要意义。

根据模态分析和瞬态分析结果,本文确定了5个优化指标,提出了结构优化的措施。综合考虑拉床的实际工况、固有频率、结构最大变形位移量以及生产成本等因素,在确保切削点精度的基础上得到了拉床KG7120kt床身的结构优化设计方案。最终应用该方案得到床身质量为2.9t,比优化前的质量减轻了15%;拉削点的位移从0.168mm降低至0.152mm,位移量减少了10%,拉床的加工精度得到了明显提高。

参考文献(References):

- [1] 邓雄飞. 基于永磁交流伺服电机的拉床多轴同步控制系统研究[D]. 杭州:浙江理工大学机械工程学院,2013.
- [2] 游小红. T2120深孔钻镗床关键结构件的有限元分析及拓扑优化[D]. 太原:中北大学机械工程学院,2013.
- [3] 黄应勇. 浅谈机械内拉床的加工技术[J]. 中国高新技术企业,2010(1):43-45.
- [4] 尹纪强. 数控立式车床立柱的有限元分析及优化设计[D]. 兰州:兰州理工大学机械工程学院,2010.
- [5] 陈昌金,尹健. 虚拟样机技术在数控深孔螺旋拉床整机设计中的应用[J]. 自动测量与控制,2008,27(2):65-71.
- [6] 陈叶林,丁晓红,郭春星,等. 机床床身结构优化设计方法[J]. 机械设计,2010(8):65-67.
- [7] 张学玲,徐燕申,钟伟弘. 基于有限元分析的数控机床床身结构动态优化设计方法研究[M]. 机械强度,2005,27(3):353-357.
- [8] CHEN Guo-jin, GONG You-ping, NI Jing, et al. Research on structural optimization technology and mechanical dynamics for CNC broaching machine[J]. **Advanced Materials Research**, 2013(700):93-97.

[编辑:周昱晨]

本文引用格式:

陈国金,林绿高,龚友平,等. 高精度拉床动特性分析与结构优化研究[J]. 机电工程,2019,36(2):153-157.

CHEN Guo-jin, LIN Lv-gao, GONG You-ping, et al. Dynamic characteristics analysis and structure optimization of high precision broaching machine[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2019,36(2):153-157.

《机电工程》杂志;<http://www.meem.com.cn>