

卧式五轴加工中心床身拓扑优化设计分析

李贺

(沈阳机床(集团)有限责任公司 辽宁 沈阳 110142)

摘要:对于卧式五轴加工中心来说,床身是发挥重要作用的关键部件,因此如何设计出满足要求且合理的结构至关重要。本文针对某大型卧式五轴加工中心床身,通过有限元分析软件对零件进行基于静力学和模态的拓扑优化设计,得到优化后的新结构;之后对优化前后两种结构进行静力学和模态频率的对比分析,结果表明经过拓扑优化后床身的静力变形降低了35%,模态频率得到了明显提高,其中1阶提升30%,床身结构的动静态性能得到了显著提升。

关键词:卧式五轴加工中心;拓扑优化;床身;优化设计

0 引言

近年来,针对适用于钛合金加工的卧式五轴加工中心,需要整机具有很高的刚性、精度、大转矩和移动速度等。床身作为“根基”部件,其自身刚性的高低会对机床的动静态性能有很大的影响。目前,机床结构的设计过程往往通过对现有结构的借鉴及基于设计人员的经验,先制造样机进行性能测试后,根据结果再进行优化得到最终的机床产品,其结果是造成严重的资金浪费和延长设计周期,更缺乏对主机理论上性能的预判。

近年来,有限元拓扑优化设计的方法在许多工程领域,如机械、汽车和建筑等得到了非常广泛的应用,国内许多工程人员也将其应用在机床行业对相关结构进行研究,如天津大学王珂研究的机床结构件的分布拓扑优化设计,基于拓扑优化理论建立数学模型,之后对立柱、溜板箱等关键结构件进行拓扑优化设计并校核其动静态性能;东南大学汤文成等研究的机床大件结构的拓扑优化设计,通过研究结构的刚度、采用的材料及制造工艺生成对应的数学模型,之后综合分析得到床身的最优结构。

本文针对某大型卧式五轴加工中心的床身进行拓扑优化分析,得到优化后的床身结构,并综合对比分析优化前后分析床身的静态刚度及模态频率。

1 拓扑优化理论介绍

拓扑优化的主要目标是在保证结构刚性及模态频率最大化的基础上尽可能地合理分布结构材料,降低结构生产和加工成本。实现拓扑优化的方法有均匀化法、离散法、变密度法及水平集法等,其中变密度法中的SIMP方法因其计算效率较高因而广泛应用于机械工程结构优化设计中,它主要以单元密度为设计变量,以最

大刚度或模态频率为目标,最终确定合理的材料分布。

对于以最大刚度为目标的拓扑优化,常常以最小柔度来建立数学模型,其形式如式(1)所示。

$$\begin{cases} X = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \\ \min C(x) \\ \frac{V_1}{V} \leq \Delta \\ 0 < x_{\min} \leq x_i \leq x_{\max} \leq 1 \end{cases} \quad (1)$$

式中, X 为设计变量; C 为柔度; V 和 V_1 分别为结构优化前后的体积参数,可决定优化后的体积分布,根据此式即可分析得到在最小柔度下的拓扑优化模型。

以最大1阶模态频率为目标的拓扑优化,建立的数学模型形式如式(2)所示。

$$\begin{cases} X = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \\ \max f(x) = 1/\lambda(x) \\ (K - \lambda_i M)\varphi_i = 0 \\ \frac{V_1}{V} \leq \Delta \\ 0 < x_{\min} \leq x_i \leq x_{\max} \leq 1 \end{cases} \quad (2)$$

式中, X 为设计变量; f 为结构固有频率; K 为刚度矩阵; M 为质量矩阵,为第 i 阶的特征值; λ_i 为第 i 阶特征值对应的特征向量; V 和 V_1 分别为结构优化前后的体积参数,根据此式即可分析得到在最大1阶频率下的拓扑优化模型。

本文将结合以上分析思想结合有限元分析软件,对未进行筋腔设计的床身实体进行拓扑优化分析。

2 床身拓扑优化

床身的拓扑优化主要是针对内部筋腔进行详细研究及分析。目前常见的内部筋腔形式有方格型、米字型 and X型等。本文首先根据设计经验采用米字型筋腔形式(图1)。

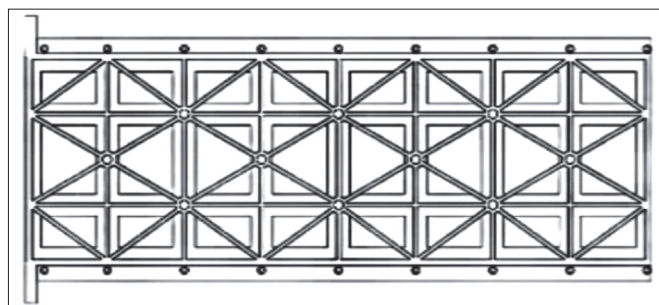


图1 经验设计床身筋腔结构

同时，将未进行筋腔设计的床身实体进行拓扑优化，其主要流程为：导入模型→拓扑优化设计方法→得到计算结果。

2.1 床身以最小静变形为目标进行拓扑优化

结合卧式五轴加工中心设计的实际工况，床身主要受力有以下三种：立柱、主轴箱等部件作用在床身导轨面的压力；由于主轴箱悬伸导致立柱、主轴箱等部件对床身导轨面的力矩作用和切削力间接作用在床身导轨面的力矩。结合有限元分析软件的具体设置，主要有如下几种：

(1) 优化及排除区域：对于床身来说导轨面及地脚螺栓所在的面是排除区域，其余均为优化区域。

(2) 优化目标：以最小静变形为目标。

(3) 保留质量比重：优化后质量占未进行筋腔设计的床身实体的百分比为40%。

设置完成后，通过软件的迭代计算得到的优化的结果（图2）。

通过分析结果可以看出，床身在拓扑优化后主要保留了支撑地脚与导轨面连接的斜支撑筋，这表明这些支撑筋对床身的刚性是非常重要的。

2.2 床身以最大1阶频率为目标进行拓扑优化

床身的振动频率是其自身固有属性，当其与外界激励频率相同时会产生共振现象，导致床身振动幅度明显增加，对于机床加工产生严重的影响，因此根据机床实际工作情况，主要采取的措施为尽可能增大零件的1阶固有频率。为此，在有限元软件中以最大1阶固有频率为目标，质量设置方式同最小静变形方式，对床身进行拓扑优化得到的结果（图3）。

通过分析结果可以看出，床身在拓扑优化后同样保留了支撑地脚与导轨面连接的斜支撑筋，同时也保留了部分纵向支撑板。

综合上述两种分析可以得出，导轨面与

支撑地脚的斜支撑筋对于静态刚性和模态频率都是很重要的，同时考虑机械设计中的其他要求，最终设计出优化后的床身内部筋腔结构（图4）。

3 床身优化前后对比分析

3.1 静力分析

针对床身考虑的工况主要是受重力、压力、切削力及力矩等。根据前文所述，床身主要受到的作用力有：

(1) 立柱、主轴箱等部件作用在床身导轨面的压力80000N；

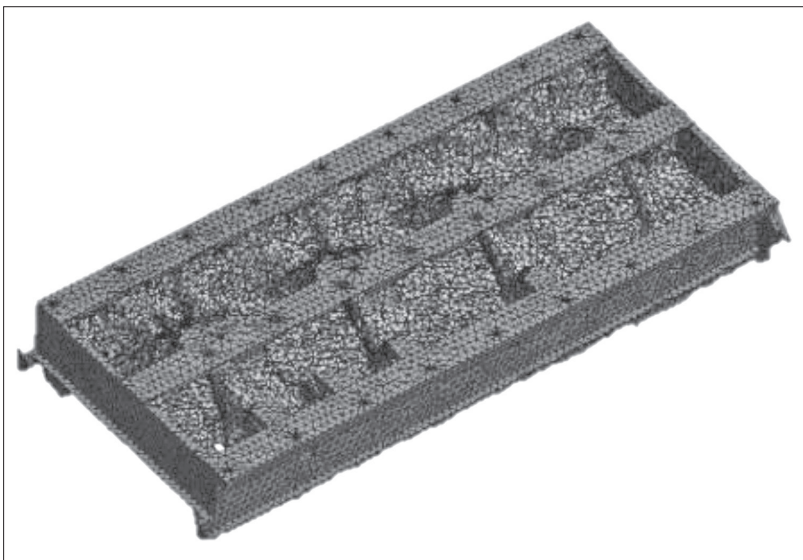


图2 最小静变形为目标下床身拓扑优化结果

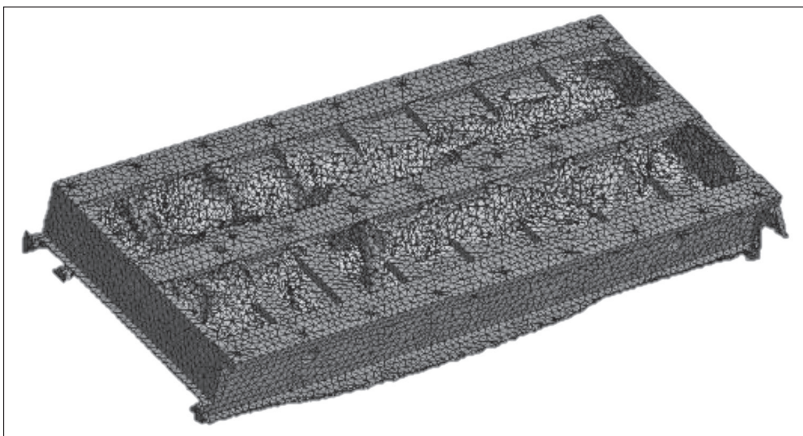


图3 最大1阶频率为目标下床身拓扑优化结果

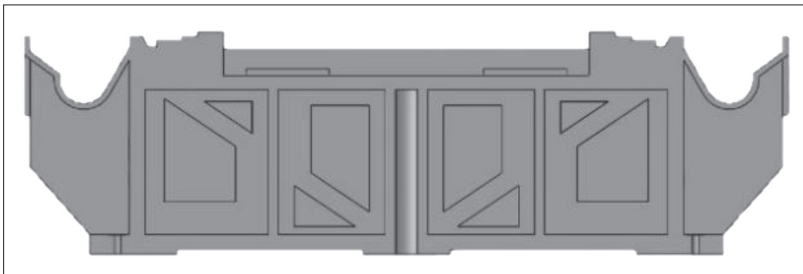


图4 优化后床身内部筋腔结构

(2) 立柱、主轴箱等部件对床身导轨面的力矩为 27000Nm；

(3) 切削力的大小为 20000N。
本文首先分析床身在仅受重力加速度、压力、切削力等作用力后的变形情况，经过求解得到床身的总体静力变形（图 5）。

床身导轨面往往是比较重要的，是保证立柱、主轴箱等移动部件能够平稳运行的关键，需要关注优化前后导轨面的变形情况（图 6）。

优化前后床身的总体变形及导轨面的结果汇总如表 1 所示。

表 1 床身结构优化前后变形情况

结构类型	优化前结构变形 /mm	优化后结构变形 /mm
床身整体变形	0.017	0.011
导轨面变形	0.014	0.01

3.2 模态分析

针对床身的模态分析，主要设置求解所需要的最大频率阶数，本文选取前四阶进行分析，得到床身的固有频率，如表 2 所示。

3.3 床身优化前后结果对比

通过前文分析结果可以看出，优化后床身总体变形相比于优化前减少 35.3%，导轨面变形相比优化前减少

表 2 床身优化前后模态频率

模态阶数	优化前床身频率 /Hz	优化后床身频率 /Hz
1	262.39	343.03
2	297.08	361.08
3	311.81	380.73
4	379.31	413.82

28.6%，因此从静力学角度看优化后床身结构要好于优化前的结构。

通过模态分析得到的数据可以得出，优化后床身前四阶模态频率相比优化前分别提升 30.7%、21.5%、22.1% 和 9.1%。

综上所述，从静力学和模态分析都可以得出优化后床身结构更优，同时优化前后床身的质量分别为 8030kg 和 7400kg，优化后质量减少了 7.8%。

4 结语

本文通过有限元分析软件对未进行筋腔设计的床身进行拓扑优化，根据结果设计出优化后的新结构，并与优化前的结构进行静力学与模态分析对比，通过结果数据可以得出优化后结构相比优化前静变形减少，模态频率提升，因此，通过拓扑优化分析可以从理论上为机械设计人员提供参考依据。

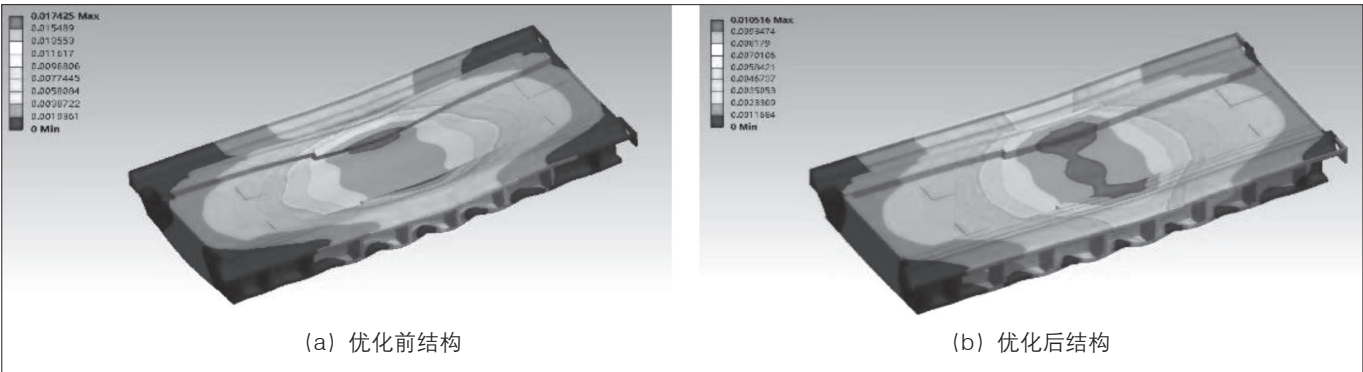


图 5 优化前后受压力切削力等时床身变形

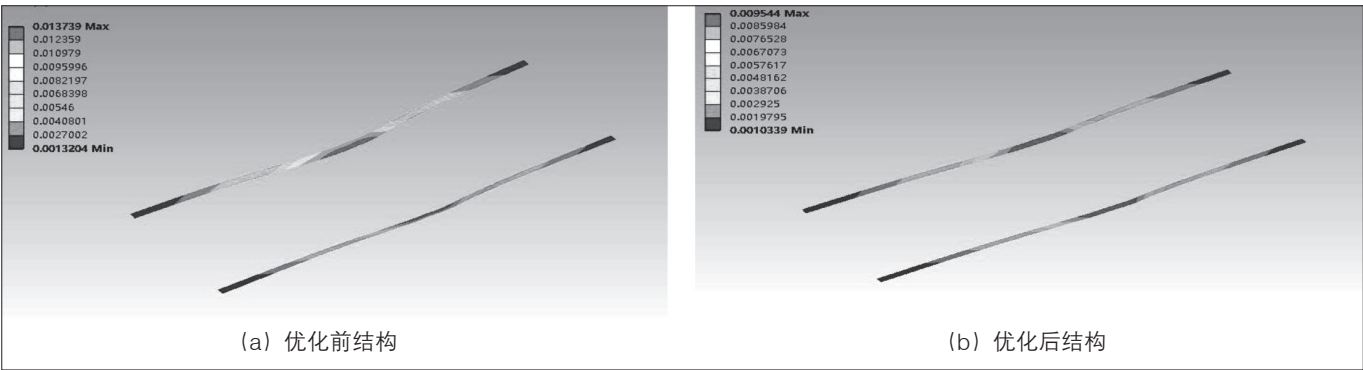


图 6 优化前后床身导轨面变形

(下转第 8 页)

铰链检具数据等。

(2) 零件实测数据虚拟匹配: 可以在零件从供应商处发货之前, 获取零部件或分总成的检测数据, 提前在 DPV 系统中进行虚拟匹配, 预测并发现质量问题并提前解决, 节省大量资金和时间。

(3) 零件实测数据公差建模仿真分析: 把车身及零部件实际测量数据, 导入三维公差尺寸链模型中, 软件预测装车效果, 并给出关键影响因子和贡献度, 帮助工程师快速识别问题点原因, 提升投产问题分析效率。

(4) 快速创建局部基准做偏差统计分析: DPV 系统可以将车身、车架的三坐标测量数据, 任意创建局部基准, 统计测点在局部基准下的相对偏差。白车身典型局部基准设置位置, 包括前门洞局部基准、后门洞局部基准、尾门洞局部基准, 前机舱局部基准、天窗局部基准、前风窗局部基准等。

(5) 数据相关性动态分析: 将一台车身门洞测点关联在一起, DPV 系统可以将 20 台车身门洞三坐标检测数据做动态可视化呈现, 快速识别多台车门洞姿态变化。

5 结语

基于 DPV 平台的数据管理系统, 整合了汽车在制造过程中全流程的测量结果, 使管理者可以依靠单一平台完成对整车制造全流程的质量监控, 并且可以横向/纵向依据工程师角色的不同, 快速实现对数据的整合分析, 让工程师把更多的精力放在对数据的分析和问题解决上, 而不是在数据的整理与管理上。DPV 数据系统降低了工程师整理和分析不同阶段数据的难度, 为公司质量整改与管理提供了有力的支撑。依据 DPV 数据系统集成的各车型大量数据, 不断优化产品设计、提升整车尺寸质量水平, 提升江铃汽车品牌竞争力。

参考文献:

[1] 陈晓刚. 尺寸工程在车身制造中的研究和应用 [D]. 沈阳: 东北大学, 2017.

作者简介: 马坚 (1975.01-), 男, 汉族, 浙江杭州人, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向: 机械工程。

(上接第 4 页)

参考文献:

[1] 张凯, 刘春时, 李焱, 等. 一种卧式五轴加工中心的结构特点与技术性能 [J]. 机械设计与制造, 2011(12): 202-204.

[2] 杨明亚, 王辉, 张长泉, 等. 数控机床床身筋板布局方式的动态性能分析及优化设计 [J]. 贵州大学学报 (自然科学版), 2013, 30(1): 37-42.

[3] 王珂. 机床结构件的分步拓扑优化设计 [D]. 天津: 天津大学, 2017.

[4] 汤文成, 易红, 唐寅. 机床大件结构的拓扑优化设计 [J]. 江苏机械制造与自动化, 1998(3): 7-10.

[5] 刘志强, 王明强. 基于 SIMP 拓扑优化理论的结构概念设计研究 [J]. 江苏科技大学学报 (自然科学版), 2006, 20(1): 65-68.

[6] 陈艾荣, 常成, 马如进, 等. 结构拓扑优化理论及

其在桥梁结构找型中的应用 [J]. 同济大学学报 (自然科学版), 2016, 44(5): 657-663.

[7] 刘月. 基于 SIMP 法的机床斜床身拓扑优化设计 [J]. 农业装备与车辆工程, 2017, 55(6): 92-96.

[8] 李启宏, 李海艳. 基于改进 SIMP 法的连续体结构拓扑优化方法研究 [J]. 机电工程, 2021, 38(4): 428-433.

[9] 邹春江, 左孔天, 向宇, 等. 基于 SIMP 方法微电容加速度计结构固有频率拓扑优化 [J]. 科学工程与技术, 2011, 11(29): 7086-7091.

[10] 朱大昌, 宋马军. 基于多目标拓扑优化的全柔顺并联机构构型固有振动频率研究 [J]. 中国机械工程, 2015(13): 1794-1801.

[11] 陈静, 杨泽龙, 安勇成, 等. 基于 ANSYS 的立柱动态特性分析与拓扑优化 [J]. 机械设计, 2015, 32(6): 61-65.