

基于 FEM 的数控弧齿铣齿机立柱结构静、动态设计

李翼龙, 郭志全, 刘明涛, 李彦启
(天津科技大学机械工程学院, 天津 300222)

摘要: 借助有限元分析软件, 运用结构动态设计原理和基于有限元法的变量化分析技术对数控弧齿铣齿机立柱部件进行动、静态特性分析, 并以立柱结构的侧板宽度为几何参数进行灵敏度分析, 找出原设计中的不足, 并在结构及尺寸上加以改进. 结果表明, 改进后立柱的动、静态性能得到显著的提高, 为机床设计和改造提供了依据.

关键词: 有限元法; 立柱; 静态分析; 灵敏度分析

中图分类号: TG502; TH122

文献标志码: A

文章编号: 1672-6510(2012)01-0052-05

FEM-Based Static & Dynamic Design of Computer Numerical Control Bevel Gear Machine Tool Column

LI Yilong, GUO Zhiqian, LIU Mingtao, LI Yanqi

(College of Mechanical Engineering, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300222, China)

Abstract: By using finite element analysis software, structural dynamic design principle, and variational analysis technique based on finite element method (FEM), a static and dynamic characteristic analysis was carried out on the column structure of numerical control bevel gear machine tool. Sensitivity analysis was also conducted according to the geometric parameters of the column structure. The deficiencies in the original design were found out and then improved in both the structure and measure. The results show that the static and dynamic performance of the improved column has been increased significantly, so this method can offer bases for the design and renovation of machine tools.

Key words: finite element method; column; static analysis; sensitivity analysis

立柱是数控机床中主要结构部件之一, 其结构特性对机床的性能影响很大, 主要体现在加工精度、抗振性、切削效率、使用寿命等方面^[1-4]. 对立柱等部件进行精确、合理和科学的分析计算是数控机床结构设计过程中需要迫切解决的重要课题. 而在满足机床加工性能的前提下, 如何使机床的设计更加轻量化, 是当今提高机床竞争力的主要趋势.

本文借助 ANSYS 软件分析了立柱的动静态特征, 优选出最佳结构型式, 探讨实现立柱动态优化设计的途径.

1 立柱模型的建立

图 1 为天津精诚机床制造有限公司生产的数控

弧齿铣齿机的结构图. 该机床用于加工大、重型卡车后桥弧齿锥齿轮, 最大加工齿轮模数 12 mm、直径 600 mm, 最大公称切削合力为 12 kN, 机床占地 2.5 m × 1.85 m, 总质量 12 t.

首先采用面建模方法来建立立柱模型, 然后将 SolidWorks 中建立的立柱结构面模型以 igs 格式导入到 ANSYS 中进行分析计算. 采用板单元类型, 单元格尺寸为 50 mm. 此机床立柱高为 1 200 mm, 顶板及底板厚度为 100 mm, 顶板长度为 870 mm, 宽度为 440 mm, 底板长度为 870 mm, 宽度为 620 mm, 外壁及内部筋板厚度均为 25 mm. 在如实反映立柱结构主要力学特性的前提下, 对部分特征进行简化. 简化后的立柱模型见图 2(a), 有限元划分结果见图 2(b).

收稿日期: 2011-10-10; 修回日期: 2011-11-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50905127); 天津科技大学科学研究基金资助项目(201117)

作者简介: 李翼龙(1983—), 男, 山西人, 硕士研究生; 通信作者: 郭志全, 副教授, guozhiqian@tust.edu.cn.

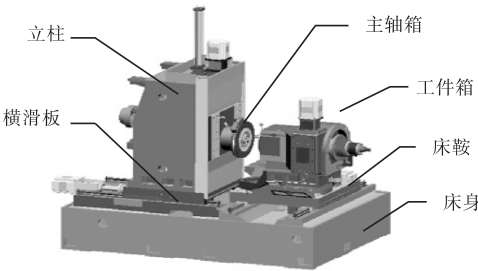
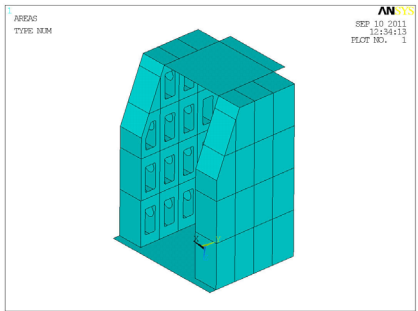
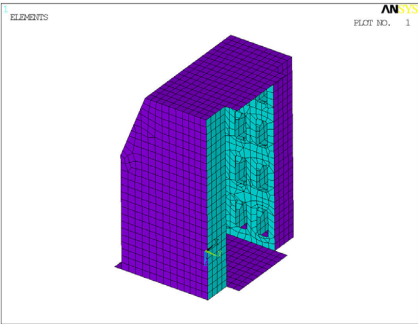


图 1 数控弧齿铣齿机结构

Fig.1 Structure of computer numerical control bevel gear machine tool



(a) 立柱简化模型



(b) 有限元划分结果

图 2 立柱模型

Fig.2 Model of column

2 立柱的动态特性分析

立柱的模态分析包括自由模态分析和约束模态分析^[5]. 采用这两种形式对立柱进行了分析与对比.

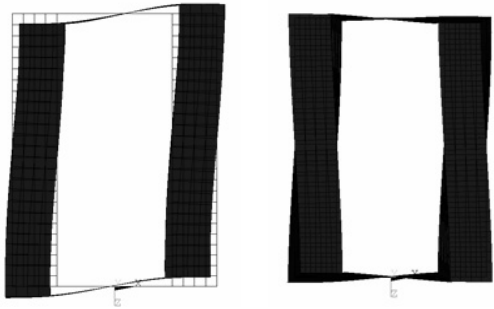
2.1 立柱的自由模态分析

在自由模态中, 立柱不受任何载荷和约束作用, 经过有限元分析得到立柱前四阶自由模态时的频率和振型描述见表 1, 振型如图 3 所示.

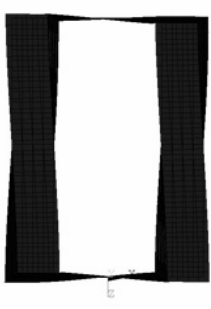
表 1 立柱自由模态频率及振型

Tab.1 Free mode frequency and modal shape of column

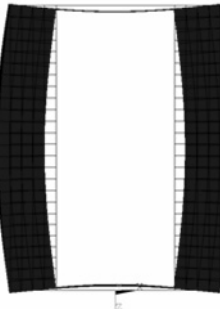
阶次	模态频率/Hz	振型描述
1	248.86	两侧板竖直方向相对摆动
2	265.51	两侧板围绕 x 轴扭动
3	347.67	两侧板扩张振动
4	481.88	两侧板同向弯曲



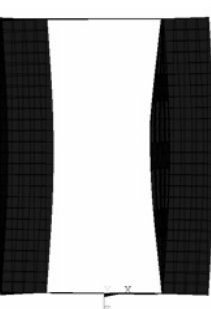
(a) 一阶振型 (248.86 Hz)



(b) 二阶振型 (265.51 Hz)



(c) 三阶振型 (347.67 Hz)



(d) 四阶振型 (481.88 Hz)

图 3 立柱前四阶自由模态的振型

Fig.3 The first four free mode shapes of column

2.2 立柱的约束模态分析

当机床在实际工作过程中时, 立柱底面是通过螺栓与横滑板固定连接在一起, 因此, 应将立柱底面的某些节点约束起来进行模态分析. 表 2 为前六阶约束模态频率及振型.

表 2 立柱约束模态频率及振型

Tab.2 Constrain mode frequency and modal shape of column

阶次	模态频率/Hz	振型描述
1	103.21	立柱侧板和顶板左右方向摆动
2	163.41	立柱侧板和顶板前后方向摆动
3	259.32	立柱围绕竖直中心轴扭动
4	398.17	两侧板扩张摆动
5	489.72	侧板围绕竖直 z 轴扭摆
6	519.76	侧板以各自的竖直轴扭摆

根据立柱前三阶约束模态振型描述可知, 不论是侧板的左右摆动、前后摆动, 还是立柱绕竖直中心轴扭动, 都直接影响机床的加工精度和切削性能. 而第四、五、六阶模态振型对机床的加工性能影响较小. 因此, 必须修改立柱的结构, 使低阶模态的频率相应提高, 以提高结构的动刚度^[6].

2.3 立柱筋板厚度变化时的自由模态分析

原始设计的立柱筋板厚度为 25 mm, 修改其厚度从 15 mm 按 2.5 mm 间距递增到 25 mm, 动态分析

结果见表3。

表3 不同筋板厚度下的动态分析

Tab.3 Dynamic analysis on rid's thickness

筋板厚度/ mm	自由状态下的模态频率/Hz			
	f_1	f_2	f_3	f_4
15.0	252.36	268.32	355.38	499.42
17.5	251.70	267.61	353.76	494.40
20.0	250.85	266.93	351.93	489.77
22.5	249.90	266.31	349.97	485.58
25.0	248.86	265.51	347.67	481.88

从表3可看出,立柱的模态频率随着筋板厚度的增加反而降低,但降低的幅度并不大(第四阶时降低最大,为17.54 Hz,降低3.5%),为了使立柱具有较高的动态特性,应尽量选取较薄的筋板。然而在设计时,还需要考虑立柱的静态特性和立柱质量来合理选择筋板厚度。

3 立柱的静态特性分析

在工作过程中,立柱的导轨部分支撑着主轴箱,所以在对立柱进行静力分析时除了在立柱底部加约束,还要在导轨面上分别加力: $F_x = -6\,000\text{ N}$, $F_y = -7\,000\text{ N}$, $F_z = -5\,000\text{ N}$ 。加载位置为竖直导轨距底面712.5~1\,092.5 mm处,约束及加载情况见图4。

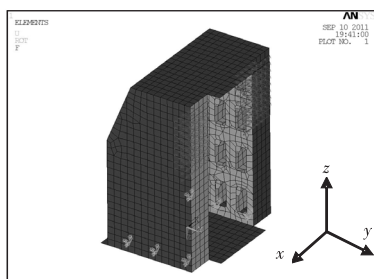


图4 施加载荷后立柱的有限元模型

Fig.4 Finite element model of column with constrain

立柱最大静变形和立柱质量随筋板厚度的变化情况分别如图5和图6所示。由图可以看出,立柱的最大静变形量随着筋板厚度的增加反而降低,但是降低的幅度并不大,可见筋板厚度对其静态特性影响较小。但筋板厚度的变化对立柱质量有一定影响。内部筋板厚度每降低1 mm,质量下降约14 kg。降低立柱质量可以节省材料、降低成本。同时从动态设计的角度考虑,上方部件质量降低,可使重心下移,有利于整机动态特性的提高。因此,在设计立柱结构时,应尽量采用薄的筋板,但是一味地降低筋板的厚度会降低立柱的静刚度,增加立柱的变形。综合以上计算,

同时为了使立柱具有较高的动态特性,选取筋板厚度20 mm作为立柱最终改进方案。

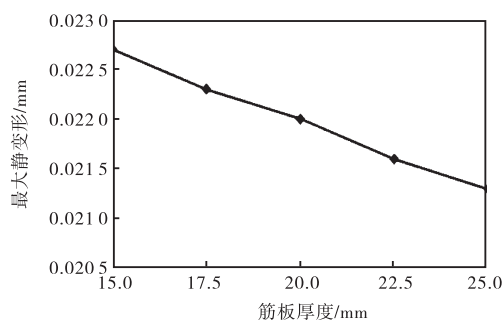


图5 最大静变形随筋板厚度变化情况

Fig.5 Relationship between static deformation and rib's thickness

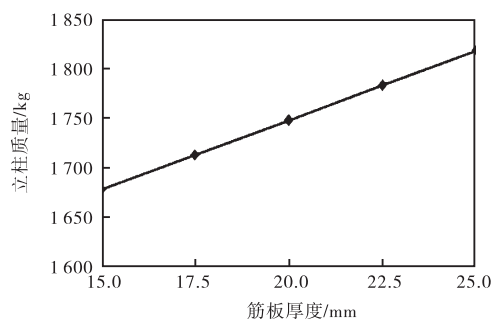


图6 立柱质量随筋板厚度变化情况

Fig.6 Relationship between column mass and rib's thickness

4 对比分析

4.1 结构变化对立柱特性的影响

从立柱的前四阶模态的振型描述可知,第一阶模态表现为两侧板竖直方向相对摆动,会引起上下水平板的刚度不足,影响机床加工的动态特性。因此,应在立柱中部上、下板拐角处加入圆弧筋板(板厚20 mm)来提高上下板的刚度,其他板厚度为原始厚度^[7],如图7所示。

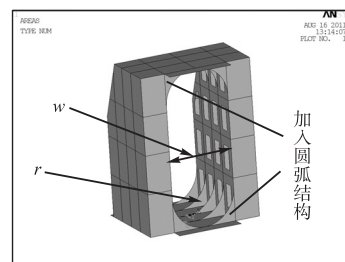


图7 圆弧过渡后的模型

Fig.7 Model of add transition circle

将该圆弧半径 r 作为设计变量, 改变半径 r 的大小, 进行有限元分析后得到 r/w 与最大静变形的关系见图 8. 上下加入圆弧 ($r/w = 0.5$) 过渡时, 最大变形量为 0.019 2 mm.

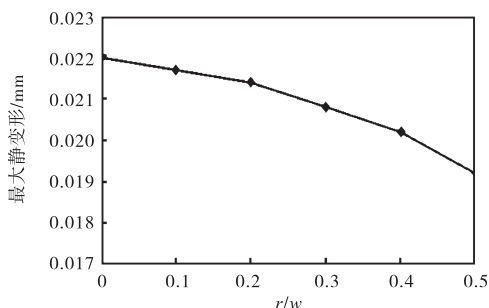


图 8 最大静变形与 r/w 的关系

Fig.8 Relationship between the maximal static deformation and r/w

改变加入的圆弧半径, r/w 与模态频率之间的关系见图 9.

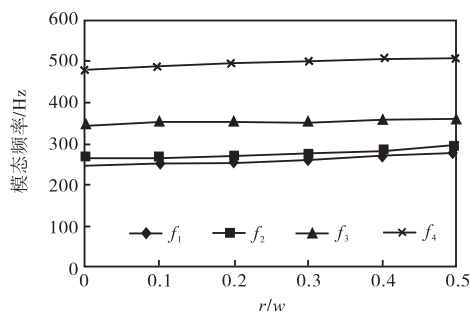


图 9 前四阶模态频率与 r/w 的关系

Fig.9 Relationship between the first four mode frequency and r/w

与原始设计对比可知, 在拐角处加入圆弧筋板可提高立柱结构的动、静态刚度, 当 $r/w > 0.2$ 时, 提高的效果更加明显. 如: $r/w = 0.5$ 时, 第 1、2 阶模态频率分别提高 12.7% 和 10.8%, 静刚度提高 9.9%. 根据以上分析, 并参考立柱内部结构形状和立柱自身质量提高的影响, 最终选择 $r/w = 0.4$, 此时, 前两阶模态频率分别比原来提高了 8.9% 和 6.4%, 静刚度提高了 5.2%.

4.2 灵敏度分析

立柱框架如图 10 所示, 框架内容纳主轴箱等部件. 中部宽度 b 由主轴箱等部件宽度来确定, 高 h 由被加工最大零件的尺寸来决定^[8]. 立柱双层板结构的侧板宽度 a 的取值对立柱整体性能有一定影响, 以 a/w 作为设计变量对该立柱框架结构进行灵敏度分析^[9-10]以求解其最优范围. 现定义 a/w 的变化范围为

0.15 ~ 0.25, 在自由状态下, a/w 的变化对立柱前 4 阶模态频率的影响如图 11 所示, a/w 的变化对最大静变形的影响如图 12 所示.

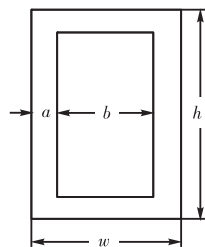


图 10 立柱框架图

Fig.10 Frame structure of column

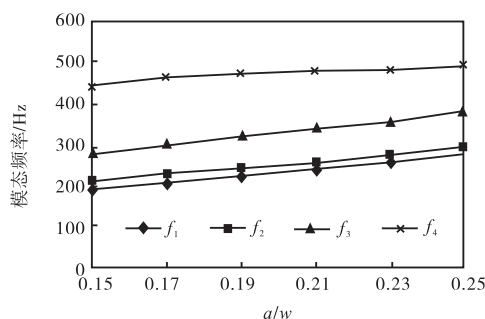


图 11 前四阶模态频率与 a/w 的关系

Fig.11 Relationship between the first four mode frequency and a/w

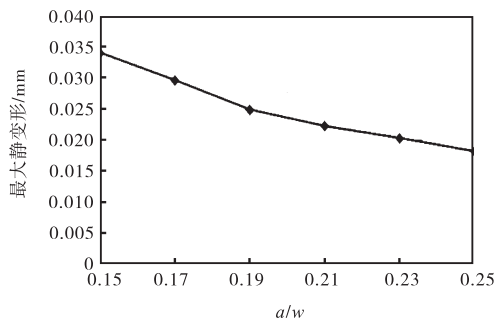


图 12 最大静变形与 a/w 的关系

Fig.12 Relationship between the maximal static deformation and a/w

由图 11 和图 12 可以看出, 立柱的侧板宽度 a 约是立柱宽度 w 的 1/4, 即立柱中间宽度 b 是整个宽度的一半时, 立柱的各阶模态频率达到最大极值, 此时立柱的最大静变形最小, 静刚度最强. 但是随着侧板宽度的增加, 立柱的质量也随着增加, 会使立柱重心上移, 不利于整机动态性能的提高. 综合考虑, 应使结构比例满足 $a/w = 0.19 \sim 0.23$, 可以得到较好的结构动态特性.

5 结 语

立柱结构的优化设计对机床整体的加工性能有重要影响,是提高机床加工精度的必要手段. 本文在应用模态、静变形分析和有限元方法的基础上,对初始的数控弧齿铣齿机的立柱结构进行了动、静态特性分析和灵敏度分析. 根据分析结果,找出设计中的薄弱环节,并从立柱结构和尺寸上进行了改进设计. 计算结果表明,改进后立柱的模态频率和静刚度有了明显提高,可以显著地提高机床的结构刚度.

参考文献:

- [1] 郭志全,徐燕申,张学龄. 基于有限元的加工中心立柱结构静、动态设计[J]. 机械强度, 2006, 28(2): 287-291.
- [2] 辛志杰,徐燕申,满佳,等. 基于有限元分析的数控铣齿机立柱动静态设计[J]. 中北大学学报:自然科学版, 2006, 27(6): 483-486.
- [3] 杨明亚,杨涛,汤本金,等. 机床立柱动态特性的分析[J]. 机械制造与自动化, 2007, 36(1): 29-31.
- [4] 韩江,杨牧原,季晗,等. 大型数控落地镗铣床立柱的有限元分析[J]. 现代机械, 2009(4): 1-2, 9.
- [5] 徐燕申. 机械动态设计[M]. 北京:机械工业出版社, 1991.
- [6] 张紫华. YH603 型 CNC 弧齿锥齿轮铣齿机结构动态设计研究[D]. 天津:天津科技大学机械工程学院, 2008.
- [7] 郭志全,霍津海,徐燕申. CNC 机床结构动态设计方法研究[J]. 制造技术与机床, 2007(8): 71-75.
- [8] 郭志全,徐燕申,霍津海,等. ANSYS 在机床结构静、动态设计中的应用[C/OL]//安世亚太 2006 年用户年会论文集, 北京:安世亚太公司, 2006[2011-10-10]. <http://wenku.baidu.com/view/f25454186bd97f192279e965.html>.
- [9] 郭垒,张辉,叶佩青,等. 基于灵敏度分析的机床轻量化设计[J]. 清华大学学报:自然科学版, 2011, 51(6): 846-850.
- [10] 罗辉,陈蔚芳,叶文华. 机床立柱灵敏度分析及多目标优化设计[J]. 机械科学与技术, 2009, 28(4): 487-491.

责任编辑:常涛