

doi:10.3969/j.issn.1672-4348.2020.01.005

数控玻璃加工机床横梁有限元分析及优化设计

赖章鹏, 黄卫东, 陈广宇, 洪浩, 张伟杰

(福建工程学院 机械与汽车工程学院, 福建 福州 350118)

摘要: 横梁是数控玻璃加工机床关键零部件, 利用 ANSYS 软件对其进行静、动态特性分析以及谐响应分析, 获得了横梁极端工况的变形情况以及前六阶固有频率和振型, 确认第 2 阶固有频率易引起横梁共振。以提高二阶固有频率为优化设计目标, 横梁结构尺寸为优化变量, 运用 Isight 软件及灵敏度分析方法对其进行优化。结果表明: 优化后横梁质量减少了 12.88 kg, 静变形量减少 29.22 μm , 二阶固有频率增大 13.34 Hz。

关键词: 数控玻璃加工机床; 横梁; 优化设计

中图分类号: TH122

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2020)01-0023-06

Finite element analysis and optimization design of beam for CNC glass machine tool

LAI Zhangpeng, HUANG Weidong, CHEN Guangyu, HONG Hao, ZHANG Weijie

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: Beam is a key component of CNC glass machine tools. The ANSYS software was used to conduct analysis on its static and dynamic characteristics and harmonic response, and obtained the deformation of the beam under extreme conditions and the first six natural frequencies and modes. It was confirmed that the second-order natural frequency tends to cause beam resonance. With improving the second-order natural frequency as the optimization design objective, and the beam structure sizes as the optimal variables, optimization was conducted by using the software Isight and the sensitivity analysis method. Results show that the mass of the optimized beam was reduced by 12.88 kg, the static deformation was reduced by 29.22 μm , and the second-order natural frequency was increased by 13.34 Hz.

Keywords: CNC glass machine tool; beam; optimization design

数控玻璃加工机床采用龙门桥式结构布局, 横梁横跨距较大, 同时要承受动力头与自身的重力以及磨削时产生的磨削力, 因此对横梁的抗扭、抗振、抗压要求比较高, 其结构设计的合理性将对整个机床的加工性能产生直接影响。董晓传等^[1]提出一种大型成型设备的预紧组合结构横梁的设计方法。郭琳娜等^[2]在十字型加强筋基础上提出米字型板筋, 使横梁整体性能显著提高。

朱金波等^[3]运用拓扑优化与模态分析, 以横梁质量、第 1 阶固有频率为目标对横梁筋板结构和尺寸进行优化从而提高其性能。

本文利用 ANSYS 软件对机床横梁进行静、动态特性进行分析, 根据谐响应分析易引起横梁共振的固有频率, 运用灵敏度分析方法及 Isight 软件以提高该固有频率为目的对横梁结构进行优化设计。

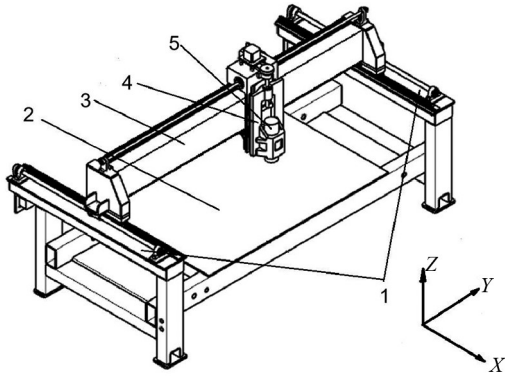
收稿日期: 2019-09-23

第一作者简介: 赖章鹏(1995-), 男, 福建晋江人, 硕士研究生, 研究方向: 先进制造工艺与装备。

通信作者: 黄卫东(1970-), 男, 福建福州人, 教授, 硕士, 研究方向: 先进制造工艺与装备。

1 横梁受力分析

数控玻璃加工机床采用龙门桥式结构布局,机床 X 轴采用了双电机同步控制,主轴功率 7.5 kW,最高转速可达到 10 000 r/min,如图 1 所示。



1-龙门架, 2-床身, 3-横梁, 4-动力头, 5-主轴

图 1 数控玻璃加工机床整机结构图

Fig.1 Structure of CNC glass machine tools

横梁组件主要包括横梁、横梁座、滑块、动力头等结构。数控玻璃加工机床动力头在横梁上左右移动从而实现 Y 方向的运动,横梁在龙门架上前后移动实现 X 方向的运动,主轴的上下运动实现 Z 方向的移动。

机床横梁所承受的是复杂的空间力系,在特定磨削进给量状态下,当动力头处于横梁对称中心位置时,横梁所承受的变形达到最大,其受力分析如图 2 所示。

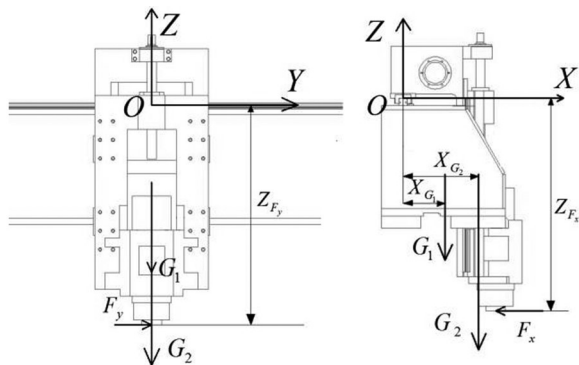


图 2 横梁受力分析

Fig.2 Force analysis of the beam

图 2 中,横梁主要承受自身重力 G_1 、动力头重力 G_2 、玻璃磨边时产生的磨削力 F_x 、 F_y 。设坐标原点 O 位于横梁上表面导轨跨中,横向滑板

主轴部件通过导轨等与横梁连接。为简化力学关系模型,假设动力头仅通过横梁上表面导轨与横梁连接。玻璃磨边加工时采用的是金刚石砂轮,因此法向磨削力与切向磨削力计算公式可采用金刚石砂轮平面磨削磨削力经验公式:

$$F_x = C_F a_p^\alpha v_s^{-\beta} v_w^\gamma; \quad F_y = (1.5 \sim 3) F_x; \quad [5]$$

式中 F_x 为切向磨削力, v_w 为移动线速度, F_y 为法向磨削力, v_s 为磨削速度, C_F 为磨削力系数, a_p 为背吃刀量, $a_p = 0.005 \text{ m}$, $v_s = 35 \text{ m/s}$, $v_w = 1 \text{ 000 } \pi$, $C_F = 25 \text{ 719}$, $\alpha = 0.86$, $\beta = 0.38$, $\gamma = 0.4$, 得 $F_y = 157.5 \text{ N}$, $F_x = 52.5 \text{ N}$ 。各力的大小和相关参数如表 1 所示。

表 1 各参数含义及数值

Tab.1 Indication and value of each parameter

名称	符号	单位	数值
横梁重力	G_1	N	6 259
动力头重力	G_2	N	4 741
法向磨削力	F_x	N	52.5
切向磨削力	F_y	N	157.5
法向磨削力距原点 Z 向距离	Z_{F_x}	mm	757
切向磨削力距原点 Z 向距离	Z_{F_y}	mm	757
横梁重力距原点 X 向距离	X_{G_1}	mm	158
动力头重力距原点 X 向距离	X_{G_2}	mm	313

设横梁受到沿 X、Y、Z 方向的分力为 F_x 、 F_y 、 F_z , 受到的绕 X、Y、Z 轴的力矩分别为 M_x 、 M_y 、 M_z 。根据力的平移定理可知:

$$F_x = F'_x = 52.5 \text{ N}$$

$$F_y = F'_y = 157.5 \text{ N}$$

$$F_z = G'_1 + G'_2 = 11 \text{ 000 N}$$

$$|M_x| = 119 \text{ 227.5 N} \cdot \text{mm}$$

$$|M_y| = 2 \text{ 512 597.5 N} \cdot \text{mm}$$

$$|M_z| = 59 \text{ 062.5 N} \cdot \text{mm}$$

2 横梁静动态特性分析

2.1 有限元模型建立

使用建模软件对机床横梁进行三维建模时,在不影响求解的情况下对横梁简化,即忽略螺栓、螺母等部分,去除倒角、圆角、凸台、螺纹孔等细微

特征。将处理好的三维模型与 ANSYS 软件进行联合仿真。设置横梁材料为 HT200,密度为 7 200 kg/m³,弹性模量取 148 GPa,泊松比取 0.31。得到横梁质量为 625.9 kg。采用网格自动划分功能,横梁上各部件除动力头外采用六面体单元,动力头采用四面体单元。为保证横梁网格划分的质量,参考各部件最小尺寸,将横梁、导轨单元网格尺寸设置为 10 mm,其余部件网格尺寸设置为 20 mm。在划分完网格后,得到单元数为 159 843,节点数为 46 198。

根据横梁受力分析可知,横梁主要承受横梁自身重力 G_1 、动力头重力 G_2 、磨削时产生的磨削力 F_x 、 F_y ,其值如上所示。由于横梁可在床身上沿 X 轴直线导轨进行精确运动,在横梁运动时,Y 轴、Z 轴方向自由度受到约束,因此需在支撑座上施加 Displacement 约束其在 Y 轴、Z 轴方向的自由度。

2.2 横梁静态特性分析

根据主轴部件在横梁上不同位置,进行静力学分析,可以得到横梁在载荷作用下的变形量和应力分布,判断横梁的静刚度大小。图 3 为主轴部件在不同位置时横梁应力应变云图。主轴部件在横梁左极限位置时的应力略大于在横梁对称中心位置,在横梁左极限位置时的最大等效应力为 19.939 MPa,主要集中在横梁的上端面;主轴部件在横梁对称中心时产生较大的应变,变形量为 135.93 μm,主要变形发生在横梁上端面,此处的刚性较差,横梁的变形将影响加工精度,需要进行强化提升。

2.3 横梁动态特性分析

模态分析可以确定横梁结构的各阶振型以及固有频率^[6]。将横梁看成是一个质量以及弹性分布都均匀连续体,该情况在理论下将有无限多的解。由于低频对机床动态性能的影响相对于高频更为显著,且高频更难达到,因此低阶模态相较于高阶模态能更为准确地反映系统在自由振动时的振动情况。因此,以前 6 阶模态固有频率作为研究对象,表 2 为横梁前 6 阶固有频率及振型。

通过横梁各阶模态分析振型可以得出,横梁前 2 阶振型以弯曲变形为主,后 4 阶振型以扭转变形为主,前两阶的固有频率较小,第 2 阶固有频率只有 102.6 Hz,机床的转动部件很容易达到该频率,导致横梁发生弯曲变形而影响加工性能。

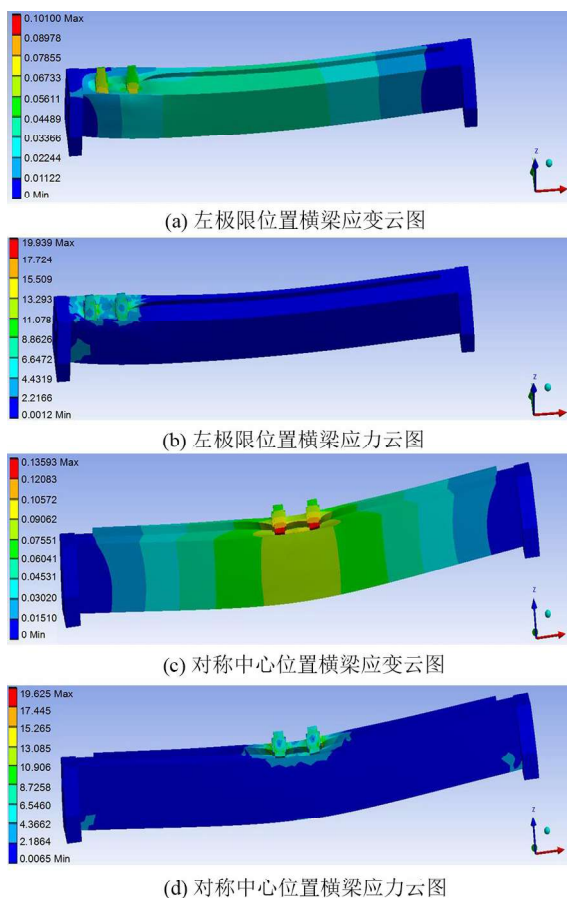


图 3 主轴部件在不同位置时横梁应力应变云图
Fig.3 Stress-strain nephograms of the beam when spindle components are in different positions

表 2 横梁前六阶固有频率及振型

Tab.2 Natural frequencies and maximum deformation of the first six orders of the beam

阶数	固有频率/Hz	振型
1	84.4	横梁中间向上弯曲变形
2	102.6	横梁中间向上弯曲变形
3	227.0	横梁左右呈 S 形扭转变形
4	237.7	横梁左右呈 S 形扭转变形
5	265.9	横梁中间受扭转变形
6	366.6	横梁中间受扭转变形

2.4 横梁谐响应分析

谐响应分析用于确定线性结构在承受随时间按正弦(简谐)规律变化的载荷时的稳态响应,分析过程中只计算结构的稳态受迫振动,不考虑激

振开始时的瞬态振动,谐响应分析的目的在于计算出结构在几种频率下的响应值(通常是位移)对频率的曲线。

机床在加工时工件与刀具间会产生一个持续作用的力,通过谐响应分析可确定横梁在这个持续力作用下的响应情况,确定横梁的抗振性能。根据横梁模态分析结果将分析范围设在 0~380 Hz,设置频率扫描间隔为 1 Hz,选择横梁上表面为分析对象进行求解,结果如图 4 所示。

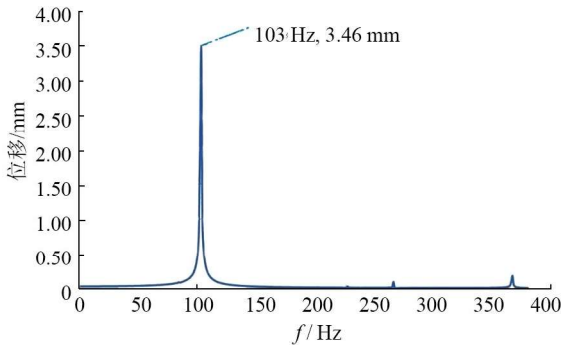


图 4 横梁位移-频率曲线图

Fig.4 Beam's displacement-frequency curve

从图 4 可看出,在不同频率的作用下,横梁位移响应最大峰值约为 3.46 mm,对应的频率约为 103 Hz。与前 6 阶模态分析的结论进行比对,发现数控玻璃加工机床横梁位移出现峰值时的频率与第 2 阶固有频率($f = 102.6$ Hz)非常接近,可知第 2 阶固有频率易引起数控玻璃加工机床横梁共振,对横梁的动态性能影响最大,因此选取第 2 阶频率作为动态优化设计的目标。同时由于高阶频率比低阶频率难以达到,因此以提高第 2 阶频率为目的进行优化设计。

3 横梁结构设计

3.1 横梁设计变量的确定

由于外部结构以及尺寸受到限制,对于横梁这一类型的零件只能对内部板筋结构及尺寸进行二次设计。大量研究表明提升横梁力学性能最有效的方法是对内部板筋的再设计^[7]。同时根据横梁静态分析可知,横梁的变形主要集中在对称中心位置,根据结构力学知识可以将横梁内部板筋分布设置成中间密集两边稀疏的形式,有效提高横梁力学性能。其结构设计如图 5 所示,图中变量如表 3 所示。

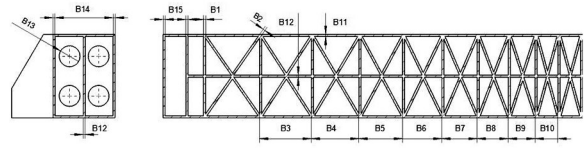


图 5 所有初始变量在横梁中的分布

Fig.5 Distribution of all initial variables in the beam

表 3 参数设计范围

Tab.3 Parameter design range

设计参数	含义	初始值/mm	变化范围/mm
B1	纵向板筋厚度	10	8~12
B2	“X”型板筋厚度	10	8~12
B3	“X”型板筋跨度 1	250	240~260
B4	“X”型板筋跨度 2	230	220~240
B5	“X”型板筋跨度 3	210	200~220
B6	“X”型板筋跨度 4	190	180~200
B7	“X”型板筋跨度 5	170	160~180
B8	“X”型板筋跨度 6	150	140~160
B9	“X”型板筋跨度 7	130	120~140
B10	“X”型板筋跨度 8	110	100~120
B11	横梁上下壁厚	10	8~12
B12	“十”字板筋厚度	10	8~12
B13	圆孔径	100	80~120
B14	横梁前后壁厚	10	8~12
B15	横梁左右壁厚	10	8~12

3.2 横梁灵敏度分析及 Isight 集成

灵敏度即求导信息,灵敏度分析是一种度量方式,是一种评价优化方案因设计变量或参数的改变而引起结构响应特性变化率的一种方法^[8]。局部灵敏度分析指的是通过改变一个设计变量来分析模型性能的变化程度,通过这种方法来找出对模型影响较大的设计变量,并以这些设计变量作为主要参数对结构进行优化^[9]。

通过 Isight 集成 UG 以及 AW 软件,进行正交实验设计,计算得出各设计参数对横梁质量以及二阶固有频率的灵敏度。图 6 所示为实验设计流程,表 4 所示为各设计参数对横梁质量、二阶固有频率的灵敏度。

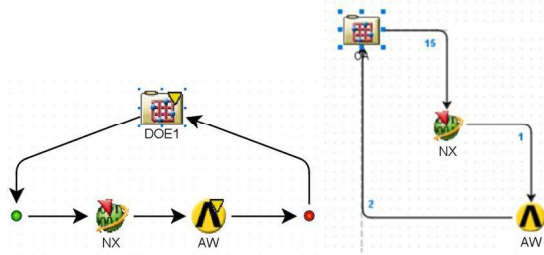


图 6 Isight 集成 UG 和 AW 软件框架

Fig.6 Isight integration UG and AW software framework

表 4 横梁质量以及二阶固有频率的灵敏度表

Tab.4 Beam mass and sensitivity of the second order's natural frequency

设计变量	质量灵敏度/ (kg · mm ⁻¹)	第二阶固有频率灵敏度/ (Hz · mm ⁻¹)
B1	-0.75	17.33
B2	-5.49	63.16
B3	0.05	-17.25
B4	-0.56	-2.74
B5	1.40	-21.22
B6	1.20	0.49
B7	-0.31	-19.52
B8	-2.92	13.12
B9	-1.54	-17.57
B10	1.55	-11.43
B11	4.38	163.80
B12	-2.88	46.29
B13	-0.52	-26.69
B14	1.66	205.70
B15	2.46	33.99

灵敏度的大小是其值的绝对值,正负号表示其相关方向,当灵敏度值大于 0 时,即目标函数与变量之间的关系为成正比,其值随变量的增加而增加;反之为反比关系,其值随变量的增加而减小^[10]。为了提高数控玻璃加工机床横梁结构动态优化的效率,应选取在不同目标函数设计下计算所得的灵敏度值(绝对值)较大的参数作为设计变量。

从表 4 中第 2 列可以看出, B2、B4、B5、B6、

B8、B9、B10、B12、B15 这 9 个尺寸对横梁的质量有较大的影响,其他尺寸对横梁质量影响较小;从表 4 第 3 列可以看出, B2、B5、B11、B12、B13、B14、B15 这 7 个尺寸对横梁二阶固有频率有较大影响,其他尺寸对二阶固有频率的影响较小,对横梁的动态特性提升程度不大。综上分析可得出结论:将 B2、B4、B5、B6、B8、B9、B10、B11、B12、B13、B14、B15 这 12 个尺寸定为尺寸优化设计的设计变量。

3.3 优化设计

利用 Isight 的 Optimization 组件中的归一化 (scalar) 方法,设置算法为 NCGA 方法,共进行了 200 次计算,得出最优方案,由于横梁属于铸件,铸造精度为 0.2 mm,其各个设计参数如表 5 所示,该方案最后优化结果如表 6 所示。

表 5 设计变量圆整值

Tab.5 Round values of design variables

设计变量	初始值	取值范围	优化圆整值
B2	10	8~12	8.6
B4	230	220~240	223.6
B5	210	200~220	217.2
B6	190	180~200	199.0
B8	150	140~160	155.6
B9	130	120~140	127.4
B10	110	100~120	115.6
B11	10	8~12	9.6
B12	10	8~12	8.2
B13	100	80~120	88.4
B14	10	8~12	8.4
B15	10	8~12	11.6

表 6 优化前及优化后对比

Tab.6 Comparison before and after optimization

方案	横梁质量/ kg	横梁静变 形量/μm	横梁二阶固 有频率/Hz
原方案	625.90	135.93	102.60
优化后方案	613.02	106.71	115.94
变化量	-12.88	-29.22	+13.34

4 结论

1) 通过对数控玻璃加工机床横梁进行静、动态特性分析,了解数控玻璃加工机床横梁的应力、应变情况以及前 6 阶固有频率。

2) 通过谐响应分析得出第 2 阶固有频率对数控玻璃加工机床横梁的动态性能影响最大,因此以第 2 阶固有频率为目标对横梁结构尺寸进行

优化设计。

3) 设计了“十”字型与“X”型板筋结构,并运用灵敏度分析方法确定了 12 个尺寸对数控玻璃加工机床横梁动态性能有较大影响。

4) 运用 NCGA 算法进行优化设计,优化后的横梁与原方案相比,质量减少了 12.88 kg,静变形量减少 29.22 μm ,二阶固有频率增大 13.34 Hz。

参考文献:

- [1] 董晓传, 金森, 姚阳, 等. 基于等效梁长法的组合深梁临界预紧力计算模型[J]. 机械工程学报, 2015, 51(15): 46-52.
- [2] 郭琳娜, 郑天池, 鞠家全, 等. 动梁龙门加工中心横梁结构设计及优化[J]. 现代制造工程, 2017(6): 90-93.
- [3] 朱金波, 徐如涛, 高新红, 等. 基于多目标优化的龙门加工中心动横梁筋板结构优化设计方法[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2015(10): 41-44.
- [4] 郭隐彪, 杨炜, 王振忠. 磨削加工工艺及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
- [5] 上海市金属切削技术协会. 金属切削手册[M]. 3 版. 上海: 上海科学技术出版社, 2000.
- [6] 杨建交, 张俊, 赵慧, 等. 双主轴铣削加工中心立柱的静动特性分析及多目标优化[J]. 机床与液压, 2018, 46(4): 52-56.
- [7] 林静. 龙门机床横梁有限元静动态特性分析及结构与优化[D]. 西安: 陕西理工学院, 2016.
- [8] 中国机械工程学会机械设计分会. 现代机械设计方法[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [9] IMANISHI E, NANJO T, KOBAYASHI T. Dynamic simulation of wire rope with contact[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2009, 23(4): 1083-1088.
- [10] 桂志伟. 累计表图像读数技术的研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2009.

(责任编辑: 方素华)