

[环保·安全]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2017.01.020

加工中心工作台结构优化及可靠性分析

刘欣玮¹, 张晓龙^{1*}, 杨垠耘¹, 张晓毅², 寸花英², 严江云², 崔岗卫², 袁胜万²

(1. 昆明理工大学机电学院, 云南 昆明 650500; 2. 沈机集团昆明机床股份有限公司, 云南 昆明 650203)

摘 要:针对目前加工中心工作台在工作时,由于振动和变形产生刚度降低的问题,提出了一种结构优化方案,以验证优化后工作台刚度的可靠性。采用有限元法,在静力学分析的基础上对工作台进行了不增加质量而提高刚度的优化;采用灵敏度分析法对优化后工作台的刚度可靠性进行分析;在 six sigma 分析系统中验证了优化后工作台的刚度可靠度。分析结果表明:优化后工作台的刚度提高 11.5%,且可靠度达到 100%,其中弹性模量及工作台圆形筋板厚度的随机变化对工作台刚度影响较大。该方案能提高加工中心工作台的刚度并且能确保其刚度可靠性。

关 键 词:加工中心;灵敏度分析;有限元法;six sigma 分析系统

中图分类号: TG502; TP271

文献标志码: A

文章编号: 1005-2895(2017)01-0086-05

Structural Optimization and Reliability Analysis of Machining Center Worktable

LIU Xinwei¹, ZHANG Xiaolong^{1*}, YANG Yinyun¹, ZHANG Xiaoyi²,
CUN Huaying², YAN Jiangyun², CUI Gangwei², YUAN Shengwan²

(1. Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;

2. Shenji Group Kunming Machine Tool Co., Ltd., Kunming 650203, China)

Abstract: Aiming at stiffness degradation due to vibration and deformation when the machining center worktable is working, a structural optimization scheme was proposed. The reliability of the optimized worktable stiffness was verified. Using finite element method, the optimization that improved the stiffness of worktable was studied without the mass increment based on static analysis. Using sensitivity analysis method, the reliability analysis of optimized worktable was studied. The stiffness reliability of the optimized worktable in the six sigma analysis system was verified. The results showed that, the stiffness of worktable increased by 11.5% after optimization and the reliability could achieve 100%. The elastic modulus and the circular steel plate thickness of the worktable had a great influence on the worktable stiffness. This scheme could improve the stiffness of machining center worktable and could ensure its stiffness reliability.

Keywords: Machining Center; sensitivity analysis; FEM (Finite Element Method); six sigma analysis system

现代机床正在向现代加工中心的方向发展。现代加工中心转速可达到 2 000 r/min 以上,快移速度 60 m/min 以上并且定位精度不超过 3 μm 。这些参数决定了机床必须有更高的刚度^[1]。工作台是机床的重要组成部分,其刚度不仅影响着机床的几何精度和加工精度^[2],而且影响着机床的加工质量和生产效率。因此,提高工作台的刚度是提高机床整体可靠性的有

效方法。

林欢等^[3]对工作台进行了静动力学分析,对该工作台进行拓扑优化以提高工作台系统的固有频率;刘光浩等^[4]对 ZK5150 型钻床的工作台进行有限元静动态分析,在满足刚度不下降的前提下对其进行轻量化设计;杨飞等^[5]对立式加工中心的工作台系统进行模态分析,对其结构进行了改进,提高了各阶的固有频

收稿日期:2016-08-09;修回日期:2016-10-10

基金项目:云南省战略性新兴产业专项(2012ZX04012-031)。

第一作者简介:刘欣玮(1992),女,云南昆明人,硕士研究生,主要研究方向为可靠性工程。通信作者:张晓龙(1976),云南昆明人,男,副教授,主要研究方向为机械设备的可靠性、维修性和安全性。E-mail:km_zxlong@qq.com

率;王传祥等^[6]用有限元分析在承受最大载荷时,TH6213 数控镗铣加工中心工作台的变形与应力,为验证机床工作台设计的合理性与进一步的优化提供了可靠的理论依据。

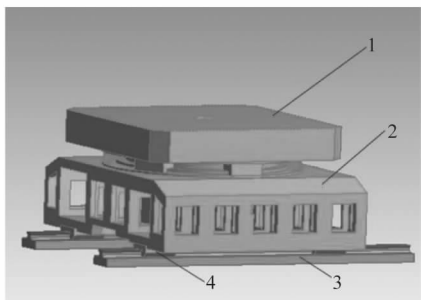
笔者以上述研究成果为依据,将工作台的静刚度作为研究对象,提出了以提高刚度为目标的优化方案。选择了几种主要影响参数作为独立随机变量,分析各参数的随机变化对优化后工作台刚度可靠性的影响,以为提高工作台刚度可靠性提供参考。

1 工作台的优化

1.1 建模

文中以某公司的 THM46100 高精度卧式加工中心工作台为研究对象进行建模分析,由于其内部结构较为复杂,建模时对影响较小的微小特征部件进行合理简化,简化后的模型如图 1 所示。

工作台支撑采用转盘轴承结构,工作时采用液压夹紧装置进行夹紧。工作台的材料为灰铸铁 HT250,弹性模量为 113 GPa;泊松比为 0.28;密度为 7 200 kg/m³;抗拉强度为 240 MPa;抗压强度为 820 MPa。工作台采用自由网格划分方式,网格划分模型如图 2 所示。



1—工作台;2—滑座;3—滑块;4—导轨。

图 1 转台结构图

Figure 1 Rotary worktable structure

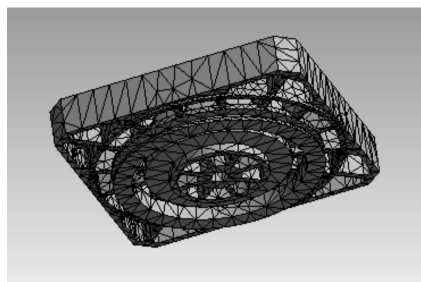


图 2 工作台网格模型

Figure 2 Worktable grid model

1.2 有限元模型的验证

对转台进行模态试验,将试验的结果与有限元分

析的结果相对照,以验证有限元模型的正确性。

被测转台采用悬吊的安装方式以模拟自由状态,其悬吊频率为 1 Hz 左右。如图 3 所示。使用橡皮绳将转台吊在刚性较好的支架上,转台保持水平。该试验所采用的测试方式为多点激励、多点拾振的多输入、多输出(MMO)法。

通过试验与有限元分析,得到了转台模态前 6 阶的试验值与计算值,如表 1 所示。经过计算可以得出,试验值和计算值之间的误差小于 10%,并且振型基本一致。因此,可以证明该建模方法基本正确,该模型可用于后续优化工作。

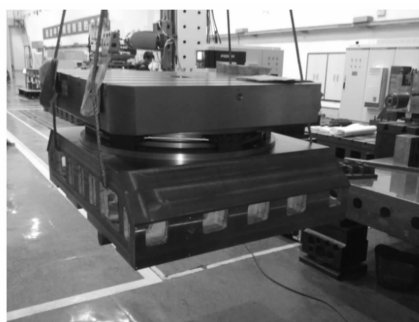


图 3 转台悬吊安装方式

Figure 3 Overhung installation method of rotary worktable

表 1 试验及计算得到的固有频率对比

Table 1 Inherent frequency comparison of experiment and computation

阶数	试验模态/Hz	计算模态/Hz	相差/%
1	279.542	294.69	5.42
2	298.059	308.85	3.62
3	304.820	330.94	8.57
4	308.113	323.09	4.86
5	311.387	332.72	6.85
6	319.880	338.85	5.93

1.3 工作台受力与约束分析

1.3.1 工作台受力分析

1) 切削力计算。该加工中心的工作台自身质量为 887 kg,能承受的最大质量为 3 000 kg。由精密双导程蜗杆与蜗轮副实现工作台 360°连续任意分度,蜗杆与交流伺服驱动电机采用进口联轴器直接连接。下面以工作时最大承力状况计算切削力^[7]:

$$F_c = \frac{C_F a_p^{x_f} a_f^{y_f} a_w^{u_f} z}{d_0^{q_f} n^{\omega_f}} K_{FZ}。$$

式中: F_c 为圆周铣削力,N; a_p 为铣削深度,25 mm; a_w 为铣削宽度,25 mm; a_f 为每齿进给量,0.04 mm/r; d_0 为铣

削直径, 25 mm; z 为铣削齿数, 36; n 为铣刀转速, 6 000 r/min; K_{FZ} 为镗削条件改变时镗削力修正参数, 取 0.92。

由参考文献[8]查得各材料系数分别取: $C_F = 7\,750$, $x_f = 1.0$, $y_f = 0.75$, $u_f = 1.1$, $\omega_f = 0.2$, $q_f = 1.3$, 经计算得到:

圆周铣削力 $F_c = 9\,467\text{ N}$ 。

比例系数取 $k_x = 0.3$, $k_y = 0.35$, 则:

$$F_x = F_c k_x = 2\,840\text{ N},$$

$$F_y = F_c k_y = 3\,313\text{ N}。$$

式中: F_x 为沿 x 轴方向的铣削力, F_y 为沿 y 轴方向的铣削力。

根据上述计算可得:

$$F_{\text{Jing}} = \sqrt{2\,840^2 + 3\,313^2} = 4\,363.6\text{ N},$$

$$F_{\text{Zhou}} = 9\,467\text{ N}。$$

式中: F_{Jing} 为沿径向的铣削力, F_{Zhou} 为沿轴向的铣削力, 其值等于圆周铣削力 F_c 。

2) 工况下载荷分析及载荷添加加载。工作台最大的承受质量为 3 000 kg, 台面尺寸 1 000 mm × 1 000 mm, 取承载面直径为 $\varnothing 700\text{ mm}$, 则工作台承受的面载荷为 $P = F/A = 3\,000 \times 9.8 / (3.14 \times 0.352) = 76\,433\text{ Pa}$ 。为简化计算, 加载时将工件的最大重力均匀地分布在台面上, 取有效面进行分析^[9]。由于不能确定加工件高度, 因此将切削力作用点沿轴向平移到工作台上。工况下液压夹紧装置施加夹紧力, 经计算为 62 500 N; 根据参考文献[10]以及厂方提供的预紧力数据, 经计算, 在 650 N 的预紧力下, 轴承刚度为 692 N/ μm ; 最后施加重力。

1.3.2 工作台约束分析

工作台与转台座之间通过轴承相连。轴承承载着工作台的自重以及加工件的重力。其承载面约束了工作台的轴向平动, 施加此面的轴向位移为零; 承载面(柱面)连接轴承内圈, 约束工作台在径向的来回平动, 施加此面的径向位移为零。

1.4 结果分析

在 ANSYS Workbench 中, 经过全面的计算求解, 生成了回转工作台的总变形图, 如图 4 所示。从图 4 可知, 工作台的最大变形量为 $y = 64.2\text{ }\mu\text{m}$ 。为了方便计算, 根据前文中已计算得出的径向和轴向切削力, 取合外力最大值为 10 000 N 进行计算, 得到工作台部件刚度

$$K = \frac{F}{y} = \frac{10\,000}{64.2} = 156\text{ N}/\mu\text{m}。$$

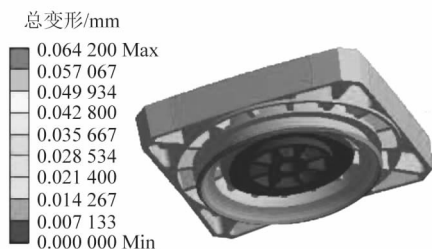


图 4 有限元分析结果

Figure 4 Finite element analysis results

由于工作台的刚度影响着机床的几何精度和加工精度, 为了进一步提高加工中心的几何精度和加工精度, 应以提高工作台的刚度为目标进行优化^[11]。

1.5 选择优化变量

由工作台的结构可知其圆形筋板的厚度对工作台刚度的影响较大, 因此本次优化主要考虑工作台上 3 个圆形筋板厚度对工作台刚度的影响。根据工作台的形状要求选择优化设计变量(筋板内圈直径 D_1 , D_2 , D_3)的取值范围, 如表 2 所示。本次优化设定约束条件为不增加工作台质量, 目标函数为工作台的最大变形(Max Deformation)。因为要提高工作台的刚度, 因此须使最大变形量达到最小。

表 2 优化变量取值

Table 2 Value of optimization variable

参数名称	初始结构设计尺寸/mm	变化范围/mm
D_1	420	400 ~ 460
D_2	668	600 ~ 700
D_3	936	900 ~ 960

1.6 优化结果

经过优化, 得到了优化后的变量数值以及优化前后的变化对比, 如表 3 所示。由表 3 可以看出, 设计变量变化最大的为 D_2 ; 优化后工作台的最大变形量为 56.8 μm , 相较优化前减小了 11.5%; 优化后工作台的质量为 887.84 kg, 相较优化前略有增加, 但整体影响不大, 符合限制质量的约束条件。由最大变形量可计算得到优化后的工作台刚度为 176 N/ μm 。相较优化前 156 N/ μm , 提高了 11.5%。达到了优化目的。

表 3 优化前后变量对比

Table 3 Comparison before and after optimization variables

名称	设计变量/mm			质量/kg	最大变形/ μm
	D_1	D_2	D_3		
优化前	420	668	936	886.91	64.2
优化后	419	621	956	887.84	56.8
优化后的变化量/%	减小	减小	增加	几乎不变	减小
	0.23	7.04	2.14		11.5

2 优化后工作台刚度可靠性分析

2.1 确定随机变量

优化后的工作台在工作时受力有不均匀性,并且主要尺寸参数具有分散性^[12],会对刚度造成影响,因此笔者选取以下主要参数来分析优化后工作台的刚度可靠性:材料、轴承刚度、外载荷以及工作台主要尺寸(优化后的筋板内圈直径 D_{S1} 、 D_{S2} 、 D_{S3})。其中工作台尺寸参数如图5所示。由参考文献[13]知,尺寸偏差多服从正态分布,其标准差是允许偏差的1/3。如表4所示。已知弹性模量、轴承刚度以及外载荷的均值分别为110 000 MPa、692 N/ μm 、10 000 N,假设它们都服从正态分布,且取它们的变异系数依次为0.04、0.02、0.02,则标准差可由变异系数计算得到,分别为4 400 MPa、13.84 N/ μm 及200 N。

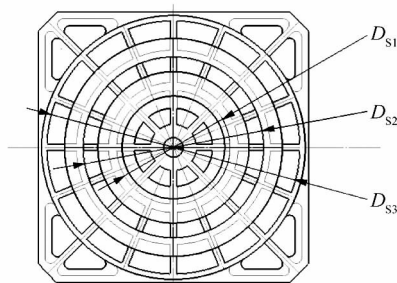


图5 工作台尺寸参数

Figure 5 Size parameters of worktable

表4 随机变量的统计特征

Table 4 Statistical characteristics of random variables

尺寸参数/mm	均值 μ /mm	标准方差 S /mm
D_{S1}	419	0.133
D_{S2}	621	0.200
D_{S3}	956	0.333

2.2 可靠性灵敏度分析

可靠性灵敏度分析可以提供某一随机变量变化引起可靠性的变化率的信息^[14]。经过分析,得到随机变量相对最大变形量的灵敏度关系,如图6所示。在图6中,可根据直方图面积的大小直观地看出每个变量对最大变形量的影响程度。其中,纵坐标 $y=0$ 上方的直方图表示该变量与最大变形量呈正相关,反之,为负相关。

由分析结果可知,这6个随机变量对最大变形量的灵敏性程度由高到低依次为弹性模量、 D_{S1} 、 D_{S2} 、 D_{S3} 、外载荷 F 和轴承刚度。其中弹性模量、 D_{S1} 、 D_{S2} 的变化对工作台刚度影响较大,为灵敏性因素,其他3个变量为非灵敏性因素。

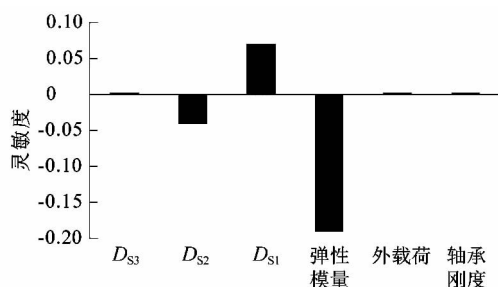


图6 变量相对最大变形的灵敏度

Figure 6 Sensitivity of variable and maximum deformation

2.3 刚度可靠性分析结果

在Six sigma分析系统中,抽样类型包括蒙特卡洛抽样法和拉丁超立方抽样法,由于后者对样本数量的节省非常显著,因此选择拉丁超立方抽样法进行抽样^[15]。如图7所示,设定程序进行10 000次抽样后可以看到,图中柱状图没有较大的跳跃或间隙,因此抽样次数是足够的。

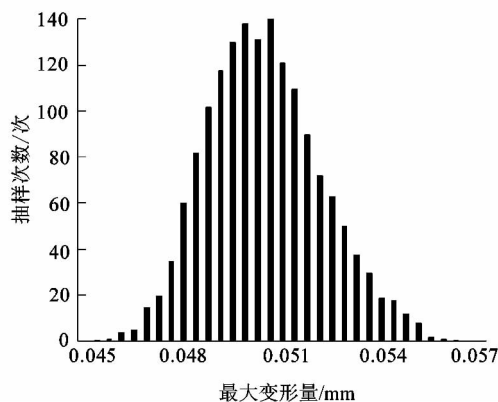


图7 最大变形的抽样次数分布

Figure 7 Sampling frequency distribution of maximum deformation

如表5所示,在参数概率列表中插入值0.060 000 mm,得到概率显示为1.000 00,即抽样分析得到的最大变形量均为小于0.060 000 mm,相比优化前的最大变形量0.064 200 mm有了较大改善。优化后工作台静刚度可靠度为100%。

3 结论

通过ANSYS平台对加工中心回转工作台进行刚度优化以及可靠性分析,得到以下结论:

1) 通过静力学有限元分析对回转工作台进行优化,在不增加质量的前提下,使工作台的刚度提高11.5%,对改善加工中心机床几何精度与加工精度起到了一定效果。

表5 参数概率列表
Table 5 List of parameters of probability

序号	最大变形量/mm	概率	西格玛水平	序号	最大变形量/mm	概率	西格玛水平
1	0.044 625	0.000 069 31	-3.810 60	12	0.056 890	0.883 540 00	1.192 90
2	0.046 447	0.000 253 17	-3.477 40	13	0.057 001	0.927 960 00	1.460 70
3	0.047 356	0.001 320 90	-3.006 60	14	0.057 112	0.956 450 00	1.710 90
4	0.049 180	0.017 189 00	-2.115 60	15	0.057 823	0.974 590 00	1.953 00
5	0.051 002	0.088 814 00	-1.348 10	16	0.057 934	0.987 760 00	2.249 60
6	0.051 913	0.167 030 00	-0.965 97	17	0.058 023	0.998 080 00	2.891 00
7	0.052 874	0.272 890 00	-0.604 09	18	0.058 290	0.999 270 00	3.182 00
8	0.053 735	0.395 300 00	-0.265 53	19	0.058 489	0.999 790 00	3.529 60
9	0.054 646	0.517 700 00	0.044 37	20	0.059 201	0.999 870 00	3.659 80
10	0.055 557	0.640 970 00	0.361 06	21	0.060 000	1.000 000 00	7.150 20
11	0.056 468	0.744 670 00	0.657 81				

2) 选取参数进行统计处理并将它们作为独立随机变量,采用拉丁超立方抽样方法对优化后的工作台进行可靠性分析。由灵敏度分析得到影响较大参数,优化后工作台刚度可靠度为100%,安全可靠。

参考文献:

- [1] 张希峰,高东强,王伟,等. 机床工作台动态特性分析及优化[J]. 制造技术与机床,2015(4):119-122.
- [2] 秦柱学,殷国富,陈珂,等. 高速卧式加工中心回转工作台刚度有限元分析方法[J]. 机械制造,2011,49(2):4-7.
- [3] 林欢,高东强,张菲,等. 高速立式加工中心工作台的有限元分析和拓扑优化[J]. 陕西科技大学学报(自然科学版),2012,30(5):96-99.
- [4] 刘光浩,黄伟,陈超山,等. 基于ANSYS的ZK5150型钻床工作台有限元静动态分析与尺寸优化[J]. 组合机床与自动化加工设备,2010(9):89-91.
- [5] 杨飞,高东强,闫媛媛,等. 立式加工中心工作台系统的动态特性分析及结构优化[J]. 机械设计与制造,2013(11):235-237.
- [6] 王传祥,王旭,徐志斌. TH6213 镗铣加工中心工作台静态分析[J]. 机械设计与制造,2013(10):184-186.
- [7] 孟少龙. 机械加工工艺手册[M]. 北京:机械工业出版社,1991.
- [8] 周泽华. 金属切削原理[M]. 上海:上海科学技术出版社,1984.
- [9] YANG Zhou, ZHANG Yimin, HUANG Xianzhen, et al. Reliability-based robust optimization design of automobile components with non-normal distribution parameters [J]. China journal of Mechanical Engineering,2013,26(4):823-830.
- [10] 李为民,王海涛. 轴向定位预紧轴承刚度计算[J]. 河北工业大学学报,2001,30(2):15-19.
- [11] TU J, CHOI K K, PARK Y H. A new study on reliability-based design optimization [J]. Journal of mechanical design, 1999, 121(4):557-564.
- [12] QIU Zhiping, HUANG Ren, WANG Xiaojun, et al. Structural reliability analysis and reliability-based design optimization: recent advances[J]. Science China physics, mechanics & astronomy,2013,56(9):1611-1618.
- [13] 谢里阳,王正,周金宇,等. 机械可靠性基本理论与方法[M]. 北京:科学出版社,2009.
- [14] CHEN Jianqiao, TANG Yuanfu, GE Rui, et al. Reliability design optimization of composite structures based on PSO together with FEA [J]. Chinese journal of aeronautics,2013,26(2):343-349.
- [15] 王美妍,文怀兴,李杰. 高速立式加工中心工作台的设计与静态性能的有限元分析[J]. 组合机床与自动化加工技术,2010(6):70-71.

(上接第85页)

- [6] 徐灏. 机械设计手册[M]. 北京:机械工业出版社,2001.
- [7] 潘柏松,梁利华,张元祥,等. 金属切削带锯床设计理论与方法[M]. 北京:清华大学出版社,2013.
- [8] 柴国钟,梁利华,王效贵,等. 材料力学[M]. 北京:科学出版社,2011.
- [9] 叶阜,张宝国,张起伟,等. 基于ANSYSWorkbench的斗轮堆取料机关键零部件的有限元分析优化[J]. 起重运输机械,2008(12):83-87.
- [10] 许京荆. ANSYS 13.0 Workbench 数值模拟技术[M]. 北京:中国水利水电出版社,2012.
- [11] 张延庆. 结构分析有限元法[M]. 北京:科学出版社,2012.
- [12] 杨新华. 剪板机结构有限元及模态分析[D]. 武汉:华中科技大学,2009:25-28.