

# 基于神经网络的精密磨床床身结构优化研究\*

柯晓龙<sup>①②</sup> 林晓辉<sup>②</sup> 王春锦<sup>②</sup>

(<sup>①</sup>厦门理工学院机械与汽车工程学院 福建 厦门 361024;

<sup>②</sup>厦门大学物理与机电工程学院 福建 厦门 361005)

**摘要:** 变形和固有频率是评价精密机床结构刚性的重要参数。为了提高磨床的整体刚性,提出一种利用BP神经网络来优化精密磨床床身结构的方法。以自主开发的高精度平面磨床2MK1760为研究对象,利用有限元分析软件ANSYS对床身进行静力分析和模态分析。为了减小精密磨床的变形和振动,将部分关键参数作为神经网络的输入,以此预计床身尺寸参数与变形量和固有频率之间的关系,从而获得磨床床身的优化尺寸。分析结果表明,通过神经网络优化后的床身变形量相比初始结构减小了36.51%,而固有频率增加了11.96%。

**关键词:** 精密磨床; 床身; 有限元; BP神经网络; 优化

**中图分类号:** TG58 **文献标识码:** A

## Optimized analysis of precision grinding machine bed based on neural network

KE Xiaolong<sup>①②</sup>, LIN Xiaohui<sup>②</sup>, WANG Chunjin<sup>②</sup>

(<sup>①</sup>School of Mechanical and Automotive Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, CHN;

<sup>②</sup>School of Physics and Mechanical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, CHN)

**Abstract:** Deformation and inherent frequency are key parameters to evaluate structure rigidity for precision machine tool. In order to improve rigidity for grinding machine, this study proposes a method that using neural network to optimize the structure of precision grinding machine bed. Take precision grinding machine tool(2MK1760) which is self developed for an example, the static structure and dynamic modal analysis is carried out by using finite element method(ANSYS). In order to alleviate the influence of deformation and vibration on precision grinding machine bed, some parameters are served as input of BP neural work model, which estimate the relationship between deformation and inherent frequency. According to analysis results, an optimization is obtained to determine the dimension of precision grinding machine bed. The results indicate that the deformation after neural network optimization compared with initial structure has decreased by 36.51%, meanwhile, the natural frequency has increased by 11.96%.

**Keywords:** precision grinding machine; lathe bed; FEM; BP neural network; optimization

目前,轴对称非球面、离轴非球面、楔形非球面等大尺寸光学非球面元件在航天、航空、国防等领域中得到了越来越广泛的应用。由于其应用领域的特殊性和精密性,对光学非球面元件的面形精度和表面粗糙度提出了极高的要求。而磨床的一些关键特征,如机床刚度、固有频率等,对其精密加工有着很大的影响。因此,如何有效地优化磨床的刚度和固有频率,是高精度磨床设计过程中的必须要解决的重要课题。

机床的结构与刚度优化的方法有很多种,有限元软件分析和灵敏度计算是当前较为主流的分析方法<sup>[1-4]</sup>。如清华大学的汪劲松教授等人<sup>[5]</sup>在UGNX 2.0和ANSYS 8.0环境下建立重型混联机床XNZH2430的三维模型和有限元模型,并采用有限元方法分析其静刚度,研究该机床在不同形位时承受一定载荷所引起的变形位移情况,从而优化机床承载力刚度。东南大学的伍建国教授等人<sup>[6]</sup>采用灵敏度分

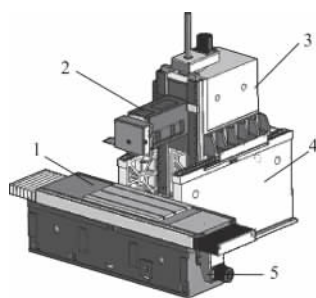
\* 国家自然科学基金项目(51075343);福建省自然科学基金项目(2012J05102)

析的手段,找出对内圆磨床床身结构动态特性影响较大的设计参数,以保证床身设计具有较好的动态特性及刚性。

而本文则采用有限元分析和 BP 神经网络计算结合的办法,利用有限元的方法对自主开发的高精度磨床 2MK1760 的床身进行静力分析和模态分析,同时利用 BP 神经网络来优化磨床结构,以达到提高磨床刚度和固有频率的效果。

## 1 高精度磨床结构分析

本文自主开发的高精度磨床 2MK1760,采用立柱移动式卧轴矩台平面磨床结构,专门用于脆性材料,如熔石英、BK7 玻璃等光学非球面元件的精密磨削加工。该磨床采用 T 字形布局,外围加钣金全防护罩防护,工作尺寸达到 1 000 mm × 600 mm × 650 mm,机床设计加工精度为  $\pm 2 \mu\text{m}/430 \text{ mm} \times 430 \text{ mm}$ 。磨床整机由床身、工作台、立柱、底座、磨头、电气及数控系统、光栅反馈系统、液压系统、油冷水冷系统、磨削液过滤系统、润滑系统、油雾净化装置、砂轮修整器、动平衡系统、外围防护罩、电磁吸盘等组成<sup>[7]</sup>。其中,磨床主机的三维结构图如图 1 所示。



1—工作台；2—磨头；3—立柱；  
4—底座；5—床身。  
图1 2MK1760磨床主机的  
结构示意图

为了保证良好的运动平稳性,床身与工作台的连接采用了精密液体静压导轨支撑。作为 2MK1760 磨床最为重要的部件之一,床身的变形及振动将影响磨床的运动定位精度,从而导致工件的精密磨削产生一定的加工误差,因此对磨床床身的分析就显得尤为重要。为了分析和优化磨床床身的结构,将采用如下 4 个步骤:(1) 建立有限元模型;(2) 获得静态和动态特征;(3) 建立神经网络模型并分析;(4) 利用上述结果,对磨床床身进行优化。

1.1 静态结构分析

为了完成磨床床身的静态特征分析,利用 SolidWorks 软件完成床身的三维实体建模,然后将其导入有限元分析软件 ANSYS 中形成有限元模型,并加以分析。床身材料选用 HT300,材料及结构参数如表 1 所示。在本文中,工作台和工件的重量以及磨削法向力作为外部力施加在磨床的导轨上,整个床身被固定在底板和底座上。图 2 为工作台达到极限位置时,

磨床床身的总变形位移。通过分析可知,床身最大变形位移为 1.153  $\mu\text{m}$ 。

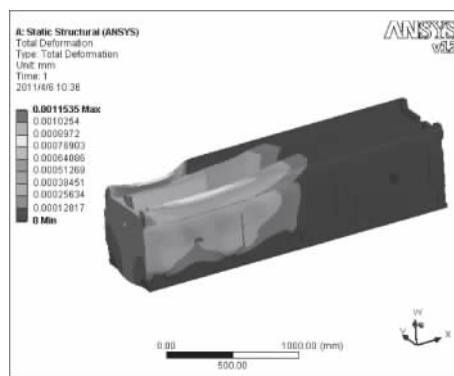


图2 磨床床身静力云图

## 1.2 模态分析

动态特征分析方法包括模态分析、频谱分析和瞬态静力分析。其中,频谱分析和瞬态静力分析一般适用于变化的外力。由于本文中床身的受力相对不变,因此只考虑模态分析。模态是固有的振动特征,每个模态都有自己的频率。为了便于分析对比,本文仅取一阶模态作为分析优化对象。经过分析计算,可以得到第一阶频率及振态如图 3 所示,其频率为 464.8 Hz。

表 1 床身的材料及结构参数

参数	数值
密度/( $\text{g}/\text{mm}^3$ )	$7 \times 10^{-3}$
温度/ $^{\circ}\text{C}$	20
杨氏模量/MPa	$1.05 \times 10^5$
泊松比	0.25
床身壁厚/mm	25
纵向肋板厚度/mm	24
横向肋板厚度/mm	25
床身宽度/mm	635

图 3 所示,其频率为 464.8 Hz。

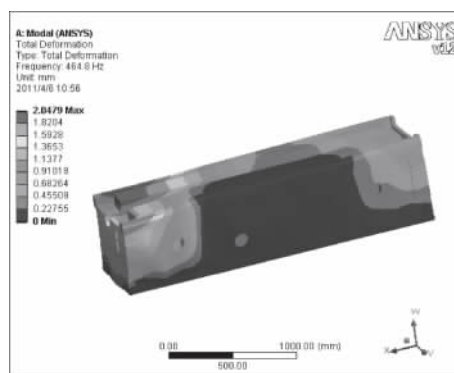


图3 磨床床身模态云图

## 2 基于神经网络的结构分析

根据设计及实践经验,床身的壁厚  $a$ 、纵向肋板厚度  $b$ 、横向肋板厚度  $c$  和床身宽度  $d$  是关键的结构尺寸,因此将它们作为重要影响参数加以分析。图 4 是这些尺寸在磨床床身中的示意图。由于很难直接找出这些尺寸与变形量、频率之间的关系,因此本文利用神

神经网络来确定它们之间的关系。

BP神经网络包括3层:输入层、隐含层和输出层。对于本分析而言,结构变量 $\Delta a$ 、 $\Delta b$ 、 $\Delta c$ 和 $\Delta d$ 作为神经网络的输入参数,变形量 $d_m$ 和频率 $f_z$ 为输出参数。可以得到神经网络的结构图如图5所示。

输出的隐含节点 $y_i$ 为:

$$y_i = f(\sum_j \omega_{ij} X_j - \theta_i) \quad (1)$$

$$X_j = \Delta a, \Delta b, \Delta c, \Delta d$$

输出的节点为:

$$O_l = f(\sum_i T_{lj} y_i - \theta_l) \quad (2)$$

$$O_l = d_m, f_z$$

式中: $\omega_{ij}$ 是输入节点与隐含节点的连接权重; $T_{lj}$ 为隐含节点与输出节点的连接权重; $\theta_i$ 和 $\theta_l$ 是节点阈值。

而节点和隐含节点的误差 $E$ 表示为

$$E = \sum_{k=1}^p e_k < \varepsilon \quad (3)$$

式中: $e_k$ 是单项误差; $\varepsilon$ 为训练的目标误差。

根据以上的BP神经网络算法,结合大量的输入参数进行训练。测试的实际的变形值和频率是通过ANSYS计算完成的。经过神经网络训练后获得的结果如图6和图7所示。可以看出,预测值和实际值很相近。

表2显示的是其他一些样本的预测值,同样可以

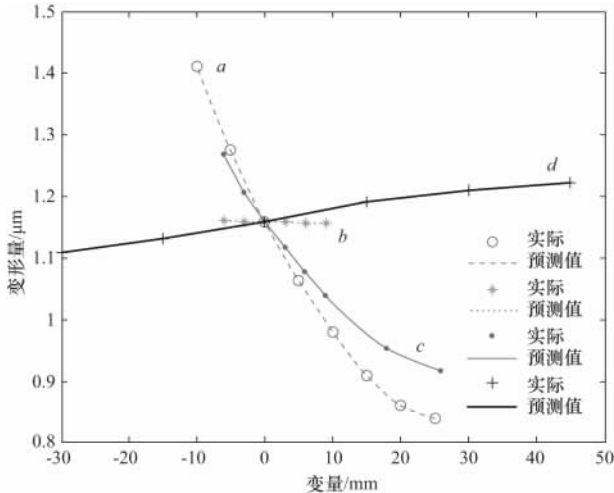


图6 实际变形值与预测值的比较

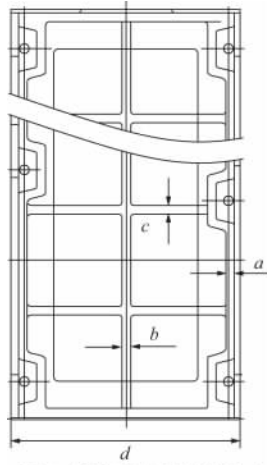


图4 磨床床身的关键尺寸

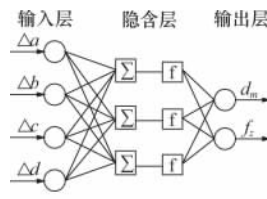


图5 神经网络结构图

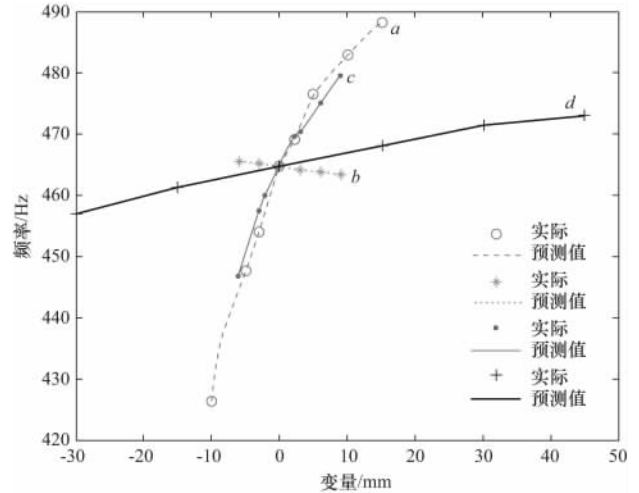


图7 实际频率与预测值的比较

看出预测值和实际值相近且误差小于1%。结果表明,BP神经网络可以较为准确地映射磨床的主要特征与结构参数之间的关系。

表2 测试结果(a、b、c、d)

变量		频率/Hz			变形值/ $\mu\text{m}$		
		预测值	实际值	误差/(%)	预测值	实际值	误差/(%)
$\Delta a$	-7	439.59	440.04	0.10	1.32	1.33	0.24
	6	476.71	477.93	0.25	1.044 9	1.04	0.47
$\Delta b$	-5	465.49	465.45	0.01	1.160 7	1.154	0.58
	7	463.68	463.77	0.02	1.159 6	1.15	0.83
$\Delta c$	-4	452.16	454.1	0.43	1.225	1.22	0.4
	8	478.01	477.93	0.15	1.052 5	1.05	0.24
$\Delta d$	-20	459.74	457.38	0.51	1.122 7	1.13	0.64
	35	471.78	469.02	0.58	1.181 3	1.18	0.11

由图6和图7可知,频率和变形值相对 $a$ 和 $c$ 较敏感,而相对 $b$ 和 $d$ 影响较小。基于此结果,我们建立另一个基于参数 $a$ 和 $c$ 的神经网络模型,将参数 $a$ 和 $c$ 作为输入参数,输出参数仍然是频率值 $d_m$ 和变形值 $f_z$ 。表3是该神经网络模型的测试结果。可以看出,其误差小于3%。

表3 测试结果(a、c)

数值		频率/Hz			变形值/ $\mu\text{m}$		
		预测值	实际值	误差/(%)	预测值	实际值	误差/(%)
26	29	476.37	476.55	0.04	1.075 1	1.075	0.01
32	30	473.96	465	1.9	1.085 3	1.082 4	0.27
37	31	489.39	504.96	3	0.898 3	0.885	1.5

### 3 磨床床身的优化

根据以上的分析结果可以看出,床身的宽度  $d$  和纵向肋板厚度  $b$  对床身变形和频率影响不大,而壁厚  $a$  和横向肋板厚度  $c$  的影响则很大。所以,床身宽度  $d$  和纵向肋板厚度  $b$  的尺寸可以相对小些,以减轻床身重量;同时,壁厚  $a$  和横向肋板厚度  $c$  则应作为变量进行优化。显然,对于高精度磨床而言,变形是影响精度最主要的因素,故将减小变形量作为优化目标。目标函数可以表述为:

$$\begin{aligned} \min F(a, c) &= y \\ 15 < a < 50 \\ 15 < c < 45 \\ \Delta y / \Delta a &> 0.04 \mu\text{m}/\text{mm} \\ \Delta y / \Delta c &> 0.03 \mu\text{m}/\text{mm} \end{aligned} \quad (4)$$

式中:  $\Delta y / \Delta a$  和  $\Delta y / \Delta c$  是敏感因子。

结合加工过程和实际的工况,约束条件也列在公式中。经过优化后,床身壁厚  $a$  和横向肋板厚度  $c$  都由之前的 25 mm 优化为 41 mm,纵向肋板厚度  $b$  由之前的 24 mm 优化为 20 mm,床身宽度  $d$  由之前的 635 mm 优化为 605 mm。利用新的参数进行建模,得到新的总变形量和模态频率分别如图 8、图 9 所示。

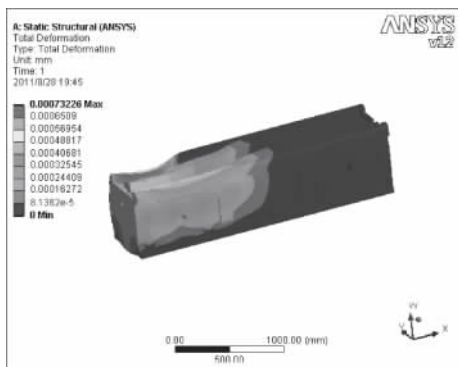


图8 经过优化的磨床床身静态变形云图

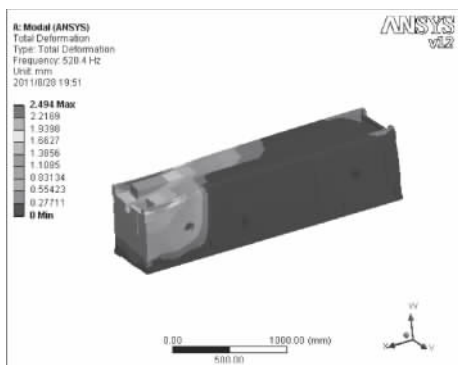


图9 经过优化的磨床床身静态频率云图

从表 4 可以看出,对比优化前的结构,优化后的床

身结构的最大变形量从 1.153  $\mu\text{m}$  下降到 0.732  $\mu\text{m}$ ,降幅达到 36.51%。而一阶模态频率从 464.8 Hz 上升到 520.4 Hz,涨幅达到 11.96%。

表 4 优化结果对比

结果	变形/ $\mu\text{m}$	模态频率/Hz
初始结构	1.153	464.8
优化的结构	0.732	520.4
对比	-36.51%	+11.96%

### 4 结语

本文使用两种 BP 神经网络模型来完成自主开发的 2MK1760 磨床的床身结构分析与优化。其中,利用第一种模型进行敏感度分析,进而确定敏感尺寸,然后代入第二种模型进行结构优化。

分析结果表明:(1) BP 神经网络可以正确地反应磨床床身的关键尺寸与关键特征间的关系。(2) 优化是可行的。通过确定敏感尺寸,并修正磨床床身的相关尺寸,可以较好地改善床身变形量和固有频率。(3) 该优化方法同样可以应用于该磨床其他重要部件,如工作台、立柱、底座等部件的结构分析,以此提高机床的总体结构性能。

### 参考文献

- [1] Jiang Chen, Guo Yinbiao. Grinding precision forecasting in optical aspheric grinding using artificial neural network and genetic algorithm [C]. 5th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies: Advanced Optical Manufacturing Technologies, April 26 - 29, 2010, Dalian, China.
- [2] 满忠伟,汪世.基于神经网络的机床-工件系统热误差补偿技术研究[J].制造技术与机床,2011(7):99-102.
- [3] 倪晓宇,易红,汤文成,等.机床床身结构的有限元分析与优化[J].制造技术与机床,2005(2):47-50.
- [4] Kang Yuan, Chang Chuan-Wei, Huang Yuanruey. Modification of a neural network utilizing hybrid filters for the compensation of thermal deformation in machine tools [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2007, 47: 376-387.
- [5] 刘悦,汪劲松,王立平.重型混联机床 XNZH2430 的静刚度优化[J].清华大学学报:自然科学版,2006,46(8):1418-1421.
- [6] 伍建国,陈新,毛海军,等.内圆磨床床身设计参数的灵敏度分析及动态设计[J].南京航空航天大学学报,2002,34(6):544-547.
- [7] 柯晓龙,郭隐彪,张世汉,等.高精度光学元件磨床的加工与检测系统的开发[J].厦门大学学报:自然科学版,2011,50(3):559-562.

第一作者:柯晓龙,男,1981年生,博士后,讲师,主要研究方向为先进装备制造技术,已发表论文 10 余篇。

(编辑 汪艺) (收稿日期:2014-03-27)

文章编号:140824

如果您想发表对本文的看法,请将文章编号填入读者意见调查表中的相应位置。