

基于动态加点 Kriging 模型的机床立柱多目标优化

赵家黎, 栾尊腾, 景宏斌

(兰州理工大学 机电工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 为改善机床性能, 提出一种将拉丁超立方实验设计、动态加点准则 Kriging 模型、NSGA-II 遗传算法相结合的多目标优化方法。通过特性分析表明机床立柱是整机静动态特性的薄弱环节, 选取立柱尺寸参数为设计变量, 通过拉丁超立方实验设计法抽取样本点构建机床立柱多目标优化的动态加点 Kriging 代理模型, 利用 NSGA-II 遗传算法对响应面模型进行寻优逼近得到 Pareto 最优解集, 选择符合权重要求的一组数据作为优化结果。验证表明, 机床整机前两阶固有频率显著提高, 整机刚度得到加强。

关键词: 复合机床; 静动特性; Kriging 模型; 优化

中图分类号: TH122; TP273+.1 **文献标志码:** B **文章编号:** 1671-5276(2021)03-0101-04

Multi-objective Optimization of Machine Tool Column Based on Dynamic Adding Kriging Model

ZHAO Jiali, LUAN Zunteng, JING Hongbin

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: To improve the performance of machine tools, a multi-objective optimization method combining Latin hypercube experimental design, Kriging model of dynamic adding point criterion and NSGA-II genetic algorithm were proposed. By characteristic analysis, the machine column was found to be the weak link of the whole machine. The column size parameter was selected as the design variable, and by Latin hypercube experimental design method, sample points was extracted to build a dynamic Kriging agent model for multi-objective optimization of machine tool column. NSGA-II genetic algorithm was applied to optimize the response surface model to obtain Pareto optimal solution set. A set of data qualified for the weight requirements was selected. The results show that the first two natural frequencies of the machine tool are significantly improved, and the rigidity of the machine tool is strengthened.

Keywords: compound machine tool; static and dynamic characteristics; Kriging model; optimization

0 引言

复合机床作为工作母机, 广泛应用于加工制造领域。机床整机静动特性作为机床重要性能指标, 其优劣程度直接影响机床稳定性及动刚度。所以, 提高机床整机静动特性对改善机床加工质量和效率具有重要意义。

近些年, 借助有限元等分析方法, 国内外学者针对机床整机静动特性的研究内容愈加丰富。胡勋等^[1]基于有限元理论, 利用静动态特性分析结果, 通过改变材料的方法实现对机床的优化。刘成颖等^[2]基于有限元辨识立柱薄弱环节, 通过拓扑优化改进筋板选型及布局, 提高机床整机静动态特性。KONON D 等^[3]在考虑接触刚度的同时通过对地脚支撑位置的调整达到提高机床性能的目的。ZHAO L P 等^[4]通过有限元分析和动态灵敏度分析相结合来提高机床整机性能。

本文针对优化过程中传统响应面模型精度较差、优化效率偏低等不足, 结合有限元分析方法和响应面模型手段, 以提高机床整机稳定性和动刚度为目的, 对某型复合

机床进行多目标优化研究。

1 机床有限元建模及特性分析

1.1 机床简介及模型建立

本文研究对象为采用模块化设计而成的多功能复合机床(图1)。该复合机床主要由床身、立柱、主轴箱、床鞍、工作台等部件组成。

相较于传统三轴数控立式铣床, 该复合机床增置了绕 y 轴 0°~90°可倾斜轴(B轴)、绕 z 轴分度旋转的回转轴(C轴)、车削主轴(S2)以及数控四方刀架。其在实现传统立式铣床基本加工功能外, 还可进行空间曲面、回转曲面、螺纹等较复杂零件的车、铣、钻削等基本切削加工, 同时具备标准圆柱直齿滚切加工功能。图2分别为车削、曲面铣削、滚齿加工示意图。

1.2 机床整机有限元模型建立

复合机床三维模型网格划分的优劣程度会直接影响

第一作者简介: 赵家黎(1980—), 男, 河南周口人, 副教授, 博士, 研究方向为数字化设计与制造、过程质量控制。

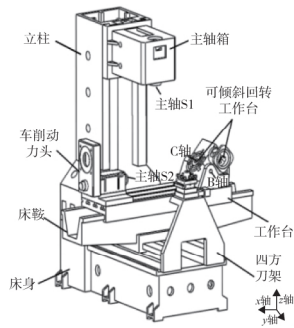


图1 多功能复合机床简化模型

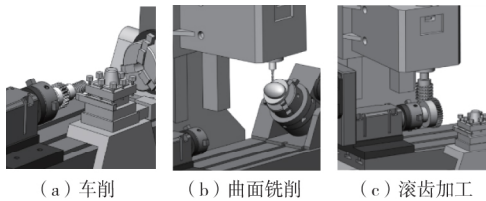


图2 车削、曲面铣削与滚齿加工示意图

有限元分析效率及准确性。本文鉴于模型复杂度采用 Automatic 法对其进行网格划分。该方法根据被划分的几何体能否被扫掠及在四面体和扫掠型间能否进行自主切换,对无法扫掠划分的实体通过协调分片算法划分四面体网格,反之采用扫掠方法划分为六面体网格,同时舍去或简化倒角、凹槽、凸台、孔洞等对机床特性影响甚微的特征,以提高优化效率,最终得到单元数和节点数分别为 261 709 和 453 047 个的整机有限元网格划分模型,如图 3 所示。

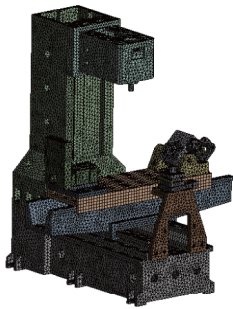


图3 有限元模型

1.3 机床动特性分析

本文着重分析图 1 位姿 (x, y 轴处于行程中间位置, 主轴箱位于立柱 z 轴上端极限位置) 下机床整机的固有特性及工作激励下的动态响应。

1) 模态分析

模态分析可以明确机床振动特性(即固有频率和振型),它们是机床结构在动力载荷作用下进行优化的重要参数。本文基于 ANSYS Workbench 平台,先对机床整机采用模态叠加法进行模态分析。其中床身和立柱为铸铁(密度 7200 kg/m^3 ,弹性模量 110 GPa ,泊松比 0.27),其他结构零部件为结构钢(密度 7850 kg/m^3 ,弹性模量 200 GPa ,泊松比 0.3)。最终通过有限元方法得到模态分析结果如表 1 所示。

表 1 整机前 6 阶固有频率与振型

阶次	频率/Hz	主振型描述
1	59.2	立柱为主沿 z 轴俯仰运动
2	89.7	立柱为主沿 x 轴俯仰运动
3	109.8	车刀架为主沿 z 轴前后摆动
4	146.1	立柱为主的复合摆动
5	180.2	立柱为主的复合摆动
6	187.8	车削动力头为主的复合摆动

2) 谐响应分析

模态分析仅可得到整机各阶振型,呈现出机床各部分相对振动情况,下面对整机进行谐响应分析,进一步了解整机在动态激励下的抗振特性。为反映机床整机在不同激励下的动态特性变化趋势,在主轴轴端三个方向上各自施加大小为 1000 N 、频率为 $0 \sim 200 \text{ Hz}$ 的谐振动,以同一部位为拾振点,获取其幅值与激振频率曲线如图 4 所示。

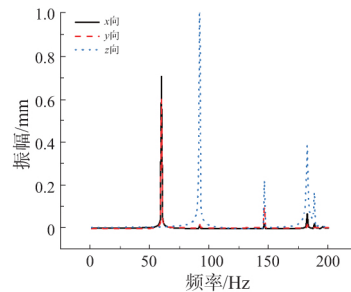


图4 机床整机三个方向的谐响应曲线

分析图 4 可知,整机在 x, y, z 方向都有多个共振点,其中 x, y 方向的最大振幅发生在 60 Hz 附近,对应机床整机的第 1 阶固有频率; z 方向的最大振幅发生在 90 Hz 附近,恰好为机床整机的第 2 阶固有频率,对应 z 方向振幅最大达到了 1.02 mm 。

1.4 机床整机薄弱环节辨识

通过机床整机的谐响应分析可知,在三个方向上的响应峰值分别出现在机床第 1 和第 2 阶固有频率附近,由此可知,机床整机动态性能受低阶振型影响最大,又由模态分析可知机床整机低阶振动形式对应的结构件都以立柱为主,因此立柱对机床整机低阶振型影响程度最大,是机床整机的薄弱环节。从机床整机性能优化的角度出发,对立柱进行结构优化设计为最佳方案,可降低对机床性能优化的盲目性,提升优化效率。

2 基于动态加点 Kriging 模型立柱优化

2.1 设计变量选取

明确立柱为整机薄弱环节后,通过对立柱主要尺寸参数进行调整达到提高机床整机性能的目的。立柱尺寸参数众多,经灵敏度分析后,此处筛选前、侧、后壁厚及板筋厚度和孔径大小等 7 个主要尺寸作为优化设计变量,对应设计变量取值范围及原始尺寸如表 2 所列。

表 2 设计变量尺寸参数及取值范围 单位: mm

设计变量	取值范围	初始值
前壁厚 x_1	20~30	25
侧壁厚 x_2	20~30	25
后壁厚 x_3	20~30	25
侧孔直径 x_4	40~60	50
纵向板筋厚度 x_5	16~24	20
横向板筋厚度 x_6	16~24	20
后孔直径 x_7	40~60	50

2.2 优化模型建立

通过模态分析可知立柱薄弱状态主要表现为低阶频率偏低, 又由谐响应分析可知机床立柱受力变形偏大, 通过提高机床立柱低阶固有频率和立柱自身刚度, 可显著改善机床立柱薄弱状况, 实现提高机床整机性能的目的。同时顺应现代机床绿色经济的发展趋势, 在保证机床质量不增加的前提下, 最终构建立柱多目标优化模型如下:

$$\min [-f_i(x) \quad \sigma(x)] \quad i=1, 2, 3 \quad (1)$$

$$X = [b_1 \quad b_2 \quad \dots \quad b_7]^T$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} 0 < \frac{m(x)}{m_0} \leq 1 \\ f(x) > f_0 \\ \sigma(x) < \sigma_0 \\ b_{\min} \leq b_j \leq b_{\max} \quad j=(1, 2, \dots, 7) \end{cases} \quad (2)$$

式中: X 为设计变量矢量, $X \in \Omega$, Ω 为设计空间; f_0 、 σ_0 、 m_0 分别为优化前立柱的频率、变形和质量; $f(x)$ 、 $\sigma(x)$ 、 $m(x)$ 分别为优化后立柱的频率、变形和质量。

2.3 动态加点准则的 Kriging 代理模型

1) Kriging 代理模型

使用拉丁超立方实验设计能够让各个水平上的因素均匀分布, 设计空间可通过较少样本点得到反映^[5]。在设计

$$E[I(x)] = \begin{cases} [y_{\min} - \hat{y}(x)] \cdot \phi\left[\frac{y_{\min} - \hat{y}(x)}{s(x)}\right] + s(x) \cdot \varphi\left[\frac{y_{\min} - \hat{y}(x)}{s(x)}\right] & s(x) > 0 \\ 0 & s(x) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\phi(\cdot)$ 为正态分布累积函数; $\varphi(\cdot)$ 为正态分布概率密度函数。

2.4 优化流程及其结果分析

NSGA-II 是目前普遍使用的多目标遗传算法, 它降低了非劣排序遗传算法的复杂性, 在快速运行的同时能够很好地保证解集的收敛稳定性。基于动态加点准则的 Kriging 代理模型及 NSGA-II 多目标优化算法基准, 构建优化流程如图 5 所示。

图 6 所示是优化所得 Pareto 前沿解集。3 个坐标轴分别对应机床整机的第 1 阶、第 2 阶固有频率及质量。由所得 Pareto 前沿解集可知, 进行多目标优化时, 各目标函数间可能是相互冲突的, 即某个目标函数的最优解可能对应另一个目标函数的较差情况。表现在低阶频率较高情况下对应的机床质量就会增加, 反之质量的减少就会导致

空间通过拉丁超立方实验设计法采样, 可获得 Kriging 代理模型样本点, 获取样本点应使得式 (3) 取值最小:

$$\sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{1}{\|x_i - x_j\|^2} \quad (3)$$

式中: $\|x_i - x_j\|$ 为两样本间的距离; N 为样本点数量。

Kriging 代理模型表达了预测值 y 和设计变量 x 的关系, 基本形式为^[6]

$$y(x) = F(\beta, x) + z(x)$$

式中: $F(\beta, x)$ 为变量空间全局模型; $z(x)$ 为随机统计过程局部偏差, 其均值为 0, 方差为 σ^2 , 协方差为 $\text{cov}(z(x_i), z(x_j)) = \sigma^2 R(x_i, x_j)$, 其中 $R(x_i, x_j)$ 是两样本点 x_i, x_j 间的变异函数。

通常选择高斯模型:

$$R(x_i, x_j) = \exp\left(-\sum_{k=1}^{n_n} \theta_k |x_i - x_j|^k\right) \quad (4)$$

式中: n 为设计变量维数; θ 为相关参数向量; x_i^k, x_j^k 和 θ_k 分别为 x_i, x_j 和 θ 的第 k 个分量。

通过线性加权和法得到 Kriging 模型在样本点 x 处的预测值为:

$$\hat{y}(x) = F(\beta, X) + r^T(x) R^{-1}(g - \beta F)$$

式中: R 为对应模型矩阵; $r(x)$ 为预测点和试验点间的模型向量; g 是样本点的相应向量。

2) 最大期望 (EI) 加点准则

加点准则即依据获取新的样本点刷新代理模型的准则, 通过相应准则获取的样本点能够显著提高建模效率。最大期望加点法本质是在变量空间利用检索局部最优点或方差最大点得到实现^[7]。本文通过在期望提高 (EI) 处加点达到在优化过程中提高代理模型精度的目的。假定变量 y 遵循正态分布 $N[\hat{y}(x), (s(x))^2]$, \hat{y} 为 Kriging 模型的预测响应, $(s(x))^2$ 为 Kriging 模型的预测方差, 则提高为 $I = y_{\min} - \hat{y}(x) > 0$, 其中 y_{\min} 为模型最小值 (优值) 的期望表达式:

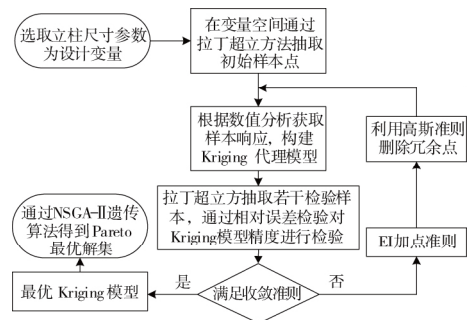


图 5 优化流程图

低阶频率的降低。虽然目标函数之间存在相互削弱的现象, Pareto 前沿解集依然可以提供相当大的设计空间供设计人员挑选, 设计人员根据目标期望的权衡就能确定满足设计需求的最佳方案^[8]。本文在保证质量不增加的前提

下,对第1阶、第2阶固有频率关注较大,故在 Pareto 解集中选择表3中一组符合权重要求的优化数据。

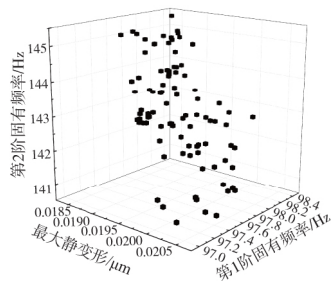


图6 pareto 前沿解集

将经过优化修整后的立柱导入复合机床整机装配体中重新建模,并依照上节中同样条件下进行模态分析和谐响应分析,得到整机前两阶固有频率如表3所示,机床整机优化前后的频响曲线如图7所示。由表3可知,机床整机在质量几乎不变的情况下,第1、2阶固有频率分别提高了9.2%和5.6%,机床抗振性得到增强。又由图6可知,机床整机在 x 、 y 、 z 三个方向上的最大共振峰值分别由原来的0.69 mm、0.61 mm、1.02 mm降低到0.42 mm、0.38 mm、0.78 mm,下降39.1%、37.7%、23.5%,机床整机刚度有所加强,机床整机动态性能得到显著改善。

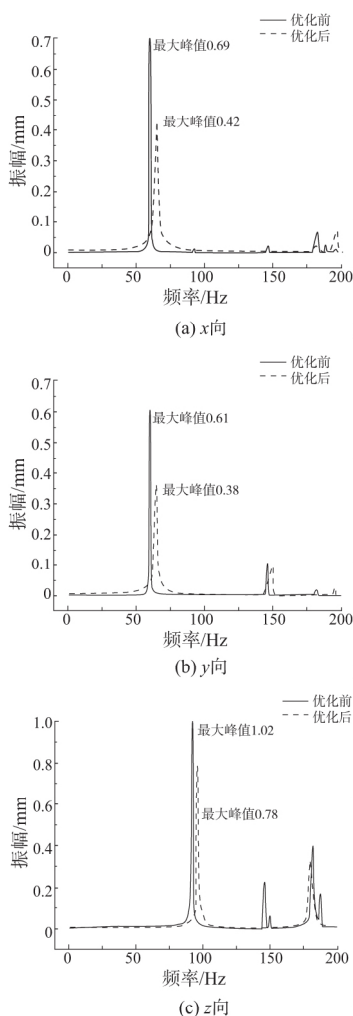


图7 优化后整机三个方向上幅值与
激励频率曲线

表3 立柱-主轴箱结构优化结果

参数	优化前	优化后(圆整)	变化率
$P1/mm$	25	29	—
$P2/mm$	25	27	—
$P3/mm$	25	22	—
$P4/mm$	50	48	—
$P5/mm$	20	21	—
$P6/mm$	20	22	—
$P7/mm$	50	46	—
m/kg	550.1	549.6	-0.09
f_1/Hz	61.1	66.7	+9.17
f_2/Hz	92.6	97.8	+5.62

综上所述,将拉丁超立方实验设计、动态加点准则 Kriging 模型、NSGA-II 遗传算法相结合的优化方法,改善了传统响应面模型精度较差、优化效率偏低的不足,利用该方法对机床进行多目标优化改进后,机床整机刚度有较大的提升,薄弱模态下的固有频率得到提高,达到了机床结构动态优化的目的。经验证后证明,其动态性能得到大幅度提高。

3 结语

本文在对多功能复合机床准确建立动力学模型的基础上,通过构建动态加点准则的 Kriging 代理模型,对机床整机进行了合理优化。

1) 基于有限元分析方法,通过模态分析和谐响应分析,辨识机床立柱为薄弱环节,明确机床结构优化方向。

2) 针对机床薄弱环节,将拉丁超立方实验设计、动态加点准则 Kriging 模型、NSGA-II 多目标遗传算法相结合,在保证质量不增加的前提下,对复合机床以前两阶固有频率和刚度为多目标进行优化设计,使机床立柱这一薄弱环节得到改善后,最终机床整机前两阶固有频率提升,机床刚度得到加强,证明该方法可靠有效。

参考文献:

- [1] 胡刚,魏宏波.基于有限元的立式加工中心床身性能分析[J].机械制造与自动化,2020,49(2):38-41.
- [2] 刘成颖,谭锋,王立平,等.面向机床整机动态性能的立柱结构优化设计研究[J].机械工程学报,2016,52(3):161-168.
- [3] KONO D, NISHIO S, YAMAJI I, et al. A method for stiffness tuning of machine tool supports considering contact stiffness[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2015, 90: 50-59.
- [4] ZHAO L P, CHEN H R, YAO Y Y, et al. A new approach to improving the machining precision based on dynamic sensitivity analysis [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2016, 102: 9-21.
- [5] 于海莲,王永泉,陈花玲,等.响应面模型与多目标遗传算法相结合的机床立柱参数优化[J].西安交通大学学报,2012,46(11):80-85.
- [6] 杨扬,舒乐时.基于序贯层次 Kriging 模型的微型飞行器机身结构设计优化[J].工程设计学报,2018,25(4):434-440.
- [7] 余竹玛,李梅. Kriging 模型改进的多目标优化算法研究[J].机械科学与技术,2019,38(6):977-984.
- [8] 张在房,张佳翔.基于响应面模型和集成方法的数控机床整机优化[J].组合机床与自动化加工技术,2018(3):14-18.

收稿日期:2020-05-06