

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

于海莲¹, 王永泉¹, 陈花玲¹, 寸花英²

(1. 西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安; 2. 沈机集团昆明机床股份有限公司, 650203, 昆明)

摘要: 针对传统方法在复杂机械结构优化设计中的低效性和局限性, 提出了一种将响应面模型与多目标遗传算法相结合的优化设计方法. 采用拉丁超立方试验的设计方法, 在设计空间抽取样本点并进行数值模拟, 建立了由7个设计参数所决定的立柱最大变形、首阶固有频率及质量的初始二阶响应面模型. 利用多目标遗传算法对响应面模型进行循环逼近优化, 得到了 Pareto 最优解集. 仿真结果表明, 在质量不变的条件下, 优化解可使立柱首阶固有频率增加 15.9%, 导轨处最大变形减小 7.7%, 可通过有限次数的数值模拟计算获得设计空间内的近似最优解, 因此较适用于机床及类似复杂结构的多目标多参数的优化设计.

关键词: 响应面模型; 多目标参数优化; 循环逼近; 龙门立柱

中图分类号: TH122 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2012)11-0080-06

Optimization for Machine Tool Column Combining Response Surface Model with Multi-Objective Genetic Algorithm

YU Hailian¹, WANG Yongquan¹, CHEN Hualing¹, CUN Huaying²

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Shenji Group Kunming Machine Tool Company Limited, Kunming 650203, China)

Abstract: Focusing on inefficiency and inherent limitations in the traditional optimization methods for complex mechanical structures, an approximation loop optimization approach combining response surface model with multi-objective genetic algorithm is proposed to deal with the optimal design problem for a type of gantry column in machine tools. Investigating the weak links of the column found by static analysis and modal analysis, the double-objective optimization model is established. Then, the Latin hypercube experiment design scheme and the response surface method are combined to construct the initial second-order response surface models of three performance indexes, i. e., the maximum column deformation, the first-order natural frequency, and its total mass, by fitting with seven design parameters. Furthermore, these response surface models are optimized by using the approximation loop technique of NSGA-II, and a distributed Pareto solution set is finally obtained. Remaining the same total column mass, in the optimal solution, the first order natural frequency increases by 15.9% while maximum guide deformation decreases by 7.7%. The optimal solution within the design space can be approximated by limited times of CAE analysis.

Keywords: response surface model; multi-objective optimization; approximation loop; gantry column

收稿日期: 2012-03-27. 作者简介: 于海莲(1987—), 女, 硕士生; 王永泉(通信作者), 男, 讲师. 基金项目: 国家重大科技专项资助项目(2010ZX04001-021); 教育部长江学者和创新团队发展计划资助项目(IRT1172); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(08143037).

网络出版时间: 2012-08-03

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20120823.1805.005.html>

机床整机是一个非常复杂的结构系统,对于精密卧式镗铣加工中心,其中立柱是承载滑鞍、主轴箱、主轴及刀具等重要部件的支撑件,并承受着加工过程中的各种载荷。对于机床这类复杂的机械结构,目前国内学术界仍局限于广义的优化设计,其实质是方案比较法。设计者根据经验,反复修改结构形状和尺寸,安排有限数量的参数组合进行数值模拟分析,并对各个参数进行灵敏度分析,进而选择性能最好的参数组合。这种设计方法的缺点是难以保证所选择的参数组合是最优方案,而且挑选参数及进行数值模拟分析需要大量时间,因此难以适应现代数控机床设计制造的需要。

近年来,基于响应面模型的优化方法已经成为国内外学者研究的热点之一:如唐勇等^[1]利用二阶响应面模型结合非支配遗传算法进行了 T 型管内高压成形加载路径的优化;Wang^[2]提出了一种自适应式响应面模型,其实质是一种动态的具有响应面模型更新功能的优化方法,该方法在全局收敛性及优化效率方面都表现出了较大的优势。

针对以上问题,本文探讨了基于响应面模型及遗传算法的多目标优化设计方法在机床结构上的应用。首先介绍了在机床优化中采用的响应面法的基本原理及非支配排序遗传算法 NSGA-II,然后给出了基于响应面模型及遗传算法的循环逼近优化方法的思路,以某型精密卧式镗铣加工中心为研究对象,根据对龙门立柱进行静动态特性分析时发现的问题,确定了以立柱静刚度最大化和首阶固有频率最大化为多目标的优化模型。在试验设计和数值模拟的基础上,建立了立柱优化输出变量的初始二阶响应面模型,并利用遗传算法进行循环逼近优化,在优化所获得的 Pareto 最优解集中选择合适的满意解,通过数值模拟对满意解进行了仿真验证。

1 响应面法的基本原理

响应面方法是构造显式的近似表达式来代替原设计问题中隐式的约束或目标函数,而响应面模型的建立主要包括:①选择构造响应面模型所需要的样本点,即试验设计;②数据拟合与预测模型的建立,这也是响应面模型的主体。

1.1 拉丁超立方试验设计

为了构造响应面模型,本文选择拉丁超立方试验设计。该方法是一种具有随机选点特性的充满空间的设计,可使输入组合相对均匀地填满整个设计空间,并且每个设计变量水平只使用一次。使用拉丁

超立方试验设计可以保证每个因素在各个水平上都能均匀地应用,因此该试验方法具有通过较少的样本点即可反映整个设计空间的特性,是一种效率高、均衡性能好的试验设计方法^[3]。

1.2 响应面模型的拟合

本文选择常用的具有较高准确性的二阶多项式响应面模型, n 个设计变量的二阶多项式响应面模型可表示为

$$y = \alpha_0 + \sum_{i=1}^n \alpha_i x_i^2 + \sum_{j=2}^n \sum_{i=1}^{j-1} \alpha_{ij} x_i x_j \quad (1)$$

$$\boldsymbol{\alpha} = [\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_n, \alpha_{11}, \alpha_{22}, \dots, \alpha_{nn}, \alpha_{12}, \alpha_{23}, \dots, \alpha_{(n-1)n}]^T$$

式中: y 为输出变量; x_i 为设计变量; n 为设计变量的个数; $\boldsymbol{\alpha}$ 为待定系数向量,可由最小二乘回归法拟合得到。

1.3 响应面模型的优度指标

采用拟合优度指标来评价响应面模型对试验数据的拟合精度,其中均方根误差 E 表示由随机误差引起的输出量不均匀程度,其越小越好。复相关系数 R^2 和相关修正负系数 R_a^2 是度量相关程度的指标,其值越接近 1,说明误差的影响越小,则响应面的精度越高^[4]。

2 多目标优化算法

多目标优化算法不存在唯一的全局最优解,而是各个目标在不同权重系数下组合的一系列解的集合,称为多目标优化问题的 Pareto 最优解集(也称非劣解或非支配解)。由于 Pareto 最优解集中所对应的任何一个目标函数的值在不使其他目标函数值恶化的条件下已不可能再进一步改进^[5],因此 Pareto 最优解集中的每一个解仅仅是多目标优化问题的一个可以接受的非劣解或满意解。对于大多数的实际问题,在求得多目标优化问题的 Pareto 最优解集后,往往要根据设计者对问题的了解程度及偏好,从众多最优解集中挑选合适的一个或者多个解作为问题的最终解。

目前,随着多目标遗传算法的不断完善和发展,其在处理多目标优化问题上已显现出了独特的优势。由于 Pareto 最优解的寻优机制在非支配遗传算法中良好的求解效果,因此得到了广泛的应用。本文选择非支配遗传算法对立柱结构进行优化。

3 基于响应面模型的多目标优化流程

基于响应面模型及多目标遗传算法的思路为:先确定优化问题中的设计空间,在整个空间内选择

样本点,并完成初始响应面模型的拟合及优化;在以后的迭代过程中,根据上一次优化的结果来判断是否变化设计空间,若是则重新构造设计空间;然后,在设计区间内增加样本点,并用其中的样本点更新响应面模型,再对其进行优化,并判断是否满足收敛,如不满足,则继续迭代.将每一次响应面模型的建立与优化的过程称为一次外循环,如图1所示的循环逼近响应面模型优化设计的具体步骤如下.

步骤1 建立优化问题的数学模型.

步骤2 利用拉丁超立方试验设计方法在设计空间内选取样本点.

步骤3 通过有限元分析计算步骤2中所选取的样本点处的响应值.

步骤4 利用步骤3中试验设计所得的离散数据,进行响应面模型的初次拟合.

步骤5 利用遗传算法对步骤4中的响应面模型进行第1次优化,优化收敛后停止优化,此处的收敛准则为优化算法的收敛准则.

步骤6 对步骤5中优化所得的最优解进行数值模拟,若各优化目标值未得到改进,则下次循环的初始点不采用新的优化点,而采用上次循环的优化点.

步骤7 校验该次外循环是否满足收敛条件,收敛条件是整个优化模型的收敛条件,定义为相邻2次外循环中每个目标函数的改进值小于某一特定值,即

$$\left. \begin{aligned} (G_1^N - G_1^{N-1})/G_1^{N-1} &\leq 1\% \\ (G_2^N - G_2^{N-1})/G_2^{N-1} &\leq 1\% \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: G_1^N 为第 N 次外循环后得到的第1个变量的目标值; G_2^N 为第 N 次外循环后得到的第2个变量的目标值.若满足收敛条件,则结束整个优化模型的优化.

步骤8 若不满足步骤7中的收敛条件,则需要计算优化点处的响应面误差,即各目标函数在响应面模型的响应值与真实数值模拟分析所得值的差值.若差值大于某一特定值,或者本次循环中各目标值并未得到改进,则减小优化区间并增加试验设计点,进而更新响应面模型.若本次循环中各目标值得到了改进,并且此时的设计空间大小在允许的最大值范围内,则增大优化区间并增加试验设计点,进而更新响应面模型,然后转入步骤5进行优化.整个优化过程是一个重复并循环的过程,直到最后满足步骤7中的收敛条件.

由于优化技术在每次外循环后会改变优化区间,因此增加设计点,并更新响应面模型.优化技术

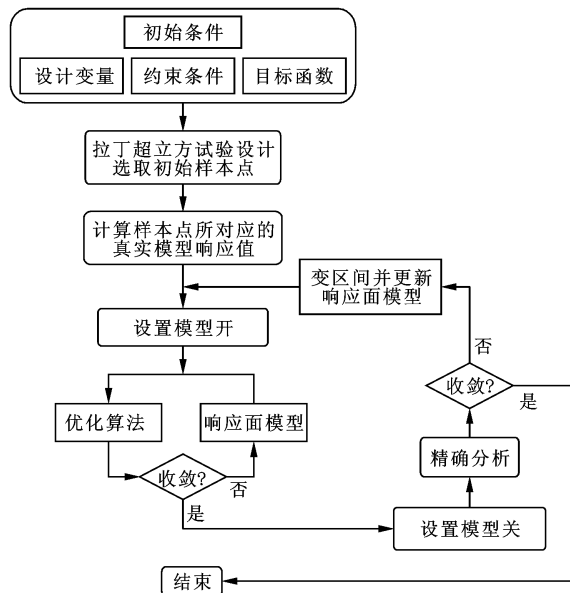
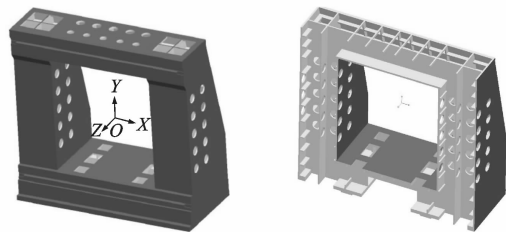


图1 多目标遗传算法流程图

并不关注单一某个响应面模型在整个设计空间内的精度,而是关注响应面模型在设计空间内最优解附近的精度,通过循环优化找到包含最优解的设计空间,从而获得整个设计空间内的最优解.

4 机床立柱结构的优化

图2为某型号精密卧式镗铣加工中心的龙门式立柱整体及其内部筋板结构的CAD模型.在初始设计中,立柱在 X 向的总宽为3 000 mm,在 Z 向的宽度为1 350 mm,在 Y 向的总高为2 920 mm,内部采用十字交叉并带孔的筋板,材料为铸铁,其密度为7 300 kg/m³,杨氏模量为 1.45×10^5 MPa,泊松比为0.27,许用应力为240 MPa,立柱总质量为9 380 kg.



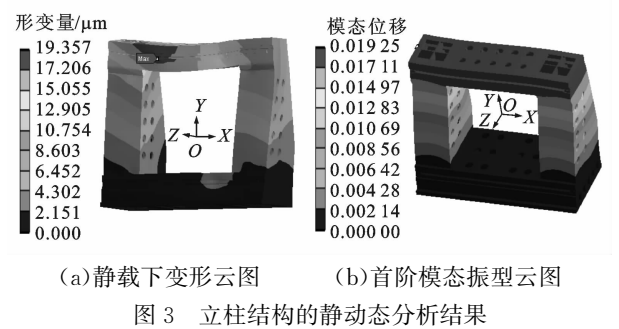
(a) 龙门立柱外形 (b) 立柱内部网状筋板

图2 立柱整体及网状筋板结构示意图

4.1 立柱结构优化模型的建立

通过对立柱结构的静力分析及模态分析,得到以下结论:①立柱在工作情况下的最大应力为2.7 MPa,远小于材料的许用应力,因此在对立柱结构进行优化时可忽略应力的影响;②立柱的最大变形为

19.4 μm ,发生在滑鞍上的导轨处(见图 3a),由于高精度机床的变形比较大,因此应对其进行进一步的结构优化;③立柱的前两阶固有频率分别为 57.7、70.3 Hz,首阶模态振型如图 3b 所示.该机床工作时主轴的主要转速为 3 000 r/min 左右,激励频率在 50 Hz 左右,在机床工作时有可能会引起共振,因此有必要对其固有频率进行优化.



4.1.1 目标函数 将提高立柱的静刚度和首阶固有频率为双优化目标,由于立柱的最大变形发生在与滑鞍接触的导轨处,因此立柱静刚度的最大化可等效转化为该处变形的最小化.立柱的目标函数为

$$\max f_1; \max D_g \rightarrow \min \tag{3}$$

式中: f_1 为立柱的首阶固有频率; D_g 为立柱与滑鞍接触部分导轨处的最大变形量.

4.1.2 约束条件 立柱不仅是机床结构中的重要支撑部件,而且也是床身的主要静载.在对立柱的静刚度及首阶固有频率进行优化时,会造成立柱质量的改变,因此为了保证整机的优化效果,则需要保证立柱的质量不增加.最初设计的立柱质量 M 为 9 380 kg,则约束条件为

$$M - 9\,380\text{ kg} \leq 0 \tag{4}$$

4.1.3 优化变量 机床立柱的外形尺寸取决于机床的规格,一般不宜轻易更改,所以本文在对立柱优化时,以机床立柱内部的筋板及清砂孔的大小为主要研究对象,并从中选取一些参数作为优化变量,具体如表 1 所示.

表 1 立柱结构优化的设计变量 mm		
设计变量	初始取值	优化区间
立柱壁厚 x_1	25	20~30
立柱顶部横筋厚度 x_2	30	25~35
立柱两侧横筋厚度 x_3	20	15~25
立柱底部横筋厚度 x_4	25	20~30
立柱纵向筋板厚度 x_5	20	15~25
立柱纵向筋板高度 x_6	60	40~80
立柱筋板清砂孔直径 x_7	150	130~170

4.2 初始二阶响应面模型的建立

对于多项式响应面模型的拟合,所需要的最少试验点数等于多项式的项数,但一般在设计空间内样本点个数越多,响应面拟合得越准确,而大多数情况下,均选择所需最少试验点数的 2 倍以上.对立柱进行优化时,选择 7 个设计变量,对于二阶响应面模型,试验设计的最少样本点数为 36,为了保证响应面模型的精度,选择样本点数为 100.将样本确定后,利用数值模拟计算出各样本点处的响应值.

根据试验设计所得的样本点,通过数据统计可以得出各设计变量对 3 个输出变量(2 个目标变量和 1 个约束变量)的影响程度,如图 4 所示.由图 4a 可知,对于立柱导轨处的最大变形,当立柱壁厚、纵筋厚度、纵筋高度等变量增大时,变形量也相应增大,但影响程度则依次减小.当清砂孔直径等变量增大时,最大变形则会减小.图中未出现的设计变量对输出变量的影响更小,对图 4b、图 4c 的分析类似.

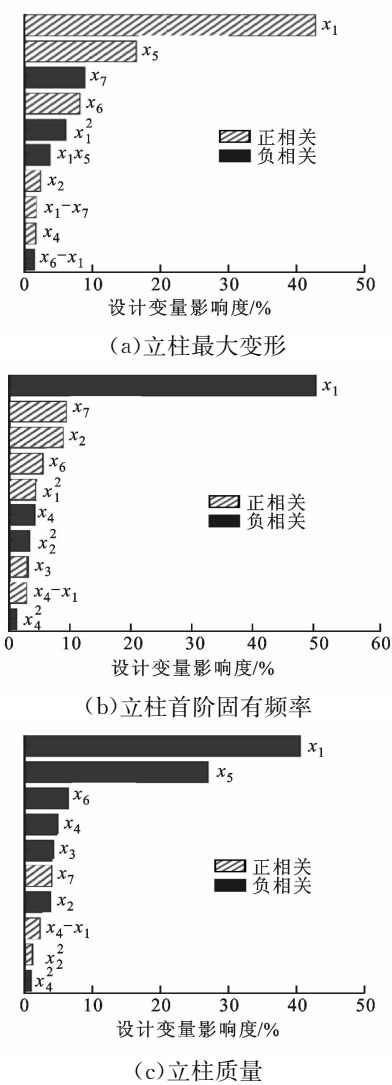


图 4 各设计变量对输出变量的影响程度

在响应面拟合时,选择影响程度较大的多项式项进行拟合,以减小噪声项的影响,同时保证响应面的拟合精度.本文在对立柱优化问题中 3 个输出变量的初始响应面的拟合过程中,根据二次完全多项式中各项(共 36 项)对响应面模型拟合精度的影响程度,选其中影响程度排前的 18 项,忽略后 18 项影响程度较小的项,以试验设计数据点为基础,利用最小二乘法完成了对各输出变量响应面模型的拟合.

4.3 优化过程及结果

在响应面模型的基础上,利用多目标遗传算法 NSGA-Ⅱ 的循环逼近优化技术对立柱进行了优化.在立柱的优化过程中,循环逼近模型满足收敛准则,经过 29 次外循环(21 次变区间优化),所得到的 Pareto 最优解集如图 5 所示.

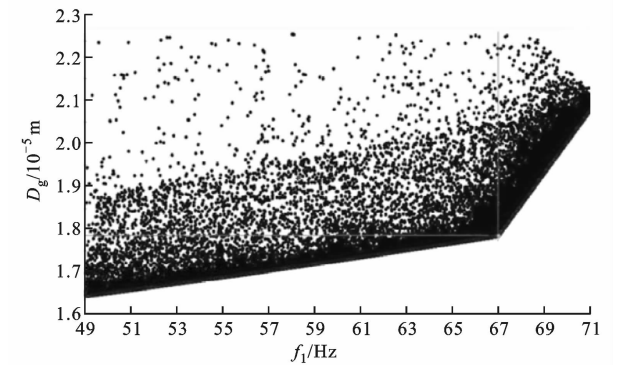


图 5 立柱结构多目标优化问题的 Pareto 最优解集

由图 5 可以看出,优化过程中众多离散点的边缘呈现出了一条折线的趋势,这条折线上的点构成了立柱结构多目标优化问题的 Pareto 最优解集.其排列趋势表明:立柱结构固有频率的增加必将导致立柱导轨处最大变形的增加,即 2 个目标函数相互矛盾,并且基本遵循折线关系.2 个目标函数在折点前的直线斜率小于折点后的直线斜率,即在折点前随着立柱固有频率的增加,立柱导轨处的最大变形缓慢增加,而在折点后立柱导轨处的最大变形急剧增加.权衡 2 个优化目标的重要性,将优化问题的最优解选定在折点处,这样既可以保证立柱有较高的固有频率,又可以保证导轨处的变形不至于很大.选取 100 组参数组合进行数值模拟分析,从中选取相对最优的一组优化解与传统的优选方案比较法进行对比,见表 2.

由优化结果可以看出,采用基于响应面模型的优化方法对立柱结构进行多目标优化后,在质量不变的条件下,可使立柱固有频率增加 15.9%,导轨处的变形减小 7.7%.另外,通过与传统方案方法相

对比,发现基于响应面模型的优化设计方法更易获得较好的优化结果.

表 2 立柱结构优化结果的对比

设计变量	原始设计	传统方法	本文方法
x_1/mm	25.0	27.6	25.9
x_2/mm	30.0	32.9	25.0
x_3/mm	20.0	17.2	15.0
x_4/mm	25.0	26.7	20.0
x_5/mm	20.0	16.7	15.0
x_6/mm	60.0	41.7	49.0
x_7/mm	150.0	144.8	130.0
M/kg	9 380.0	9 363.9	9 380.0
f_1/Hz	57.7	60.1	66.9
$D_g/\mu\text{m}$	19.4	18.8	17.9

5 结 论

本文以某型号机床立柱的优化设计为应用实例,提出了一种基于响应面模型及多目标遗传算法的工程结构优化方法.通过分析、寻找影响机床静动态性能的薄弱环节,确定了其龙门立柱结构的双目标优化方案,建立了优化问题中 3 个输出变量的初始响应面模型,并以该模型来代替数值模拟计算.采用基于非支配排序遗传算法 NSGA-Ⅱ 的循环逼近优化技术,完成了优化计算.这种将响应面模型与多目标遗传算法相结合的优化方法,不仅可实现较高精度的全局搜索寻优,获得多目标问题的 Pareto 最优解集,而且与目前机床结构优化中普遍采用的基于多次数值分析的方案优选法相比,具有较高的计算效率.本文所提出的优化方法,同时也适用于机床中其他零部件或类似复杂机械结构的优化问题.

参考文献:

[1] 唐勇.铝合金热态内高压成形工艺研究 [D].合肥:合肥工业大学,2010.
[2] WANG G G. Adaptive response surface method using inherited Latin hypercube design points [J]. Journal of Mechanical Design, 2003, 125(2):210-220.
[3] MORRIS M D, MITCHELL T J. Exploratory designs for computational experiments [J]. J Statist Plann Inference, 1995, 43(3): 381-402.
[4] WEI S, NILAY P, RAJKUMAR V, et al. Global de-

sign optimization for aerodynamics and rocket propulsion components [J]. Progress in Aerospace Sciences, 2001, 37(1):59-118.

[5] DEB K, AGRAWAL S, PRATAP A, et al. A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2):182-197.

(编辑 管咏梅)