

高架桥式重型龙门加工中心横梁优化设计

李志杰^{1,2,3}, 蔡力钢^{1,2}, 刘志峰^{1,2}, 郭铁能^{1,2}

(1. 北京工业大学机械工程与应用电子技术学院, 北京 100124; 2. 先进制造技术北京市重点实验室, 北京 100124;
3. 北华航天工业学院机电工程学院, 河北 廊坊 065000)

摘要:介绍了一种高架桥式重型龙门加工中心横梁从初始构型设计到最终确定板件具体尺寸的优化设计方法, 首先针对高架桥式重型龙门加工中心横梁承受随动载荷的工况, 以及焊接工艺及操作空间的制造限制条件, 建立基于变密度法 SIMP 插值的拓扑优化数学模型, 采用启发式调整法对变量进行迭代更新的优化准则法 (optimality criteria, OC) 算法, 利用灵敏度过滤技术抑制棋盘格、增强网格独立性, 借助 MATLAB 编程进行结构拓扑优化, 得到横梁初始构型; 再以横梁主要板件厚度为设计变量, 建立响应面模型, 计算刚度和固有频率对板件厚度的灵敏度; 采用带有精英策略的第二代非劣排序遗传算法 NSGA-II 对响应面模型进行多目标优化, 在 Pareto 解集中选出最优解, 并基于灵敏度分析对设计变量进行取整修正, 优化后的横梁动静态性能满足工程要求, 目前已经应用到工程实践中, 具有很强实用性。

关键词: 高架桥式; 龙门横梁; 优化设计; 变密度法; 响应面模型; 多目标优化

中图分类号: TH 122

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2020)05-0440-08

doi: 10.11936/bjputxb2018120025

Cross Beam Optimum Design of Viaduct Type Heavy Gantry Machining Center

LI Zhijie^{1,2,3}, CAI Ligang^{1,2}, LIU Zhifeng^{1,2}, GUO Tieneng^{1,2}

(1. College of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;
2. Beijing Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology, Beijing 100124, China; 3. College of Mechanical and Electronics Engineering, North China Institute of Aerospace Engineering, Langfang 065600, Hebei, China)

Abstract: An optimum design method of gantry machining center cross beam was introduced from the initial configuration design to the final determination of the reinforcement bar specific size. The mathematical model of topology optimization based on variable density method was first established in which the moving load was considered. The iterative formula was deduced with optimality criteria method and a filtering function with volume constraint was imported to solve the problem of checkerboard and mesh independence. After the preparation of MATLAB program, the initial configuration of the beam was obtained. Then, the response surface model was established to calculate the sensitivity of stiffness and natural frequency to the thickness of the main plate. NSGA-II with elitist strategy was used to optimize the response surface model, and after selection of the optimal solution in Pareto solution set, rounding correction of the design variables based on sensitivity analysis was implemented. By comparing with the original design data, the reliability and feasibility of the method in this paper were proved, which

收稿日期: 2018-12-29

基金项目: 国家科技重大专项资助项目(2014ZX04001-171); 国家自然科学基金资助项目(51575009); 河北省高等学校科学技术研究项目(QN2019193)

作者简介: 李志杰(1979—), 男, 博士研究生, 主要从事机床动力学、运动控制方面的研究, E-mail: nciae_lizhijie@126.com

provides theoretical guidance for the optimization design of cross beam of gantry machining center, and also provides reference for the optimization design of other similar structures.

Key words: viaduct type; cross beam; optimization design; variable density method; response surface model; multi-objective optimization

重型制造装备具有大尺度、大惯量、大复杂的特点,这给该类设备的设计与制造带来严峻挑战,提升重型制造装备关键零部件的自主创新设计和制造能力势在必行^[1]. 横梁作为高架桥式重型龙门机床的重要承载和移动部件,其自身静动态特性对机床整体加工性能有着至关重要的影响,因此优化横梁结构,减轻横梁质量,提高横梁静动态性能意义重大. 清华大学张伯鹏等^[2]利用重力自演进补偿技术减小横梁重力变形,改善横梁系统几何精度. Han等^[3]通过优化横梁结构提高其静刚度,减小了横梁的重力变形. Zatarain等^[4]基于有限元方法对横梁等部件进行了模态分析,进而得到较合理的结构设计方案. 赵岭等^[5]利用结构仿生方法对加工中心横梁筋板结构进行了优化设计. 文献[6-7]通过分析溜板在不同位置时横梁的变形情况,得到横梁导轨的变形曲线,进而设计出起拱曲线,来抵消变形的影响,从而保证机床几何精度.

本文研究对象是面向航天器高强度复杂零件加工特殊需求而开发的高架桥式大跨度动梁数控龙门复合加工中心,在加工过程中,横梁作为运动部件(动梁)移动的同时,其上的溜板组件相对横梁位置也发生变化,相对于横梁构成移动载荷(动载),针对于此种工况的横梁优化设计在现有文献中少有提及. 以往工程实践中对于大跨度重型龙门机床横梁设计,初始形态都是通过经验类比法先大致绘制出三维模型,在此基础上再进行相应的优化分析与设计,虽然此种方法可以使结构形态满足基本的性能要求,但结构形态不会发生太大的本质变化,这必然使结构设计存在一定的偶然性和盲目性.

本文针对高架桥式重型龙门加工中心横梁承受随动载荷的工况,以及焊接工艺及操作空间的制造限制条件,建立基于固体各向同性微结构材料惩罚模型法(solid isotropic microstructures with penalization, SIMP)插值的拓扑优化数学模型,采用启发式调整法对变量进行迭代更新的优化准则法(optimality criteria, OC)算法,利用灵敏度过滤技术增强网格独立性,抑制棋盘格等现象,借助 MATLAB 编程对横梁纵向和横向截面进行结构拓扑优化,从而得到横梁初始构型;继而再以横梁主要板件厚度

为设计变量,建立响应面模型计算柔顺度和固有频率对板件厚度的灵敏度;最后采用带有精英策略的第二代非劣排序遗传算法 NSGA-II 对响应面模型进行多目标优化,在 Pareto 解集中选出 1 组最优解. 通过与原始设计进行对比,证明了方法的可靠性和可行性.

1 基于拓扑优化的横梁初始构型设计

结构拓扑优化作为一种结构优化方法,不需给定结构的初始形态,只需限定设计空间范围以及载荷与约束等边界条件,通过优化算法就能在设计域内寻找出合理的结构形态,是一种计算机辅助造型技术^[8]. Bendsoe等^[9]首先提出了基于孔洞微结构的均匀化方法,通过控制孔洞的变量变化实现对拓扑形状的改变,均匀化方法具有严谨的数学和力学基础,具有很高理论研究价值. 变密度法其实是均匀化方法的一种简化形式, Sigmund等^[10]提出变密度法的基本思想,建立正交各向同性材料密度惩罚模型,对材料密度插值函数展开研究. 不同于变密度法将 0~1 连续变量作为设计变量,离散体变量法直接采用离散的 0/1 作为设计变量,渐进结构优化(evolutionary structural optimization, ESO)是离散变量优化方法的一个重要代表^[11]. 为解决早期进化结构优化中单元格误删之后难以恢复问题, Huang等^[12]提出了能重生材料单元格的双向渐进结构优化方法(bi-directional evolutionary structural optimization, BESO). 基于离散变量法模型,智能算法如遗传算法^[13]、粒子群算法^[14]和蚁穴算法^[15]等具有很强的全局搜索能力和高准确性,但必须满足特定条件,针对性较强,通用性较差. 变密度法基于各向同性材料,将材料单元的相对密度作为设计变量,程序简单,具有很强通用性.

1.1 变密度法拓扑优化数学模型

结构拓扑优化是将结构的柔度作为优化目标,将其材料体积设为限制条件,最终实现目标函数的柔度最小化,从而实现结构刚度最大,具体的数学模型表达式为

目标函数:

$$\text{Min}C(x) = \mathbf{U}^T \mathbf{K} \mathbf{U} = \sum_{e=1}^N (x_e)^p \mathbf{u}_e^T \mathbf{k}_0 \mathbf{u}_e \quad (1)$$

约束函数:

$$\begin{cases} \frac{V(x)}{V_0} = f \\ \mathbf{K} \mathbf{U} = \mathbf{F} \\ 0 < x_{\min} \leq x_e \leq 1 \end{cases} \quad (2)$$

式中: \mathbf{U} 和 \mathbf{F} 分别表示结构的变形和向量力; \mathbf{K} 是结构的刚度矩阵; \mathbf{u}_e 和 \mathbf{k}_e 分别为元素的位移矢量和刚度矩阵; x_e 是设计变量; x_{\min} 为相对密度最小的设计变量; N 是在 $0 \sim 1$ 设计区域内离散化的元素数目; p 为密度惩罚因子; $V(x)$ 和 V_0 分别为给定的材料体积和设计区域体积; f 为体积分数。

1.2 优化算法

在拓扑优化的非线性优化算法中, 优化准则法(OC)算法基于启发式调整法对设计变量进行更新, 对于设计变量较多而约束条件较少的情况, 优化准则法具有很高的求解效率, 收敛速度快, 通用性较强; 移动渐近线法(method of moving asymptotes, MMA)是利用当前设计点目标函数和其导数建立一个简单的近似凸函数来逼近实际隐函数, 具有很强的鲁棒性, 但对于优化问题复杂的场合, 寻找近似函数比较困难, 所以适用于约束条件较少的优化场合; 梯度投影法(gradient projection method, GPM)具有很高的求解效率, 缺点是容易产生局部最优解。本文采用通用性较强的优化准则法。

$$x_e = \begin{cases} \max(x_{\min}, x_e - m) \\ \text{if } x_e B_e^\eta \leq \max(x_{\min}, x_e - m), \\ x_e B_e^\eta \\ \text{if } \max(x_{\min}, x_e - m) < x_e B_e^\eta < \min(1, x_e + m) \\ \min(1, x_e + m) \\ \text{if } \min(1, x_e + m) \leq x_e B_e^\eta \end{cases} \quad (3)$$

式中: m 是正向移动极限; η 是阻尼常数; λ 是拉格朗日乘子。

$$B_e = \frac{-\frac{\partial c}{\partial x_e}}{\lambda \frac{\partial V}{\partial x_e}} \quad (4)$$

为抑制运算过程中出现棋盘格、网络依赖性等数值不稳定现象, 采用基于卷积积分因子的灵敏度过滤技术, 对过滤半径区域内网格加权平均获得新的灵敏度数值作为设计变量进行更新, 进而提升网格的

独立性, 不需要再加入额外附加约束, 简单可靠。

目标函数的灵敏度表达式为

$$\frac{\partial c}{\partial x_e} = \sum_{f=1}^N \hat{H}_f x_f \frac{\partial c}{\partial x_f} / \left(x_e \sum_{f=1}^N \hat{H}_f \right) \quad (5)$$

式中 \hat{H}_f 为卷积积分因子, 表达式为

$$\begin{aligned} \hat{H}_f &= r_{\min} - \text{dist}(e, f) \\ \{f \in N \mid \text{dist}(e, f) \leq r_{\min}\}, e &= 1, 2, \dots, N \end{aligned} \quad (6)$$

引入惩罚因子目的是将设计变量即文中所说密度从 $0 \sim 1$ 向两端聚集, 进而在设计区域内得到较为清晰的拓扑形式。惩罚因子的取值对优化结果有很大影响, 文献[16]进行了详细描述, 本文取 3.0 对横梁进行优化。

1.3 横梁构型

本文研究对象高架桥式大跨度动梁数控龙门复合加工中心由立柱、床身、横梁、溜板滑枕等主要部件组成, 如图 1 所示, 其跨距 7 m, 横梁长 9.5 m, 溜板和滑枕等附件合计 10 t。根据横梁受力情况, 为提高运行速度节省运行时间, 将横梁随时间变化的变位载荷以及横梁自身重力简化为 3 点, 即中点、左端和右端, 此 3 种工况是横梁工作时 3 种极端情况, 目标函数变更为

$$c(x) = \sum_{i=1}^3 \mathbf{U}_i^T \mathbf{K} \mathbf{U}_i \quad (7)$$

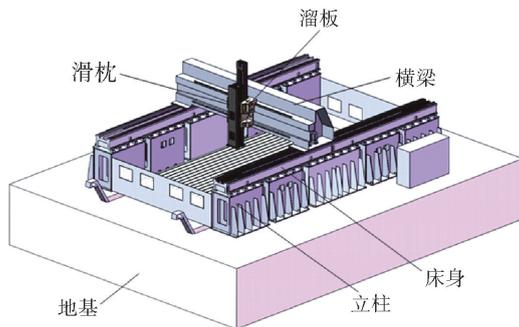


图 1 高架桥式重型龙门结构图

Fig. 1 Structural sketch of heavy gantry

借助 MATLAB 软件编制拓扑优化算法程序, 本文研究对象横梁主体长度 9 500 mm, 高度 1 000 mm, 随动载荷施加位置简化为横梁左侧、右侧和中间, 过滤半径 r_{\min} 取值 1.5, 惩罚因子设定为 3.0, f 取值 0.5, 优化结果如图 2 所示。获得横梁纵向筋板结构形式如图 3 所示。

高架桥式龙门加工中心其溜板及滑枕安装在横梁一侧, 造成横梁弯曲和扭转变形, 横梁在保证纵向具有足够刚度的同时, 横向也要尽量减小柔性变形。经初步优化后, 横梁纵向筋板需纵贯横梁

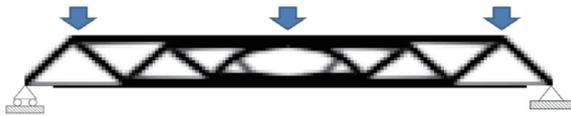


图2 横梁纵向拓扑优化结果

Fig. 2 Longitudinal topology optimization of beam

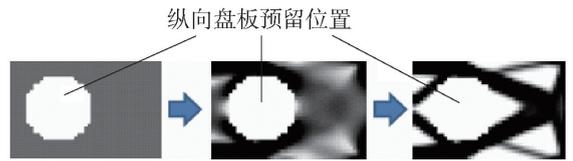


图6 横梁横向截面拓扑演化

Fig. 6 Topological evolution of transverse section

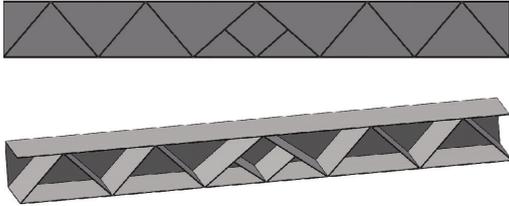


图3 横梁纵向筋板布局示意图

Fig. 3 Longitudinal stiffener layout diagram of beam

内腔,如图3所示,若再增加横向加强筋,势必在横梁内部造成筋板交错,增加焊接难度甚至无法焊接。为此,采用空间错位的方法,在横向优化的同时为纵向筋板预留空间位置,结合工程经验,截面加强筋一般在两结合壁板的公共垂直面上并呈近似三角形,如图4所示,纵向筋板预留位置在截面上投影呈近似圆形。

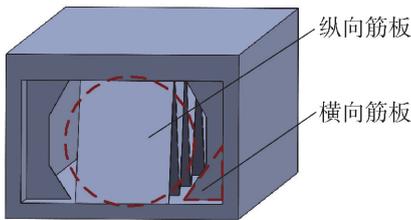


图4 横梁纵向筋板空间错位示意图

Fig. 4 Spatial layout of transverse and longitudinal stiffeners

溜板及滑枕附件等效载荷施加在横梁横向截面右侧顶部和距离底部1/3处,将载荷简化并施加在如图5所示位置。按空间错位方法,在横梁内腔预留出纵向筋板位置(如图6所示),根据拓扑优化结果,对横梁内部横向截面加强筋板结构形式进行设计,得到横梁初始构型。

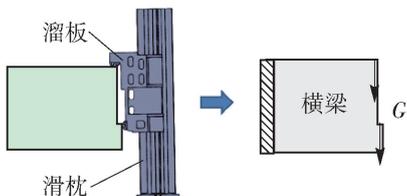


图5 横梁横向截面受力简化图

Fig. 5 Diagram of transverse section force

2 基于响应面法的尺寸设计

2.1 设计变量

在拓扑优化对横梁内部纵向和截面筋板构型设计的基础上,结合焊接、磨削等加工工艺以及导轨、电机等组件的装配空间和工艺,对横梁进行详细设计。高架桥式重型龙门加工中心由于其跨距大,驱动形式采用横梁两端齿轮齿条同步双驱,伺服电机安装在横梁两端。横梁端底板连接滑块将安装在高架墙的导轨上,简化对应于图3的支撑点。再者,横梁两端须预留电机安装空间,所以端底板上不设纵向筋板。图7是横梁的初始构型,选取其中5个主要结构尺寸作为设计变量,分别为:截面筋板厚度 P_1 、纵向筋板厚度 P_2 、主壁板厚度 P_3 、底面纵向筋板厚度 P_4 、端底板厚度 P_5 。取值范围见表1。

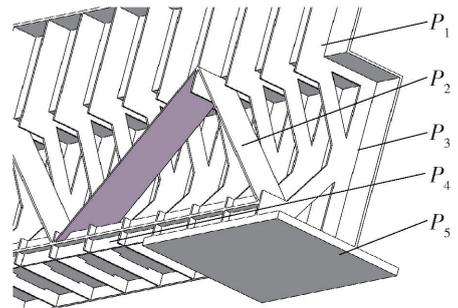


图7 横梁初始设计构型

Fig. 7 Initial design configuration of cross beam

表1 设计变量取值范围

Table 1 Range of design variables

变量	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5
初始值	10	10	16	10	55
上限值	8	8	14	8	49
下限值	12	12	18	12	61

2.2 响应面模型

响应面法(response surface methodology, RSM)的研究最早追溯到1951年,由Wilson和Box提出,在1959年Box和Draper将其定义为“在经验模型构造和开发中应用的一组统计学方法”。近些年,基

于响应面方法的优化设计已经成为国内外学者的研究热点,北京工业大学隋允康教授团队^[17]做了大量研究工作.对于 n 个设计变量,二次多项式响应面模型为

$$\hat{y}(x) = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i + \sum_{i=1}^n a_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n a_{ij} x_i x_j \quad (8)$$

式中: $x_i (i=1, 2, \dots, n)$ 为 n 维设计变量; a_0, a_i, a_{ii}, a_{ij} 为多项式待定系数,其个数 $k = (n+1)(n+2)/2$, 待定系数按照一定次数排列构成矢量 $\mathbf{a} = (a_0, a_1, \dots, a_{k-1})$, 采用最小二乘法求解矢量 \mathbf{a} , 试验点个数 m 大于等于 k .

2.3 中心复合设计

在 RSM 曲面构建过程中,实验类型的选择有着至关重要的作用,它直接影响着相应面的构造精度^[18].中心复合设计(central composite designs, CCDs)由 Box 于 1951 年提出,是一种在二阶设计中重复一阶部分的试验策略,具有很好的稳健性. CCDs 既可以估计线性和交互效应,又可以估计曲性效应,以最少的试验循环提供了关于试验变量和试验误差的诸多信息,是目前在 RSM 中广为推荐的一种试验点设计方法^[19].

对 n 因子两水平情况,试验点由中心点、轴向点和析因点三部分组成,图 8 所示为 $n=3, l=3$ 情况下中心复合设计试验点分布方式.

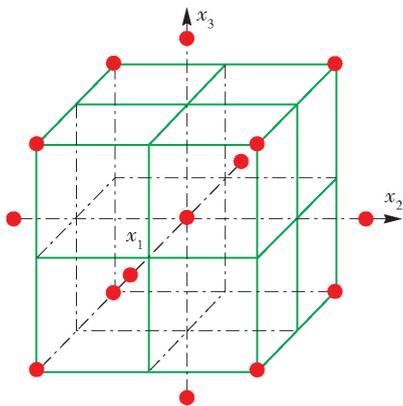


图 8 三变量二水平中心复合设计

Fig. 8 3-variable and 2-level central composite design

在两水平析因试验点设计基础上,增加设计矩阵的中心点,并在轴向距离 $\pm \delta$ 的位置增加设计点. δ 一般取值 1 或 $\sqrt[4]{m}$, m 为中心复合试验设计需要的试验点数,其数值可由下列公式得到:

$$m = 2^{n-\zeta} + 2n + 1 \quad (9)$$

式中: n 为设计变量个数; ζ 为析因系数. 本文提取

了 5 个主要结构尺寸最为设计变量,取 $\zeta = 1$, 试验点数 $m = 27$.

2.4 回归评价

在 RSM 中响应面函数 $\hat{y}(x)$ 是性能函数 $y(x)$ 的近似函数,二者之间存在误差. 响应面模型是否可以作为性能函数的近似模型,需要对响应面的拟合精度进行检验. 决定系数 R^2 、修正决定系数 Ra^2 的公式分别为

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^m (y_i - \hat{y})^2}{\sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y})^2} \quad (10)$$

$$Ra^2 = 1 - \left(\frac{m-1}{m-n} \right) \frac{\sum_{i=1}^m (y_i - \hat{y})^2}{\sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y})^2} \quad (11)$$

决定系数 R^2 取值在 $[0, 1]$, 数值越接近 1 说明响应面函数与性能函数近似程度越高,若 $R^2 = 1$ 则说明响应面函数可以精确地表达性能函数,所有试验点全部都在响应面函数确定的曲面上^[20].

引入修正决定系数 Ra^2 是为了减小参数个数变化对响应面模型近似精度的影响,即当参数个数增加时, Ra^2 不会随之增加,避免了冗余参数对响应面模型近似精度的影响.

从表 2 响应面模型的拟合度量值可以看出,响应面模型的总体进度可以满足要求.

表 2 拟合评价指标数值

Table 2 Fitness evaluation index value

评价指标	质量 m	静变形 δ	一阶频率 f_1	二阶频率 f_2
R^2	1	0.996 77	0.997 31	0.996 00
Ra^2	1	0.995 80	0.995 89	0.995 05

2.5 灵敏度分析

通过上述方法,得到目标函数的响应面函数 $\hat{y}(x)$, 对设计变量 x_i 求偏导,得到响应面函数对 x_i 的灵敏度 S , 由灵敏度 S 大小可以看出设计变量变化对目标函数的影响程度^[21].

$$s = \frac{\partial \hat{y}}{\partial x_i} \quad (12)$$

在本例的分析中,函数分别为横梁刚度即等效应力、最大静变形、横梁一阶固有频率和横梁质量.

由图 9 可见, P_1 截面筋板厚度、 P_2 纵向筋板厚度和 P_3 主壁板厚度对等效应力、最大静力变形和一阶固有频率影响较大,这也进一步验证了前期对纵

向筋板和截面筋板构型进行拓扑优化的重要性.

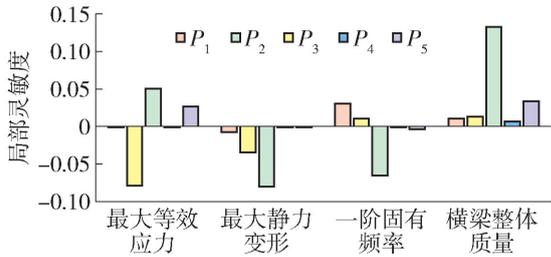


图9 设计变量灵敏度

Fig. 9 Sensitivity of design variables

图10和图11中, $x_i|_{\min}$ 和 $x_i|_{\max}$ 分别为设计变量下限值和上限值. 由图10中各设计变量的曲线走向可见, 所有设计变量对静力变形都是负相关, 按影响由大到小依次为 P_3, P_2, P_1 ; 由图11可见, 对一阶固有频率影响由大到小依次为 P_3, P_1, P_2 , 且 P_3 是负相关, 可以考虑通过调整 P_3 对静力变形和固有频率进行控制.

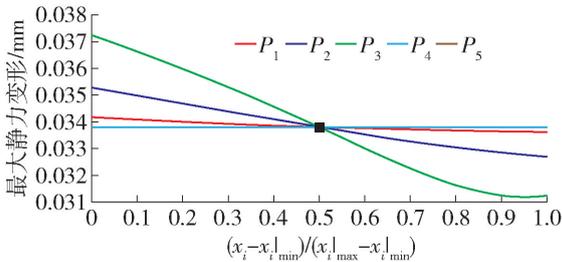


图10 最大静力变形灵敏度曲线

Fig. 10 Sensitivity curve of maximum static deformation

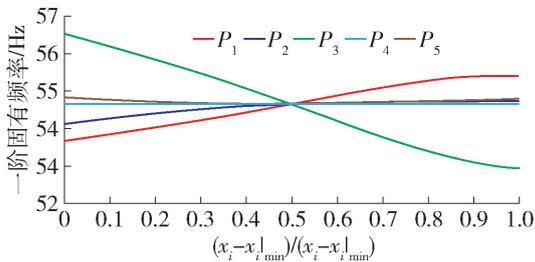


图11 一阶固有频率灵敏度曲线

Fig. 11 Sensitivity curve of first-order natural frequency

3 多目标优化

横梁作为龙门机床的重要零部件, 设计时需要同时考虑其静态和动态性能, 基于上述响应面模型, 将最大静力变形和动态频率即一阶固有频率最大化同时作为优化的目标函数, 将最大等效应力第二阶固有频率设定为约束条件, 5个主要的结构尺寸作为设计变量, 数学表达如下:

目标函数

$$\max f_1(\mathbf{X}), \min \delta(\mathbf{X})$$

约束函数

$$\begin{cases} f_2(\mathbf{X}) \geq f_2|_0 \\ \sigma(\mathbf{X}) \leq \sigma_0 \\ x_i|_{\min} \leq x_i \leq x_i|_{\max} \end{cases} \quad (16)$$

式中: $\mathbf{X} = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)$; $f_1(\mathbf{X})$ 为一阶固有频率; $\delta(\mathbf{X})$ 为最大静力变形; $f_2(\mathbf{X})$ 为二阶固有频率; $f_2|_0$ 为初始二阶固有频率; $\sigma(\mathbf{X})$ 为最大等效应力; σ_0 为初始等效应力.

在多目标优化中, 各目标之间很难同时达到最优化, 常产生一系列有效解集, 叫作 Pareto 解. 传统的多目标优化问题常采用线性加权法和主要目标法等将多目标问题转化为单目标问题求解, 这类方法一般需要事先确定出每个目标的重要程度, 具有很大局限性. 基于 Pareto 解集的带有精英策略的第二代非劣排序遗传算法 (NSGA-II), 由于其算法分布性和收敛性都非常优秀, 是目前公认的一种最佳多目标优化算法^[22].

本文利用 ANSYS workbench design experiment 模块, 在 optimization 中选择 MOGA 多目标遗传算法, 样本初始数量 800, 每次迭代样本数 100, 最大迭代数量 50, 得到 Pareto 最优解集如图12所示, 2个坐标轴 x, y 分别代表了2个优化目标: 一阶固有频率和最大静力变形, x, y 目标函数对构成了 Pareto 前端.

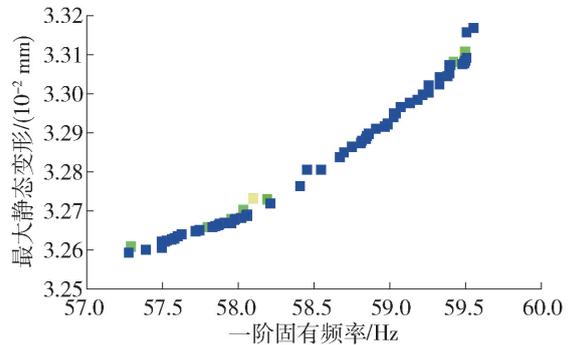


图12 Pareto 最优解

Fig. 12 Pareto optimum solution

对于重型龙门机床横梁, 工程中最为关心的是静态性能, 即最大静变形和低阶固有频率. 由图11可见, 两个优化目标最大静变形和一阶固有频率分别在 0.0326 ~ 0.0332 mm 和 57 ~ 59.5 Hz 变化, 静力变形相差很小, 故此选取一阶固有频率较大值的解作为候选最优解. 从图10和图11的

灵敏度分析可以看出 P_3 、 P_2 、 P_1 对刚度和固有频率影响最大,对候选最优解的设计变量进行取整修正,代入模型中重新计算并与初始设计进行对比,具体数据见表3.

表3 优化结果对比

Table 3 Comparison of optimization results

参数名称	初始值	优化后	变化率/%
截面筋板厚度 P_1 /mm	10.0	11.5	15
纵向筋板厚度 P_2 /mm	10	9	-10
壁板厚度 P_3 /mm	16	12	-25
底纵筋板厚度 P_4 /mm	10	6	-33.3
端底板厚度 P_5 /mm	55	42	-23.6
横梁质量 m /kg	9 513.8	7 445.9	-21.7
最大静力变形 δ /mm	0.033 87	0.033 08	-2.33
一阶固有频率 f_1 /Hz	54.68	59.45	8.72
二阶固有频率 f_2 /Hz	79.97	86.71	8.43
最大等效应力 σ /MPa	5.346 3	4.374 2	-18.18

如表3所示,在初始构型和主要筋板尺寸经验设计的基础上,经过优化后的横梁质量减少了21.7%,最大静力变形减小了2.33%,一阶固有频率提升了8.72%,二阶固有频率提升了8.43%.经过优化后的横梁在质量大幅减少的同时,静态和动态特性得到了进一步的提升.

论文方法已经应用到某高架桥式动梁数控龙门复合加工中心的横梁优化设计中,满足工程实践要求.

4 结论

1) 针对高架桥式重型龙门加工中心横梁承受随动载荷的工况,以及焊接工艺及操作空间的制造限制条件,建立基于变密度法 SIMP 插值的拓扑优化数学模型,采用启发式调整法对变量进行迭代更新的 OC 算法,利用灵敏度过滤技术抑制棋盘格、增强网格独立性,借助 MATLAB 编程进行结构拓扑优化,得到了横梁的纵向和横向截面初始构型,避免了以往初始构型靠经验设计的弊端,为此类零件优化设计提供了有力借鉴.

2) 在初始构型的基础上,以主要结构尺寸为设计变量,以质量、最大静力变形和一阶固有频率为目标,建立响应面模型,通过灵敏度分析证明了对初始构型拓扑优化的重要性,也为多目标优化之后主要

结构尺寸进一步修正提供了依据.

3) 结合变密度法拓扑优化技术、试验设计、响应面法、多目标遗传算法和灵敏度分析技术,实现了高架桥式加工中心龙门横梁从初始构型设计到结构件具体尺寸优化的完整设计流程,设计结果满足工程要求,具有很强工程实用性.

参考文献:

- [1] 高峰,郭为忠,宋清玉,等. 重型制造装备国内外研究与发展[J]. 机械工程学报, 2010, 46(19): 92-107.
GAO F, GUO W Z, SONG Q Y, et al. Current development of heavy-duty manufacturing equipments[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(19): 92-107. (in Chinese)
- [2] 张伯鹏,张年松. 机床横梁重力变位的自演进补偿[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2006, 46(2): 191-193.
ZHANG B P, ZHANG N S. Self-evolutionary compensation of machine tool crossbeam deformation induced by gravity[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2006, 46(2): 191-193. (in Chinese)
- [3] HAN G, GAO B, SHAO J, et al. Structural analysis and optimization on crossbeam of heavy NC gantry moving boring & milling machine[C] // International Conference on Electronic and Mechanical Engineering and Information Technology (EMEIT), 2011. Piscataway: IEEE, 2011: 1586-1589.
- [4] ZATARAIN M, LEJARDI E, EGANA F. Modular synthesis of machine tools[J]. Annals of the CIRP, 1998, 47(1): 333-336.
- [5] 赵岭,陈五一,马建峰. 基于王莲叶脉分布的机床横梁筋板结构仿生优化[J]. 高技术通讯, 2008, 18(8): 806-809.
ZHAO L, CHEN W Y, MA J F. Structural bionic optimization of stiffening ribs of a machine tool cross beam based on giant waterlily vein distribution[J]. Chinese High Technology Letters, 2008, 18(8): 806-809. (in Chinese)
- [6] 郭铁能,崔亚辉,蔡力钢,等. 装卡方式对超跨距横梁 Z 向导轨面起拱曲线加工的影响[J]. 北京工业大学学报, 2013, 39(6): 811-816.
GUO T N, CUI Y H, CAI L G, et al. The influence of the chucking mode on the manufacture of the Z-guide face camber curve of super-span beam[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2013, 39(6): 811-816. (in Chinese)

- [7] 程强,董雪娇,刘志峰,等. 大跨度重载横梁导轨接触的变形分析[J]. 北京工业大学学报, 2012, 38(1): 12-16.
CHENG Q, DONG X J, LIU Z F, et al. Deformation analysis of slideway contact of a long span and heavy load crossbeam [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2012, 38(1): 12-16. (in Chinese)
- [8] 陈艾荣,常成. 渐进结构优化法在桥梁找型中的应用[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2012, 40(1): 8-13.
CHEN A R, CHANG C. Evolutionary structural optimization in form finding of bridges [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2012, 40(1): 8-13. (in Chinese)
- [9] BENDSØE M P, SIGMUND O. Material interpolation schemes in topology optimization[J]. Archive of Applied Mechanics, 1999, 69(9/10): 635-654.
- [10] SIGMUND O. A 99 line topology optimization code written in Matlab [J]. Structural Multidisciplinary Optimization, 2001, 21(2): 120-127.
- [11] MATTHECK C, BURKHARDT S. A new method of structural shape optimization based on biological growth [J]. International Journal of Fatigue, 1990, 12(3): 185.
- [12] HUANG X, ZUO Z H, XIE Y M. Evolutionary topological optimization of vibrating continuum structures for natural frequencies [J]. Computers & Structures, 2010, 88(5/6): 357-364.
- [13] ZUO Z H, XIE Y M, HUANG X. Combining genetic algorithms with BESO for topology optimization [J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2009, 38(5): 511.
- [14] COELLO C A C, PULIDO G T, LECHUGA M S. Handling multiple objectives with particle swarm optimization [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2004, 8(3): 256-279.
- [15] LUH G, LIN C. Structural topology optimization using ant colony optimization algorithm [J]. Applied Soft Computing, 2009, 9(4): 1343.
- [16] 李志杰,张金,朱剑,等. 基于变密度法的双向载荷横梁拓扑优化设计[J]. 机械设计与制造, 2017(8): 179-182.
LI Z J, ZHANG J, ZHU J, et al. The topological optimization design of beam bearing two-way loads with variable density method [J]. Machinery Design & Manufacture, 2017(8): 179-182. (in Chinese)
- [17] 隋允康,宇慧平. 响应面方法的改进及其对工程优化的应用[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 4-22.
- [18] 石磊,王学仁,孙文爽. 试验设计基础[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1997: 105-115.
- [19] FERREIRA S L C, BRUNS R E, FERREIRA H S, et al. Box-Behnken design: an alternative for the optimization of analytical methods[J]. Analytica Chimica Acta, 2007, 597(2): 179-186.
- [20] LI Y Q, CUI Z S, ZHANG D J, et al. Six sigma optimization in sheet metal forming based on dual response surface model [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 19(2): 97-101.
- [21] 于长亮,张辉,王仁彻,等. 机床整机刚度薄弱环节辨识与优化方法研究[J]. 机械工程学报, 2013, 49(21): 11-17.
YU C L, ZHANG H, WANG R C, et al. Study on method for weak link identification of dynamic stiffness of a machine tool and optimization design [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(21): 11-17. (in Chinese)
- [22] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.

(责任编辑 张 蕾)