

DOI:10.16356/j.1005-2615.2020.03.010

基于响应面的框架式复材成型模具轻量化设计

魏灵航, 安鲁陵, 鲍益东, 花蕾蕾

(南京航空航天大学机电学院, 南京, 210016)

摘要: 针对框架式复合材料成型模具的轻量化设计, 提出了一种基于响应面的优化方法。该方法将被优化的尺寸变量与优化目标分别作为输入与输出, 通过灵敏度分析与试验设计等方法建立并拟合为对应的响应面模型, 设定轻量化优化目标与约束条件后求解数学模型获得优化方案。通过将求解结果代入有限元模型计算比较验证该方案的准确性, 并以某具体模具为例阐述了该方法的原理与过程。

关键词: 成型模具; 轻量化设计; 响应面; 灵敏度; 遗传算法

中图分类号: TG501.3

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2020)03-0422-08

Lightweight Design of Frame Molding Die for Composite Materials Based on Response Surface

WEI Linghang, AN Luling, BAO Yidong, HUA Leilei

(College of Mechanical and Electronic Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics,
Nanjing, 210016, China)

Abstract: Aiming at the lightweight design of the frame-type composite material forming mold, an optimization method based on response is proposed. This method takes the optimized size variables and optimization goals as input and output respectively, and establishes and fits corresponding approximate mathematical models through methods such as sensitivity analysis and test table design. After setting lightweight optimization goals and constraints, the problem is solved by the mathematical model and is used to obtain the optimal solution. Solution results are substituted into the finite element model for calculation and comparison to verify the accuracy of the solution. A specific mold is used as an example to illustrate the use of the method.

Key words: molding die; lightweight design; response surface; sensitivity; genetic algorithm

复合材料构件在飞机结构上的使用比例越来越高, 因此对其质量的要求也在不断提高, 而复合材料构件的制造大多采用热压罐成型工艺, 即构件表面在模具型面上紧贴后送入热压罐高温高压成型, 因此模具在运输、加热固化等过程中的变形会直接影响构件的成型与复材产品的质量^[1]。目前行业中, 为了保证模具的刚度, 往往采用保守设计确定型板厚度、隔板厚度和通风孔边距等参数, 使

模具的质量较大, 耗费大量材料, 增加了制造成本。同时由于热容量的升高也会影响到复材的固化成型, 质量的增加也对模具制造、运输和使用过程中的相关设备提出了更高吨位的要求^[2], 因此有必要对模具进行轻量化设计。张铖等^[3]对框架式复材成型模具的底部支撑框格进行了拓扑优化, 在保证一定约束条件下实现了轻量化目标, 但其优化结果为不规则形状, 给设计和加工制造带来了很大

基金项目: 航空科学基金(20161852018)资助项目。

收稿日期: 2019-06-29; **修订日期:** 2020-01-09

通信作者: 安鲁陵, 男, 教授, 博士生导师, E-mail: anllme@nuaa.edu.cn。

引用格式: 魏灵航, 安鲁陵, 鲍益东, 等. 基于响应面的框架式复材成型模具轻量化设计[J]. 南京航空航天大学学报, 2020, 52(3): 422-429. WEI Linghang, AN Luling, BAO Yidong, et al. Lightweight design of frame molding die for composite materials based on response surface[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2020, 52(3): 422-429.

的问题。王雯等^[4]利用 Abaqus 的尺寸优化模块,以隔板的厚度为优化变量对模具进行了轻量化设计,使模具质量降低了 12%,但模具的变形也同步增大。

本文提出一种基于响应面的轻量化设计方法,能实现同时对多个设计变量在多种工况变形约束下的尺寸优化。其基本原理为将经过灵敏度筛选的模具待优化设计参数通过数学近似模型拟合出与轻量化目标间的函数关系,根据优化需求设置约束条件与优化目标后,以数学模型代替有限元模型并采用相应算法求解,以获得优化方案,该方法的主要流程如图 1 所示。

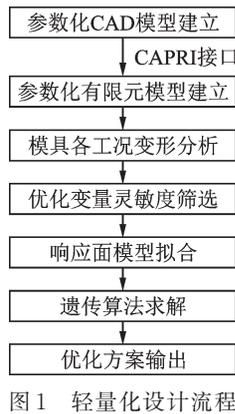


图 1 轻量化设计流程

Fig.1 Lightweight design process

1 模具参数化模型建立

由于本文的轻量化研究对象为框架式复合材料成型模具,模具三维模型的建立为该方法的基础,同时为提高后续大量不同尺寸模具的有限元计算效率,使模型随着参数更新自动循环计算是本轻量化方法得以实现的必要前提,因此首先需要建立参数化的 CAD 与 CAE 模型。

本文采用 CATIA 软件与 ANSYS 相关联的方法进行模具参数化模型建立,即首先在 CATIA 中绘制模具的三维模型,将后续需要优化的设计变量作为参数参与几何模型的建立并挂于模型特征树。在 CATIA 中建立参数化模型后,利用 CAPRI CAE Gateway 接口关联 CATIA 与 Ansys,通过在 Ansys 中识别 CATIA 模型中的指定参数并根据参数的变化实时更新有限元模型的方法,省去了重复建模的步骤,具体流程如图 2 所示。

为具体阐述模具的参数化建立方法,以图 3 所示框架式模具为例进行实例计算。该模具主要由型板、隔板、底板、叉车槽和吊耳等零部件组成,各零部件之间采用焊接连接,各项设计参数初始值与可优化范围见表 1。

通过 CAPRI 接口将 CATIA 三维模型导入 Workbench 后进行有限元模型建立,单元类型为

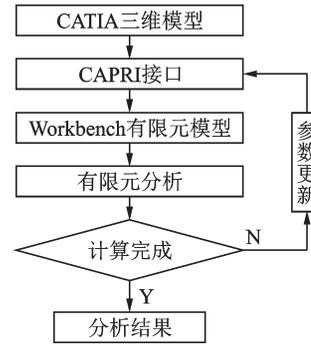


图 2 CAD/CAE 模型更新流程图

Fig.2 CAD/CAE model update flow chart

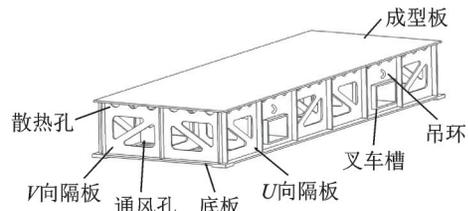


图 3 成型模具结构

Fig.3 Structure of molding die

表 1 模具的结构设计参数

Table 1 Structural design parameters of the mold

设计变量	初始值/ mm	取值范围/ mm	物理意义
D_1	10	5~15	型板厚度
D_2	10	5~15	U 向板厚度
D_3	10	5~15	V 向板厚度
D_4	10	5~15	底板厚度
H	325	300~350	型架高度
X_1	60	40~80	通风孔边距
d	60	40~90	散热孔直径
X_2	40	20~60	桁条宽度
X_3	60	50~80	底板外宽
X_4	40	20~50	底板内宽
X_5	70.5	40~80	散热孔边距
X_6	50	10~100	U 向散热孔间距
X_7	50	10~100	V 向散热孔间距

SOLID186 实体单元,而由于焊接处焊后材料的变形和应力对模具刚度的影响相较于优化参数较小^[5],且焊接工艺不参与本文的优化,因此本文在对焊缝部分作实体刚性连接处理。

2 模具典型工况分析

模具的变形会直接影响型面上复合材料构件的变形,为保证成型质量,模具在使用过程中各工况下的变形量作为后续优化的约束条件需要事先计算。通常复材成型模具的典型工况有转运(包括叉车转运、吊装转运)、预浸料铺贴、热压罐加热成

型等,因此以图3模具为例,阐述对以上4种工况下的模具变形进行分析的一般性方法和过程。

2.1 载荷与边界条件定义

该模具制造材料为殷钢,密度为 $8\,120\text{ kg/m}^3$,弹性模量为 141 GPa ,泊松比为 0.3 ,屈服强度为 280 MPa ^[6]。模具转运时,考虑型面上有复材构件、辅助工装等总质量约 120 kg ,匀速转运下产生型面 $1\,200\text{ N}$ 法向压力,同时由于模具的转运过程中存在加速起吊、振荡冲击载荷等,此时可等效为整体最大受3倍重力场作用^[4],型面上的 120 kg 工装可产生 $3\,600\text{ N}$ 的法向压力。模具在热压罐中加热时,热空气从热压罐一端吹入,使模具升温,由于自身温度的变化,模具会产生一定的热变形,因此模具载荷与边界条件定义如下:

(1) 叉车转运

①匀速叉车转运:叉车槽上表面固定约束,型面上施加 $1\,200\text{ N}$ 的均布合力,整体施加单倍重力场;

②加速叉车转运:叉车槽上表面固定约束,型面上施加 $3\,600\text{ N}$ 的均布合力,整体施加3倍重力场。

(2) 吊装转运

①匀速起吊:4个吊耳固定约束,型面上施加 $1\,200\text{ N}$ 的均布合力,整体施加单倍重力场。

②加速起吊:4个吊耳固定约束,型面上施加 $3\,600\text{ N}$ 的均布合力,整体施加3倍重力场。

(3)铺贴工况:4个底脚垫块固定约束,整体施加单倍重力场,型面上施加法向压强 0.02 MPa ^[7]。

(4)加热工况:此工况下的分析涉及温度场的计算与模具变形的模拟,本文主要研究热变形,关于其前置步骤,即温度场的计算采用文献[8]的方法,即利用ICEM软件划分网格后,通过设置罐内气流相关参数后模拟计算模具温度场,再将温度场计算结果作为载荷导入Ansys静力运算模块计算热变形。同时为降低计算量,对热压罐的加热工艺曲线作适当简化(图4^[1]),罐内风速为 2.5 m/s ,压力为 0.2 MPa 。模拟计算热变形时,边界条件可以看作模具一个底角固定,其他3个底角约束Z方向的位移为零^[1],载荷为温度载荷、自身重力以及型面上 $1\,200\text{ N}$ 的均布合力。

2.2 结果分析

将上述各工况的载荷与边界条件加载到有限元模型中进行分析,其中模具的温度场分布与热变形分布为最大温差与最大变形时刻,即罐内温度刚达到工艺曲线最高温度时^[1],结果如图5所示。

根据该模具的优化约束条件与优化目标计算

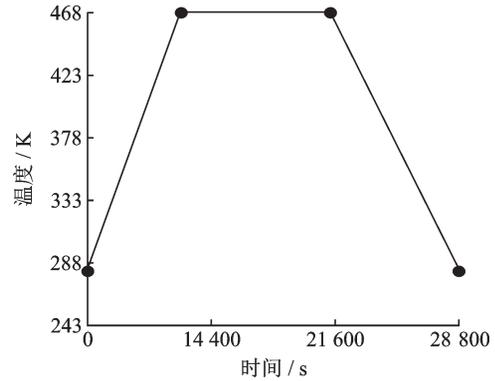


图4 加热工艺曲线

Fig.4 Heating process curve

相应数据,即不同典型工况的仿真分析结果中最大等效应力与最大位移,如表2所示。通过对表2数据进行分析可知,叉车转运与吊装转运时,最大应力及最大位移与重力加速度成正比,因此为便于分析,本文对同一工况只取其最大载荷,即对于叉车转运与吊装转运只研究其加速转运(包括振荡、冲击载荷等)时的情形,即3倍重力场、 $3\,600\text{ N}$ 型面均布合力。同时该模具在各工况下的最大等效应力均远小于材料的屈服强度,因此在后续的优化中暂不将最大等效应力纳入优化范围,待优化结束后验证优化方案的最大应力是否符合许用应力即可。

表2 不同工况对比

Table 2 Comparison of different working conditions

工况	最大位移/mm	最大等效应力/MPa
匀速转运	0.006 8	1.477
加速转运	0.020 9	4.507
匀速起吊	0.010 4	16.490
加速起吊	0.031 8	50.361
铺贴工况	0.226 1	53.156
加热工况	0.143 9	37.186

3 基于灵敏度分析的优化变量筛选

复材成型模具建模时涉及到的尺寸参数较多,如果对所有尺寸参数都进行优化,一方面计算量庞大,工作量太大,另一方面将影响不敏感的参数纳入数据拟合也会大大降低响应面近似模型的精度,从而无法得到正确的最优解^[9]。因此为提高优化效率,有必要对所有参数进行灵敏度分析,筛选出其中对目标函数影响较大的参数进行优化。本方法通过拉丁超立方抽样建立试验设计表后根据Spearman秩相关系数进行灵敏度筛选。

3.1 不同参数下质量、变形变化趋势比较

以该模具型板厚度与隔板厚度为例,分别逐步增大两种厚度,分析由此造成的模具质量与各工况变形的变化情况,如图6所示。

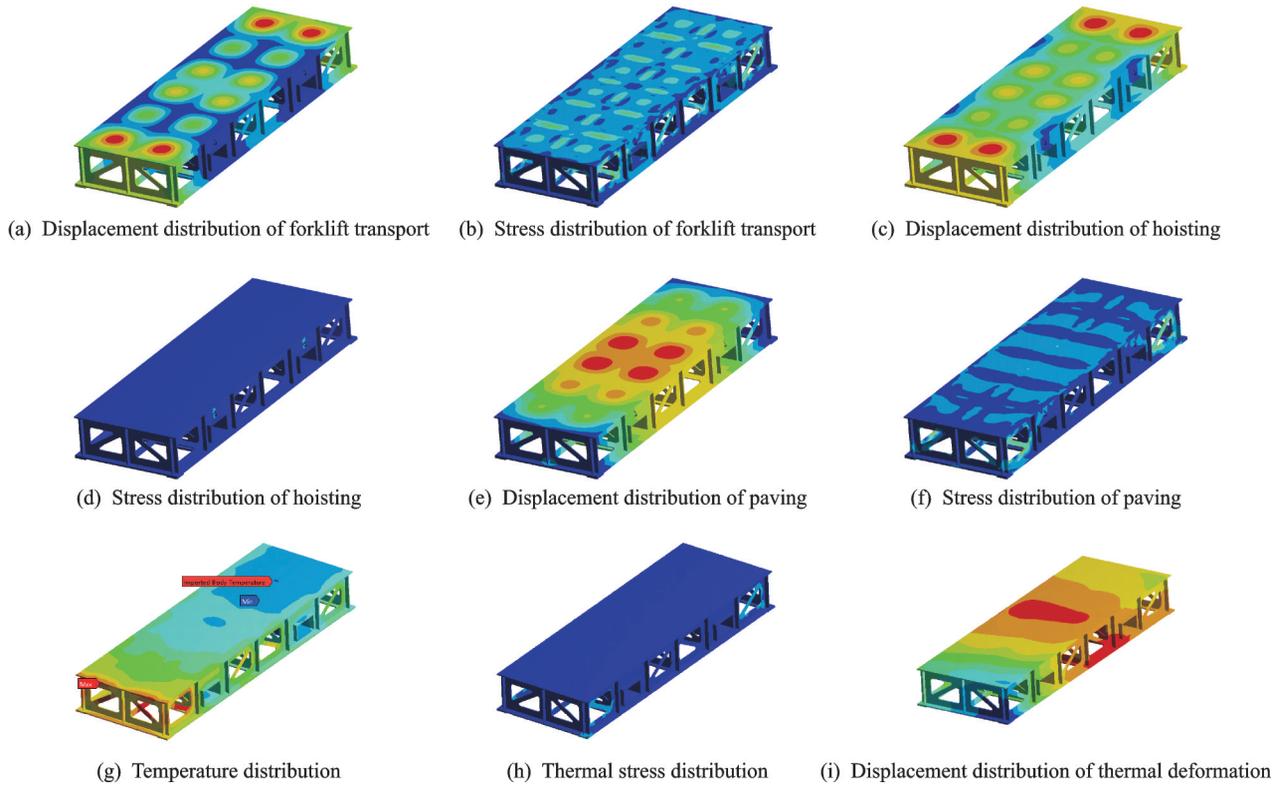


图 5 各工况计算结果

Fig.5 Calculation results of each working condition

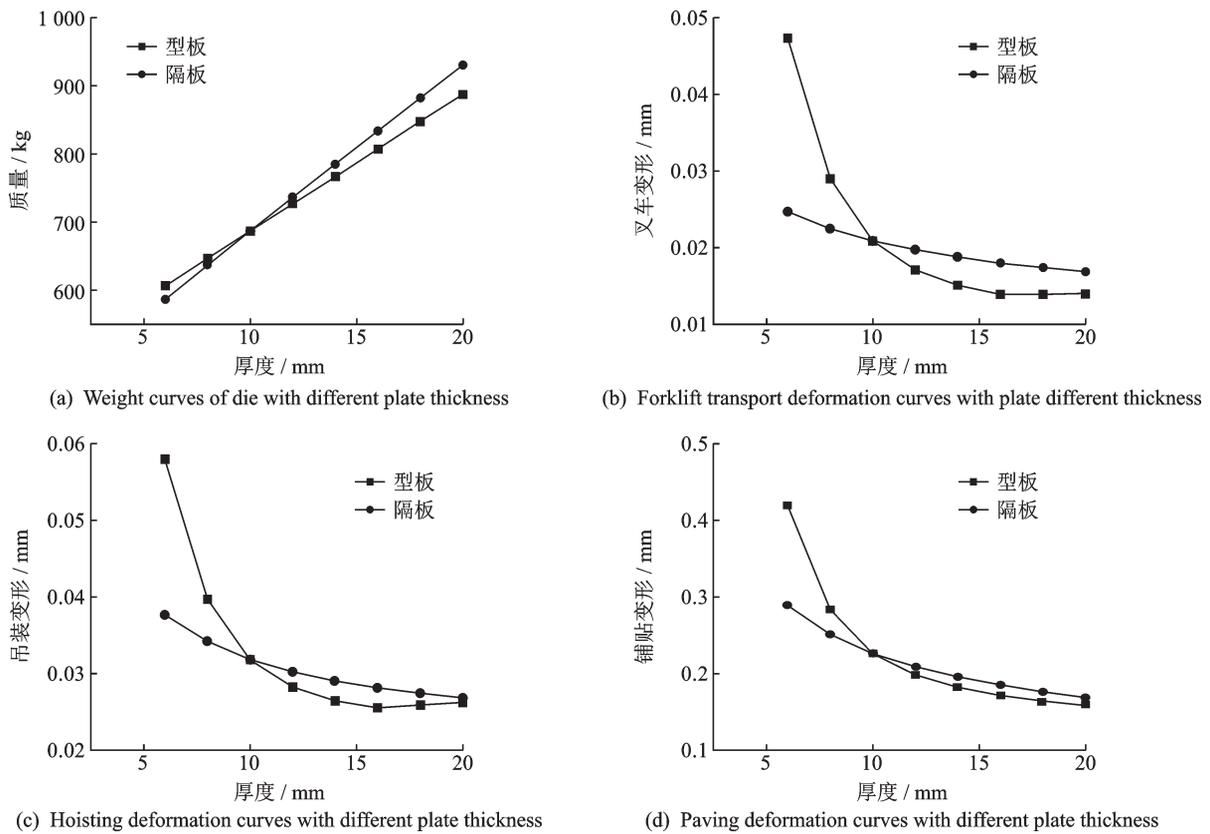


图 6 不同板厚的模具质量变化与各工况变形变化曲线

Fig.6 Curves of weight and deformation with different plate thickness under various working conditions

从图 6 可以看出,模具隔板厚度与型板厚度的变化对模具各工况变形影响程度不一,在某些工况

下,改变模具某些零部件的尺寸会同步改变模具的质量,同时提高模具刚度,减小模具变形,但当模具

质量超出某一阈值时,由于其自重过大,反而会增大变形。而不同参数的改变对变形量的影响大小与趋势均不相同,因此可表明灵敏度筛选在本文轻量化设计方法中的必要性。

3.2 Spearman 秩相关系数的灵敏度筛选

Workbench 中的 Design Exploration 包含参数相关性分析模块 Parameters Correlation, 可以进行基于拉丁超立方抽样(Latin hypercube sampling, LHS)与 Spearman 秩相关系数的灵敏度筛选。拉丁超立方抽样是一种从多元参数分布中近似随机抽样的方法,它所需要的样本量较少,且能避免重复抽样,对于涉及参数较多的情形有较高的抽样效率^[10]。Spearman 秩相关系数分析灵敏度,是将自变量参数 X 取 n 个样本点 X_1, X_2, \dots, X_n , 进行试验

后得到响应值 Y_1, Y_2, \dots, Y_n , 令样本值 X_i 在样本中的秩为 R_i , 样本值 Y_i 在样本中的秩为 Q_i , 则该数据组的 Spearman 相关系数为

$$r_s = \frac{\sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})(Q_i - \bar{Q})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2}} \quad (1)$$

式中 \bar{R}, \bar{Q} 为样本组 X, Y 的平均值^[11]。

对表 1 中各结构设计参数进行拉丁超立方抽样后进行有限元分析,将计算结果代入式(1)进行计算后得到各设计参数对各响应的灵敏度值,如图 7 所示。该柱状图横坐标依次是模具质量、叉车变形、吊装变形和铺贴变形,纵坐标为灵敏度系数 ($-1 \sim 1$)。

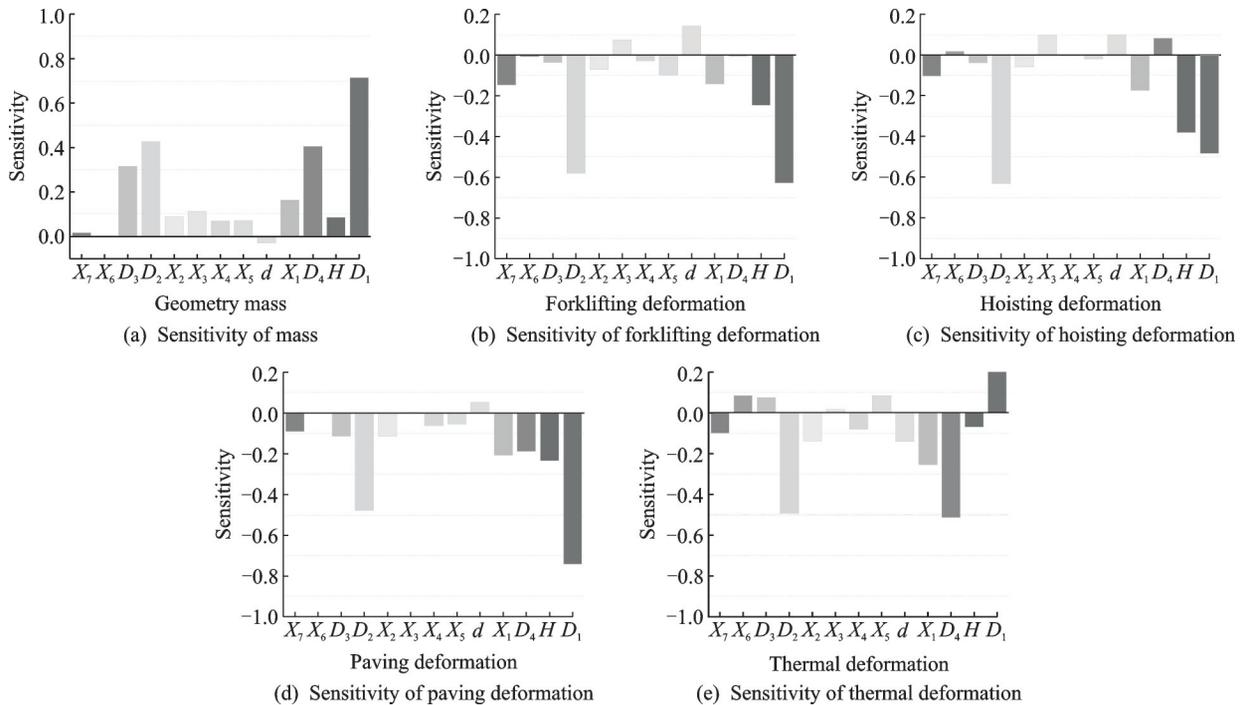


图7 各参数灵敏度示意图

Fig.7 Sensitivity diagram of parameters

结合图 6 各参数的变化对模具质量和各工况下最大变形的灵敏度分析可知, D_1, D_4, X_1, D_2, D_3 对质量影响较大, D_1, H, X_1, d, D_2, X_7 对叉车变形影响较大, D_1, H, X_1, D_2 对吊装变形影响较大, D_1, H, D_4, X_1, D_2 对铺贴变形影响较大, D_1, D_2, D_4, X_1 对热变形影响较大, 因此针对该模具可以筛选出 $D_1, D_2, D_3, D_4, X_1, X_2, H$ 这 7 个参数作为优化设计变量。

通过针对该模具的灵敏度筛选可知, 框架式复合材料成型模具的各尺寸参数对模具各工况变形与质量的影响大小不一, 利用该灵敏度分析方法筛选出影响较显著的设计参数进行针对性的优化, 同时不同模具的显著性参数不同, 可使用该方法分析

其他结构形式相近而尺寸不同的框架式模具。

4 响应面模型建立

响应面模型是本文轻量化方法的核心内容, 其通过试验设计法安排试验计划表, 将统计学的理论引入到优化设计当中, 通过构建拟合代理模型, 模拟各个设计变量和性能指标之间的关系, 并通过一个显示的表达式近似表达。在优化的过程当中, 所有优化的适应度值均通过所得到的响应面模型进行计算, 取代了原先直接优化当中的有限元模拟, 在保证一定精度的前提下, 节省了计算时间和计算成本^[12], 本文采用的响应面优化策略流程图如图 8 所示, 并根据研究对象模具的各工况变形量分析与

灵敏度筛选结果进行了实例拟合计算,主要分为试验设计与计算、响应面拟合以及精度校验 3 个步骤。

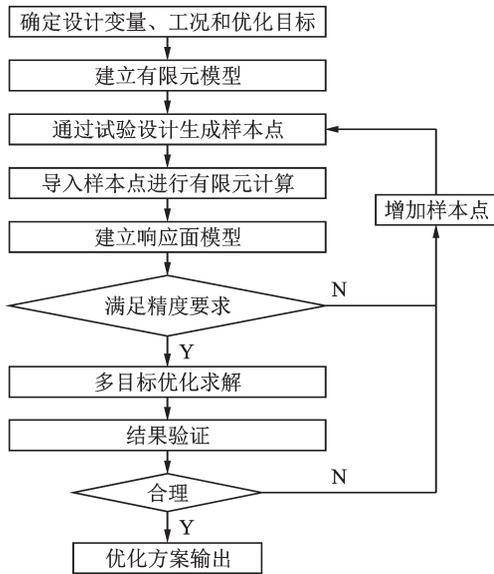


图 8 响应面优化流程图

Fig.8 Flow chart of response surface optimization

4.1 试验设计

试验设计是根据预定目标制定合适的试验计划,以促进试验结果有效统计分析的实现方法。

根据表 1 的数据可确定 D_1 、 D_2 、 D_3 、 D_4 、 X_1 、 X_2 、 H 等 7 个优化变量的取值范围,本文采用中心复合试验设计法(Central composite experiment design, CCD)进行试验规划,生成模具质量、叉车变形、吊装变形以及铺贴变形的样本矩阵,总共进行 79 次试验,计算完成后部分数据结果如表 3 所示。

表 3 中心复合试验设计矩阵

Table 3 Center composite test design matrix

编号	设计变量			响应结果		
	D_1	...	H	质量	...	热变形
1	10	...	325	663.22	...	0.143 9
2	5	...	325	562.85	...	0.152 1
⋮	⋮	...	⋮	⋮	...	⋮
40	7.354 6	...	338.23	556.35	...	0.116 8
⋮	⋮	...	⋮	⋮	...	⋮
78	7.354 6	...	338.23	716.81	...	0.114 3
79	12.645	...	338.23	839.15	...	0.120 4

4.2 响应面模型拟合与精度校验

根据图 6 中设计变量变化导致各响应变化的趋势特点,本文采用二阶响应面构建近似模型

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

式中: y 为优化目标; a_0 、 a_i 、 a_{ii} 、 a_{ij} 为待定系数; x_j 、 x_i 为优化变量; ϵ 为精度误差^[13]。

将表 3 中的试验结果输入 Wrokbench 中的 Response surface 模块后进行响应面模型的建立,并计算该模型下的回归方程确定系数 R^2

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (3)$$

式中: Y_i 为第 i 个观察到的响应值, \hat{Y}_i 为第 i 个拟合响应值, \bar{Y} 为平均响应值^[14]。由此计算可得模具质量、叉车变形、吊装变形、铺贴变形、热变形的确定系数分别为 0.949 8、0.943 1、0.942 8、0.954 7、0.930 2,表明超过 93% 的试验数据可用对应的拟合模型解释,说明该模型的拟合精度较高,具有一定的推广使用价值^[15]。

5 优化求解与结果分析

响应面模型建立后,可根据相应的约束条件与优化目标进行遗传算法寻优,并将寻优结果与有限元计算相比较来验证该方法的有效性。

5.1 优化求解数学模型

根据表 2 中的模具质量与各工况下变形量数据,以 F_1 、 F_2 、 F_3 、 F_4 为约束条件,模具质量 M 为约束目标,可建立式(4)所示的确定性优化模型。

$$\begin{cases} \text{优化变量: } X = (D_1, D_2, D_3, D_4, X_1, X_2, H) \\ \text{约束条件: } \begin{cases} F_1(X) \leq 0.020 9 \\ F_2(X) \leq 0.031 8 \\ F_3(X) \leq 0.226 1 \\ F_4(X) \leq 0.143 9 \end{cases} \\ \text{优化目标: Minimize}(M) \end{cases} \quad (4)$$

5.2 遗传算法求解与结果验证

本次优化的数学模型建立后,可利用 Workbench 中的 MOGA 遗传算法进行求解。将遗传算法的种群规模设置为 70,交叉概率设置为 0.8,变异概率为 0.02,通过 21 次迭代计算可得 Pareto 最优解集。从 Pareto 最优解集中选取最接近优化目标的点作为优化结果,同时为研究 Pareto 最优解的可行性,分别对模具质量与各工况下最大变形进行近似模型与有限元计算比较,所得各项数据如表 4 所示。

从表 4 数据分析可知,经过优化后,在各工况最大变形与原模型一致甚至略微减小的情况下,模具质量降低了 8.86%。同时对于以多目标遗传(Multi-objective genetic algorithm, MOGA)算法解得的 Pareto 最优解,经过验证表明该点的近似模型计算结果与实际有限元分析结果基本相同,质量与各变形量误差均在 3% 以内,证明了优化结果的可靠性,同时该点下的各工况最大等效应力均远小于材料的屈服极限,证明模型的强度也满足设计要求。

表4 优化结果验证与对比

Table 4 Verification and comparison of optimization results

变量	Pareto解		原模具
	计算	验证	
D_1	12.566		10
D_2	8.280		10
D_3	5.594		10
D_4	7.505		10
H	318.394		325
X_1	45.960		60
X_2	37.857		40
叉车应力/MPa	6.5		4.507
吊装应力/MPa	55.1		50.361
铺贴应力/MPa	63.5		53.156
热应力/MPa	39.826		37.186
叉车变形/mm	0.018 8	0.019 1	0.020 9
吊装变形/mm	0.030 1	0.031 2	0.031 8
铺贴变形/mm	0.226 1	0.221 7	0.226 1
热变形/mm	0.141 1	0.144 5	0.143 9
模具质量/kg	603.1	602.9	661.5

同时由于响应面的拟合结果本质为显式表达式,尽管不同模具的拟合表达式不同,但遗传算法针对该类问题的求解方法通用,因此本方法亦适用于其他不同尺寸的框架式模具。

6 结 论

本文针对框架式复合材料成型模具提出了一种结合参数化CAD/CAE模型建立、灵敏度分析、响应面拟合与遗传算法寻优的轻量化设计方法,并以某模具为例阐述了相应的方法流程。通过CA-PRI接口关联CATIA与Workbench中的参数化模具模型,分析了模具在叉车转运、吊装、铺贴和加热等工况下的变形情况,并采用拉丁超立方抽样与Spearman秩相关系数分析了各参数对不同工况下变形的灵敏度,筛选出对模具质量与变形影响较为显著的设计参数,最后通过中心复合试验与二阶响应面构建近似模型,利用MOGA遗传算法得到在原模型变形量约束条件下的优化方案。经过实例计算与比较后,本方法使研究对象模具实例在原变形量约束不变的条件下,使模具质量降低了8.86%,且优化方案的实际有限元计算结果与近似模型计算结果误差较小,证明本文提出的方法正确有效,同时由于该方法的本质是数学模型的拟合与计算,可根据输入数据的变化调整拟合模型,因此对于其他不同尺寸框架式模具的轻量化优化也具备相同的可行性。

本研究表明框架式复材成型模具关于质量与

各工况变形量的响应面拟合精度较高,使用数学近似模型代替几何模型进行轻量化设计能在保证一定精度的要求下大大减少计算时间,提高优化效率。

参考文献:

- [1] 岳广全,张博明,杜善义,等.热压罐成型工艺所用框架式模具的变形分析[J].复合材料学报,2009,26(5): 148-152.
YUE Guangquan, ZHANG Boming, DU Shanyi, et al. Geometrical deformations of the framed-mould in autoclave processing for composite structures[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2009, 26(5): 148-152.
- [2] 白光辉,晏冬秀,张冬梅,等.大型复杂框架式模具温度场模拟[J].复合材料学报,2013,30(S1): 169-174.
BAI Guanghui, YAN Dongxiu, ZHANG Dongmei, et al. A study on the temperature field distribute property of large frame type molds[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2013, 30(S1): 169-174.
- [3] 张铖,梁宪珠,胡江波,等.拓扑优化在框架式模具结构选型中的应用[J].航空制造技术,2012,405(9): 62-63.
ZHANG Cheng, LIANG Xianzhu, HU Jiangbo, et al. Application of topology optimization in structure selection of frame mould[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012, 405(9): 62-63.
- [4] 王雯,鲍益东,樊胜宝,等.框架式复材成型模具轻量化设计方法[J].航空制造技术,2018,61(Z2): 82-86.
WANG Wen, BAO Yidong, FAN Shengbao, et al. Lightweight design method of frame molding die for composite materials[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(Z2): 82-86.
- [5] 陈艳.大型液压挖掘机工作装置轻量化研究[D].太原:太原科技大学,2014.
CHEN Yan. Lightweight research on large hydraulic excavator working device[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Science and Technology, 2014.
- [6] MOSTAFA Y, STEPHEN C. Density and mechanical properties in selective laser melting of Invar 36 and stainless steel 316L[J]. Journal of Materials Processing Tech, 2018, 266: 1-81.
- [7] 施彬彬.基于知识的复合材料模具支撑结构设计[D].南京:南京航空航天大学,2017.
SHI Binbin. The knowledge-based design of structural support of composites component mould and die[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017.
- [8] 王永贵,梁宪珠,薛向晨.热压罐工艺的传热分析和框架式模具温度场分布[J].航空制造技术,2008,51(22): 80-83,87.
WANG Yonggui, LIANG Xianzhu, XUE Xiangchen.

- Heat transfer analysis of autoclave process and temperature distribution of frame mold[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2008, 51(22): 80-83, 87.
- [9] SEYED M M B, VIKTOR B. Global sensitivity analysis of bogie dynamics with respect to suspension components[J]. *Multibody System Dynamics*, 2016, 37(2): 145-174.
- [10] CAVAZZUTI M. Optimization methods from theory to design: Scientific and technological aspects in mechanics[M]. Berlin: Springer, 2013.
- [11] 刘跃昆, 朱强. 基于灵敏度分析的门式起重机结构优化设计[J]. *现代制造工程*, 2018, 22(7): 129-133.
LIU Yuekun, ZHU Qiang. Structural optimization design of gantry crane based on sensitivity analysis[J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2018, 22(7): 129-133.
- [12] EROL K, MESUT H, AHMET Y. Optimization of drilling parameters on surface roughness in drilling of AISI 1045 using response surface methodology and genetic algorithm[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2011, 52(1/2/3/4): 79-88.
- [13] 董恩国, 张蕾, 关志伟, 等. 基于二阶响应面法的车辆转向机构稳健设计[J]. *机械设计与制造工程*, 2011, 40(21): 36-38, 42.
DONG Enguo, ZHANG Lei, GUAN Zhiwei, et al. The robust design of vehicle steering mechanism based on second-order response surface method[J]. *Machine Design Manufacturing Engineering*, 2011, 40(21): 36-38, 42.
- [14] 叶祥. 考虑应力疲劳的柔顺机构多质量特性稳健优化设计研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2018.
YE Xiang. Research on robust optimization design of multi-quality characteristics of compliant mechanism considering stress fatigue[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Technology, 2018.
- [15] CHAN I P. Multi-objective optimization of the tooth surface in helical gears using design of experiment and the response surface method[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2010, 24(3): 823-829.

(编辑:陈珺)