

DOI:10.19344/j. cnki. issn1671-5276.2024.02.008

板材立体料库托盘的结构设计与优化

封雨青¹,汪振华¹,濮雍²,许超帆¹

(1. 南京理工大学 机械工程学院,江苏 南京 210094; 2. 扬州安特自动化科技有限公司,江苏 扬州 211407)

摘要:为了降低板材料库的生产和加工成本,对料库托盘进行结构简化和轻量化改进。从型材选型入手,对结构方管的承重性能进行参数敏感度分析,汇总不同方管的质量与性能。通过拓扑优化计算,得到托盘承载的材料最佳分配方案,设计最优的托盘结构,并对该结构进行参数优化,运用稀疏网格模型拟合试验参数建立响应面模型,通过 MOGA 算法进行优化求解,得到结构参数的最优解。通过搭配不同方管和最优解方案,实现了不同目标的优化效果。

关键词:立体仓库;托盘;有限元分析;敏感度分析;拓扑优化;响应面优化

中图分类号:TH122 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2024)02-0040-06

Structure Design and Optimization of Pallet in Plate Stereoscopic Warehouse

FENG Yuqing¹, WANG Zhenhua¹, PU Yong², XU Chaofan¹

(1. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China;

2. Yangzhou Antil Automation Technology Co., Ltd., Yangzhou 211407, China)

Abstract: To reduce the production and processing costs of plate stereoscopic warehouse, it is necessary to simplify and lightweight the pallet structure. This paper analyzes the parameter sensitivity of the bearing performance of the structural square tube in terms of profile selection, and summarizes the quality and performance of the square tube. Through topology optimization calculation, the optimal material distribution solution of the pallet is obtained, the optimal pallet structure is designed and its parameters are optimized. The response surface model is established by fitting parameters with sparse grid Initialization, and the model is optimized by MOGA to obtain the optimal solution of parameters. By matching different square tubes and optimal solutions, the different optimization effects are achieved.

Keywords: stereoscopic warehouse; pallet; finite element analysis; sensitivity analysis; topology optimization; response surface optimization

0 引言

板材立体料库由托盘、托盘货架、托盘码垛机组成,是钣金加工生产线自动化上下料模块的存料设备,它能够立体、整洁地存储板材,配合生产线运料小车,完成原料板材的自动化上料^[1]。图1是某六层板材立体料库的总装模型,料库托盘的质量占整台料库加工件质量的45%,且不同料库的托盘结构相似可以通用。对托盘进行轻量化改进,是最有效降低料库生产成本的方法。然而,非标自动化设备的零部件优化都是以降低成本为目标,托盘设计需选用标准型材,而满足设计条件的型材少;料库托盘的结构简单,无法使用复杂精密结构,优化改进困难。

相关学者对响应面优化和轻量化优化进行了研究。覃凌云、唐华平等^[2-3]针对关键结构件导

向架的轻量化需求,提出了拓扑优化与多目标优化方法相结合的优化策略,在设计初期使用变密度法拓扑优化,对部件进行高效减重,使用响应面多目标优化法进行参数优化,改善构件性能。胡建平等^[4]通过参数敏感度分析,从17个输入变量中筛选出8个对输出变量较敏感的参数,并将其作为设计变量进行基于响应面优化的轻量化设计。梁其传等^[5]提出了一种结合稀疏网格模型与MOGA算法的优化方法,提高了响应面模型的拟合优度以及优化迭代的效率和精度。

本文的轻量化改进从型材选型的参数相关性分析入手,汇总高性能的方管。参照拓扑优化结果,设计托盘方管结构,使用响应面多目标优化法进行参数优化。设计人员可按实际需求选择结构优化方案并选配方管,具体优化流程如图2所示。

基金项目:扬州市科技成果转化项目(YZ2021108)

第一作者简介:封雨青(1997—),男,江苏常州人,硕士研究生,研究方向为机械设计及理论,807168240@qq.com。

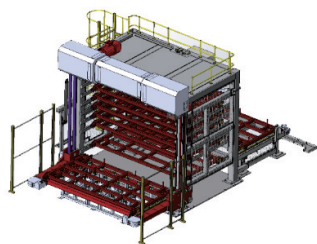


图1 六层板材立体料库

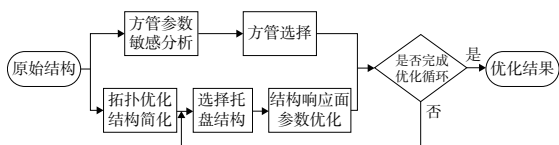


图2 优化流程

1 托盘结构静力分析

优化前托盘原始设计方案如图3所示,该托盘的设计最大载荷3 t,设计储存板材的尺寸为3 000 mm×1 500 mm,向下兼容至最小1 000 mm×1 000 mm的板材。采用80 mm×80 mm×6 mm 方管焊接而成,设计质量为319 kg。

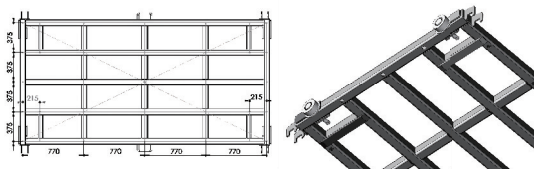


图3 料库托盘原始结构方案模型

此前,托盘使用的是80 mm×80 mm×5 mm 方管,但有客户反馈在实际使用过程中,单层托盘在满载的情况下有明显变形,影响观感与使用。为此设计人员在原始结构基础上,改换80 mm×80 mm×6 mm 方管,效果虽能达到没有明显变形的要求,但单托盘的质量也由原先258 kg 增加到319 kg,原料成本陡增,有待优化。

根据上述80 mm×80 mm×6 mm 原始设计方案,建立托盘的有限元模型,模型简化时,只保留方管结构,省去圆角、封板、拖拽卡爪与加工开孔。材料为Q235-A(弹性模量 $E=2.1 \times 10^5$ MPa,泊松比 $\nu=0.3$,密度 $\rho=7\,850$ kg/m³)。设置网格划分大小25 mm,在重力场下,在3 000 mm×1 500 mm×5 mm 重1 732 N的板材上施加28 268 N 向下力,模拟3 t 的多层薄板对托盘的影响,板材与托盘之间为摩擦接触,摩擦因数0.2,具体模型如图4所示。

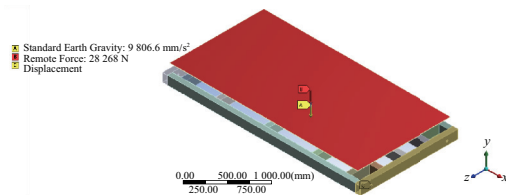
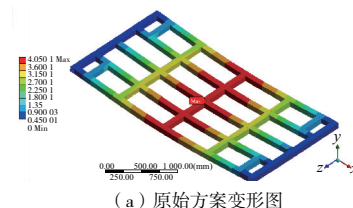
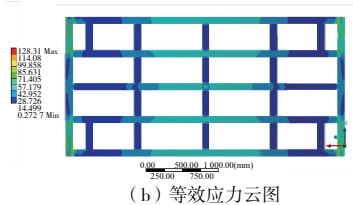


图4 托盘静力学分析模型示意图

计算得到托盘总变形、等效应力云图如图5所示。由图可知最大变形为托盘中心处,为4.050 mm,托盘质量为318.72 kg。横向方管有应力集中,纵向加强方管作用小,应适当减少纵向加强方管的数量。整个结构最大等效应力处在4个滚轮轴与托盘装配处。已针对此问题在轴承安装方管的两侧焊接加厚板,应力集中问题不在本结构设计考虑范围内。



(a) 原始方案变形图



(b) 等效应力云图

图5 原始方案变形和等效应力云图

2 基于参数敏感度分析的方管选型计算

2.1 方管承重静力分析

计算取1 000 mm 长度的80 mm×80 mm×6 mm 矩形管为样。方管材质为Q235-A,材料属性同上,每米质量13.214 kg。对方管两端进行无变形约束,设置重力场,位于中间段的750 mm 方管受向下10 kN 的远端力面载荷,计算结果。方管的总变形云图如图6所示。受力面处为最大变形处,约0.171 mm。方管的最大等效应力少于40 MPa,远小于屈服强度故不作安全性校验。

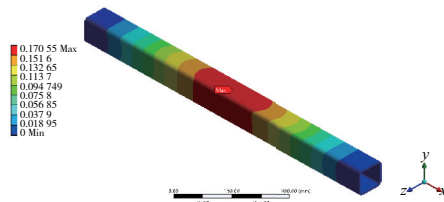


图6 80 mm×80 mm×6 mm 方管总变形云图

2.2 参数敏感度分析

出于成本考虑,托盘将继续采用 GB/T 6728—2002 标准的结构用冷弯空心型钢方管或矩形管。选取方管厚、宽、高(P_1 、 P_2 、 P_3)为设计变量,即输入参数。每 1 000 mm 质量 $M(P_4)$ 、最大变形 $D(P_0)$ 为输出参数,进行参数敏感性分析。查阅标准,确定其中输入参数的取值范围是: $3 \leq P_1 \leq 6$ mm, $50 \leq P_2 \leq 150$ mm, $50 \leq P_3 \leq 150$ mm。

Ansys Workbench 敏感度分析是一种基于 LHS 的抽样法。若进行 N 次抽样,则首先将 $[0,1]$ 等分成相等 N 个等区间,再从输入分布的每个区间中独立等概率抽样。该方法抽样效率高,既能避免重复抽样,也能保证偏远样本被准确代表。由于本次输入、输出参数不多,分析样本点数量 50 个即可保证精度。

经过计算,各个参数对计算结果的参数敏感性柱状图如图 7 所示,纵坐标为敏感度系数,数值区间为 $(-1 \sim 1)$ 。如图所示,方管宽高与方管总质量的敏感系数都为 0.54,但高是最影响最大变形的参数,宽对性能几乎无影响;方管厚度是影响方管质量的重大因素,是影响最大变形的次要因素。综上,选择标准方管时应当选择高度大、高宽比大的方管,厚度还需单独分析。

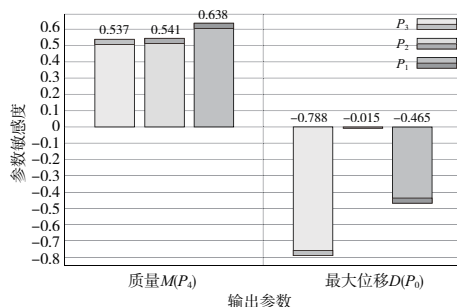


图7 方管参数敏感性柱状图

2.3 方管选型

由于料库层高限制,不能无限制地增加托盘高度,参考先前经验,设置托盘高度上限为 140 mm。查阅 GB/T 6728—2002 结构用标准矩形管型号,选取高度 80~140 mm 矩形管中高宽比最大的所有厚度矩形管为样本。按 2.1 节方法分析计算每 1 000 mm 方管的质量 M 和该方管的最大变形 D 。由于二者呈反比,故额外计算二者乘积 K 。 K 为评估系数。

$$K = M_{p,m} \times \varepsilon_{\max} \quad (1)$$

式中: $M_{p,m}$ 为每米质量; $\varepsilon_{\max}$ 为最大变形。

K 越小,即代表单位质量的材料性能运用越充分,数据汇总如表 1 所示。

表1 各型方管不同壁厚的性能汇总

型号 (高×宽)/mm	评估系数			
	壁厚 3 mm	壁厚 4 mm	壁厚 5 mm	壁厚 6 mm
80×40	5.187×0.458=2.376	6.710×0.365=2.449	8.129×0.313=2.544	—
90×40	5.658×0.349=1.975	7.338×0.277=2.033	8.914×0.235=2.095	—
100×50	6.690×0.248=1.659	8.584×0.193=1.657	10.484×0.161=1.688	—
120×60	8.013×0.162=1.298	10.478×0.122=1.278	12.839×0.100=1.284	15.097×0.085=1.283
140×80	—	12.990×0.087=1.130	15.979×0.068=1.087	18.865×0.057=1.075

3 基于拓扑优化的总体结构设计

3.1 托盘结构拓扑优化

本文拓扑优化采用了基于各向同性材料惩罚模型(SIMP)的变密度法,这是在给定约束下,为使某个目标量最大或最小化而寻求的实体材料最佳分配方案。

将托盘除四周方管以外区域实心化,材料、边界条件同第 1 节,用 30 kN 远端面载荷代替重力影响,定义体积响应和应变能响应,以保留体积的 10% 为优化目标,以最小柔顺度为目标函数进行形状拓扑优化。优化结果、导出数据测量关键节点位置,具体节点位置参数如图 8 所示。

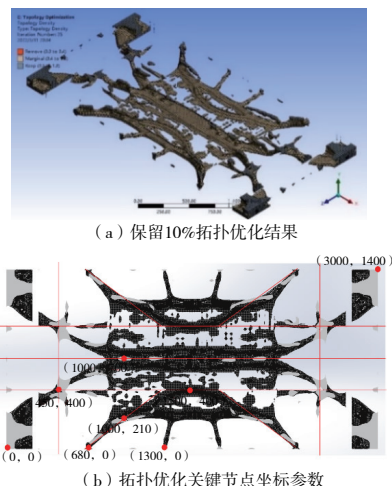


图8 节点位置参数图

3.2 构建托盘结构

根据图 8 拓扑优化关键结构点位置参数,串联不同的关键结节点,设计不同的结构方案。设计时,为了方便托盘出入库,靠近滚轮两侧大约 300 mm 处需安装耐磨垫片,因此安装垫片的支撑方管是必要的。结构设计统一采用性价比最高的 140 mm×80 mm×4 mm 方管。作为优化参照,使用该方管的原始方案结构的质量为 304.44 kg,最大变形为 2.539 mm。

1) “米”字结构

仿照拓扑优化结果,设计如图 9-I 的“米”字方管结构。计算可知该结构的质量为 312.97 kg,最大变形为 2.53 mm。对比原始方案,性能相近,但质量增加,未能减重,由等效应力云图 9-I' 知,竖向加强方管的作用很小,应减少类似竖向方管。减少后的结果如图 9-II 所示,该结构的质量为 304.45 kg,最大变形为 2.42 mm,质量减少,性能提升,减少竖向方管效果良好。

为进一步降低托盘质量,进行了减少一根横向方管的尝试。设计了 III—V 结构的计算,结果汇总如表 2 所示。减少横向方管使得整体性能明显降低,应优先缩减竖向、斜向方管的数量。

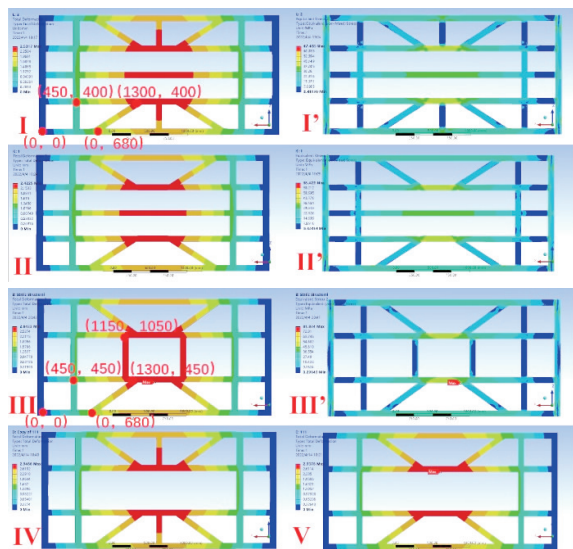


图 9 “米”字结构 I—V 总变形、等效应力云图

表 2 “米”字结构 I—V 质量、最大变形汇总

编号	质量/kg	最大变形/mm
I	312.97	2.532
II	304.45	2.423
III	282.60	2.843
IV	278.60	2.947
V	268.75	2.938

2) 5 根横向方管结构

经过对“米”字结构和原始结构的计算发现,使用横向方管性价比最高,斜向方管次之,竖向方管最低。提出了不使用斜向方管的 5 根横向方管结构方案,并对是否需要少量竖向加强方管进行了如下计算。

如图 10 所示, A—D 与 E—H 两组方案的横向方管间距不同,适当增加了竖向加强方管,并额外计算 B₂、E₂ 两组可行方案。各个结构的质量与最大变形如表 3 所示。通过对比结果可知,增加竖向加强方管能稍微增加整体结构强度,且连接变形差,较大的横向方管,能起到更好的加强效果;使用 4 根竖向加强方管的效果好于 2 根,但成本也会相应增加。

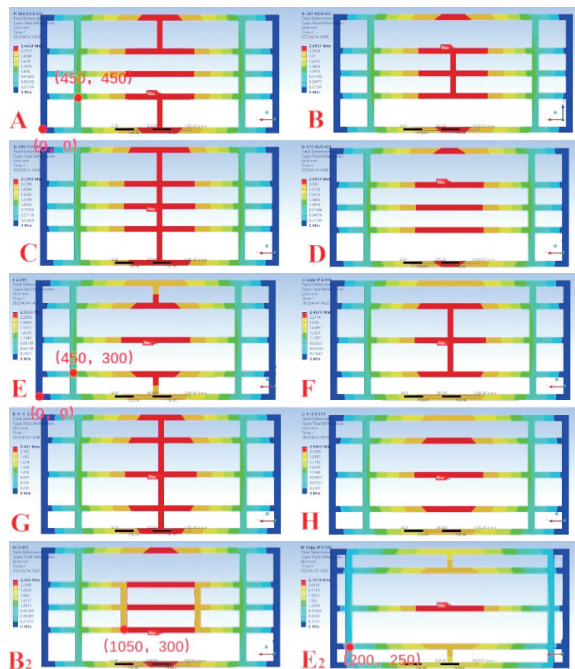


图 10 5 根横向方管结构 A—H 总变形云图

表 3 5 根横向方管结构 A—H 质量、总变形汇总

编号	质量/kg	最大变形/mm
A	282.87	2.443
B	278.88	2.456
C	288.73	2.391
D	273.02	2.472
E	278.88	2.553
F	282.87	2.488
G	288.73	2.421
H	273.02	2.566
B ₂	284.73	2.469
E ₂	277.54	2.792

同组对比 A—D 和 E—H 两组托盘 4 种结构,可知竖向方管起到的加强效果有限。横向对比两组结构的性能,发现合理安排横向方管间距能更有效地增强结构强度。考虑到优化设计以降低质量减少加工工序为主,决定采用没有额外竖向方管的设计方案,即 H 型。省略斜方管后,原先依照拓扑结果建立的横向方管位置已经不再合理,需要进行方管位置的参数优化。

4 基于响应面法的参数优化

4.1 优化设计模型建立

为方便加工制造,使托盘中心对称。选取外侧两根竖向方管距边框距离为设计变量 P_5 ,中间两根竖向方管距边框距离为设计变量 P_6 ,横向方管距离中间横梁距离为设计变量 P_7 ,以托盘在 3 t 的 3 000 mm×1 500 mm 板材下的总变形为目标输出变量 P_8 ,为兼顾小板材,以托盘在 0.8 t 的 1 000 mm×1 000 mm 板材靠角偏置下的总变形为输出变量 P_9 。各输入变量实际含义如图 11 所示。

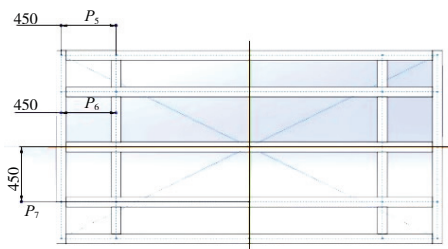


图 11 托盘结构参数化模型

为提升 1 000 mm×1 000 mm 板材的承重性能, P_6 最大值不应超过最小板材长度, P_5 处需安装耐磨垫片,距两侧距离不能超过 500 mm。为方便加工,各方管间距不超过 200 mm。综上考虑,建立结构的优化模型如下,优化初始值即为模型 H。

$$\begin{cases} \min \{P_8, P_9\} \\ \text{s.t.} \begin{cases} 200 \leq P_5 \leq 500 \\ 200 \leq P_6 \leq 1\,000 \\ 200 \leq P_7 \leq 550 \end{cases} \end{cases} \quad (2)$$

4.2 稀疏网格模型的建立与分析

首先进行实验设计,使用稀疏网格 (sparse grid initialization) 设计点采样法,根据各参数的取值范围,生成稀疏网格设计点并完成计算。算法会在输出参数相对误差较高的位置自动细化设计点矩阵,提高响应面精度直至预设值。稀疏网格构建设计点是基于分段多线性基函数的分层稀疏

网格插值算法,该算法在求解多维问题时通过一维多级基础的稀疏张量积构造设计点,能有效减少多维问题求解时设计点的采集数量,提高复杂问题的精度和求解效率^[6]。

综合考虑计算成本以及精度,设置如下稀疏网格曲面拟合参数:输出参数允许的最大相对误差为 10%,细化过程中可生成的最大细化点数为 200,在给定方向上创建的最大网格级别数为 4。图 12 为收敛曲线,在细化点数达到 80 时,继续细化收敛很慢,已基本达到收敛极限。

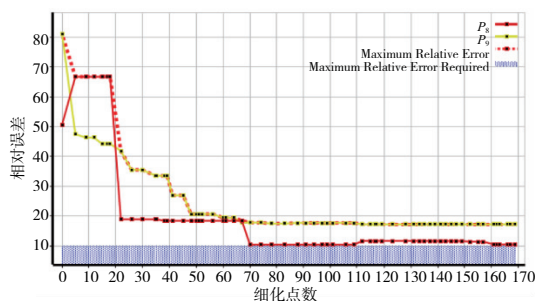


图 12 收敛曲线

图 13 为参数 P_5 、 P_6 、 P_7 与 P_8 、 P_9 之间拟合的响应面图,即输入、输出参数之间拟合的稀疏网格模型结果。通过对不同参数的组合,可得到不同的输入参数对输出参数的影响。

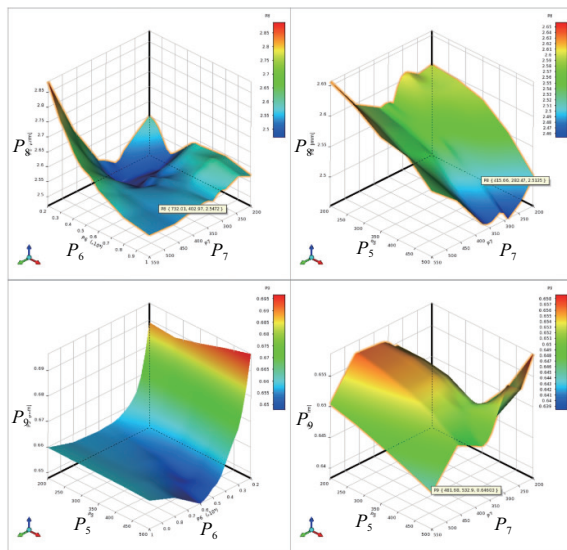


图 13 参数 P_5 、 P_6 、 P_7 与 P_8 、 P_9 之间拟合响应图

4.3 MOGA 参数优化分析

在拟合出响应曲面之后,使用 Optimization 模块进行参数优化。在第 3 章设计托盘结构时,小尺寸板材变形远不如满载状态,改善托盘满载下的结构变形是主要优化目标,故将满载状态下最

大总变形 P_8 目标重要级别设置为最高, P_9 设置为默认一般。

选择多目标遗传算法(MOGA)进行优化。MOGA 算法是基于 NSGA-II 的一个变种,它支持多种目标和约束,在较大的设计变量空间内迅速寻优,适合计算全局最大值或最小值。设置相关参数,初始样本数为 100,每次迭代的样本数为 100,最大允许 Pareto 百分比为 70%,收敛稳定性百分比为 2%,最大迭代次数为 20,突变概率为 0.01,交叉概率为 0.98。

根据计算得到了图 14 为输入参数对输出参数的参数灵敏度柱状图,影响托盘变形的最大因素为横向方管间距 P_7 ,两个优化目标参数灵敏度一正一负,体现了两个优化目标(承载不同尺寸板材时托盘的总变形最小)之间的矛盾。

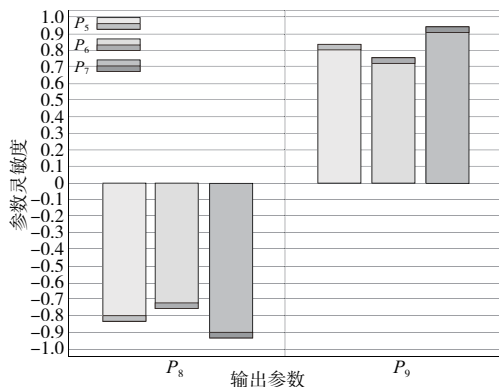


图 14 输入参数对输出参数的参数敏感图

4.4 优化结果分析

计算得到表 4 所示的优化备选方案,并计算了其整圆后的验证值。最优解与初始解的对比如表 5 所示。

表 4 优化备选方案与整圆后方案对比

设计参数	P_5/mm	P_6/mm	P_7/mm	P_8/mm	P_9/mm
初始值	450	450	450	2.544 9	0.653 5
最优解 1	494.23	549.73	367.37	2.456 5	0.649 3
最优解 2	483.93	438.69	352.98	2.459 9	0.653 5
最优解 3	496.44	366.41	289.03	2.452 1	0.656 3
整圆验证 1	500	550	370	2.451 7	0.649 4
整圆验证 2	480	440	350	2.444 2	0.655 3
整圆验证 3	500	370	290	2.486 9	0.660 0

对比优化前后结果可知,选用 $120\text{ mm}\times 60\text{ mm}\times 4\text{ mm}$ 方管可在不降低性能的情况下,达到该结构的最大减重,能减重 30%;若选用 $140\text{ mm}\times 80\text{ mm}\times 4\text{ mm}$ 方管,性能提升最大,能在性能增加

40%的情况下仍可减重 14%。

表 5 不同方管最优结构与原始结构对比

结构方案	使用方管/mm	质量/kg	P_8/mm	P_9/mm
原始方案	$80\times 80\times 6$	318.72	4.050 0	1.079 1
原始方案	$140\times 80\times 4$	304.44	2.539 0	0.706 0
最优解整圆 1	$140\times 80\times 4$	273.02	2.451 7	0.649 4
最优解整圆 1	$120\times 60\times 4$	223.85	3.974 4	1.034 6
最优解整圆 1	$120\times 60\times 5$	276.55	3.104 6	0.827 1

5 结语

1) 通过对标准方管强度的参数相关性分析得到性价比最高的 3 组方管: $140\text{ mm}\times 80\text{ mm}\times 4\text{ mm}$; $120\text{ mm}\times 60\text{ mm}\times 4\text{ mm}$; $120\text{ mm}\times 60\text{ mm}\times 5\text{ mm}$ 。

2) 参考拓扑优化结果,排列方管结构,计算对比“米”字结构与 5 根横向方管结构的质量与性能,发现横向方管承载效果最好,斜向方管次之,竖向最差。故选用了无额外竖向加强的 5 根横向方管结构方案。

3) 对 5 根横向方管结构方案进行参数化建模,使用响应面优化工具进行多目标优化设计,得出不同的优化备选方案,再配合使用推荐的方管可达到较好性能表现。其中,最优方案 1 配合选用 $120\text{ mm}\times 60\text{ mm}\times 4\text{ mm}$ 方管可在不降低性能的情况下,最多可减重 30%;也可选择性能最优的 $140\text{ mm}\times 80\text{ mm}\times 4\text{ mm}$ 方管,能在性能增加 40%的情况下减重 14%。

参考文献:

- [1] 卞正其,陈龙,朱志金. FMS 激光切割机柔性生产线[J]. 锻压装备与制造技术,2017,52(3):41-44.
- [2] 覃凌云,杨书仪,陈哲吾,等. 基于复合优化方法的导向架结构设计[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版),2022,37(1):43-50.
- [3] 唐华平,李红星,姜永正,等. 基于拓扑优化与多目标优化的给料机关键部件结构设计[J]. 机械强度,2020,42(4):842-848.
- [4] 胡建平,黄磊,王留柱,等. 基于参数敏感度分析的移栽机提升支架轻量化设计[J]. 机械设计与制造,2017(1):38-42.
- [5] 梁其传,易朋兴,邱悦. 基于稀疏网格模型与 MOGA 算法的起重机主梁结构优化[J]. 现代制造工程,2019(6):79-83.
- [6] 马石磊,李方义,李剑峰,等. 基于稀疏网格的近似模型及其在轻量化设计中的应用[J]. 机械工程学报,2013,49(7):43-50.

收稿日期:2022-10-11