

装备与成套技术

锻造专用机械臂的结构有限元分析及优化设计

刘高照, 管殿柱, 施 磊, 宋新城, 卢光城

(青岛大学 机电工程学院, 山东 青岛 266071)

摘要: 以一款 80 MN 的锻造液压机为研究对象, 针对其工作时毛坯件的冲孔工序, 设计了一种大型环锻件冲孔专用机械臂, 以替代人工操作。为了保证机械臂的设计满足强度和刚度要求, 对机械臂进行了静力学分析, 以验证设计方案的合理性。分析结果表明: 机械臂的强度满足材料要求, 但仍有较大的优化潜力, 因此, 利用响应面法对机械臂进行轻量化设计。根据静力学分析结果筛选出 4 个尺寸参数作为优化变量, 以最大变形及等效应力为约束条件、总重量最小为目标, 建立数学模型。通过优化筛选出候选点, 对其尺寸进行圆整后重新分析, 对比后显示质量减轻了 421 kg, 减重比例达 15.22%, 优化效果显著。

关键词: 锻压机; 机械臂; 冲孔; 轻量化; 最大变形; 等效应力

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.05.020

中图分类号: TH122; TP319

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2024) 05-0160-07

Finite element analysis and optimization design on special forging mechanical arm

Liu Gaozhao, Guan Dianzhu, Shi Lei, Song Xincheng, Lu Guangcheng

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Qingdao University, Qingdao 266071, China)

Abstract: For 80 MN forging hydraulic press, a specialized mechanical arm for punching large-scale ring forgings was designed to replace manual operation based on the punching process of blank during its operation. Then, in order to ensure that the design of mechanical arm meets the requirements of strength and stiffness, the static analysis on the mechanical arm was conducted to verify the rationality of design scheme. The analysis results show that the strength on the mechanical arm meets the material requirements, but there is still a large optimization space. Therefore, the lightweight design on the mechanical arm was conducted by the response surface method. According to the results of static analysis, taking four size parameters as the optimization variables, the maximum deformation and equivalent stress as the constraint conditions, and the minimum total weight as the goal, the mathematical model was established. By optimizing and screening candidate points, rounding their dimensions and reanalyzing them, after comparison, the weight is reduced by 421 kg, the weight reduction ratio is up to 15.22%, and the optimization effect is significant.

Key words: forging press; mechanical arm; punching; light weight; maximum deformation; equivalent stress

在“中国制造 2025”的时代背景下, 科技发展日新月异, 目前国内大多数锻造企业的生产线仍以人工作业为主, 存在生产效率低、产品质量不稳定及安全性差等问题^[1-2], 随着客户对产品质量要求的提高以及用人成本的逐年增加, 以人工作业为主的传统生产方式不利于企业竞争, 且工人长时间暴露于烟雾、高温环境中容易产生职业病。因此, 需要对现有锻造设备进行升级改造, 提高设备自动化生产程度, 减轻操作人员的工作强度^[3-4]。机械臂

是一种能够模仿人的手臂动作、按固定的程序搬运物体的自动化操作装置^[5]。虽然大部分机械臂未达到完全智能化的水平, 但是可以代替人们进行某些重复、危险的工作, 在工业产品生产过程中具有重要作用^[6]。在传统的机械臂结构设计中, 对其结构及尺寸参数选取较为保守, 且某些初始尺寸设计依托于简单计算及经验, 容易造成结构冗余和参数设计不合理, 因此, 有必要对机械臂部分尺寸进行响应面优化, 以保证强度和刚度在符合要求的情况下降低机械臂重量, 从而提高材料利用率并减少能源消耗^[7]。

本文针对一款 80 MN 锻造液压机的毛坯件冲孔工序的实际工况, 对机械臂装配体模型进行简化并进行静力学分析, 根据结果云图筛选尺寸变量。对模型进行参数化建模, 依据机械臂工作时各臂的几何关系, 在 Solidworks 中构建尺寸关系方程式。应

收稿日期: 2023-10-31; 修订日期: 2024-01-26

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2017YFC140510)

作者简介: 刘高照 (2000-), 男, 硕士研究生

E-mail: lgz_156@163.com

通信作者: 管殿柱 (1969-), 男, 硕士, 教授

E-mail: gdz_zero@126.com

用 ANSYS Workbench 分析软件对其结构进行响应面优化,与初始参数对比后显示轻量化效果明显,且优化后的模型符合强度、变形以及工作空间位置要求。

1 锻造机械臂设计与工作原理

1.1 锻造机械臂设计

本文针对青岛武晓集团股份有限公司的 80 MN 锻压机生产线设计一款用于冲孔工序的锻造专用机械臂,可实现对质量达 1.9×10^4 kg 的锻件的变形加工。对各零部件尺寸及结构设计时主要依据传统经验与一般力学常识,为保证其可靠性和安全性,采取冗余设计。选取了动力元件与传动机构,确定机械臂各部分的构造与装配关系后,在 Solidworks 中建立锻造专用机械臂的三维模型,如图 1 所示。机身材料按要求选取 Q235 钢,各转动中心轴选取强度较高的 45 钢,滑动轴承材料选取力学性能较好的高力黄铜,材料的性能见表 1。

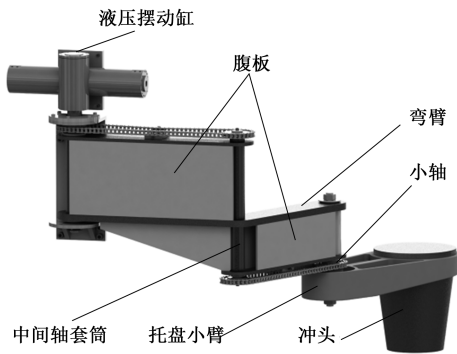


图 1 机械臂的三维模型图
Fig. 1 3D model diagram of manipulator

表 1 材料的性能参数

Table 1 Perpormance parameters of materials				
材料名称	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/ MPa	泊松比	屈服强度/ MPa
Q235 钢	7850	2. 10	0. 300	235
45 钢	7850	2. 09	0. 269	355
CUZN24AL6	8900	1. 08	0. 350	427

该机械臂末端冲头质量为 2.0×10^3 kg,为减小由冲头自重引起的变形,弯臂结构主要采用“工字型”结构,如图 2 所示。该结构是一种断面力学性能更为优良的经济型断面钢材,其翼缘宽,侧向刚度大,承载能力大,抗弯能力强。为了克服由于弯臂角度以及托盘小臂转动过程带来的较大弯矩,在“工字型”截面两侧各添加了两块筋板以有效地减

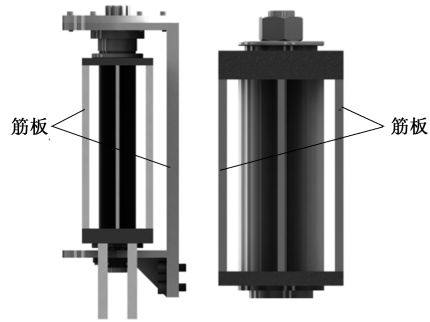


图 2 弯臂结构示意图
Fig. 2 Schematic diagram of curved arm structure

小机械臂整体的变形程度。

1.2 工作原理介绍

工作时机械臂仅需一个摆动液压缸作为两臂转动的动力源,如图 3 所示,传动机构为链轮链条传动,机械臂工作时,该弯臂绕摆动缸输出轴逆时针转动,转速为 $0.079\text{ r}\cdot\text{s}^{-1}$ 。链轮 1 通过螺栓固连于机身静止不动,弯臂整体由摆动缸输出轴输入动力产生摆动,导致链轮 1、链轮 2 的相对位置发生变化,链轮 2 被动地绕中心轴顺时针转动。链轮 2、链轮 3 为同轴转动,托盘小臂与链轮 4 通过螺栓固连为一体,链轮 3 的转动通过链条 2 带动托盘小臂绕小轴顺时针转动,转速为 $0.157\text{ r}\cdot\text{s}^{-1}$ 。弯臂与托盘小臂的整体配合运动,使冲头能够精准连贯地移动至毛坯件的中心位置。

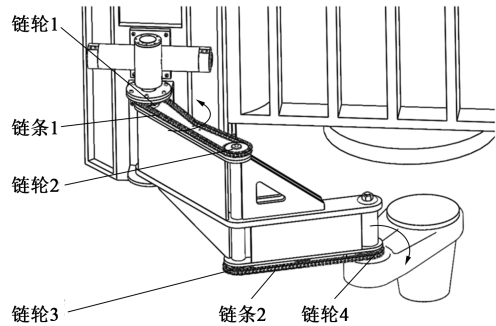


图 3 弯臂运动示意图
Fig. 3 Schemaic diagram of curved arm moving

2 锻造机械臂静力学分析

在 Solidworks 中对机械臂的结构进行简化,原模型存在较多的螺纹孔,为提高仿真效率和准确性,删除一些不受计算影响的螺栓、螺母以及螺纹孔。该机械臂存在较多筋板,在连接时需要进行焊接,但焊接件模型之间会存在诸多微小间隙,影响计算的精度,需对部分焊接筋板在建模时机型拉伸合

并^[8]。在静力学分析前,需考虑锻件温度是否对机械臂产生影响,经瞬态热分析已验证机械臂温度无明显变化,故可进行静力学分析。由一般的力学常识可知,机械臂在不同运动姿态下的静动态特性不同。机械臂两臂运动速度较慢,动载特性对机械臂结构变形等参数影响甚微,可通过静力学分析校核强度,但需确定机械臂最危险姿态下的静力学受力情况,分析可知,当托盘小臂与大臂处于垂直面时为最危险姿态^[9]。为方便静力学分析时对其局部区域施加载荷,在 Solidworks 中对冲头与托盘小臂的局部区域接触进行分割。

将简化后的模型导入 Workbench 中,对各零部件添加材料属性,如表 1 所示,进行网格划分,采取总体和局部网格尺寸控制,权衡设备性能与结果准确性,最终确定总体网格尺寸为 30 mm,对受力大、尺寸小的滑动轴承等部件设置局部网格尺寸为 5 mm,网格类型的控制方法为自动控制。共产生 96784 个单元,245163 个结点。

根据实际工况,在左侧底座施加固定约束。由冲头重力引起托盘小臂受到向下的作用力 F 为 20 kN,在托盘小臂的上端分割区域施加压强 $P = F/A \approx 0.884 \text{ MPa}$ 。其中, A 为托盘小臂与冲头接触表面积,为 $2.262 \times 10^4 \text{ mm}^2$ 。

根据材料力学相关知识,屈服强度应大于外力,否则零部件将产生永久失效,无法恢复。对于无明显屈服现象的材料,规定以产生 0.2% 残余变形的应力值作为其屈服极限^[10],即总变形不得超过总长度的 2‰。该机械臂弯臂与托盘小臂长度之和约为 3500 mm,得到机械臂总变形不应超过 7 mm。图 4 分析结果显示,机械臂处于极限位置时最大变形量为 4.7164 mm,符合设计要求。应力主要分布于弯臂夹角处和两端轴的连接处。应力最大处位于液压摆动缸输出轴端的滑动轴承处,最大等效应力为 96.658 MPa,远小于材料的屈服强度,具有很大的优化空间^[11],此时机械臂的总质量为 2766 kg,可通过轻量化设计减轻机械臂的质量。

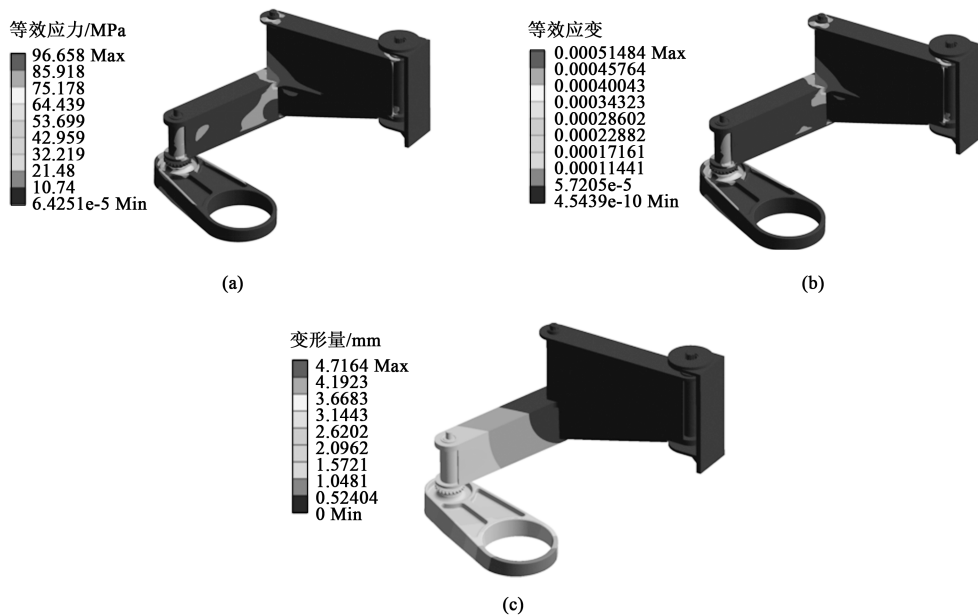


图 4 圆整后的静力学分析云图

(a) 等效应力 (b) 等效应变 (c) 变形量

Fig. 4 Statics analysis nephograms after rounding

(a) Equivalent stress (b) Equivalent strain (c) Deformation amount

3 机械臂结构尺寸优化

3.1 尺寸参数设置与方程式建立

Solidworks 是一款通用的三维设计软件,建模时可基于方程式进行变形设计,将单一或不同零件间的尺寸参数建立一定的函数关系,并进行链接,当少数尺寸主动改变时即可改变其他关联尺寸^[12]。

该机械臂的结构较为复杂,单个或不同零件间的尺寸参数存在诸多相互配合关系。如:孔轴尺寸、各臂长度、弯臂厚度、腹板长度或高度等。各臂长度尺寸如图 5 所示,其中, B 为弯臂下端长度, C 为托盘小臂长度, D 为弯臂上端长度, L_1 为链轮 1 中心至工件中心的纵向距离, L_2 为链轮 1 中心至工件中心轴的横向距离, α 为弯臂夹角的补角。在进

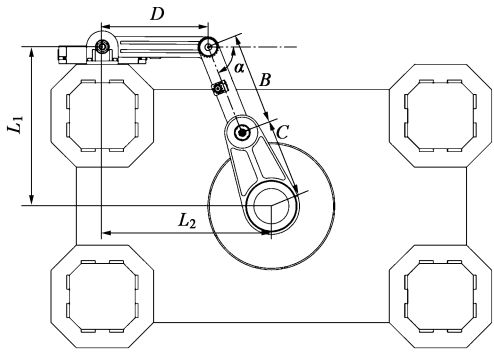


图 5 机械臂各臂尺寸图

Fig. 5 Dimensional diagram of each arm of manipulator

行优化时，分析软件在 Solidworks 平台上不断修改尺寸并更新模型，为避免尺寸修改后的零件与相邻零件发生干涉，在 Solidworks 中构建优化参数的关联方程式，提高优化的效率与精度。

该机械臂工作时按照预定轨迹将冲头转运至毛坯的中心位置，各臂长度的随意改变不能保证机械臂的工作范围符合要求。故该机械臂的各臂长度在进行尺寸优化时应考虑空间位置关系，托盘小臂的单位长度质量较大且设计余量较大，故该臂在锻压机压头位置的限制下取最小值为 1070 mm，当弯臂夹角 α 主动改变时，弯臂尺寸 A 和 B 根据函数关系式取不同值以满足要求。Workbench 进行优化分析时需对参数变量进行识别，需将相关尺寸在 Solidworks 中添加识别前缀“DS_”，并添加尺寸约束方程式，其中单位为 mm。

$$\begin{cases} A = 2250/\sin(DS_ \alpha) - 1070 \\ B = 2395 - 2250/\tan(DS_ \alpha) \end{cases} \quad (1)$$

优化时 Solidworks 与 Workbench 双向联合仿真，将尺寸设置为软件识别的通用格式，实现双向参数互动^[13]。根据静力学分析云图结合机械臂实际运行原理，筛选对机械臂分析结果影响较大的零件尺寸，将中间轴套筒外径、小轴直径、弯臂夹角及弯臂厚度设置为参数变量并添加识别前缀，如表 2 所示。

表 2 参数变量设置

Table 2 Parameter variable settings

变量	参数
中间轴套筒外径	DS_ P_1
小轴直径	DS_ P_2
弯臂夹角	DS_ P_3
弯臂厚度	DS_ P_4

3.2 数学模型建立

根据设计要求，机身材料主要为 Q235 钢，优化时设置最大等效应力小于材料许用应力，材料安

全系数的选择应综合考虑动载情况、应力集中、理论与实际的差别等因素，最终取值为 2。

$$[\sigma] = \frac{R_{el}}{S} \quad (2)$$

式中： $[\sigma]$ 为许用应力，MPa； R_{el} 为屈服强度，MPa； S 为安全系数。

根据式 (2) 求得材料许用应力 $[\sigma]$ 为 117 MPa。以机械臂整体变形量小于 6 mm 及许用应力为约束条件，以机械臂总质量最小为目标函数，得到机械臂的优化数学模型表示为：

$$\text{Find } N = [P_1, P_2, P_3, P_4]^T \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \min f(x) &= m \\ \text{s. t. } \begin{cases} \sigma_{\max} \leq [\sigma] \\ \delta_{\max} \leq 6 \text{ mm} \end{cases} \end{aligned} \quad (4)$$

式中： N 为设计变量； $f(x)$ 为约束函数； m 为机械臂质量； $P_1 \sim P_4$ 为设计变量； σ_{\max} 为最大应力； δ_{\max} 为最大变形量。

3.3 响应面优化分析

Workbench 软件中提供了 5 种优化方法，其中响应面法有快速获取最佳优化参数、计算准确快速的优点，该机械臂的尺寸优化采取此方法^[14]。在 Design Modeler 模块中勾选尺寸参数，在上述静力学分析模块中选择最大应力、最大变形以及质量为优化参数。在 Workbench 平台中选择响应面优化 (Response Surface Optimization) 模块与静力学模块连接。在优化模块实验设计 (Design of Experiments) 栏中设置尺寸的变化范围，如表 3 所示。

表 3 尺寸变量区间

Table 3 Variable interval of sizes

参数	变量区间
DS_ P_1 /mm	[120, 160]
DS_ P_2 /mm	[110, 180]
DS_ P_3 /(°)	[55, 75]
DS_ P_4 /mm	[25, 80]

为增强实验拟合效果，在实验设计类型中选择中心复合设计 (Central Composite Design)，在设计类型 (Design Type) 中选择自动定义 (Auto Defined)，更新后生成 26 组实验数据，如图 6 所示。

灵敏度柱状图能直观反映尺寸变量对分析结果的影响程度，更新得到的机械臂总变形、最大等效应力、质量的灵敏度分析图如图 7 所示，分析可知：小轴直径、弯臂厚度对总变形及最大等效应力影响更大，均成负相关关系；弯臂夹角及厚度对质量影

Table of Outline A12: Design Points of Design of Experiments								
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Name ▼	P1 - P45@... .Part ▼	P2 - P41@DS... .Part ▼	P3 - P7@D... .Part ▼	P4 - P7@... .Part ▼	P5 - Total Deformation Maximum (mm) ▼	P6 - Equivalent Stress Maximum (MPa) ▼	P7 - Geometry Mass (kg) ▼
2	1	140	145	65	52.5	5.1781	103.53	2614.3
3	2	120	145	65	52.5	5.6605	144.57	2580.8
4	3	160	145	65	52.5	5.0832	102.24	2653.2
5	4	140	110	65	52.5	6.7554	200.46	2599.4
6	5	140	180	65	52.5	4.5044	147.5	2631.9
7	6	140	145	55	52.5	5.7025	128.75	2383.2
8	7	140	145	75	52.5	4.6725	87.348	2835.6
9	8	140	145	65	25	6.0792	188.74	2437.1
10	9	140	145	65	80	4.6029	113.93	2797.5
11	10	125.92	120.35	57.958	33.134	7.6123	185.49	2301.7
12	11	154.08	120.35	57.958	33.134	7.0006	167.23	2353.6
13	12	125.92	169.65	57.958	33.134	6.2373	186.09	2324.6
14	13	154.08	169.65	57.958	33.134	5.3877	170.68	2376.5
15	14	125.92	120.35	72.042	33.134	6.5743	147.29	2601.3
16	15	154.08	120.35	72.042	33.134	6.1649	147.67	2653.2
17	16	125.92	169.65	72.042	33.134	5.1708	140.29	2624.1
18	17	154.08	169.65	72.042	33.134	4.5468	149.64	2676.1
19	18	125.92	120.35	57.958	71.866	6.0045	150.88	2539.1
20	19	154.08	120.35	57.958	71.866	5.6288	150.99	2589.7
21	20	125.92	169.65	57.958	71.866	4.9712	135.28	2562
22	21	154.08	169.65	57.958	71.866	4.4289	121.7	2612.6
23	22	125.92	120.35	72.042	71.866	5.3004	159.24	2872.7
24	23	154.08	120.35	72.042	71.866	5.042	159.4	2923.3
25	24	125.92	169.65	72.042	71.866	4.2531	92.845	2895.6
26	25	154.08	169.65	72.042	71.866	3.8319	118.34	2946.2

图 6 响应曲面优化数据表

Fig. 6 Data table of response surface optimization

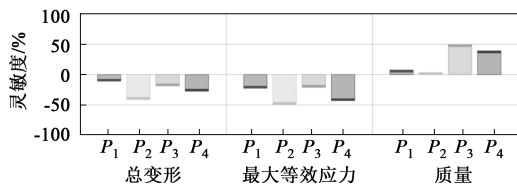


图 7 局部敏感度柱状图

Fig. 7 Histogram of local sensiticit

响较大，成正相关关系。根据静力学分析云图筛选的 4 个尺寸变量较为理想。

在响应点（Response Point）中选择响应（Response）选项，模型选择直观方便观察的 3D 图。将 4 个尺寸变量组合作为 X 轴和 Y 轴，最大等效应力、最大变形和质量分别作为 Z 轴，部分三维关系图如图 8 所示，变量不同的数值组合对最大等效应力的影响为波动影响，响应面优化的目的便是综合尺寸变量的影响，选取符合约束条件的最优解。

根据数学模型添加变形、应力的约束条件，将总质量最小作为优化目标，选择多目标遗传算

法（Multi-Objective Genetic Algorithm, MOGA）作为优化算法，方式选择自动（Auto），运算得到 3 个候选点，对比结果将候选点 1 作为预选方案，将候选点 1 的尺寸根据实际加工、选材的客观要求进行圆整，在 Solidworks 软件中修改尺寸并检查模型合理性，导入 Workbench 中重新进行静力学分析，得到机械臂的等效应力、等效应变与变形量云图，如图 9 所示。

由图 9 可知，圆整后模型的最大等效应力小于优化设置的材料许用应力，总变形仍小于 7 mm，符合设计要求。优化前后对比结果如表 4 所示，机械臂机身总质量减少 421 kg，减少了材料浪费，轻量化效果明显，为企业制造节省了材料、降低了生产成本。

4 结语

对一款用于 80 MN 锻压机的锻造专用机械臂的结构及工作原理进行介绍，运用 ANSYS Workbench 软件进行静力学分析，结合分析结果与各臂工作位置关系

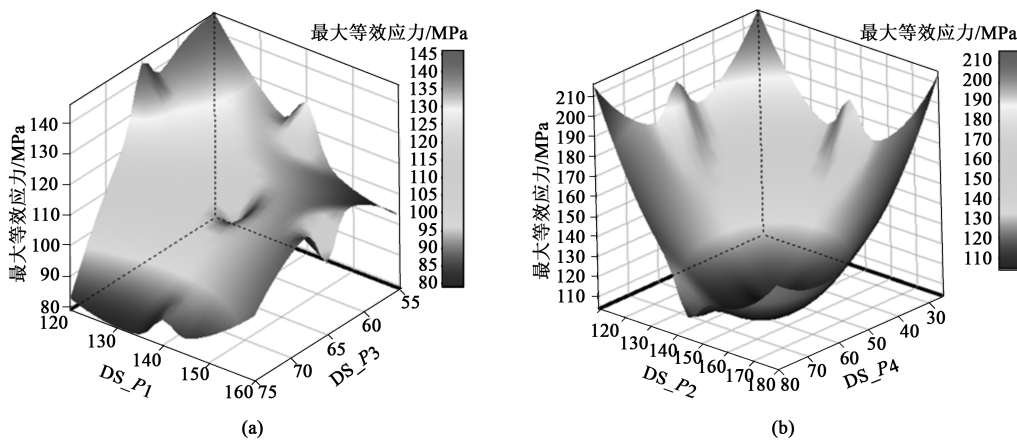


图 8 最大等效应力响应图
(a) P_1-P_3 (b) P_2-P_4

Fig. 8 Response diagrams for maximum equivalent stress

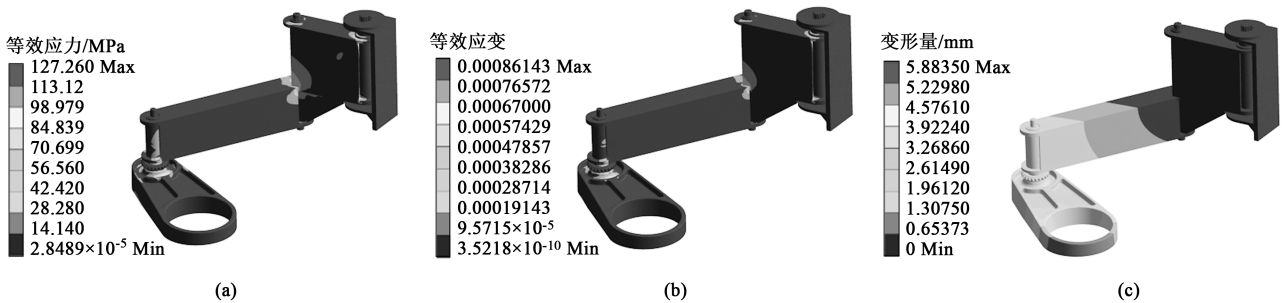


图 9 优化圆整后的静力学分析云图
(a) 等效应力 (b) 等效应变 (c) 变形量

Fig. 9 Statics analysis nephograms after rounding and optimized
(a) Equivalent stress (b) Equivalent strain (c) Deformation amount

表 4 机械臂尺寸优化结果对比

Table 4 Comparison of size optimization results for mechanical arm			
参数	最大等效应力/MPa	变形量/mm	质量/kg
优化前	96.658	4.7164	2766
优化后	127.260	5.8835	2345
改变量	30.602	1.1671	421
百分比/%	31.66	24.75	-15.22

筛选 4 个尺寸，在 Solidworks 软件中进行参数化并建立方程式。模型简化后基于响应面法对其优化分析。经轻量化设计后机械臂的最大等效应力和变形满足设计要求，总质量减轻 15.22%，降低了自身负载，提高了运动灵活度。所研究成果能够为企业降低成本，减少能源消耗，也对类似机械臂的轻量化提供一定借鉴思路。

参考文献：

[1] 杨涛, 米君昊. 浅谈工业机器人的发展及应用 [J]. 时代汽车, 2020, (15): 17-18.
Yang T, Mi Y H. Brief discussion about the development and

application of iustrial robots [J]. Auto Time, 2020, (15): 17-18.
[2] 王子舒. 铁路道岔钢轨锻造生产线自动化方案设计 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (6): 67-74.
Wang Z S. Design on automatic scheme for rail forging production line of railway turnout [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (6): 67-74.
[3] 安文. 锻造企业职业危害及劳动防护措施 [J]. 安全与健康, 2016, (2): 28-29.
An W. Occupational hazards and labor protection measures of forging enterprises [J]. Safety & Health, 2016, (2): 28-29.
[4] 赵一冰, 刘庆生, 宏亮, 等. 快速换模技术在锻造自动化生产线上的应用 [J]. 锻压技术, 2023, 48 (2): 174-179.
Zhao Y B, Liu Q S, Hong L, et al. Application of rapid mold technology in forging automatic production line [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48 (2): 174-179.
[5] 肖雨. 喷砂机器人八自由度机械臂控制系统设计 [D]. 济南: 济南大学, 2021.
Xiao Y. The Design of Eight Degree of Freedom Robotic Arm Control System for Sand Blasting Robot [D]. Jinan: University of Jinan, 2021.

(下转第 178 页)