圆柜内机缓冲衬垫多目标优化设计

孙百会^{1,2,3},**叶子平**^{1,2,3},**李燕华**^{1,2,3},**张雄飞**^{1,2,3},**王领**^{1,2,3},**雷子龙**^{1,2,3} (1.珠海格力电器股份有限公司,广东 珠海 519000; 2.空调设备及系统运行节能国家重点实验室,

广东 珠海 519000; 3.广东省制冷设备节能环保技术企业重点实验室, 广东 珠海 519000)

摘要:目的 基于有限元软件研究圆柜内机包装件静态载荷下的力学特性,并进行多目标优化设计。 方法 利用 CREO 建立三维模型、ANSYS Workbench 建立有限元模型,对圆柜内机包装件进行静力学分析。以上缓冲衬垫的5条筋条厚度和2侧壁厚作为设计变量,以上缓冲衬垫的质量、包装件的最大变形量 和最大等效应力作为目标函数建立优化模型。基于 OSF 试验设计方法和 Kriging 模型,采用多目标遗传算法 进行多目标优化设计。结果 优化前的包装件最大变形量为 1.511 3 mm,最大等效应力为 0.327 6 MPa。优 化后包装件的筋条和侧壁厚度显著降低,上缓冲衬垫质量减少了 27%,整体强度无显著降低。结论 建 立的多目标优化设计方法合理且 Kriging 模型精度较高,在保证缓冲防护效果的基础上,实现了轻量化 设计,降低了包装成本。

关键词:有限元分析;多目标优化;Kriging 模型;最优空间填充设计 中图分类号:TB482.2 文献标识码:A 文章编号:1001-3563(2023)13-0208-09 DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.13.025

Multi-objective Optimization Design of Cushion for Inner Unit of Circular Cabinet Air Conditioner

SUN Bai-hui^{1,2,3}, YE Zi-ping^{1,2,3}, LI Yan-hua^{1,2,3}, ZHANG Xiong-fei^{1,2,3}, WANG Ling^{1,2,3}, LEI Zi-long^{1,2,3}

(1.Gree Electric Appliances, Inc. of Zhuhai, Guangdong Zhuhai 519000, China; 2. State Key Laboratory of Air-conditioning Equipment and System Energy Conservation, Guangdong Zhuhai 519000, China;
 3. Guangdong Key Laboratory of Refrigeration Equipment and Energy Conservation Technology, Guangdong Zhuhai 519000, China)

ABSTRACT: The work aims to study the mechanical characteristics of the inner package of circular cabinet air conditioner under static load based on the finite element software, and carry out multi-objective optimization design. A three-dimensional model was established by CREO and a finite element model was established by ANSYS Workbench to carry out static analysis on the inner package of circular cabinet air conditioner. The multi-objective optimization model was established with the thickness of 5 ribs and 2 side walls of the upper cushion as design variables and the mass of the upper cushion, maximum deformation and maximum equivalent stress of the package as the objective functions. Based on OSF experiment design method and Kriging model, multi-objective optimization design was carried out by multi-objective genetic algorithm. The maximum deformation of the package before optimization was 1.511 3 mm, and the

收稿日期: 2022-10-21

基金项目:珠海市基础与应用基础课题研究项目(ZH22017003200007PWC)

作者简介:孙百会(1996—),女,硕士,主要研究方向为物流运输包装及仿真优化。

通信作者:李燕华(1989—),男,博士,主要研究方向为冲击动力学。

maximum equivalent stress was 0.327 6 MPa. After optimization, the thickness of the ribs and side walls of the package decreased significantly, the mass of the upper cushion decreased by 27%, and the overall strength did not decrease significantly. The multi-objective optimization design method established is reasonable and the Kriging model has high accuracy. On the basis of ensuring the cushioning protection effect, the lightweight design is realized and the packaging cost is reduced. **KEY WORDS:** finite element analysis; multi-objective optimization; Kriging model; optimal space filling design

运输包装能在流通过程中保护产品并避免载荷 破坏。如果包装设计不合理,极易造成产品磨损、 磕碰甚至断裂破损无法使用^[1]。空调作为一种常见 的家电产品,因国内物流环境恶劣且空调质量大、 价格贵。为避免包装失效引发产品破损,包装采用 裕量设计。根据《塑料加工业"十四五"发展规划指 导意见》坚持"五化"(功能化、轻量化、精密化、 生态化、智能化)技术创新发展方向,包装轻量化 是发展趋势。

CAE 技术不断发展,越来越多国内外学者将其应用于产品的力学仿真和优化设计等方面。如马瑞博等^[2]对电暖气包装件进行仿真分析及优化设计,提高了缓冲保护性能;董静等^[3]对空调内机缓冲衬垫进行优化,满足缓冲防护要求实现了包装轻量化设计;阎帅等^[4]将响应面法应用于液晶电视包装件的优化设计,旗间前等^[4]将响应面法应用于液晶电视包装件的优化设计,降低产品破损率的同时节约了材料;张皓佳^[5]将多目标遗传算法应用于燃气灶的优化设计,提高总体缓冲性能的同时质量减轻了 4%。Lim 等^[6]将多目标遗传算法优化应用于在空间框架结构设计中;Pmar等^[7]将采用遗传算法对滚筒洗衣机进行优化,改善了振动特性。

目前,以柜式空调内机为研究对象进行仿真分 析及优化设计的较少,其研究方法以有限元分析为 手段,优化方向主要依赖于设计人员经验。本文以 某款圆柜内机包装件为研究对象,采用参数化建模, 在静力学分析的基础上,基于 Kriging 模型与多目标 遗传算法进行多目标优化设计,为轻量化设计提供 参考。

1 圆柜内机堆码仿真分析

1.1 几何模型建立

试验对象是某型号圆形柜内机(下文全部简称为 圆柜),圆柜简化为 378 mm(直径)×1 717 mm 的圆 柱体;纸箱几何尺寸为 2 028 mm×521 mm×502 mm; 压力板尺寸为 2 800 mm×1 200 mm×100 mm。使用 Creo 软件建立圆柜包装件的几何模型,见图 1。

1.2 材料参数设置

包装件整体涉及 ABS、EPS、瓦楞纸板和 Stainless Steel 4 种材料,材料参数见表 1。



图 1 圆柜包装件几何模型 Fig.1 Geometric model of circular cabinet air conditioner package

表 1 材料参数 Tab.1 Material parameter

组件名称	材料名称	密度/ (kg·m ⁻³)	泊松比	弹性模量/ MPa
圆柜	ABS	1 340	0.4	2 538
缓冲衬垫	EPS	20	0.1	2.538
纸箱	瓦楞	160	0.34	200
压力板	Stainless Steel	7.75×10^{7}	0.31	1.93×10^{9}

1.3 计算参数设置

1.3.1 接触设置

圆柜与上下缓冲衬垫、上下缓冲衬垫之间采用绑 定接触,纸箱与上下缓冲之间采用摩擦接触,摩擦因 数为 0.12。

1.3.2 网格划分

压力板、圆柜、缓冲衬垫采用实体四面体网格, 纸箱采用壳体四边形网格。缓冲衬垫的网格大小为 25 mm,压力板、圆柜和纸箱的网格大小为 30 mm。网 格划分后总共有节点 405 138 个,网格数 168 785 个, 有限元模型见图 2。



图 2 圆柜包装件有限元模型 Fig.2 Finite element model of circular cabinet air conditioner package

1.3.3 定义载荷与约束

载荷计算式见式 (1)。	
$F = K \times m \times (N-1) \times g$	(1)
	N 104

式中: *F* 为载荷力, N; *K* 为安全系数; *m* 为样 品毛质量, kg; *N* 为最大堆码层数; *g* 取 9.8 kg/s²。

由式(1)计算得出载荷力为9172.8 N。将载荷 力均匀地作用在压力板的上表面,方向垂直向下;下 压力板底面设置为固定约束,见图3。

1.4 网格无关性分析

为避免缓冲衬垫网格尺寸影响仿真结果准确性, 进行网格无关性分析。将缓冲衬垫设置8组网格尺寸 进行仿真计算,仿真结果见表2和图4。

由图 4 可知,网格尺寸处于 30~20 mm,包装件的最大等效应力与总变形值趋近平缓,且计算时间较 合理;网格尺寸小于 15 mm 时,计算时间急剧增长, 计算成本较高。综合考虑仿真精度和计算成本,不采 用提高仿真精度而减小网格尺寸的方案^[8],最终选择 缓冲衬垫网格尺寸为 25 mm。



图 3 载荷约束施加 Fig.3 Load and constraint imposed

1.5 仿真分析结果

利用 Workbench 对有限元模型进行求解,得到圆 柜包装件的等效应力和总变形云图,见图 5。由图 5 可 知,包装件最大变形发生在纸箱顶部,最大变形量为 1.511 3 mm。上压板使包装件整体受力更加均匀,无 变形不均,扭曲、倾斜趋势^[4]。包装件最大等效应力 集中在纸箱左侧端面,为 0.327 6 MPa。因纸箱承受 大部分应力,缓冲衬垫尤其是内部支撑筋条所受到的 等效应力较小,有很大的优化空间。

网格大小/mm	最大等效应力/MPa	总变形量/mm	节点数	单元数	计算时间/s					
60	0.325 91	1.995 3	232 215	61 448	652					
50	0.340 73	1.866 5	244 346	68 340	664					
40	0.328 41	1.710 7	266 613	81 710	914					
30	0.327 18	1.549 7	327 434	119 372	1 064					
25	0.327 59	1.511 3	405 138	168 785	1 313					
20	0.325 16	1.512 4	566 384	276 824	1 620					
15	0.326 64	1.489 6	1 013 393	579 124	3 148					
10	0.353 96	1.581	2 748 705	1 795 673	37 860					

表 2 仿真结果 Tab 2 Simulation results



图 4 仿真结果对比 Fig.4 Comparison of simulation results



图 5 堆码仿真分析 Fig.5 Stacking simulation analysis

2 圆柜内机缓冲衬垫多目标优化设计

缓冲衬垫的优化设计存在很多影响因素,如工 艺、成本、性能等,属于多目标优化问题。多目标优 化,就是在多个子目标中协调寻求一个折中的集合, 使各个子目标都尽可能达到最优化^[9]。

圆柜内机缓冲衬垫多目标优化设计思路如下所示:首先确明确影响优化目标的关键设计参数,进行 参数化模型建立并完成有限元分析;然后选取试验设 计方法形成样本空间,完成响应值计算;再通过样本 数据构建响应面模型并评估相关参数;最后通过优化 算法进行寻优,确定最优设计方案,完成优化。优化 设计流程见图 6。



图 6 优化设计流程 Fig.6 Optimization design flow

2.1 优化模型建立

选取上缓冲衬垫的5个筋条厚度、两侧壁厚作为

设计变量,见图 7。利用 ANSYS SCDM 模块对上缓 冲衬垫进行参数化。将最大等效应力、最大总变形量 及上缓冲衬垫的质量作为目标函数,设计变量的尺寸 取值范围作为约束条件,建立圆柜缓冲衬垫优化模 型。结合其他柜机缓冲衬垫尺寸、堆码分析结果,设 计变量和目标函数取值见表 3。



Fig.7 Design variables

2.2 试验设计

试验设计方案,特别是计算的设计点数直接决 定响应面模型的构造精度,为了提高近似响应函数 (响应面)的精度,试验样本获取需遵从试验设计 准则^[10]。试验设计准则一般包括中心组合设计、箱 式贝恩肯设计、拉丁超立方设计、最优空间填充设 计(OSF)等几种方法^[11]。最优空间填充设计是优化 的拉丁超立方采样设计,在整个设计空间中平均分 配设计参数,以更好地填充参数空间,提供较合理 的试验方案。

采用最优空间填充设计对上缓冲衬垫的 6 个设 计变量进行试验方案设计,共 45 组样本设计点,见 表 4。

表 3 参数取值范围 Tab.3 Range of control parameters												
	设计变量								目标函数			
名称	筋条厚度1	筋条厚度 2	筋条厚度3	筋条厚度4	筋条厚度 5	侧壁厚度 1	侧壁厚度 2	上衬垫质量	最大等效应力	最大总变形		
	$(D_1)/mm$	$(D_2)/mm$	(D ₃)/mm	(D ₄)/mm	(D ₅)/mm	$(D_6)/mm$	(<i>D</i> ₇)/mm	$(P_1)/kg$	$(P_2)/MPa$	量(P ₃)/mm		
初始值	144	153	300	168	190	25	25	2.34	0.327 6	1.511 3		
最大值	40	40	40	40	40	25	25	2	0.32	1.5		
最小值	20	20	20	20	20	15	15					

表 4 样本试验结果 Tab.4 Test results of samples

						r				
序号	D_1/mm	D_2/mm	D_3/mm	D_4/mm	D_5/mm	D_6/mm	P_2 /MPa	P ₃ /mm	P_1/kg	D_7/mm
1	26.44	30.44	29.11	22.00	38.00	23.78	0.38	1.71	1.55	23.78
2	27.78	34.89	38.00	30.89	20.22	20.22	0.37	1.81	1.50	20.22
3	20.22	34.44	23.78	32.22	28.67	23.11	0.38	1.71	1.53	23.11
4	21.56	29.56	26.44	28.67	21.11	18.00	0.38	1.85	1.44	18.00
5	28.67	20.22	26.89	37.56	32.22	17.78	0.38	1.85	1.46	17.78
6	35.78	24.22	25.56	24.67	28.22	24.67	0.38	1.71	1.55	24.67
7	28.22	29.11	20.22	34.44	26.89	16.00	0.38	1.88	1.43	16.00
8	38.00	22.44	29.56	26.89	38.44	20.67	0.38	1.81	1.51	20.67
9	30.89	27.33	33 11	35.78	38.89	24.22	0.37	1 70	1.57	24 22
10	21.11	25.11	32.67	37.11	22.89	20.89	0.38	1.70	1.50	20.89
11	22.11	23.11	39.78	28.22	31.78	20.09	0.38	1.72	1.50	20.09
12	22.07	24.07	28.67	20.22	25.56	21.22	0.38	1.71	1.55	22.22
12	30.00	36.67	26.07	22.09	36.67	18.22	0.38	1.75	1.51	18.22
13	35.33	34.00	20.00	21.11	31.33	16.22	0.38	1.05	1.47	16.22
14	25.33	25.79	27.22	21.22	25 78	15.11	0.38	1.00	1.47	15.11
15	23.11	22.00	27.55	24.22	22.70	15.11	0.38	1.09	1.45	15.11
10	32.07	22.00	26.69	24.22	32.07	13.30	0.38	1.69	1.42	13.30
1/	34.89	21.50	30.07	20.00	27.78	23.33	0.38	1.70	1.55	23.33
18	36.22	28.67	24.22	30.00	39.33	10.6/	0.38	1.8/	1.46	10.6/
19	27.33	39.78	27.78	38.00	26.44	18.44	0.38	1.84	1.48	18.44
20	20.07	20.00	28.22	25.33	23 23	22 44	0.38	1.65	1.40	22 44
21	37.56	30.89	34.00	36.22	20.67	19 78	0.38	1.71	1.55	19 78
23	39.33	37.56	22.89	34.00	30.00	19.11	0.38	1.83	1.50	19.11
24	26.00	27.78	31.33	23.78	23.78	24.44	0.38	1.71	1.54	24.44
25	22.44	38.89	37.56	26.44	33.56	19.33	0.38	1.82	1.50	19.33
26	24.67	30.00	36.22	23.33	29.56	15.33	0.38	1.89	1.42	15.33
27	37.11	26.44	25.11	39.33	30.89	22.00	0.38	1.70	1.53	22.00
28	38.89	33.56	34.89	25.56	27.33	16.44	0.38	1.87	1.46	16.44
29	23.33	20.67	30.44	20.67	30.44	19.56	0.38	1.83	1.46	19.56
30	23.78	32.22	38.44	36.67	29.11	16.89	0.38	1.85	1.46	16.89
31	39.78	23.78	24.67	30.44	24.22	17.33	0.38	1.80	1.45	17.33
32	34.44	20.22	30.09	22.44	34.09	17.56	0.38	1.71	1.35	21.50
34	31.33	32.55	23 33	21.56	24 67	17.30	0.38	1.85	1.47	17.50
35	26.89	33.11	22.44	38.44	37.56	21.78	0.38	1.70	1.53	21.78
36	24.22	38.00	35.78	34.89	34.44	23.56	0.37	1.70	1.56	23.56
37	36.67	37.11	37.11	29.11	37.11	18.67	0.38	1.83	1.50	18.67
38	33.56	31.33	22.00	29.56	39.78	22.67	0.38	1.71	1.54	22.67
39	31.78	35.33	21.11	32.67	22.44	22.89	0.38	1.71	1.53	22.89
40	29.56	31.78	31.78	39.78	26.00	24.89	0.37	1.70	1.58	24.89
41	29.11	21.11	21.56	27.78	25.11	21.11	0.38	1.73	1.49	21.11
42	22.00	25.56	20.67	26.00	34.00	20.44	0.38	1.82	1.48	20.44
43	55.11 20.44	20.89	33.33	20.22	22.00	20.00	0.38	1.82	1.48	20.00
44 45	34.00	22.89 38.44	34 44	27 33	∠1.30 33.11	24.00	0.38	1.00	1.42	24.00
7.7	1	//// TT	17.77	1.1.11	1 1.11	/. 	11. 10	1.71	1.11	/.

• 213 •

2.3 Kriging 模型建立

响应面是通过数据的最佳拟合曲线,使用拟合曲线 代替数据。Kriging 响应面具有较好的全局拟合精度,可 通过相关函数作用,比较精确地建立设计变量与响应之 间的数学关系,以较低的计算成本解决优化问题^[12-14]。

结合最优空间填充设计(OSF)试验方法, Kriging 模型具有更高的拟合精度。同时随机选取3个样本点 的均方根误差(RMSE)检验 Kriging 模型的精度。 结果显示其 RMSE 值均小于 0.01, 表明构造的 Kriging 模型精度较高。

图 8 为设计变量与目标函数的响应面模型。由图 8



图 8 响应面模型 Fig.8 Response surface model

可知,筋条厚度、侧壁厚度与质量为线性关系,与最 大等效应力、最大总变形量为非线性关系。随着筋条 厚度的减小,质量随之减小,最大应力逐渐增加。

图 9 为各设计变量与目标函数之间的灵敏度分析图,表示结构性能参数对各设计变量变化的敏感程度^[13]。由图 9 可知,质量与设计变量成正比,侧壁厚度(D_6)对质量影响最大;最大变形量和最大应力与设计变量成反比,筋条厚度(D_5)的影响最大,筋条厚度1(D_1)及筋条厚度2(D_2)的影响较小。





2.4 优化结果

采用多目标遗传算法(MOGA)进行优化计算, 设置最大允许的 Pareto 比例为 70%,初始样本点为 600,最大迭代次数为 20。计算完成后得到 3 组最优 设计点,如表 5 所示。综合考虑 3 组候选设计点,选 取候选点 3 作为多目标优化设计的最优解。确定圆整 后的 7 个设计变量尺寸依次为 33、36、34、38、25、 23、23 mm。

3 优化后堆码仿真分析和试验验证

将圆整后的优化筋条尺寸重新建模然后进行堆码仿真分析,等效应力和总变形云图见图 10。由图 10 可知,优化后包装件最大变形发生在纸箱顶部,最大变形量为 1.699 9 mm。包装件最大等效应力集中在纸箱前面顶部,为 0.368 7 MPa。

对优化后的圆柜包装件进行堆码试验验证,依据 GB/T 4857.4—2008 的要求进行试验,见图 11。试验 后包装件变形量为 1.87 mm,仿真准确性达 90%以上, 有限元仿真结果真实可靠。

为进一步验证优化后圆柜包装件的缓冲防护性 能,模拟包装运输中可能造成的伤害,进行踩踏、倾 翻和跌落试验验证。

	表 5 优化设计候选点 Tab.5 Candidate point of optimization design										
-	候选点	D_1/mm	D_2/mm	D ₃ /mm	D_4 /mm	D_5/mm	D_6/mm	<i>D</i> ₇ /mm	P_1/kg	P ₃ /mm	P ₃ /MPa
	1	34.98	30.29	39.03	39.63	29.54	23.67	23.67	1.72	1.69	0.37
	2	34.98	30.29	38.97	39.63	23.41	23.79	23.79	1.72	1.70	0.37
	3	33.15	36.39	34.47	38.51	25.80	23.38	23.38	1.70	1.69	0.37











图 11 优化后圆柜包装件堆码试验 Fig.11 Stacking test of optimized circular cabinet air conditioner package

踩踏试验时,将包装件平放在平整的水泥地面上,由一位体质量为100kg的测试员(可手提重物以达到预定体质量)穿上坚硬的鞋子站在圆柜包装件顶部来回踩踏2次。试验后,包装箱无破损,圆柜整体

外观完好,通电后功能正常,见图 12。

倾翻试验时,将包装件竖直放置在水平地面上, 在高于圆柜包装件重心的适当位置上施加水平推力, 倾斜包装件直至重力线通过底面棱使包装件自然失 去平衡,倾翻到水平地面上。试验后,通电后功能正 常,样机外观及内部结构完好,无断裂、明显变形现 象,拆机结构见图 13a。

跌落试验时,将圆柜包装件按照高度为 250 mm 的"1 角 3 棱 6 面"的方法进行试验。试验后,通电后 功能正常,样机外观及内部结构完好,无断裂、明显 变形现象,拆机结构见图 13b。

踩踏、倾翻和跌落试验结果表明,优化后的包装 缓冲防护性能符合要求。对比优化前后的结果可知, 优化前上衬垫质量为 2.34 kg,优化后为 1.70 kg,减 少了 0.64 kg,占优化前上衬垫质量的 27%;优化后 包装件的最大变形量与最大应力虽然有所增加,但仍 处于允许范围内。



图 12 优化后圆柜包装件踩踏试验 Fig.12 Trampling test of optimized circular cabinet air conditioner package



a 倾翻试验

b 跌落试验

图 13 试验后圆柜结构检验 Fig.13 Structural inspection of circular cabinet air conditioner after test

4 结语

应用 ANSYS Workbench 对圆柜内机进行静力学 分析,并基于 Kriging 模型与多目标遗传算法对上缓 冲衬垫进行多目标优化设计。通过对比优化前后包装 件的结果可知,在满足缓冲防护的前提下,圆柜内机 包装件的质量降低了 27%,达到了包装轻量化的目的。

参考文献:

 [1] 侯晓琳. 基于有限元分析的空调内机运输包装设计
 [D]. 哈尔滨:哈尔滨商业大学, 2019.
 HOU Xiao-lin. Transport Packaging Design of Air-Conditioning Indoor Unit Based on Finite Element Analysis[D]. Harbin: Harbin University of Commerce, 2019.

 [2] 马瑞博,李燕华,牛美亮,等.电暖器包装结构优化 仿真分析及试验验证[J].包装工程,2021,42(5): 148-156.

MA Rui-bo, LI Yan-hua, NIU Mei-liang, et al. Simulation Analysis and Test Verification of Packaging Structure Optimization of Electric Heater[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(5): 148-156.

- [3] 董静,李斌,侯晓琳. 空调缓冲衬垫有限元分析及优 化设计[J]. 包装工程, 2020, 41(13): 90-94.
 DONG Jing, LI Bin, HOU Xiao-lin. Finite Element Analysis and Optimization Design of Air-Conditioner Cushion[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(13): 90-94.
- [4] 阎帅,李光.液晶电视包装件有限元分析及优化设计
 [J].包装工程, 2017, 38(1): 121-127.
 YAN Shuai, LI Guang. Finite Element Analysis and Op-

timization Design of LCD TV Package[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(1): 121-127.

- [5] 张皓佳. 厨电产品缓冲包装优化设计及其应用研究
 [D]. 西安: 陕西科技大学, 2019: 42-58.
 ZHANG Hao-jia. Optimal Design and Application of Buffer Packaging for Kitchen Appliances[D]. Xi'an: Shaanxi University of Science & Technology, 2019: 42-58.
- [6] LIM J, YOU C, DAYYANI I. Multi-Objective Topology Optimization and Structural Analysis of Periodic Space Frame Structure[J]. Material and Design, 2020, 108: 552-568.
- [7] PMAR B, MUTLU G. Dynamic Modeling of a Horizontal Washing Machine and Optimization of Vibration Characteristics Using Genetic Algorithms[J]. Mechatronics: The Science of Intelligent Machunes, 2013, 23(6): 581-593.
- [8] 黄山,徐伟,张喻捷,等. 基于 Ansys Workbench 的往复吊厢吊杆网格无关性分析[J]. 起重运输机械, 2022(1): 62-66.
 HUANG Shan, XU Wei, ZHANG Yu-jie, et al. Grid Independence Analysis of Derrick of Reciprocating Car Based on Ansys Workbench[J]. Hoisting and Conveying Machinery, 2022(1): 62-66.
- [9] 肖晓伟,肖迪,林锦国,等. 多目标优化问题的研究 概述[J]. 计算机应用研究, 2011, 28(3): 805-808.
 XIAO Xiao-wei, XIAO Di, LIN Jin-guo, et al. Overview on Multi-Objective Optimization Problem Research[J].
 Application Research of Computers, 2011, 28(3): 805-808.
- [10] 蔡芸, 彭亮, 刘学, 等. 波轮式洗衣机脱水桶的结构 分析与多目标优化设计[J]. 机械强度, 2018, 40(1):

227-232.

CAI Yun, PENG Liang, LIU Xue, et al. Structural Analysis and Multi-Objective Optimization Design of Dewatering Barrel of Pulsator Washing Machine[J]. Journal of Mechanical Strength, 2018, 40(1): 227-232.

- [11] 隋允康, 字慧平. 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.
 SUI Yun-kang, YU Hui-ping. Improvement of Response Surface Method and Its Application to Engineering Optimization[M]. Beijing: Science Press, 2011.
- [12] 胡明扬, 彭珍瑞, 王增辉, 等. 基于 Kriging 模型的吸 开装置减振多目标优化[J]. 噪声与振动控制, 2021, 41(6): 67-70.

HU Ming-yang, PENG Zhen-rui, WANG Zeng-hui, et al. Multi-Objective Optimization of Vibration Reduction of Suction-Opening Devices Based on Kriging Model[J]. Noise and Vibration Control, 2021, 41(6): 67-70.

[13] 宋全刚, 王琦, 张承, 等. 基于 ANSYS 分析的水冷散 热器多目标优化[J]. 流体机械, 2022, 50(4): 65-70.

SONG Quan-gang, WANG Qi, ZHANG Cheng, et al. Multi-Objective Optimization of a Water-Cooled Heatsink Based on ANSYS Analysis[J]. Fluid Machinery, 2022, 50(4): 65-70.

[14] 李奇涵, 孟楷博, 韩小亨, 等. 基于 Kriging 模型的钢 铝异质板料无铆钉铆接结构工艺参数优化[J]. 锻压技 术, 2022, 47(1): 36-42.

LI Qi-han, MENG Kai-bo, HAN Xiao-heng, et al. Optimization on Structural Process Parameters in Clinching for Steel-Aluminum Heterogeneous Sheets Based on Kriging Model[J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47(1): 36-42.

[15] 伍建军,谢周伟,黄裕林,等.基于田口方法柔性铰 链应力对设计参数的灵敏度分析[J].机械强度,2016, 38(2):252-258.

WU Jian-jun, XIE Zhou-wei, HUANG Yu-lin, et al. Sensitivity Analysis on Stress of Flexible Hinges to Design Parameters Based on Taguchi Method[J]. Journal of Mechanical Strength, 2016, 38(2): 252-258.

责任编辑:曾钰婵