

基于响应面与 3DCS 的车身钣金件定位布局优化设计

王俊豪

陕西重型汽车有限公司汽车工程研究院

摘要: 针对车身钣金件装配偏差导致的试制问题, 提出了一种基于 Box—Behnken 法与 3DCS 的车身钣金件焊装夹具定位布局优化设计方法。分析了重卡前风窗上横梁定位块坐标参数对装配偏差的影响, 得到最优定位设计参数水平。利用 3DCS 建立前风窗上横梁柔性装配偏差仿真模型, 结合响应面法确定最优设计方案。根据优化后的工艺参数指导工装夹具设计并进行零件试生产, 有效减少了装配偏差, 证实了该方法的实用性。

关键词: 钣金件; 焊装夹具; 定位布局; 响应面; 3DCS

0 前言

汽车白车身由柔性钣金件焊接装配而成, 白车身的焊装质量对整车性能影响较大。白车身钣金件焊装定位通过夹具实现, 夹紧点的位置变化影响装配偏差的波动, 选择合理的定位策略优化方法及布局方式尤为重要。

目前, 企业对于白车身钣金件焊装夹具定位点的优化通常采用比较法, 难以得到全局最优。设计人员需进行多次模拟后, 根据经验反复修改来确定夹紧点的布局合理性。传统的装配分析方法将白车身钣金件考虑为刚性件, 忽略了零件在装焊过程的重力、焊接等变形, 在进行模拟分析过程中耗时长, 且优化效率低下, 不能满足研发生产需求。

本文以某重卡前风窗上横梁为研究对象, 分析定位块坐标对测点偏差的影响, 确定合理定位设计参数水平, 然后利用 3DCS 软件进行前风窗上横梁柔性装配偏差分析, 通过响应面法对零件关键测点装配间隙尺寸偏差的值进行优化, 并得到最优参数组合。基于最优工艺参数组合, 在 3DCS 软件中验证其有效性。结果表明, 多目标优化预测结果与模拟结果误差小, 可用于指导工装夹具设计。

1 装配定位原理及定位设计参数分析

1.1 装配定位原理

重卡白车身总成由薄板冲压件焊装而成, 在装配

过程中, 刚度不足的柔性薄板件因重力作用在法平面会产生微量变形, 传统的“3—2—1”定位原则不再适用, 故 $N-2-1$ ($N \geq 3$) 的定位策略成为主流, 如图 1 所示。

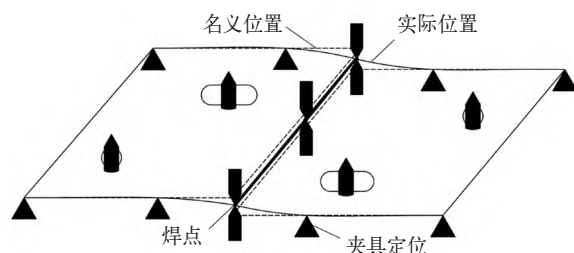


图1 两薄板件4—2—1定位方式

前风窗上横梁三维装配模型如图 2 所示, 上、下本体均为柔性薄板件, 其定位策略为 6—2—1 装配方式, L1 ~ L6 为主平面定位块的原始设计位置, H1 和 H2 为二次定位孔的位置, 是零件测点。在进行尺寸偏差分析时, 3DCS 软件中 Autobend 装配方式可以有效解决主定位面过约束定位问题, 其装配顺序是先执行主定位面 3—2—1 刚性装配, 然后选取 Bend 点进行几何弯曲变形处理。

1.2 定位设计参数分析

采用 3DCS_Autobend 装配方式分析前风窗上横梁

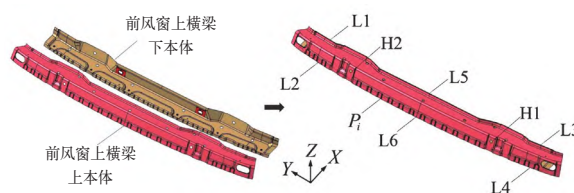


图2 前风窗上横梁三维装配模型

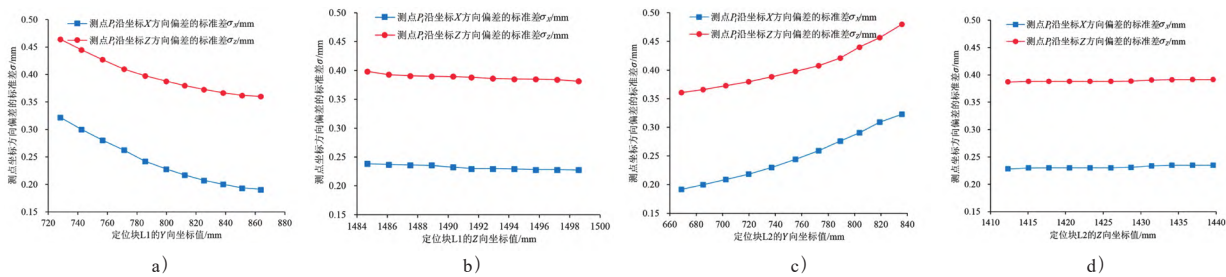


图3 测点坐标方向偏差的标准差与定位块坐标参数关系曲线

装配偏差，以影响较大的（L1 ~ L4）定位块空间坐标值为参数变量，分析定位块的单坐标参数对测点不同方向偏差的影响趋势。参照原始定位方案，主定位面在 X 向为定位块支撑方向，定位块 X 向坐标变化较小，故不作为定位块的单坐标考虑范围；由于定位块不限制零部件 Y 向运动，仅需研究测点 X 向和 Z 向尺寸偏差。根据前风窗上横梁几何模型及定位方案可知，分析测点偏差的标准差与 L1、L2 定位块坐标参数之间的曲线关系，即可说明（L1 ~ L4）定位块对装配偏差的影响程度，如图 3 所示。

由图 3 可知，定位块 Y 方向坐标值对目标测点偏差影响较大，Z 方向坐标值影响不显著。参照装配模型几何尺寸，（L1 ~ L4）定位块 Z 向的坐标变化范围较小，分别为 15 mm、28 mm、15 mm 和 28 mm，因此在设计试验时，不再考虑定位块 Z 向坐标值，仅选取装配过程中影响较大的定位块 Y 向坐标作为变量因素，进行优化目标的装配偏差分析。

2 基于 3DCS 柔性建模及工艺优化设计

2.1 3DCS 柔性建模

根据图 2 所示前风窗上横梁装配模型，为了真实反映定位、夹紧、焊接和释放四个工艺过程，本文采用 3DCS 有限元柔性模块进行柔性建模，以精准模拟装配过程零部件的装配偏差。在进行模拟装配前，需对模型进行几何前处理，定义前风窗上横梁组件的材料及单元物理属性，然后将带有物理属性的网格单元模型导入 3DCS 软件进行节点关联，通过有限元模型节点与三维偏差分析模型点耦合得到满足要求的刚性矩阵、质量矩阵和网格文件。

为真实地反映前风窗上横梁柔性薄板件装配关系，在不考虑热膨胀影响的情况下，采用 3DCS_Autobend 装配方式进行主定位面约束，结合实际工艺过程进行柔性仿真模拟计算。前风窗上横梁组件材料及物理属性见表 1。前风窗上横梁网格单元如图 4 所示。前风

窗上横梁 3DCS 柔性分析流程，如图 5 所示。

表 1 前风窗上横梁组件材料及物理属性

零件名称	材料类型	弹性模量 / (N/mm ²)	密度 / (t/mm ³)	泊松比	厚度 /mm
上下本体	DC04	2.07E+05	7.8E-09	0.28	0.80



图4 前风窗上横梁网格单元

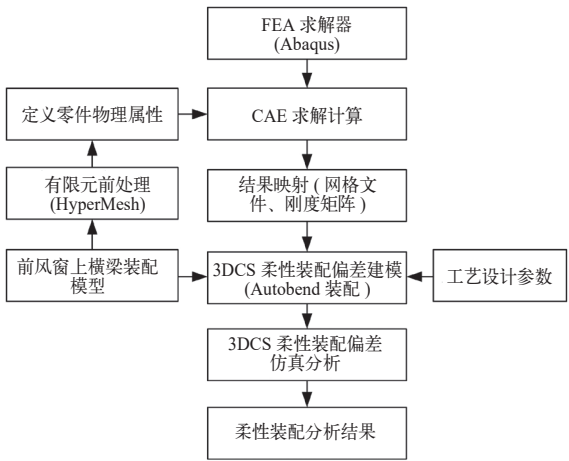


图5 前风窗上横梁 3DCS 柔性分析流程

2.2 Box—Behnken 试验设计

采用 Design Expert 13 进行 BBD 试验设计，BBD 试验设计适用于 2 ~ 5 因素优化试验。本试验为 4 因素 3 水平，试验次数 29 次。通过上述定位块坐标参数影响趋势分析可知，确定以影响较大的（L1 ~ L4）定位块 Y 向坐标值（A、B、C、D）变化为工艺参数变量，每个参数变量对应模型上点的坐标，将关键测点装配间隙尺寸偏差的值作为目标函数。前风窗上横梁定位

块及焊点布置方案如图 6 所示。综合考虑定位块坐标原始设计参数及变化区间，确定 BBD 试验的工艺参数及水平见表 2。试验方案及结果见表 3。

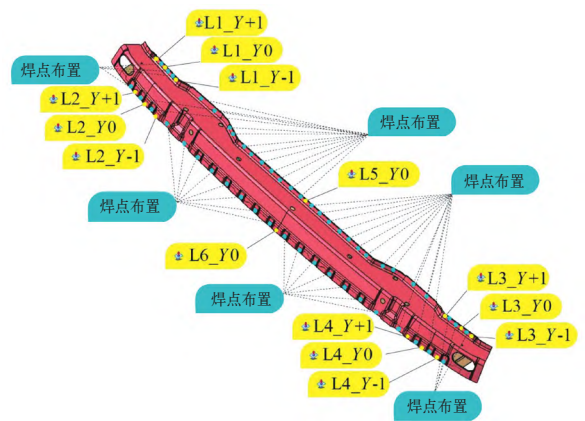


图 6 前风窗上横梁定位块及焊点布置方案

表 2 BBD 试验因素及水平

		-1	0	1
L1	X	420.926	429.752	437.717
	Y	738.752	799.734	852.234
	Z	1493.885	1491.521	1489.386
L2	X	285.725	294.891	306.464
	Y	682.211	749.292	816.154
	Z	1426.014	1425.984	1425.046
L3	X	437.717	429.752	420.807
	Y	-852.234	-799.734	-738.688
	Z	1489.386	1491.521	1493.908
L4	X	306.464	294.891	285.725
	Y	-816.154	-749.292	-682.211
	Z	1425.046	1425.984	1426.013

2.3 响应面模型建立及结果分析

通过建立的 3DCS 柔性装配仿真模型，进行前风窗上横梁蒙特卡洛（Monte Carlo）模拟装配，完成表 3 试验设计方案仿真分析。使用 Design Expert 软件分析表 3 试验数据，通过对影响二次方程模型的一次项、二次项和常数项的显著性进行检验，见表 4。建立多元回归模型，拟合得到关键测点偏差目标值与（L1 ~ L4）定位块向坐标（A、B、C、D）之间的二次多项回归方程如下：

$$\begin{aligned} y = & 1.3926 + 0.0012A - 0.024B - 0.0112C - 0.0709D - \\ & 0.0019AB + 0.0084AC - 0.0014AD + 0.0018BC - \\ & 0.0092BD - 0.0118CD + 0.0307A^2 - 0.0199B^2 - \\ & 0.0126C^2 + 0.0861D^2 \end{aligned} \quad (1)$$

表 3 试验方案及结果

方案	L1	L2	L3	L4	Y /mm
1	-1	0	0	1	1.439535
2	0	0	0	0	1.392610
3	0	1	-1	0	1.355792
4	-1	1	0	0	1.374651
5	0	0	-1	-1	1.523405
6	0	1	1	0	1.337498
7	0	0	0	0	1.392610
8	0	-1	0	1	1.409092
9	-1	0	-1	0	1.420239
10	0	0	1	1	1.388477
11	0	-1	1	0	1.376756
12	1	0	1	0	1.398994
13	0	-1	-1	0	1.402186
14	0	0	0	0	1.392610
15	1	1	0	0	1.384287
16	0	1	0	1	1.340793
17	0	0	-1	1	1.435611
18	0	0	1	-1	1.523274
19	0	-1	0	-1	1.539651
20	1	0	0	1	1.429814
21	1	0	-1	0	1.403972
22	-1	-1	0	0	1.421892
23	0	0	0	0	1.392610
24	0	1	0	-1	1.508002
25	0	0	0	0	1.392610
26	1	-1	0	0	1.439201
27	-1	0	1	0	1.381725
28	1	0	0	-1	1.597888
29	-1	0	0	-1	1.602105

由表 4 方差分析结果可知，该模型的 F 值为 44.3700，P 值 < 0.0001，所以，模型是显著的。对于测点偏差目标值而言，B、D、A²、D² 对其影响极显著（≤ 0.0001）。工艺参数对测点影响顺序为：定位块 L4 > 定位块 L2 > 定位块 L3 > 定位块 L1。

2.4 响应面模型精度检验

为了能准确地预测前风窗上横梁关键测点偏差目标值，在拟合得到二阶响应面近似模型后，须对响应面进行精度检验。一方面采用决定系数检验响应面模型拟合情况，其值越接近于 1，则表示响应面模型精度越高。使用 Design Expert 软件分析，得到模型的决定系数和修正决定系数，见表 5。

由表 5 可知，响应面模型的决定系数均大于 0.95，说明模型准确度较高。

另一方面，结合响应适应度图直观分析模型的拟

表 4 响应面模型的方差分析

方差来源	平方和	自由度	平均方差	F 值	P 值	显著性
模型	0.1344	14	0.0096	44.3700	< 0.0001	显著
A	0.0000	1	0.0000	0.0756	0.7874	
B	0.0069	1	0.0069	31.8900	< 0.0001	
C	0.0015	1	0.0015	6.9700	0.0194	
D	0.0604	1	0.0604	278.9300	< 0.0001	
AB	0.0000	1	0.0000	0.0680	0.7980	
AC	0.0003	1	0.0003	1.3000	0.2734	
AD	0.0000	1	0.0000	0.0350	0.8543	
BC	0.0000	1	0.0000	0.0588	0.8119	
BD	0.0003	1	0.0003	1.5500	0.2333	
AC	0.0006	1	0.0006	2.5500	0.1324	
A ²	0.0061	1	0.0061	28.2500	0.0001	
B ²	0.0026	1	0.0026	11.8300	0.0040	
C ²	0.0010	1	0.0010	4.7600	0.0467	
D ²	0.0481	1	0.0481	222.3200	< 0.0001	
残差	0.0030	14	0.0002			
总和	0.1374	28				

表 5 响应面模型的决定系数

目标函数	决定系数	修正决定系数
y	0.9780	0.9559

合效果。如图 7 所示为实际值与预测值分布，图 8 为残差与预测值分布。从图 7 中可以直观地看到各测试样本点分布于对角线上或两侧，接近拟合直线。图 8 数据点的残差值随机分布且无明显规律。由此推断出建立的响应面近似模型拟合效果良好，比较精确。

综上所述，所建立的响应面模型精度较高，可以

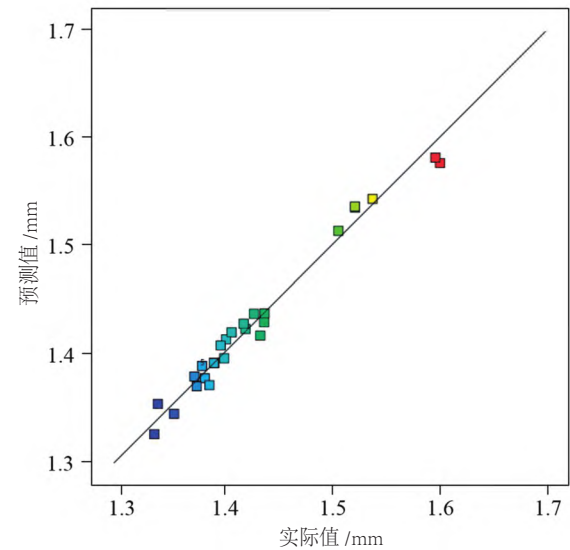


图 7 实际值与预测值分布

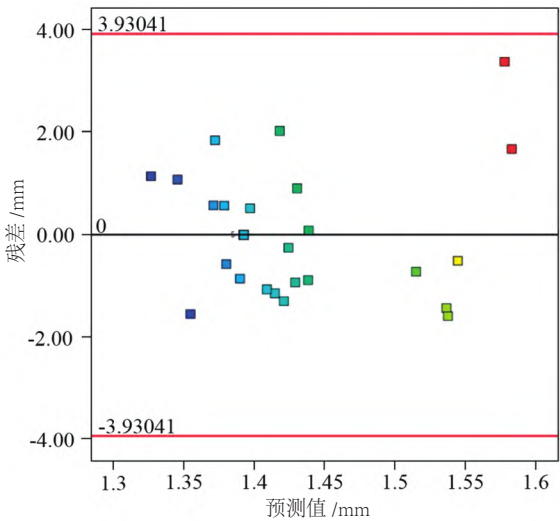


图 8 残差与预测值分布

用来预测关键测点装配间隙尺寸偏差。

3 最优参数组合模拟

使用 Design Expert 13 进行参数优化，以关键测点装配间隙尺寸偏差的作为目标，基于响应面模型进行定位块坐标参数组合优选，确定的最优参数值：A 为 -0.598、B 为 0.775、C 为 0.994 和 D 为 0.124，转化为 (L1 ~ L4) 定位块 Y 向真实坐标值：A 为 761.565、B 为 801.110、C 为 -739.010 和 D 为 -740.855。通过网格模型节点确定 (L1~L4) 定位块真实坐标值，见表 6。

表 6 最优参数下的定位块坐标值

		初始方案	优化方案
L1	X	420.825	424.227
	Y	738.769	761.565
	Z	1493.922	1493.001
L2	X	294.891	303.619
	Y	749.292	801.110
	Z	1425.984	1425.191
L3	X	429.752	420.963
	Y	-799.734	-739.010
	Z	1491.521	1493.875
L4	X	306.464	293.578
	Y	-816.154	-740.855
	Z	1425.046	1425.971

在最优参数组合下采用 3DCS 软件进行柔性装配模拟，得出关键测点装配间隙尺寸偏差目标值 y 的预测值与模拟值，见表 7。预测值和模拟值的误差为 0.1%，说明最优参数组合下目标的预测值与模拟值较吻合，证明了二阶响应面模型的有效性。

表 7 最优参数组合的预测及模拟结果

参数	A	B	C	D	预测值	模拟值
数值	-0.598000	0.775000	0.994000	0.124000	1.336311	1.337389

4 试验方案验证

采用优化后的定位参数进行模拟验证。在前风窗上横梁建立 3 处间隙测量点，如图 9 所示，作为衡量装配质量指标。在 3DCS 中对前风窗上横梁的原始定位方案与优化设计方案分别进行仿真分析，每次 Monte Carlo 模拟 2000 次装配，获得对比分析结果，见表 8、图 10 所示。

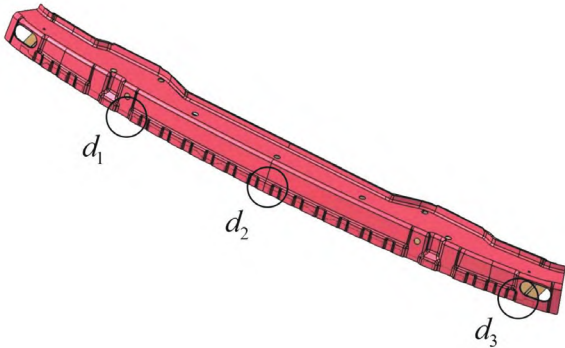


图 9 前风窗上横梁装配间隙测点

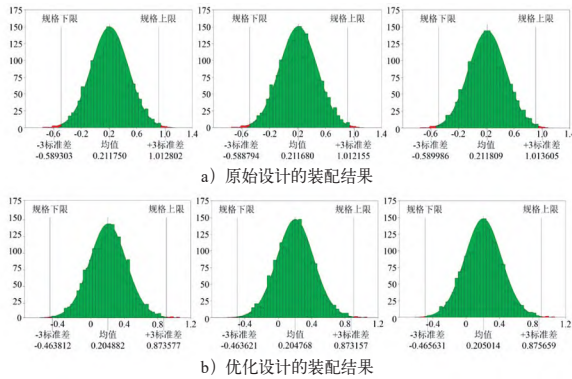


图 10 原始设计与优化设计的数值结果对比

表 8 原始设计与优化设计的数值结果对比

方案	装配结果	测量结果			
		d ₁	d ₂	d ₃	平均值
原始设计	平均尺寸/mm	0.211750	0.211680	0.211809	0.211746
	标准差/mm	0.267018	0.266825	0.267265	0.267036
	超差率(%)	0.65	0.65	0.65	0.65
优化设计	平均尺寸/mm	0.204882	0.204768	0.205014	0.204888
	标准差/mm	0.222898	0.222796	0.223548	0.223081
	超差率(%)	0.25	0.20	0.25	0.23

从表 8 和图 10 可知，前风窗横梁定位布局优化设计方案下，关键测点装配间隙的平均测量值比原始方案降低 3.2%，标准差的平均值降低 16.5%，平均超差

率降低了 64.6%。

实际生产中采用优化后的定位块目标参数指导工装夹具设计，并进行前风窗上横梁试焊验证。采用检具对零件总成进行多目标点检测，结果显示：相比原始定位夹紧方案，测点合格率提升 11.69%。但由于公司的商业保密性，无法提供具体的实物生产验证结果。

5 结语

本文提出了一种基于 Box—Behnken 法与 3DCS 的重卡前风窗上横梁焊装夹具定位布局优化设计方法。

通过建立 3DCS FEA 三维柔性装配偏差模型和 BBD 试验，分析前风窗上横梁定位块坐标参数对装配间隙尺寸偏差的影响，并在 Design Expert 软件中进行目标参数优化。采用最优参数进行预测，得到关键测点装配间隙尺寸偏差和与模拟值相差 0.1%，证明优化设计方法的有效性。

与原始设计方案相比，前风窗上横梁定位布局优化设计方案中测点装配间隙的平均测量值比原始方案减小 3.2%，平均标准差降低 16.5%，平均超差率降低了 64.6%，试生产验证测点合格率提升 11.69%。这表明该定位布局优化设计方案能显著提高零件的装配质量。

参考文献

[1] 胡朝辉, 刘建文. 基于 PCWR 的薄板件装配偏差计算与控制研究[J]. 汽车工程学报, 2017, 7(6): 423-431.

[2] REZAEI ADERIANI A, WÄRMEFJORD K, SÖDERBERG R, et al. Optimal Design of Fixture Layouts for Compliant Sheet Metal Assemblies[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 110(7-8): 2181-2201.

[3] REZAEI ADERIANI A, HALLMANN M, WÄRMEFJORD K, et al. Integrated Tolerance and Fixture Layout Design for Compliant Sheet Metal Assemblies[J]. Applied Sciences, 2021, 11(4): 1646-1646.

[4] YANG B, WANG Z, YANG Y, et al. Multi-objective Optimization of Fixture Locating Layout for Sheet Metal Part Using Kriging and MOBA[J]. Procedia CIRP, 2022, 112: 418-423.

- [5] LIU Z, SUN Y. Fixture Layout Optimization for Car Dashboard Based on N-X Locating Principle[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2022, 236(9): 1282-1292.
- [6] KUMAR A, JADON G P S, PANDIT P P. Design, Optimization, and Analysis of Machining Fixture Layout Under Dynamic Conditions[J]. International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology, 2023, 11(4): 4022-4038.
- [7] VINOSH M, NITHISH RAJ T, PRASATH M. Optimization of Sheet Metal Resistance Spot Welding Process Fixture Design[J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 45: 1696-1700.
- [8] KHODABANDEH M, SARYAZDI M G, OHADI A. Multi-Objective Optimization of Auto-body Fixture Layout Based on An Ant Colony Algorithm[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2020, 234(6): 1137-1145.
- [9] ALSHAMERI T, DONG Y, ALQADHI A. Declining Neighborhood Simulated Annealing Algorithm to Robust Fixture Synthesis in A Point-Set Domain[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 119(11-12): 8003-8023.
- [10] HU F W. Digital Twin-Driven Reconfigurable Fixturing Optimization for Trimming Operation of Aircraft Skins[J]. Aerospace, 2022, 9(3): 154.
- [11] CAI W. Robust Pin Layout Design for Sheet Panel Locating[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2006, 28(5): 486-494.
- [12] 伍建军, 王子宁, 任崇轩, 等. 基于响应面法的升降机滚筒线支架轻量化设计[J]. 机械设计与制造, 2020, (8): 263-266.