

车门铰链结构的优化设计及控制方法

黄洲，范清林，王连昌，陈丽，柯留洋，向杰，蔺昭辉
重庆长安汽车股份有限公司

【摘要】本文采用 CAE 分析及六西格玛设计相关理论，确定车门铰链结构优化设计的关键技术特性及可测量技术指标、关键参数因子等，并建立对应功能传递函数；同时，通过 Minitab17 软件分析及响应因子优化方法，确定车门铰链结构优化设计的最优参数解。结果表明：基于某小型 SUV 车型，在车身包络及造型锁定的前提下，轴向刚度（总变形）及重量轻为车门铰链优化设计关键技术特性，且主要由铰链料厚、铰链材质及阴铰链臂长 3 个关键参数因子综合确定；在满足基本功能要求及强制标准下，冲压式铰链综合最优，且料厚 4.5mm、铰链材质 QStE380MT 及阴铰链臂长 52mm 为车门铰链结构优化设计最优解，且在最优解条件下，车门铰链（以后门上铰链总成为例）总变形、重量及车门下掉量均满足设计目标及要求。

【关键词】 总变形，重量，铰链料厚，铰链材质，阴铰链臂长

Optimization Design and Control Method of Door Hinge Structure

Huang Zhou, Fan Qinglin, Wang Lianchang, Chen Li, Ke Liuyang, Xiang Jie, Lin Zhaozhui
Chongqing Changan Automobile Company Limited

Abstract: By using CAE analysis and six Sigma design theory, the key technical characteristics, measurable technical indicators and key parameter factors of the optimization design of door hinge structure were determined, and the corresponding function transfer function was established. At the same time, through Minitab software analysis and response factor optimization method, the optimal parameter solution of door hinge structure optimization design is determined. Which based on a small SUV, the results show that under the premise of body envelope and shape locking, the total deformation and weight are the key technical characteristics of door hinge optimization design, and are mainly determined by the thickness of hinge material, hinge material and the length of the female hinge arm. In order to meet the basic functional requirements and mandatory standards, the hinge material thickness of 4.5mm, hinge material QStE380MT and female hinge arm length of 52mm are the optimal structural design solutions of the door hinge, and under the optimal solution conditions, the total deformation and weight of the door hinge (rear door hinges are always taken as an example) meet the design objectives and requirements.

Key words: total deformation, weight, hinge material thickness, hinge material, female hinge arm

引言

近年来，随着物联网、大数据、云计算、人工智能（AI）等新技术的快速发展，汽车行业进入了全新的发展通道，各大造车新势力、ICT 企业等大举“入侵”汽车市场，整车汽车市场陷入了前所未有的竞争白热化状态。为了抢占市场，各大车企不断进行技术创新、价格下探等，上演了一幕幕营销大战。然而，如何做到成本与销量平衡的问题成为各大车企的首要目标及任务。鉴于此，各大企业均通过对一些关键零部件进行优化设计，如零部件模块化入库、零件结构优化等^[1]，意图寻找到最佳、最合适的方案来实现整车成本的控制及降低^[1-3,5]。

车门铰链作为车门固定和保持在车身上的核心零件之一^[4-6,9]，具有控制车门运动、保持车门与车身相对位置等重要功能^[10-11]，但车门铰链的结构设计需综合考虑整车的造型、车间工艺、设计成本、零件重量目标、性能指标要求等。鉴于此，本文基于现有某小型 SUV 车型（造型及工艺等已确定），选取车门铰链（后门上铰链总成为例）为研究对象，采用 CAE 分析及六西格玛设计理论对其进行优化设计及分析，确定关键参数因子对车门铰链总变形、重量的影

响，并通过 DOE 试验验证及试验优化等方式求出铰链料厚、铰链材质、阴铰链臂长的最优参数解。同时，基于优化后模拟预测及试验结果，反向验证总变形及重量满足设定目标及要求。

1 关键技术指标确认

根据车门铰链的功能及需求，本文基于内部客户（主要为某小型 SUV 项目组）及外部用户（主要为买车用户）两大角度对用户需求（VOC）进行系统分析（图 1）。内部用户主要需求为车门铰链成本低、易装配维护、重量轻等，而外部用户主要需求为车门铰链耐用。鉴于此，本文通过逐一梳理并获取到可靠耐用、成本低等 7 项需求为客户的核心需求（VOC）。同时，基于 KANO 模型对其分类分析，确认满足基本功能、强制标准两项为其基本需求，耐用、重量轻等 5 项为其一元需求，暂无魅力需求（图 2）。

基于上述分类，本文进一步利用成对比较法，按照比胜次数多少对客户需求从高到底依次进行了排序：满足强制标准 A>满足基本功能 B>可靠耐用 C>重量轻 E>成本低 D>通用性好 G>易于装配及维护 F。同时，为了进一步确认核心技术指标，本文建立了客户需求与可测量指标的质量屋，其中，满足强制标准、满足基本功能两项客户需求因判定标准

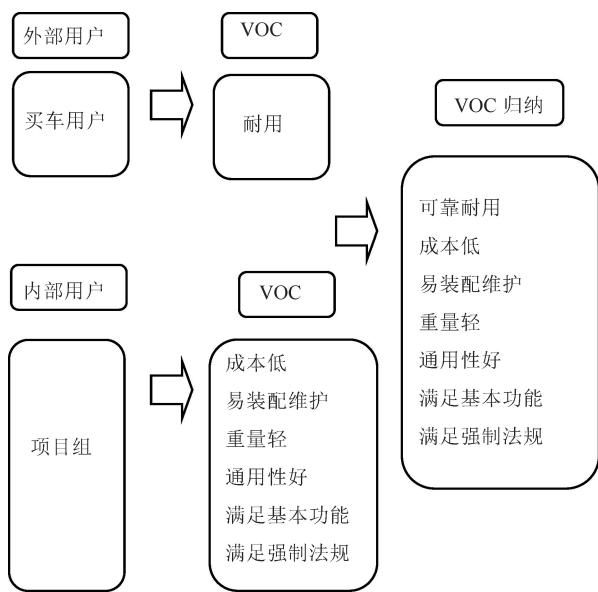


图 1 用户需求 (VOC) 分析

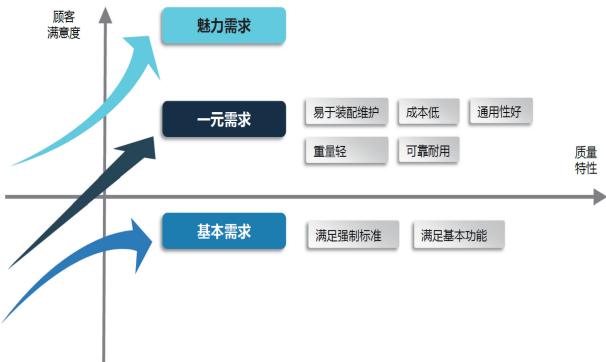


图 2 KANO 模型分析

为车门铰链试验后铰链不脱落或车门能够正常开闭^[12]，暂无具体可测量值；同时，车门铰链可靠耐用可分解为轴向刚度（总变形量）及耐久性两个技术指标^[13]；车门通用性好可分解为修改周边零件数量及安装点变化量两个技术指标。鉴于此，基于对可测量指标进行优先度占比分析可知，确认车门铰链总变形量及零件重量作为用户需求及可测量的两项关键设计技术指标（表 1、表 2）。

表 1 客户需求成对比较

需求	A	B	C	D	E	F	G
A							
B	A						
C	A	B					
D	A	B	C				
E	A	B	C	E			
F	A	B	C	D	E		
G	A	B	C	D	E	G	

注：A—满足强制标准；B—满足基本功能；C—可靠耐用；D—成本低；E—重量轻；F—易装配维护；G—通用性好。

表 2 客户需求与可测量指标质量屋

产品功能需求（可测量指标）								
望大/小/目	-	+	-	-	T	-	-	-
需求	重要度	总变形	耐久	重量	成本	材料	修改零件数量	安装点变化量
强制标准	10	9	0	0	0	0	0	0
基本功能	9	3	0	0	0	0	0	0
可靠耐用	7	9	9	9	0	3	3	3
成本低	5	0	0	9	9	3	3	3
重量轻	3	9	0	9	3	3	3	3
通用性	2	9	0	9	0	3	3	3
装配维护	1	3	0	3	0	3	3	3
指标得分	228		63	156	54	54	54	54
优先度 (%)	34.4	9.5	23.5	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1

注：-表示期望值小；+表示期望值大；T 表示期望目标值；

2 关键参数因子确认

2.1 车门铰链选型

基于车门铰链市场对标，目前绝大多数车型的车门铰链主要集中于冲压式铰链、铸造式铰链及型钢式铰链三种，其中冲压式铰链具有工艺简单、性能好、成本低等特点，而铸造式铰链及型钢式铰链尽管性能优于冲压式铰链，但其成型工艺、成本等均较高（表 3）。同时，本文结合 Pugh 矩阵对三种主流车门铰链方案进行相对比较筛选，确认方案一，即冲压式铰链总得分最高，确定其为某小型 SUV 车型最佳选择，而后续的设计也针对此方案展开（表 4）。

表 3 市面常见铰链类型

序号	类型	示意图	描述
1	冲压式		工艺简单，性能好，成本低
2	铸造式		工艺复杂，性能优，成本高
3	型钢式		工艺一般，性能佳，成本高

表 4 Pugh 矩阵方案对比

选择标准	权重	冲压式	铸造式	型钢式
功能及强制标准	10	S	S	S
可靠耐用	8	S	S	S
重量轻	6	S	-	-
成本低	4	S	-	-
可模块化	2	S	S	S
易装配维护	1	S	S	S

(续)

选择标准	权重	冲压式	铸造式	型钢式
比胜次数+	/	0	0	0
比输次数-	/	0	2	2
相当次数0	/	0	3	0
相对优势分数	/	0	0	0
相对劣势分数	/	0	-10	-10
总计分数	/	0	-10	-10

2.2 关键参数因子

通过系统功能分析，初步识别客户需求与系统功能及零部件关键参数之间关系，确认铰链材质、铰链厚度、阴铰链臂长、与侧围安装点数量及与车门安装点数量等为车门铰链设计重点考虑参数因子（因某小型 SUV 车型车身包络及数据锁定，阳铰链臂长固定，不做参数选择）（图 3）。同时，本文对所筛选关键技术参数进行产品需求功能分析，确认铰链料厚、铰链材质及阴铰链臂长相对占比最大（合计 87.8%），并设定本文优化设计的关键设计参数因子（表 5）。

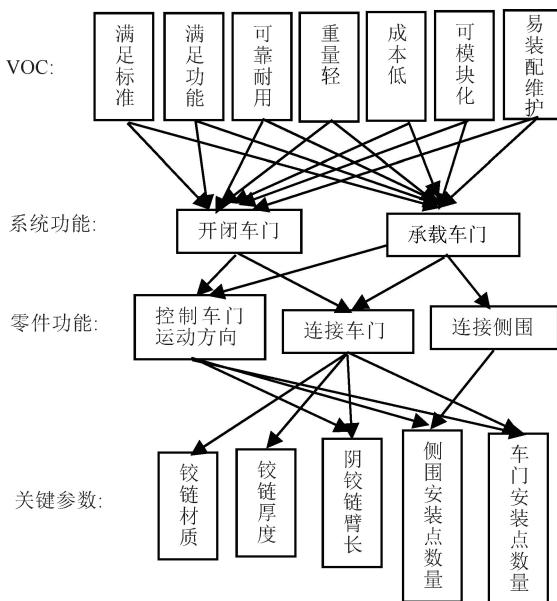


图 3 车门铰链系统功能分析图

表 5 产品需求功能分析

产品功能需求（可测量指标）

望大/小或望目		-	T	-	-	-
需求	重要度	铰链料厚	铰链材质	阴铰链臂长	车门安装点	侧围安装位置点
变形量	9	9	9	9	3	3
重量轻	7		9	3	0	0
技术指标		144	144	102	27	27
相对重要度/%		32.4	32.4	23	6.1	6.1

3 功能传递函数

基于所识别出来的关键技术设计指标和关键设计参数因子，将车门铰链总变形性能 (Y_1) 和车门铰链重量 (Y_2) 作为响应变量，影响 Y_1 、 Y_2 的因子参数设定为 X_1 (铰链料厚)、 X_2 (铰链材质)、 X_3 (阴铰链臂长)，并建立二者之间的传递函数：

$$Y=F(X_1, X_2, X_3) \quad (1)$$

式中， X_1 为铰链料厚 (mm)； X_2 为铰链材质对应屈服强度 (MPa)； X_3 为阴铰链臂长 (mm)。

同时基于关键参数因子的市场对标，确定对应影响因子的水平值，即取值范围区间：铰链料厚水平值为 4.5~5.0mm；铰链材质对应屈服强度：380~460MPa；阴铰链臂长为 50~55mm（表 6）。

表 6 确定影响因子水平值

设计参数	水平值		试验因子	说明
铰链料厚/mm	4.0	5.0	X_1	基于对标值选定最小和最大值为低水平和高水平
铰链材质 (屈服强度)	380	460	X_2	基于对标，以冲压铰链常相对应材质的屈服强度最小和最大值设定为低水平和高水平
阴铰链臂长/mm	50	55	X_3	基于车型需求，阴铰链臂长选择为 50-55mm 之间，且将最小和最大值设定为低水平和高水平

注：屈服强度 380 表示 QStE380MT 材质；屈服强度 460 表示 QstE460MT 材质。

4 试验设计

4.1 方案设计

由于关键参数试验因子（铰链料厚、铰链材质及阴铰链臂长） < 5 个，因此本文设计 3 因子 2 水平+1 个中心点的全因子试验，试验次数一共 $2^3 + 1 = 9$ 次（图 4）。

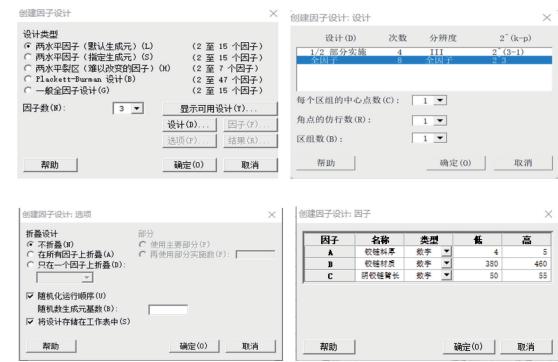


图 4 试验设计方案

4.2 数据收集

通过 CAE 模型分析和 CATIA 模型分析计算，进行全因

予 DOE 试验并收集数据（合计 9 组），为后续的分析做准备（表 7）。

表 7 试验数据收集

运行序	运行序	中心点	区组	铰链料厚	铰链材质	阴铰链臂长	总变形	重量
7	1	1	1	4	460	55	6.2	440
6	2	1	1	5	380	55	6.5	475
8	3	1	1	5	460	55	5.4	489
3	4	1	1	4	460	50	5.2	425
5	5	1	1	4	380	55	7.6	423
2	6	1	1	5	380	50	5.3	432
1	7	1	1	4	380	50	6.2	389
4	8	1	1	5	460	50	4.3	452
9	9	0	1	4.5	420	52.5	5.9	443

4.3 试验分析

4.3.1 DOE 试验

采用 Minitab17 对响应变量 1——总变形进行 DOE 试验，根据数据分析结果可知，存在 P 值大于 0.05 高阶项，并基于一次消除一个非显著项且从 P 值最大的高阶项开始的原则依次删除后重新分析（图 5）。同时，根据标准的柏拉图及残差图分析可知：回归项对应的因子 P 值均小于 0.05，弯曲值大于 0.05，回归方程有效；同时， $R\text{-sq} = 96.97\%$ ，表明模型拟合较好。

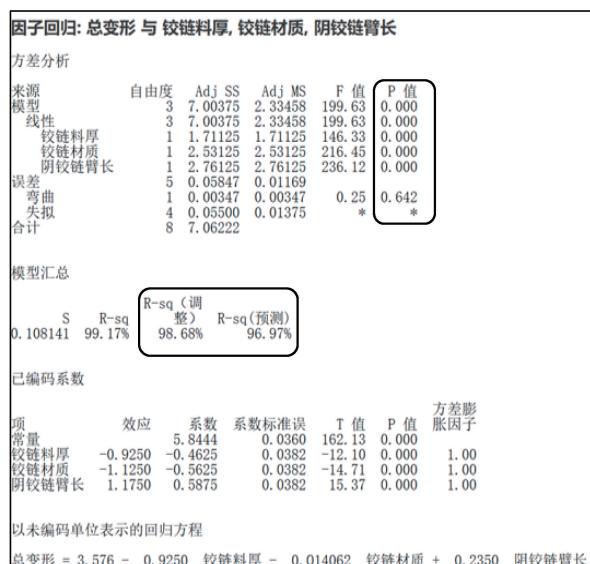
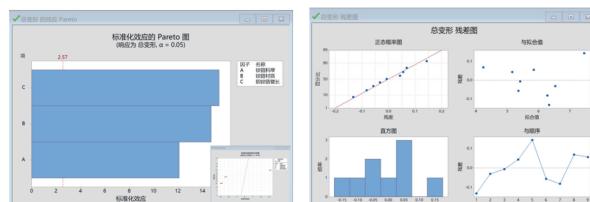


图 5 响应变量（总变形）分析

采用 Minitab17 对响应变量 2——重量进行 DOE 试验，根据数据分析结果可知，存在 P 值大于 0.05 高阶项，基于一次消除一个非显著项且从 P 值最大的高阶项开始的原则依次进行删除后重新分析；根据标准的柏拉图及残差图分析得出结论：回归项对应的因子 P 值均小于 0.05，弯曲值大于 0.05，回归方程有效；同时， $R\text{-sq} = 92.48\%$ ，表明模型拟合较好（图 6）。

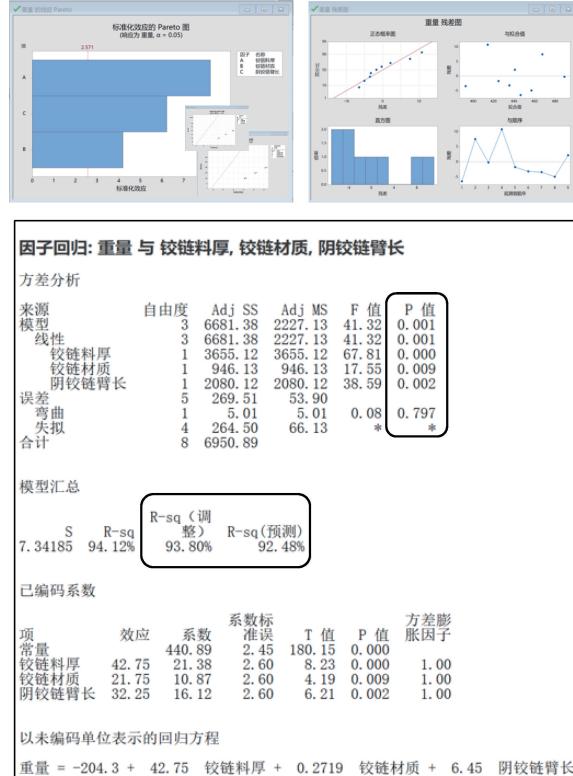


图 6 响应变量（重量）分析

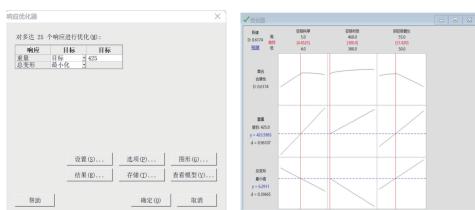
4.3.2 试验优化

运用 Minitab 17 响应优化器对关键设计因子进行响应优化设计（图 7），以刚度（总变形）最小、重量目作为优化目标，得出理论最优解：铰链料厚 4.4523mm；铰链材质 380；阴铰链臂长 51.82mm。进一步，结合市面上实际材料规格情况，将因子进行优化归整，设定最优解为：铰链料厚 4.5mm；铰链材质 QStE380MT；阴铰链臂长 52mm（表 8）。

表 8 因子优化归整

设计参数	最优解	水平	编号
铰链料厚/mm	4.45235	4.5	X1
铰链材质	380	QStE380MT	X2
阴铰链臂长/mm	51.82	52	X3

基于上述最优解对优化方案进行综合拟合，预测结果为：铰链刚度总变形值 $6.28944\text{mm} \leq 8.0\text{mm}$ ，满足性能目标；重量 418.789g ，此设计质量经评估得到项目组认可（项目组初步预估重量目标 $\leq 425\text{g}$ ）；同时，随机生成 5000 组数据进行蒙特卡洛模拟，总变形（ $P_{pk} = 1.97$ ）和重量（ $P_{pk} = 1.84$ ）均 > 1.67 ，表明设定各因子公差水平均满足过程能力要求（图 8、图 9）。



优化图

响应优化: 重量, 总变形

参数	响应	目标	下限	目标	上限	权重	重要度
重量	重量	389	425.0	489.0	1	1	1
总变形	总变形	最小值	4.3	7.6	1	1	1

解

解	铰链料厚	铰链	阴铰链	重量	总变形	拟合值	复合意性
1	4.45253	380	51.82	425.059	4.92336	0.900195	

多响应预测

变量	设置
铰链料厚	4.45253
铰链材质	380
阴铰链臂长	51.82

响应	拟合值	标准误	95% 置信区间	95% 预测区间
重量	425.06	4.60	(413.25, 436.87)	(402.79, 447.32)
总变形	4.9234	0.0677	(4.7494, 5.0973)	(4.5954, 5.2513)

图 7 响应优化分析

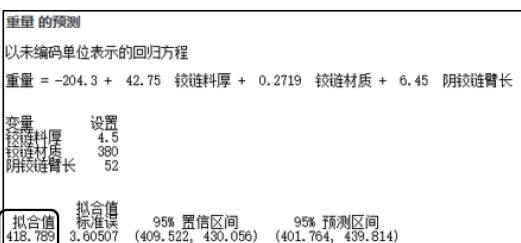
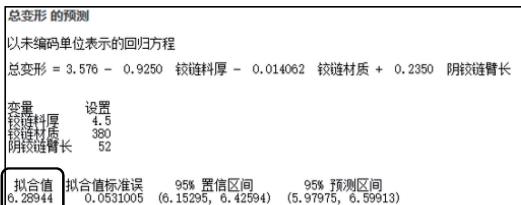


图 8 最优解拟合分析

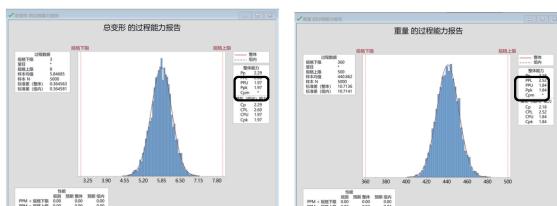


图 9 过程能力分析

4.4 试验验证

按照优化阶段的因子选择进行工程化数据设计，并通过单体试验测试零件轴向刚度（5 组），结果表明：经 1000N 垂直向下轴向作用力后，样件变形量≤8mm，测试合格。同时，基于 3D 数据分析，对车门铰链重量进行测量为 419g，满足设定 425g 要求，验证结果合格（表 9、图 10）。

表 9 单体轴向刚度试验

试验组别	试验要求	总变形/mm	结果
第一组	经 1000N 垂直向下轴向作用力后，样件变形量≤8mm	6.45	合格
第二组		6.28	合格
第三组		6.80	合格
第四组		6.94	合格
第五组		6.48	合格

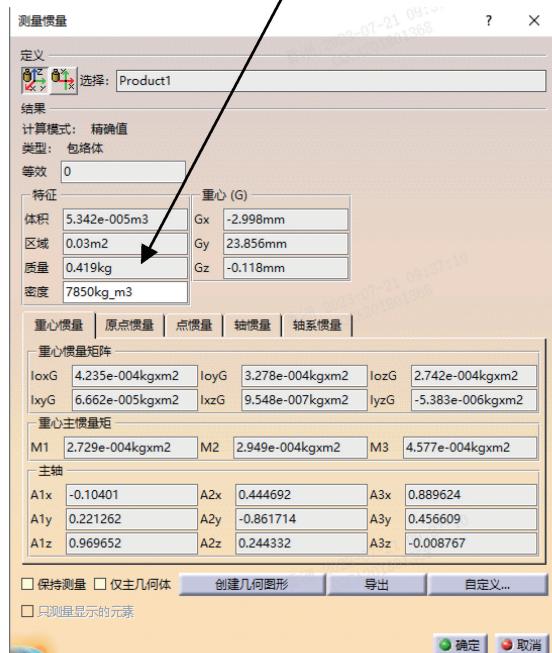
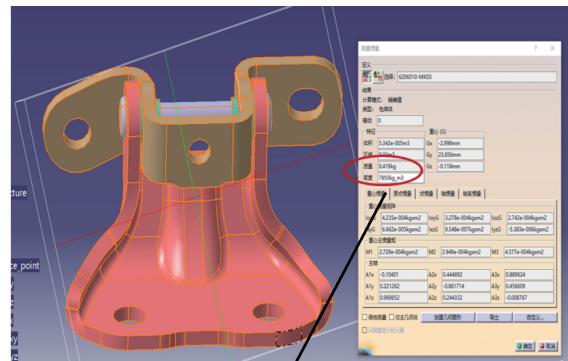


图 10 3D 数据分析

为进一步保证优化结果的合理性，本文将设计优化后的车门铰链于整车搭载进行 CAE 下掉仿真分析，反向验证单体零部件设计的合理性。结果表明：车门下掉量 5.91mm，满足≤11mm 的要求，验证结果合格（图 11、表 10）。

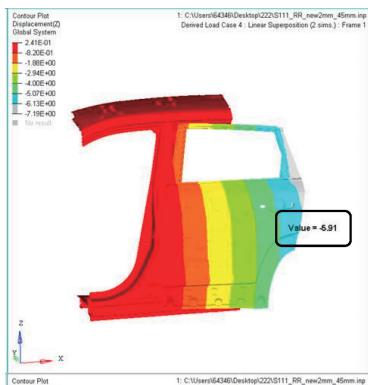


图 11 车门下掉 CAE 仿真分析

表 10 性能及重量目标确认

类别	指标	目标	编号	当前值
性能	总变形	≤11mm	Y1	5.91mm
重量	重量轻	≤425g	Y2	419g

5 结论

1) 基于车门铰链功能及需求，确认车门铰链轴向刚度（总变形值）及重量轻为用户需求及可测量两项关键设计技术指标。

2) 基于某小型 SUV 车型，在整车现有造型、车间工艺、设计成本等综合要求下，冲压式铰链综合最优；且确认铰链料厚、铰链材质及阴铰链臂长为关键设计参数因子。

3) 以轴向刚度（总变形）望小、重量望目做为优化目标，并结合市面上实际材料规格情况，将因子进行优化归整，设定最优解为：铰链料厚 4.5mm；铰链材质 QStE380MT；阴铰链臂长 52mm。

4) 按照优化阶段的因子选择进行工程化数据设计，并对其进行单体零部件垂向刚度测试及重量测试，同时通过整车 CAE 下掉仿真分析进行反向验证优化结果的合理性。结果表明：车门铰链垂向刚度（总变形）验证结果合格；车门铰链重量测量，满足设定要求；整车车门下掉量满足设定要求，验证结果合格。

参 考 文 献

- [1] 马天生, 苏志勇, 刘金龙, 等. 浅谈几种轿车车门铰链的应用研究对比 [C]//2021 中国汽车工程学会年会论文集 (5). 北京: 机械工业出版社, 2021.
- [2] 虎仪鑫, 成起, 王青. 热熔钻技术在车门铰链螺母板制造中的应用研究 [J]. 汽车实用技术, 2018 (17): 245-249.
- [3] 罗燕, 尹和俭, 王华杰, 等. 车门铰链系统与车门下沉刚度的相关性 [J]. 计算机辅助工程, 2021 (1): 32-38.
- [4] 包涛, 习俊通, 徐武彬, 等. 车门铰链倾角对车门关闭力影响的研究 [J]. 机械设计与制造, 2021 (4): 211-214.
- [5] 雷学明, 王大鹏. 车门铰链布置设计 [J]. 汽车实用技术, 2015 (3): 19-20.
- [6] 李文玺, 唐淳, 雷学明. 基于造型 CAS 面的车门铰链及车门分缝布置的设计研究 [J]. 汽车实用技术, 2016 (3): 25-29.
- [7] 徐川, 魏雪飞. 一种车门铰链的优化改进 [J]. 汽车实用技术, 2021 (20): 52-58.
- [8] 张晓宇. 六西格玛设计在车门铰链结构优化上的应用 [J]. 汽车与配件, 2017 (9): 84-85.
- [9] 辛勇, 张向超, 兴文. 浅谈汽车门铰链设计 [C]//第十二届河南省汽车工程科技学术研讨会论文集. 郑州: 河南省汽车工程学会, 2015.
- [10] 李华伟. 车门铰链布置研究 [C]//2008 年安徽省科协年会机械工程分年会论文集. 合肥: 安徽省机械工程学会, 2008.
- [11] 王秋锋, 石永泉, 罗康. 车门铰链的设计开发 [C]//第八届河南省汽车工程科技学术研讨会论文集 (下). 郑州: 河南省汽车工程学会, 2011.
- [12] 全国汽车标准化技术委员会. 汽车门锁及车门保持件的性能要求和试验方法: GB 15086—2013 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [13] 李文彬. 车门垂向刚度分析及优化 [J]. 机电技术, 2015 (1): 57-59.