**文章编号：**1674-8085（2023）01-0085-05

# 基于多目标的纯电汽车全铝车身轻量化设计

何君儒[1]，*谢世坤[2,3]，吁安山[2,3]

（1.江西江铃新能源汽车有限公司，江西，南昌 330052；2. 井冈山大学机电工程学院，江西，吉安 343009；
3. 吉安市轻合金材料重点实验室，江西，吉安 343009）

**摘　要：**为了提高全铝车身整体轻量化水平，提高纯电汽车续航里程，在汽车概念设计阶段引入轻量化开发理念。首先利用 SFE 参数化建模软件，建立全铝车身的参数化模型；进一步结合车身灵敏度分析及 Isight 集成优化技术找出对刚度、模态、安全等性能目标参数影响明显的零部件，确定各零部件对性能的敏感程度，再进行多学科优化分析。结果表明：通过优化分析，白车身质量减轻 5.3 kg，整体性能水平满足设计要求，达到轻量化目标。

**关键词：**SFE 参数化建模；全铝车身；轻量化；

**中图分类号：**TH16　　**文献标识码：**A　　DOI：10.3969/j.issn.1674-8085.2023.01.013

# LIGHTWEIGHT DESIGN OF ELECTRIC VEHICLE WITH ALL-ALUMINUM BODY BASED ON MULTI-OBJECTIVE

HE Jun-ru[1], *XIE Shi-kun[2,3], YU An-shan[2,3]

（1. Jiangxi Jiangling Group New Energy Vehicle co.LTD, Nanchang, Jiangxi 330052, China; 2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Jinggangshan University, Ji'an, Jiangxi 343009, China; 3. Key Laboratory of Light Alloy Materials of Ji'an City, Ji'an, Jiangxi 343009, China）

**Abstract：**In order to improve the overall lightweight level of all-aluminum body and improve the range of pure electric vehicle, the concept of lightweight development was introduced in the concept design stage of the vehicle. Firstly, the parametric model of aluminum body is established by SFE parametric modeling software. Furthermore, the body sensitivity analysis and Isight integrated optimization technology were combined to find out the parts which had obvious influence on the performance target parameters such as stiffness, modal and safety, and determine the sensitivity of each part to performance, and then the multidisciplinary optimization analysis was carried out. The results showed that after optimization analysis, the mass of body-in-white is reduced by 5.3kg, the overall performance level meets the design requirements, and the lightweight target is achieved

**Key words:** SFE parametric model; all-aluminum vehicle body; lightweight

## 0　引言

当前，汽车工业正处在重要转折关口，国家碳达峰碳中和重大战略扎实推进，传统燃油汽车正一步步被纯电动汽车淘汰[1]。电池包成为了纯电汽车的主要动力来源，其整车重量就成为决定续航里程的关键因素。经实验分析，汽车自重每降低 100 kg，可实现单位电量转化续航里程效率提升 8%[2]。因此，车身轻量化技术已经成为了各主要汽车生产厂家研究的重点方向。

铝合金具有密度底、比强度高、耐腐蚀等优异的材料性能。有研究表明，达到同样的力学性

收稿日期：2022-01-11；修改日期：2022-05-05
基金项目：国家自然科学基金项目(51165010)；江西省自然科学基金课题(20181BAB206028)；江西省教育厅科学技术研究重点项目(GJJ2201606)；吉安市重大科技专项（吉财教指〔2020〕83 号）
作者简介：何君儒(1985-)，男，湖北黄梅人，工程师，硕士，主要从事汽车结构仿真及轻量化研究(E-mail:hejr@jmev.com)；
*谢世坤(1973-)，男，江西吉安人，教授，博士，硕士生导师，主要从事材料轻量化研究及材料成型及工艺控制(E-mail::xskun@163.com).

能指标，铝比钢轻 60 %。仅在车身上用铝合金来代替传统钢板就可使白车身质量减轻约 47%，轻质合金材料的应用已经成为汽车行业研究轻量化的重要途径之一，两种材料承受同样冲击，铝板比钢板多吸收冲击能 50%。利用铝合金设计车身成为了汽车行业轻量化主要路径之一。根据铝合金的材料成型特性，全铝白车身主要以挤出型材与高压真空铸铝组合，通过铝点焊及螺栓连接而形成笼式框架车身结构。另外，由于纯电汽车电池包通常布置在地板下面，通常情况下为了提高续航里程，取消了传统车上特有的地板纵梁，以便最大限度地布置电池包。纵梁作为车身主要受力件，直接关系到整车正面碰撞的安全性能、弯曲刚度和扭转刚度。由此，对于纯电动全铝汽车设计来说，轻量化与车身安全等属性存在相互矛盾的特性。如何设计既轻又安全的车身成为汽车行业研究的重难点。

基于此，以本公司开发的某款纯电汽车全铝式白车身为研究对象，利用 SFE-CONCEPT 参数化建模技术建立全铝车身的参数化模型[3]，结合多学科优化技术，以车身轻量化为目标，模态、弯扭刚度为边界约束，在概念设计阶段完成满足多性能目标的轻量化车身设计。

## 1 参数化建模及性能分析

SFE-CONCEPT 作为一款参数化设计软件，集成了 CAD、CAE、CAM 等设计与分析功能，可实现全参数化驱动和对设计需求进行响应。在项目设计初期阶段，能快速指导确定最佳设计方案和节省大量的研发时间和成本[3]。同时，SFE 参数化模型可以为车身结构设计和轻量化奠定基础，实现提升整车性能和轻量化水平的目标[4-6]。

本项目为公司全新开发的一款 A00 级全铝纯电汽车，轴距 2250 mm，性能目标为扭转刚度 11000 N.m/°,弯曲刚度 12000 N/mm。车身结构主要为型材结构，其截面的大小和厚度直接决定了整车性能水平，利用 SFE 软件，对初始截面进行拉伸，快速形成全铝白车身 SFE 参数化模型，如图 1 所示。

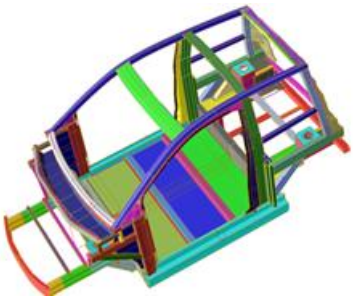


图 1 SFE 参数化模型

Fig.1 SFE parameterized model

全铝车身相应的材料参数如表 1 所示。

**表 1 材料参数**

Table 1 Material parameter

| 材料 | 许用应力 / MPa | 弹性模量 / GPa | 泊松比 |
|---|---|---|---|
| AL6082 | 160 | 71 | 0.33 |
| AL6061 | 180 | 71 | 0.33 |

SFE 软件可快速生成网格模型进行性能分析，整体效率可提升两倍左右，并可利用参数化技术对车身模型进行快速更改，极大地提高设计和分析效率[7]。整车性能分析结果如表 2 所示，位移云图如图 2、图 3 所示。

**表 2 白车身弯扭刚度**

Table 2 Bending and torsional stiffness of body in white

| 分析类型 | 参考车 | EV | 目标 |
|---|---|---|---|
| Torsion（N.m/°） | 9839 | 11538 | 11000 |
| Bending（N/mm） | 15561 | 12446 | 12000 |

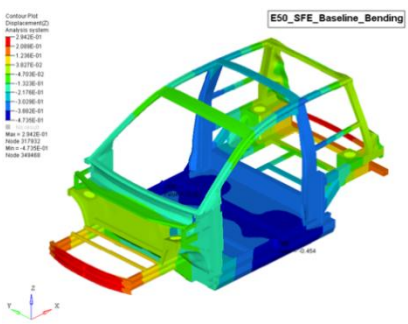



图 2 弯曲刚度位移云图

Fig.2 Cloud diagram of bending stiffness

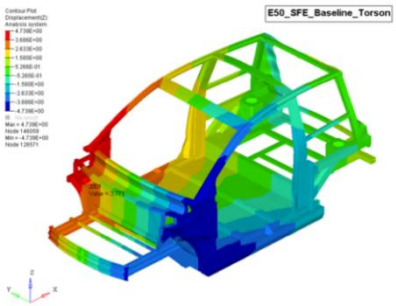



图 3 扭转刚度位移云图

Fig.3 Cloud diagram of torsion stiffness

从分析结果来看，车身扭转刚度大于目标值和标杆车，弯曲刚度小于参考车，但大于设计目标值，两性能目标均满足设计要求。

## 2 车身轻量化设计

在开展车身轻量化设计时，不能仅以减重为目标，还需同时考虑如模态、强度、刚度等多方面性能。在进行优化分析时，需将上述其他性能因素作为约束条件进行同时分析[8]。由于设计多个性能目标，增加了计算的难度和时间。为此，本文建立了以轻量化为目的，模态及刚度为条件的车身轻量化流程，以实现在不影响主要性能前提下的白车身减重目标，具体流程如图 4 所示。

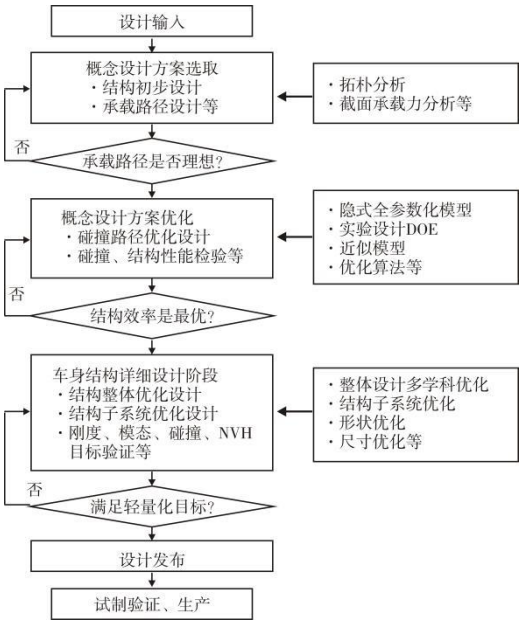



图 4 车身轻量化设计流程图

Fig4. Flow chart of lightweight design

本文以白车身质量最小为目标函数 $f(x)$，以弯扭刚度值及一阶模态设为性能约束函数，建立了白车身多目标性能优化数学模型如下：

$$\begin{cases} \min f(x,u(x)) \\ s.t.\ \ h_j(x,u(x))=0, J=1,2,\cdots,m \\ g_{i(x,x(u))} \le 0, i=1,2,\cdots,n \end{cases}$$

式中，$x$ 为设计变量，$f(x,u(x))$为目标函数，$h_j(x,u(x))$为等式约束，$j$ 为等式约束个数，$g_i$ 为不等式约束，$i$ 为不等约束个数[2]。

依据已经建立的全参数化全铝白车身模型，结合铝合金结构的截面特点，设定 12 个截面作为变量，如图 5 所示。通过设定的 12 个关键截面，只需对变量截面定义不同的截面特性，厚度、位置等，即可驱动 SFE 建立的参数化车身模型作出相应的变化[9]。根据项目前期设计的整车性能目标，在保证性能目标的前提下达到轻量化目的。

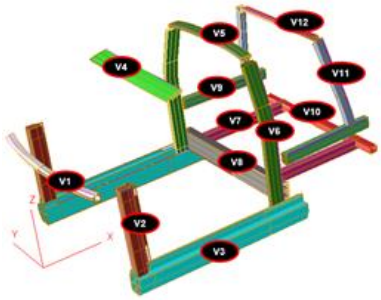



图 5 车身截面示意图

Fig.5 Body section diagram

**表 3 截面说明**

Table 3 Section shows

| 变量 | 名称 | 变量范围 |
|---|---|---|
| V1 | 前风挡下横梁截面 | （-1，1） |
| V2 | A 柱下竖直梁截面 | （-1，1） |
| V3 | 纵梁截面 | （-1，1） |
| V4 | 顶棚第一横梁截面 | （-1，1） |
| V5 | 顶棚第二横梁截面 | （-1，1） |
| V6 | B 柱截面 | （-1，1） |
| V7 | 后纵梁截面截面 | （-1，1） |
| V8 | 后地板横梁截面 | （-1，1） |
| V9 | 后上纵梁截面 | （-1，1） |
| V10 | 后防撞梁截面 | （-1，1） |
| V11 | C 柱截面 | （-1，1） |
| V12 | 顶棚第三横梁截面 | （-1，1） |

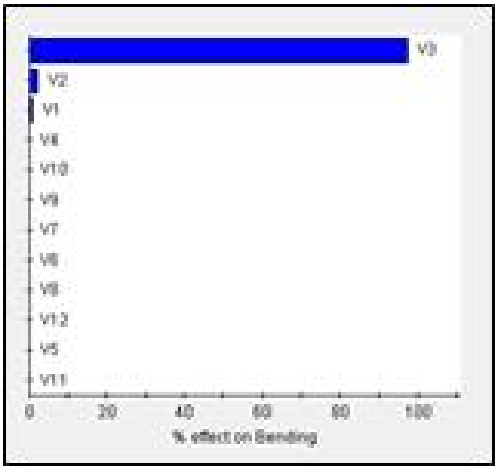
利用集成软件 ISIGHT 的优化算法实现 CAE 驱动车身满足多属性（安全、模态、强度）的结构优化设计、平台开发；由于车身零部件众多，要达到最优的轻量化方案通常需要计算几百个甚至几千个样本量，从项目开发的时间节点来看，往往来不及开展这样的工作。因此，本文采用少量的变量来构建响应面，在响应面上采用模拟退火算法来寻找优化的减重方案，这样可以大大的缩短轻量化开发时间。首先，基于 ISGIHT 建立正交实验设计（DOE）；选取后纵梁截面、前风挡下横梁截面、C 柱截面等 12 个截面的厚度、形状、位置作为正交变量，以重量最小、白车身弯、扭刚度值作为目标值响应进行分析。

通过对 1000 个近似模型进行计算，优化结果如表 4 所示，完成减重目标 5.3 kg。由正交试验数据分析得到的主效应图如图 6 所示，由图分析可知，对质量、弯曲及扭转扭刚度影响最大的变量为 V1、V2、V3、V4 四个截面。其中纵梁截面 V3 的影响最大。通过上述分析为后续整车轻量化及性能提升指明了优化方向。

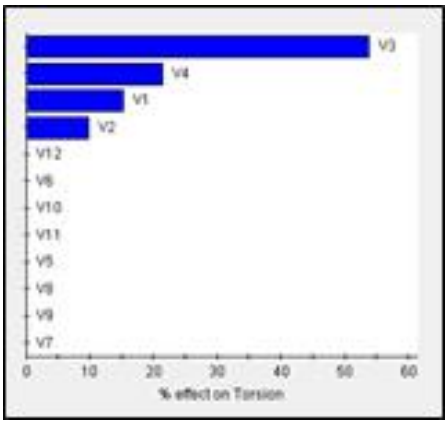
**表 4 优化分析结果**

Table 4 Optimization analysis results

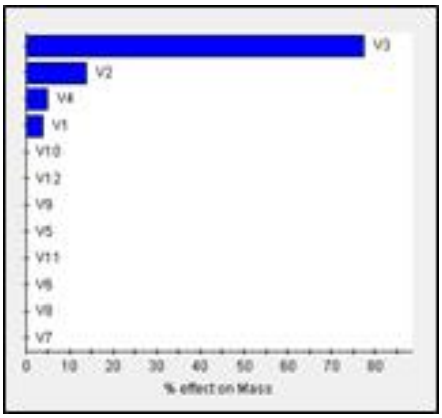
| 性能指标 | 优化前 | 优化后 |
|---|---|---|
| Torsion（N.m/°） | 11538 | 11246 |
| Bending（N/mm） | 12446 | 12068 |
| MASS（kg） | 110.6 | 105.3 |




（a）弯曲刚度主效应图




（b）扭转刚度主效应图




（c）质量主效应图

图 6 主效应图

Fig.6 The main effect diagram

## 3 性能验证

试制样车完成后，为了验证车身弯曲刚度性能是否达到原始设计目标，随机抽样选取了三台白车身进行弯扭刚度实验，主要实验方法如下：

（1）弯曲刚度：通过安置在车身左、右门槛梁上的夹具，施加最大 4448 N 的垂直向下载荷，记录车身左、右门槛梁下部中点各测点的挠度。左右门槛梁处依次施加 1112 N、2224 N、3336 N、4448 N 的垂直向下的载荷，测点布置在门槛梁下方中心向外 10 mm 处，左、右对称布置。

（2）扭转刚度：扭转台通过车身前悬位置支撑，对白车身施加最大到 3000 N/m 的扭矩，并记录载荷施加后在左、右纵梁上各测点的挠度（含前悬、后悬位置）。在车身前悬位置处依次施加 1000 N.m、2000 N.m、3000 N.m 的扭矩，中间测

点均布置在门槛梁下底中心线上，左右对称布置；前、后悬测量在支撑位置处。试验具体约束和加载如图 7 所示。

图 7 弯扭刚度实验

Fig.7 Bendin torsional stiffness experiment

实验结果显示，弯曲刚度为 12510 N/mm，扭转刚度为 10518 N.m/°，与设计目标误差均在 5%之内，满足性能要求。

## 4 结论

在保证整车弯扭刚度及模态性能的基础上，通过参数化建模技术及灵敏度分析实现了全铝白车身的轻量化设计，车身质量减轻 5.3 kg，整车刚度性能基本不变。本研究提出的研究方法不但实现了铝合金车身的轻量化目标，同时也为其他车型的轻量化设计提供了一种新的开发思路。

## 参考文献：

[1] 关绍康,姚波,王迎新.汽车铝合金车身板材的研究现状及发展趋势[J].机械工程材料,2001,25(5):12-18.

[2] 唐辉,门永新,毛雪峰,等.基于隐式参数化的车身概念开发[J].汽车工程,2014,36(10):1248-1253.

[3] 史国宏,陈勇,姜欣,等.基于全参数化模型的白车身多学科设计优化[J].汽车工程,2010,32(11):928-931.

[4] Benedyk J. Light metal in automotive applications[J].Light Metal Age,2000,58(10):34-35.

[5] 高云凯,杨欣,金哲峰. 轿车车身刚度优化方法研究[J]. 同济大学学报:自然科学报,2005(8):1095-1097.

[6] 王志亮.基于弯曲刚度和扭转刚度的白车身优化分析[J]. 机械科学与技术,2008(8):1021-1024.

[7] 陈德朋.基于模态参数的白车身有限元 模型修正[D].长沙:湖南大学, 2018.

[8] 吕天佟,王登峰,王传青.隐式参数化白车身多目标协同优化设计[J].北京理工大学学报,2019,39(5):447-453.

[9] 段月磊,毕传兴.基于刚度和模态灵敏度分析的轿车车身轻量化研究[J].噪声与振动控制,2010( 6) :79-82.