

基于拓扑优化的新能源整车结构轻量化与强度协同优化

肖中校

海南宇龙机械科技有限公司 海南 海口 570311

摘要：轻量化与结构安全性、行驶续航之间的平衡是新能源车身开发中的核心难题。本文针对某纯电动 SUV 白车身，构建以弯曲、扭转、制动及转向工况为约束的整车有限元模型，采用变密度拓扑优化方法开展多目标加权柔度最小化计算，识别下车身纵梁、门槛梁及前后轮包等区域的主传力路径，据此完成结构的删繁就简与结构优化，随后对保留的主要承载构件进行厚度尺寸优化，并在强度及刚度约束下求取质量最低方案。优化后白车身减重效果明显，弯曲与扭转刚度保持达标，各工况应力峰值均位于许用范围内，表明拓扑优化与尺寸优化衔接的协同路线可兼顾轻量化收益与承载安全。

关键词：拓扑优化；新能源汽车；轻量化；结构强度；协同优化

引言：新能源车型随着需求的续航里程不断增加促使电池质量整车占比逐渐偏大，整车质量普遍高于同尺寸燃油车，而续航能力又与质量呈反比关联，这使得减重成为新能源汽车开发中优先事项。但在车身钣金厚度削减或传力构件精简的过程中，局部应力攀升和刚度退化的风险随之上升，极端工况下可能危及结构完整性。拓扑优化不依赖初始构型，可在设计域内自动搜寻满足性能要求的最优材料布局，为摆脱经验试错法的减重模式提供了新思路。本文将拓扑优化引入某纯电动 SUV 白车身开发，构建从材料宏观分布到底板厚度精细匹配的两级优化流程，并在强度校核中检验最终方案的承载可靠性。

1 拓扑优化基本原理与协同设计思路

1.1 变密度法及材料插值模型

变密度法的基本思想是将结构离散为有限单元后为每个单元赋予一个连续变化的伪密度，单元的弹性模量通过材料插值函数与该伪密度相关联，从而使离散的拓扑决策转化为连续变量优化问题。选用的 SIMP 模型采用幂函数形式的插值方案，通过构建单元密度与材料单行模型的非线性映射关系，通过设置惩罚因子 P 来抑制中间密度单元的变化，使最终构型趋于“有”或“无”的二元分布。这一方法概念直观、求解效率较高，在汽车结构优化领域获得了广泛应用。

1.2 多工况柔度加权策略

车身在实际服役中同时或交替承受多种载荷，单一工况下的最优拓扑往往不能兼顾其他工况下的力流需

求。本文采用加权柔度法处理多工况问题，将弯曲、扭转、制动和转向四类工况的柔度按其在整车使用中的贡献程度赋以权重，合并为单一目标函数。权重分配主要依据各工况的载荷大小和作用频次，弯曲和扭转因持续作用于行驶全程而赋予较高权重，制动与转向工况权重略低，从而保证优化结果在各类受力状态下均有稳定的传力效率^[1]。

1.3 强度评价方法与协同优化框架

静力学强度评价采用 von Mises 准则，以等效应力与材料屈服强度之比衡量各部位的安全裕度。对于车身不同区域采用差异化的许用应力标准，主承力构件取较高安全系数，一般连接件和辅助支架适当放宽。本文提出的协同优化框架分两阶段运行：首先通过拓扑优化确定材料在整车层面的宏观分布，提取高密度区域作为必需的传力骨架；然后在此基础上对保留构件的板厚实施尺寸优化，在强度、刚度和模态约束下追求质量最低。两阶段共享同一载荷工况体系和评价标准，确保优化方向的连贯性。

2 整车有限元建模与初始性能评估

2.1 有限元模型建立

研究对象为某钢铝混合车身纯电动 SUV。以三维数模为基础建立有限元模型，覆盖白车身、前后悬架、副车架及电池包等主要结构。钣金类部件以四边形壳单元离散，铸铝和锻钢件采用四面体实体单元，焊点、焊缝及螺栓连接分别采用 ACM 单元、共节点壳单元和刚性梁单元模拟。关键承载区域网格实施局部细化以保

证应力捕捉精度。铝制电池包既以质量均布反映电芯的重量效应,又以四面体实体单元机壳单元保留其局部刚度贡献。模型总单元规模控制在合理范围内以确保求解效率。

2.2 初始结构的强度与刚度表现

对初始结构进行四类典型工况的计算分析,以建立后续优化的性能基线。弯曲工况下纵梁沿长度方向变形连续,最大垂向位移出现在座舱门槛梁中部区域,满足设计目标规定的限值要求,弯曲刚度指标合格。扭转工况模拟单轮悬空状态,应力最高点出现在减震塔座与纵梁的连接过渡区,该处应力接近 SAPH440 高强钢的屈服极限,安全裕度明显偏小,是整个初始结构中最为薄弱的环节。制动工况施加纵向惯性载荷后,前纵梁根部应力水平较高但尚未超限,仍保有一定安全裕度。模态分析结果显示,一阶扭转模态频率与整车怠速下冷却风扇工作激励频率保持错开,动态特性尚可接受^[2]。总体而言,初始结构的静强度和刚度基本达到设计目标,但扭转工况的安全裕度严重不足,且白车身整体质量偏大,存在通过拓扑优化识别并去除冗余材料的明确空间。

2.3 可减重潜力区域的初步判断

根据应力分布与变形形态,初始结构中应力水平较低的区域约占全部钣金件面积的五分之一以上,主要分布在后侧围上部、顶棚中后段及部分内板加强件上。这些区域的材料在静强度工况下参与力流传递的程度有限,属于拓扑优化中可能被削减的对象。需要结合拓扑优化给出定量依据。

3 拓扑优化与传力路径重构

3.1 优化模型建立与求解

拓扑优化的前处理阶段需要对可变域与不变域进行明确的约束。本文将白车身全部钣金件划定为可变域,包括纵梁、横梁、立柱、门槛、轮罩及顶棚等主要结构件均纳入材料分布优化的范畴。所有用于连接悬架、动力总成及电池包的安装孔位和连接面等硬点被设置为不变域,以保证优化后这些接口的位置、尺寸和形状不发生改变,确保与周边系统的装配兼容性不受影响。目标函数定为四类典型工况加权柔度最小化,等价于在给定材料用量下最大化结构整体刚度。体积分约束设为初始结构总体积的四分之三。为避免优化结果中出现过于细碎或难以制造的传力路径,施加了最小成员尺寸约束,同时考虑冲压工艺对拔模方向的基本要求。各工况权重经综合评估后确定为弯曲和扭转各占三成、制动和转向各占两成。优化求解采用变密度法中的 SIMP 插值方

案,伴随法求解灵敏度,移动渐近线法驱动迭代更新。整个优化过程经过数十步迭代后各项指标趋于稳定,目标函数和约束条件均达到收敛判据。

3.2 高密度区域分布与传力路径识别

密度云图是拓扑优化结果最直观的可视化呈现,材料密度趋近于 1 的区域表示承载效率高、应当保留材料,密度趋近于 0 的区域表示材料利用效率低、可以考虑去除。分析密度分布结果可以发现,下车体纵梁从前保险杠安装板延伸至后纵梁末端,沿途保持高密度贯通,表明纵向传力路径在弯曲和扭转中承担核心作用,材料布局应保持连续完整。门槛梁在前门铰链至 B 柱区段密度集中程度较高,向后方逐渐递减,提示后段截面或板厚存在适度调整空间^[3]。前围板横梁与后轮包上部出现斜向高密度带,明确指示抗扭加强筋的最优布置方向。顶棚横梁中部及后侧围内板密度同样较低,属于可精简区域。

3.3 结构重构方案

将密度云图中的高密度区域进行几何化提取和拓扑关系梳理后,可归纳出整车在静强度工况下的三条主传力通道。第一条为前纵梁经门槛梁至后纵梁的纵向通道,是全车最核心的力流骨架,承载弯曲工况下的大部分弯矩以及扭转工况下的纵向剪力。第二条为减震塔座经轮罩内板至 A 柱下段的垂向通道,负责将悬架垂向载荷向上传递至车身顶部。第三条为前围板横梁经中央通道至后横梁的横向通道,主要承担扭转工况下的载荷分配。重构围绕这三条通道展开:纵梁和门槛的主截面维持不变,内部加强板依据密度分布针对性调整;平均密度低于阈值的区域取消原有支架和加强件;后轮包上部的高密度斜向带转化为实体加强筋。重构后零件数量减少,装配层级简化。

3.4 优化后结构的初步校核

优化方案在几何调整完成后需要进行初步力学性能验证。将重构后的白车身模型重新搭建整车 FE 模型,采用与初始结构完全相同的边界条件和载荷输入进行计算,重点关注弯曲刚度、扭转刚度和应力峰值三项核心指标。预分析结果显示,弯曲刚度降幅控制在较小范围内,扭转刚度基本保持持平,表明拓扑优化识别的传力路径在整车局部结构优化后仍保留了结构的核心承载能力。各工况应力水平虽有所上升但仍在许用范围内,高应力区域未出现新的集中点。优化后结构的力学性能经受了初步验证,为后续尺寸优化提供了性能起点。

4 尺寸优化与强度协同校核

4.1 尺寸优化建模

以优化结构为初始构型,选择前纵梁、门槛梁、后纵梁、前围横梁及减震塔座等构件的厚度作为设计变量。这些构件覆盖了纵向传力通道、垂向载荷传递路径以及横向抗扭结构,共同构成整车承载体系的核心。约束条件包含各工况应力峰值低于许用值、一阶扭转模态不低于目标频率以及弯曲刚度不低于目标值,三项约束分别对应强度安全、动态品质和静态刚度三个层面的性能要求。优化目标设定为白车身质量最小,在满足所有约束的前提下追求极致的材料利用效率。由于整车有限元模型规模庞大,直接调用仿真进行优化迭代的计算周期较长,因此采用最优拉丁超立方试验设计获取样本数据并构建径向基近似模型,用优化算法在近似模型上寻优后再用有限元计算验证。近似模型精度经交叉验证确认满足要求后,方可用于后续优化迭代。

4.2 灵敏度引导的厚度调整

灵敏度分析是尺寸优化中的关键环节,用以量化各设计变量变化对各项性能指标的影响程度。分析结果显示,前纵梁厚度对应力约束最为敏感,其厚度变化会直接影响弯曲和制动工况下纵梁根部的应力集中水平,属于减薄时必须审慎对待的高敏感参数。门槛厚度对扭转刚度的贡献最大,适当增加有助于提升整车抗扭性能。减震塔座厚度同时影响局部应力水平和整体扭转变形,该处既要承受悬架输入的高幅值载荷,又承担着向车身传递力流的桥梁作用,因此其优化方向定义为结构局部新增加强筋方式^[4]。相比之下,A柱上部、后侧围内板等部位的厚度变化对各项响应的影响微弱,灵敏度值处于较低水平。据此,对高敏感构件保持或适度增加厚度,对低敏感构件在约束范围内减薄,确保每单位质量投入都能获得最大的性能回报。迭代收敛后各设计变量均取在约束边界附近,表明结构各构件的材料利用效率已达到较高水平。

4.3 优化方案的强度校核

将厚度优化后的完整方案代入整车有限元模型重新计算全部工况,以验证优化方案在实际承载条件下的强度可靠性。弯曲工况下纵梁根部应力较初始值有所回落且分布更均匀,表明结构优化及厚度调整后在纵梁截面上得到了更合理的分配,局部应力集中得到有效缓解。扭转工况中减震塔座周边的峰值应力从初始接近许用上限降至安全区间内,这是拓扑阶段引入斜向加强筋与尺寸阶段增厚塔座协同作用的结果,该处安全裕度得到明显提升。制动和转向工况的应力峰值均有下降或持平,各点应力裕度充足,动态载荷下的结构完整性同样得到

保障。高应力区数量较初始状态缩减,剩余高应力点的量值明显降低,应力分布形态更加合理,整体应力场趋于均匀。综合来看,优化方案在各工况下均满足强度设计要求,证明了尺寸优化方向的正确性。

4.4 综合性能与工艺可行性

优化后白车身质量减幅明显,在同等强度约束下取得了可观的轻量化收益,验证了两级协同优化在减重方面的有效性。弯曲刚度保持稳定,扭转刚度略有提升,后者得益于拓扑阶段识别并引入的斜向加强筋对抵抗扭转变形的贡献。一阶扭转模态频率向高频方向移动,与整车怠速时冷却风险工作激励的间隔扩大,整车的动态品质同步改善。各工况应力峰值与屈服强度的比值均低于安全系数限值,结构强度储备充分,为实际使用中的载荷波动和材料性能偏差留出了足够裕度。工艺评审确认,板厚调整未超出原模具的厚度适应范围,无需重新开模即可实现;零件合并方案减少了焊点数量且不改变主夹具定位基准,装配流程得到简化;新增的斜向加强筋与周边结构无干涉,可在现有焊接夹具上完成定位。优化方案具备良好的制造可行性,可直接纳入现有生产线试制。

结束语

本文将拓扑优化与尺寸优化衔接为两级协同流程,应用于某纯电动SUV白车身的轻量化设计。通过多工况加权柔度拓扑优化,识别出下车体纵梁、门槛及轮拱斜向加强等核心传力路径,据此完成结构的精简重构;进而以板厚为设计变量,在强度与刚度约束下实施尺寸优化,进一步挖掘减重潜力。最终方案在实现明显减重的同时,各工况应力峰值保持在许用范围内,弯曲与扭转刚度未退化。研究表明,拓扑优化与尺寸优化存在良好的力学互补性,将轻量化与强度转化为可协同的设计维度。该流程可迁移性强,可为新能源车型开发前期提供参考。后续需通过物理试验验证优化方案的承载能力与耐久表现。

参考文献

- [1] 郭宁宁. 基于有限元分析与优化的汽车车身结构轻量化设计研究[J]. 内燃机与配件, 2025(14): 111-113.
- [2] 刘涛. 基于先进机械设计的轻量化汽车车身结构研究与优化[J]. 汽车维修技师, 2025(2): 115-116.
- [3] 钟培荣. 智能网联新能源汽车整车结构轻量化关键技术工艺应用[J]. 汽车与新动力, 2024, 7(1): 4-7.
- [4] 宛铜. 新能源汽车轻量化材料应用及车身结构优化研究[J]. 汽车维修技师, 2025(14): 116-117.