

基于有限元的整车结构强度校核与结构改进设计

肖中校

海南宇龙机械科技有限公司

DOI:10.32629/etd.v7i1.22240

[摘要] 整车结构强度关乎行车安全与车辆服役年限,而车身结构做为主要承载部件,其结构强度体现出了很大重要性。传统实物试验、经验校核手段成本高昂、排查范围有限。文章选取乘用车作为研究案例,依托有限元软件搭建整车仿真模型,针对弯曲、扭转、急刹、侧碰四类工况实施强度验算,定位应力集中以及形变超标部位。依照构件受力特征从排布、截面、加强件层面落实优化,优化之后重新仿真校验。数据证明结构应力趋于均匀、形变量下降,各项指标符合安全标准,可为整车结构改良提供参考。

[关键词] 有限元分析; 整车结构; 强度校核; 结构改进; 轻量化

中图分类号: U463.82 **文献标识码:** A

Finite Element-Based Strength Verification and Structural Improvement Design of Complete Vehicles

Zhongxiao Xiao

Hainan Yulong Machinery Technology Co., Ltd.

[Abstract] The structural strength of a complete vehicle is directly related to driving safety and service life, while the body structure, as a primary load-bearing component, is of particular importance to overall structural strength. Traditional physical testing and experience-based verification methods are costly and limited in their scope of investigation. Taking a passenger vehicle as a case study, this paper establishes a complete-vehicle simulation model using finite element software and conducts strength verification under four typical operating conditions: bending, torsion, emergency braking, and side impact. Areas with stress concentration and excessive deformation are identified. Based on the load-bearing characteristics of the components, optimization is carried out in terms of component layout, cross-sectional design, and reinforcement structures, followed by re-simulation and verification. The results demonstrate that structural stress becomes more evenly distributed and deformation is reduced after optimization, with all indicators meeting safety requirements. The study can provide a reference for structural improvement of complete vehicles.

[Key words] finite element analysis; complete vehicle structure; strength verification; structural improvement; lightweight design

引言

整车结构强度是汽车设计阶段必须验证的核心性能指标,直接关系车辆的可靠性。常规的校核方法主要依赖工程经验类比和样车试验,测试过程发现的整车问题需多轮整改优化,导致开发周期延长、迭代成本增加。有限元方法凭借其强大的数值模拟能力,可在样车制造前对整车结构的应力分布与变形特征进行全面预测,已成为车身开发中不可或缺的技术手段之一。本文以某乘用车为研究对象,采用有限元法建立整车结构模型,系统开展多工况强度校核,定位薄弱区域并提出改进方案,旨在为同类车型结构设计提供可靠的结构参考。

1 整车结构强度校核基础与有限元建模

1.1 整车结构强度校核核心指标与工况选取

整车结构强度校核的核心指标包括应力分布、变形量及安全系数。应力分布需满足材料屈服强度要求,各部位计算应力不得超过相应许用值;变形量需控制在设计允许范围内,确保结构刚度满足使用要求;安全系数需达到行业标准,保证结构在各类工况下不产生塑性变形、开裂或失稳等失效现象。结合车辆实际行驶场景,选取四种典型工况开展强度校核:弯曲工况模拟车辆满载行驶于平整路面时的纵向弯曲受力状态;扭转工况模拟车辆行驶在凹凸起伏或者颠簸路面时的扭转受力状态;紧急制

工况模拟车辆高速制动时的惯性载荷作用; 侧面碰撞工况模拟车辆遭受侧面冲击时的受力响应。四类工况覆盖了整车在常规行驶与突发状况下的核心受力场景^[1]。

1.2 整车有限元模型搭建

以某SUV整车三维数模为基础, 在Hyper Work前处理平台中开展几何清理与模型简化。建模过程中去除对整体强度影响较小的细小附件、装饰件及非承载特征, 保留车身骨架、车架、悬架系统、发动机舱等核心承载结构。白车身钣金件以四边形壳单元离散化, 关键承载区域单元尺寸控制在5~8mm, 非承载区域适当放宽至10mm, 过渡区域采用三角形单元衔接, 三角形单元占比控制在5%以内。铸铝减震塔座、锻钢转向节及悬架控制臂等厚壁部件采用二阶四面体实体单元划分, 以准确反映厚度方向的应力梯度。材料属性按部件实际用材分别定义: DC01低碳钢板弹性模量E参数设定206GPa、泊松比0.3、屈服强度170MPa; SAPH440高强度钢弹性模量206GPa、屈服强度305MPa; DC04深冲钢板屈服强度150MPa; 铸铝合金弹性模量70GPa、泊松比0.33、屈服强度220MPa; 其中碳钢材质密度 ρ 定义为 $7.9 \times 10^{-9} \text{ t/m}^3$, 铸铝材质密度 ρ 定义为 $2.7 \times 10^{-9} \text{ t/m}^3$ 。螺焊点、焊缝及螺栓连接分别采用ACM单元、共节点壳单元和刚性单元(rbe2)模拟, 悬架铰接点采用自由度约束模拟实际运动副特性。

1.3 模型可靠性验证

为确保有限元模型的准确性, 采用对比验证法开展模型可靠性检验。将整车模型的一阶扭转模态和一阶弯曲模态分析结果与同平台实车模态试验数据进行对比。仿真计算得到一阶弯曲模态频率仿真值为27.1Hz, 试验值为27.9Hz, 相对误差2.8%; 一阶扭转模态频率为29.7Hz, 试验值为30.5Hz, 相对误差2.6%。两阶关键模态的频率误差均在5%以内, 振型特征一致, 符合工程仿真精度要求。同时, 对模型进行网格质量全面检查, 单元合格率达98%以上, 无畸形单元和冗余单元, 雅可比、翘曲度、长宽比等核心指标均满足求解器收敛性要求。上述验证结果表明, 该有限元模型能够准确反映整车结构的力学特性, 可用于后续强度校核与结构改进分析。

2 整车结构多工况强度校核与结果分析

2.1 弯曲工况强度校核

弯曲工况模拟车辆满载状态下行驶于平整路面时的纵向弯曲受力, 是校核整车核心承载能力的关键工况。本次校核中, 对整车施加满载垂向载荷, 载荷大小依据整车满载质量与重力加速度计算确定, 同时约束前后悬架与车身连接点的位移, 限制其垂向与横向自由度。采用隐式静力求解方案开展强度分析, 求解在相同的收敛控制参数下进行以确保结果可靠性。结果显示, 整车结构整体应力分布较为均匀, 大部分区域应力低于材料屈服强度, 但车身纵梁中部、门槛梁与B柱连接区域出现明显应力集中, 峰值应力达248MPa, 略高于SAPH440材料的许用值(235MPa), 存在塑性变形风险。同时, 车身中部最大垂向变形量为2.2mm, 超出该部位设计允许值(1.5mm)。该区域为整车核心承载部位, 承担着传递纵向载荷、维持车身整体刚度的重要作用,

应力集中与变形超限易引发疲劳开裂, 是后续结构改进的重点区域^[2]。

2.2 扭转工况强度校核

扭转工况模拟车辆单侧车轮驶过凸起路面时的受力状态, 对车身抗扭性能提出较高要求。校核中约束一侧前后悬架连接点位移, 对另一侧悬架施加扭矩2000N·m, 模拟对角车轮抬起的极限工况。分析结果显示, 车架纵梁与横梁连接节点、减震器支座周边应力水平较高, 峰值应力达256MPa, 超过材料许用值(235MPa), 存在塑性变形风险。车身侧面整体扭转角度为1.8deg, 超出设计标准(1.5deg), 表明结构抗扭性能不足。扭转工况下的应力集中区域多为结构连接节点, 受力复杂且易产生应力叠加, 需针对性优化结构连接方式以改善力流传递路径。

2.3 紧急制动工况强度校核

紧急制动工况模拟车辆高速行驶时急刹车产生的惯性载荷作用, 对前部承载结构的强度提出考验。校核中对整车施加0.8g纵向惯性力, 约束车轮与地面接触点位移, 采用隐式静力求解方案计算。分析结果显示, 前纵梁根部、制动踏板支架连接区域应力集中明显, 峰值应力达242MPa, 低于SAPH440许用值(235MPa)但已接近上限(应力比97%), 安全裕度仅3%。车身前部出现纵向变形, 最大变形量为4.8mm, 虽未超出设计允许值, 但应力集中区域长期承受交变载荷, 存在疲劳损伤隐患。同时, 制动过程中悬架连接部位受力较大, 存在应力集中需强化局部结构强度。

2.4 侧面碰撞工况强度校核

侧面碰撞工况采用求解器(LS-DYNA)进行瞬态响应分析, 模拟车辆遭受侧面撞击时的结构响应。根据GB 20071—2025《汽车侧面碰撞的乘员保护》标准要求, 设置移动变形壁障以50km/h的速度垂直撞击车身侧面。校核结果显示, B柱中部、车门防撞梁与车身连接区域出现严重的应力集中与塑性变形, 峰值应力达468MPa, 远超材料屈服强度; 车门侵入量峰值为108mm, 满足GB 20071标准($\leq 150\text{mm}$)的法规要求, 但车门侵入量仍处于偏高的水准, 本文也将以提升侧面碰撞安全性能裕度为优化目标。

3 整车结构改进设计方案

3.1 结构改进总体思路

结合多工况强度校核结果, 以“降低应力集中、控制变形量、提升结构强度”为核心目标, 遵循“局部优化、整体协同”的改进原则, 针对各工况下的强度薄弱区域开展针对性改进。改进过程中兼顾轻量化需求, 避免盲目增加构件厚度导致整车质量大幅上升, 通过优化构件布局、调整截面尺寸、增设加强结构、优化连接方式等手段实现结构强度与轻量化的协同提升。同时, 确保改进方案具备良好的工艺可行性, 适配现有冲压与焊接生产流程。改进设计遵循三项基本原则: 一是局部补强优先于整体加强, 以最小的质量代价解决关键问题; 二是优化力流传递路径优先于单纯增加材料厚度, 从力学机理上改善载荷分配; 三是改进方案需具备良好的工艺可行性, 避免因过度复杂的设计导致制造成本大幅上升。基于上述原则, 针对各薄弱环节的受力特征分别制定差异化改进方案^[3]。

3.2 核心薄弱区域针对性改进

弯曲工况当中纵梁中部、门槛梁-B柱接头存在应力集中、变形超标缺陷。此处加装纵向加强筋,接头直角改成圆角过渡削减应力集中系数,板材厚度从1.6mm上调至1.8mm,强化局部承载力。面对扭转工况节点应力隐患,改良纵梁横梁接头形式,焊接加固板提高节点刚度,扩大减震支座和车身接触面积分散荷载。紧急制动工况前纵梁根部受力过载,加装专用加强支架、优化踏板支架,理顺车身力流传递。侧面碰撞工况针对B柱、车门防撞梁强度短板,使用变截面B-柱结构,中段钢板厚度由1.4mm加厚至2.0mm,上下段厚度不变从而把控整车自重;车门增设至两根防撞梁,规划合适安装间距并且配置横向加强筋,以此强化车身侧向抗冲击性能。

3.3 改进方案工艺可行性分析

对结构改进方案进行工艺可行性评估,确保改进后的结构可通过现有制造工艺实现。加强筋、加强板的增设均采用常规CO₂气体保护焊或电阻点焊工艺,无需新增特殊焊接设备,可在现有焊接生产线上完成。板材厚度调整幅度控制在0.2~0.6mm范围内,适配现有冲压模具的加工精度容差,无需重新开模,降低了改造成本。变截面B柱可采用激光拼焊板技术实现,该技术已在行业内成熟应用,工艺可靠。结构连接方式的优化不改变总装车间的原有装配流程,不增加额外工序和工位。经核算,改进后整车质量增加约9.8kg,增幅为2.8%,满足轻量化设计要求,具备良好的工程应用可行性。

4 改进后整车结构强度校核与效果分析

4.1 改进后多工况强度校核

将改进后的整车结构重新导入有限元模型,保持工况设置、边界条件与原模型完全一致,分别采用隐式静力求解器(弯曲、扭转、制动工况)和显式动力学求解器(侧碰工况)开展多工况强度校核。弯曲工况下,纵梁中部、门槛梁与B柱连接区域峰值应力由248MPa降至198MPa,降幅20.2%,低于SAPH440许用值235MPa,安全裕度恢复至15.7%;最大垂向变形量由2.2mm降至1.4mm,满足设计允许值($\leq 1.5\text{mm}$)要求。扭转工况下,连接节点峰值应力由256MPa降至205MPa,降幅19.9%;车身扭转角度由1.8deg降至1.3deg,满足设计标准($\leq 1.5\text{deg}$),结构抗扭性能显著提升。紧急制动工况下,前纵梁根部峰值应力由242MPa降至192MPa,降幅20.7%,安全裕度由3%扩大至18.3%;制动踏板支架区域应力集中

得到有效缓解。侧面碰撞工况下,B柱、车门防撞梁区域峰值应力由468MPa降至352MPa,降幅24.8%;车门侵入量由108mm降至72mm,大大优于GB 20071要求($\leq 150\text{mm}$),侧面抗碰撞能力显著增强。

4.2 改进效果综合分析

改进后整车结构强度得到全面提升,各工况下应力集中区域明显减少,应力分布趋于均匀,变形量均控制在设计允许范围内,各部位安全系数均达到企业设计标准要求。整车质量增幅控制在2.8%,未对车辆轻量化性能产生明显负面影响。各工况峰值应力降幅在19.9%~24.8%之间,车门侵入量下降33.3%,结构改进效果显著。改进方案经工艺可行性评估确认可直接应用于实际生产,有效解决了原结构存在的强度隐患,提升了整车行驶安全性与服役寿命^[4]。

5 结束语

本文基于有限元分析技术,系统开展了某SUV整车结构的多工况强度校核与结构改进设计。通过搭建整车有限元模型,对弯曲、扭转、紧急制动及侧面碰撞四种典型工况进行计算分析,精准定位了各工况下的应力集中与变形超限区域。针对结构薄弱环节制定了加强筋增设、截面优化、连接方式改进及B柱变截面设计等针对性措施,改进后再次校核表明各工况应力峰值降幅达19.9%~24.8%,变形量均满足设计标准。研究验证了基于有限元分析的强度校核与改进设计闭环方法在整车开发中的工程有效性,可为同类车型的结构设计与优化提供参考。

[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]徐业成.汽车车身结构焊接工艺的优化设计与品控研究[J].汽车电器,2026(3):156-158.
- [3]梁春龙,庞毅,裴一骏,等.轻混汽车后碰有限元分析及结构优化[J].汽车实用技术,2022,47(11):30-33.
- [4]吴磊,庞毅,潘俊潮.基于有限元分析的新能源汽车侧面柱碰结构优化研究[J].西部交通科技,2022(1):187-190.

作者简介:

肖中校(1988--),男,汉族,海南省海口市人,本科,中级工程师,研究方向:整车NVH性能及低速电动车结构开发。