

整车集成设计中车身结构与主被动安全的协同优化研究

孙士峰

新实亚汽车上海有限公司, 上海, 200135;

摘要: 在汽车产业技术迭代与安全标准持续升级的背景下, 企业整车集成设计面临车身结构性能、主动安全预警与被动安全防护的多维协同诉求。本文立足整车开发全流程, 剖析车身结构承载特性与主被动安全系统的耦合机理, 构建兼顾结构刚度、碰撞吸能、预警响应与防护效能的协同优化体系, 梳理企业研发端的技术痛点与落地路径, 提出适配量产需求的集成优化策略, 为提升整车安全冗余、实现性能与成本均衡提供理论支撑与实践参考。

关键词: 整车集成; 车身结构; 主动安全; 被动安全

DOI: 10.69979/3029-2727.26.05.052

引言

汽车安全性能是企业产品核心竞争力与品牌口碑的关键载体, 随着全球汽车安全法规日趋严苛、消费者驾乘安全诉求不断提升, 单一维度的车身结构强化或安全系统升级已无法满足整车集成设计目标。车身结构作为安全防护的物理载体, 其刚度分配、传力路径与变形模式直接决定主被动安全系统的发挥效能, 而主动安全预警、被动约束装置的布局又反向约束车身结构设计边界。企业亟需打破车身研发与安全系统开发的部门壁垒, 建立全周期协同优化机制, 化解轻量化、安全性与制造成本的矛盾, 推动整车安全性能跨越式提升。

1 整车集成设计与安全协同内涵

1.1 整车集成设计的企业研发逻辑

整车集成设计是企业统筹整车性能、制造工艺、成本控制与市场需求的系统性工程, 核心是打破各子系统设计的孤立状态, 实现底盘、车身、电子电器、动力总成等模块的深度融合。对于企业而言, 整车集成并非简单的零部件拼装, 而是以顶层目标为导向, 贯穿概念设计、详细开发、试制验证到量产投产的全流程管控。车身结构作为整车集成的核心载体, 既要满足刚度、模态、耐久性等基础性能要求, 又要适配主动安全传感器布局、被动安全装置安装空间, 同时兼顾冲压、焊接、涂装等制造工艺的可行性, 这就要求企业建立跨部门协同的集成开发模式, 将安全性能指标嵌入设计全链条^[1]。

1.2 主被动安全与车身结构的耦合关系

主动安全系统与被动安全系统并非相互独立, 二者依托车身结构形成闭环防护体系, 共同构成整车安全的核心屏障。主动安全系统依托毫米波雷达、摄像头、激

光雷达等感知元件, 实现碰撞预警、紧急制动、车道保持等功能, 其感知精度与响应效率依赖车身结构的精准布局, 传感器安装支架的刚度、位置偏差直接影响信号采集稳定性, 进而决定预警与干预的及时性。被动安全系统则以车身结构为基础, 通过可控变形吸能、座舱刚性保形, 配合安全气囊、安全带等约束装置, 降低碰撞过程中乘员损伤风险, 其防护效果完全依托车身结构的传力路径与变形模式。

2 车身结构设计对主被动安全性能的影响机制

2.1 车身结构拓扑与传力路径的安全适配性

车身结构拓扑布局是决定整车安全性能的底层要素, 企业在设计阶段需结合各类碰撞工况, 规划高效传力路径, 实现碰撞能量的有序传导与耗散。承载式车身作为当前主流结构形式, 其纵梁、横梁、立柱、门槛梁等关键构件组成笼式承载框架, 传力路径的合理性直接影响碰撞过程中能量分配与座舱变形量。合理的拓扑布局可引导碰撞能量沿多条路径分散, 避免局部应力集中导致结构断裂, 同时保障座舱区域刚性充足, 为乘员预留生存空间, 也为被动安全约束装置提供稳定的工作环境。对于主动安全系统而言, 车身前端、侧面及顶部的结构布局, 直接决定感知元件的安装视野与防护能力^[2]。前端纵梁、机舱横梁的布局需避让雷达、摄像头的感知区域, 避免结构遮挡导致信号失真; 侧面门槛梁、B柱的结构设计需兼顾侧碰防护与侧面雷达安装需求, 防止碰撞过程中结构变形挤压感知模块, 造成主动安全系统失效。

2.2 车身材料选型与安全性能的协同匹配

车身材料选型是企业平衡轻量化与安全性能的核心抓手, 不同材料的力学特性直接决定车身结构的吸能

效率与刚性水平，进而影响主被动安全系统的适配性。高强度钢、先进高强度钢、铝合金、复合材料等材料的差异化应用，可实现车身不同区域的性能定制化：吸能区域采用低强度、高延性材料，通过塑性变形高效吸收碰撞能量；座舱防护区域采用高强度、高刚度材料，抵御冲击、保障结构完整性。这种差异化材料分配，既提升被动安全防护效果，又为主动安全传感器支架提供足够刚度，减少行驶振动对感知精度的干扰。企业在材料选型过程中，需综合考虑材料成本、工艺难度、回收性与安全性能的协同关系^[3]。多材料混合车身虽能实现性能最优，但面临连接工艺复杂、匹配精度要求高等问题，若处理不当易导致碰撞过程中连接部位失效，破坏传力路径，削弱安全防护能力。

2.3 车身关键结构件设计与安全系统的兼容性

车身关键结构件的细节设计，直接决定主被动安全系统的落地效果与整车安全冗余。前防撞梁、吸能盒、A柱、B柱、门槛梁、座椅安装横梁等部件，既是车身结构的核心受力件，也是安全系统的重要依托。前防撞梁与吸能盒的结构形式，决定正面碰撞能量的初始吸收效率，其长度、截面形状需适配主动安全紧急制动后的碰撞工况，降低后续冲击载荷；A柱、B柱的加强板设计，需兼顾正面偏置碰、侧碰的防护需求，避免结构变形侵入座舱，同时预留侧面气囊、气帘的安装与展开空间。

3 主被动安全系统对车身结构设计的约束与反馈

3.1 主动安全系统布局对车身结构的设计约束

主动安全系统的感知、决策、执行模块，对车身结构的布局、刚度、空间提出明确约束，企业需将这些约束前置到车身概念设计阶段。感知传感器作为主动安全的核心部件，其安装位置需保证无遮挡、视野开阔，车身前端进气格栅、机舱盖、风挡玻璃的结构设计需适配摄像头、雷达的安装角度，避免结构凸起、曲面弧度影响信号传输；同时，传感器安装支架需具备足够刚度与模态性能，抑制行驶颠簸、路面冲击带来的振动，防止感知信号漂移，确保预警与干预的准确性。

除感知模块外，主动安全的执行机构、电控单元也对车身结构提出空间与防护要求。制动助力机构、转向辅助模块需依托车身纵梁、副车架安装，结构承载能力需满足动态载荷需求；电控单元作为决策核心，需布置在车身碰撞损伤较小的区域，避免碰撞过程中失效导致

主动安全功能中断^[4]。企业需建立主动安全系统与车身结构的同步设计机制，通过前期数据共享、联合校核，规避后期结构整改，提升研发效率。

3.2 被动安全系统对车身结构的性能要求

被动安全系统的约束效能，高度依赖车身结构的碰撞响应特性，车身的变形模式、侵入量、加速度波形直接决定安全气囊、安全带等装置的设计参数与起爆逻辑。企业在被动安全开发过程中，需基于车身结构的碰撞仿真与试验结果，标定约束装置的起爆时机、充气速率、预紧力大小：若车身吸能速率过快，乘员前移量过大，需提前起爆气囊、强化安全带预紧；若车身刚性过剩，冲击加速度过大，需优化车身吸能结构，配合约束装置缓冲乘员冲击。

同时，被动安全装置的安装空间、展开路径对车身结构提出刚性要求。正面气囊、侧气囊、头部气帘的布置需避开车身加强件、线束管路，确保起爆后顺利展开，避免结构干涉导致防护失效；安全带固定点、气囊安装支架的强度需满足法规要求，防止碰撞过程中脱落失效。车身结构设计需充分预留被动安全装置的操作空间，通过结构避让、局部加强，实现约束装置与车身的完美适配。

3.3 主被动安全协同对车身集成设计的迭代反馈

主被动安全系统协同运行效果，给车身结构优化赋予关键数据支撑，塑造起“设计-验证-反馈-优化”的闭环迭代体系。企业在整车安全测试过程中，如果出现主动安全预警滞后、干预失效的情况，需要回溯车身传感器安装位置、支架刚度等结构参数，针对性地调整布局和结构形式；如果被动安全防护效果不好、乘员损伤指标超标，需要优化车身传力路径、材料分配和关键构件结构，改善碰撞变形模式。

迭代反馈并非一次完成的，而是贯穿整车开发全过程。概念设计阶段根据主被动安全初步需求确定车身拓扑框架，详细设计阶段根据安全系统标定参数优化结构细节，试制验证阶段通过实车测试发现匹配短板，反向修正结构设计，量产阶段通过市场反馈和售后数据不断优化结构工艺和安全参数。闭环迭代使车身结构与主被动安全相契合，不断改善整车安全性能。

4 企业视角下协同优化的核心策略与落地路径

4.1 构建跨部门协同开发体系

企业要冲破车身研发、主动安全、被动安全、试验认证等各个部门之间的壁垒，创建起跨职能协同开发团

队,把安全协同优化纳入整车设计规划当中。协同团队在项目开始时确定车身结构和主被动安全的性能目标、约束条件和开发节点,制定统一的设计标准和校核规范,防止分段设计造成的性能冲突。同时搭建数据共享平台,实现车身结构参数、安全系统标定数据、测试结果的实时互通,提高设计效率和决策精准度^[5]。

从管理角度来讲,企业要创建协同考核机制,把整车安全性能当作主要考核指标,而不是单个子系统性能,从而调动各个部门协同改进的积极性。对新能源汽车、智能网联汽车等新型车型,增设电池安全、智能感知安全等专项协同小组,拓宽协同优化维度,适应新型车型的安全设计需求,实现车身结构、主被动安全、三电系统、智能驾驶系统等各方面的深度融合。

4.2 推行全周期多目标协同优化方法

企业要抛弃传统的顺序优化模式,实行全周期多目标协同优化,把车身结构刚度、轻量化、碰撞安全性、主动安全感知精度、被动安全防护效能等指标纳入统一的优化体系。拓扑优化和多方案比较在概念设计阶段确定安全和轻量化的车身基础结构,在详细设计阶段对关键构件进行尺寸、形状优化,平衡结构强度和安全系统适配性,在验证阶段进行主被动安全联合标定和整车碰撞测试,同步优化结构参数和安全控制策略。

协同优化时企业要兼顾性能和成本,不能因为过分看重安全性能而造成制造成本急剧上升。通过材料优选、结构精简、工艺优化,在满足安全法规和性能目标的基础上,控制车身重量和制造成本,提高产品的市场竞争力。同时采用平台化、模块化开发思想,把成熟的协同优化方案复用到同平台车型上,降低研发成本、缩短开发周期,实现规模化效益。

4.3 强化验证体系与标准管控

完善的验证体系是保障协同优化效果的关键,企业需构建涵盖虚拟仿真、台架试验、实车测试的多层级验证体系,全面校核车身结构与主被动安全的协同性能。虚拟仿真阶段,开展多工况碰撞仿真、振动仿真、感知精度仿真,提前预判匹配问题,减少物理样机整改次数;台架试验阶段,针对车身关键构件、安全系统部件开展强度、耐久性、起爆性能测试,验证零部件可靠性;实车测试阶段,开展正面碰撞、侧面碰撞、偏置碰、翻滚等多工况测试,核验整车协同防护效果。

同时,企业需建立严格的标准管控体系,紧跟国内

外安全法规与测试标准升级趋势,及时更新设计规范与验证指标^[6]。针对主被动安全协同、车身结构安全制定企业内控标准,严于国标与行业标准,提升产品安全壁垒。此外,加强生产一致性管控,确保量产车型的车身结构工艺、安全系统装配与设计方案一致,避免制造偏差影响协同安全性能。

5 结论

整车集成设计中,车身结构与主被动安全的协同优化是企业提升整车安全性能、打造核心竞争力的关键路径。二者存在深度耦合关系,车身结构为安全系统提供物理支撑与空间保障,主被动安全系统反向约束结构设计、推动性能迭代。企业需通过构建跨部门协同开发体系、推行全周期多目标优化、强化验证与标准管控,化解性能冲突、攻克技术难点,实现车身结构刚度、轻量化与主被动安全防护效能的均衡提升。面对行业技术升级与标准迭代,企业需持续加大研发投入,推动智能化、轻量化技术与安全设计的深度融合,构建更高效、更可靠的整车安全防护体系,为驾乘人员提供全方位安全保障。

参考文献

- [1]张延泽.机器视觉技术在汽车整车车身制造中的应用研究[C]//中国智慧工程研究会.2024智慧施工与规划设计学术交流会议论文集.余姚领克汽车部件有限公司;,2024:489-491.
- [2]廉玉波,衣本钢,崔营营,等.基于扭转刚度的电池包与车身集成设计研究[J].汽车工程,2023,45(04):647-653.
- [3]王秋伟.分布式非充气电动轮驱动汽车的平顺性与稳定性集成控制[D].南京航空航天大学,2022.
- [4]田端洋.汽车底盘域多维度动力学集成优化控制及其软件架构设计[D].吉林大学,2022.
- [5]王飞,车身控制模块与整车网关集成化开发技术.内蒙古自治区,北奔重型汽车集团有限公司,2021-12-02.
- [6]王传晓.四轮转向的半主动空气悬架车辆车身姿态控制研究[D].江苏科技大学,2021.

作者简介:孙士峰(1976.09-),男,汉族,籍贯:河北省保定市,学历:本科,职称:无,研究方向:整车集成及设计。