

基于梁与接头灵敏度分析的白车身刚度模态优化^{*}

姚再起^{1,2,3†}, 门永新³, 李落星^{1,2}, 毛雪峰⁴, 朱凌³, 马芳武⁵

(1. 湖南大学 机械与运载工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 湖南大学 汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 湖南 长沙 410082; 3. 吉利汽车研究院 虚拟性能开发部, 浙江 杭州 311228; 4. 上海澜帆科技, 上海 201108; 5. 吉林大学 汽车工程学院, 吉林 长春 130025)

摘要:白车身结构显著影响整车性能,而车身框架是车身设计的基础.在某MPV车型概念设计阶段,通过参数化技术,快速将车身主要框架划分为梁和接头结构.分别局部刚化处理49处左右对称结构,分析各结构对扭转刚度、弯曲刚度、后部扭转模态影响的灵敏度.结果表明,D柱下段、顶盖后横梁、下地板后纵梁等结构的单位质量对扭转刚度贡献量超过5%;后地板横梁、前地板后纵梁、后地板纵梁等结构单位质量对弯曲刚度的贡献量超过4%.通过8处灵敏度较高的结构优化和厚度优化,同时对性能影响小的结构减薄、减件,结合工艺改进,实现白车身质量不增加,扭转刚度提高9.0%,弯曲刚度提高4.8%,后扭模态提高2.0%.

关键词:参数化设计;灵敏度分析;结构刚化;接头;梁单元

中图分类号:U463

文献标志码:A

Modal Optimization of Body-in-White Stiffness Based on Sensitivity Analysis of Beam and Joint

YAO Zaiqi^{1,2,3†}, MEN Yongxin³, LI Luoxing^{1,2}, MAO Xuefeng⁴, ZHU Ling³, MA Fangwu⁵

(1. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body, Hunan University, Changsha 410082, China; 3. Virtual Performance Development Division, Geely Automobile Research Institute, Hangzhou 311228, China; 4. Shanghai Lanfan Technology, Shanghai 201108, China; 5. College of Automotive Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China)

Abstract: It is known that Body-in-White (BIW) structure significantly influences the vehicle performance, and vehicle body is the basis for its design. In a PMV conceptual design phase, the main frame structure was quickly divided into several joints and beam elements by means of parameterization technique. 49 kinds of bilaterally symmetrical joints and beams were locally treated as rigid. The sensitivity of torsional stiffness, bending stiffness, and rear torsional modal to each locked rigid structure was analyzed and

^{*} 收稿日期:2016-07-07

基金项目:国家高技术研究发展计划项目(863计划)(2011AA11A221), National High Technology Research and Development Program of China (2011AA11A221); 国家“十二·五”科技支撑计划项目(2011BAG03B02), Supporting Program of the “12th Five-year Plan” for Sci & Tech Research of China (2011BAG03B02); 湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室自主课题资助项目(31225005), Research Program of State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle body of Hunan University(31225005)

作者简介:姚再起(1979-),男,内蒙古四子王旗人,湖南大学博士后,高级工程师,工学博士

[†] 通讯联系人, E-mail: yaozaiqi@163.com

ranked. The relative sensitivities of the structures, such as BEAM_D-PLR_LWR, BEAM_ROOF_RR, and RAIL_RR on the torsional stiffness were more than 5%, while the relative sensitivity of the structures, such as FLOOR_RR_CB_FRT, RAIL_CTR, and RAIL_RR on the bending stiffness was more than 4%. The torsional stiffness was increased by 9.0%, the bending stiffness was increased by 4.8%, and the rear torsional modal was increased by 2.0% by means of structure and thickness optimization, structural thinning and reduction, and processing improvement for sensitive structure. On the other hand, the mass of BIW was obviously not increased.

Key words: parameterized design; sensitivity analysis; structure rigidization; joint; beam element

现代汽车主要采用承载式车身结构,其白车身对整车刚度的贡献可达60%以上^[1],因此车身具有足够刚度才可保证其装配和使用要求.由接头和梁结构组成的车身框架的截面形状和几何特性对白车身刚度性能影响尤为重要.在概念设计阶段研究接头、梁截面对车身刚度的影响,提出优化方案,有利于提升整车性能、提高概念设计精度、缩短汽车设计周期.

邢子敬等^[2]建立全参数化的概念车身模型,通过改变梁截面的方向和厚度来研究截面特性对车身刚度的影响;潘星辰等^[3]在车身概念设计对接头部件进行简化处理模拟;任山^[4]截取现有车型的白车身主断面图并计算相关主断面的力学特性数据,通过简化模型静态性能的验证探讨该方法的可行性;李龙^[5]基于梁截面参数的灵敏度,运用向量优化法对某些截面的截面特征参数进行优化,从而实现车身的轻量化.目前对概念车身分析所得的主要评价指标(如扭转刚度)与详细车身模型主要指标存在着较大差异,主要是由于简化车身模型的接头单元被设计成刚性结构,从而导致整车扭转刚度与真实实验数据不一致.

在概念设计阶段,如采用参考车型的详细有限元模型,进行接头和梁结构划分,分析效率较低;且在研车结构将会有明显调整,分析结果难以真实反映设计车型的性能,不一定具有指导意义.传统灵敏度分析,多是在详细设计阶段以实际零件为分析单位,结构变化和修改空间已受到很大限制.零部件间存在复杂的连接关系,对于判断各零件几何形状对性能的影响有一定局限性.

采用SFE-CONCEPT隐式参数化技术,可通过截面形状隐式参数化、结构拓扑关系隐式参数化以及通过映射关系定义车身各子模块间的复杂装配关系等方式实现车身模型的快速搭建.车身模型的几

何形状可由IP点(影响点)位置、基线曲率和截面形状控制^[6-9].任意改变其中一个参数,与之相关联的结构就会发生相应改变,同时又保持车身模型原有的拓扑关系和几何连续性.根据其建模特点,可方便实现不同梁单元、接头单元的属性 and 结构修改,进一步研究不同梁单元、接头单元对于整个白车身性能的影响.在车身设计早期即可提出合理方案,实现车身结构的性能提升和结构优化设计.

本文在某款MPV(Multi-Purpose Vehicle)车型概念设计阶段建立SFE参数化模型.按其模型特点,对局部结构(梁单元、接头单元)分别进行刚化处理,研究其结构变化对整个白车身性能的影响,进一步采用有效的结构优化进行性能提升.

1 模型构建及分析方法

1.1 建立参数化模型

在概念设计阶段,根据V0版下车身数据、外CAS面、上车身主断面及对标车接头数据,建立全参数化白车身概念模型,如图1所示.含玻璃的白车身质量为340.9 kg.白车身骨架主要由接头和梁单元组成.

为了研究某对接头、梁结构对白车身刚度和模态的影响,对此局部结构进行刚化,考察其性能提升潜力.主要刚化处理14对侧围接头和14对侧围梁结构,21组地板、机舱和顶盖的梁结构.与原始模型一并形成50组对比分析模型.如B柱上接头刚化处理的有限元模型如图2所示.所提取的梁单元和接头单元的总质量达220.0 kg.侧围各结构是按照SFE建模原则的截面切取(包括外覆盖件部分).对于地板、机舱、顶盖梁单元是在生成的有限元模型中选取相关零件(不包括外覆盖件).文中所研究的梁结构、接头结构,均称之为“结构”.

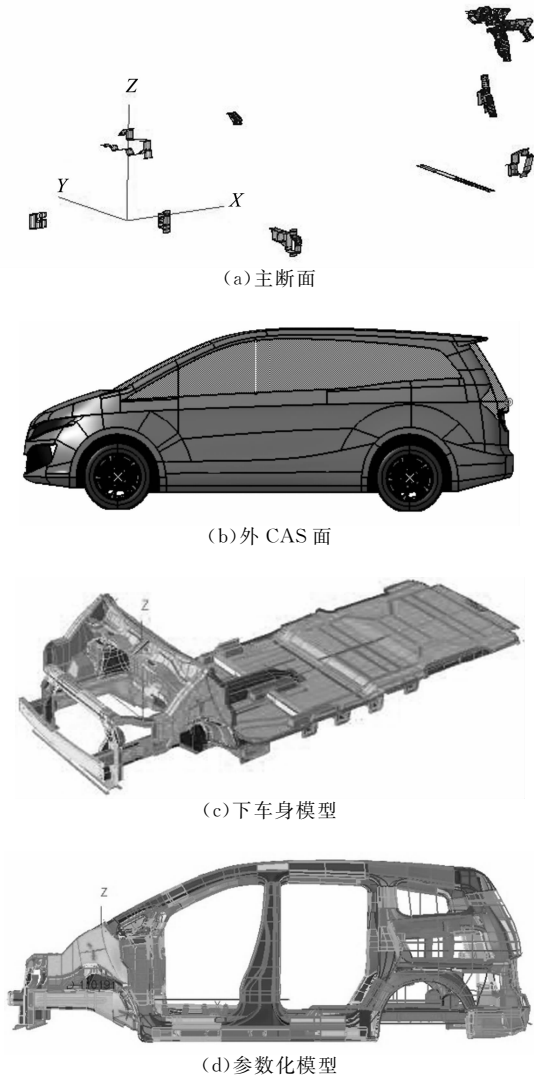


图 1 白车身参数化模型建立
Fig.1 Technological process
of parameterized BIW model

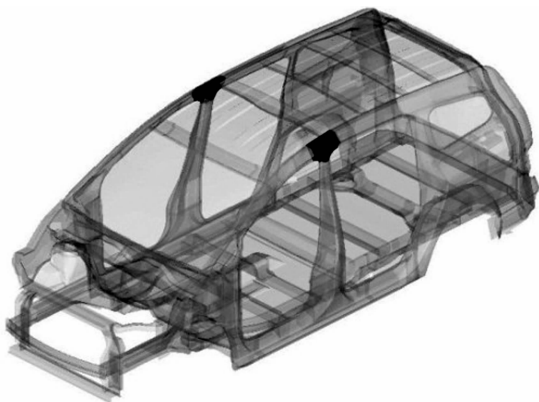


图 2 刚化 B 柱上接头有限元模型示意图
Fig.2 BIW finite element
model of rigid B-Pillar_UPR

1.2 刚度模式分析方法

白车身模型包括焊接车身、前后车窗玻璃、前后防撞梁。扭转刚度计算公式为:

$$K_t = T/\alpha \quad (1)$$

$$\alpha = D_f/Y_f - D_T/Y_T \quad (2)$$

式中: K_t 为扭转刚度(N·m/deg); T 为扭矩(N·m); α 为相对扭转角度(deg).

弯曲刚度计算公式为:

$$K_f = F/D \quad (3)$$

式中: K_f 为弯曲刚度(N/mm); F 为施加载荷; D 为门槛下部边缘的最大-Z向位移。

对于 MPV 车身,后部扭转模式是车身模态性能的最重要的衡量指标。

1.3 灵敏度分析方法

结构灵敏度定义为相对于原始模型,将某一对结构刚化处理后,考察性能提升的百分比。相对灵敏度定义为将结构对性能影响的百分比除以刚化结构本身质量所得的百分比值。质量贡献因子为某方案调整引起的质量变化百分比。性能贡献因子为某方案调整引起性能变化的百分比。

2 分析结果

2.1 结构对性能的影响

按照结构对扭转刚度、弯曲刚度和后扭模态性能的影响程度,将刚化区域分类划分,如图 3 所示。图中所示的结构影响总图并非是同一模型的不同部分,而是表示若将此结构刚化处理后,其对整个白车身性能影响程度的示意图。结构刚化对扭转刚度性能提升影响前 3 位的结构分别是后地板纵梁、前地板后纵梁和 B 柱,相对于原始模型,扭转刚度增加百分比分别是 46.69%,35.69%和 24.98%;结构刚化对弯曲刚度影响前 3 位的结构是前地板后纵梁、后地板纵梁和后地板横梁,增加的百分比分别是 58.24%,29.78%和 15.70%;结构刚化对后部扭转模态影响前 3 位的结构是 D 柱上接头、D 柱下接头和 D 柱下段,后部扭转模态增加的百分比分别是 34.81%,17.87%和 12.66%。

2.2 结构的单位质量对性能的影响

按照刚化结构的单位质量对扭转刚度、弯曲刚度和后扭模态性能的影响程度,即性能相对灵敏度,将刚化区域分类划分,如图 4 所示。刚化结构的单位

质量对扭转刚度性能提升影响前 3 位是 D 柱下段、顶盖后横梁和后地板纵梁,扭转刚度性能增加百分比分别是 5.20%,5.11%和 5.11%;刚化结构单位质量对弯曲刚度影响前 3 位是后地板横梁、前地板后纵梁和后地板纵梁,弯曲刚度增加的百分比分别

是 4.23%,4.21%和 3.26%;刚化结构的单位质量对后部扭转模态影响前 3 位是 D 柱下段、D 柱上接头和 D 柱上段,后部扭转模态增加的百分比分别是 6.54%,6.45%和 4.70%。

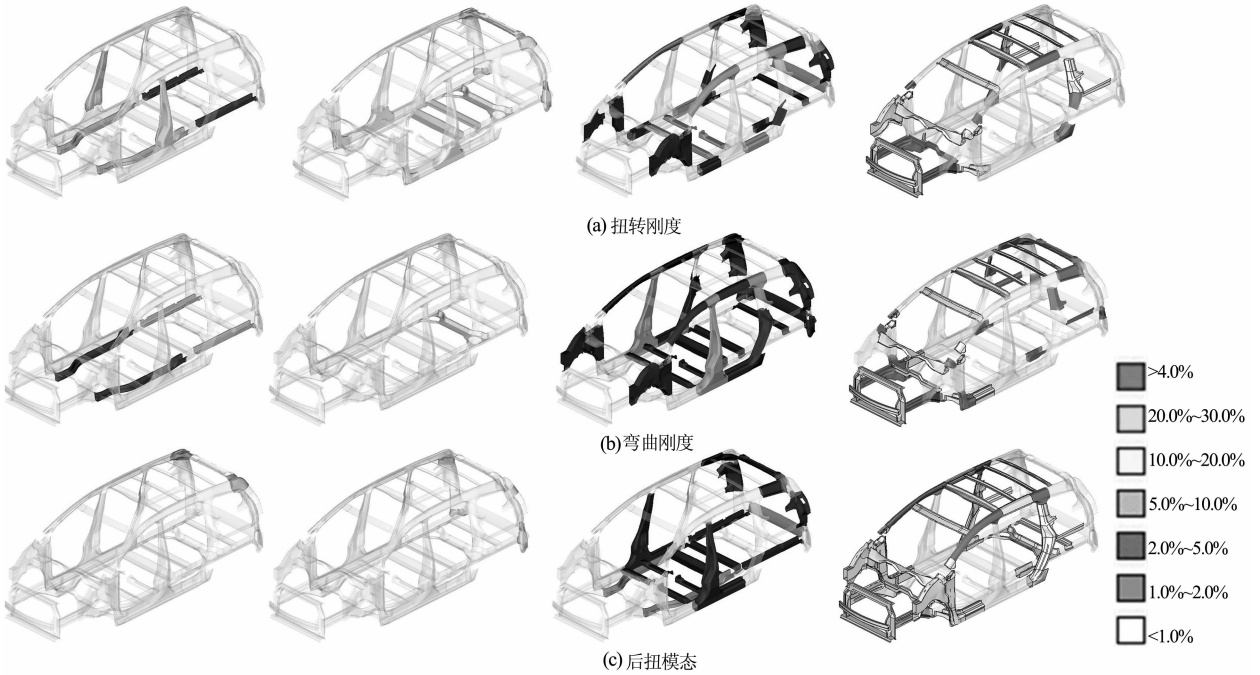


图 3 结构对扭转刚度、弯曲刚度和后扭模态性能的影响

Fig. 3 The influence of structures on torsional stiffness, bending stiffness and rear torsional mode

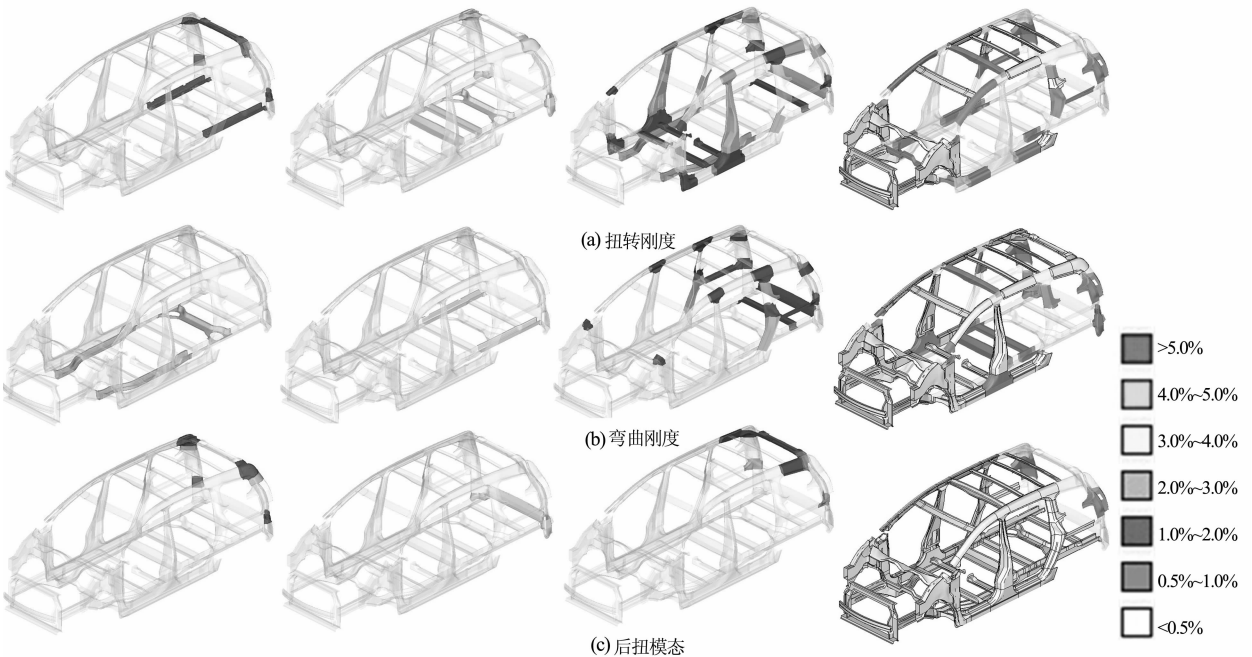


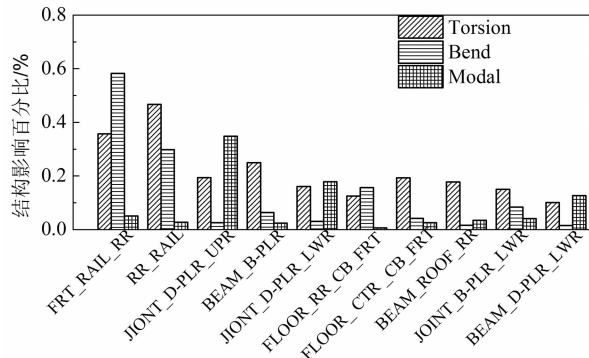
图 4 扭转刚度、弯曲刚度和后扭模态性能的相对灵敏度排序

Fig. 4 The relative sensitivity of torsional stiffness, bending stiffness and rear torsional mode

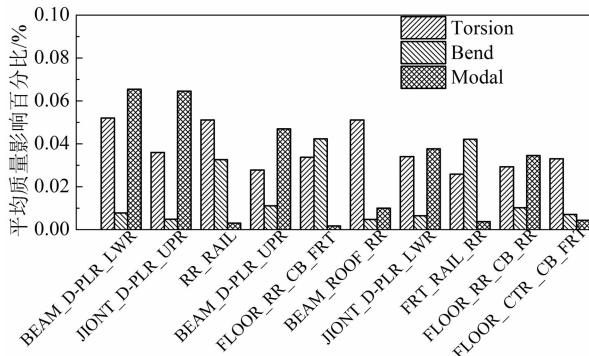
3 讨论及结构性能优化

3.1 结构对 NVH 综合性能的影响

为近似评估各结构对 MPV 车型的扭转刚度、弯曲刚度和后部扭转模态 3 个重要性能的综合效果,进一步提出具体零部件结构优化方案,对 3 种性能的结构灵敏度值和相对灵敏度值分别求取均方根

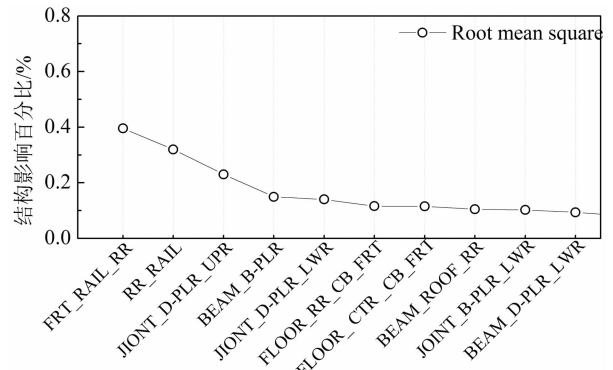


(a) 各性能结构灵敏度

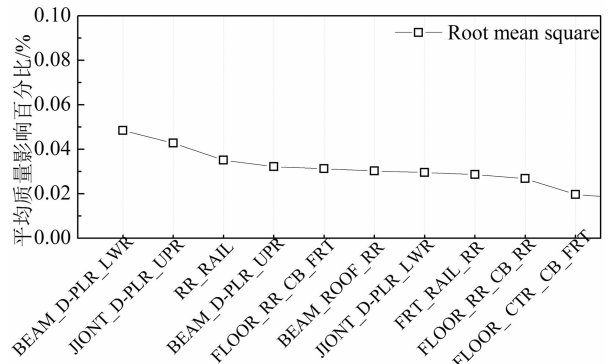


(c) 各性能相对灵敏度

值. 综合性能灵敏度前 10 位结构如图 5(a)和图 5(b)所示. 除了结构位置等,零件尺寸、质量也是影响性能的主要因素,反映接头的重要程度. 为消除质量影响,结构灵敏度数值除以结构质量,得出单位质量的相对灵敏度分析结果,准确反映结构和厚度优化的必要性. 综合性能相对灵敏度排名前 10 位的结构如图 5(c)和图 5(d)所示.



(b) 综合结构灵敏度



(d) 综合相对灵敏度

图 5 影响结构灵敏度和相对灵敏度前 10 位的结构

Fig. 5 Top 10 structure of the sensitivity and the relative sensitivity values

3.2 优化方案及性能验证

优化截面参数提高白车身综合性能,可通过改变截面的几何结构和材料厚度等级等方面来实现. 在设计空间、总布置、造型允许的前提下尽可能采用结构优化;若几何结构已确定,对于敏感性较高的结构通过增加厚度提高性能;对于敏感性较低的结构,可适当减少厚度,达到轻量化目的. 如涉及到结构耐撞性、强度等要求,可通过适当提高材料等级、改变加工工艺等方法解决.

考虑生产工艺,优化方案是按照概念阶段的梁、接头结构分析的指向性,对具体零件进行优化,而不是按照 SFE 建模方式切取的接头和梁单元进行.

3.2.1 基于截面的优化方案

关键截面的特性参数包括截面材料使用面积

S , 截面惯性矩 I_y, I_z , 截面扭转常量 T_j , 截面所包围的总面积 A 等. 其中,

$$S = \int_A dA \quad (4)$$

$$I_y = \int_A z^2 dA \quad (5)$$

$$I_z = \int_A y^2 dA \quad (6)$$

如 D 柱上段外造型与内造型相对确定,不可做尺寸调整,在工艺允许的前提下,不改变拓扑关系,改变内板的位置实现其截面惯性矩的改变. 将加强板向外侧移动如图 6 所示. 截面惯性矩 I_y 由 $6.071 \times 10^6 \text{ mm}^4$ 增加到 $6.102 \times 10^6 \text{ mm}^4$, 截面惯性矩 I_z 由 $2.964 \times 10^6 \text{ mm}^4$ 增加到 $3.018 \times 10^6 \text{ mm}^4$. 结构质量基本保持不变,白车身弯曲刚度提升达 0.54%.

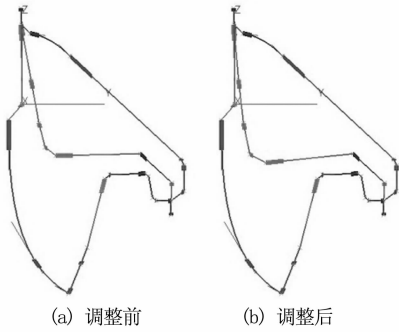


图 6 D 柱上段加强板结构调整示意图
Fig. 6 D-Pillar_UPR stiffness structure improvement

在前后地板纵梁满足装配关系的前提下,纵梁变宽 10 mm,显著提高截面惯性矩。

灵敏度分析表明,C 柱下段(Dog-leg)结构较弱,但由于涉及到外造型和工艺要求,无法局部加强,而后硬点、纵梁与侧围只有覆盖件相连,刚度存在不连续.左右两侧增加 Lionfoot 加强件,如图 7 所示.加强件明显补偿了 C 柱下段偏弱的问题,形成载荷传递路径,扭转刚度明显改善达 3.70%。

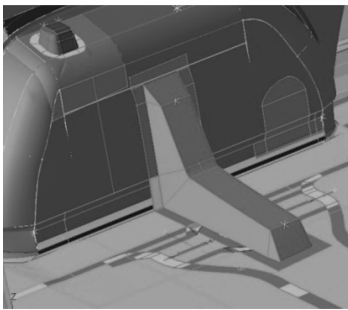


图 7 增加 Lionfoot 结构示意图
Fig. 7 Lionfoot structure improvement

3.2.2 基于厚度的优化方案

由于安装尾灯需要,D 柱下段截面比相邻结构明显偏弱,但截面尺寸无法调整,通过局部增加零件厚度明显提高局部刚度,如图 8 所示,整车质量增加 0.06%,扭转刚度增加 0.66%,弯曲刚度增加 0.41%,达到最优综合性能提升效果。

根据灵敏度分析结果,将后地板中横梁(与后悬对应的横梁)厚度增加 0.2 mm,顶盖后横梁、后地板尾部横梁厚度增加 0.2 mm,均达到显著提升效果.而 Shotgun 结构、水箱框架等厚度对于性能影响较小,做减薄优化,材料等级适当提高.分析和优化结果表明,加强纵梁结构以及后背门框结构对综合性能有显著提升。

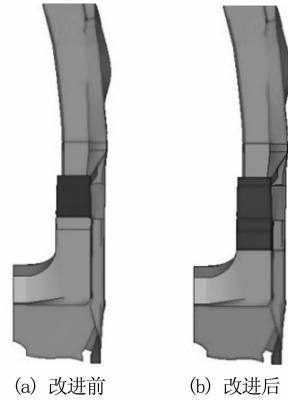


图 8 D 柱下段厚度改进示意图
Fig. 8 D-Pillar_LWR stiffness structure improvement

3.2.3 基于工艺的优化方案

对灵敏度较低的结构可采用轻量化设计方案.在材料厚度变化时,首先按照等强度理论,做近似计算,采用高强度材料代替较低强度材料,在满足 NVH 性能、轻量化前提下,同时满足碰撞安全性。

原方案前横梁由 340/590DP 厚度为 2.0 mm 辊压成型前横梁结构改进为 1 500 MPa 级别的单板结构 22MnB5 热冲压成型前横梁,如图 9 所示.经 100% 正面碰撞、40% 正面偏置碰撞仿真分析,在提高结构耐撞性的同时,质量减轻 1.7 kg,同时不影响 NVH 性能。

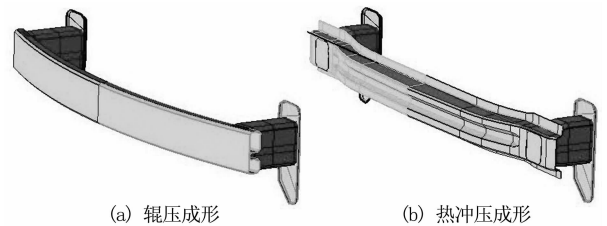


图 9 辊压成形与热冲压成形前横梁结构对比
Fig. 9 The comparison of rolling and hot stamping crossbeam

3.3 综合优化方案

单个方案对结构的影响及综合效果如表 1 所示,表明了灵敏度分析的有效性.由于局部结构调整对于后部扭转模态影响规律不明显,且具有交互作用,所以未做单独统计.加强纵梁 RAIL_CTR_RR 结构和增加 Lionfoot 结构,对弯曲和扭转刚度贡献突出.综合各种方案,白车身在整体质量不增加的前提下,性能明显改善,扭转刚度上升 9.00%,弯曲刚度上升 4.80%,后扭模态提升 2.04%。

表1 性能提升方案及各性能变化
Tab.1 Optimization strategies and performance improvement

| 零件名 | 方案 | 质量 | | 扭转刚度 | | 弯曲刚度 | | 后部扭转 | |
|---------------------|-----------------------|------------|------------|----------------------------------|------------|----------------------------------|------------|------------|------------|
| | | 测量值 /kg | 贡献因子 /% | 计算值/ (N·m·deg ⁻¹) | 贡献因子 /% | 计算值/ (N·m·deg ⁻¹) | 贡献因子 /% | 计算值 /Hz | 贡献因子 /% |
| 原始 | — | 340.9 | — | 12 348.01 | — | 10 720.66 | — | 25.91 | — |
| BEAM_D-PLR_LWR | 加厚 0.2 mm | +0.2 | 0.06 | 12 429.01 | 0.66 | 10 764.76 | 0.41 | — | — |
| BEAM_D-PLR-UPR | 截面优化 | +0.01 | 0.00 | 12 349.64 | 0.13 | 10 775.19 | 0.51 | — | — |
| RAIL_CTR_RR | 加厚 0.2 mm 加宽 10 mm | +2.9 | 0.85 | 12 683.57 | 2.72 | 10 993.57 | 2.55 | — | — |
| REAR_GATE_WEB | 翻边加宽 3 mm | +0.3 | 0.09 | 12 349.75 | 0.14 | 10 780.42 | 0.56 | — | — |
| FLOOR_RR_CB_FRT | 加厚 0.2 mm | +0.6 | 0.18 | 12 426.91 | 0.64 | 10 814.49 | 0.88 | — | — |
| BEAM_ROOF_RR_HEADER | 加厚 0.2 mm | +0.4 | 0.12 | 12 494.67 | 1.19 | 10 764.76 | 0.41 | — | — |
| FLOOR_RR_CB_RR | 加厚 0.2 mm | +0.4 | 0.12 | 12 377.64 | 0.24 | 10 769.98 | 0.46 | — | — |
| LIONSFOOT | 闭合环路 | +2.8 | 0.82 | 12 805.39 | 3.70 | 10 961.06 | 2.24 | — | — |
| BEAM_ROOFBOW | 取消 | -0.5 | -0.15 | 12 348.01 | 0.00 | 10 719.95 | 0.00 | — | — |
| FRONT_BEAM | 工艺替换 | -1.7 | -0.41 | 12 357.68 | 0.00 | 10 720.00 | 0.00 | — | — |
| RADIATOR_SUP_UPR | 减薄 0.2 mm | -0.7 | -0.21 | 12 357.68 | 0.00 | 10 720.00 | 0.00 | — | — |
| RADIATOR_SUP_LWR | 减薄 0.2 mm | -0.5 | -0.15 | 12 357.68 | 0.00 | 10 720.00 | 0.00 | — | — |
| RADIATOR_SUP_SIDE | 减薄 0.2 mm | -0.6 | -0.18 | 12 357.68 | 0.00 | 10 720.00 | 0.00 | — | — |
| SHOT_GUN | 减薄 0.4 mm | -1.9 | -0.56 | 12 335.45 | -0.10 | 10 711.78 | -0.08 | — | — |
| A-PLR_LWR | 减薄 0.2 mm | -1.7 | -0.50 | 12 332.01 | -0.13 | 10 710.67 | -0.09 | — | — |
| TOTAL | — | 0 | 0 | 13 496.68 | 9.00 | 11 277.89 | 4.80 | 26.44 | 2.04 |

4 结 论

车身框架的刚度、模态是车身的基本性能。

1) 早期概念设计阶段,基于参数化模型,分别刚化梁、接头结构,分析其对性能影响,有效判断结构对性能的灵敏度,指导性能提升和轻量化设计。

2) 对扭转刚度相对灵敏度影响较大的结构是D柱下段、顶盖后横梁、下地板后纵梁等;对弯曲刚度影响较大的是后地板横梁、前地板后纵梁、后地板纵梁等;后背门框结构对后部扭转模态影响较大。

3) 根据刚度、模态灵敏度分析,考虑工艺可行性、结构耐撞性等因素,进行结构优化。白车身保持质量不增加,扭转刚度上升 9.00%,弯曲刚度上升 4.80%,后扭模态提升 2.04%。

参 考 文 献

- [1] TAKAMATSU M, FUJITA H, INOUE H, *et al.* Development of lighter-weight, higher-stiffness body for New Rx-7 [J]. SAE Transaction; Journal of Passenger Cars, 1992, 101(6): 44-48.
- [2] 邢子敬, 侯文彬, 刘斌, 等. 概念设计中梁截面对车身刚度影响的研究[J]. 汽车技术, 2009, 40(10): 21-24.
XING Zijing, HOU Wenbin, LIU Bin, *et al.* The study of effect of beam section to auto body stiffness in conception design [J]. Automobile Technology, 2009, 40(10): 21-24. (In Chinese)
- [3] 潘星辰, 侯文彬, 张雨, 等. 车身概念设计中接头部件的模拟[J]. 计算力学学报, 2010, 27(2): 336-341.
PAN Xingchen, HOU Wenbin, ZHANG Yu, *et al.* Joint sim-

ulation method in conception design of car body structure [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2010, 27(2): 336-341. (In Chinese)

- [4] 任山. 基于主断面力学特性的车身简化模型的建立[D]. 长春: 吉林大学汽车工程学院, 2008:35-40.
REN Shan. The establishment of simplified car body model based on the mechanical property of car body cross section [D]. Changchun: College of Automotive Engineering, Jinlin University, 2008:35-40. (In Chinese)
- [5] 李龙. 车身梁截面优化方法的研究[D]. 长春: 吉林大学汽车工程学院, 2008:43-54.
LI Long. Research of auto body beam section's optimization [D]. Changchun: College of Automotive Engineering, Jinlin University, 2008:43-54. (In Chinese)
- [6] 宋凯, 段利斌, 陈涛, 等. 全参数化概念车身协同开发与快速化结构设计研究[J]. 中国机械工程, 2014, 25(6): 842-847.
SONG Kai, DUAN Libin, CHEN Tao, *et al.* Collaborative development and rapid structural design based on full parametric concept car body [J]. China Mechanical Engineering, 2014, 25(6): 842-847. (In Chinese)
- [7] 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, 946.
SHI Guohong, CHEN Yong, JIANG Xin, *et al.* BIW multi-disciplinary design optimization based on full parametric model [J]. Automotive Engineering, 2010, 32(11): 928-931, 946. (In Chinese)
- [8] 李楠, 高卫民, 戴轶. 基于隐式参数化模型的车身结构优化设计[J]. 汽车工程, 2008, 30(10): 857-860.
LI Nan, GAO Weimin, DAI Yi. Optimization design of car body structure based on implicit parametric model [J]. Automotive Engineering, 2008, 30(10): 857-860. (In Chinese)
- [9] 史国宏, 陈勇, 杨雨泽, 等. 白车身多学科轻量化优化设计应用[J]. 机械工程学报, 2012, 48(8): 110-114.
SHI Guohong, CHEN Yong, YANG Yuze, *et al.* BIW architecture multidisciplinary light weight optimization design [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(8): 110-114. (In Chinese)