



2012

中国汽车轻量化技术研讨会

China Automotive Lightweight Technology Forum

论文集 Proceedings

汽车轻量化技术创新战略联盟

China Auto Lightweight Technology Innovation Strategic Alliance

中国汽车工程学会

Society of Automotive Engineers of China

编

 北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

2012 中国汽车轻量化 技术研讨会论文集

汽车轻量化技术创新战略联盟 编
中国汽车工程学会



北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

版权专有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

2012 中国汽车轻量化技术研讨会论文集/汽车轻量化技术创新战略联盟, 中国汽车工程学会编. —北京: 北京理工大学出版社, 2012. 9

ISBN 978 - 7 - 5640 - 6743 - 4

I. ①2… II. ①汽… ②中… III. ①汽车轻量化 - 中国 - 学术会议 - 文集 IV. ①U462. 2 - 53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 201628 号

出版发行 / 北京理工大学出版社

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010)68914775(办公室) 68944990(批销中心) 68911084(读者服务部)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 北京恒石彩印有限公司

开 本 / 787 毫米 × 1092 毫米 1/16

印 张 / 32.5

字 数 / 772 千字

版 次 / 2012 年 9 月第 1 版 2012 年 9 月第 1 次印刷

责任校对 / 陈玉梅

定 价 / 160.00 元

责任印制 / 王美丽

图书出现印装质量问题, 本社负责调换

评审委员会名单

主任：陈一龙

成员：（按姓氏笔画排序）

马芳武	马鸣图	王利	王登峰	王静
王慧娟	兰凤崇	冯美斌	由剑	孙凤池
李奉伟	李菁华	羊军	朱熠	应善强
陈一龙	陈强	陈鑫	张义和	张少微
张君媛	林逸	周青	周宇飞	柏建仁
姚远	徐成林	黎予生		

目 录

设 计

基于相对灵敏度法的白车身轻量化	李亦文, 郝玉敏, 唐洪斌, 李红建, 王士彬	(3)
组合式凸轮轴的轻量化优势分析	邹 伟, 万 建, 王金石, 林 飞, 许立兵, 田 宁	(10)
尺寸优化在某商用车轻量化设计中的应用	樊红光, 许春铁, 咎建明, 王 园, 张松波	(18)
铝合金前罩 Slam 疲劳耐久分析	李 冰, 李芹英, 毛显红	(25)
汽车车身结构轻量化技术研究	李红丽, 王 卓, 李飞亚, 咎建明	(30)
虚拟迭代技术在疲劳分析中的应用	周云平, 沙大亮, 毛显红, 务运兴	(37)
电动汽车电池框架支撑结构的轻量化设计研究	王玉琴, 邓留名, 羊 军, 盛治华, 叶永亮, 汪侃磊	(44)
两厢车车身尾门洞扭转刚度优化	杨亭福, 叶永亮, 盛治华	(49)
铸铁控制臂更改为冲压焊接结构轻量化设计分析	路小路, 魏国祯, 郑素云	(58)
白车身隐式参数化模型建模、验证及应用	张继游, 彭 鸿, 门永新, 赵福全	(65)
汽车轻量化数据库研究与开发	罗家元, 万鑫铭, 李 阳	(75)
玻纤复合材料后排座椅行李块冲击强度计算	汪庆洋, 陈 光, 张君媛, 武栋楠	(81)
道路试验中轻量化车架开裂原因分析与改进	陈 健, 周福庚, 何雄杰	(88)
基于 CFD 分析的厢式货车导流罩优化设计	吴根忠, 康春香, 卫 刚	(96)
基于 Hypermesh/Optistruct 某发动机悬置梁的优化设计	唐述江, 高艳军	(103)
基于轻量化的车门防撞梁设计	史富强, 俞 燕, 周利民, 林 丽	(111)
进气系统轻量化设计	吴文海	(117)
汽车线束轻量化设计	马雷刚, 严法东	(126)
浅谈某轻型商用车低压燃油系统轻量化	党 菲	(131)
小型化、轻量化空调系统在轻卡上的应用	吕 慧	(136)
一种板簧安装支架的优化设计	周磊磊, 王晓军, 王成立, 陈锐哲	(143)

重型卡车轻量化板簧的设计研究	居 刚, 周福庚, 李海波	(151)
某变速箱壳体设计过程中的轻量化要点	姬腾飞, 祁 稳, 严木荣	(157)
后排座椅骨架轻量化设计改进	李英杰	(162)
车身轻量化对噪声性能的影响与优化	罗 森, 谢晓龙, 傅 薇, 汪晓虎	(168)
动力总成悬置支架多工况拓扑优化设计研究	吕兆平, 杨 晓	(175)
新型汽车车身轻量化设计的探究	庞敬超	(184)

材 料

镁合金在汽车车身轻量化设计中的应用研究

.....	傅君君, 李芹英, 毛显红, 陈乾乾	(195)
SMC 在乘用车开闭件上的轻量化设计应用	俞瓊权, 杨永超	(201)
塑料踏板在汽车轻量化技术中的开发应用	郑素云, 席玉岭, 王华拓	(207)
铝合金挤压型材在汽车上的应用	周 佳, 万鑫铭, 李 阳, 赵清江	(214)
宝钢第三代高强钢 QP 钢的成型特性	刁可山, 蒋浩民, 王 利, 陈新平	(222)
6061X 铝合金的时效动力学模型拟合	万银辉, 王 冠, 叶 拓, 肖碧媛, 李落星	(228)
热成形工艺参数对 AC1500HS 钢组织性能的影响	时晓光, 董 毅, 韩 斌, 徐 鑫, 刘仁东	(235)
连续退火双相钢奥氏体转变的热力学特征	方 芳, 尹云洋, 王 辉, 林承江	(242)
510 MPa 级热轧冲焊桥壳用钢的研制	刘永前, 彭 涛, 周祖安, 陈 宇, 赵江涛, 刘 斌	(248)
980 MPa 级冷轧 TRIP 钢的研究开发	姜英花, 邝 霜, 王海全, 尉 冬, 刘光明	(253)
首钢高强度、高疲劳寿命商用汽车车轮用钢的研究开发	周志伟, 崔 阳, 李 飞, 李瑞恒, 赵 林,	
.....	尹 娜, 肖宝亮, 孟宪堂, 董现春	(259)
新型模具钢在冲压先进高强钢上的应用	包卫平, 冯英育	(267)
本钢 600 MPa 级热镀锌双相高强钢研制开发	刘明辉, 高洪刚, 陈立红	(276)
热成形高强度钢 22MnB5 在车身轻量化设计中的应用	胡 平, 戴明华, 盈 亮, 史栋勇, 郭润清, 韩小强	(281)
液性阻尼材料在汽车轻量化中的应用	王 亮, 汪晓虎, 谢晓龙, 孙跃辉	(288)
铝合金汽车车身板卷边性能的影响因素分析	毕祥玉, 路洪洲, 路贵民, 马鸣图	(294)
PMMA 车窗在车身轻量化方面的应用分析	高云凯, 邱 娜	(303)
塑料在翼子板上的应用研究	史荣波	(310)
聚碳酸酯 (PC) 在汽车玻璃窗上的应用和发展	史荣波	(317)

工 艺

- 摩擦对铝合金板成型及回弹影响的研究 闫 巍, 张 健, 王文瑞 (325)
- 胶层内聚单元在单搭接头有限元仿真中的实现 李 龙, 替建明 (333)
- 铝合金车轮制造工艺及轻量化研究 丁 杰, 邴 建, 郑素云, 席玉岭 (340)
- 轻金属材料在汽车上的应用及工艺特点 魏元生 (345)
- 车门防撞梁热成形数值模拟研究
..... 郭怡晖, 马鸣图, 方 刚, 宋磊峰, 周惦武 (359)
- 汽车板材包边工艺研究 张钧萍, 马鸣图, 金庆生, 方 刚 (366)
- 斜楔弯曲工艺对类 U 形件回弹的影响与分析
..... 方 刚, 马鸣图, 金庆生, 郭怡晖, 宋磊峰 (374)
- 基于 HyperXtrude 的铝型材挤压成型仿真分析与试验
..... 万鑫铭, 夏 铭, 李 阳, 赵清江 (380)
- 材料状态和工艺顺序对铝型材绕弯回弹的影响
..... 刘志文, 万银辉, 王 冠, 李落星 (387)
- 激光拼焊技术的研究进展 刘国承, 刘吉斌, 史玉升, 胡吟萍, 张志建 (394)
- 基于 FEM 的汽车轻量化用高强度板拉深成型性研究
..... 朱梅云, 崔礼春, 熊 飞, 杨 杰, 许三山 (403)
- 热成形技术在 JAC 车身上的应用 王 平, 崔礼春, 熊 飞, 余欢庆 (410)
- 超高强度钢辊弯成型有限元建模与工艺分析报告
..... 阎 昱, 高贵麟, 冯志彬, 贾方辉, 张 乐, 张 振 (415)
- 超高强度汽车结构件热成形模具仿真优化技术
..... 史栋勇, 盈 亮, 胡 平, 戴明华, 李 焯, 贺 斌 (423)
- 非平衡胶接接头极端温度环境强度退化研究 胡 平, 韩 啸, 李伟东 (430)
- 激光切割对 TRIP 钢组织和性能的影响研究 李 斌, 郭小燕, 孙智富 (438)
- 浅谈铝合金车身连接技术的现状与趋势 张宁红 (446)
- 汽车轻量化构件内高压成型技术开发进展
..... 苑世剑, 刘 钢, 韩 聪, 王小松, 谢文才, 王 彦 (453)

评 价

- 普通乘用车白车身弯曲刚度试验方法的比较
..... 向晓峰, 陈 军, 魏丽霞, 马鸣图 (461)
- 铝合金板材表面橘皮和断口形貌观察及纳米硬度表征
..... 马鸣图, 梅华生, 路洪洲, 杨红亚, 吴娥梅 (467)

铝合金汽车板表面橘皮的 EBSD 和 X 衍射分析

..... 马鸣图, 孙智富, 王智文, 路洪洲 (476)

轻量化乘用车的星级评价方法研究

..... 路洪洲, 王智文, 马鸣图, 陈一龙, 路贵民 (486)

客车轻量化技术的应用现状及发展前景 尹知生 (496)

高强度钢热摩擦系数测试装置 ... 孙智富, 马鸣图, 郭怡晖, 孙 健, 李 静 (500)

汽车零部件材料冷热疲劳模拟装置 孙智富, 马鸣图, 孙 健, 吴娥梅 (507)



设计



基于相对灵敏度法的白车身轻量化

李亦文^{1,2}, 郝玉敏^{1,2}, 唐洪斌^{1,2}, 李红建^{1,2}, 王士彬^{1,2}

1. 汽车振动噪声与安全控制综合技术国家重点实验室;
2. 中国第一汽车股份有限公司技术中心

摘要: 将应变能密度理论与白车身结构承载特性相结合, 提出了车身部件的应变能密度比质量灵敏度的相对灵敏度方法。通过弯扭工况下的相对灵敏度分析, 能够准确获得各个部件的承载贡献量, 以指导在刚度目标下的轻量化设计。根据预定义的抗撞性能目标, 对轻量化方案和原模型进行了分析对比。结果表明, 轻量化方案能够在保证性能的前提下显著地降低结构质量。

关键字: 白车身; 轻量化; 应变能密度; 相对灵敏度; 抗撞性

中图分类号: U463.82

文献标识码: A

文章编号: 2012AL0102

Lightweight Design of BIW based on Relative Sensitivity Method

LI Yi-wen^{1,2}, HAO Yu-min^{1,2}, TANG Hong-bin^{1,2},
LI Hong-jian^{1,2}, WANG Shi-bin^{1,2}

1. State Key Laboratory of Comprehensive Technology on Automobile Vibration and Noise & Safety Control;
2. China FAW Group Corporation R&D Center

Abstract: Using the element strain energy density theory combining with the load-carrying characteristics of BIW, a structure modification method based on the relative sensitivity, i. e., the ratio of the strain energy density to the mass sensitivity was proposed. From the relative sensitivity analysis of bending and twisting condition, the load-carrying capability of all components can be obtained to help the high stiffness and lightweight design. According to the crashworthiness targets, the comparison of lightweight scheme and initial model is taken. The results demonstrate the lightweight scheme can obviously reduce total weight, and successfully

收稿日期: 2012年7月4日。

作者简介: 李亦文, 男, 博士, 工程师; 郝玉敏, 男, 硕士, 工程师; 唐洪斌, 男, 博士, 高级工程师; 李红建, 男, 博士, 研究型高级工程师; 王士彬, 男, 学士, 工程师。

achieve the pre-defined performance targets.

Key words: BIW; Lightweight; Strain energy density; Relative sensitivity; Crashworthiness

1 前言

节能和环保是汽车工业发展的永恒议题。世界铝业协会报告指出：车身自重每减少10%，可降低油耗6%~8%，降低排放5%~6%。可见，汽车轻量化设计对节能和环保至关重要。现有的轻量化技术主要包括三方面：新材料的应用、新的制造技术和工艺，以及先进的结构优化或设计方法。在成本驱动下，基于FEM的结构优化及修改技术逐渐成为主要的轻量化设计手段，能够为轻量化提供较为理想的结构方案^[1]。高云凯利用ANSYS对轿车车身进行了模态修改灵敏度分析，并对车身主要部件提出了轻量化改进方案^[2]。兰凤崇基于梯度法对轿车车身部件进行了厚度优化，提高了车身扭转刚度及低频频率，并控制了车重^[3]。同时，国外的学者也在轻量化领域进行了众多尝试^[4,5]。但类似的方法中均存在着灵敏度分析计算量过大的问题。

本文将车身结构在扭转和弯曲工况下产生的应变能密度作为衡量局部承载量的标志，刚度分析中的部件应变能密度分布可以等效为结构刚度的逆测度。通过计算一次特定工况下的应变能密度，能够有效地替代结构灵敏度分析，提高了模型修改的效率。同时，提出了应变能密度比质量灵敏度的相对灵敏度分析方法，以此结果指导后续的轻量化模型修改。经验证，所提出的轻量化方案显著地减低了结构质量，并确保了静刚度、抗撞性能达到设计目标。

轻量化问题描述

车身的主要性能包括：静刚度、动刚度、结构抗撞性能、NVH特性、疲劳及耐久等其他特性。在开发过程中，设计人员发现某A级车的白车身结构在静刚度和结构抗撞性能方面存在着一定的性能冗余，而且整体的质量较大，因此有必要在保证静刚度和抗撞性能的前提下，实施轻量化。由数值模拟与试验结果对比可知，所建立的有限元模型具有较高的模拟精度，能够用于后续的性能评估及优化。为了确保轻量化后的车身结构依然具备较高的结构力学性能，定义了弯曲、扭转刚度的性能阈值分别为12 000 N/mm和8 000 N·m/(°)，同时要求将质量控制到260 kg以下。考虑到成本因素，在轻量化过程中并未替换材料，仅将部件板厚作为修改变量。

2 相对灵敏度分析

2.1 应变能密度法

在载荷的作用下，白车身的结构发生变化，参与承载的部件将会产生应变能（弹性势能）。为了使结构的承载能力最大，应保证应变能密度分布均匀化。在静态扭转、弯曲工况下车身的有限元方程可表示为：

$$u = K^{-1} \cdot P$$

$$E = \frac{1}{2} u^T P = \frac{1}{2} P^T \cdot u$$

$$E = \frac{1}{2} u^T K \cdot u \quad (1)$$

基于上式,若载荷 P 保持不变,结构刚度越大,其位移 u 就越大,则结构的应变能 E 也就越大;而对于刚度较小的结构,其位移 u 也较小,则其应变能也较小。因此,可将结构承载后产生的应变能密度作为结构刚度的一种拟测度,从而解决了复杂结构灵敏度分析计算量过大的问题^[6]。

2.2 相对灵敏度法

对承载式车身来说,一个关键板壳部件厚度的变化会对车身的的一个或多个性能产生迥异的影响。虽然某些部件厚度的减少可以在一定程度上减轻结构质量,但同时将伴随着结构刚度显著下降,甚至结构刚度下降幅度会远大于降重幅度。因此,在轻量化目标下,综合考虑这些影响因素是十分必要的。在利用应变能密度法分析部件承载贡献量的同时,要分析各部件厚度增量在整个白车身的轻量化设计中的影响程度,即质量灵敏度 S_M :

$$S_M = \frac{\Delta M(x)}{\Delta x_i} \quad (2)$$

式中, $\Delta M(x)$ 为质量增量,单位为 kg; Δx_i 为厚度增量,单位为 mm。

为了权衡部件厚度变化对刚度及质量的综合影响,进一步计算扭转工况相对灵敏度 E_T/S_M 和弯曲工况相对灵敏度 E_B/S_M ,即扭转工况及弯曲工况下,应变能密度对质量修改量的相对灵敏度。表 1 和表 2 中列出了比较有代表性的部件灵敏度信息。

表 1 扭转工况灵敏度信息表

部件编号	最大单元应变能密度 E_T / (J · mm ⁻³)	质量灵敏度 S_M / (kg · mm ⁻¹)	相对灵敏度 $\frac{E_T}{S_M}$
8403253	0.009 49	0.000 196 7	48.249
5113141	0.008 86	0.000 448	19.918
5101281	0.001 31	0.012 6	0.104
5112223	0.000 048	0.000 676	0.071

表 2 弯曲工况灵敏度信息表

部件编号	最大单元应变能密度 E_B / (J · mm ⁻³)	质量灵敏度 S_M / (kg · mm ⁻¹)	相对灵敏度 $\frac{E_B}{S_M}$
5101661	0.003 12	0.000 344	9.07
5113172	0.000 753	0.000 219 875	3.425
5301421	0.001 15	0.005 855	0.196
5401442	0.000 001 78	0.000 152	0.011 7

由表 1 可知,在扭转工况下部件 8403253 和 5113141 的质量灵敏度较低,若减少这两个部件的厚度,则降重效果不明显;同时这两个部件的最大单元应变能密度值和相对灵敏度值较大,减厚的同时会显著降低结构承载能力,因此不宜减少这两个部件的厚度。相反,部件 5101281 和 5112223 的最大单元应变能密度值和相对灵敏度值较低,而质量灵敏度值较大,表明减小两部件的厚度能够有效地降低结构质量,同时不会过多损失整体扭转刚度。类似地,表 2 中部件 5101661 和 5113172 在弯曲工况下的相对灵敏度数值较大,表明减少这两个部件的厚度会对整体弯曲刚度造成不利影响,因此对降重的目标贡献很小;相反,由于部件 5301421 和 5401442 的相对灵敏度数值较小,可以通过减少厚度来实现轻量化目标,且不会过多影响弯曲刚度。

3 轻量化方案

在轻量化过程中,需要避免修改对侧面碰撞吸能及 NVH 特性影响大的部件。为防止厚度更改影响到原造型或方案布置,厚度修改范围定为原厚度的 20%。基于相对灵敏度分析结果,选择其中 134 个相对灵敏度数值较小的部件进行减厚处理(如图 1 所示)。

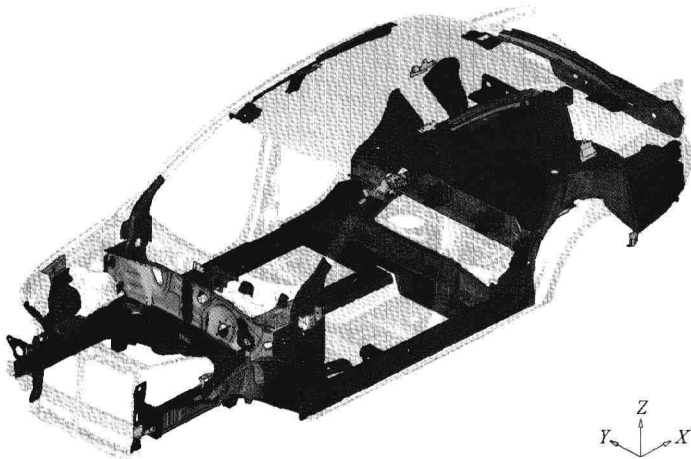


图 1 减小厚度的 134 个部件分布

4 方案对比与分析

4.1 静刚度性能

图 2 和图 3 分别为轻量化模型在扭转和弯曲工况下的位移及应力云图。结合表 3 的数据可以看出,轻量化方案导致结构的扭转刚度和弯曲刚度有所下降,但二者均大于性能阈值,保证了整体刚度的性能目标。同时,整体质量下降达 25.3 kg

(约 8.89%)，降重效果十分显著，在保证刚度性能的情况下，极好地实现了降重目标。

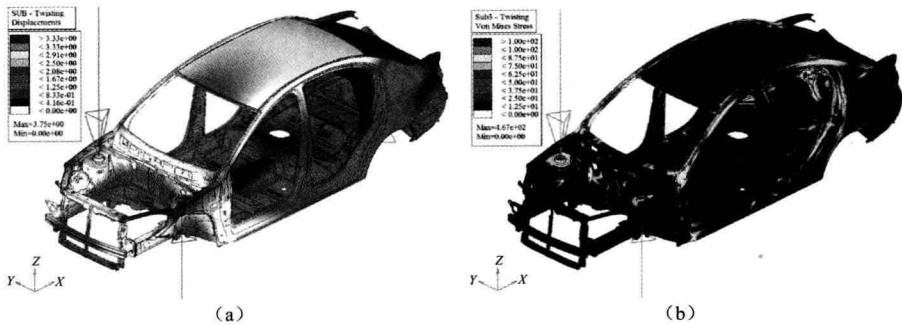


图2 轻量化模型在扭转工况下的位移及应力云图

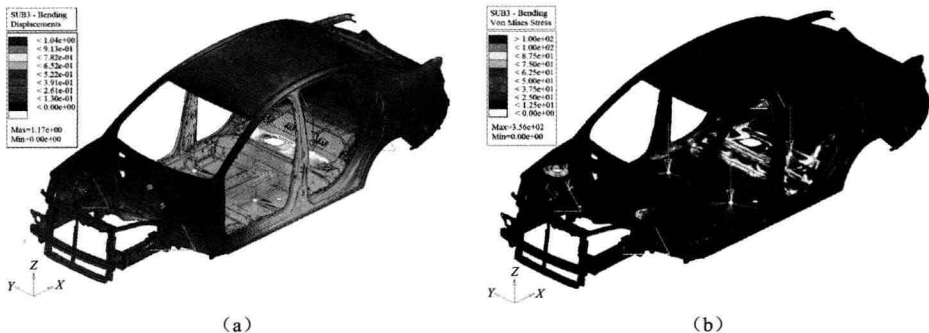


图3 轻量化模型在弯曲工况下的位移及应力云图

表3 原模型与轻量化模型的刚度对比

	原模型	轻量化模型	轻量化阈值
扭转刚度/ $[N \cdot m \cdot (^{\circ})^{-1}]$	8 968.16	8 090.61	8 000
弯曲刚度/ $(N \cdot mm^{-1})$	15 772.87	14 424.81	12 000
质量/kg	284.4	259.1	260

4.2 整车抗撞性能分析对比

为了检验轻量化方案对整车抗撞性能的影响程度并确保满足安全性能目标，参考 C-NCAP 中的三项高速试验工况：FRB 50 km/h、ODB 56 km/h 和 MDB 50 km/h，对原模型及轻量化模型进行了分析对比。其中，FRB 50 km/h 和 ODB 56 km/h 采用相同的对比参数，包括驾驶员侧脚部区域关键点侵入量 (F_1、F_2、F_3) 和驾驶员侧前门口 X 方向变形量 (D_1、D_2)，如图 4 (a) 和 (b) 所示。MDB 50 km/h 的对比参数包括 B 柱关键点侵入量 (BP_1、BP_2、BP_3、BP_4)，如图 4 (c) 所示。原模型与轻

量化模型在三个工况下的对比参数列于表 4。

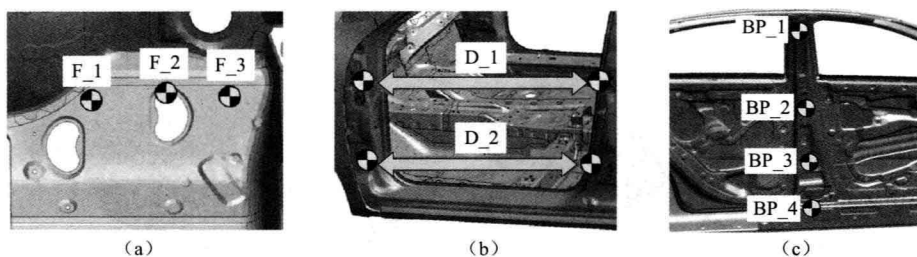


图 4 结构抗撞性参考点

(a) 驾驶员侧脚窝区域关键点；(b) 驾驶员侧前门口变形；
(c) B 柱关键点

表 4 轻量化方案与原模型的抗撞性能对比

工况	FRB 50 km/h 对比参数/mm					ODB 56 km/h 对比参数/mm					MDB 50 km/h 对比参数/mm			
	F_1	F_2	F_3	D_1	D_2	F_1	F_2	F_3	D_1	D_2	BP_1	BP_2	BP_3	BP_4
轻量化方案	21	16	6	0	0	41	28	17	1	0	56	112	96	82
原模型	14	11	3	0	0	41	29	14	0	0	49	100	79	59
目标阈值	50	50	50	15	7.5	50	50	50	15	7.5	100	115	200	100

表 4 中的对比数据显示，在 FRB 50 km/h 和 ODB 56 km/h 这两个前部碰撞工况下，驾驶员侧脚部区域的侵入量明显增加，而前门口变形量变化极小。这是由于轻量化方案中将车身前部的吸能结构做了减厚处理，致使前部刚度下降。但基本未修改乘员舱框架部件的厚度，因此保证了乘员舱区域在前部碰撞下仍具备较高的刚度，符合前低后高的刚度设计规则。由于车身 B 柱下端门槛做了减厚处理，导致在 MDB 50 km/h 中的 BP_3 和 BP_4 的侵入量显著增加，使车身侧面抗撞性能有较大的降幅。但总体来看，各项对比参数的变化数值均低于目标阈值，满足设计性能目标。

5 结论

基于轻量化设计及车身力学性能目标，将应变能密度法等效为结构刚度的逆刚度方法，并与结构质量灵敏度相结合，综合地评估了各个部件厚度更改对刚度特性及质量的影响程度，显著地降低了复杂结构灵敏度分析的计算量。通过合理地选择部件并进行减厚处理，实现了满足静刚度、抗撞性能目标的轻量化设计，验证了所提出的相对灵敏度方法既能够有效地协调结构性能与轻量化设计的关系，又能够同

时提高模型修改的准确性及效率。

参考文献:

- [1] 吴春虎, 李方义, 李剑锋, 等. 基于 FEM 的驱动桥壳轻量化设计 [J]. 武汉理工大学学报 (交通科学与工程版), 2011, 35 (6): 1248 - 1251.
- [2] 高云凯, 蓝晓理, 陈鑫. 轿车车身模态修改灵敏度计算分析 [J]. 汽车工程, 2001, 23 (5): 352 - 355.
- [3] 兰凤崇, 陈吉清. 承载式车身覆盖件板厚优化及灵敏度分析 [J]. 航空制造技术, 2005, 3: 61 - 65.
- [4] Ishihama M, Iizuka S, Tanahashi K, et al. Optimization of super-lightweight space-frame vehicle structure [J]. SAE Technical Paper, 2003 - 01 - 1709.
- [5] Soto C. A, Pan T. Y. Optimum topology of structural foam for crashworthiness applications [J]. SAE Technical Paper, 2004 - 01 - 0467.
- [6] 李亦文, 徐涛, 左文杰, 等. 基于相对灵敏度的车身结构模型修改 [J]. 吉林大学学报 (工学版), 2009, 39 (6): 1435 - 1440.