

Application of parameter optimization in vehicle hood development

Ruyi CHEN^{1,2}, Huijie Xu¹, Yue Fu¹, Ju Wang^{1,2}, Huili YU^{1,2}, Taisong CUI^{1,2}, Hui ZHAO^{1,2}

¹State Key Laboratory of Vehicle NVH and Safety Technology, Chongqing, China, 401120

²Chongqing Changan Automobile Co Ltd, Chongqing, China, 401120

Email: chenry@changan.com.cn

Abstract: In this research, vehicle hood is fully parameterized by SFE concept software, and the performance of pedestrian protection, NVH (Noise, Vibration, Harshness) and stiffness is optimized simultaneously. In order to improve the efficiency of optimization, an automated workflow is proposed to generate DOE (Design Of Experiments) data, RSM (Response Surface Method) and MDO (Multidisciplinary Design Optimization) method are conducted to find the optimal design. 17 design variables was selected from 22 structure parameters based on sensitivity analysis. Latin hypercube method is selected to generate sample data, Kriging method based RSM and NSEA+ algorithm are performed to find the multi-object for minimum of vehicle hood mass and average HIC value. After MDO conducted, the result shows that average HIC value is reduced by 28.3%, and hood mass is reduced by 5%.

Keywords: vehicle hood; parameter optimization; pedestrian protection; MDO

参数化方法在前罩开发中的应用

陈如意^{1,2}, 许慧杰¹, 付月¹, 王菊^{1,2}, 禹慧丽^{1,2}, 崔泰松^{1,2}, 赵会^{1,2}

¹汽车噪声振动和安全技术国家重点实验室, 重庆, 中国, 401120

²重庆长安汽车股份公司, 重庆, 中国, 401120

Email: chenry@changan.com.cn

摘要: 通过参数化方法对前罩板进行全尺寸参数化建模, 并从行人保护、罩板模态、刚度等各方面性能进行同步优化, 能有效提高罩板的综合性能。为了提高效率, 本文提出了面向罩板优化的自动化优化流程, 并结合响应面方法进行多学科优化。选择罩板结构的 22 个变量作为多学科优化的设计变量, 通过相关性分析, 分析了这 22 个变量对各项指标的影响, 选取了相关性较高的 17 个变量用于最终优化。采用优化拉丁超立方生成样本点, 通过 Kriging 算法建立响应面后, 采用第二代非劣解排序遗传算法(NSEA+)进行罩板总重量和平均 HIC 值优化, 得到妥协解。最终选取平均 HIC 值最小的妥协解作为优化解。优化后平均 HIC 值降低 28.3%, 罩板厚度降低 5%。

关键词: 罩板; 参数优化; 行人保护; 多学科优化

1 引言

C-NCAP (18 版) 新增了行人保护评价内容, 行人保护评价项分为头部和小腿, 前罩是头部主要的得分区域。但是前罩的开发属于典型的多学科问题, 除了考虑安全性能外, 前罩在设计过程中需要满足其他学科的性能要求, 比如前罩的弯扭刚度和声-振-粗糙度 (NVH) 性能等^[1]。其中弯扭刚度往往与 NVH 性能正相关, 而与安全性能负相关^[2]。Su Ruiyi^[3]对汽车白车身进行多目标优化, 以提高刚度、强度和翻转安全性, 同时也降低了 76 公斤的车身结构重量。对于行人保护方面的参数化优化, 吕晓江^[4]等人对多目标优化算法进行研究, 对车辆前端结构参数进行了可靠性优化设计, 提升了行人腿部保护的安全性能。然而, 传统的开发流程使多学科优化变得困难, 如图 1 (a) 所示, 现有的开发流程中, 工程师参与较晚, 且各学科之间相对独立, 方案修订困难冗杂, 很难充分挖掘出罩板的安全性能。吉林大学的王登峰团队^[5-7]通过 SFE Concept 软件建立了隐式参数化车身模型, 通过全尺寸参数变换, 进行多学

科参数化, 并找到了满足多个学科性能要求的配套参数。因此, 通过参数化罩板结构参数进行多学科优化可以大大提高罩板的开发效率。但是目前针对罩板的前期全尺寸多学科的参数化研究仍较少。故本文提出一种面向设计初期的参数化优化方法用于罩板的多学科设计。本文在建立高精度的前期参数化模型基础上, 通过自动化调用试验矩阵和建立近似模型, 对罩板的内部结构参数进行多学科优化, 不仅能使罩板在满足刚度和 NVH 要求的基础上, 充分发挥轻量化和安全性能, 还能有效减少方案迭代次数, 其工作流程如图 1 (b)所示。

D-

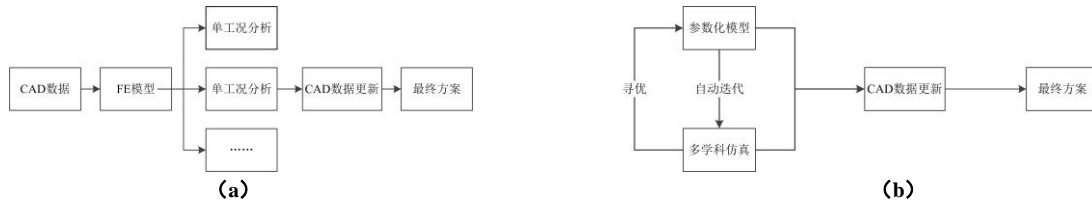


Figure 1. The comparison of vehicle hood development

图 1. 前罩开发流程对比

2 全尺寸隐式参数化模型建立

2.1 隐式参数化方法

随着法规不断健全和市场竞争不断加剧, 对汽车的性能要求越来越严格, 对缩短零部件开发效率也提出了新的要求。车身结构作为四大总成中更新最快的部分, 通过参数化设计方法能有效通过提高优化效率, 减少重复工作, 缩短研发周期, 从而提高主机厂的市场竞争力。参数化方法包含“传统参数化方法”和“仿真驱动的参数化方法”, 传统方法注重零件层面的参数化, 模型相对简单, 可编译参数少, 且难以应用到仿真和生产^[8]。分析驱动的参数化可以建立 CAD-CAE 一体化模型, 能自动生成网格, 通过配合大范围全尺寸的零部件设计参数, 能很好的建立高可信度的有限元模型用于结构的仿真优化。近年来德国 SFE 公司, 美国 DEP 和 Altair 等公司分别对出了专门用于结构设计的 SFE-Concept、DEP-Meshworks 和 Hypermorpher 等软件来辅助工程师实现仿真驱动设计^[9]。其中 SFE-Concept 采用隐式全参数化建模, 相对于基于控制网格变化的显示参数化设计, 隐式参数化方法通过几何模型内高效的映射关系, 形成相对独立的拓扑关系与几何关系, 从而实现各个参数尺寸的大幅变动和网格数据的快速生成。隐式参数化模型还可以通过数据库, 将各个零部件进行映射拼接可以快速的定义一个新概念产品。SFE-Concept 参数化模型的组成元素主要包括了基点 (Influence point)、基线 (Base lien)、截面 (Base/local section)、梁 (Beam)、接头 (Joint)、以及自由面 (Surface) 和肋条 (Stamping), 其中基点、基线、截面是 SFE 模型的主要参数变量。如图 2 所示, 创建两个基点后, 通过两个基点形成基线, 然后根据罩板轮廓画出罩板截面, 最后通过创建梁使得截面沿着基线生成参数化曲面。其中基点位置、基线曲率, 截面尺寸等参数均可以设置成参数用于后期的参数化优化。

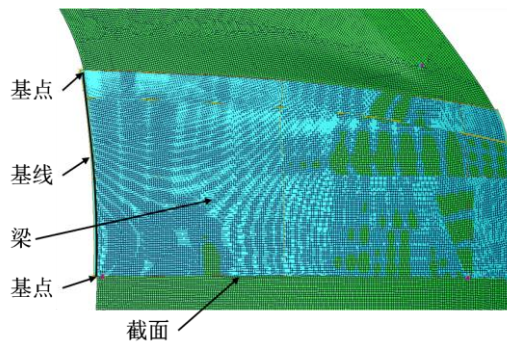


Figure 2. The process of Beam generation

图 2. 梁元素的生成过程

发动机罩板主要由内外罩板、铰链、锁销及前罩加强件组成，内外板之间通过粘胶进行连接。罩板与整车通过铰链连接，锁销进行限位，并辅以缓冲垫支撑，具体结构如图 3 所示。考虑到内外板为主要的零件，其中前罩内板是最主要的结构件，其设计空间大，通过优化设计可以很好的满足刚强度、NVH 和行人保护等学科的性能要求。故本文建立参数化模型主要为前罩内外板，并将其通过外部网格连接功能与锁销、铰链及其对应加强件的 dyna 关键字进行连接。同时内外板之间建立粘胶参数化模型及多层翻边实现内外板的连接。

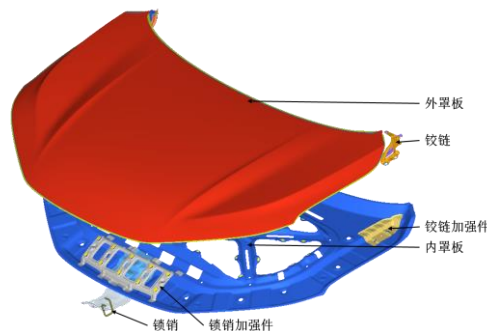


Figure 3. The composition of vehicle hood

图 3. 罩板结构示意图

2.2 罩板全尺寸参数化模型

由于罩板内外板关于 X-Z 平面对称，所以在对其进行参数化建模时以 X-Z 平面为对称平面将罩板内外板模型分为左右两个部分，建模时只需建立左侧部分，然后利用 SFE-Concept 中的镜像功能快速的构建出右侧部分，再对非对称部件进一步修改。经过镜像后左右两部分能无间隙连在一起，并且保证划分网格时，连接部位单元共节点。由于建模仿真度越高工作量往往越大，故在参数化建模时应对车身性能影响较小的筋条、倒角、孔等特征忽略掉。这样既提高了参数化模型的柔度，又方便后期录制设计变量。罩板外板中间部分与边缘造型相对独立，中间造型相对简单，边缘造型过渡变化较多，故本文采用 3 段梁来对结构进行表征，其中中间部分采用一根横梁，边缘部分分割成两段纵梁来表征，各梁内部会通过中间截面来调整整个梁的几何走向和细节特征，使参数化模型具有较高的几何保真度。但是由于部分区域（灰色区域）曲率变化剧烈，不易设定与梁两端相同的几何截面，本文通过在建立好梁几何后通过添加面来补合。罩板内板模型较为复杂，含有大量特征，对于外围几何采用三段梁进行表征。由于三段梁之间相邻夹角接近 90 度，本文采用接头特征进行连接。在每段梁中通过中间截面进行凸台、凹槽、倒角等特征的表达，对于复杂特征，通过补充面的方式进行建立。对于内板结构，本车采用 X 型内板结构，X 型结构区域通过 5 段梁特征进行表达，然后通过中间的一个矩形凸台接头进行内部连接，并通过四周的 4 个接头与外周结构连接。并在 X 型区域内建立粘胶特征用于后续与外罩板的连接。由于

内外板加强件结构相对简单，就不具体赘述建模过程，整个参数化罩板建模示意图如图 4 所示。

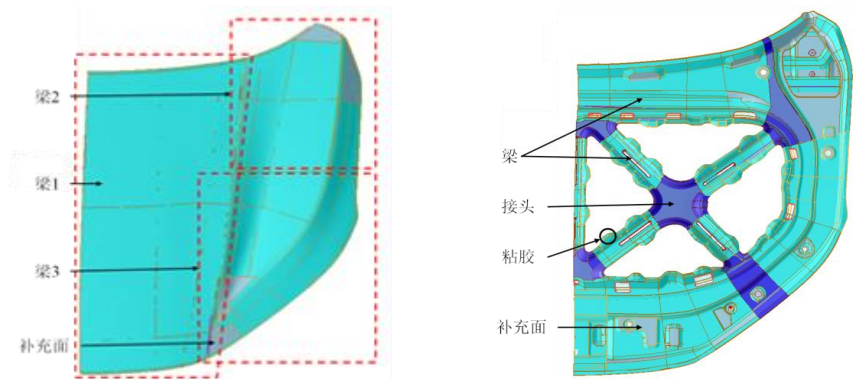


Figure 4. The composition of vehicle hood parametric model
图 4. 参数化罩板建模示意图

本文主要研究罩板的参数化优化问题，因此无需对前端结构和发动机罩内的结构建立参数化模型，但是在性能分析时，需要对其将发动机罩安装在车体上，才能保证仿真的真实性。本文通过建立外部网格连接，将非优化区域的网格模型与建立的参数化模型进行耦合。整个耦合方法是首先在参数化模型与外部模型之间预留一定间隙，然后通过生成一个特定的局部截面使得其两端分别与参数化模型和外部模型共节点，从而实现参数化模型与外部模型的连接与耦合。本文与外部网格连接主要是锁销加强件与锁销的连接，铰链加强件与铰链的连接。除了与外部网格连接之外，加载点的刚性连接（Rigid body）和加载点网格编号保持不变是流程化计算的关键。通过在参数化模型中建立 RIGID BODY 并赋予固定的 Part ID 可以使参数化模型使加载点 ID 不受模型网格变化的影响，进而对于任意参数的模型，都能通过对该点进行加载。锁销加强件与加载点设置如图 5 所示。

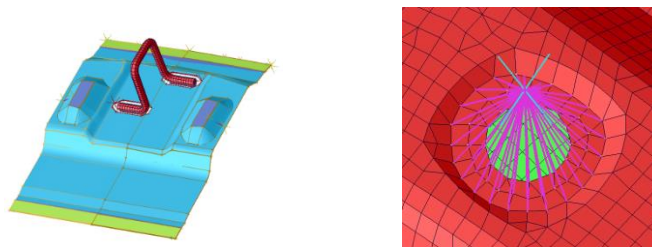


Figure 5. External grid connection and Rigid body
图 5. 外部网格连接与工况加载点设置

3 面向罩板结构的多学科优化

3.1 多学科工况

发动机舱盖本体结构性能主要选取了舱盖扭转刚度、侧向刚度、前后部弯曲刚度等 4 个工况共 6 个分析项作为输出响应^[10-12]，如图 6 所示各分析工况从不同角度反映了舱盖本体结构抵抗变形的能力。其中扭转刚度弯曲工况主要考察发动机罩板在一定载荷下产生相对扭转角，如汽车在行驶途中遇到坑洼路段时，车头一侧出现悬空的情况。仿真时将铰链安装孔全部自由度和右侧缓冲块 Z 向自由度进行约束，加载点在左侧缓冲块上，测量点为左右缓冲块在外板上的投影点。侧向刚度则是研究约束铰链安装孔全部自由度，约束左右侧缓冲块 Z 向自由度，加载在锁扣中心点（在锁扣中点两侧各 5mm 内锁扣表面节点创建 RBE2 单元）上，测量点为锁扣中心点在外板上的投影点。另外前后部弯曲刚度主要研究在垂直力载荷作用下该罩板的纵向变形情况，用于模拟汽车在行驶状况下遇到颠簸时的受力情况。前部弯曲刚度的约束条件和加载点与侧向刚度相同，测量点分别为锁

扣中心点在外板上的投影点和车身纵向对称面与外板距前罩前边缘 20mm 处的交点测量点为锁扣中心点在外板上的投影点和车身纵向对称面与外板距前罩前边缘 20mm 处的交点，后部弯曲刚度约束条件与侧向刚度相同，车身纵向对称面距前罩后端边缘 20mm 处，在内板和外板上选取 10mm*10mm 区域创建 RBE2 单元，RBE2 单元主点为加载点，测量点为锁扣中心点在外板上的投影点和车身纵向对称面与外板距前罩前边缘 20mm 处的交点，测量点为加载点在外板上的投影点。

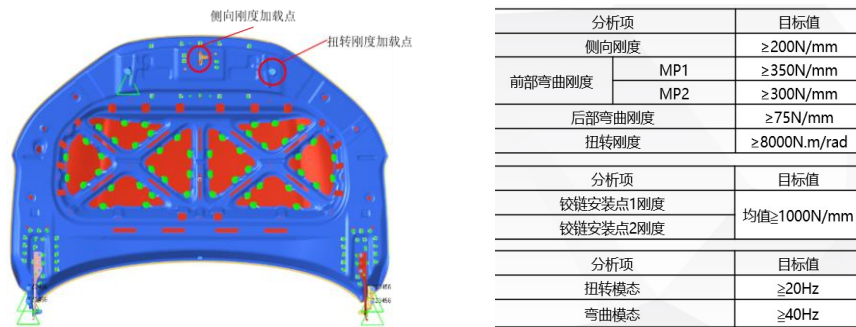


Figure 6. Constraints of stiffness analysis and responses
图 6.工况加载情况与响应要求

NVH 分析主要是为了提取和识别出物体的固有特性，即各阶固有频率和动态响应^[13]。一般轿车的模态为扭转模态，固有频率通常在 20~35 Hz^[14]。若只针对 NVH 性能，在质量可控的前提下，往往一阶频率越高，越有利于提升 NVH 品质以及延长疲劳寿命。但是高频率可能导致高刚度，这又会与行人保护性能相冲突，需要进行多学科统筹规划。由此，在满足该车型的整车设计验证计划目标为一阶频率 20 Hz。

“中国新车评价规程(China New Car Assessment Program, C-NCAP)”中的行人保护测试项目中涉及到发动机舱盖的包含儿童头型试验和成人头型试验^[15]。儿童头型质量 3.5 kg，碰撞速度 40 km/h，与水平方向成 50°；成人头型质量 4.5 kg，碰撞速度 40 km/h，与水平方向成 65°，其仿真工况示意图如图 7 所示。根据 C-NCAP 要求对发动机舱盖进行分区画点，分别得到儿童和成人头型定位信息，用头型冲击舱盖上各点，得到该点的 HIC 值，根据 HIC 值得到相应的点分数。新版 C-NCAP 中行人保护中头部性能总分为 12 分，故头部性能得分=(各点得分总和/点数之和)×12。因此以头部性能得分作为行人保护性能的输出响应。

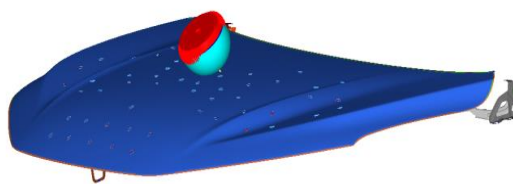


Figure 7. Pedestrian head impact analysis
图 7.行人保护头部碰撞示意图

3.2 优化问题定义

优化目标：以车身轻量化为目标，在车身模态频率和刚度指标达到要求的情况下尽可能降低白车身重量。

约束条件：在保证参数化白车身模态频率和刚度性能条件下的车身轻量化设计中，约束条件为约束车身结构的一阶频率，弯曲刚度以及扭转刚度的变化量。

变量选取：设计变量的数量和设计空间决定了优化设计的设计效率和优化结果，为了提高设计效率，缩短设计周期，如表 1 所示选取内板内部结构件的 22 个设计变量，设计参数分布在内板内各个加强件与主要结构尺

寸上。

Table 1. The information of design variable
表 1. 设计变量信息

变量	变量范围(cm)	变量描述	变量	变量范围(cm)	变量描述
x_1	(-5,10)	加强件前部内侧 Z 向高度	x_{12}	(-10,20)	内板两侧孔宽度大小
x_2	(-5,10)	加强件前部外侧 Z 向高度	x_{13}	(-10,20)	内板两侧孔宽度大小
x_3	(-2.5,10)	加强件后部外侧 Z 向高度	x_{14}	(-20,20)	内板前侧孔宽度大小
x_4	(-5,10)	加强件后部内侧 Z 向高度	x_{15}	(-25,15)	内板后侧孔宽度大小
x_5	(-5,10)	加强件中部 Z 向高度	x_{16}	(-15,20)	加强筋绕 X 转动
x_6	(-7.5,7.5)	后端台阶面 X 向宽度	x_{17}	(-25,15)	两侧腔体宽度
x_7	(-10,10)	后端台阶面 Z 向高度	x_{18}	(-25,15)	后侧腔体宽度
x_8	(-2.5,10)	改成前部腔体 X 向宽度	x_{19}	(-2.5,10)	后端台阶 2 界面 Z 向高度
x_9	(-15,10)	内板台阶宽度	x_{20}	(-15,10)	后端面外加强筋 Z 向位置
x_{10}	(-10,30)	后端面外加强筋 Y 向位置	x_{21}	(-15,10)	后端面内加强筋 Z 向宽度
x_{11}	(-10,20)	后端面外加强筋 Y 向宽度	x_{22}	(-20,20)	罩锁上加强件撑脚 X 位移

3.2 自动化优化流程

在建立参数化模型后，用同一组变量对前罩进行定义，SFE-CONCEPT 软件输出变量文件 (.mac)，通过驱动软件进行变形。在 OPTIMUS 软件中，把 .mac 作为输入变量文件，定义好相应变量的范围。读取分析后一些直接量作为响应（如扭转刚度、模态频率），间接量需要单独编程处理（如头部 HIC 值）。至此，能够自动进行前罩多学科的分析 and 后处理，这极大地减少了人为的手动优化次数，提高效率。具体分析流程如下图 8 所示。

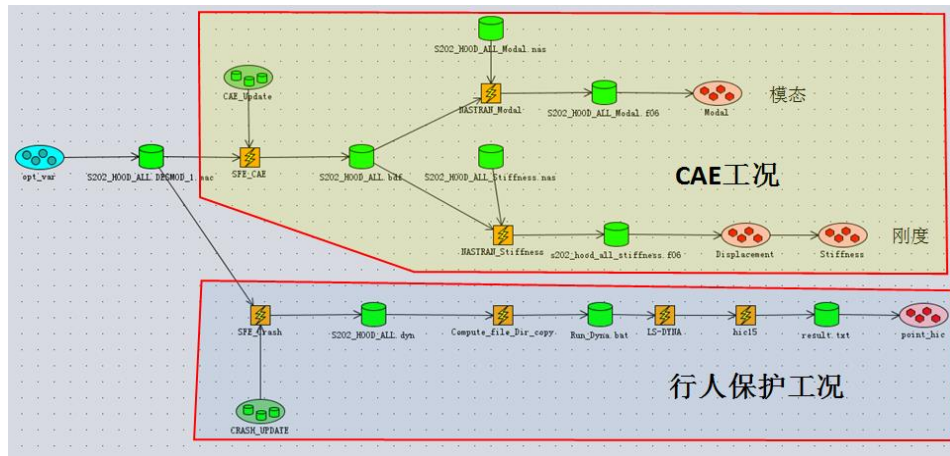


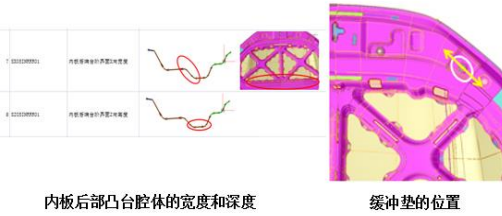
Figure 8. Workflow for CAE analysis
图 8. 自动化分析流程

流程试算无问题后，对 22 个变量运用拉丁超立方方法抽取 100 组数据进行 DOE 分析，对变量进行初步筛选，减少变量数。根据相关性分析，变量对响应的相关性系数越接近于 1，则影响越显著^[16]，通过此方法可以筛选出对响应不敏感的变量进行删除，并且能找到某些对一方不敏感而对另一方敏感的变量，这样变量的方案可以为后续的项目提供很好的参考。分析发现，如中间筋的深度、四周开孔对刚度、模态性能影响不敏感，而缓冲垫位置、后部腔体的深度对行人保护不敏感。相关变量分析见图 9。

1.对行保影响较大，对CAE影响较小的变量如下



2.对CAE影响较大，对行保影响较小的变量如下

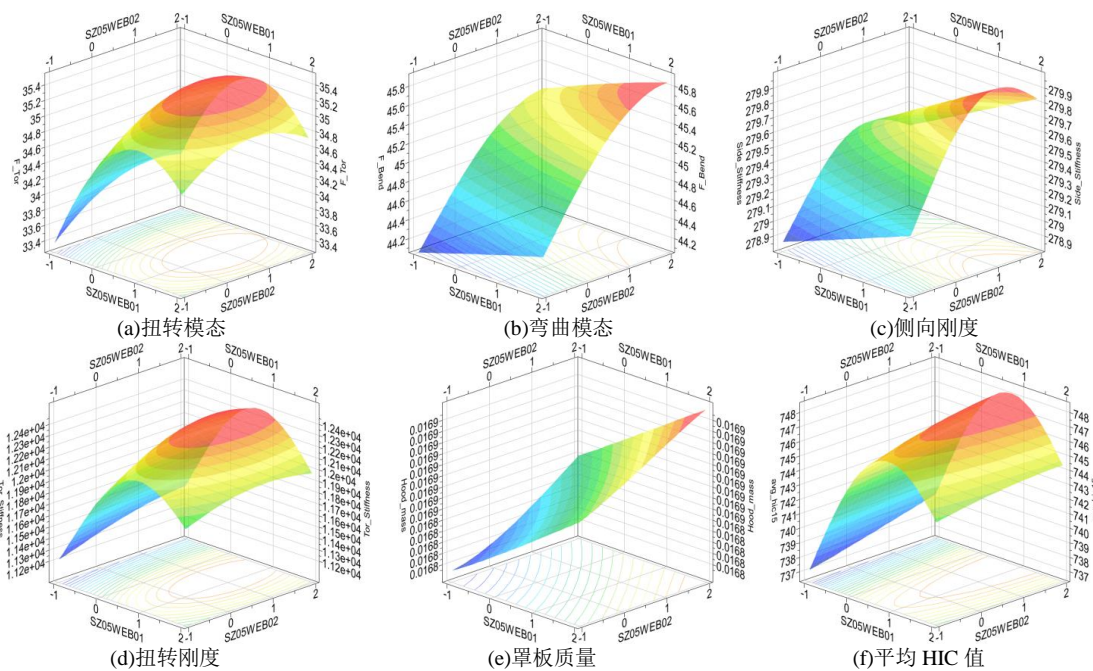


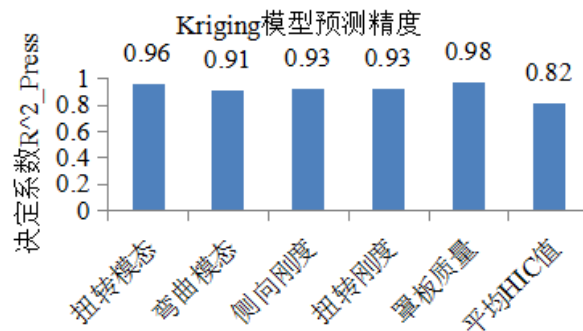
3.对两者影响均影响均较小的变量有



Figure 9. Related variable analysis
图 9. 相关变量分析

对变量进行筛选后，去掉了 5 个不敏感的变量，此时变量数目降为 17 个。重新进行一次 DOE 分析，计算 180 个样本点。样本点计算完成后，用 Kriging 模型对变量和响应进行拟合，生成近似模型。近似模型如图 10 所示。近似模型的精度可以用决定系数 R^2_{press} 反映，系数越接近 1，则说明近似模型的精度越高，其预测的值越可靠。在此处，模态、刚度指标的决定系数均大于 0.9，行人保护指标大于 0.8，因此认为所生成的近似模型是可靠的^[17]，如图 10 所示。





(g)各响应量对应的 Kriging 模型预测精度

Figure 10. Response surface models and prediction accuracy

图 10. 各响应面模型及其预测精度

对近似模型的可靠性进行验证后，就可以用近似模型进行优化，进而找到最优解。在此处，以原始前罩的刚度、模态指标做为约束，重量和平均头部 HIC 值作为目标，采用多目标遗传算法（NSEA+）进行寻优。优化结果如下图 11 所示，有 13 个 Pareto 解。

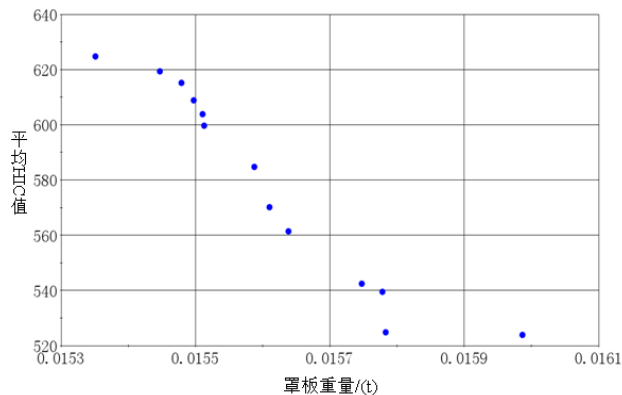


Figure 11. The result of optimization

图 11. 优化结果

为了提升罩板的行人保护性能，最后选取平均 HIC 值最小的 Pareto 解，优化结果显示，罩板质量从 16.8kg 降低为 15.99kg，平均 HIC 值从 730 降低为 523，优化效果明显。

4 结论

本文提出了一种面向罩板设计前期的参数化优化方法，并通过建立自动化分析流程实现对罩板各个工况进行自动分析。在得到 DOE 数据的基础上，通过建立响应面模型用于后期优化，最后优化结果显示，轻量化性能与行人保护性能都得到有效提升。故本文提出的参数化方法能够将有效的 CAE 分析提前渗透入产品开发流程，可以大大减少后期的分析优化次数。

5 不足与展望

本文通过建立参数化模型，能够对整个罩板进行全尺寸优化，大部分尺寸和形状都能够根据优化问题得到最优解，后期可以通过建立参数化模型库，快速生成新构型的罩板。由于对头部保护性能的评价涉及罩板及挡风玻璃区域为数较多的碰撞测试点，本文只选取了部分具有代表性的碰撞点的平均 HIC 值进行探究，在接下来的研究中，可考虑增加碰撞点或将离散的点进行插值运算，以覆盖更全面的法规测试区域。另本文的参数化模型主要包含罩板本

体, 对于大的结构尺寸及整体布置无法进行大的调整, 在之后的参数化优化中, 可考虑将整个前端结构都进行参数化建模分析, 并引入材料与厚度变量进行更深入的优化。

致谢 (Acknowledgement)

本研究为汽车噪声振动和安全技术国家重点实验室 2019 年度开放基金资助项目。课题编号为: NVHSKL-201909, 特此感谢。

参考文献 (References)

- [1] Swamy, Santosh, Gulshan Noorumar, and Shivakumar Chidanandappa. MASS OPTIMIZED HOOD DESIGN FOR CONFLICTING PERFORMANCES. No. 2019-28-2546. SAE Technical Paper, 2019.
- [2] PANCHAXRIMATH, Sushanth Kumareshwar, et al. Topology Driven Design of Under-Hood Automotive Components for Optimal Weight and NVH Attributes. SAE Technical Paper, 2019.
- [3] Su R , Gui L , Fan Z . Multi-objective optimization for bus body with strength and rollover safety constraints based on surrogate models[J]. Structural & Multidisciplinary Optimization, 2011, 44(3):431-441.
- [4] 吕晓江, 谷先广, 王国荣, et al. 基于组合近似模型的可靠性优化方法在行人柔性腿型碰撞中应用研究[J]. 机械工程学报, 2016, 52(10):142-149.
- [5] 王登峰, 蔡珂芳, 马明辉, et al. 基于隐式参数化模型的白车身轻量化设计[J]. 汽车工程, 2018, v.40; No.286(05):113-119+127.
- [6] 史国宏, 陈勇, 杨雨泽, et al. 白车身多学科轻量化优化设计应用[J]. 机械工程学报, 2012(08):114-118.
- [7] 王磊, 刘莹, 乔鑫. 基于正向开发流程的车身轻量化设计[J]. 汽车工程学报, 2015, v.5;No.29(06):74-78.
- [8] CHOI, Yangwook; FREEMAN, Shawn; LETAILLEUR, Fabien. Constructing a Concept Vehicle Structure Optimized for Crashworthiness. SAE Technical Paper, 2019.
- [9] 郑开铭. 基于参数化模型的小型电动车全铝框架车身结构轻量化设计[D]. 2019.
- [10] VYAS, Gaurav M.; ANDRÉ, Alann; SALA, Ramses. Toward lightweight smart automotive hood structures for head impact mitigation: Integration of active stiffness control composites. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2019, 1045389X19880016.
- [11] SATHAYE, Ashish; BHATTACHARYYA, Indranil. Lightweighting of Automobile Hood Using Multistep Optimization for Composite Material. SAE Technical Paper, 2019.
- [12] 何丽驰. 基于有限元分析的发动机罩板轻量化设计及耐撞性仿真研究[D]. 武汉科技大学, 2018.
- [13] CHANDRU, B. T., et al. Modal Analysis of Car Hood with Viscoelastic Damper. Materials Today: Proceedings, 2018, 5.10: 22293-22302.
- [14] SONG, Yun-biao, et al. Modal Analysis and Experimental Study of a Range Hood. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2018, 2: 26.
- [15] CHEN, Chao, et al. Investigation on Contralateral Lower Extremity Injuries of Pedestrian and E-Bike Rider Based on C-NCAP. SAE Technical Paper, 2018.
- [16] SONG, Yang, et al. Structural parameters optimization of lens hood based on a kind of surrogate model. In: 14th National Conference on Laser Technology and Optoelectronics (LTO 2019). International Society for Optics and Photonics, 2019. p. 1117002.
- [17] MENG, T. K., et al. Optimization of Polystyrene Biodegradation using Response Surface Methodology (RSM) Measured by Simple Colorimetric Method. International Journal of Engineering & Technology, 2018, 7.4.14: 216-22