

A Study of Inner Structure of the Hood Effect on Pedestrian's Head Protection

Yongcheng LONG^{1,2}, Jian ZHANG^{1,2}, Qiang HE^{1,2}, Ju WANG^{1,2}, Huili YU^{1,2}

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

² Changan Auto R & D Center, Changan Automobile Co., Ltd. Chongqing 401120, China

Email: longyongcheng@163.com

Abstract: In order to study the effect of the inner structure of hood on pedestrian's head protection. At first, the main inner layer structure on the market were classified into six types. Then, the performance of head protection, stiffness and mode were analyzed by finite element method. And the results shown that the structure type of honeycomb expressed high composite behavior, its stiffness and mode were satisfied on design aims. It improved the protection of pedestrian's head by 25% than original hood.

Keywords: engine hood; pedestrian's head protection; stiffness and mode; inner layer structure

发动机罩内板结构对行人头部保护性能的影响研究

龙永程^{1,2}, 张健^{1,2}, 何强^{1,2}, 王菊^{1,2}, 禹慧丽^{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 重庆长安汽车股份有限公司 汽车工程研究总院, 重庆, 中国, 401120

Email: longyongcheng@163.com

摘要: 为了研究发动机罩内板结构对行人头部保护性能的影响, 首先对市面上主要车型的内板结构形式进行了统计, 归纳出了 6 种常见的发动机罩内板结构。接着运用有限元方法, 在同一车型下对这几种内板结构的发动机罩头部碰撞性能, 弯扭刚度和自由模态进行了分析。结果表明: 蜂窝型内板结构性能最优, 弯扭刚度和模态指标均满足设计要求, 并且行人头部保护性能比原方案提高了 25%。

关键词: 发动机罩; 行人头部保护; 刚度; 模态; 内板结构

1 前言

近年来, 随着汽车工业快速发展, 汽车的保有量进一步增加, 行人事故的发生率也显著提升。通过对行人事故数据统计发现, 行人头部与汽车前部碰撞是主要的致死原因^[1]。根据行人事故中的损伤特点, 各国相应出台了行人保护法规, 如欧盟的 ECE-R127 指令、Euro-NCAP 新车评价规程、全球 GTR 法规, 我国也于 2009 年出台了 GB/T 24500 法规。在头部评价中, 主要通过头锤冲击器撞击发动机罩等结构, 因此优化发动机罩的结构对减轻行人头部伤害具有重要意义。

发动机罩板在设计时还必须满足一定的刚度要求, 若刚度不足, 使用过程中发动机罩板开闭时, 会产生变形。另一方面, 发动机罩板对振动和噪声有重要影响, 影响用户的舒适度^[2]。因此, 对发动机罩的研究必须综合考虑, 而目前国内外大多是对碰撞或刚度性能单方面进行研究, 很少结合两方面研究, 缺乏实际的工程意义^[3-5]。并且对行人头部碰撞中大多是集中于某几个点对发动机罩进行优化, 这不能综合评价优化前后罩行人头部性能的变化情况。

理想的发动机罩应具有足够的整体刚度和较小的局部刚度。针对市场上数量众多的发动机罩内板结构, 本文进行了归纳总结, 提出了 6 种常见的内板结构形式。根据 Euro-NCAP 评价规程^[6], 在长安一款车型上比较了

6 种结构内板的行人头部保护性能，同时分析了其弯扭刚度和自由模态，这为发动机罩内板结构的选型和设计提供了参考。

2 发动机罩内板结构

本文首先对标了市场上 54 款车型的发动机罩，从中归纳出 6 种比较典型的内板结构，如图 1 所示。

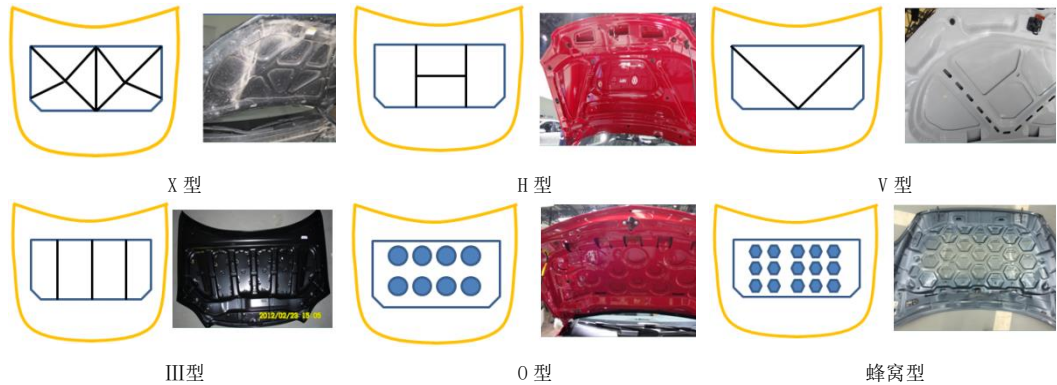


Figure 1. The structure of inner layer on the market

图 1. 市场上典型发罩内板结构

在长安一款车型发动机罩的基础上，建立了上述 6 种结构相对应的内板模型，如图 2 所示。本文中只研究内板结构的影响，内板边缘区域由于部件安装和配合的要求，研究中内板边缘区域的形状保持不变。发动机罩外板、铰链加强件和罩锁加强件均和基础模型一致，部件材料和厚度如表 1 所示。发动机罩内板和外板中间区域采用粘接连接，内外板边缘区域采用包边形式连接，包边厚度为 2.1mm。

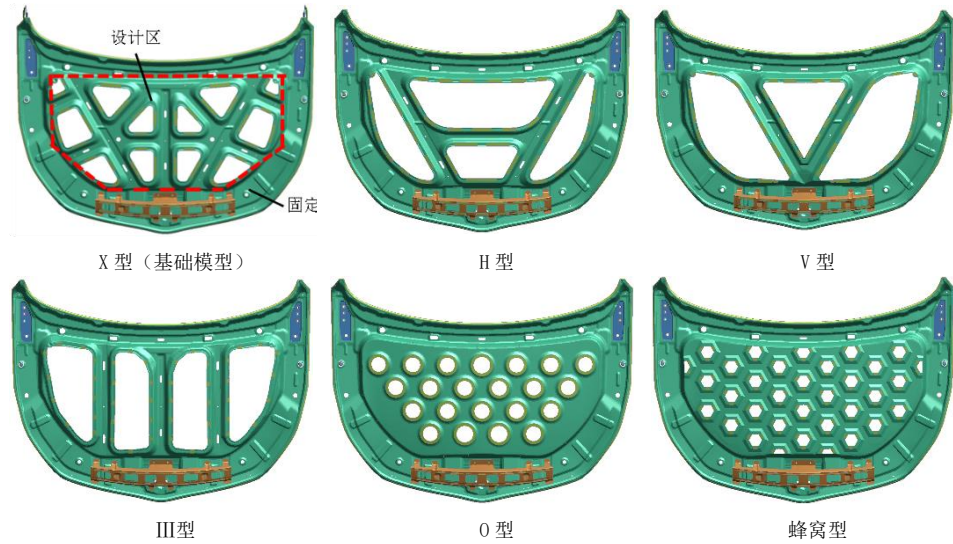


Figure 2.Inner structure of the different designs

图 2. 建立的 6 种结构罩板模型

Table 1.The parts material and thickness of the hood

表 1 发动机罩总成各部件材料和厚度

部件	材料号	屈服强度/MPa	厚度/mm
外板	DC04	164	0.7
内板	DC05	144	0.7
罩锁加强件	DC01	240	0.7
铰链加强件	DC01	240	1.5

3 有限元建模

3.1 行人头部碰撞分析

参考 Euro-NCAP 评价规程, 根据行人头部试验方法对前罩划分碰撞区域并对撞击点进行标记和命名^[6]。发动机罩板区域为儿童头区域, 按照规程要求从纵向中心线开始每 100mm 标记网格点位置, 如图 3 所示。

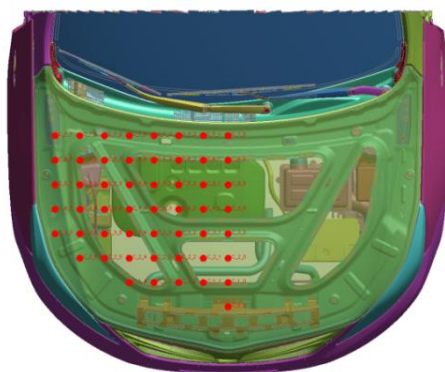


Figure3. Impact points of the child head

图 3.儿童头部碰撞点

分析中保留了机舱中可能与头部发生二次碰撞的部件, 如发动机装饰罩、电池组、空滤器等。整车后部对分析结果的影响较小, 截取 A 柱之前的结构并约束截面位置处节点的 6 个自由度, 以简化模型。采用动态非线性有限元软件 LS-DYNA 进行碰撞分析, 发动机罩总成中钣金件均采用 *MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY 材料模拟, 内外板间的粘胶采用 *MAT_ISOTROPIC_ELASTIC_PLASTIC 模拟。粘胶与内板共节点, 跟外板采用 CONTACT_TIED_NODE_TO_SURFACE 接触模拟粘接。

儿童头锤模型质量为 3.5kg, 在质心处设置加速度传感器。儿童头中心线与 Z 方向呈 65° 通过标记的网格点, 以 40km/h 的速度撞击发动机罩。头锤与外板采用 CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE 接触, 整车定义 CONTACT_AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE 接触。

所建立的头部碰撞有限元模型如图 4 所示, 仿真中输出儿童头锤质心处的合成加速度, 并计算 15ms 的 HIC 值并参考 E-NCAP 中头部伤害值标准进行评分。

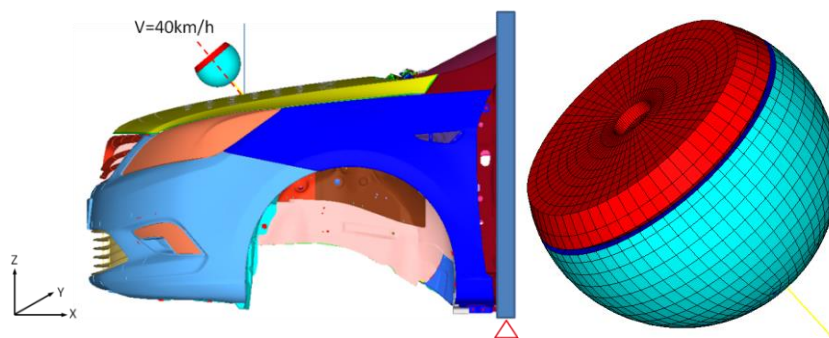


Figure4.Finite element model for pedestrian protection

图 4.行人保护有限元模型

3.2 发动机罩刚度和模态分析

根据发动机罩的相关试验标准^[2],本文选取了 2 个指标即前罩扭转刚度、前后弯曲变形量对刚度进行评价,同时对前罩自由模态进行分析。分析所用有限元软件为 MSC.Nastran,边界和载荷条件设置如图 5。

1) 扭转刚度:约束前罩两侧铰链位置螺栓安装孔的 6 个自由度,约束右侧缓冲块位置的 Z 向自由度,在左侧缓冲块位置处沿 Z 的负向施加 178N 载荷。

2) 前后弯曲变形量:约束前罩两侧铰链位置螺栓安装孔的 6 个自由度,约束两侧缓冲块位置的 Z 向自由度,前后弯曲工况分别在锁扣中点和后端边缘 20mm 处施加 200N 载荷。前部弯曲工况中测量加载点 Z 向投影至外板对应点的 Z 向位移量,车身纵向对称面与外板距前罩前边缘 20mm 处 Z 向位移量。后部弯曲工况中测量加载点在外板上投影点 Z 向的位移量。

3) 自由模态:不施加任何约束和载荷条件,提取其一阶扭转和一阶弯曲模态频率。

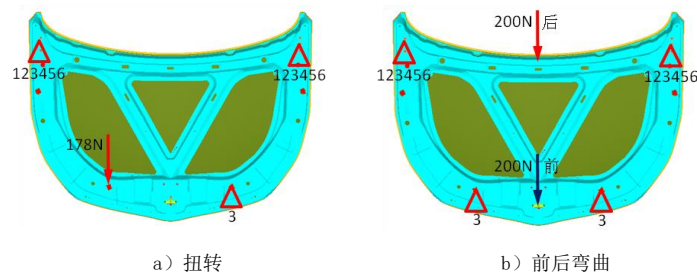


Figure 5.The conditions for hood stiffness analysis

图 5.发动机罩刚度分析工况

4 结果分析

4.1 行人头部保护性能

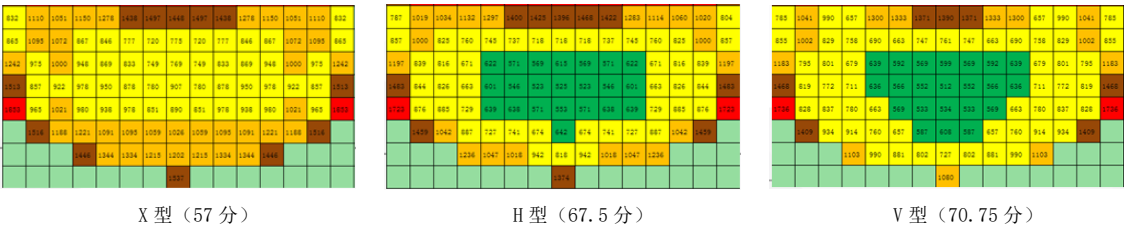
为了综合评价发动机罩的行人头部保护性能,参考 E-NCAP 对每个碰撞点的 HIC 值进行评分,评分标准如表 2 所示。

Table 2.The performance standard of HIC

表 2.头部伤害值性能标准^[7]

头部 15ms HIC 值	颜色	得分
$HIC < 650$	绿	1
$650 \leq HIC < 1000$	黄	0.75
$1000 \leq HIC < 1350$	橙	0.5
$1350 \leq HIC < 1700$	棕	0.25
$1700 \leq HIC$	红	0

通过总得分评价发动机罩的行人头部保护性能,即得分越高行人头部保护性能越好。根据前文将罩板区域共划分 98 个网格点,每个网格点的总分为 1 分,则罩板区域的总得分为 98 分。经统计,6 种结构罩板的得分情况如图 6 所示。



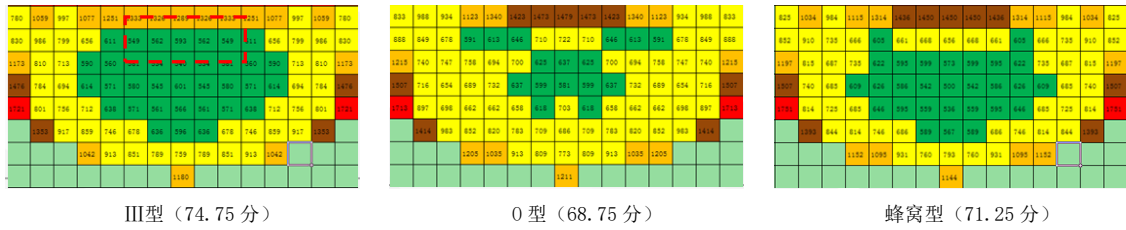


Figure 6.The pedestrian head scores of six type of structures

图 6.6 种结构发动机罩行人头部得分

如上图，基础结构（X 型）的得分最低，行人头部保护性能最差，相较于其余 5 种结构其罩板中部无绿色的满分网格点。H 型和 O 型结构的得分基本相同，行人头部保护性能比基础结构分别提高 18.4%和 20.6%。V 型和蜂窝型结构的得分基本相同，行人保护性能比基础结构分别提高了 24.1%和 25%。III型结构行人头部得分最高，行人保护性能比基础结构提升 31.1%。III型结构罩板区域中部绿色得分区域面积最大，第 7，8 排（红色方框）网格点得分明显要优于其余几种结构，这说明III型罩板后缘的刚度较小。比较 X 型和 H 型、V 型、III型结构的得分情况，可知减少内板加强筋的布置能显著提高头部的得分。采用均匀分布的内板结构如 O 型、蜂窝型亦能提高头部性能，这与 Shojaeefard^[12]等人的研究结果类似。

对罩板的中间碰撞点 C_4_0 比较，不同结构内板的加速度曲线对比如图 7 所示。X 型内板的第一个波峰最大，这直接导致其 HIC 达到最大值 907。与之相比，III型、V 型和 H 型加强筋数量减少，第一个波峰的峰值降低。O 型和蜂窝型罩板第一个波峰峰值也较低。达到第一个波峰后，罩板发生变形吸收能量，加速度值迅速下降，6 种结构均没有与底部部件发生二次碰撞。6ms 时的应力云图如图 8 所示，X 型、H 型和 III型应力分布较为集中，通过局部吸收能量，其头部加速度值较大。而圆型和蜂窝型内板其应力均匀分布应力值较小，通过内板整体吸能使得头部加速度值较低。

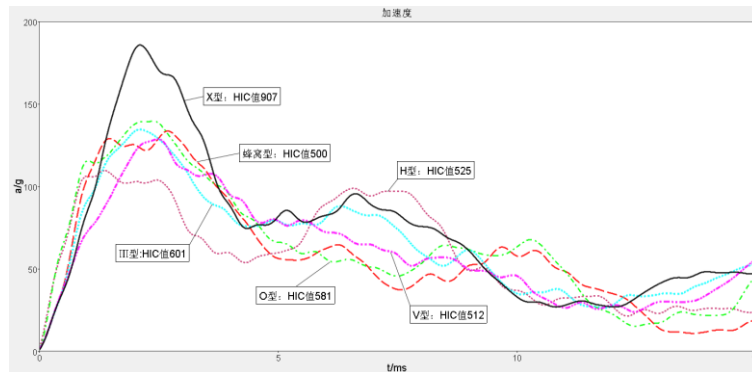


Figure 7.The comparison of head acceleration

图 7.头部加速度曲线对比

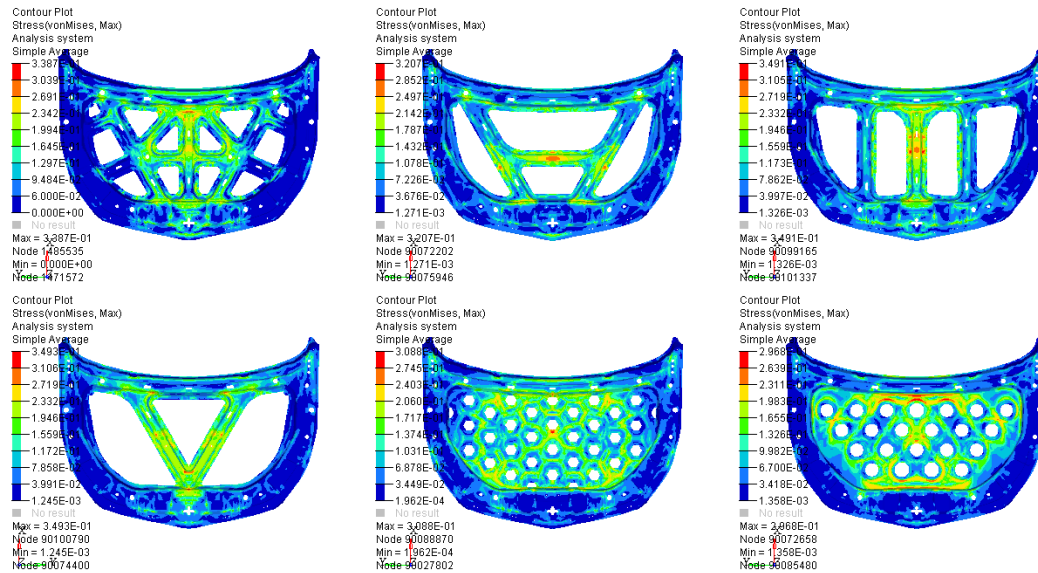


Figure 8.Stress distribution of the inner layer of the hoods at 6ms

图 8.6ms 时内板应力分布

4.2 刚度和模态

6 种结构发动机罩的刚度和模态分析结果如表 3 所示。参考文献[2,9,11]中的研究结果，本文选择扭转刚度的参考值为 9000Nm/rad，一阶扭转和一阶弯曲模态频率参考值为 27Hz 和 46Hz，弯曲变形量越小越好。与基础 X 型结构相比，其余 5 种结构的扭转刚度均出现一定程度的下降，III型的扭转刚度最小，降低了 30.1%。V 型和 III 型结构扭转刚度均低于参考值不满足要求。

内板结构对前后弯曲变形量影响较小，前部变形量偏差在 $\pm 0.1\text{mm}$ 内，后部变形量在 $\pm 0.2\text{mm}$ 内。6 种结构前罩的一阶扭转和弯曲模态频率均大于参考值，满足目标要求。

Table 3.The analysis results of stiffness and mode of different designs

表 3 不同内板结构的前罩刚度和模态分析结果

内板结构	X 型	V 型	H 型	III 型	蜂窝型	O 型
扭转刚度/Nm/rad	10663	8935	9182	7454	10071	9332
弯曲变形量/mm	前部位移 1	0.4464	0.4708	0.4305	0.4789	0.5206
	前部位移 2	0.6049	0.6322	0.5864	0.6331	0.7047
	后部位移	2.413	2.346	2.517	2.357	2.541
一阶扭转/Hz	36.7	33.2	32.4	30	35.1	34.3
一阶弯曲/Hz	55.1	57.4	54.1	57.6	51.9	51.3
前罩总成质量/Kg	16.396	15.073	15.491	15.386	16.777	16.878

综上所述，符合目标要求的内板结构有 X 型、H 型、O 型和蜂窝型，其质量最轻的为 H 型，比基础模型减重 5.5%，最重的为 O 型质量增加 2.9%。结合上文中的头部保护性能结果可知蜂窝型内板结构为最优结构，其行人头部保护性能较好，弯扭刚度和模态均满足目标要求，虽然其质量增加 2.3%，但与原方案质量相比增加量可以忽略。

5 结论

- (1) 对市面上发动机罩的内板结构形式进行了统计，提出了 6 种常见的内板结构。并针对某款车型，建立 6 种不同内板结构的前罩模型。
- (2) 运用有限元方法，比较了这 6 种的发动机罩板行人头部保护性能、刚度和模态性能。
- (3) 减少内板加强筋的布置能有效提高前罩头部保护性能，但会显著降低前罩的扭转刚度。
- (4) 通过对比研究表明：蜂窝型结构内板的综合性能最优，行人头部保护性能比原方案提高了 25%，扭转、

弯曲刚度和一阶模态均能满足设计要求。同时,扭转刚度留有 11.9%的余量,可以通过优化蜂窝型内板的几何参数如孔径大小、腔体深度等,进一步提高行人头部保护性能,减轻重量。

参考文献

- [1] Yang J K. Review of Injury Biomechanics in Car-Pedestrian Collisions. *Journal of Vehicle Safety*, 2005, 1:1-18.
- [2] 向晓峰, 李纲, 谭伦宾. 普通乘用车发动机罩盖静刚度试验方法[J]. *汽车工程师*, 2016(2):59-62.
- [3] 杨安志, 刘卫国. 基于 Euro-NCAP 评价规程的行人头部碰撞安全性能评估与优化[J]. *佳木斯大学学报(自然科学版)*, 2014(1):47-50.
- [4] 李向荣, 王凯, 刘志新,等. 汽车发动机罩儿童行人保护安全性仿真研究[J]. *汽车工程*, 2010, 32(1):56-59.
- [5] 杨娜, 刘明敏, 赵桂范,等. 基于自适应响应面法的发动机罩行人头部保护效果研究[J]. *汽车工程*, 2016, 38(4):435-439.
- [6] European New Car Assessment Program. Pedestrian Test Protocol[E].[http: / /www . euroncap . com/Content- Web- Page/fb5e236e- b11b- 4598- 8e20- 3eced15ce74e / protocols. as-px](http://www.euroncap.com/Content-Web-Page/fb5e236e-b11b-4598-8e20-3eced15ce74e/protocols.aspx); 2012.
- [7] European New Car Assessment Program. Pedestrian Protection Assessment Protocol[E]. [http: // www. euroncap. com / Content- Web- Page / fb5e236e-b11b-4598-8e20-3eced15ce74e / protocols.aspx](http://www.euroncap.com/Content-Web-Page/fb5e236e-b11b-4598-8e20-3eced15ce74e/protocols.aspx); 2012.
- [8] 钟志华. 汽车碰撞安全技术[M]. 机械工业出版社, 2003.
- [9] 曾小敏, 彭雄奇, 鲁宏升,等. 基于行人头部保护和刚度要求的发动机罩内板优化设计[J]. *计算机辅助工程*, 2015, 24(2):7-11.
- [10] 葛如海, 邱琦锋, 应龙,等. 基于 LS-Dyna 的行人头部保护发动机罩优化[J]. *广西大学学报自然科学版*, 2014(3):598-606.
- [11] 张丰利, 雷明准, 陈剑,等. 某 SRV 发动机罩模态分析及频率优化研究[J]. *汽车技术*, 2008(6):1-4.
- [12] Shojaeefard M H, Najibi A, Ahmadabadi M R. Pedestrian safety investigation of the new inner structure of the hood to mitigate the impact injury of the head[J]. *Thin-Walled Structures*, 2014, 77(4):77-85.
- [13] Teng T L, Liang C C, Shih C J, et al. Design of car hood of sandwich structures for pedestrian safety[J]. *International Journal of Vehicle Design*, 2013, 63(2/3):185-198.