

Vehicle hood design satisfying both requirements of stiffness and pedestrian head impact protection

Yajun Wang, Zhuo Huang, Shen R. Wu, Liwei Xu, Youzhong Xu, Chaozhao Chen
(Chery Automobile Co., Ltd, AnHui WuHu, wangyajun@mychery.com)

Abstract: In vehicle design process, the engineers need to consider requirements from different attributes. Some of them are consistent, some are conflict. For example, the hood should be designed with good stiffness to satisfy requirements of depression resistance and frequency. But for pedestrian protection, a soft hood is helpful for reducing head impact injury. CAE engineering plays critical role in this kind of multi-disciplinary optimal design. A basic approach needs to iterate among the disciplines and find a compromised solution satisfying different interests. A better approach is to start the cross attributive optimization in early design stage, to explore the Pareto optimal solutions of the designing space. One of the key steps is to identify the major factors from all the attributes as the design parameters. The hood design will be presented. Various design opportunities are evaluated for light weight, low cost, and good performance to satisfy all the requirements of stiffness and pedestrian protection.

Keywords: pedestrian, stiffness, depression resistance

基于刚度与行人头部保护要求的汽车引擎盖设计

王亚军, 黄茁, 吴沈荣, 徐立伟, 徐有忠, 陈超卓
(奇瑞汽车股份有限公司汽车工程研究院, 安徽省芜湖市 241009)

摘要: 在车辆的设计过程中, 工程师需要考虑各方面的性能要求, 有些是一致的, 而有些是矛盾的。比如, 设计引擎盖时需要更好的刚度来满足抗凹和频率要求。但是行人保护却要求更柔软的引擎盖以便降低头部伤害值。CAE 在多学科优化设计方面起到关键性的作用。基本方法是在各学科之间反复考量, 最终找到一个折中的方案。更好的方法是在早期设计阶段即进行交叉学科的优化, 搜寻设计空间中的 Pareto 最优解。其中重要的一步是找出影响设计目标的主要因素确定为设计变量。对于这种高度非线性的强耦合优化问题, CAE 在求解目标函数, 影响因素灵敏度分析方面表现出了巨大优势。引擎盖设计应综合考虑轻量化、低成本、高性能等要求以便满足行人保护和刚度性能目标。

关键词: 行人保护, 刚度, 抗凹

1 引言

自从欧盟于 2003 年率先制定 2003/102/EC 行人保护法规以来, 各组织相继对行人保护法规进行了研究。其中 GTR 法规可能作为一个全球性法规在各国实施, 中国是其成员国之一, 届时在国内上市的车辆也必将满足行人保护法规要求。同时, ENCAP 也在逐年提高行人保护在星级评定中的比重。因此, 针对行人保护的车辆开发越发受到各主机厂的重视。根据资料统计, 头部伤害是行人-车辆碰撞死亡的主要因素, 而头部伤害的主要原因之一是引擎盖刚度问题, 而刚度与抗凹性能具有正关联性。因此, 本文重点讨论行人头部碰撞与引擎盖抗凹性能之间的关系。

2 行人头部碰撞和引擎盖抗凹的简化力学模型

1) 头部碰撞力学模型

行人保护头部碰撞可简化为如图 1 所示的质量-弹簧系统。系统中质量 m 是头锤, 弹簧的 $k(x)$ 是引擎盖在头锤作用下的刚度 (一般是非线性的), 它将影响头锤的加速度历史。假设头锤只限于沿水平面做直线运动并且仅受弹簧力的作用, 那么在某一瞬时 t , 头锤的位移由原长 x_0 变为 x , 即头锤受到的力为 $F=k(x) \cdot (x-x_0)$, 用 a 表示头锤的加速度。根据牛顿定律, 有

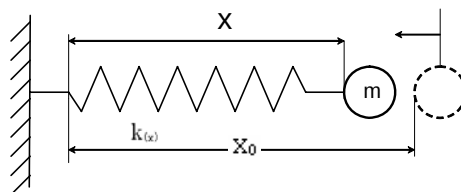


图 1 行人头部碰撞简化力学模型

$$ma - k(x) \cdot (x - x_0) = 0 \quad (1)$$

$$\text{由方程式 (1) 可推导出加速度 } a \text{ 为: } a = k(x) \cdot (x - x_0) / m \quad (2)$$

而行人保护头部碰撞的伤害值计算公式为:

$$HIC = \max \left\{ (t_2 - t_1) \left(\frac{\int_{t_1}^{t_2} a dt}{(t_2 - t_1)} \right)^{2.5} \right\}$$

$$t_2 - t_1 \leq 15ms$$
(3)

a 代表头部重心的合成加速度, t_1 和 t_2 为时间积分的开始和结束时间。

从 HIC 值的计算公式可知, HIC 值不仅与头锤加速度峰值有关, 还与加速度历史有关。

如果可以用常数因子 β 来调整刚度, 那么由方程式 (2) 和 (3) 便建立了头部伤害值 HIC 与引擎盖刚度 $k_{(x)}$ 之间的关系。

$$HIC \propto (\beta)^{2.5}$$
(4)

2) 抗凹简化力学模型

抗凹分析的力学模型可简化为如图 2 所示的四周铰支薄板弯曲模型[1]。薄板边长 L , 板厚为 h , 中心点施加集中载荷 q , 跨度为 L , 中心点挠度为 w , 有:

$$-D\nabla^4 W = q$$
(5)

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}, \quad W_{\max} \propto \frac{qL^4}{D}$$

$$\left(\frac{w_c}{h}\right)^3 + 1.362\left(\frac{w_c}{h}\right) = 0.0276\left(\frac{qL^4}{Dh}\right) \quad (n=5)$$
(6)

式中, E 为所选材料的弹性模量, ν 为泊松比, D 为弯曲刚度。

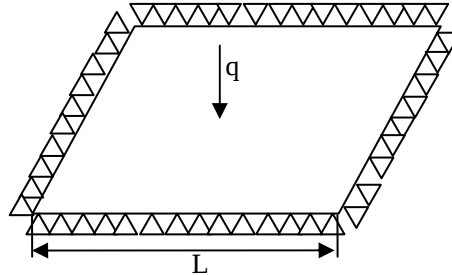


图 2 抗凹力学简化模型

3 行人头部碰撞与引擎盖抗凹性能影响因素对比分析

由上面分析可知, 行人保护头部碰撞要求引擎盖刚度越小越好, 而引擎盖抗凹则与之相反。影响引擎盖刚度的因素很多, 比如引擎盖内外板厚度、结构胶(布置、材料参数)、内板结构(筋高、筋的密度、孔大小)以及材料强度等。据文献[2]可知, 引擎盖材料强度对行人保护头部碰撞并不敏感, 因此本部分不再对此进行讨论。本部分以奇瑞某款车型为基础, 仅通过更改引擎盖内外板厚度、结构胶材料参数和内板筋高等参数, 来对比分析其对行人保护头部碰撞和抗凹性能的影响。本节根据 GTR 行人保护工况[3], 模拟 3.5kg 的行人头部以 35km/h 的速度碰撞车辆前端, 主要考察加速度和头部伤害值 HIC。考察引擎盖抗凹性能时, 使用直径为 80mm 的压头准静态垂向加载 400N 的压力, 然后卸载, 考察加载过程引擎盖表面的最大位移以及卸载后的最大残余位移。

3.1 引擎盖厚度的影响

对于引擎盖而言, 板材过厚将导致引擎盖过重从而影响引擎盖的正常开启, 料厚过薄无法满足刚度要求, 因此引擎盖料厚一般设定为 0.6~0.9mm。下面考察引擎盖内外板的厚度分别为 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 时, 行人头部伤害和引擎盖抗凹的变化趋势。

3.1.1 内板厚度的影响

根据引擎盖内板厚度的不同, 分别建立四个方案模型, 其中方案一对应的内板厚度为 0.6mm, 方案二对应的内板厚度为 0.7mm, 方案三对应的内板厚度为 0.8, 方案四对应的内板厚度为 0.9。

图 3 所示为行人保护头部碰撞时的加速度曲线, 图 4 所示为引擎盖的刚度曲线, 图 5 所示为性能敏感度曲线, 表 1 为四个模型对应的计算结果。

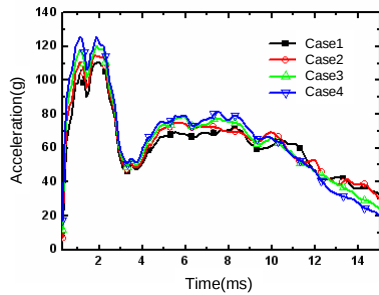


图3 加速度曲线

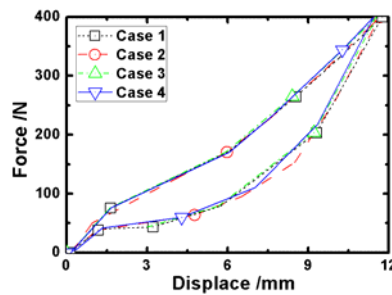


图4 刚度曲线

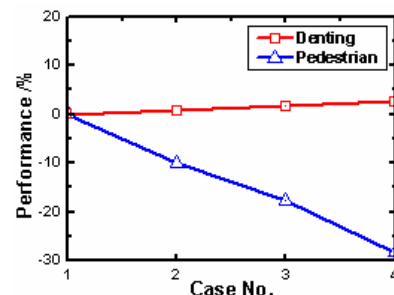


图5 性能敏感度曲线

表1 行人保护和抗凹计算结果

工况	内板厚度/mm	HIC	最大位移/mm	残余位移/mm
case1	0.6	459	11.75	0.125
case2	0.7	505	11.66	0.072
case3	0.8	540	11.55	0.080
case4	0.9	589	11.44	0.090

根据图3和表1可知,行人头部伤害值随着内板厚度的降低而降低;而根据图4和表1可知,最大位移和残余位移均随着内板厚度的减小而增加。根据图5可知两者对内板厚度的要求相矛盾,而且行人保护对内板厚度更为敏感。

3.1.2 外板厚度的影响

根据引擎盖内板厚度的不同,分别建立四个方案模型,其中方案一对应的外板厚度为0.6mm,方案二对应的外板厚度为0.7mm,方案三对应的外板厚度为0.8,方案四对应的外板厚度为0.9。

图6所示为行人保护头部碰撞时的加速度曲线,图7所示为引擎盖的刚度曲线,图8所示为性能敏感度曲线,表2为四个模型对应的计算结果。

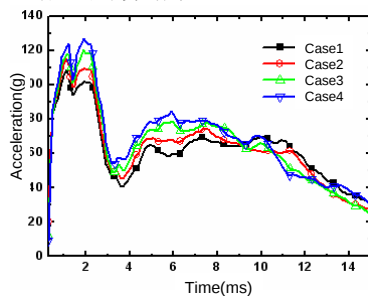


图6 加速度曲线

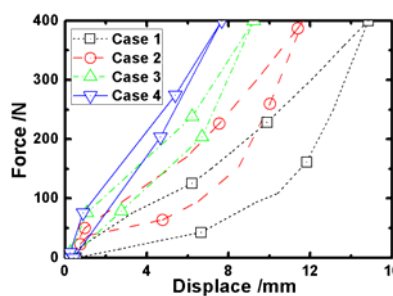


图7 刚度曲线

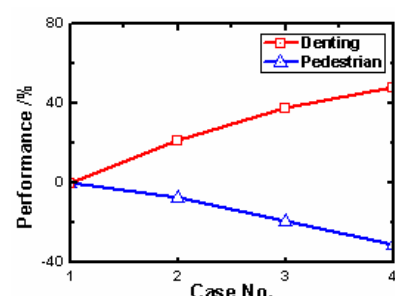


图8 性能敏感度曲线

表2 行人保护和抗凹计算结果

模型	外板厚度/mm	HIC	最大位移/mm	残余位移/mm
case1	0.6	454	14.84	0.53
case2	0.7	486	11.66	0.072
case3	0.8	540	9.23	0.28
case4	0.9	594	7.67	0.41

根据图6和表2可知,行人头部伤害值和加速度峰值随着外板厚度的降低而降低;而根据图7和表2可知,最大位移和残余位移均随着外板厚度的减小而增加。根据图5可知两者对外板厚度的要求相矛盾。

3.2 引擎盖内板结构的影响

引擎盖内板结构受到头锤的撞击,发生变形吸收了大部分能量,因此引擎盖内板结构直接影响加速度历史及峰值。现实中,引擎盖内板结构多种多样,本部分仅仅考察内板筋高对行人头部碰撞的影响。图9为引擎盖内外板及其内板筋高的局部截面图。

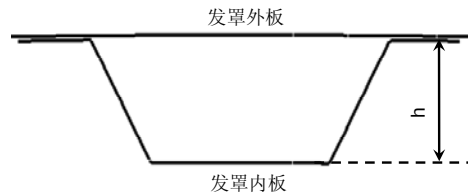


图9 引擎盖内外板截面图

图10所示为行人保护头部碰撞时的加速度曲线,图11所示为引擎盖的刚度曲线,图12所示为性能敏感度曲线,表3为四个模型对应的计算结果。

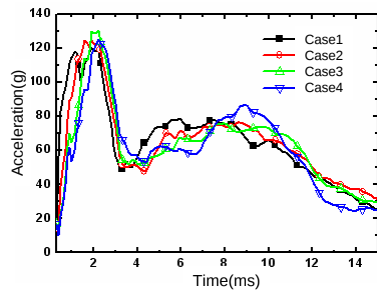


图10 加速度曲线

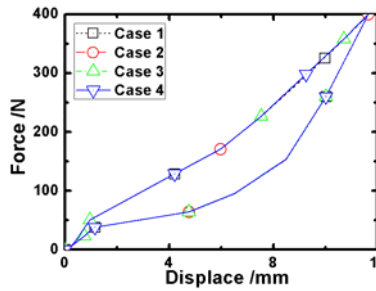


图11 刚度曲线.

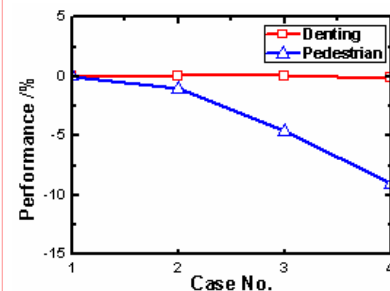


图12 性能敏感度曲线

表3 行人保护和抗凹计算结果

工况	筋高 h	HIC	最大位移/mm	残余位移/mm
case1	38	540	11.66	0.072
case2	33	518	11.64	0.073
case3	28	500	11.64	0.074
case4	23	495	11.65	0.075

根据图10和表3可知,行人头部伤害值和加速度峰值随着内板筋高的降低而降低;而根据图11和表3可知,最大位移和残余位移并没有随着内板筋高变化而显著变化。根据图12可知,内板筋高对行人保护更为敏感,而对抗凹则影响甚小。

3.3 引擎盖结构胶的影响

引擎盖结构胶起到粘结引擎盖内外板的作用。结构胶的布置和材料特性或多或少都会影响到引擎盖内外板对行人头部的响应。因此,本部分通过更改结构胶的材料参数来考察其对计算精度的影响。分为四种工况进行分析,结构胶的杨氏模量分别为0.001、0.01、0.0152和0.05。

图13所示为行人保护头部碰撞时的加速度曲线,图14所示为引擎盖的刚度曲线,图15所示为性能敏感度曲线,表4为四个模型对应的计算结果。

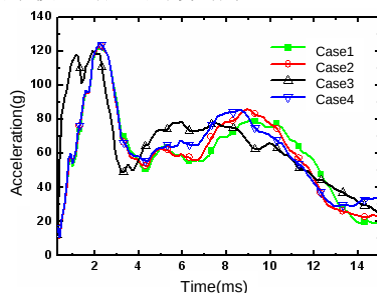


图13 加速度曲线

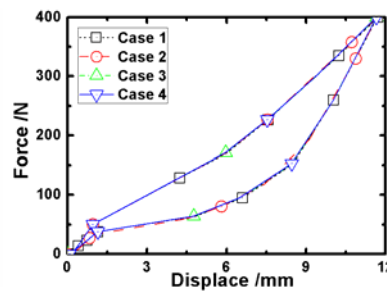


图14 刚度曲线

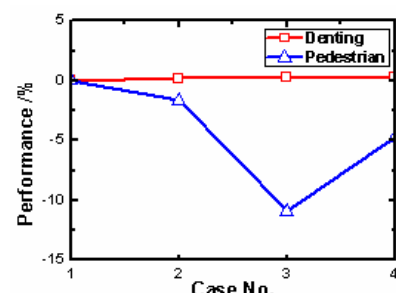


图15 性能敏感度曲线

表4 行人保护和抗凹计算结果

工况	结构胶 E	HIC	最大位移/mm	残余位移/mm
case1	0.001	487	11.69	0.067
case2	0.01	495	11.66	0.069
case3	0.0152	540	11.66	0.072
case4	0.05	510	11.65	0.074

根据图13、14、15和表4可知,结构胶材料参数对行人头部碰撞的加速度峰值、最大位移和残余位移影响不大,但是

对 HIC 值影响较大, 即结构胶材料参数对行人头部碰撞敏感, 对引擎盖抗凹并不敏感。

3.4 优化变量与模型

引擎盖设计优化的模型可以用式 (7) 表达, 此类高度非线性问题的约束条件的求解必需依赖 CAE 分析技术, 因此 CAE 分析结果的可靠性与准确性对于优化过程的效率与成功密切相关。

$$F(\mathbf{x}) = \text{Min}\{f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), f_3(\mathbf{x}), \dots, f_n(\mathbf{x})\} \quad (7)$$

$$g_j(\mathbf{x}) = 0$$

$$h_k(\mathbf{x}) \leq 0$$

$$\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \in \mathbf{E}^n$$

上式中 $F(\mathbf{x})$ 为优化目标函数, $g_j(\mathbf{x})$ 和 $h_k(\mathbf{x})$ 为约束条件, 本文中 $h_1(\mathbf{x}) = \text{HIC} - C1$, $h_2(\mathbf{x}) = U_{\max} - C2$, $h_3(\mathbf{x}) = U_{\text{residual}} - C3$, $\mathbf{x}$ 是优化变量, 本文中为引擎盖的设计参数。

引擎盖的设计参数中与行人保护和抗凹性能相关的主要影响因素见表 5。本文选取的优化变量为 $\mathbf{x}1$ =外板厚度 $h1$, $\mathbf{x}2$ =内板厚度 $h2$, $\mathbf{x}3$ =筋的高度 $h3$, $\mathbf{x}4$ =结构胶材料参数 E 。改进过程由第 4 节详细阐述。

表 5 引擎盖行人保护与抗凹性能影响因素对比

影响因素 (依影响程度大小排名)	
行人保护	抗凹
① 内外板料厚 h (Thin is better) \	① 内外板料厚 h , $O(h^3)$ (Thick is better) /
② 材料性能(模量、强度) (low is better) \	② 内板支撑点跨度 L , $O(L^4)$ (Short is better) \
③ 内板结构 筋的高度(Lower is better) \	③ 内板结构 内外板连接点数量与分布、筋的密度、高度 (Higher is better) /
筋和孔的布置(趋于均匀 is better)	孔的密度、孔的大小(Lower is better) \
④ 引擎盖与舱内件间隙 (Big is better) /	④ 材料性能(模量、强度) (Higher is better) /

4 优化设计

EuroNCAP 行人保护工况和评价指标都较 GTR 行人保护法规严格, 因此接下来的改进分析根据 EuroNCAP 行人保护工况^[4]进行模拟分析, 模拟 2.5kg 的行人头部以 40km/h 的速度碰撞引擎盖前部。ENCAP 评价指标为: $1000 \leq \text{HIC} \leq 1350$, scoring 2~0。本部分以奇瑞某款车型为例, 综合考虑上述因素对改进分析, 从而找到一个既能满足行人保护又能满足引擎盖抗凹的解决方案。

该对比分析包括三个方案, 分别是方案一: 引擎盖内板结构如图 16 所示, 该引擎盖为原始状态, 图中绿色部分(粗线条)为结构胶; 方案二: 引擎盖内板结构如图 17 所示, 该引擎盖综合考量上述因素重新设计了引擎盖内板, 并重新布置引擎盖胶; 方案三: 引擎盖内板结构如图 18 所示, 该引擎盖在方案二的基础上进行了弱化处理(在引擎盖内板上打孔, 并减小引擎盖厚度)。



图 16 方案一



图 17 方案二



图 18 方案三

表 6 行人保护计算结果

碰撞点	C01	C02	C03	C04	C05	C06	C07	C08	C09	C10	C11
方案一	1303	1558	1485	1314	3320	1669	4190	3689	1552	1436	1573
方案二	1042	986	1021	1041	1043	1426	1918	1466	1267	1242	1354
方案三	964	953	966	957	1037	1201	1360	1350	1133	1122	1166

由表 6 行人保护计算结果可知，方案一：按照 EuroNCAP 的规定除了 C01 外，其他各碰撞点 HIC 均超过 1350，因此不能得分。初步分析发现 C05/C07/C08 总布置不合理造成的，其他碰撞点都是因为引擎盖刚度过大造成的。方案二：根据方案一的计算分析结果，重新设计引擎盖内板和去除不合理的总布置，从结果看，HIC 值得到了明显降低，但是仍然有优化空间。方案三：在方案二的基础上弱化内板结构，计算结果显示 HIC 值进一步得到了降低，说明改进方向正确，而且抗凹分析显示随着行人保护头部伤害值的降低，引擎盖抗凹性能虽有所下降，但是尚在可接受范围之内。

5 结论

1、行人保护头部碰撞和抗凹对引擎盖的要求是相矛盾的，而矛盾的焦点是引擎盖的刚度。研究发现行人保护要求引擎盖刚度越小越好，而抗凹则要求引擎盖刚度越大越好。

2、影响引擎盖刚度的因素很多，本文仅仅分析了引擎盖内外板厚度、结构胶以及内板筋高等因素，其它影响因素尚待研究。

3、针对引擎盖内板结构，本文只涉及到内板筋高的影响，其它的内板结构因素尚未考虑。而且诸如造型、引擎盖倾角等对行人保护和抗凹的影响，都需开展进一步的研究。

参考文献

- [1] 王桂芳，应用弹性力学[M]，中国四川成都:成都科技大学出版社，1995，243-262.
- [2] 谢书港，方科鸿，徐立伟，王亚军，吴沈荣.基于行人保护头部碰撞的发盖设计方法.中国汽车安全技术国际研讨会，2008.
- [3] Proposal for a draft global technical regulation on pedestrian safety. (Established in the Global Registry on 12 November 2008).
- [4] European New Car Assessment Program, Pedestrian Impact.EuroNCAP.Dec.1,2002.