# Optimization of windshield model based on pedestrian protection

Xiongliren JIANG<sup>1</sup>, Haiming GU<sup>1</sup>, Deyou YAN<sup>1</sup>

<sup>1</sup>CATARC Automotive Test Center(Tianjin) Co., Ltd., Tianjin, China, 300300

 $\label{eq:email:generative} Email: jiangxiongliren@catarc.ac.cn, guhaiming@catarc.ac.cn, yandeyou@catarc.ac.cn \\$ 

**Abstract:** This paper had carried on the comprehensive analysis and studied to provide reference for the pedestrian protection research through numerical simulation, experimental research and optimization design, to achieve the purpose of protecting pedestrians. Through the tests, the windshield crack propagation map and acceleration time history curve were obtained, and the accuracy of the simulation model was verified. The windshield was optimized based on the index of head injury. The results indicate that the HIC value decreased by 12.2% to optimize the parameters of windshield glass material. On the basis of material selection, with no significant change in the total thickness of the windshield, the HIC value decreased by 26.38%, improved the protection performance of the windshield on the pedestrian head.

Keywords: pedestrian protection; windscreen; approximate model; optimal design

## 基于行人保护的汽车风挡玻璃模型优化研究

**蒋熊力忍<sup>1</sup>,顾海明<sup>1</sup>,闫德有<sup>1</sup>** <sup>1</sup>中汽研汽车检验中心(天津)有限公司,天津,中国,300300 *Email: jiangxiongliren@catarc.ac.cn, guhaiming@catarc.ac.cn, yandeyou@catarc.ac.cn* 

**摘 要:**本文通过数值模拟、试验研究及优化设计对行人头部与夹层风挡玻璃碰撞进行了较为全面的分析研究,期望达到保护行人的目的。通过试验得到了风挡玻璃加速度时间历程曲线,并验证了仿真模型的准确性。基于行人头部损伤指标进行了优化设计。结果表明:对风挡玻璃材料参数优选使得 HIC 值降低了 12.2%。在材料优选的基础上,在不显著改变玻璃总厚度的情况下,使得 HIC 值降低了 26.38%,改善了汽车风挡玻璃对行人头部保护性能。

关键词:行人保护;近似模型;风挡玻璃;优化设计

## 1 引言

在人-车事故中,由于车内乘员有安全带及安全气囊等保护装置,而行人几乎没有任何保护措施,使得行人 与高速行驶车辆发生碰撞时,伤亡比率远高于车内乘员。对损伤部位进行统计分析发现,头部损伤比例高达 30.97%,是行人最易受到损伤的部位<sup>[1-4]</sup>。

风挡玻璃作为最易与行人头部发生碰撞的部位,已受到各大高校和车企的关注。风挡玻璃作为人-车事故中, 车辆与行人头部最先接触的部件,其裂纹扩展及变形带来的吸能效果备受关注。对风挡玻璃裂纹扩展进行仿真 分析,优化玻璃参数,改善行人的头部损伤。由于车速及碰撞部位的不同,行人头部与风挡玻璃的接触点也不 尽相同。风挡玻璃吸能效果的好坏对行人的生命安全至关重要。在人-车事故中,风挡玻璃优化研究对提高汽车 被动安全性具有重要意义<sup>[5-7]</sup>。

## 2风挡玻璃冲击试验

### 2.1 成人头型冲击器设计

根据国家法规中要求,成人头型冲击器由三部分组成,分别是底板、球体及人造皮肤。底板及球体均为铝制材料,人造皮肤为 PVC 材料,成人头型冲击器的总质量控制在 4.5kg±0.1kg 之内。法规中规定头部冲击器直

径为 165mm±1mm,人造皮肤厚度为 14mm±0.5mm。头型冲击器质心与其几何中心的误差±5mm。由于需要 采集头部质心的加速度时间历程曲线,需要在头部冲击器的质心处安装加速度传感器,用以采集质心处 X,Y, Z 方向的加速度。国家标准中对成人头型冲击器的相关要求如图 1 所示。



Figure 1. Adult head impactor 图 1. 成人头型冲击器

#### 2.2 风挡玻璃冲击破坏特性试验

在头型冲击器冲击风挡玻璃试验台基础上,需要设计出合理的试验方案对冲击破坏试验就行研究。《汽车对 行人的碰撞保护》对头型冲击器冲击试验在温度和湿度、冲击试验场地、车辆的准备、头型冲击器的推进、冲 击速度的测量及记录进行了规定。

温度和湿度,试验时,试验设备及车辆所处环境要求为相对湿度 40%±30%、温度 20℃±4℃。

冲击试验场地,冲击试验地面应保证平坦、光滑、坚硬,且不平度不大于1%。

头型冲击器的推进,头型冲击器在与风挡玻璃碰撞瞬间的冲击速度及冲击方向应满足法规要求。

冲击速度的测量,利用 ISO3784 中的要求,测量头型冲击器在碰撞前自由下落过程中,在某一位置处的速度,速度测量误差为±0.01m/s。为了计算碰撞点的速度,应考虑所有能影响到通过测量点速度计算碰撞点速度的可能因素。本试验设计头型冲击器在重力作用下垂直下落,因此在碰撞点速度矢量的角度与风挡玻璃安装的角度有关。

头型冲击器利用绳索连接,通过定滑轮使得头型冲击器悬置在一定的高度。忽略绳索与定滑轮的摩擦力及 空气阻力,将头型冲击器下落等效为自由落体运动。通过调节头型冲击器悬挂高度,控制头型冲击器与风挡玻 璃碰撞时的速度。

### 3风挡玻璃模型有效性验证

#### 3.1 风挡玻璃仿真模型确定

如图 2 所示,原模型中三层模型呈现"双峰"特性与试验相符,但是其脉宽及峰值与试验结果的误差过大。因此基于原模型,需要进行改进,以完成风挡玻璃优化设计。本文建立的三层模型为体-体-体结构,即玻璃层与 PVB 层都为体单元,层与层之间的接触方式定义为\*CONTACT\_TIED\_SURFACE\_TO\_SURFACE。

汽车风挡玻璃由三层结构组成,包括上下层玻璃层及中间 PVB 层。三层结构采用的网格大小均为 5mm•5mm, 各层厚度均与实际中相同,即玻璃层厚度为 2mm, PVB 层厚度为 0.76mm。

玻璃层是冲击过程中断裂失效属于小变形,呈现线弹性特性,采用 110 号材料 \*MAT\_JOHNSON\_HOLMQUIST\_CERAMICS模拟。110 号材料主要用于玻璃等脆性材料<sup>[8-11]</sup>。



图 2. 模型及试验对应加速度时间历程曲线

## 3.2 仿真结果与试验结果对比分析

成人头型冲击器冲击风挡玻璃试验与仿真对标主要是通过分析两者加速度时间历程曲线的相似度来对比。 试验中,头型冲击器释放高度为2.5m,头型冲击器冲击风挡玻璃的速度为25km/h。为了与试验进行对比,将仿 真中的碰撞速度设为25km/h。试验与仿真的加速度时间历程曲线如图3所示。如图可知,试验与仿真曲线趋势 一致,且都呈现"双峰"特性。第一个波峰的峰值及脉宽重合度较高,加速度峰值误差约为6.59%,脉宽均为 6~7ms。第二个波峰相比于第一个波峰误差较大,但总体趋势基本一致。根据汽车碰撞领域的仿真与试验对标 经验,认为所建立的成人头型冲击器冲击风挡玻璃仿真模型是可以运用于后续优化设计中的。



Figure 3. Acceleration time history curves of test and simulation at the same collision speed 图 3. 试验与仿真在相同碰撞速度下加速度时间历程曲线

## 4 风挡玻璃材料优化

## 4.1 行人头部损伤评价指标

HIC (Head Injury Criterion) 评价标准是在 Gadd 利用韦恩耐受曲线 (WSTC) 所做研究工作基础上建立的。 韦恩耐受曲线如图 4 所示,在曲线上方表示高于耐受限度,在曲线下方表示低于耐受限度。Versace 于 1971 年 提出基于平均加速度的 HIC 值。



图 4. 韦恩耐受曲线

## 4.2 风挡玻璃材料优化近似模型

风挡玻璃由两层普通钠钙玻璃与中间 PVB 层构成,通过调整这三层结构的材料属性,来获得良好保护行人 头部的效果。玻璃性质在一定范围内可以随成分发生连续变化,因此可以通过改变玻璃成分来改变玻璃的性质。 因此可以针对钠钙玻璃层的剪切模量、抗拉强度进行优化。PVB 材料的力学性能在学术界一直存在争议,得到 普遍认可的主要有弹塑性、超弹性、粘弹性。本节对 PVB 层仅对其弹性模量进行优化。钠钙玻璃层及 PVB 层 各优化参数的初始值及其变化范围见表1。

表 1. 设计参数初始值及范围						
设计参数	剪切模量 (GPa)	抗拉强度 (MPa)	弹性模量 A	弹性模量 B		
优化变量	M1	M2	M3	M4		
初始参数	30.4	70	1.6	0.06		
设计范围	24~36	50~90	1~2	0.02~0.1		

Table 1 Initial value and range of design parameters

试验设计(Design of Experiments, DOE)属于数理统计一部分,是优化设计中最重要的统计方法之一。DOE 方法要尽量使得设计空间的特性能通过选取的有限个试验点来表达。采用最优拉丁超立方设计试验,根据设计 变量将试验次数设为16次[12]。

R-Squared (R2)可用来判断近似模型与采样点的吻合程度。通过计算可得 Kriging 模型的 R2 的值为 0.9999999999, 表示 Kriging 近似模型具有很高的拟合精度。

Kriging 方法建立的模型用 3D Graphs 的形式表示。由于三维图的中,Z轴表示近似模型的响应值,因此每 一个三维图中只能包含两个变量。响应关于玻璃层剪切模量 M1 和玻璃层抗拉强度 M2 的近似模型如图 5 所示: 响应关于 PVB 层杨氏模量 A (M3) 和 PVB 层杨氏模量 B (M4) 的近似模型如图 6 所示。



Figure 5. Approximate model of glass layer shear modulus M1 and glass layer tensile strength M2 图 5. 响应关于玻璃层剪切模量 M1 和玻璃层抗拉强度 M2 的近似模型



Figure 6. Approximate model of PVB layer Young's modulus A M3 and PVB layer Young's modulus B M4 图 6. 响应关于 PVB 层杨氏模量 AM3 和 PVB 层杨氏模量 BM4 的近似模型

通过材料优化近似模型分析可知,玻璃层抗拉强度对 HIC 值得影响最大,PVB 层杨氏模量对 HIC 值的影响 相对于玻璃层剪切模量较小。因此,从响应关于变量的近似模型 3D 图中选取的 *M*<sub>1</sub>、*M*<sub>2</sub>、*M*<sub>3</sub>、*M*<sub>4</sub>的值分别为 28.2GPa、55.52MPa、1.2、0.042。此时对应的近似模型头部损伤 HIC 值为 460.42,将优选的 *M*<sub>1</sub>、*M*<sub>2</sub>、*M*<sub>3</sub>、*M*<sub>4</sub> 的值带入有限元模型中运算得到的 HIC 值为 466.534,通过数值比对可以看出,近似模型预测的误差为 1.3%。 材料优化前的模型对应 HIC 值为 531.205,对风挡玻璃关键材料参数进行优选后 HIC 值降低了 12.2%。

## 4 风挡玻璃厚度优化

本节建立的近似模型选取的变量为上层玻璃厚度 T1、下层玻璃厚度 T2 及 PVB 厚度为 T3,响应值为头部 损伤 HIC 和风挡玻璃总厚度 T0。风挡玻璃各层厚度的初始值及设计范围见表 2。

农 2· 区月 罗奴忉知道汉池国						
设计参数	上层玻璃厚度(mm)	下层玻璃厚度 (mm)	PVB 厚度(mm)			
优化变量	T1	T2	T3			
初始参数	2	2	0.76			
设计范围	1~3	1~3	0.5~2			

Table 2. Initial va	alue and range of design parameters
表 2.	设计参数初始值及范围

合理的选择试验设计方法是为了使采样点在设计空间内尽量均匀分布,使得在此基础上建立的近似模型能 准确的反应物理模型的特性。采用最优拉丁超立方设计试验,根据设计变量将试验次数设为16次,试验响应指 标为 HIC 值及风挡玻璃总厚度,采样点具体参数参见表3。

试验编号	T1 (mm)	T2 (mm)	T3 (mm)	T0 (mm)	HIC
1	3.40	1.20	2.07	6.67	466.809
2	3.80	3.40	1.13	8.33	560.494
3	1.80	3.60	3.00	8.40	462.781
4	2.80	2.20	2.81	7.81	494.531
5	2.00	1.00	1.69	4.69	423.833
6	4.00	2.60	2.25	8.85	668.286
7	1.20	3.20	1.88	6.28	399.425
8	1.00	1.80	0.95	3.75	356.484
9	1.40	2.00	2.63	6.03	442.463
10	1.60	3.00	0.57	5.17	394.961
11	2.60	2.40	1.51	6.51	578.097
12	3.60	1.60	0.76	5.96	527.939
13	2.20	1.40	0.40	3.99	436.538
14	2.40	4.00	1.32	7.72	563.085
15	3.20	3.80	2.44	9.44	493.438
16	3.40	1.20	2.07	6.67	466.809

 Table 3. Experimental design and results of optimal Latin Hypercube

 表 3. 最优拉丁超立方试验设计方案及结果

## 4.1 风挡玻璃厚度近似模型

为了便于直观的分析近似模型,同样用 3D Graphs 的形式表示。在三维图的中,Z 轴表示近似模型的响应 值,每一个三维图中只能包含两个变量。为了分析近似模型拟合效果,列出了如下两个模型:HIC 响应关于上 层玻璃厚度 T1 和下层玻璃厚度 T2 的近似模型;总厚度 T0 响应关于上层玻璃厚度 T1 和 PVB 层厚度 T3 的近似 模型。

神经网络被广泛应用于函数逼近、信号处理、人工智能以及优化等工程领域方面,得到的近似模型如图7、图8所示。



Figure 7. HIC responds to an approximate model of the thickness of the upper glass T1 and the thickness of the underlying glass T2 图 7. HIC 响应关于上层玻璃厚度 T1 和下层玻璃厚度 T2 的近似模型



Figure 8. T0 responds to an approximate model of the thickness of the upper glass T1 and PVB layer T3 图 8. 总厚度 T0 响应关于上层玻璃厚度 T1 和 PVB 层厚度 T3 的近似模型

Chebyshev 多项式在工程应用的逼近方法中有着重要的意义。其定义的插值多项式能有效降低 Runge 现象,并且对连续函数具有最佳一致逼近。得到的近似模型如图 9、图 10 所示。



Figure 9. HIC responds to an approximate model of the thickness of the upper glass T1 and the thickness of the underlying glass T2 图 9. HIC 响应关于上层玻璃厚度 T1 和下层玻璃厚度 T2 的近似模型



Figure 10. T0 responds to an approximate model of the thickness of the upper glass T1 and PVB layer T3 图 10. 总厚度 T0 响应关于上层玻璃厚度 T1 和 PVB 层厚度 T3 的近似模型

Kriging 方法建立的模型用 3D Graphs 的形式表示如图 11、图 12 所示<sup>[13]</sup>。



Figure 11. HIC responds to an approximate model of the thickness of the upper glass T1 and the thickness of the underlying glass T2 图 11. HIC 响应关于上层玻璃厚度 T1 和下层玻璃厚度 T2 的近似模型



Figure 12. T0 responds to an approximate model of the thickness of the upper glass T1 and PVB layer T3 图 12. 总厚度 T0 响应关于上层玻璃厚度 T1 和 PVB 层厚度 T3 的近似模型

## 4.2 基于全局优化算法的风挡玻璃厚度优化设计

利用神经网络方法、切比雪夫多项式方法及克里格方法建立的风挡玻璃近似模型可以替代风挡玻璃有限元 模型进行优化设计。优化设计的目标为在不显著改变风挡玻璃原始总厚度的基础上,头部损伤 HIC 值尽可能小<sup>[14]</sup>。

多岛遗传算法(MIGA)。按照多岛遗传算法参数配置步骤,考虑到在对玻璃总厚度改变不大的条件下,对风挡玻璃各层厚度进行优化,来使得头部损伤 HIC 值达到最优值。优化问题的数学模型如式(1)所示。

设置多岛遗传算法总迭代次数为 1000 次。图 13-15 所示为在 T0 约束下优化迭代历程曲线图。图中红色水

平线为约束条件的上限为 5.0mm, 蓝色水平线为约束条件的下限为 4.5mm, 红点表示不满足约束条件的参数方案, 黑点表示可行的参数方案, 绿点表示在有限迭代次数里最优的参数方案。详细参数如表 4 所示<sup>[15]</sup>。



Figure 13. Optimal iterative process curve of approximate model of neural network 图 13. 神经网络近似模型的优化迭代历程曲线



 Figure 14. Optimal iterative process curve of approximate model of Chebyshev

 图 14. 切比雪夫近似模型的优化迭代历程曲线



Figure 15. Optimal iterative process curve of approximate model of Kriging 图 15. 克里格近似模型的优化迭代历程曲线

近似模型	T1 (mm)	T2 (mm)	T3 (mm)	T0 (mm)	HIC
RBF	1.7006	2.0353	0.9885	4.6010	430.61
Chebyshev	1.2477	1.5716	1.9665	4.8408	428.44
Kriging	2.0932	1.3146	1.6619	4.9138	444.40

Table 4. Typical feasible solution and optimal solution of multi Island genetic algorithm 表 4. 多岛遗传算法典型可行解及最优解

自适应模拟退火算法(ASA)。对风挡玻璃各层厚度优化采用的优化数学模型表达式与 MIGA 一致。 六次优化在约束条件下得到的最优解相差不大,都实现了对头部损伤 HIC 的优化设计。多岛遗传算法与自 适应模拟退火算法得到最优解的详细参数如表 5 所示。

表 5. MIGA 与 ASA 在约束条件下最优解参数							
	优化近似模型	T1	T2	T3	HIC	相对误差(%)	
	MIGA-RBF	1.70	2.04	0.99	426.11	1.05	
	MIGA-CHE	1.25	1.57	1.97	413.84	3.41	
	MIGA-KRI	2.10	1.32	1.67	451.15	1.52	
	ASA-RBF	1.54	1.75	1.39	391.05	7.42	
	ASA-CHE	1.86	1.03	1.80	403.18	3.52	
	ASA-KRI	1.95	1.02	1.99	440.50	3.16	

Table 5. Optimal solution parameters of MIGA and ASA under constraints 表 5. MIGA 与 ASA 在约束条件下最优解参数

工程中要求进行优化设计的近似模型误差不应大于 15%。通过对三种模型优化设计进行验证发现, RBF 方 法的相对误差为 4.235%, Chebyshev 方法的相对误差为 3.465%, Kriging 方法的相对误差为 2.34%。三个近似模型的平均相对误差都远远小于 15%, 且三个近似模型的精度大小:克里格近似模型>切比雪夫近似模型>神经网 络近似模型。通过对比 6 组最优解,最终确定的优化设计方案为上层玻璃厚度为 1.54mm,下层玻璃厚度为 1.75mm, PVB 厚度为 1.39mm, 使得头部损伤 HIC 值降低 26.38%。

## 5 结论

本文根据国家标准《汽车对行人的碰撞保护》建立了头型冲击器冲击风挡玻璃仿真模型,并搭建了冲击试 验台,研究了风挡玻璃对行人头部的保护性能,并对风挡玻璃保护性能进行了优化。

从材料优选的角度对风挡玻璃进行优化,近似模型预测结果与仿真结果相差 1.3%,行人头部损伤值 HIC 降低了 12.2%。分别采用基于多岛遗传算法与自适应模拟退火算法这两种全局优化算法对三种近似模型寻优,在不显著改变风挡玻璃总厚度的基础上,使得头部损伤指标 HIC 值降低了 26.38%。

本文的工作可对行人保护型风挡玻璃的开发、设计提供一定的理论依据。

#### 致 谢 (Acknowledgement)

感谢杨娜老师对课题的指导和帮助,杨老师扎实的专业知识与试验研究能力推动着本课题顺利完成。感谢 实验室的同事们在工作生活中的支持与鼓励,同时在课题研究、论文撰写中提供的帮助。

感谢家人对我工作与生活的关心与支持,让我懂得了在工作上更加勤奋刻苦。感谢他们多年无微不至的关 怀与教育,让我人生中充满了不懈追求的动力与信念。

## 参考文献 (References)

[1] 程效. 车辆-行人事故中风挡玻璃裂纹破损特性的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学硕士学位论文, 2015: 50-53.

INFATS Conference in Chongqing, November 15-16, 2018

- [2] 杜良. 汽车车身结构安全部件材料的优化设计[J]. 内燃机与配件, 2018, 17 (5): 11-13.
- [3] 黄俊. 面向行人下肢碰撞保护的汽车前端结构快速优化设计研究[D]. 北京:清华大学博士学位论文, 2013: 8-9.
- [4] 崔宇硕. 行人\_车辆碰撞下肢及头部保护研究[D]. 北京:清华大学硕士学位论文, 2010: 1-92.
- [5] Yao, J.F., J.K. Yang, and D. Otte, *Investigation of head injuries by reconstructions of real-world vehicle-versus-adult-pedestrian accidents.* Safety Science, 2007. **46**(7): p. 1103-1114.
- [6] 孙喜龙. 汽车被动安全性的模块化建模方法与多目标优化研究[D]. 长春:吉林大学博士学位论文, 2013.
- [7] 孟佑铭,颜潇,张奇祥等.汽车碰撞中头颈部有限元模型构建与分析[J].科技经济市场,2017,12(5):4-5.
- [8] 刘朝阳. 汽车乘员上肢生物力学模型开发及碰撞损伤分析[D]. 广州: 华南理工大学硕士学位论文, 2017.
- [9] 刘保祥, 雷应锋, 曾皓. 接触摩擦因数对碰撞仿真分析相关性的影响[J]. 汽车工程师, 2016, 12: 35-37+48.
- [10] 吕婕. 汽车内饰件与乘员头部碰撞仿真自动化模块开发及应用[D]. 长春: 吉林大学, 2016.
- [11] 王家顺,安琦. 汽车碰撞试验中碰撞过程的运动及力学性能[J]. 华东理工大学学报(自然科学版), 2017, 6: 863-870.
- [12] 王新,房亮,侯国强.基于行人头部保护的汽车发动机罩铰链优化设计[J].汽车实用技术,2018,19:4.
- [13] 张崎. 基于 Kriging 方法的结构可靠性分析及优化设计[D]. 大连: 大连理工大学博士学位论文, 2005: 23-25.
- [14] 卢金娜. 基于优化算法的径向基神经网络模型的改进及应用[D]. 太原: 中北大学博士学位论文, 2015: 14-19.
- [15] 赖宇阳,姜欣,方立桥,等. Isight 参数优化理论与实例详解. 北京:北京航空航天大学出版社, 2012: 139-142.