

Optimized Design of the Airbag Parameters for OOP Children Based on LS-OPT

Fei Jing¹, Bai Zhonghao², Chen Keming¹

¹ China Automotive Engineering Research Institute Co., Ltd., Chongqing, China, 401122

² State Key Laboratory Of Advanced Design And Manufacturing For Vehicle Body, Hunan University, Changsha, , 410082

Email: fj1234ff@163.com, baizhonghao@hnu.edu.cn, chenkening@caeri.com.cn

Abstract: According to SAEJ1980-2008 regulation, The Multi-body and FE model is established for two OOP children aged 3 years old and 6 years old. The combined injury probability Pcomb is considered as the object function in reference to the US-NCAP regulation. The Response Surface Methodology is constructed with sampling points generated by Space Filling and dynamic Basis Function networks. The optimization tool is LS-OPT together with the explicit code of MADYMO. The hybrid adaptive simulated annealing algorithm including Genetic Algorithm and adaptive simulated annealing is used for metamodel optimization to minimum Pcomb. Meanwhile, dummy injury values of dual-stage inflator and single-stage inflator are compared in 25km/h and 54km/h frontal crash. The result indicates that the optimal object value meets the regulation requirement basically, protection effect of dual-stage inflator is better significantly than single-stage inflator.

Keywords: OOP children; airbag parameters; Pcomb; LS-OPT optimization

基于 LS-OPT 离位儿童乘员安全气囊参数优化

费敬¹, 白中浩², 陈可明¹

¹ 中国汽车工程研究院股份有限公司, 重庆, 中国, 401122;

² 湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 长沙, 中国, 410082

Email: fj1234ff@163.com, baizhonghao@hnu.edu.cn, chenkening@caeri.com.cn

摘要: 根据 SAE J1980-2008 法规, 建立了典型的 3 岁和 6 岁离位儿童乘员多刚体-有限元仿真模型。以乘员综合损伤评价指标 Pcomb 为目标函数, 安全气囊参数为设计变量, 采用 LS-OPT 集成 MADYMO 对选取的变量进行优化, 选用空间填充试验设计采取样本点, 以动态径向基函数 (RBF) 神经网络建立响应面模型, 采用混合自适应模拟退火算法对响应面模型进行优化使 Pcomb 最小。此外, 对比了双级和单级气体发生器气囊在低速和高速对假人损伤的影响。结果表明: 对于 3 岁离位儿童, 位置一和位置二气囊参数优化后的 Pcomb 值分别为 0.083 和 0.101; 对于 6 岁离位儿童, 位置一和位置二气囊参数优化后的 Pcomb 值分别为 0.063 和 0.076, 基本满足 US-NCAP 法规的要求; 同时双级气囊在高速时对假人的保护作用明显优于单级气囊。

关键词: 离位儿童; 安全气囊参数; Pcomb; LS-OPT 优化

1 引言

在各种道路使用者中, 儿童是最脆弱的群体。据世界预防儿童伤害报告显示: 2004 年 0-19 岁的儿童, 道路交通伤害占了大约有 262000 个, 大约是所有伤亡儿童的 30%; 同时, 交通伤害是 15-19 岁致死的最主要的原因^[1]。根据美国的统计资料: 2004 年, 在美国共有 1859 个 15 岁以下的儿童在车辆碰撞事故中死亡, 235912 人受伤,

其中 52% 的 5-9 岁和 63% 10-15 岁死亡的孩子没有使用任何约束装置 [2]。因此，儿童安全问题已成为世界汽车交通安全领域应优先考虑的问题。目前国内只有少许相关的研究机构或重点大学的学术团队对儿童乘员安全性法规、儿童约束系统的建模仿真及台车试验等进行初步的研究，研究成果相对较少。而现有的安全气囊通常是针对正常体位的成年人设计的，对离位儿童的研究较少，本文从安全气囊的角度对离位儿童乘员进行研究，采用 LS-OPT 和 MADYMO 结合的方法对安全气囊的参数进行了优化。

2 正面碰撞仿真模型的建立

2.1 气囊有限元模型的建立

为了更好地模拟气囊与假人以及车体的接触，本气囊建立的是有限元模型，采用的是线性三节点三角形膜单元 (ELEMENT. TRIADS) 来模拟，共包含 14964 个单元和 7502 个节点。建立好的气囊模型的物理参数如表 1 所示。

Table 1. Physical parameters of the airbag
表 1. 安全气囊物理参数

织物密度 /(kg/m ³)	杨氏模量 /Mpa	泊松比	泄气孔 直径/mm	厚度 /mm
620	200	0.3	45	0.25

在这里，气囊采用的是三根拉带平行布置的形式，其结构简单，不需要任何传感器，头部位置的两根拉带通过控制与头部接触的气袋的圆弧面的曲率从而改变头部与气袋的接触面积，进而控制乘员头部的接触力，从而有效降低头部加速度值进而减小对乘员头部的伤害；对胸部的保护与头部的保护是一个道理。气囊结构示意图如图 1 所示。

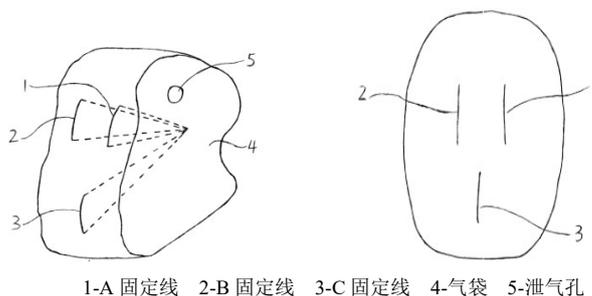


Figure 1. Curve: Schematic diagram of three parallel strap airbag
图 1. 三根拉带平行布置的气囊结构示意图

对气囊的折叠没有实际的气囊折叠方式的参考，参考了美国通用汽车公司研究与开发中心关于气囊折叠的方法。如图 2 所示，该方法在建立乘员侧安全气囊模型方面，较为简便、快捷。通过通用汽车公司研究与开发中心关于约束系统的相关优化研究，表明该折叠方法确实有效可行。具体的折叠方法是先将气囊的参考模型导入到折叠软件 Primer 中，在参考模型的基础上，沿三维方向进行气囊单元和节点的比例缩放到合适的尺寸和状态。然后在折叠好的气囊模块下布以壳单元建立气囊的外壳模型，以便于模型的安装和角度的调整。

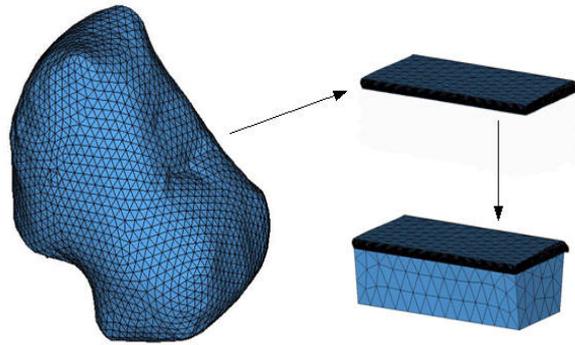


Figure 2. Curve:airbag fold process
图 2. 气囊的折叠过程

MADYMO 软件通过穿透量, 定义的加载、卸载曲线以及迟滞模型来计算产生的非线性弹性力、粘滞阻尼及摩擦力。根据碰撞中可能发生的接触, 模型中通过关键字 CONTACT.MB_FE 和 CONTACT.FE_FE 定义假人与车体及安全气囊的接触如表 2 所示。

Table 2. Contact between dummy and car and airbag

表 2. 假人与车体及安全气囊	接触对数	主面	从面	接触定义
	1	仪表板	头部、颈部、胸部	
	2	挡风玻璃	头部	
	3	膝部挡板	下肢	
	4	座垫	臀部、上肢、大腿	
	5	座椅靠背	肩部、背部、头部	
	6	假人	气囊	

2.2 人-车仿真模型的建立与验证

SAEJ1980-2008 法规规定了儿童假人七个离位位置状态。本文选取了常见的两个离位位置进行了研究。位置一为假人坐在座椅的前边缘或站在地板上, 下巴靠近仪表板的上表面, 背部垂直于地板; 位置二为假人的头部靠近仪表板的中部^[3]。

利用 MADYMO 软件建立了 3 岁和 6 岁离位儿童乘员模型。如图 3 和图 4 所示。

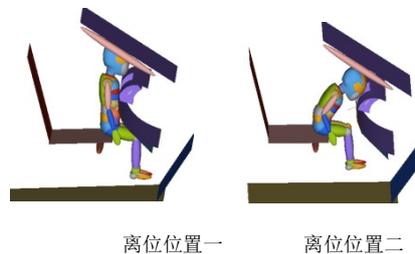


Figure 3. Curve: OOP simulation models of 3 years old children
图 3. 3 岁离位儿童乘员模型

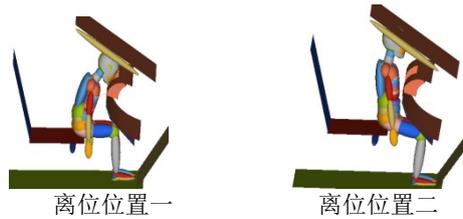


Figure 4. Curve: OOP simulation models of 3 years old children
图 4. 6岁离位儿童乘员模型

对建立好的仿真模型需要进行试验以验证气囊展开效果的有效性。根据 SAEJ1980-2008 法规，对于离位儿童乘员可以进行两种试验，一种是气囊的静态起爆试验，另一种是以初速度 25km/h，最大加速度 6.7G 进行动态试验。气囊模块的静态起爆试验主要用来进行气袋模块性能的考察并对仿真模型进行验证，从而为下一步的优化设计做准备。文献 4 和 5 对建立的模型进行了试验验证^[4,5]。

3 目标函数和优化方法的确定

3.1 目标函数和设计变量的选取

通常我们所做的研究是以 HIC₃₆(或 HIC₁₅)、胸部 3ms 准则、胸部压缩量、颈部 Nij 来衡量假人损伤的。但是这些损伤评价标准是以一定的容限水平来评价乘员约束系统设计的。为评价约束系统的整体性能，应该有一个包括单个伤害参数的完全伤害准则。基于这种考虑，我们参考了 US-NCAP 中关于 5 百分位女性假人的综合损伤指标 P_{comb} 作为前碰撞中离位儿童乘员损伤的目标函数^[6]， P_{comb} 可综合反映头部、颈部、胸部的损伤。选取混合模拟退火算法进行优化，使 P_{comb} 尽可能达到 US-NCAP 要求的五星级^[7]，使 HIC₁₅、胸部压缩量、颈部 Nij 满足法规规定的范围，从而有效地保护离位儿童乘员。

$$\text{目标函数 } Function = \min(P_{comb}) \quad (1)$$

$$P_{comb} = 1 - (1 - P_{head})(1 - P_{neck})(1 - P_{chest}) \quad (2)$$

$$P_{head} = \Phi\left(\frac{\ln(HIC_{15} - 7.45231)}{0.73998}\right) \quad (3)$$

$$P_{chest} = \frac{1}{1 + e^{10.5456 - 1.7212 * (ChestDefl)^{0.4612}}} \quad (4)$$

$$P_{neck} = \max(imun(P_{neck_Nij}, P_{neck_Tens}, P_{neck_Comp})) \quad (5)$$

$$P_{neck_Nij} = \frac{1}{1 + e^{3.2269 - 1.9688 * Nij}} \quad (6)$$

$$P_{neck_Tens} = \frac{1}{1 + e^{10.958 - 3.770 * Neck_Tension}} \quad (7)$$

$$P_{neck_Comp} = \frac{1}{1 + e^{10.958 - 3.770 * Neck_Compression}} \quad (8)$$

其中： P_{head} 为头部损伤评价分量， P_{chest} 为胸部损伤评价分量， P_{neck} 为颈部损伤评价分量。选取泄气孔面积缩放因子 $Vent_05Ffor$ 、不同气体发生器质量流率曲线 $InflatorDelay_05Ffor$ 、质量流率缩放系数 $InflatorScale$ 、气囊起爆时间 $VentOpenT_05Ffor$ 、气囊在仪表板上的安装角度 $RotationY$ ，以及拉带的长度 $Strap1_05Ffor$ 作为约束变量；并初步确定变量的范围如下：

$$0.1 \leq Vent_05Ffor(A) \leq 3.6$$

$$0.18 \leq \text{Strap1_05Ffor}(B) \leq 1.38$$

$$1 \leq \text{InflatorDelay_05Ffor}(C) \leq 8$$

$$0.5 \leq \text{InflatorScale}(D) \leq 1.5$$

$$-1.05 \leq \text{RotationY}(E) \leq 1.05$$

$$0.005 \leq \text{VentOpenT_05Ffor}(F) \leq 0.03$$

3.2 优化方法的确定

本研究采用 LS-OPT 优化分析软件集成 MADYMO 对所确定的气囊参数进行优化分析。通过选取空间填充试验设计 (Space Filling) 作为样本点选取方法, 在优化过程中不断更新采样空间, 采用动态径向基函数(RBF)神经网络建立响应面模型, 并通过混合自适应模拟退火算法对建立的响应面进行优化获得原优化问题的最优解^[8]。在每一次迭代过程中采样空间被不断更新, 响应面模型也不断更新以提高响应面模型的精度。本文优化循环的次数选为 15, 每次循环计算 11 组, 循环的次数选的越多计算的越精确, 由于计算时间的原因选取了 15 次循环。

LS-OPT 是 LSTC 公司开发的优化工具软件, 可以和所有的仿真软件连接, LS-OPT 为用户提供了结构化设计流程, 可以根据特定的约束条件和目标参数进行设计和优化计算, 也非常适用于解决系统识别问题和统计分析, 可以用来解决复杂的非线性优化问题, 用户可以在图形用户界面 (GUI) 中方便地设计优化输入参数, 监控并控制仿真过程, 还可以对优化数据作后处理分析, 软件界面如图 5 所示。在用此界面操作之前, 需要编写一个 LS-OPT 命令文件 (Com.MadymoOpt) 调用 MADYMO 里的.XML 文件, 在此命令文件里包括你选用的优化方法、设计变量以及设计变量的范围、约束条件、响应以及响应表达式、目标函数以及目标函数表达式等。

本文所研究的目标函数和输入变量之间存在一个高度的非线性关系, 很难用传统的数理方法建立数学模型。而径向基函数 (RBF) 神经网络具有较高的非线性映射能力, 通过 RBF 网络的学习可以建立起两者之间的非线性关系。径向基函数神经网络作为一种性能良好的前馈式神经网络, 是基于人脑的神经元细胞对外界的局部性而提出的。如图 6 所示, 包括输入层、隐含层和输出层, 隐含层的输出函数被定义为径向基函数, LS-OPT 提供两种径向基函数, 分别为高斯函数 (Gaussian) 和多二次函数 (Multi-Quadrics), 默认的为多二次函数。径向基函数神经网络的优点是避免数据的分析和建模工作, 能够从观测样本中发现隐含的复杂结构; 具有较高的运算速度, 能以任意精度全局逼近一个非线性函数。缺点是不能求出显示表达式。两种径向基函数的表达式如公式 (9) 和公式 (10) 所示。

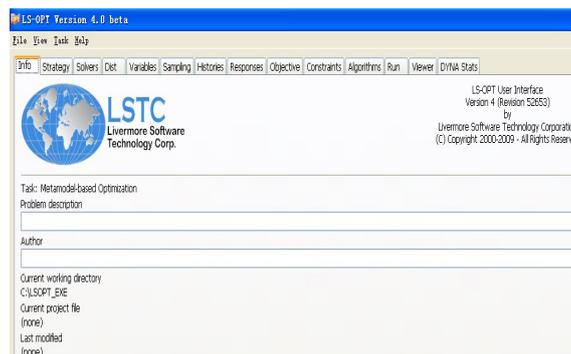


Figure 5. Curve: operator interface of LS-OPT

图 5. LS-OPT 操作界面

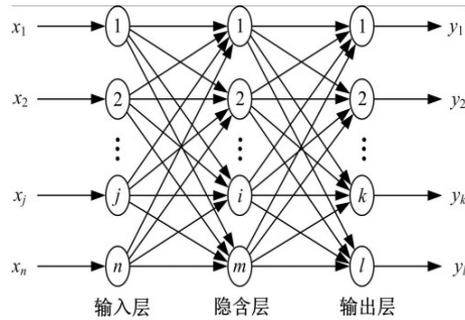


Figure 6. Curve: RBF neural network model
图 6. 径向基函数神经网络模型

$$Ri(x) = \sqrt{1 + \left[\frac{\|X - Ci\|^2}{\sigma_i^2} \right]} \quad i=1,2,\dots,N_r \quad (9)$$

$$Ri(x) = \exp \left[-\frac{\|X - Ci\|^2}{(2\sigma_i^2)} \right] \quad (10)$$

式中, $Ri(x)$ 为隐层第 i 个单元的输入; X 为 N 维输入矢量, $X=\{Xp \mid Xp \in R_N, P=1, 2, \dots, k\}$; C_i 为隐层第 i 个单元高斯函数的中心点, σ_i 为第 i 个隐节点的归一化参数, 即该隐节点的宽度; N_r 为隐层的节点数; P 表示样本数。

模型中有未知的非线性关系, 且这种关系没有一个可说服的参数回归模型来表示, 并且约束不确定。在这种情况下, 好的实验设计是让样本点均匀地分布在设计空间内, 空间填充设计 (Space Filling) 没有给近似模型一个强加的假设, 且允许单个变量有多个水平。因此, 本研究选取空间填充设计选取样本点。

自适应模拟退火算法 ASA(Adaptive Simulated Annealing)是一种新的统计优化方法, 其思想最早是由 N Metropolis 等人借鉴统计力学中物质退火方法而提出的。该算法的主要特性之一就是能以一定的概率接受目标函数值不太好的状态, 即算法不但往好的方向走也可朝差的方向走。这使得算法即便落入局部最优的陷阱中, 经过足够长的时间后也可跳出来从而收敛到全局最优解, 是一种强大的随机搜索算法, 能处理任意程度的非线性, 不连续和随机的问題, 具有对初始点的不依赖性, 可以任意的选取出随机序列, 可有效地避免陷入局部极小并最终趋于全局最优的串行结构的优化算法。但是趋于全局最优解的算法的时间要足够长。约束跳步优化算法 LFOPC(Leap-frog Optimizer for Constrained problems)将罚函数引入了无约束优化跳步算法, 避免了后者求解效率对初始值的依赖性, 能够快速准确的求解约束优化问题, 较传统的共轭梯度算法有更快的收敛速度, 且对梯度误差不敏感, 具有较好的鲁棒性, 但是是一种局部优化算法。混合自适应模拟退火算法将 ASA 和 LFOPC 有效地结合起来, 使目标函数值收敛到全局最佳, 这种算法被认为是一种有效和高效的全局优化算法^[9-10]。因此本文采取此优化算法进行气囊参数优化研究。

4 基于 LS-OPT 的气囊参数优化

优化分析结果如图 7 及表 3 所示。根据 US-NCAP 要求, 达到五星级要求的 $P_{comb} < 0.1$, 对应的 $HIC_{15} \leq 250$, $chest\ deflation \leq 19mm$, $N_{ij} \leq 0.3$ ^[11]。由表 3 可直观地看到: 对于 3 岁离位位置的儿童, 位置一的目标函数值达到了五星级要求, 位置二的目标函数值没有达到五星级标准, 颈部损伤较严重。这可能是由于位置二的头部和胸部太靠近仪表盘, 气囊没有展开到最大就与假人接触, 气囊没有起到一定的保护作用。对于 6 岁离位位置的儿童, 位置一和位置二的目标函数值都达到了五星级要求。3 岁和 6 岁离位儿童的最优仿真结果如图 8-11 所示。

4.1 双级和单级气体发生器气囊对假人损伤影响对比

安全气囊展开时的速度和冲击力是很大的，由于儿童的骨骼比较脆弱且通常处于离位的状态，安全气囊一旦展开对儿童的伤害是很大的。研究表明：双级气囊模块对儿童的伤害相对于相同能量的单级气囊模块降低较明显，主要是因为把能量分为两个阶段，从而减小了对儿童的一次攻击性。双级气体发生器第一级和第二级气体发生量之比为60:40，两级起爆延迟时间为20ms。以3岁离位儿童位置一为研究对象，分别对比正面低速25km/h碰撞和正面高速54km/h碰撞双级气体发生器气囊和单级气体发生器气囊对儿童损伤的影响。25km/h和56km/h碰撞脉冲特性曲线如图12和图13所示，两速度下双级和单级气体发生器对假人损伤影响对比如图14和图15所示。需要说明的是，54km/h正面碰撞中头部损伤值很大，远大于胸部和颈部的损伤值，综合考虑将头部损伤值缩小100倍即图14和15中显示的数值。由图14和图15可知，正面低速25km/h碰撞，双级和单级气体发生器对假人损伤影响差不多；但是正面高速54km/h碰撞，双级气体发生器气囊对假人的保护作用明显高于单级气体发生器气囊，对头部和颈部的保护作用尤为明显，但是对假人的损伤依旧很大，主要是因为儿童处于离位状态，距离气囊较近，气囊的冲击力过大导致对儿童的损伤较大。

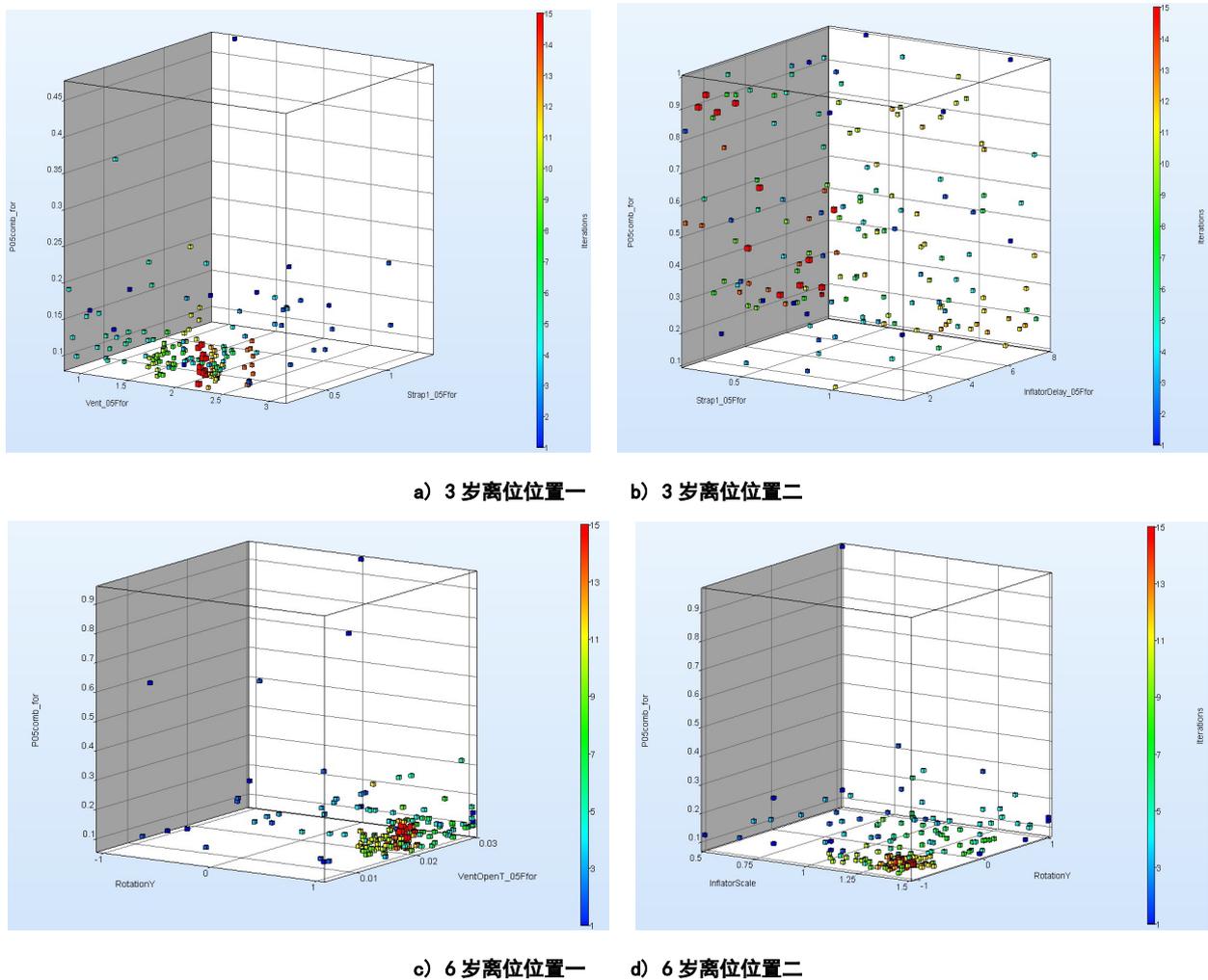


Figure 7. Curve: distribution of sample points
图7. 样本点分布图

Table 3. Summary of injury results for OOP children
表 3. 高位儿童损伤结果汇总

位置	变量						损伤值			综合损伤值
	A	B	C	D	E	F	HIC ₁₅	D _{chest}	N _{ij}	Pcomb
OOP1(3 year)	0.09	2.31	7	1.13	-1.00	0.01	17.64	17.3	0.3	0.083
OOP2(3 year)	0.17	1.01	1	0.78	-0.05	0.006	8.02	3.14	0.5	0.101
OOP1(6 year)	1.96	1.11	6	1.48	1.03	0.024	10.97	12.30	0.21	0.063
OOP2(6 year)	1.49	0.61	4	1.41	0.16	0.025	29.73	13.3	0.31	0.076

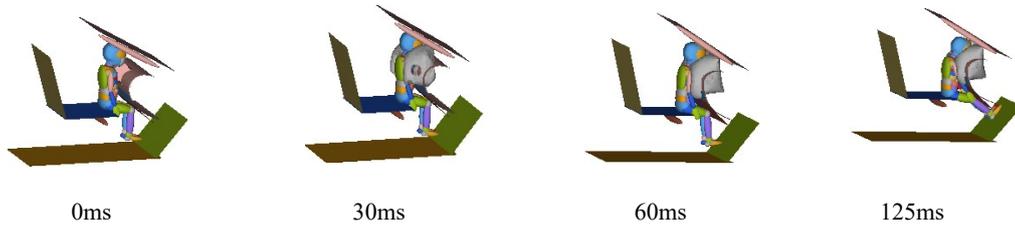


Figure 8. Curve: Optimal animation results of OOP 1 for 3 years old children
图 8. 3岁高位儿童位置一仿真优化结果



Figure 9. Curve: Optimal animation results of OOP 2 for 3 years old children
图 9. 3岁高位儿童位置二仿真优化结果



Figure 10. Curve: Optimal animation results of OOP 1 for 6 years old children
图 10. 6岁高位儿童位置一仿真优化结果



Figure 11. Curve: Optimal animation results of OOP 2 for 6 years old children
图 11. 6岁高位儿童位置二仿真优化结果

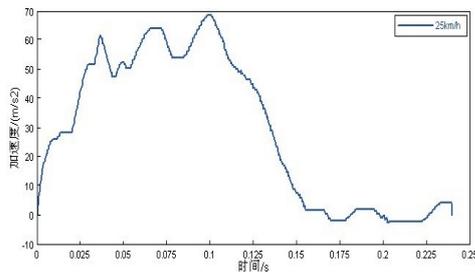


Figure 12. Curve: Crash pulse curve of 25km/h
图 12. 25km/h 碰撞脉冲特性曲线

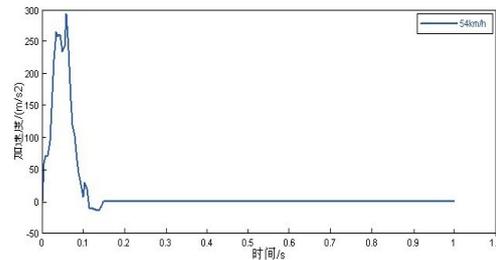


Figure 13. Curve: Crash pulse curve of 54km/h
图 13. 54km/h 碰撞脉冲特性曲线

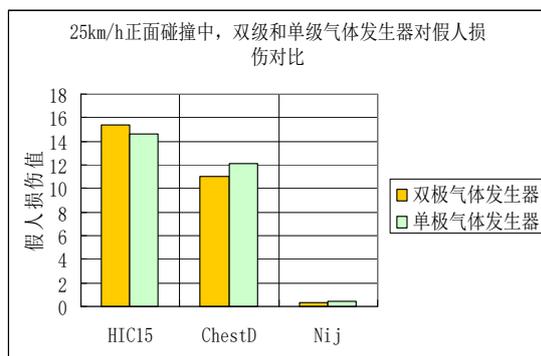


Figure14. Injuries of two inflators in 25km/h frontal crash
图14. 正面25km/h双级和单级气体发生器对假人损伤

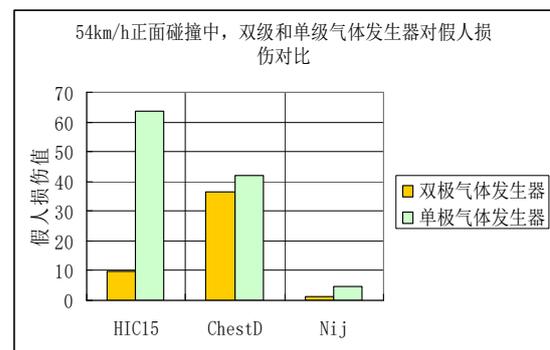


Figure15. Injuries of two inflators in 54km/h frontal crash
图15. 正面54km/h双级和单级气体发生器对假人损伤

5 结论

本文参照SAEJ1980-2008法规和US-NCAP法规，对3岁和6岁儿童乘员进行了气囊参数优化，优化的结果基本上达到了法规的要求，为以后离位儿童乘员的研究做了基础性的工作。但在实际的车辆碰撞中，碰撞的程度远大于SAEJ1980-2008法规规定的值，儿童受伤害程度更大。这就需要花费更多的时间和经历来研究离位儿童的损伤，早日探索出一个如Pcomb的综合损伤准则来评价离位儿童的伤害。同时，验证并优化此气囊对成年人及儿童共同的保护也是今后研究的重点。

参考文献 (References)

- [1] Kate McMahon, Gururaj Gopalakrishna, Mark Stevenson. Word report on child injury prevention:31-51
- [2] National Highway Traffic Safety Administration. 2004 Motor Vehicle Occupant Protection Facts:Children and Young Adults.[R]. DOT HS 810 654, 2006
- [3] SAEJ1980-2008, Guidelines for Evaluating Out-of-Position Vehicle Occupant Interaction with Deploying Frontal Airbags[S]
- [4] 基于6岁儿童离位乘员安全气囊参数优化研究. 第十四届汽车安全技术学术会议, 北京, 中国, 8,2011, p170-174.
- [5] Zhonghao Bai, Jing Fei, Weijie Ma.Optimization of the OOP Children Restraint System, Applied Mechanics and Materials Vols.155-156 (2012).pp386-390
- [6] DEPARTMENT OF TRANSPORTATION National Highway Traffic Safety Administration [Docket No. NHTSA-2006-26555]: Consumer Information - New Car Assessment Program. 2008
- [7] Stander, N., Roux, W.J., Goel, T., Eggleston, T. and Craig, K.-J. LS-OPT User's Manual, Version 3.3,Livermore Software Technology Corporation, Livermore, CA, 2008.
- [8] JIN R, CHEN W, SIMPSON T W. Comparative studies of metamodeling techniques under multiple modeling criteria[J].Struct Multidisc Optim,2001,23:1-13
- [9] Tushar Goel,Nielen Stander, Adaptive Simulated Annealing for Global Optimization in LS-OPT. 7th European LS-DYNA Conference, Austria, 2009
- [10] Nielen Stander, Tushar Goel, Willem Roux,New developments in LS-DYNA. LS-DYNA Anwenderforum, Bamberg 2008.

- [11] Steffen Sohr, Axel Heym. Benefit of Adaptive Occupant Restraint System with Focus on the New US-NCAP Rating Requirements, The 21st International Technical Conference on the Enhanced Safety of Conference (ESV), International Congress Center Stuttgart, Germany June15-18, 2009