

Research on the Protection of Passenger-side Restraint System to Different Percentile Dummy

Hang Yang, Wei HU

Chongqing Vehicle Test & Research Institute Co.Ltd , Chongqing, China , 401122

Email: cjyanghang@cmhk.com

Abstract: At present, the restraint system is basically developed based on the HybirdIII 50th percentile male dummy, but does not take others of different statures into account. It cannot guarantee better protective effect for others as well. Therefore, it is very necessary to study the protective effect of the restraint system on occupants of different statures. This paper is based on a SUV model of a certain own branch. First of all, it builds the restraint system model of the 50th percentile male dummy on the occupant side, and verifies it through the experimental data. Then this paper studies the protective effect of the 5th percentile dummy by this set of restraint system, and optimizes it next in order to implement the restraint system which has the protective effect to the occupants of different statures.

The study of this paper shows: first, the protective effect of the 5th percentile dummy is not as good as the protective effect of the 50th percentile dummy by the restraint system. Second, the injury of the 5th percentile female dummy is mainly concentrated in the upper body. By optimizing the restraint system, the female dummy's head HIC, chest 3ms and chest compression are reduced by 25.8%, 7.4% and 8.3% respectively.

Key word: frontal crash; restraint system; finite element; simulation

乘员侧约束系统对不同百分位假人的保护研究

杨杭, 胡伟

重庆车辆检测研究院有限公司, 重庆, 401122

Email: cjyanghang@cmhk.com

摘要: 目前汽车的约束系统基本上是基于 HybirdIII 第 50 百分位男性假人而开发的, 对其他身材的人群几乎没有考虑, 这就不能保证对其他人群也具有较好的保护效果, 因此研究约束系统对不同身材的乘员的保护效果十分必要。本文基于国内某自主品牌的 SUV 车型上, 首先建立乘员侧第 50 百分位男性假人的正碰约束系统模型并通过实验数据进行验证, 随后研究该套约束系统对第 5 百分位假人的保护效果并进行优化, 实现满足对不同身材的乘员具有保护效果的约束系统。研究结果表明: 第一, 该车型的约束系统对第 5 百分位假人的保护效果不如第 50 百分位假人; 第二, 第 5 百分位女性假人的伤害主要集中在上半身。通过对约束系统进行优化, 女性假人头部 HIC、胸部 3ms、胸部压缩量分别减少了 25.8%、7.4%、8.3%

关键字: 正面碰撞; 约束系统; 有限元; 仿真分析

1 引言

随着国内经济的发展, 汽车普及率越来越高, 汽车保有量也逐年增加。汽车给人们出行带来便利的同时, 汽车安全也日益成为人们所关心的问题。随着现代技术的飞速发展, 许多先进的安全技术也被运用到汽车上, 主动安全方面^[1-3]: 除一些早期的技术外 (如 ABS、ESP)、一些新的技术也相继被应用, 如雷达系统、图像识别系统、胎压监测系统; 被动安全方面: 安全带、安全气囊、安全座椅等配置也有了很大的改进。虽然主动安全技术在一定程度上能降低交通事故的发生率, 但因为现在主动安全技术发展还不够成熟, 不能完全避免交通事故的发生, 因此如何在汽车发生交通事故后最大程度的保护车内人员的人身、财产安全是汽车行业最紧迫的问题。据美国 NHTSA 的一项研究统计表明, 近年来在发生交通事故致死的案例中, 男性驾驶员比例减少了

50%，而女性驾驶员仅减少了 30%^[4-6]，因此可见在发生涉及死亡的交通事故中女性驾驶员未能得到与男性驾驶员相同的改善。由于男女的身材比例不同^[7]，即使两者受到的碰撞强度相同，女性受到的伤害也会大于男性，而目前车辆设计和匹配主要是针对第 50 百分位男性开发的，而忽略了女性受到的伤害^[8]。汽车碰撞事故可以根据碰撞位置的不同分为正面碰撞、侧面碰撞、追尾和翻滚等事故^[9]；在所有汽车安全事故中，正面碰撞所占的比重最大，造成人员、财产损失最严重^[10]。为了降低正面碰撞发生后对车内乘员的伤害，约束系统的匹配是关键的问题。随着现在社会中女性乘员所占比例越来越高，而在涉及发生死亡的交通事故中女性的降低比例又未能得到与男性相同的改善^[11]。因此开发对不同人群都具有很好的保护效果的约束系统有很高的实际意义。

2 乘员伤害评价准则

2.1 头部伤害标准

头部是全身最关键和脆弱的部位，目前在汽车安全领域对于头部的伤害评价主要有 HIC（Head Injury Criterion）和 3ms 头部合成加速度两种方式^[12-13]。

$$HIC = \max_{T_1, T_2} \left[(t_1 - t_2) \left(\frac{1}{t_1 - t_2} \int_{t_2}^{t_1} a(t) dt \right)^{2.5} \right]$$

其中： $a(t)$ 为 $T_1 \leq t \leq T_2$ 时间内的头部合成加速度； T_1 为碰撞开始时刻； T_2 为碰撞结束时刻； t_1 为 HIC 最大值开始时刻； t_2 为 HIC 最大值结束时刻。

2.2 胸部伤害指标

目前广泛应用的是 3 毫秒准则，其是指胸部受到大于 60g 的加速度持续 3ms 或更长的时间^[14]。

3 乘员侧约束系统的仿真开发

3.1 仿真模型的建立

乘员约束系统广义上来讲指汽车在发生碰撞后能够尽可能的避免乘员与车内其它物体发生二次碰撞的所有装置总称，其一般包括：安全座椅、安全带、气囊等部件。通常对乘员约束系统仿真的方法有两种^[15]，第一种方法是模型只包含一些在实际碰撞情况下可能与假人发生接触和对假人有伤害的部件，如：安全气囊、安全带、挡风玻璃、安全座椅、仪表板等；第二种方法就是与实际碰撞实验相似，直接按照实验标准把假人放入整车中进行仿真计算。第一种方法模型相对较为简单效率较高，常用于约束系统开发阶段，第二种方法模型较为复杂效率较低，常用于整车冻结后的仿真实验。

本文则用第一种方法进行约束系统模型的搭建及仿真，首先采用 Hyperworks 软件中的 Hypermesh 模块根据厂家提供的实际 CAD 模型进行有限元网格的离散化；本模型共有网格 74888 个，节点 62167 个，三角形所占占比为 3.2%。结合使用 primer/Hyperworkes 进行前后处理、应用 LS-DYNA 作为求解器，对约束系统的各个子系统进行相关的验证，并与实验数据进行对标从而验证仿真模型的可靠性，建立好的模型如下所示。



Figure 1. Restraint system model
图 1.约束系统模型

3.2 模型验证

完成以上各零件的建立后,按照实验标准放置第 50 百分位混III男性假人在指定的 H 点,按照实验测量的定位数据将假人的头部、胸部、下肢进行定位和姿态的调整;建立假人与气囊、假人与安全带、假人与座椅、假人脚部与搁脚板、假人小腿与仪表板、假人膝部与前围板设置相应的接触,气囊设置自接触。各接触部位的摩擦系数如表 1 所示。

Table 1. Friction coefficient
表 1. 各部位接触系数

接触类型	安全带—假人	气囊—假人	座椅—假人	仪表板—假人	肩带滑环	腰带滑环	搁脚板—假人脚部
摩擦系数	0.5	0.2	0.4	0.6	0.15	0.15	0.5

设置完相关接触后,把实验 B 柱下方的传感器接收到的加速度波形反向施加到假人身上,用以模拟碰撞中假人的运动情况,约束住对仿真结果影响不大的部位全部自由度,卡片设置计算时间为 120ms,得到的仿真模型提交给 LS-DYNA 求解计算。

图 2 为仿真与实验的对标结果,从图中可知乘员侧上半身的主要部位的伤害曲线与实验基本相符,仿真模型与实验存在一定的误差,但是一般认为误差控制在 10%以内,模型就可靠,而本次仿真模型的主要部位的误差均在 10%以内,所以本模型可用做后续仿真分析。

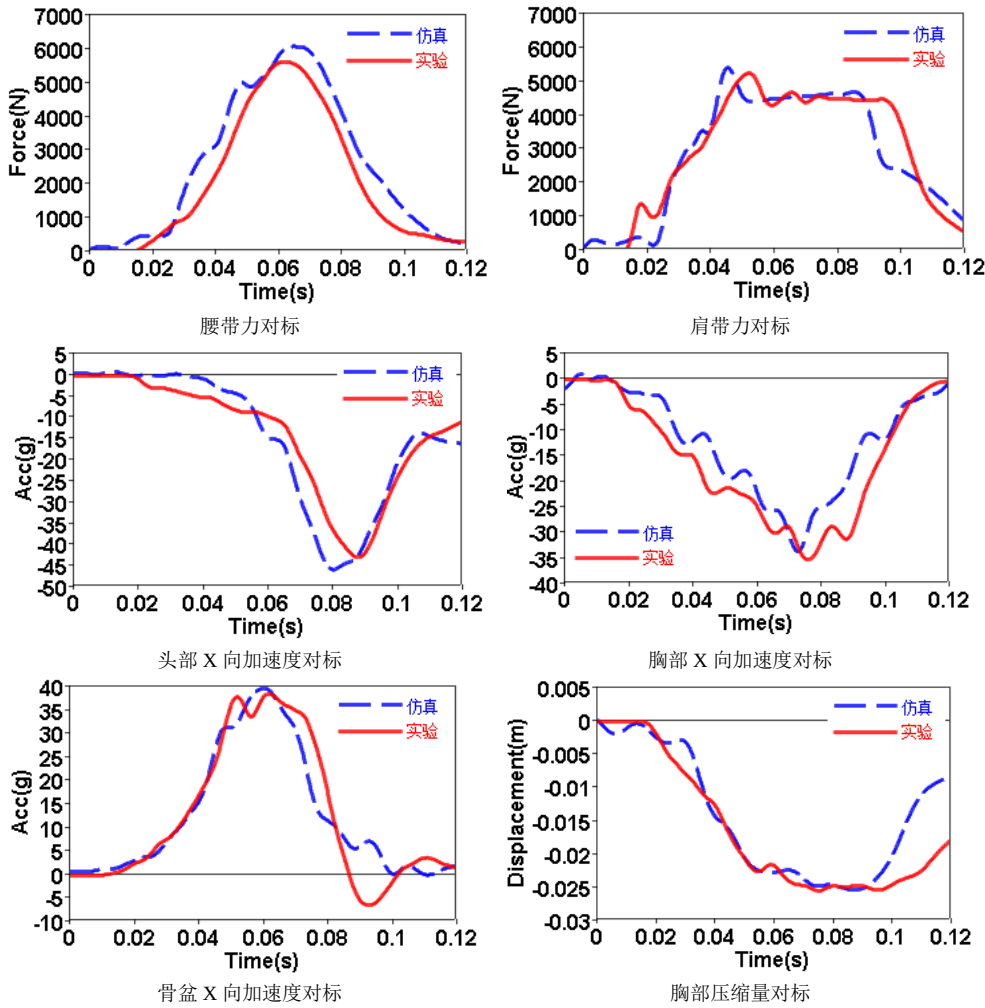


Figure 2. Contrast curve
图 2 乘员伤害对标曲线

4 同一约束系统对 5th% 女性假人的伤害分析

把对标模型中的第 50 百分位男性假人换成第 5 百分女性假人，由于第 5 百分位女性假人相对于第 50 百分位男性假人尺寸、重量等都相对较小，本文采用 E-NCAP 的实验规定方法，把副驾的座椅调整到行程最前端和最上端，然后根据实际情况调整女性假人的姿态。把得到的伤害情况与对标好的第 50 百分位男性假人伤害曲线对比，来评价和研究女性乘员所受到的伤害。

下图为女性假人的伤害曲线与第 50 百分位男性假人的伤害曲线的对比。通过图中分析可以发现，女性假人受到的安全带肩带力与 50 百分位男性受到的肩带力大小相当，而腰带力则相对小很多，是由于女性乘员质量比男性乘员的质量要轻，受到的惯性也就相对较小，移动的距离也较小。

由于位置靠前，头部与气囊接触的时间也提前，所以女性假人头部的峰值时刻出现得比男性要早；由于与气囊接触的时候气囊还处于充气状态，所以头部的加速度要大于男性。胸部加速度也是由于位置靠前，出现峰值时刻要早于男性，而且出现了两个波峰，第一个波峰是因为女性假人与气囊的接触而产生，第二个波峰是由于安全带肩带力而产生。女性的胸部压缩量相对于男性较低，出现峰值的时刻也相对较早，由于女性假人回弹的时刻比较早，所以胸部压缩量下降得也相对快一些。

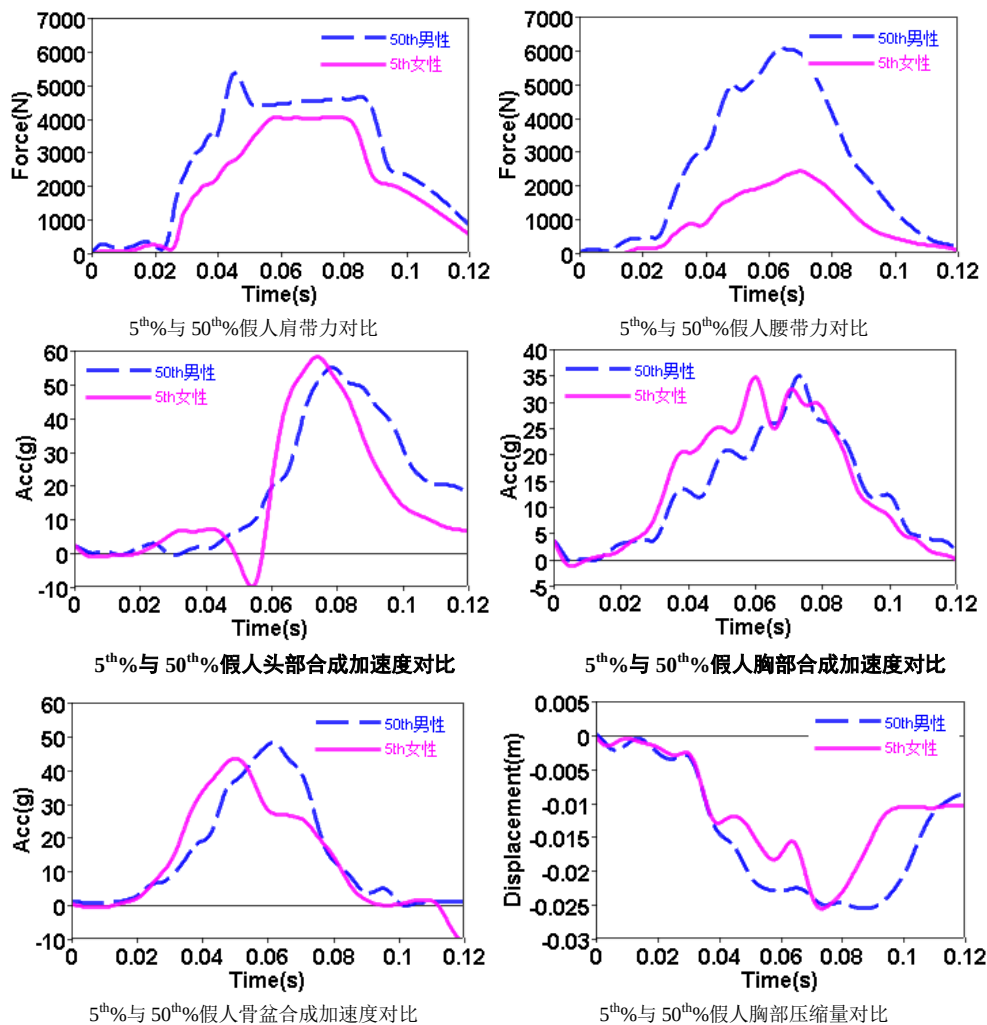


Figure 3. Comparison of damage between the 5th% dummy and the 50th% dummy

图 3. 5th% 假人与 50th% 假人伤害对比

同一种约束形态下男性与女性假人伤害对比如表 2 所示，从表中分析可以看出女性受到的伤害主要在上半

身，头部 HIC 值及 3ms 加速度比男性要大，胸部 3ms 加速度、胸部压缩量等和男性几乎相当，但是由于女性和男性身体构造上的不同，在受到相同外力作用下女性受到的伤害要大于男性，因此可以看出该约束系统对女性的保护不如男性，需要对女性乘员约束系统进行优化。

Table 2. Comparison of damage between the 5th dummy and the 50th dummy

表 2. 50th%和 5th%假人伤害对比

乘员类型	头部 HIC ₁₅	头部 3ms (g)	胸部压缩量 (m)	胸部 3ms (g)	左大腿力 (kN)	右大腿力 (kN)
50 th %男性	288.55	54.1	0.0256	33.6	1.1091	1.6352
5 th %女性	333.78	58	0.0253	33.7	0.5932	0.6943

5 乘员约束系统优化设计

5.1 5th%女性假人灵敏度分析

通过以上分析，本论文结合实际情况，选取了 5 个对约束系统影响较大的设计参数进行分析，并确定了每个参数的最大值和最小值，总共安排了 10 次试验，选取的 5 个参数分别为：安全带限力值、安全带上挂点位置、气囊泄气孔大小、气囊点爆时间、气囊气流率。

Table 3. 5th% Dummy sensitivity analysis

表 3. 5th%假人灵敏度分析实验安排

	设计参数	运算符	最小值	运算符	最大值
安全带	限力值	1	50%	2	150%
	D 环 Z 向位移	3	-50mm	4	+50mm
	泄气孔大小	5	50%	6	150%
安全气囊	点爆时刻	7	-8ms	8	+8ms
	气流率	9	70%	10	130%
	气流率	9	70%	10	130%

通过分析发现：气囊点爆时刻、安全带限力值和气流率是影响女性假人头部、胸部最主要参数。综合考虑女性假人的伤害情况，本论文选取气囊点爆时刻、安全带限力值和气囊气流率作为女性假人的改进目标参数。

5.2 约束系统参数优化

通过以上灵敏度分析，通过改变单个参数，找到了对假人伤害比较大的变量，但是在实际过程中，各变量之间是相互影响的，因此就需要采用实验设计的方法，找出对不同假人保护效果最优的参数。

本论文中筛选的优化变量每个包含 3 个参数，如果采用完全实验的方法就会有至少 27 次实验，这极大的加重了实验成本和减小了实验效率，为避免这种盲目的实验，所以本论文采取正交实验法。通过对实验的精心设计和安排，可以通过最少的实验找到最合适的实验组合。对第 5 百分位女性假人伤害比较敏感的变量主要是气囊点爆时刻、安全带限力值、气流率 3 个参数；选取的变量因子水平如下表所示。

Table 4. Divisor level

表 4. 因子水平

	水平 1	水平 2	水平 3
安全带限力值:A	90%	100%	110%
气流率:B	90%	100%	110%
气囊点爆时刻:C	-5ms	0	+5ms

表中水平 2 均代表初始值，取值范围是从灵敏度分析的取值范围内选取的几个水平来安排实验列出的正交

实验表如下所示。

Table 5. Orthogonal experiment
表 5. 正交实验表

序号	A	B	C
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2

5.3 5th%女性假人优化分析

由于女性假人损伤部位主要集中在头部和胸部，所以本文采用头、胸组合损伤概率 P_{combine} 作为优化目标； P_{combine} 表示乘员损伤 AIS4 级以上重伤的概率，其计算公式为：

$$P_{\text{combine}} = \left(1 + e^{(5.02 - 0.00351 \times \text{HIC}_{15})}\right)^{-1} + \left(1 + e^{(5.55 - 0.0693 \times T_{3\text{ms}})}\right)^{-1} - \left(1 + e^{(5.02 - 0.00351 \times \text{HIC}_{15})}\right)^{-1} \times \left(1 + e^{(5.55 - 0.0693 \times T_{3\text{ms}})}\right)^{-1}$$

其中 HIC_{15} 为头部损伤指标， $T_{3\text{ms}}$ 为胸部合成 3ms 加速度，单位为 g； P_{combine} 越小，说明该系统的保护效果更好。

Table 6. Orthogonal experiment of 5th% dummy result
表 6. 正交实验设计 5th%假人仿真结果

实验号	HIC_{15}	胸部 3ms	胸部压缩量	P_{combine}
1	247.67	31.2	0.0232	0.0477
2	346.83	34.7	0.0218	0.0622
3	492.48	33.8	0.0250	0.0734
4	319.14	31.7	0.0249	0.0530
5	451.03	33.9	0.0249	0.0691
6	315.85	36.7	0.0246	0.0658
7	363.14	33.9	0.0243	0.0613
8	258.94	33.2	0.0248	0.0529
9	410.79	37.3	0.0249	0.0749

本文选取 P_{combine} 作为评价试验指标，来确定试验结果的主次因素，对以上结果采用极差分析如表 7 所示，通过对比分析可以看出，对女性假人组合损伤概率影响较大的因素依次为：气流率>气囊点爆时刻>安全带限力值。由于考察伤害的部位不一样，优化的结果也不相同，本论文针对女性主要是头部和胸部受到的伤害要大些，所以仅用组合损伤 P_{combine} 作为优化评价指标。

Table 7. Data analysis of orthogonal experiment on Pcombine

表 7. 针对 $P_{combine}$ 值的正交实验数据分析

结果	A	B	C
k_{j1}	0.1833	0.1620	0.1664
k_{j2}	0.1879	0.1842	0.1901
k_{j3}	0.1891	0.2144	0.2038
$\bar{k}_{j1}$	0.0611	0.054	0.0555
$\bar{k}_{j2}$	0.0626	0.0614	0.0634
$\bar{k}_{j3}$	0.0630	0.0714	0.0679
R_j	0.0019	0.0174	0.0124
因素主次	B	C	A
最优方案	A1	B1	C1

从上表分析结果可以看出女性假人最优方案为 A1B1C1，即安全带限力值为原始的 90%、气囊气流率为原始的 90%、气囊点爆时刻比原始早 5ms，仿真结果与原模型对比如表 8 和图 4 至 6 所示，可以看出假人头部和胸部的伤害都有一定程度的改进。

Table 8. Optimization result of 5th% dummy

表 8. 5th%假人优化结果

	HIC ₁₅	胸部 3ms	胸部压缩量
优化前	333.78	33.7	0.0253
优化后	247.67	31.2	0.0232
改进比例	-25.8%	-7.4%	-8.3%

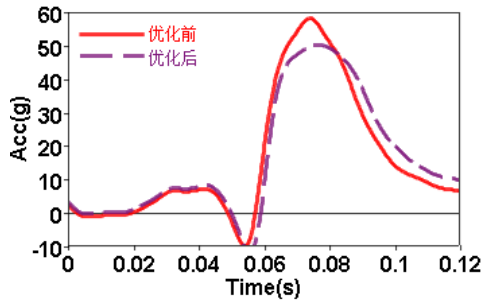


Figure 4. Optimization result of HIC
图 4. 5th%假人头部 HIC 优化结果

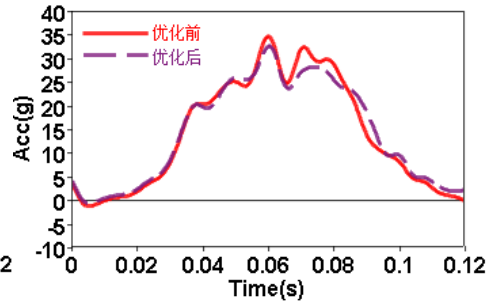


Figure 5. Optimization result of chest 3ms
图 5. 5th%假人胸部 3ms 优化结果

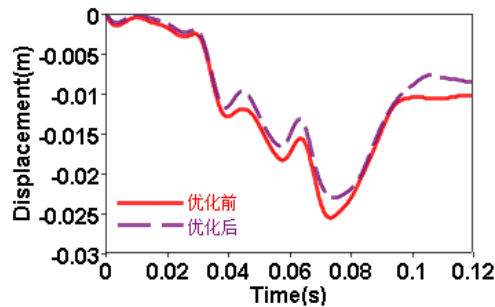


Figure 6. Optimization result of chest compression
图 6. 5th%假人胸部压缩量优化结果

6 结论

(1) 传统的约束系统不能同时兼顾保护不同身材比例的乘员, 要想实现一套约束系统对不同比例人群的保护需要采用智能约束系统。

(2) 乘员侧的女性假人上海主要集中在上半身, 对女性假人的约束系统设计需要重点考虑如何对上半身的保护

致谢 (Acknowledgement)

感谢公司的大力支持, 同时也感谢我的同事和朋友在论文撰写过程中给予的帮助, 也希望各位专家和评委对本论文的不足提出宝贵的意见。

参考文献 (References)

- [1] 马明雪. 现代汽车主动安全辅助系统探究[J]. 科技风, 2015(21):82-82.
- [2] 葛如海, 赵越, 应龙. 校车主动式安全气囊控制参数分析[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2016, 41(3):666-673.
- [3] 张冠军, 赵新锋, 曹立波. 主动式座椅参数对其正面碰撞乘员保护性能影响的研究[J]. 汽车工程, 2017, V39(2):34-42.
- [4] Traffic Safety Facts 2012. National Center for Statistics and Analysis, U.S. Department of Transportation, Washington DC, 20590, 201
- [5] 张滕滕, 王立志, 卓鹏,等. 基于 Euro NCAP 全宽正碰前排女性乘员气囊试验研究[J]. 汽车安全与节能学报, 2016, 7(4):403-411.
- [6] Yi, Shen. Study of Damage of Passenger with Short Stature during a Frontal Collision[J]. Atlantis Press, 2015.
- [7] 李莉, 段大伟, 刘孙炼,等. 基于不同身材乘员保护的约束系统优化研究[J]. 汽车工程, 2016, 38(11):1312-1318.
- [8] 商恩义, 陈现岭, 杨劲松. 驾驶员侧 50%假人约束系统配置 5%女性假人伤害研究[J]. 汽车技术, 2015(3):47-51.
- [9] 葛如海.汽车正面碰撞乘员约束系统匹配研究[D].镇江: 江苏大学, 2007
- [10] 葛如海.汽车安全工程[M].北京: 化学工业出版社, 2005
- [11] 洪亮, 傅靖江, 周海超. 正面 40%偏置碰撞中约束系统对女性驾驶员的保护研究[J]. 中国安全科学学报, 2017, 27(1):36-41.
- [12] 张君媛, 黄柏, 冯原,等. 基于多工况的汽车碰撞乘员约束系统参数匹配的研究[J]. 中国机械工程, 2007, 18(24):3005-3008.
- [13] 林逸, 范成建. 汽车乘员安全约束系统的优化[J]. 汽车工程, 2000, 22(5):299-302.
- [14] 肖志, 叶映台, 李凡,等. 汽车正面碰撞中驾驶员侧约束系统的可靠性优化[J]. 汽车工程, 2011, 33(8):676-679.
- [15] 胡远志, 曾必强, 谢书港. 基于 LS-DYNA 和 HyperWorks 的汽车安全仿真与分析[M]. 清华大学出版社, 2011.