

Optimization Research on Restraint System Development for Female Driver

Authors: Li Hongyun¹, Lu Shuang¹, Han Feifei¹, Li Guo¹, Cao Huan^{1,2}

¹China Automotive Technology & Research Center, Tianjin, China, 300300

²School of Mechanical Engineering, HeBei University of Technology, Tianjin, China, 300130

E-mail: lihongyun@catarc.ac.cn

Abstract: At present, the female driver gradually increased, but the development of restraint systems is mainly aimed at the male drivers, how to protect women drivers become a serious problem. In this paper, based on the existing driver restraint system configuration, combined with the simulation analysis method to calculate the effect of the restraint system to protect the female drivers, by contrastive analysis, it can identify the lack of current driver restraint system configuration and optimize, so that it can simultaneously satisfy the requirements of injury for male drivers and female drivers(E-NCAP version 2015), to improve compatibility with the driver restraint system.

Key words: Female Driver; Restraint System; Driver airbag; Optimization

女性驾驶员约束系统匹配与优化分析

李红运¹, 鲁爽¹, 韩菲菲¹, 曹欢^{1,2}

¹中国汽车技术研究中心, 天津, 中国, 300300

²河北工业大学机械工程学院, 天津, 中国, 300130

E-mail: lihongyun@catarc.ac.cn

摘要: 目前, 女性驾驶员逐渐增多, 但约束系统的开发多以男性驾驶员为基础, 如何更好的保护女性驾驶员成为亟待解决的问题。本文根据现有的驾驶员约束系统配置, 结合仿真分析手段, 计算该约束系统对女性驾驶员的保护效果, 通过对比分析, 找出目前驾驶员约束系统配置的不足并进行改进优化, 使其能够同时满足男性驾驶员和女性驾驶员的伤害值要求(2015版E-NCAP), 提高驾驶员约束系统的兼容性。

关键词: 女性驾驶员; 约束系统; 驾驶员气囊; 优化分析

1 引言

随着我国经济的快速发展, 女性驾驶员群体增长十分迅速。据不完全统计, 目前全国女性驾驶员数量已超过1000万。而目前车辆上匹配的乘员约束系统大多是以男性驾驶员为基础设计的, 对身材矮小的女性驾驶员考虑较少, 在一定程度上限制了驾驶员约束系统的性能。在美国, 其碰撞法规FMVSS208(2014)中都有驾驶员是女性的碰撞工况。欧洲E-NCAP将在2015年新增50公里正面碰撞工况, 并且乘员(包括驾驶员、前排乘员和后排乘员)全部使用女性假人^[1]。由此可见, 碰撞工况中增加女性驾驶员是较为明显的国际趋势, 国内相关法规和C-NCAP也将向此发展。因此, 研究女性驾驶员约束系统的匹配和兼容性, 具有较大的现实和法规意义。

本文根据现有的驾驶员约束系统配置, 结合仿真分析手段, 计算该约束系统对女性驾驶员的保护效果, 通过与男性驾驶员保护效果对比分析, 找出不足并进行改进优化, 使其同时满足男性驾驶员和女性驾驶员的伤害值要求, 提高驾驶员约束系统的匹配与兼容性。

2 男性驾驶员约束系统模型仿真分析

本文根据某车型的 CAD 数据和约束系统参数，建立该车型 50 公里正面碰撞驾驶员侧约束系统仿真模型，并以该车型在 50km/h 正面 100%重叠刚性壁障碰撞试验获得的数据为基础，进行对标，保证模型的精度和准确度。

2.1 男性驾驶员仿真模型的建立

仿真模型包括座椅、地板、踏板、仪表盘、安全带、方向盘、转向管柱、安全气囊等，在模型中放置 Hybrid III 第 50 百分位男性假人，并调整假人坐姿与试验状态相同，如图 1 所示。

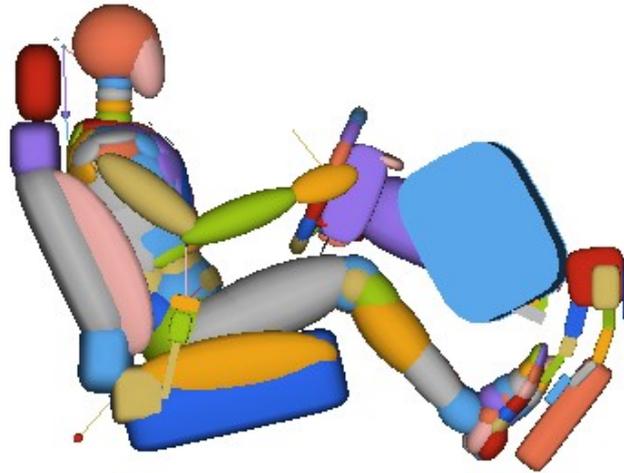


Figure 1. Model: male driver

图1. 男性驾驶员仿真模型

2.2 男性驾驶员仿真模型的对标

为保证仿真模型的准确度，需要将仿真结果与试验数据进行对标，关键伤害曲线对比结果如图 2-图 5 所示。

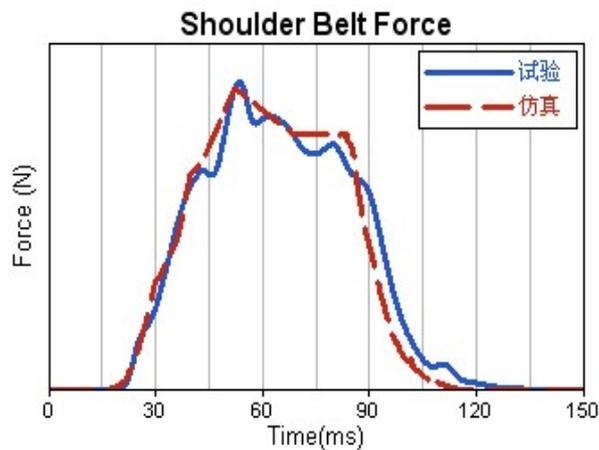


Figure 2. Contrast: shoulder belt force

图2. 肩带力对标结果

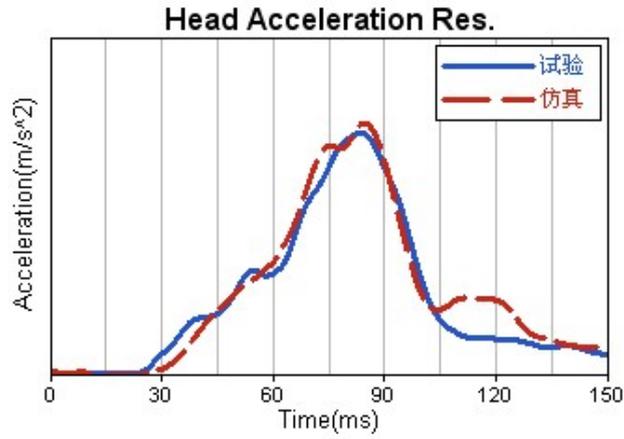


Figure 3. Contrast: head acceleration
图3. 头部加速度对标结果

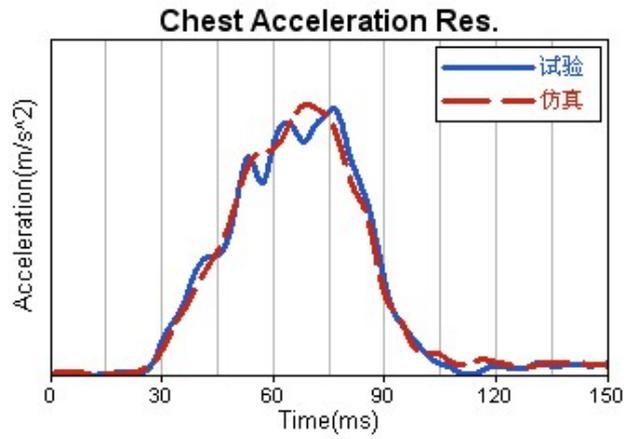


Figure 4. Contrast: chest acceleration
图4. 胸部加速度对标结果

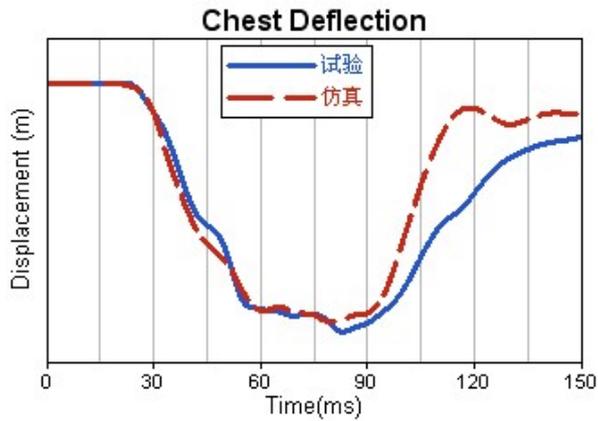


Figure 5. Contrast: chest deflection
图5. 胸部压缩量对标结果

综上所述，假人关键伤害曲线的吻合率均在 90%以上，满足对标要求，模型可用于后面的优化分析。

3 女性驾驶员约束系统模型仿真分析

将上述模型中 HybridIII 第 50 百分位男性假人替换为 Hybrid III 第 5 百分位女性假人，座椅由滑轨中间位置调整到最前端，转向管柱由中间位置调整到最下，调整 HybridIII 第 5 百分位女性假人坐姿，重新拟合安全带，计算现有约束系统对女性驾驶员的保护效果。

使用相同的约束系统，HybridIII 第 50 百分位男性假人和 HybridIII 第 5 百分位女性假人的伤害曲线对比如下图 6-11。

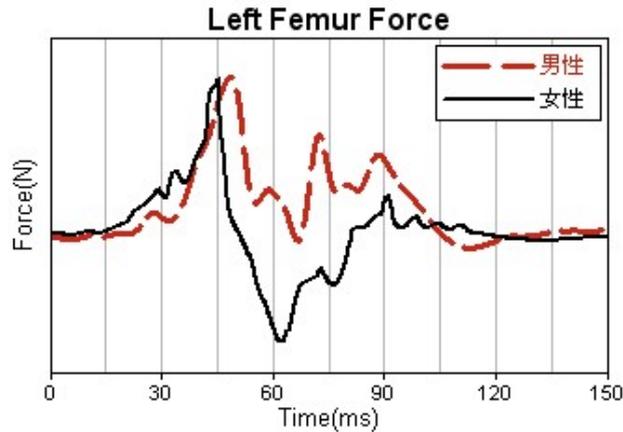


Figure 6. Left femur force(male VS. female)
图 6. 男驾驶员与女驾驶员左大腿力对比

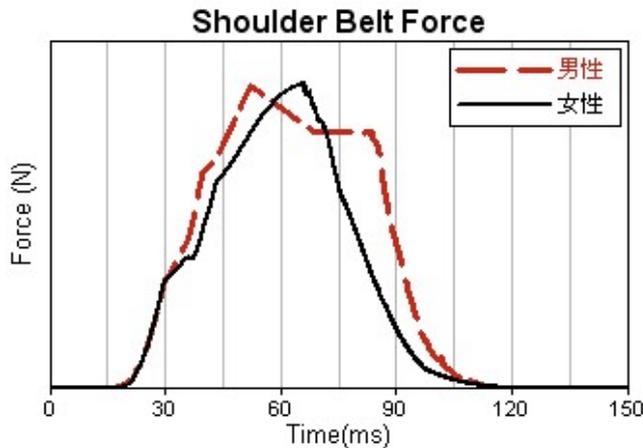


Figure 7. Shoulder belt force(male VS. female)
图 7. 男驾驶员与女驾驶员肩带力对比

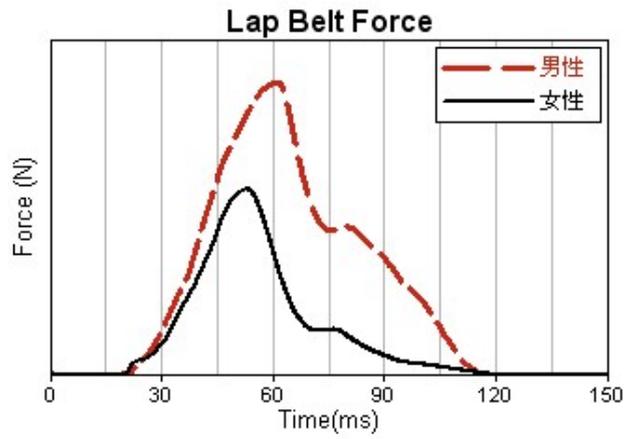


Figure 8. Lap belt force(male VS. female)
图8. 男驾驶员与女驾驶员腰带力对比

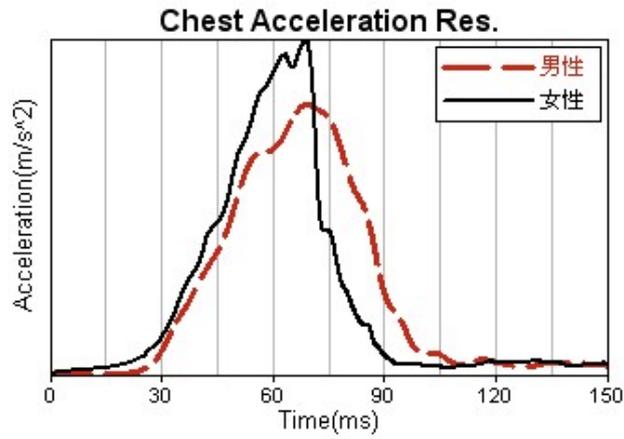


Figure 9. Chest acceleration(male VS. female)
图9. 男驾驶员与女驾驶员胸部加速度对比

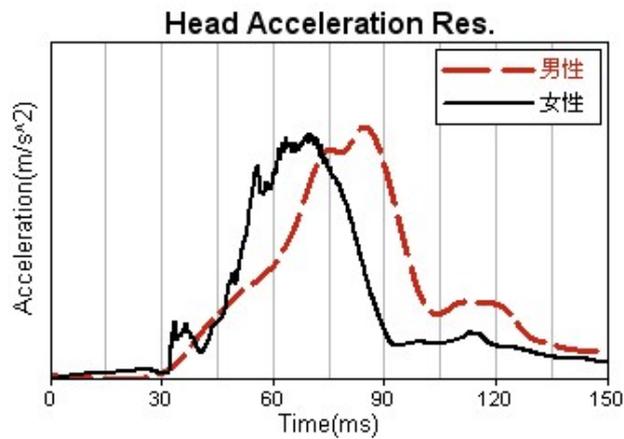


Figure 10. Head acceleration(male VS. female)
图10. 男驾驶员与女驾驶员头部加速度对比

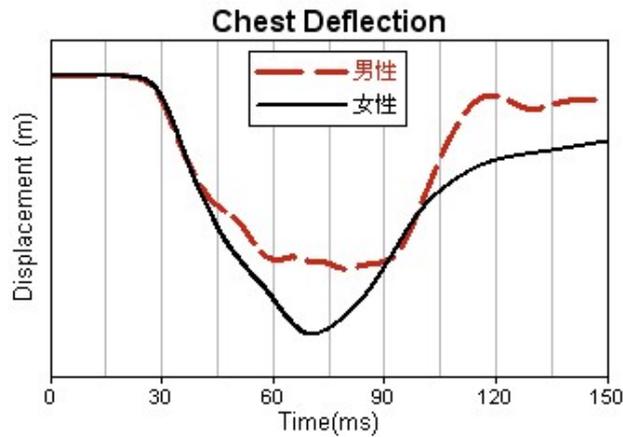


Figure 11. Chest deflection(male VS. female)
图 11. 男驾驶员与女驾驶员胸部压缩量对比

通过对比男性驾驶员和女性驾驶员的主要伤害值曲线和仿真录像可以发现：

(1) 由于女性假人形体矮小、座椅前移导致腿部与仪表板间距离变小，因此女性假人腿部和仪表板的接触时间提前。

(2) 两者肩带力的峰值基本一致，但由于女性假人与气囊接触较早，气囊阻碍女性假人继续向前运动，因此女性假人的回弹时间比男性假人早；男性假人腰带力明显大于女性假人，这是因为男性假人骨盆的运动位移大于女性假人。

(3) 在相同预紧力和限力情况下，女性假人由于座椅靠前，与气囊接触提前，女性假人胸部加速度上升时间提前。

(4) 女性假人位于座椅最前位置，与方向盘的距离比男性假人近，因此头部与气囊接触时间提前，从录像观察，女性假人头部在 45ms 开始与气囊接触，此时，男性头部距离气囊还有一定的空间。

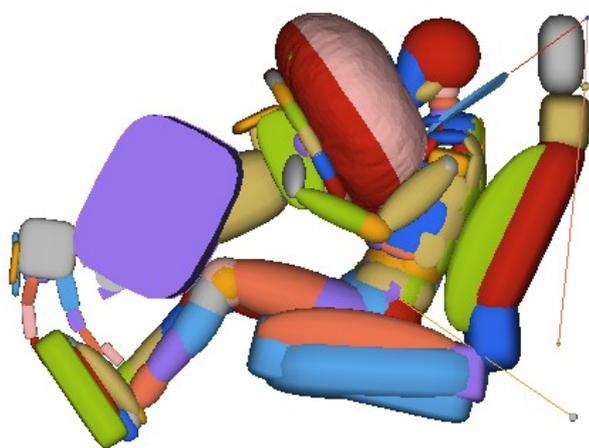


Figure 12. Female head contact with the airbag(45ms)
图 12. 45ms 时刻女性假人头部与气囊接触

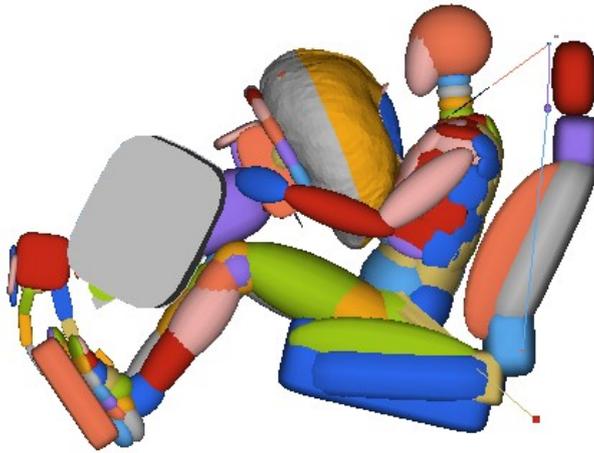


Figure 13. Male head not contact with the airbag(45ms)
图 13. 45ms 时刻男性假人头部未与气囊接触

使用相同的约束系统, Hybrid III 第 50 百分位男性假人和 Hybrid III 第 5 百分位女性假人的伤害值得分如表 1 和表 2。由于 C-NCAP 没有前排女性驾驶员工况, 所以参考 Euro-NCAP (2015 版) 50 公里正碰评分规则, 女性假人伤害值得到 13.27 分 (满分 16 分), 失分项为胸部, 如表 2 所示。由此可知, 该车型满足男性驾驶员的约束系统不能较好地保护女性驾驶员, 胸部伤害值需要优化。

Table 1. Male dummy injury value and point
表 1. 原约束系统配置男性假人伤害值得分

C-NCAP	性能指标	性能指标范围	基础模型	
			伤害值	得分
头部	HIC36	650-1000	569	5
	A3ms (g)	72-88	59	
颈部	弯矩 (Nm)	42-57	13.77	2
	剪切力 (kN)	1.9-3.1	0.75	
	拉伸力 (kN)	2.7-3.3	1.17	
胸部	压缩量 (mm)	22-50	26.7	4.16
	A3ms (g)	38-60	48.55	
大腿	左大腿载荷 (kN)	3.8-9.07	0.138	2
	右大腿载荷 (kN)		1.36	
	左膝滑移量 (mm)	6.0-15.0	0.358	
	右膝滑移量 (mm)		4.977	
小腿	左上 TI	0.4-1.3	0.38	1.66
	左下 TI		0.216	
	右上 TI		0.281	
	右下 TI		0.28	
	左小腿载荷 (kN)	2.0-8.0	1.907	
	右小腿载荷 (kN)		3.01	
合计			14.82	

Table 2. Female dummy injury value and point
表 2. 原约束系统配置女性假人伤害值得分

E-NCAP	性能指标	性能指标范围	基础模型	
			伤害值	得分
头部	HIC15	500-700	342.87	4
	头部 3ms (g)	72-80	56.69	
	合成加速度峰值 (g)	<80	59.11	
颈部	弯矩 My (Nm)	36-49	9.14	4
	张力 Fz (kN)	1.7-2.62	1.14	
	剪切力 Fx (kN)	1.2-1.95	0.4	
胸部	压缩变形量 (mm)	18-42	34.37	1.27
	VC (m/s)	0.5-1.0	0.11	
大腿	压力 (kN)	2.6-6	1.67	4
总分			13.27	

4 约束系统优化

由于女性假人腿部的伤害值远小于性能指标范围，基本不会扣分。所以该车型的女性驾驶员和男性驾驶员约束系统匹配兼容性主要考虑头、颈、胸三个部位。

4.1 安全带限力优化

假人的胸部压缩量与安全带的的作用密不可分，尤其是在假人胸部与气囊接触前，假人的胸部压缩量大小直接由安全带的力决定。因此，将安全带的限力等级由3500N分别降低到3000N、2500N，女性假人的伤害值如表3所示。

Table 3. Female injury value change by optimizing belt limiter level
表3. 安全带限力优化对女性驾驶员伤害值的影响

E-NCAP	性能指标	基础模型		限力 3000N		限力 2500N	
		伤害值	得分	伤害值	得分	伤害值	得分
头部	HIC15	342.87	4	311.7	4	273.9	4
	头部 3ms	56.69		54.72		51.47	
	合成加速度峰值	59.11		57.25		56.05	
颈部	弯矩 My	9.14	4	7.96	4	7.07	4
	张力 Fz	1.14		1.14		1.08	
	剪切力 Fx	0.4		0.44		0.51	
胸部	压缩变形量	34.37	1.27	31.82	1.7	27.9	2.35
	VC	0.11		0.1		0.09	
合计		9.27		9.7		10.35	

由表3可知，安全带限力等级降低，女性假人的胸部压缩量减小。从动画观察，女性假人头部距离方向盘最近的时刻如图14所示，女性假人的头部均未和方向盘接触。因此，降低安全带限力等级，有利于减小女性假人的胸部压缩量。

但同时也要考虑安全带限力等级降低对男性驾驶员伤害值的影响。由图15可知，安全带限力等级为3000N时，男性假人头部已经与方向盘发生接触，气囊被击穿。因此，单独降低安全带限力等级，不能同时兼顾男性

驾驶员和女性驾驶员。

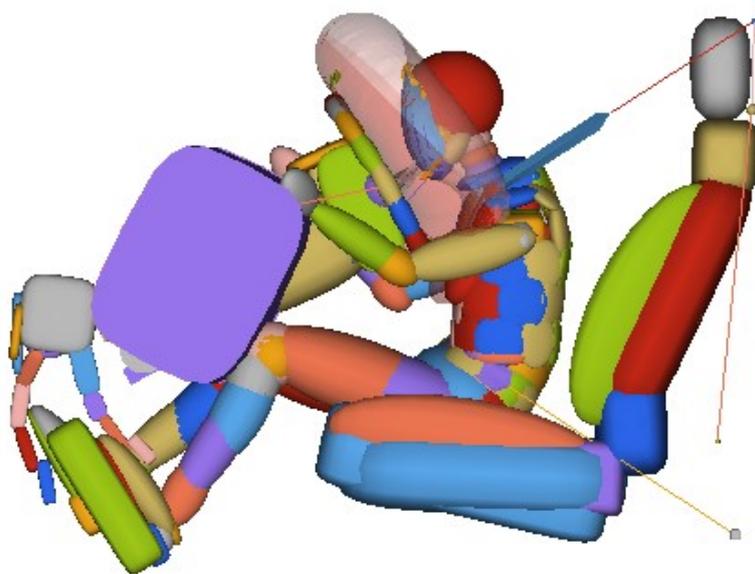


Figure 14. Closest distance between female and SW (belt LL2500)
图 14. 限力 2500N, 女性假人头部与方向盘最近距离

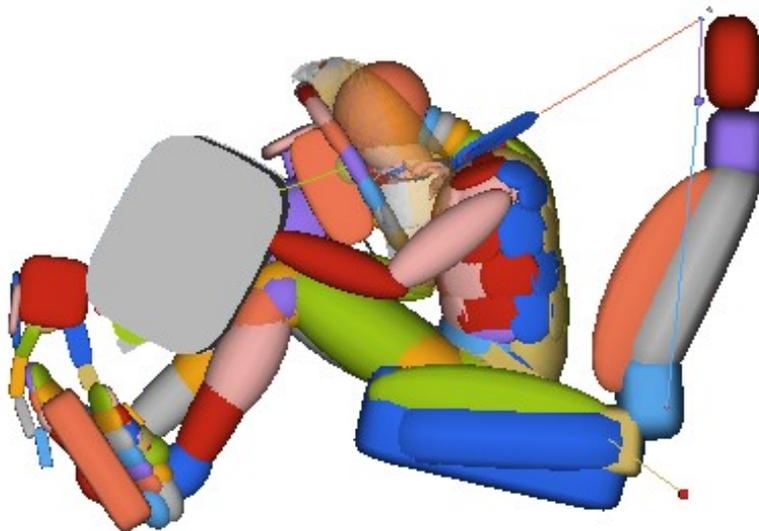


Figure 15. Closest distance between male and SW (belt LL3000)
图 15. 限力 3000N, 男性假人头部与方向盘接触

4.2 安全气囊气孔优化

在降低安全带限力等级的基础上，减小气囊的气孔直径，将气孔直径由25mm减小到20mm，使气囊的泄气变慢，目的是女性假人胸压减小的同时，避免男性假人头部和方向盘发生接触。

对比优化后的男性驾驶员伤害值和女性驾驶员伤害值，如表4-5所示。

从仿真录像看，气囊未被击穿，男性假人头部与方向盘未发生接触，如图16所示。

采用安全带限力等级3000N，安全气囊气孔20mm的方案，男性驾驶员和女性驾驶员的伤害值均得到改善，男性驾驶员胸部得分提高0.61分，女性驾驶员胸部得分提高0.35分。

Table 4. Male driver injury value
表4. 男性驾驶员伤害值

C-NCAP	性能指标	基础模型		限力 3000N, 孔 20	
		伤害值	得分	伤害值	得分
头部	HIC36	569	5	589	5
	A3ms (g)	59		61	
颈部	弯矩(Nm)	13.77	2	11.89	2
	剪切力(kN)	0.75		0.66	
	拉伸力(kN)	1.17		1.18	
胸部	压缩量(mm)	26.7	4.16	23.3	4.77
	A3ms (g)	48.55		46.4	
合计		11.16		11.77	

Table 5. Female driver injury value
表5. 女性驾驶员伤害值

E-NCAP	性能指标	基础模型		限力 3000N		限力 3000N_孔 20	
		伤害值	得分	伤害值	得分	伤害值	得分
头部	HIC15	342.87	4	311.7	4	353	4
	头部 3ms	56.69		54.72		56.36	
	合成加速度峰值	59.11		57.25		59.8	
颈部	弯矩 My	9.14	4	7.96	4	7.26	4
	张力 Fz	1.14		1.14		1.18	
	剪切力 Fx	0.4		0.44		0.49	
胸部	压缩变形量	34.37	1.27	31.82	1.7	32.3	1.62
	VC	0.11		0.1		0.1	
合计		9.27		9.7		9.62	

4.3 转向管柱优化

该车型的转向管柱压溃力约为3000N，压溃行程为20mm，将转向管柱的压溃力降低到2500N，分析转向管柱压溃力减小对假人伤害值的影响。分析结果如表6所示。

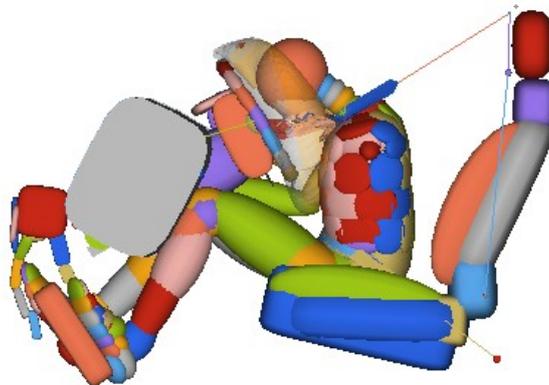


Figure 16. Closest distance between male and SW (belt LL3000, hole 20mm)

图16. 限力3000N, 气孔20mm, 男性假人头部与方向盘最近距离

Table 6. Male injury value change by optimizing SC

表6. 转向管柱优化对男性驾驶员伤害值的影响

C-NCAP	性能指标	基础模型		限力 3000N, 孔 20		限力 3000N_孔 20_压溃力 2500N	
		伤害值	得分	伤害值	得分	伤害值	得分
头部	HIC36	569	5	589	5	444	5
	A3ms (g)	59		61		56.3	
颈部	弯矩 (Nm)	13.77	2	11.89	2	16	2
	剪切力 (kN)	0.75		0.66		0.67	
	拉伸力 (kN)	1.17		1.18		1.41	
胸部	压缩量 (mm)	26.7	4.16	23.3	4.77	23.7	4.7
	A3ms (g)	41.55		39.4		35.4	
合计		11.16		11.77		11.7	

由结果可知, 减小转向管柱的压溃力, 对于男性驾驶员和女性驾驶员的头部伤害值均有明显改善, 但对胸部伤害值的改善不明显。从图17-18分析, 转向管柱约在55ms开始压溃, 75ms压溃过程结束, 在该时间段内气囊对胸部的挤压作用减小, 胸部压缩量减小, 但从整个碰撞过程分析, 假人胸部压缩量的峰值并未减小。

Table 7. Female injury value change by optimizing SC

表7. 转向管柱优化对女性驾驶员伤害值的影响

E-NCAP	性能指标	基础模型		限力 3000N_孔 20		限力 3000N_孔 20_压溃力 2500N	
		伤害值	得分	伤害值	得分	伤害值	得分
头部	HIC15	342.87	4	353	4	333	4
	头部 3ms	56.69		56.36		55.4	
	合成加速度峰值	59.11		59.8		57.5	
颈部	弯矩 My	9.14	4	7.26	4	7.48	4
	张力 Fz	1.14		1.18		1.16	
	剪切力 Fx	0.4		0.49		0.47	
胸部	压缩变形量	34.37	1.27	32.3	1.62	32.16	1.64
	VC	0.11		0.1		0.1	
合计		9.27		9.62		9.64	

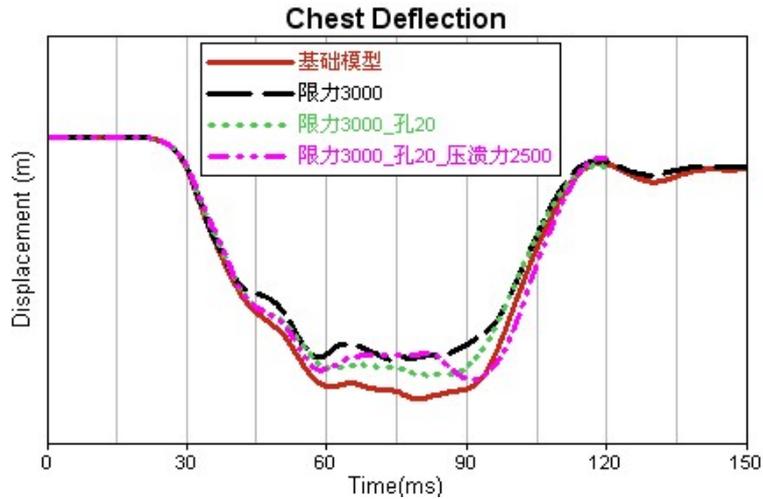


Figure 17. Male driver chest deflection
图17. 男性驾驶员胸部压缩量

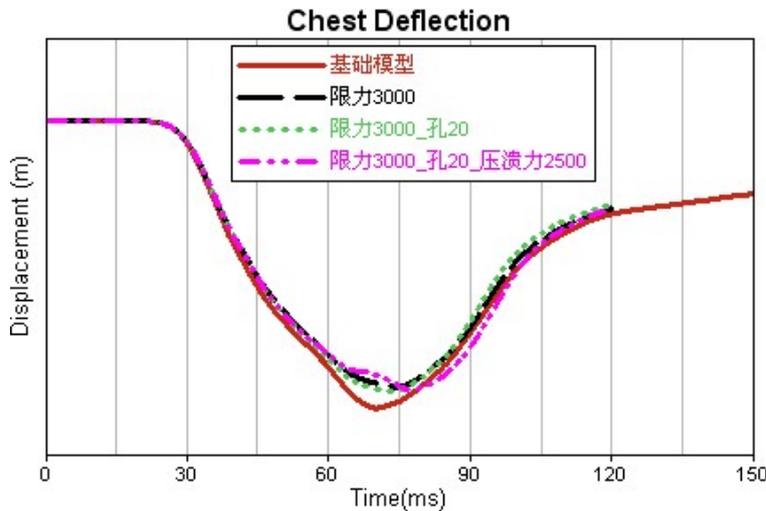


Figure 18. Female driver chest deflection
图18. 女性驾驶员胸部压缩量

5 结论

本文根据现有的驾驶员约束系统配置，结合仿真分析手段，对比分析了男性驾驶员和女性驾驶员在50km/h正面碰撞的保护效果，找出目前驾驶员约束系统配置的不足并进行改进优化。仿真分析表明，驾驶员通过优化安全带限力等级、安全气囊气孔、转向管柱压溃力等方式，能够同时满足男性驾驶员和女性驾驶员的伤害值要求（2015版E-NCAP），提高驾驶员约束系统的兼容性。从中可以得出以下结论：

（1）在保证男性驾驶员的头部不砸穿气囊的前提下，降低安全带限力等级，有利于同时降低男性驾驶员和女性驾驶员的胸部压缩量。

（2）只调整气囊的气孔，对胸部压缩量的改善作用不明显；但在降低安全带限力等级的基础上，适当减小气囊的气孔，保证头部和气囊不发生击穿，可以同时满足男性驾驶员和女性驾驶员的伤害值要求，实现驾驶员约束系统的兼容性。

(3) 减小转向管柱的压溃力，压溃距离变大，对假人头部伤害值的改善比较明显。

致谢

本研究课题《前排女性乘员约束系统匹配与兼容性研究》的立项，得到中国汽车技术研究中心的资助，在此表示衷心的感谢。

参考文献 (References)

- [1] Michiel van Ratingen, Euro NCAP Roadmap to Implementation 2013 to 2016, 2012 Annual General Meeting of the Automotive Safety Council, Scottsdale, March 2012.
- [2] EUROPEAN NEW CAR ASSESSMENT PROGRAMME (Euro NCAP)-ASSESSMENT PROTOCOL-ADULT OCCUPANT PROTECTION, 2013
- [3] C-NCAP (2012) 中国汽车技术研究中心编. C-NCAP管理规则 (2012版)
- [4] Pan Ruyang, Wang Taoying, Guo Qingxiang. Analysis and Optimizing the Performance of Female Driver During the Frontal Crash潘如阳, 王桃英, 郭庆祥. 女性汽车驾驶员正面碰撞伤害分析及安全性能优化