

基于轿车的车车角度碰撞约束系统优化研究*

颜凌波^{1,2†}, 解文娜², 曹立波², 刘亚飞², 戴宏亮²

(1. 汽车噪声振动和安全技术国家重点实验室, 重庆 400039;

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

摘要:为探究车车角度碰撞下的乘员约束系统参数设计准则,建立了某紧凑型车30°车车角度碰撞有限元模型和MADYMO驾驶区约束系统模型,并对整车模型及约束系统模型进行了验证.对安全带、安全气囊、安全座椅等约束系统各参数进行了灵敏度分析,运用MODEFRONTIER软件对目标车和同伴车约束系统参数进行优化.结果显示,在30°角度碰撞工况中,安全带D环位置及带扣点/锚点位置两个参数对驾驶员头部和胸部损伤影响显著,同时带扣点/锚点位置还对大腿轴向力有着显著的影响,而安全气囊点火时刻、气囊气体质量流率及泄气孔面积、安全带预紧器点火时刻4个参数对目标车和同伴车驾驶员各部位损伤影响都较为显著.优化后,目标车和同伴车WIC值分别减小了33.7%、7.4%,从而使此车型的约束系统在30°角度碰撞中对目标车和同伴车驾驶员的保护效果都达到最好.

关键词:30°角度碰撞;灵敏度分析;约束系统;参数优化

中图分类号:TH122

文献标志码:A

Study on Optimization of Restraint System in Oblique Crash under Car to Car Collision

YAN Lingbo^{1,2†}, XIE Wenna², CAO Libo², LIU Yafei², DAI Hongliang²

(1. State Key Laboratory of Vehicle Noise-Vibration-Harshness and Safety Technology, Chongqing 400039, China;

2. State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacture for Vehicle Body, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: This study aimed at exploring the design guidelines of restraints system parameters for occupants in oblique crash under car to car collision. The full car finite element model of a compact car was used to conduct the 30° oblique impact, and the model of occupant restraint system in the driving area were established and validated. The sensitive analysis of restraint system parameters to the driver in target car and driving car was then carried out. These parameters included seat belt parameters, airbag parameters and safety seat parameters. Furthermore, restraint system parameters were optimized according to these sensitive injury parameters. It is showed that the driver's head and chest injuries are sensitive to the locations of D-ring, anchor and buckle in the 30° oblique crash. Meanwhile, the femur forces are sensitive to the locations of anchor and buckle. Further, the driver injuries in both the target car and driving car are sensitive to airbag fire time, pretensioner fire time, airbag holes areas and mass flow rate of the airbag.

* 收稿日期:2017-09-15

基金项目:汽车噪声振动和安全技术国家重点实验室2015年度开放基金(NVH SKL-201509), State Key Laboratory of Vehicle NVH and Safety Technology Open-end Funds(NVH SKL-201509);国家自然科学基金资助项目(51605152), National Natural Science Foundation of China(51605152)

作者简介:颜凌波(1984-),男,湖南长沙人,湖南大学助理研究员,博士

† 通讯联系人, E-mail: milanyl@hotmail.com

After the optimization, the injury index WIC of driver of target car is induced by 33.7% and that of the driver of driving car is induced by 7.4%. The optimization results make the protecting effect of the restraint system for drivers both in target car and in driving car to be optimized.

Key words: 30 degree oblique crash; sensitive parameters; restraint system; parameters optimization

美国公路交通安全管理局 NHTSA (National Highway Traffic Safety Administration) 对汽车碰撞事故形式的分析报告中指出, 在汽车正面碰撞、侧面碰撞及追尾碰撞三种碰撞事故类型中, 正面碰撞所占的比例及其所导致的乘员死亡率分别高达 49%、33.5%, 此两项均是第一位^[1]. 由此可见在各类汽车碰撞事故中, 正面碰撞事故是最易发生、死亡率最高的一种碰撞形式. 最常见的正面碰撞事故类型可以分为三种: 正面 100% 全宽碰撞、正面偏置碰撞、正面角度碰撞. 美国 Kaye Sullivan 等人对美国正面碰撞事故中车辆的碰撞位置进行统计, 结果表明碰撞位置集中在车辆正面 +30° 角度范围内的比例高达约 80.2%^[2], 由此可见角度碰撞在正面碰撞事故中存在很大的比例.

由于不同的碰撞类型中车身纵向加速度、横向加速度以及乘员舱侵入量都不同, 所以乘员的损伤程度及损伤特点也各不相同^[3]. 目前, 国内外对角度碰撞的相关研究比较少. Horsch 等人通过台车试验探究了安全带在不同角度碰撞工况下对假人运动学响应的影响^[4]. Saunders 等人研究了安全带参数在 30° 角度碰撞中对驾驶员胸部、臀部损伤的影响^[5]. Stucki 等人分析了安全气囊参数在角度碰撞中对驾驶员损伤的影响^[6]. 黄栋针对某款乘用车型参照美国 FMVSS208 角度碰撞试验法规通过局部结构加强的方法提高该车在角度碰撞中的结构安全特性^[7]; 周航飞探究了车体-壁障在不同角度工况下的角度碰撞乘员损伤^[8]; 牛卫中等人对比分析了碰撞角度与碰撞速度对某 SUV 在车-车小重叠率正面斜角碰撞工况下的车体耐撞性影响^[9]; 曹立波等人对比了正面不同重叠率碰撞及 30° 角度碰撞工况下的乘员损伤特点^[10]; 颜凌波等人研究了小轿车与 SUV 在正面不同重叠率以及不同碰撞严重程度车-车角度碰撞中的乘员损伤情况^[11].

然而, 对于角度碰撞, 国内外的研究主要限于车体结构本身的防撞特性、吸能筒结构的变形与吸能、约束系统单个部件或单个参数对于驾驶员损伤的影响, 对角度碰撞中驾驶员约束系统设计的系统研究仍旧较少. 另外, 目前汽车的驾驶员约束系统主要是

针对正面全宽碰撞及偏置碰撞而设计的, 现有约束系统能否较好保护角度碰撞中的驾驶员仍不明确. 故本文将深入研究车-车角度碰撞中不同约束系统设计参数对驾驶员损伤的影响趋势及敏感性, 采用优化方法研究基于正面碰撞中评价指标法规值的驾驶员约束系统参数设计范围, 确定车-车角度碰撞的驾驶员约束系统参数设计依据.

1 碰撞仿真模型的建立

1.1 整车有限元模型的建立与验证

选用 2010 年版丰田 Yaris 为研究对象, 整车有限元模型由美国国家碰撞分析中心 (National Crash Analysis Center, NCAC) 建立及发布. 模型包括车身、驱动桥、引擎、悬架、内饰、座椅等部件^[12].

本文对 Yaris 整车有限元模型进行了有效性验证, 仿真计算了其 100% 正面刚性壁碰撞及 40% 偏置碰撞, 碰撞速度分别为 56 km/h、64 km/h, 将其与整车试验进行了对比验证, 其中整车试验数据来自于 NHTSA No. 5677 及 IIHS CEF0610^[13]. 图 1 是仿真和试验车体变形及车身加速度对比结果, 可以发现, 两者吻合较好, 因此该整车有限元模型可用于后续研究.

1.2 车车 30° 角度碰撞模型的建立

美国国家汽车调查系统耐撞性数据系统 (NASS-CDS) 1995-1999 年的统计结果表明, 在车-车角度碰撞事故中, 车-车左侧角度碰撞模式发生的概率较高, 并且碰撞角度 30° 为发生频率最高的碰撞角度^[14]. 另外, 我国道路交通事故统计结果表明, 交通事故中比例高达 75% 的事故车-车速集中在 50 km/h 以下, 且车-车碰撞工况中车辆前部变形区域集中在靠近车辆左侧 1/3~1/2 范围内^[15]. 而当同伴车中轴线通过目标车前排副驾驶侧座椅 R 点时, 目标车的前端变形区域范围刚好介于 1/3~1/2. 因此, 本文将基于前文经过验证的整车有限元模型, 以同伴车中垂面通过目标车副驾驶侧座椅 R 点时的碰撞位置作为本文最终的车-车角度碰撞研究工况, 碰撞速度为 50 km/h. 考虑到不

同车型车-车碰撞不相容性所带来的不确定性,本文目标车及同伴车采用同一款车型. 建立好的车-车 30° 角度碰撞模型如图 2 所示,左侧为目标车(被碰车),右侧为同伴车(碰撞车).

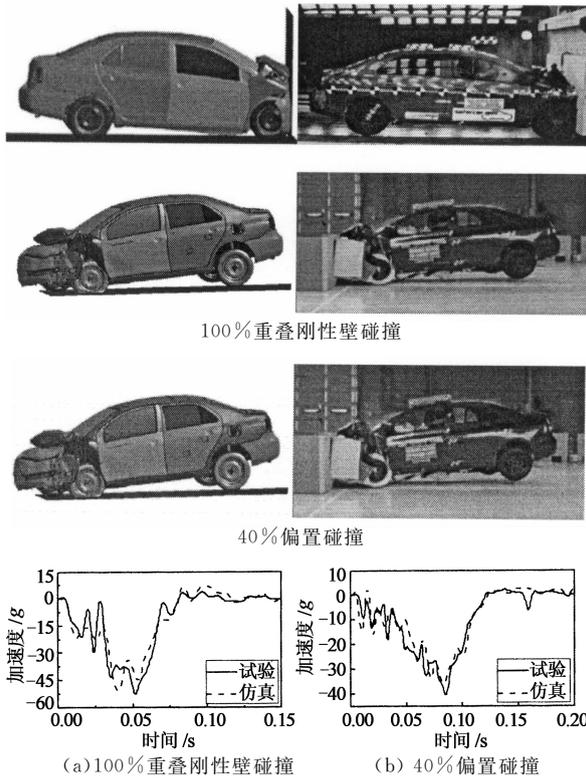


图 1 Yaris 整车有限元模型的验证

Fig. 1 Validation of the Yaris FE model

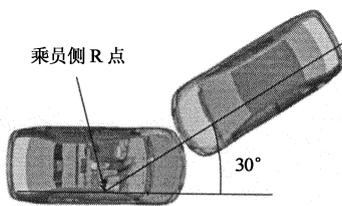


图 2 车-车 30° 角度碰撞仿真模型

Fig. 2 Simulation model of car to car 30° oblique crash

1.3 约束系统模型的建立与验证

采用多刚体动力学软件 MADYMO 中的子结构方法(Prescribed Structure Motion, PSM)建立被碰车与碰撞车的驾驶员侧乘员约束系统模型. 该模型包括车体、假人、安全带和安全气囊. 车体包含仪表板总成,地板,左侧车门内饰板,左侧 A、B 柱,驾驶员座椅. 安全带模型为有限元与多刚体相结合的混合式安全带,并定义卷收器,包含限力功能和预紧功能. 安全气囊点火时刻和充气速率通过对比整车碰撞的试验动画来调节. 仿真假人采用 Hybrid III

50 百分位椭圆体假人,根据整车碰撞试验假人位置调整仿真假人在车体中的相对空间位置^[16]. 根据试验建立好的驾驶员侧约束系统模型如图 3 所示.

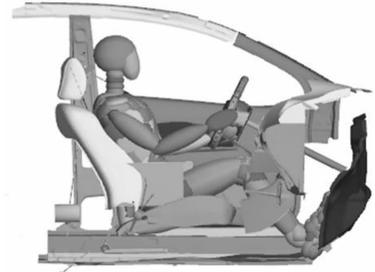


图 3 驾驶员侧约束系统仿真模型

Fig. 3 The driving area and restraint system simulation models

利用 56 km/h 的正面 100%全宽碰撞工况下获得的驾驶员损伤数据,对建立的 MADYMO 模型中驾驶员的损伤值进行验证. 将仿真中头部 HIC、胸部加速度和左右大腿力值与试验结果进行比较,各部位损伤峰值对比结果如表 1 所示. 可以看出假人各损伤指标中试验与仿真的误差均在 10%以内,因此所建驾驶员约束系统模型有效,可用于下一步研究.

表 1 试验与仿真模型假人损伤峰值对比

Tab. 1 Comparison of dummy injury criteria

指标	试验值	仿真值	误差/%
头部 HIC36	427	459.6	7.6
胸部 3 ms	45g	46.7g	3.8
左大腿力	-4 893 N	-4 840 N	-1.1
右大腿力	-2 829 N	-2 987 N	5.6

2 约束系统参数灵敏度分析

本文选取了安全带、安全气囊、安全座椅等约束系统相关参数进行灵敏度分析,各参数及其取值范围来自于参考文献和汽车生产厂商所提供的数据. 对于安全带参数中的 D 环位置、带扣点及锚点位置参数,由于其与车体结构相关,无法使用软件实现模型的自动运算,需要手动调整参数,因此本文主要研究这些参数改变对驾驶员损伤的影响趋势,而且后续优化分析也仅参考这些参数的单因素分析结果而不对其进行优化. 由于现实车辆中安全带腰带与驾驶员左右两侧夹角较为相似,因此,仿真试验中,锚点和带扣点位置的变化保持一致即同时前进或后退. 此外,本文安全座椅参数选取较少,因为座椅参数的变动会影响到假人空间相对位置的变化,进而

影响到安全带参数的变化,所以本文只选取了坐垫的刚度参数,各参数及其取值如表 2 所示.其中,D 环位置上下移动范围为 20 mm,锚点/带扣点位置前后移动范围为 20 mm.

表 2 约束系统参数取值范围

Tab. 2 The range of restraint system parameters

设计参数		初始值	取值范围
安全带参数	安全带限力级别/kN	4.0	2.5~6
	预紧器点火时刻/ms	15.0	12~18
	D 环摩擦因子	0.2	0.1~0.4
安全气囊参数	点火时刻/ms	18	13~30
	气体质量流率缩放因子	1.4	1.15~1.65
	泄气孔面积/mm ²	1 500	628~2 515
安全座椅参数	气囊体积缩放因子	1.0	0.95~1.05
	坐垫刚度缩放因子	1.0	0.8~1.2
车体结构参数	D 环位置/mm	0	-20~20
	锚点/带扣点位置/mm	0	-20~20

运用 MODEFRONTIER 软件对验证过的 MADYMO 仿真模型进行试验设计计算,利用 student-*t* 检验进行了输入参数的显著性分析,输出 C-NCAP 中的主要评价指标,包括头部 HIC36、胸部位移 Chest-D、胸部黏性指标 VC、左右大腿轴向力 Femur-L 和 Femur-R,分别对目标车和同伴车的驾驶员损伤参数进行灵敏度分析.为了方便比较各损伤参数的变化趋势,将 C-NCAP 正面碰撞驾驶员损伤评价指标的低性能值设为基础值,赋值为 1,将仿真输出的各损伤值与之相比得到的比值输出进行分析.

2.1 车体结构分析

2.1.1 D 环位置的变化

图 4 和图 5 为 D 环位置参数对目标车及同伴车驾驶员损伤影响图.可以看出:

1)对于目标车,随着 D 环位置的下移,驾驶员头部 HIC36 呈现逐渐增加的趋势,当 D 环位置下移距离超过 10 mm 以后,驾驶员胸部压缩变形量和胸部粘性指标 VC 增加幅度较大.原因是 D 环位置的下移使安全带与驾驶员胸部接触位置下移,安全带的约束效果减弱,从而使驾驶员的头部及胸部的向前运动幅度增大,导致头部和胸部更易与车门内饰板接触并最终使得损伤明显增加.此外,目标车驾驶员左大腿力明显大于右大腿力,是因为角度碰撞中车身向车门一侧旋转,导致左侧搁置板处的防火墙及仪表板变形大于右侧,从而使左大腿力大于右大腿力.

2)对于同伴车,驾驶员头部 HIC36 未出现明显

波动,且头部损伤明显低于目标车,而胸部压缩量及胸部粘性指标 VC、左右大腿力与目标车各指标变化趋势一致.

综上可得,当 D 环位置上移时,目标车驾驶员头部和胸部损伤及同伴车胸部损伤均呈现减小的趋势,而其他损伤参数无明显变化.当 D 环位置上移 20 mm 时,目标车及同伴车驾驶员各部位损伤都较小,因此在后续优化时将此位置设为优化初始值.

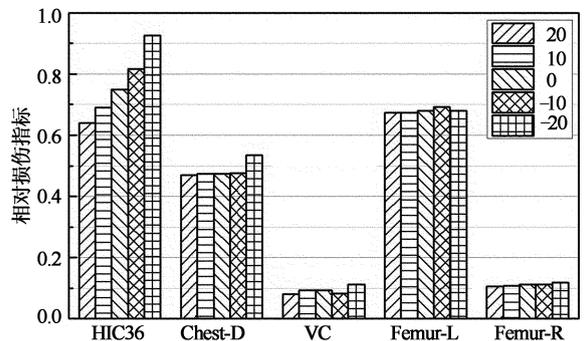


图 4 目标车 D 环位置参数分析

Fig. 4 Comparisons of driver injury for target car with different D-ring locations

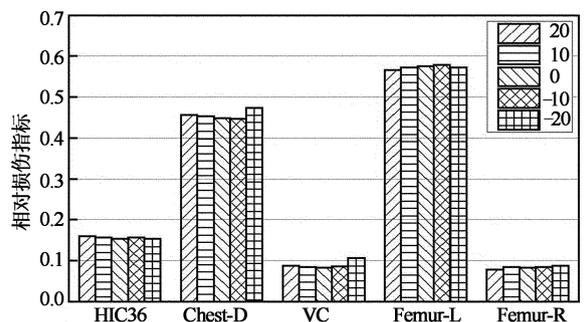


图 5 同伴车 D 环位置参数分析

Fig. 5 Comparisons of driver injury for driving car with different D-ring locations

2.1.2 带扣点/锚点位置的变化

图 6 和图 7 为带扣点/锚点位置对目标车及同伴车驾驶员损伤影响图.从图可以看出:

1)对于目标车,随着带扣点/锚点位置的后移,驾驶员头部 HIC36 稍有增加,而胸部位移与粘性指标 VC 及大腿力都呈下降趋势.原因是随着带扣点/锚点位置后移,腰带与地板之间的夹角变小,导致碰撞时驾驶员腰部、臀部以及下肢的向前运动距离被腰带所限制,使其头部相对下肢向前运动幅度增大,而驾驶员胸部与安全气囊的接触面积变小,因此驾驶员的头部损伤增加,胸部及大腿损伤减小.

2)对于同伴车,驾驶员头部 HIC36 无明显波动,且头部损伤明显低于目标车,而胸部位移与粘性指标 VC 及大腿力都呈下降趋势,与目标车相应各指标变化趋势一致。

综上可得,当带扣点/锚点位置变化时,目标车驾驶员头部与胸部损伤及左右大腿损伤变化趋势相反,因此在后续优化中将带扣点/锚点原始位置设为优化初始值。

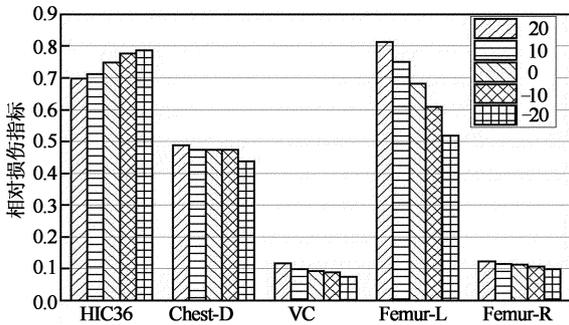


图 6 目标车带扣点/锚点位置参数分析

Fig. 6 Comparisons of driver injury for target car with different buckle or anchor locations

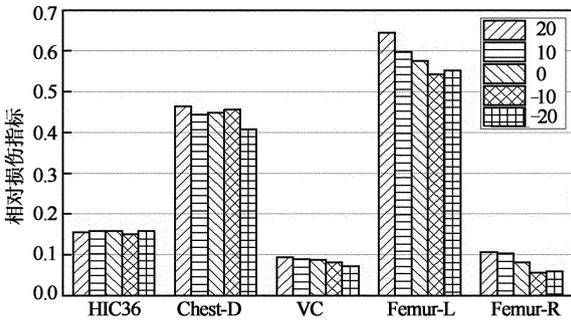


图 7 同伴车带扣点/锚点位置参数分析

Fig. 7 Comparisons of driver injury for driving car with different buckle or anchor locations

2.2 安全带安全气囊及座椅参数分析

选取约束系统 8 个参数,分别为安全带限力级别、预紧器点火时刻、D 环摩擦因子、安全气囊点火时刻、气体质量流率缩放因子、泄气孔面积、气囊体积缩放因子和座椅座垫刚度缩放因子,运用均匀拉丁方法在参数范围内均匀采点选取 100 个组合参数进行碰撞仿真,通过 student-t 检验进行了输入参数的显著性分析.由于本文灵敏度分析所选取的置信区间为 95%,所以当 P 值小于或者等于 5%时表示该影响参数较为显著。

对于目标车,显著性分析结果如表 3 所示.可以

看出,安全气囊点火时刻及气体质量流率两个参数对驾驶员头部、胸部及大腿损伤均有显著性影响;气囊泄气孔面积主要对驾驶员头部和胸部损伤有显著性影响;安全带预紧器点火时刻则主要对驾驶员大腿损伤影响显著;而气囊体积、安全带限力级别、D 环摩擦因数及座椅刚度等其他 4 个参数对驾驶员损伤无显著性影响。

对于同伴车,显著性分析结果如表 4 所示.可以看出,安全气囊点火时刻仅对驾驶员胸部损伤有显著性影响,而除此之外,约束系统其他参数对驾驶员损伤有显著性影响的部位与同伴车相一致。

表 3 目标车驾驶员损伤影响显著性分析(P value, %)

Tab. 3 Significance analysis of driver injury for target car

指标	安全气囊				安全带			座椅
	A	B	C	D	E	F	G	H
HIC36	0	0	0.24	29	19	53	89	70
Chest-D	0	0	1.1	50	23	58	97	82
VC	1.2	0	42	12	43	52	12	54
Femur-L	90	0	14.4	60	74	0	64	36
Femur-R	0	40	29	38	55	0	58	42

注:A:安全气囊点火时刻;B:安全气囊气体质量流率;C:安全气囊泄气孔面积;D:安全气囊体积;E:安全带限力级别;F:安全带预紧器点火时刻;G:安全带 D 环摩擦因数;H:座椅刚度.表 4 同。

表 4 同伴车驾驶员损伤影响显著性分析(P value, %)

Tab. 4 Significance analysis of driver injury for driving car

指标	安全气囊				安全带			座椅
	A	B	C	D	E	F	G	H
HIC36	78	0	3.9	24	24	62	89	79
Chest-D	0	0	0.98	52	29	74	97	81
VC	1.4	0	35	11	44	6.4	12	68
Femur-L	57	11	46	93	85	0	64	41
Femur-R	71	0	88	19	69	4.2	58	72

根据驾驶员各部位损伤的影响显著性参数,分别列出其影响显著性大小,如图 8 和图 9 所示.正值表示该参数变化与该驾驶员部位损伤变化趋势相一致,负值表示该参数与该驾驶员部位损伤变化趋势相反.由图可知:

1)对于目标车驾驶员,安全气囊点火时刻是最显著的影响参数,并且对驾驶员各部位都有影响,当气囊点火时刻推迟时,头部损伤会大幅减小,而胸部压缩量会有所增加;其次是气体质量流率,对驾驶员各部位都有显著影响,当气体质量流率增大时,头部损伤明显减小,而胸部损伤呈增大趋势;泄气孔面积则主要是对头部有影响,随着泄气孔面积的增大,头部损伤增大;安全带预紧器点火时刻主要是影响驾驶员的左右大腿轴向力。

2)对于同伴车驾驶员,安全气囊气体质量流率是最显著的影响参数,对驾驶员各部位都有损伤,且随着气体质量流率的增大,头部及胸部损伤的变化趋势与同伴车相一致;气囊点火时刻主要影响胸部损伤,随着点火时刻推迟,胸部损伤增大;泄气孔面积则主要影响头部和胸部损伤,随着泄气孔面积的增大,头部及胸部损伤相应减小;而安全带预紧器点火时刻则主要影响驾驶员左右大腿轴向力。

综上所述,对于目标车和同伴车,随着安全气囊点火时刻的推迟,目标车和同伴车驾驶员头部损伤和胸部压缩量都会增加,变化趋势一致;随着气体质量流率的增大,目标车和同伴车都有头部损伤减小、胸部损伤增大的趋势;随着泄气孔面积的增大,目标车头部损伤增大,而同伴车头部和胸部损伤都减小。因此,对目标车和同伴车驾驶员损伤影响趋势差异最大的参数是安全气囊泄气孔面积。总而言之,驾驶员损伤的灵敏参数主要有气囊点火时刻、气体质量流率、泄气孔面积和安全带预紧器点火时刻。

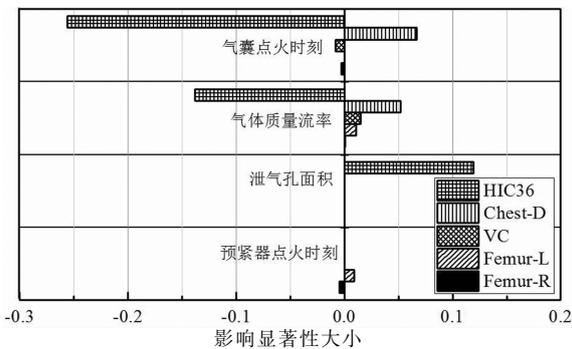


图 8 目标车约束系统参数分析

Fig. 8 Parameter analysis of restraint system for target car

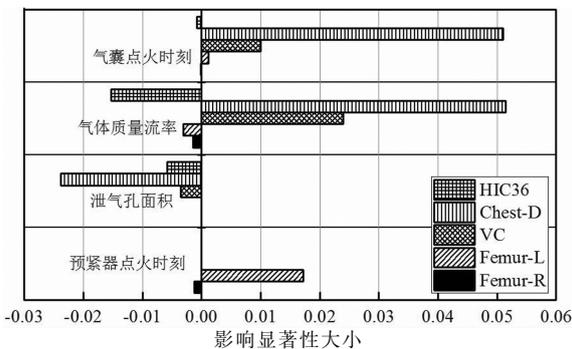


图 9 同伴车约束系统参数分析

Fig. 9 Parameter analysis of restraint system for driving car

3 乘员约束系统参数优化

基于上节分析,将安全带 D 环位置、带扣点/锚点位置两个参数对驾驶员各部位损伤最小的取值作为优化的输入值,针对筛选出的其他角度碰撞中驾驶员损伤的 4 个灵敏参数:安全气囊点火时刻、气体质量流率、泄气孔面积和安全带预紧器点火时刻,对 30°角度碰撞中 Yaris 约束系统进行参数优化。

3.1 优化目标及约束条件

由于角度碰撞国内外还没有相关的碰撞评价法规,本文以 2015 版 C-NCAP 中正面碰撞驾驶员各部位损伤评价指标限值(表 5 所示)作为优化约束条件;以安全气囊点火时刻、气体质量流率、泄气孔面积和安全带预紧器点火时刻为目标变量;以正面碰撞中驾驶员的损伤评价指标及评分基准定义的加权伤害准则 WIC(Weighted Injury Criterion)作为优化目标^[17];运用 modeFRONTIER 软件调用 MADYMO 软件对 Yaris 车型在角度碰撞中分别处于目标车和同伴车位置的驾驶员约束系统参数进行优化。

表 5 C-NCAP 正面碰撞中驾驶员损伤的约束条件

Tab. 5 Restraint condition of driver injury for

C-NCAP front impact		
损伤部位	指标	约束条件
头部	HIC ₃₆	≤1 000
	3 ms 合成加速度 H3ms/g	≤88
颈部	剪切力 Neckup-Fx/kN	≤3.1
	张力 Neckup-Fz/kN	≤3.3
	伸张弯矩 Neckup-My/(N·m)	≤57
胸部	压缩变形量 Chest-D/mm	≤50
	粘性指数 VC/(m·s ⁻¹)	≤1.0
大腿	轴向力 Femur/kN	≤9.07
	膝盖滑移量 Kneeslider/mm	≤15
小腿	轴向力 TCFC/kN	≤8
	胫骨指数 TI	≤1.3

综合损伤评价指标 WIC 是针对头部、胸部、大腿等部位的损伤值加权,表达式如下^[16]:

$$WIC = 0.6 \left(\frac{HIC_{36}}{1000} \right) + \frac{0.35}{2} \left(\frac{C_g}{60} + \frac{C}{0.0762} \right) + \frac{0.05}{2} \left(\frac{F_L}{10} + \frac{F_R}{10} \right)$$

式中:HIC₃₆为头部损伤指标;C_g为胸部 3 ms 合成加速度,单位为 g;C 为胸部压缩量指标,单位为 m;F_L、F_R分别是左右大腿轴向力最大值,单位为 kN。WIC 值越小,则可说明约束系统对驾驶员的保护效

果越好。

3.2 RSM 响应面模型的构建

对于目标车和同伴车,采用拉丁方试验设计方法在灵敏参数取值范围内均匀采点,生成 40 组试验数据进行碰撞仿真,得到驾驶员头部、胸部、大腿的损伤值,并采用 Kriging 算法利用试验数据创建目标变量与输出损伤值之间的响应面模型。

3.3 基于遗传算法的参数优化

本文基于 MODEFRONTIER 软件采用遗传算法 NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II) 来进行约束系统各参数优化分析。利用上面建立的响应面代理模型分别对目标车和同伴车的驾驶员约束系统进行参数优化。每次优化包括 40 代,每一代进行 50 次试验,共 2 000 次试验。

对比目标车和同伴车的优化结果,取二者优化结果中的交集。目标车和同伴车最优设计点均为:安全气囊点火时刻为 28 ms、气体质量流率缩放因子为 1.58、泄气孔面积为 1 669 mm²、安全带预紧器点火时刻为 15 ms。优化前后目标车和同伴车驾驶员损伤对比如表 6 和表 7 所示。

表 6 目标车优化前后驾驶员各部位损伤参数对比

Tab. 6 Comparison of driver injury criteria before and after optimization for target car

损伤指标	优化前	优化后	比例/%
HIC36	994.5	540.5	-45.7
H3MS/(m·s ⁻²)	819.2	670.9	-18.1
Neckup-Fx/N	-979.4	-482.7	-50.7
Neckup-Fz/N	2 985.5	2 502.1	-16.2
Neckup-My/(N·m)	51.5	40.8	-20.8
Chest-D/mm	29.9	32.1	7.4
VC/(m·s ⁻¹)	0.11	0.11	0
Femur-L/N	5 130.1	5 061.9	-1.3
Femur-R/N	1 143.2	1 088.1	-4.8
WIC	0.83	0.55	-33.7

表 7 同伴车优化前后驾驶员各部位损伤参数对比

Tab. 7 Comparison of driver injury criteria before and after optimization for driving car

损伤指标	优化前	优化后	比例/%
HIC36	160.8	145.0	-9.83
H3MS/(m·s ⁻²)	316.2	296.6	-6.20
Neckup-Fx/N	-644.4	-657.6	2.05
Neckup-Fz/N	734.5	770.6	4.91
Neckup-My/(N·m)	56.6	40.3	-28.8
Chest-D/mm	28.9	28.5	-1.38
VC/(m·s ⁻¹)	0.11	0.10	-9.09
Femur-L/N	5 073.4	5 085.6	0.24
Femur-R/N	693.4	692.3	-0.16
WIC	0.27	0.25	-7.4

对于目标车,优化后驾驶员的头部 HIC36、H3MS、颈部轴向力、颈部剪切力和颈部弯矩明显降低,胸部压缩量稍有增加,而 WIC 值降低了 33.7%。对于同伴车,优化后驾驶员的头部 HIC36、H3MS、颈部弯矩明显减小,颈部轴向力和剪切力稍有增加,而 WIC 值降低了 7.4%。由此可见,优化后的约束系统更好地保护了目标车和同伴车驾驶员,使其所受致命伤害降低。

表 8 为优化前后约束系统参数对比数据。可以发现,优化后的约束系统参数中,安全气囊点火时刻和安全带预紧器点火时刻都有所延迟,因为在 30° 角度碰撞中车身转动比较严重,驾驶员与安全气囊的接触时间会比正面碰撞中的时间晚一些。

表 8 优化前后约束系统参数对比

Tab. 8 Comparison of restraint system parameters before and after optimization

损伤指标	优化前	优化后
安全气囊点火时刻/ms	23	28
安全气囊气体质量流率缩放因子	1.24	1.58
安全气囊泄气孔面积/mm ²	1 456	1 669
安全带预紧器点火时刻/ms	13	15

综合前文约束系统单因素分析结果来看,对于目标车,安全气囊点火时刻延迟,气囊气体质量流率增大,气囊泄气孔面积减小,目标车头部损伤会相应减小,胸部损伤会相应增大。而从约束系统参数优化结果来看,当安全气囊点火时刻延迟、气体质量流率增大,而泄气孔面积增大时,达到了驾驶员损伤最优结果,优化后的驾驶员头部损伤和 WIC 值大幅减小,胸部压缩量稍有增加。由此可见,在 4 个灵敏参数的相互耦合作用下,最优的约束系统参数设计中每个参数的变化趋势与单因素分析中对驾驶员的损伤影响趋势并不是完全一样的,针对同伴车可得出相似结果。因此,后期应进一步地系统研究驾驶员约束系统各参数相互耦合之后,共同作用下的约束系统对驾驶员各部位的损伤影响。

4 结论

本文建立并验证了某款乘用车-车型在 30° 角度碰撞工况下的车-车碰撞有限元模型和驾驶员约束系统模型,进行了安全带、安全气囊、安全座椅等约束系统参数对驾驶员损伤的灵敏度分析,并对较灵敏参数进行优化使其在 30° 角度碰撞工况下保护最佳。得到以下结论:

1) 30° 角度碰撞中,安全带 D 环位置和锚点/带

扣点位置对驾驶员的头部和胸部损伤影响显著;此外,带扣点/锚点位置对大腿轴向力影响也较为显著.因此,适当地调整这些参数,可以减小角度碰撞中对驾驶员所造成的伤害.

2) 30°角度碰撞中,安全气囊点火时刻、气体质量流率及泄气孔面积、安全带预紧器点火时刻4个参数对目标车和同伴车位置驾驶员各部位损伤影响都较为显著.

3) 优化约束系统参数后,目标车和同伴车乘员综合损伤评价指标 WIC 值分别减小了 33.7%、7.4%,达到对 30°角度碰撞工况驾驶员保护最优.

参考文献

- [1] U S department of transportation. Traffic safety facts 2003; a compilation of motor vehicle crash data from the fatality analysis reporting system and the general estimates system [R]. National Highway Traffic Safety Administration, National Center for Statistics & Analysis; HS-809/775, 2005;13-18.
- [2] SULLIVAN K, HENRY S, LAITURI T R. A frontal impact taxonomy for USA field data [J]. SAE International Journal of Passenger Cars Mechanical Systems, 2008, 1(1):406-429.
- [3] 张金换,杜汇良,马春生,等.汽车碰撞安全性设计[M].北京:清华大学出版社,2010:152-155.
ZHANG Jinhuan, DU Huiliang, MA Chunsheng, et al. Automotive design for crash safety [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2010:152-155. (In Chinese)
- [4] HORSCH J D. Occupant dynamics as a function of impact angle and belt restraint [R]. SAE Technical Paper 801310, 1980;13-17.
- [5] SAUNDERS J W, PRASAD A. NHTSA's frontal offset research program [R]. SAE Technical Paper 2004-01-1169, 2004;102-149.
- [6] STUCKI S L, RAGLAND C, HENNESSEY B, et al. NHTSA's improved frontal protection research program [R]. SAE Technical Paper 950497, 1995;73-79.
- [7] 黄栋.轿车正面斜角碰撞车身结构安全性改进研究[D].长沙:湖南大学机械与运载工程学院,2010:19-54.
HUANG Dong. Study on improving the crashworthiness safety of body structure based on front oblique impact [D]. Changsha: College of Mechanical and Vehicle Engineering, Hunan University, 2010; 19-54. (In Chinese)
- [8] 周航飞.轿车前部斜角碰撞仿真及驾驶员损伤防护研究[D].长沙:湖南大学机械与运载工程学院,2009:39-46.
ZHOU Hangfei. Study on simulation and prevention effect for driver injury based on front oblique impact [D]. Changsha: College of Mechanical and Vehicle Engineering, Hunan University, 2009; 39-46. (In Chinese)
- [9] 牛卫中,许鹏善,刘金鑫.小重叠正面斜角碰撞工况对车体耐撞性的影响[J].汽车安全与节能学报,2017,8(1):53-58.
NIU Weizhong, XU Pengshan, LIU Jinxin. Influence of small overlap frontal oblique impact conditions on crashworthiness of car body [J]. Automotive Safety and Energy, 2017, 8(1):53-58. (In Chinese)
- [10] 曹立波,张萍,颜凌波,等.在车对车碰撞条件下轿车斜角碰撞及小重叠碰撞的驾驶员损伤研究[J].汽车工程,2016,38(2):174-180.
CAO Libo, ZHANG Ping, YAN Lingbo, et al. The study on driver injury in oblique and small overlap crash under car to car collision [J]. Automobile Engineer, 2016, 38(2):174-180. (In Chinese)
- [11] 颜凌波,丁宗阳,曹立波,等.车车斜角碰撞工况下驾驶员损伤研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2016,43(4):59-66.
YAN Lingbo, DING Zongyang, CAO Libo, et al. Study on the driver injury in vehicle to vehicle oblique crashes [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2016, 43(4):59-66. (In Chinese)
- [12] 崔崇楨.多种典型工况下的汽车正面碰撞性能协同优化[D].长沙:湖南大学机械与运载工程学院,2014:85-102.
CUI Chongzhen. The study on collaborative optimization of vehicle frontal impact safety in multiple typical situations [D]. Changsha: College of Mechanical and Vehicle Engineering, Hunan University, 2014; 85-102. (In Chinese)
- [13] MARZOUGUI D, SAMAHA R R, NIX L, et al. Extended validation of the finite element model for the 2010 Toyota Yaris passenger Sedan [C]//Transportation Research Board 92nd Annual Meeting. 2013:9-15.
- [14] RAGLAND C L, FESSAHAIE O, ELLIOTT D. Evaluation of frontal offset/ oblique crash test conditions[C]//17th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles. Amsterdam,2001;8-9.
- [15] 陈君毅,王宏雁,潘婷.从道路交通事故研究看我国汽车正面碰撞法规试验形式[J].汽车工程,2010,32(2):168-172.
CHEN Junyi, WANG Hongyan, PAN Ting. On the types of vehicle frontal crash test in china based on road traffic accident research [J]. Automotive Engineering, 2010, 32(2):168-172. (In Chinese)
- [16] U S department of transportation. NHTSA rulemaking office of crashworthiness standards; Test report of toyota motor corporation 2007 Toyota Yaris [R]. National Highway Traffic Safety Administration, National Center for Statistics & Analysis, NCAP-MGA-2006-011, 2006;7-15.
- [17] 赵志杰,金先龙.乘员约束系统耐撞性数据挖掘[J].振动与冲击,2010,29(3):13-17.
ZHAO Zhijie, JIN Xianlong. Data mining on crashworthiness data of occupant restraint system [J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(3):13-17. (In Chinese)