

文章编号:1674-2974(2016)04-0059-08

车车斜角碰撞工况下驾驶员损伤研究*

颜凌波^{1,3†}, 丁宗阳², 曹立波¹, 谢飞³, 乐中耀³

(1. 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; 2. 神龙汽车有限公司技术中心, 湖北武汉 430056; 3. 汽车噪声振动和安全技术国家重点实验室, 重庆 400039)

摘要:为了探究车车斜角碰撞模式下的乘员损伤的特点, 分别建立了某款小轿车与某款SUV在不同碰撞重叠率以及不同碰撞严重程度下的车车斜角碰撞有限元模型, 并采用有限元软件和多刚体软件相结合的方法分析了车车斜角碰撞中不同碰撞重叠率和不同碰撞严重程度条件下的乘员损伤。结果显示, 假人各部位中, 头部和下肢损伤受碰撞严重程度和碰撞重叠率的影响较大, 在多种重叠率工况中, 30%重叠率工况下假人损伤受碰撞严重程度的影响比较敏感, 70%重叠率工况下假人损伤较小。

关键词:汽车碰撞安全; 正面斜角碰撞; 乘员损伤

中图分类号:TH122

文献标识码:A

Study on the Driver Injury in Vehicle to Vehicle Oblique Crashes

YAN Ling-bo^{1,3†}, DING Zong-yang², CAO Li-bo¹, XIE Fei³, YUE Zhong-yao³

(1. State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body, Hunan Univ, Changsha, Hunan 410082, China; 2. Dongfeng Peugeot Citroen Automobile Company, Wuhan, Hubei 430056, China; 3. State Key Laboratory of Vehicle Noise-Vibration-Harshness and Safety Technology, Chongqing 400039, China)

Abstract: FE models of different oblique crash cases between passenger car and SUV in different crash overlaps and impact severities were developed to investigate the injury responses of the driver in oblique crashes. The method combining the FE and multi-body software was used to analyze the injury response of driver in different cases. It is shown that the impact severity and the crash overlap have great influence on the injury response of the head and the lower limb. It is also indicated that the driver injury response in 30% crash overlap case is more sensitive to the impact severity and the driver injury response in 70% crash overlap case is the lowest in three crash overlap cases.

Key words: vehicle safety; frontal oblique crash; driver injury

正面碰撞作为汽车交通事故和法规评价中的主要碰撞形式, 一直是汽车被动安全性研究的焦点问题。正面碰撞的试验方法包括全宽碰撞、偏置碰撞和

斜角碰撞。我国的正面碰撞法规主要采用100%重叠率的刚性壁障碰撞试验和40%重叠率的偏置可变形壁障碰撞试验两类试验方法, 法规中并没有关

* 收稿日期: 2015-01-22

基金项目: 中国博士后基金资助项目(2014M552313); 汽车噪声振动和安全技术国家重点实验室2015年度开放基金资助项目(NVH SKL-201509)

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: yanlingbo@hnu.edu.cn

于斜角碰撞的内容及试验要求,然而,Kaye Sullivan对美国国家汽车调查系统耐撞性数据库(NASS-CDS)统计结果的研究显示,在现实交通事故中,汽车发生斜角碰撞仍占30%^[1].因此,进行汽车斜角碰撞的研究,对进一步提高汽车安全性具有重要意义.

目前,世界主要汽车大国的碰撞法规中,美国的FMVSS 208 正面碰撞法规包含汽车斜角碰撞试验,试验要求车辆以48.3 km/h的速度撞击30°斜角刚性壁障,国内一些学者基于该法规的试验方法对车辆斜角碰撞安全性进行研究^[2-3].但也有学者指出试验中汽车撞击刚性墙后产生较大侧向滑移,使得车身及乘员的动态响应与实际交通事故不同.因此学者们利用车车碰撞的试验方法来研究车辆斜角碰撞安全性^[4-5],但是在过往研究中只考虑了单一重叠率工况,不能全面反映汽车发生斜角碰撞时的情况.Paul Scullion的研究表明,在不同碰撞重叠率下的乘员损伤概率有所不同,需要将正面碰撞细分成小重叠率碰撞、中等偏置碰撞、大重叠率碰撞等几种工况进行分别研究^[6].因此,要深入分析斜角碰撞的乘员损伤特点,需要对不同重叠率下的汽车斜角碰撞进行研究.另外,现行的正面碰撞试验评价方法都只能考查类型相似的两辆车之间发生的碰撞事故中安全性能的好坏,没有考虑车辆碰撞相容性的影响^[7].研究表明,不同级别的车辆发生碰撞时,小车所遭受的碰撞严重程度及乘员损伤会明显增高^[8].但在车车斜角碰撞中,碰撞相容性问题所造成的乘员各部位损伤特点缺乏相关研究说明.

因此,本文采用某款小轿车作为研究对象,建立了该车与某款SUV在不同重叠率下的车车斜角碰撞有限元模型,并且通过改变两车的碰撞速度来模拟车车碰撞中该小轿车所遭受碰撞程度的不同.将车车碰撞的有限元仿真结果导入MADYMO乘员约束系统模型中计算该小轿车乘员损伤,从而研究车车斜角碰撞中碰撞重叠率和碰撞严重程度对乘员损伤的影响.

1 碰撞仿真模型的建立

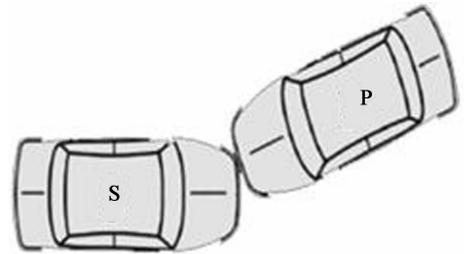
1.1 整车有限元模型的验证

本研究中选用的两款车分别为2001年版福特小轿车Taurus和2003年版福特SUV Explorer.两

款车的整车有限元模型由美国国家碰撞分析中心(National Crash Analysis Center, NCAC)建立并发布.在建立该模型后,NCAC通过100%正面碰撞试验对模型进行了验证,其中整车试验数据来自于美国新车碰撞测试中的100%正面碰撞试验,试验号依次为7520^[9]和3730^[10].

1.2 车车斜角碰撞模型的建立

Carl Ragland等人对美国国家汽车调查系统耐撞性数据库1995—1999年交通事故统计的分析结果显示,左偏置斜角碰撞形式在正面斜角碰撞中是发生概率最高的碰撞形式(见图1,其中S为被碰车辆,代表被研究对象,P为碰撞车辆).在碰撞角度中,处在50百分位(非加权算法)的碰撞角度是30°,加权算法中50百分位的角度是33°^[11].



(S车为被碰车,P车为碰撞车)

图1 左侧斜角碰撞示意图^[7]

Fig. 1 Left offset oblique crash configuration

根据以上数据,本文所有仿真都设置为左侧斜角碰撞,设置被碰车为小轿车Taurus,碰撞车为SUV Explorer,两车的中心线夹角为30°.两车的碰撞重叠率分别设为30%,50%和70%,如图2所示.



图2 不同重叠率工况下车车仿真碰撞模型

Fig. 2 Car to car oblique crash simulation in different overlap ratio modes

在车车碰撞中,两车相互的接近速度反映了车车碰撞的严重程度,两辆车相互接近速度越大,两车

相互碰撞越严重^[12]. 两车碰撞的接近速度应结合交通事故统计以及相关法规进行设置. 同济大学陈君毅对我国道路交通事故统计结果进行了分析, 结果显示 75% 的交通事故中事故车的车速在 50 km/h 以下^[13]. 美国 FMVSS208 正面斜角碰撞法规中要求汽车以 48.3 km/h 撞击刚性壁障, 为了得到与法规相一致的 Taurus 受撞击程度, 本研究按照该法规中左侧 30° 斜角的试验设置对小轿车 Taurus 进行了仿真, 并将其与不同碰撞车速度工况下的车车 30° 斜角碰撞仿真进行对比. 在车车碰撞仿真中 Taurus 的初始速度与法规相同, 设定为 48.3 km/h, 而后设定不同的碰撞车 Explorer 初始速度进行仿真. 结果显示, Explorer 初始速度为 20 km/h 时, 被碰车 Taurus 在 X 方向上的碰撞前后速度变化量 ΔV 与法规试验中接近(见表 1). 速度变化量 ΔV 与乘员损伤概率存在紧密的相关性, 常用来描述汽车的受撞击程度^[14]. 因此, 当碰撞车 Explorer 初始速度为 20 km/h, Taurus 的初始速度为 48.3 km/h 时, Taurus 受撞击程度与法规试验条件下的受撞击程度基本相同.

表 1 Taurus 斜角碰撞前后 X-速度变化量
Tab. 1 The Delta-V of Taurus in oblique crash

Taurus 斜角碰撞模式	Taurus 碰撞前后 X-速度变化量/(km·h ⁻¹)
车车碰撞 30% 重叠率	44.76
车车碰撞 50% 重叠率	45.4
车车碰撞 70% 重叠率	47.97
法规车-壁障碰撞	43.95

本研究以碰撞车速度为仿真试验变量, 根据交通事故统计结果和相关试验法规设置, 将被碰车 (Taurus) 的速度设定为 48.3 km/h, 碰撞车 (Explorer) 速度分别选取为 20 km/h, 30 km/h, 40 km/h, 50 km/h, 用来模拟被碰车不同的碰撞严重程度, 进行车车斜角碰撞仿真试验. 车车斜角碰撞仿真矩阵如表 2 所示.

1.3 驾驶员侧乘员约束系统模型的建立

本文采用 MADYMO 软件建立了 Taurus 驾驶员侧乘员约束系统碰撞仿真模型, 用来分析车车斜角碰撞中被碰车的乘员损伤响应, 该模型包括假人、约束系统和车体. 车体包含仪表盘总成, 地板, 左侧车门内饰板, 左侧 A、B 柱, 前排左侧座椅; 约束系统包括安全气囊和安全带. 安全带模型由有限元安全带和多体安全带单元组成, 模型中安全气囊的起爆

时间和起爆速率通过对比整车碰撞的试验动画来调节, 整车试验动画来自于美国新车碰撞测试中的 100% 正面碰撞试验. 假人模型采用了 Hybrid III 50 百分位椭圆假人模型, 参照美国新车碰撞测试中的 7520 号试验, 调节 MADYMO 仿真模型的假人位置与试验一致. 根据试验调节好的驾驶员侧乘员约束系统模型如图 3 所示.

表 2 车车碰撞仿真模型
Tab. 2 The car to car crash simulation models

车车碰撞模型	被碰车 Taurus 速度/(km·h ⁻¹)	碰撞车 Explorer 速度/(km·h ⁻¹)	被碰车碰撞重叠率/%
仿真 1	48.3	20	30
仿真 2	48.3	20	50
仿真 3	48.3	20	70
仿真 4	48.3	30	30
仿真 5	48.3	30	50
仿真 6	48.3	30	70
仿真 7	48.3	40	30
仿真 8	48.3	40	50
仿真 9	48.3	40	70
仿真 10	48.3	50	30
仿真 11	48.3	50	50
仿真 12	48.3	50	70

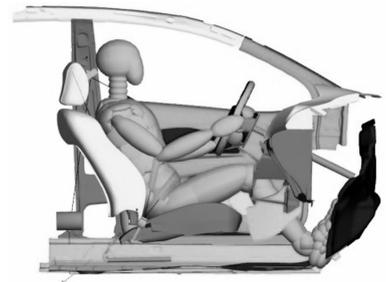


图 3 驾驶区及乘员约束系统碰撞仿真模型
Fig. 3 The driving area and occupant restraint system simulation models

为了在 MADYMO 仿真中模拟车体变形情况, 本文运用 PSM (prescribed structure motion) 方法, 将有限元整车碰撞模型中相关部件的节点-位移历程导出, MADYMO 约束系统模型中通过 MOTION_STRUCT_DISP 将其导入, 即把车车斜角碰撞中车体变形情况作为 MADYMO 模型中的已知边界条件输入. 同时, 在有限元碰撞仿真模型中设置输出驾驶员座椅下方加速度计的加速度和转角加速度, 作为 MADYMO 模型的输入条件.

1.4 驾驶区乘员约束系统模型的验证

为了保证模型的准确性, 需要对乘员约束系统模型进行验证, 本文对 Taurus 100% 正面碰撞进行

了仿真,从结果中提取加速度曲线以及相关车体部件的节点-位移历程,导入 MADYMO 模型中得到乘员损伤,将仿真中乘员头部 HIC,胸部加速度和左右大腿力值与试验结果进行比较,试验数据来自于美国新车碰撞测试中的 100% 正面碰撞试验.表 3 给出了仿真和试验中假人各部位损伤峰值,可知该乘员约束系统模型仿真计算的假人损伤值与试验假人损伤值的误差均在 10% 以内.

表 3 试验与仿真模型假人损伤值对比
Tab. 3 Comparison of dummy injury criteria

	试验	仿真	误差
HIC36	345	366.5	6.2%
胸部 3 ms 加速度/g	40.8	37.0	9.3%
左大腿力峰值/N	-124.6	-117.4	-5.8%
右大腿力峰值/N	-602.6	-634.7	5.3%

2 不同工况下的仿真结果分析

2.1 碰撞重叠率对乘员损伤的影响

图 4 给出了 3 种不同碰撞重叠率工况下两车前部结构的相互作用情况.从图中可以看出,30% 重叠率工况下被碰车前纵梁及前防撞梁并未直接参与碰撞变形,50% 和 70% 重叠率工况下被碰车前纵梁及前防撞梁均直接参与碰撞变形,但前防撞梁的受撞击位置有所不同,70% 重叠率工况下前防撞梁的受撞击位置更靠近两侧纵梁中间位置.

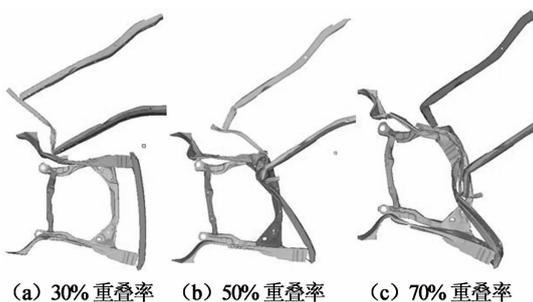


图 4 3 种重叠率工况下车辆前部结构件变形
Fig. 4 Deformations of frontal main components in three overlap modes

图 5~图 8 为不同碰撞速度下,碰撞重叠率对被碰车乘员损伤情况的影响,将 30% 重叠率下碰撞仿真得到的被碰车假人各部位损伤指标作为基础数值,并赋为 1,其它重叠率工况的被碰车假人损伤指标与其对比得出.从图中可以看出,当碰撞速度分

别设定为 20 km/h, 30 km/h, 40 km/h, 50 km/h 时,不同碰撞重叠率工况间的头部损伤 HIC₃₆ 值变化幅度分别为 66.7%, 25.8%, 48%, 329.4%. 其中,碰撞车速度为 40 km/h 以下的三种工况中,50% 重叠率的被碰车乘员头部损伤较大;碰撞车速度为 50 km/h 的工况中,30% 重叠率的被碰车乘员头部损伤远高于其他两种碰撞重叠率.颈部损伤 N_{ij} 值的变化幅度分别为 11%, 14%, 10%, 67%, 其中,碰撞车速度为 40 km/h 以下的三种工况,颈部损伤 N_{ij} 值变化不大,碰撞车速度为 50 km/h 的工况中,30% 重叠率的被碰车乘员颈部损伤出现了一定程度的增大.胸部 3 ms 加速度的变化幅度分别为 19%, 15%, 7%, 5%. 左大腿损伤值的变化幅度分别为 92%, 45%, 50%, 144%, 其中 30% 重叠率的乘员左大腿损伤值最高,70% 重叠率的乘员左大腿损伤值最低.右大腿损伤值的变化幅度分别为 56%, 58%, 24%, 45%, 其中 70% 重叠率的乘员右大腿损伤值均比其他两种重叠率小.

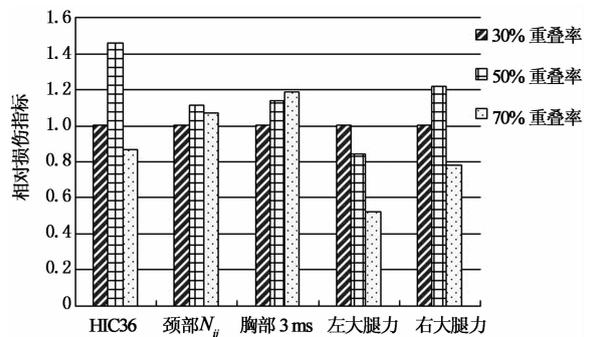


图 5 碰撞车速度为 20 km/h 时重叠率对乘员损伤的影响

Fig. 5 Comparisons of driver injury with different overlap ratio for 20 km/h mode

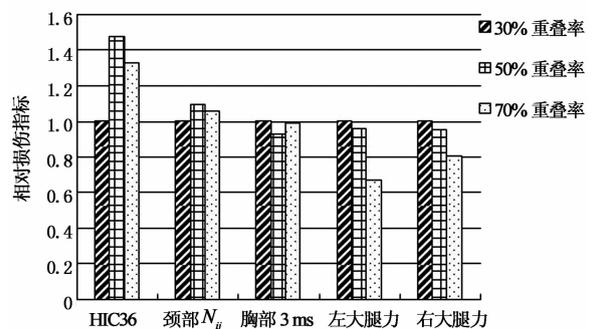


图 6 碰撞车速度为 30 km/h 时重叠率对乘员损伤的影响

Fig. 6 Comparisons of driver injury with different overlap ratio for 30 km/h mode

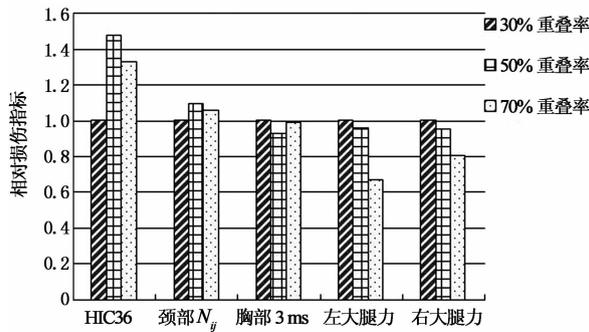


图 7 碰撞车速度为 40 km/h 时重叠率对乘员损伤的影响

Fig. 7 Comparisons of driver injury with different overlap ratio for 40 km/h mode

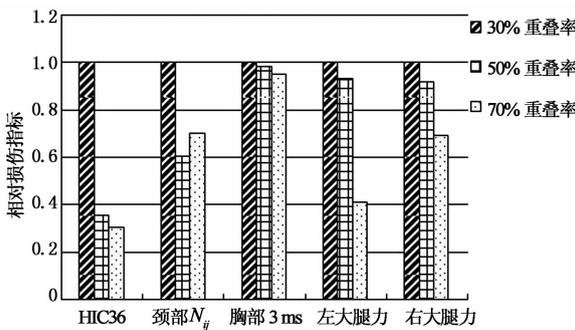


图 8 碰撞车速度为 50 km/h 时重叠率对乘员损伤的影响

Fig. 8 Comparisons of driver injury with different overlap ratio for 50 km/h mode

根据以上结果可得,车车斜角碰撞中,相比于不同碰撞重叠率之间乘员颈部和胸部损伤的差别程度,乘员头部和下肢损伤受碰撞重叠率的影响较大.左大腿损伤值随着两车碰撞重叠率的减小而增加,30%重叠率下乘员左大腿损伤高于其他两种重叠率.这是由于腿部损伤受乘员舱侵入的影响很大,不同的碰撞重叠率会造成乘员舱变形程度和变形模式的不同.碰撞重叠率越小,乘员舱变形程度越大,发生最大变形的地方越靠近驾驶员左侧区域,尤其是30%重叠率工况下,被碰车前纵梁不直接参与碰撞变形,碰撞车直接撞击被碰车乘员舱,变形程度更严重,从而导致乘员左大腿损伤高于其他两种重叠率.另外,不同重叠率下乘员头部损伤的变化趋势随着碰撞严重程度变化而有所不同.在碰撞严重程度较低的工况下,50%重叠率中乘员头部损伤高于其他两种重叠率.而在碰撞严重程度较高的工况下,30%重叠率中乘员头部损伤高于其他两种重叠率.这是由于在碰撞严重程度较低的斜角碰撞工况下,X方向加速度是造成乘员头部损伤的主要原因,50%重

叠率碰撞中被碰车 X 方向加速度大于其他两种工况,而 30%重叠率碰撞中被碰车参与碰撞的部件相对刚度较小,X 方向加速度峰值也较小(见图 9),因此,50%重叠率下头部损伤较大.在碰撞严重程度较高的斜角碰撞工况下,假人会与侧向内饰件发生碰撞,影响头部运动学响应,并导致头部损伤增加.30%重叠率碰撞中被碰车 Y 方向受到冲击较大,导致 30%重叠率中头部损伤指标剧烈增大,从而高于其他两种重叠率.

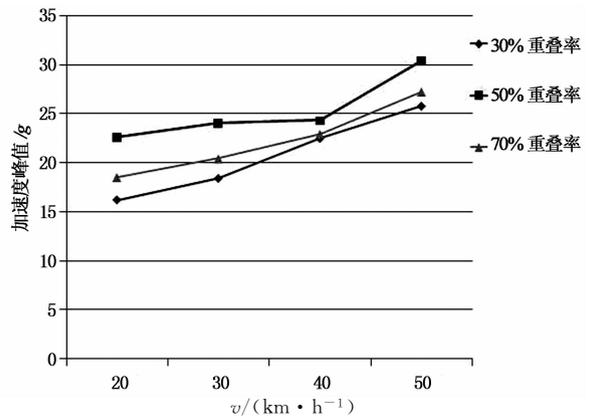


图 9 不同重叠率工况下被碰车 X-加速度峰值对比
Fig. 9 Comparisons of subject car X-acceleration peak with different overlap modes

2.2 碰撞严重程度对乘员损伤的影响

在车车碰撞中,整车碰撞吸能量反映了该车的受碰撞程度,其数值越高说明受碰撞程度越严重.图 10 给出了不同碰撞重叠率的车车斜角碰撞工况下被碰车的碰撞吸能情况.从图中可以看出,在 3 种重叠率工况下,随着碰撞车速度的增大,被碰车的碰撞吸能量相应增大,这表明被碰车速度不变,随着碰撞车速度的增大,被碰车受碰撞程度逐渐增大.

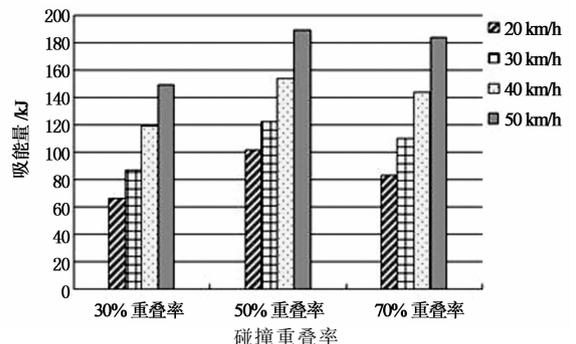


图 10 碰撞车速度对被碰车吸能的影响
Fig. 10 Absorbed energy of subject car in different partner car velocity modes

图 11~图 13 给出了 3 种重叠率工况下,不同碰撞车速度对被碰车乘员损伤情况的影响,将碰撞车速度为 20 km/h 下碰撞仿真得到被碰车假人损伤指标作为基础数值,并赋为 1,其它碰撞车速度工况与之相比得到的被碰车假人各部位损伤指标.结果显示,在三种重叠率下,随着碰撞车速度从 20 km/h 逐渐增加到 50 km/h,乘员各部位损伤也逐渐增加.当碰撞重叠率分别为 30%,50%,70%时,头部损伤 HIC₃₆ 值增加的最大倍数分别为 10.4,2.5,3.6;颈部损伤 N_{ij} 值增加的最大倍数分别为 1.98,1.13、1.31;胸部 3 ms 加速度增加的最大倍数分别为 1.81,1.56,1.46;左大腿力增加最大倍数分别为 4.2,3.8,3;右大腿力增加最大倍数分别为 2.6,2.1,2.3.

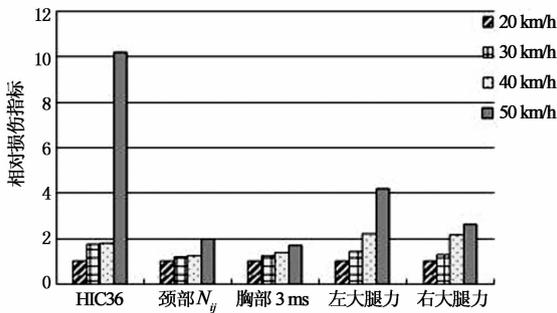


图 11 30%重叠率下碰撞车速度对乘员损伤的影响
Fig. 11 Comparisons of the driver injury with different partner car velocity for 30% overlap

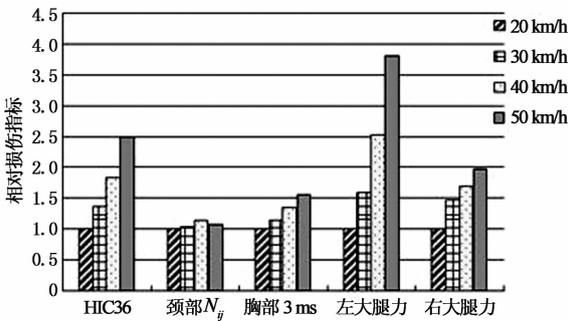


图 12 50%重叠率下碰撞车速度对乘员损伤的影响
Fig. 12 Comparisons of the driver injury with different partner car velocity for 50% overlap

根据上述结果可以得出,车车斜角碰撞中,随着被碰车受碰撞程度的增加,被碰车乘员各部位损伤指标呈现增大的趋势.其中颈部和胸部损伤指标变化幅度相对较小,头部和下肢损伤指标变化幅度相对较大.头部损伤指标增加明显主要是由于汽车斜角碰撞中,假人头部从安全气囊左侧边缘滑过,安全气囊无法充分发挥缓冲作用,假人头部损伤值随碰

撞程度的增大而明显增大.下肢损伤与乘员舱的压溃程度直接相关,碰撞程度增大导致乘员舱侵入量增大,仪表板与下肢接触导致损伤增加.相比于重叠率为 50%,70%的两种工况,重叠率为 30%的工况下乘员各部位损伤增大幅度较大,这表明 30%重叠率工况下被碰车乘员损伤对碰撞程度变化的响应较敏感.这是由于该工况下碰撞重叠率较小,被碰车前纵梁不直接参与碰撞,导致前舱缓冲吸能效率较低,碰撞能量很大程度上被乘员舱吸收.因此,随着碰撞程度的增加,被碰车乘员损伤受到的影响较大.

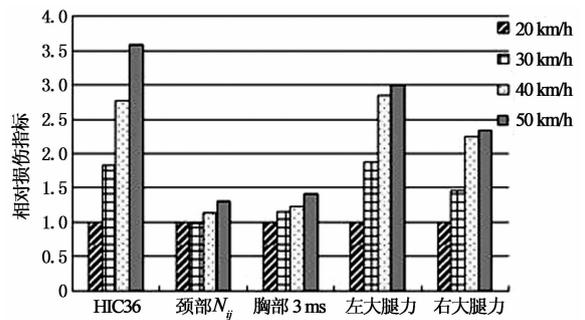


图 13 70%重叠率下碰撞车速度对乘员损伤的影响
Fig. 13 Comparisons of the driver injury with different partner car velocity for 70% overlap

另外,从图 11 中发现,30%重叠率工况下,碰撞车速度设置为 50 km/h 的车车碰撞仿真中被碰车乘员头部损伤值远大于其他几组碰撞车速度设置的仿真,在不同碰撞车速度设置的仿真中,被碰车假人头部 X 方向和 Y 方向的位移-时间历程曲线如图 14 和图 15 所示.从图中可以得出,假人头部 X 方向的位移随着碰撞车速度增大而增大,但曲线趋势基本相同.而碰撞车速度为 50 km/h 时,假人头部 Y 方向的位移-时间历程曲线趋势明显不同于其他几组速度工况,这表明该工况下假人头部 Y 方向的运动学响应异常.

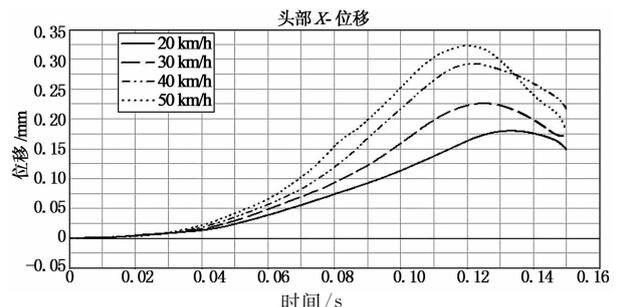


图 14 头部 X 方向位移-时间历程
Fig. 14 Head X displacement-time curve

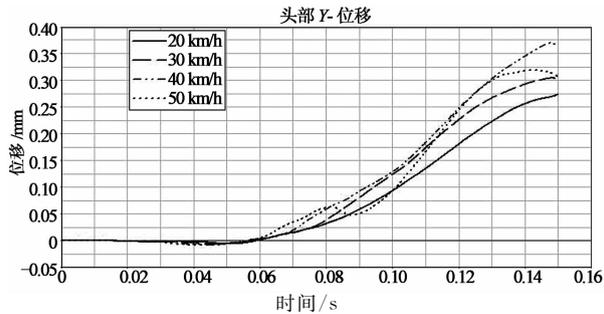


图 15 头部Y方向位移-时间历程

Fig. 15 Head Y displacement-time curve

图 16 和图 17 给出了 30% 重叠率工况下,碰撞车速度分别为 40 km/h, 50 km/h 时,被碰车乘员胸部和头部 Y 方向加速度。从图中可以看出,碰撞车速度为 50 km/h 的仿真中,乘员胸部 Y 方向加速度在 100 ms 时出现剧烈增大,头部 Y 方向加速度在 120 ms 时出现剧烈增大,胸部 Y 方向加速度剧烈增大时间先于头部 Y 方向加速度。这表明碰撞中乘员胸部在 Y 方向上受到巨大冲击,胸部向左移动受到抑制,导致乘员头部 Y 方向加速度急剧增大,头部损伤值随之剧增。

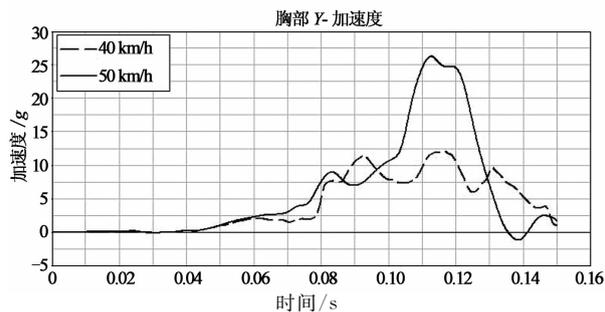


图 16 胸部Y方向加速度

Fig. 16 Chest Y-acceleration curve

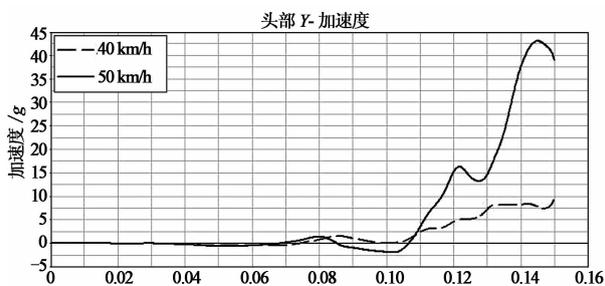


图 17 头部Y方向加速度

Fig. 17 Head Y-acceleration curve

图 18 给出了 30% 重叠率工况下,碰撞车速度为 40 km/h, 50 km/h 碰撞仿真中的被碰车假人 110

ms 运动姿态。在图 18(b) 中假人胸部与门内饰板并未直接接触,图 18(a) 中假人胸部与门内饰板发生侧向撞击,这是造成假人运动学响应异常,从而导致假人头部损伤急剧增大的主要原因。这表明在 30% 重叠率工况下,随着受撞击程度的增加,假人更容易与侧向内饰件发生二次碰撞,从而导致假人头部损伤值急剧增加。

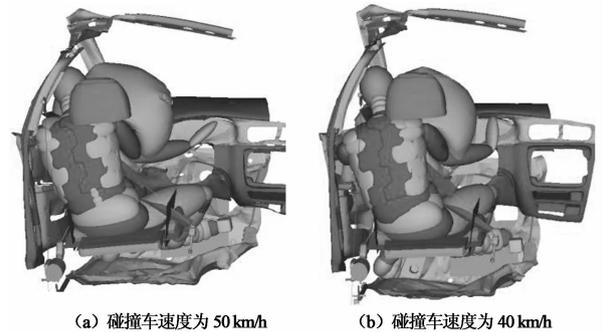


图 18 30% 重叠率下 110 ms 时刻乘员运动姿态

Fig. 18 Moving posture of passenger for 30% overlap

3 结论

本文采用某款小轿车作为研究对象,研究了在车车斜角碰撞工况下碰撞重叠率和碰撞严重程度对乘员各部位损伤的影响。

研究表明,碰撞重叠率会影响两车前部结构的相互作用情况,不同重叠率工况的车车斜角碰撞之间,乘员颈部和胸部损伤差别较小,头部和下肢损伤的差别较大。乘员左大腿损伤值随着两车碰撞重叠率的增加而减小,头部损伤变化趋势随着碰撞严重程度的变化而有所不同,在碰撞严重程度较低时,50% 重叠率下的乘员头部损伤高于其他两种重叠率,在碰撞严重程度较高时,30% 重叠率下的乘员头部损伤出现较大增长,高于其他两种重叠率。在三种碰撞重叠率工况中,70% 重叠率的乘员头部和下肢损伤均较小。

另外,车车斜角碰撞中,随着碰撞车速度的增加,被碰车受碰撞程度随之增大,乘员各部位损伤指标也呈现增大的趋势,其中头部和下肢损伤指标增长幅度较大,颈部和胸部损伤指标变化幅度较小。三种重叠率的斜角碰撞工况中,30% 重叠率工况下被碰车的前纵梁并未直接参与碰撞,该工况的乘员损伤对碰撞严重程度的影响比较敏感。

参考文献

- [1] SULLIVAN K, HENRY S, LAITURI T R. A frontal impact taxonomy for USA field data [J]. *SAE International Journal of Passenger Car Mechanical Systems*, 2009, 1 (1): 406—429.
- [2] 殷文强, 郭厚锐, 刘玉云. 汽车斜角碰撞安全气囊点火控制策略研究[J]. *汽车工程学报*, 2014, 4(1): 44—49.
YIN Wen-qiang, GUO Hou-ruì, LIU Yu-yun. Research on the control strategy for airbag deployment on the oblique impact[J]. *Chinese Journal of Automotive Engineering*, 2014, 4 (1): 44—49. (In Chinese)
- [3] 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.
HUANG Dong. A study and improvement on vehicle body structure safety in front oblique impact[D]. Changsha: College of Mechanical and Vehicle Engineering, Hunan University, 2010. (In Chinese)
- [4] 费敬, 陈可明, 乐中耀. 约束系统匹配对车-车斜角碰撞中驾驶员损伤影响[J]. *汽车工程学报*, 2014, 4(5): 335—341.
FEI Jing, CHEN Ke-ming, YUE Zhong-yao. Study on development and optimization of driver restraint system for car to car oblique collision [J]. *Chinese Journal of Automotive Engineering*, 2014, 4(5): 335—341. (In Chinese)
- [5] LEE I, AINAKA K, SAIKI J. Parameter optimization for vehicle to vehicle crash compatibility using finite element methods[C]//18th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles. Nagoya, Japan. 2001.
- [6] SCULLION P, MORGAN R M, MOHAN P, *et al.* A reexamination of the small overlap frontal crash[C]// *Annals of Advances in Automotive Medicine/Annual Scientific Conference*. 2010.
- [7] 朱西产. 汽车正面碰撞试验法规及其发展趋势的分析[J]. *汽车工程*, 2002, 24(1): 1—5.
ZHU Xi-chan. An analysis on automotive frontal crash test regulation and its tendency [J]. *Automotive Engineering*, 2002, 24(1): 1—5. (In Chinese)
- [8] SUMMERS S M, HOLLOWELL W T, PRASAD A. NHTSA's research program for vehicle compatibility[C]//18th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles. Nagoya, Japan. 2001.
- [9] NCAC. Finite element model of Ford Taurus[R]. NHTSA National Crash Analysis Center, 2008.
- [10] NCAC. Finite element model of Ford Explorer[R]. NHTSA National Crash Analysis Center, 2007.
- [11] 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, Netherlands. 2001.
- [12] THOMAS G E. Compatibility and structural interaction in passenger vehicle collisions[D]. Melbourne, Australia: Faculty of Engineering, RMIT University, 2005.
- [13] 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 Jun-yi, WANG Hong-yan, 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)
- [14] VERMA M K, LAVELLE J, TAN S, *et al.* Injury patterns and effective countermeasures for vehicle collision compatibility [C]//17th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles. Washington, USA. 2005: 6—9.