

Accident Reconstruction Research on Occupant Injury with Stiffness Based Impact Model

Yin Xingjia¹, Ye Wenlong¹, Wang Hongyan¹, Chen Junyi²

¹School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai, China, 201804

Email: xingjia.yin@outlook.com

Abstract: Accident reconstruction research on occupant injury mainly includes the vehicle movement and the human body biomechanical response during collision. In this paper, PC-Crash is used for reconstructing kinetic and kinematic process and obtaining acceleration pulse by utilizing stiffness based impact model. Coupling calculation with MADYMO is done to stimulate the occupant biomechanical response along with the interior, belt, airbag and dummy model built in MADYMO. Results shows that acceleration pulse obtained by method of stiffness based impact model is more accurate and reliable. And coupling simulation using PC-Crash and MADYMO is capable of reconstructing both in vehicle movement and occupant response. This paper can provide valuable reference for accident reconstruction and occupant injury analysis.

Keywords: accident reconstruction; acceleration pulse; occupant injury

基于刚度碰撞模型的车内乘员致伤事故再现方法研究

尹兴家¹, 叶文龙¹, 王宏雁¹, 陈君毅¹, 何宇桐²

¹同济大学汽车学院, 上海, 中国, 201804

²上海联合道路交通安全科学研究中心, 上海, 中国, 201804

Email: xingjia.yin@outlook.com

摘 要: 车内乘员致伤事故再现研究内容主要包括两方面: 一是事故车辆碰撞前后的运动状态; 二是参与人在碰撞中的生物力学响应和损伤机理。本文利用 PC-Crash 软件重现事故的整个运动状态。采用基于刚度碰撞模型的计算方法得到 PC-Crash 事故重现中车辆的加速度波形, 再结合 MADYMO 软件建立了包含车体、安全带、安全气囊、假人在内的约束系统模型, 对车内乘员的碰撞生物力学响应进行耦合计算。结果表明, 基于刚度碰撞模型的计算方法得到的事故车辆的加速度波形是准确可靠的; 采用 PC-Crash 和 MADYMO 软件进行耦合计算, 可以同时再现车辆的运动状态和车内乘员的运动响应。本文为交通事故人体伤情分析提供了重要参考。

关键词: 事故再现; 碰撞加速度波形; 人员损伤

1 引言

2015 年全年我国汽车市场销量为 2459.8 万辆, 同比增长 4.7%^[1], 连续三年的汽车销量超过 2000 万辆, 这一方面说明我国汽车工业蓬勃发展, 另一方面也在无形中给控制道路交通事故数量带来挑战。根据 2008 年至 2014 年我国道路交通事故的相关统计数据^[2], 虽然道路事故数量、致死人数和受伤人数均呈下降趋势, 但 2014 年全年仍有超过 5.8 万死于道路交通事故, 道路交通安全的发展仍然任重道远。

事故研究是进行车辆安全性研究的基础, 也是检验车辆安全性的最终手段。事故再现是事故研究的重要内容, 当前的事故再现, 其着重点主要是车辆的运动状态再现, 越来越多的研究人员通过使用计算机进行事故再现, 包括使用事故再现软件 PC-Crash, CRASH^[3]等。但对于车内乘员的碰撞运动响应研究的较少, 而人员保护是事故中最值得关注的地方, 是评价车辆安全性的直接指标, 基于人的碰撞生物力学的损伤机理研究, 对事故

中人的运动响应进行再现是事故再现的重要组成部分。

目前少数基于 PC-Crash 对车内乘员的运动再现方法主要是采用 Geigl B C 等人提出的“平均加速度法”获取碰撞加速度波形^[4],即在原始 PC-Crash 加速度曲线中插入一段时长约为 60%真实碰撞持续时间的平均加速度。但缺点是,真实的碰撞持续时间是未知的,只能通过已存的碰撞测试的高速录像来预估,而碰撞持续时间直接影响插入的平均加速度的大小,故会影响乘员在碰撞过程中的运动,存在不可控制的误差。因此,如何充分利用 PC-Crash 所能提供的参数,重现车辆的运动响应和乘员的致伤事故再现研究是十分必要的。

2 车内乘员致伤事故再现方法

对交通事故中车辆运动状态进行再现,常用的方法是使用事故仿真软件,本文使用 PC-Crash 软件对车辆的运动状态进行再现。在车内乘员致伤事故再现过程中,重点关注的是车内乘员在碰撞过程中的运动响应。乘员致伤事故再现模型中有两个重要的输入参数,一是事故过程中车辆碰撞加速度波形,二是乘员约束系统模型参数。

2.1 碰撞加速度波形的获取方法

一般来说,在用 PC-Crash 软件进行事故重建时,采用基于经典碰撞模型进行计算,利用该模型计算时,碰撞力的交换发生在无限小的时间步长内,主要的计算结果是车辆速度突变的曲线,无法直接输出有效的车辆加速度波形。

本文使用 PC-Crash 软件获取车辆加速度波形。主要有两种方法,一种是基于经典碰撞模型的平均加速度法,该方法不考虑车体的刚度,另一种是基于刚度碰撞模型的计算方法,该方法将基于车辆的平均刚度数值,用平均刚度数值代替车辆整体刚度。

2.1.1 平均加速度法

基于 Giel B C 提出的“平均加速度”理论^[4],需要对 PC-Crash 输出的车辆加速度曲线进行处理:

$$a = \frac{v_2 - v_1}{t}(1)$$

其中, v_2 、 v_1 分别为碰撞力交换前后的瞬间速度, t 为插入的碰撞持续时间。Giel B C 等人的研究表明,当插入 60%的真实碰撞持续时间时,乘员伤害满足实际伤害要求。

2.1.2 刚度碰撞模型法

对于基于刚度碰撞模型来说,车辆椭球体的尺寸由车辆外形参数决定。在 PC-Crash 的车辆设置中,使用“Impact parameters”中的“Car body”选项中的数据计算车辆的碰撞。在“Car body”选项中可以指定车身刚度、摩擦系数和恢复系数,在此指定的刚度数值则代表所有车身椭球体的刚度。通常来说,在 PC-Crash 软件中,轮胎椭球体的刚度数值是车身刚度的一半,车顶的刚度是车身刚度的四分之一^[5]。

在 PC-Crash 中使用基于刚度碰撞模型进行事故仿真时,默认车体刚度是线性刚度,即车辆刚度不随车辆碰撞部位的变化而有所不同,是真实车辆刚度的简化结果,使用该计算方法进行事故再现后,可在最终再现结果中导出车辆的速度变化量和车辆加速度等数据,用于后续的研究分析。

2.1.3 基于刚度碰撞模型的车辆加速度波形的试验验证

本文选择正面 100%重叠刚性壁障碰撞试验工况来验证 PC-Crash 导出的车辆加速度波形的有效性。在 PC-Crash 中重建碰撞试验工况如图 2,对从 PC-Crash 中导出的车辆加速度波形、平均加速度法得到的加速度波形和真实碰撞得到的波形进行对比,分别将这三种波形输入到 MADYMO 软件自带的正碰模型中,对混合 III 型假人主要部位的加速度曲线进行对比,从对比结果论证 PC-Crash 导出的车辆加速度波形更适合用于后续车内乘员运动响应再现。

PC-Crash 导出的车辆加速度曲线如图 3 所示,相较于试验得出的车辆加速度波形,PC-Crash 导出的加速度波形只有一个很明显的波峰,这和所使用的基于刚度碰撞模型计算方法有关。但是相较于平均加速度法生成的波形,PC-Crash 导出的波形和实际波形更为接近。

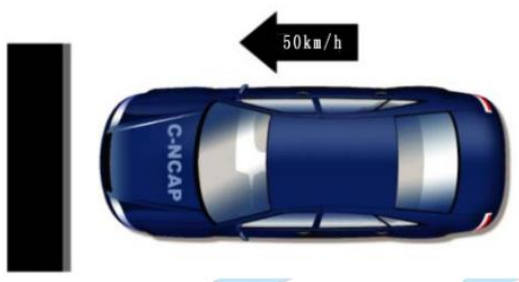


Figure 1. C-NCAP frontal 100% rigid barrier test
图 1. C-NCAP 正面 100%重叠刚性壁障碰撞试验

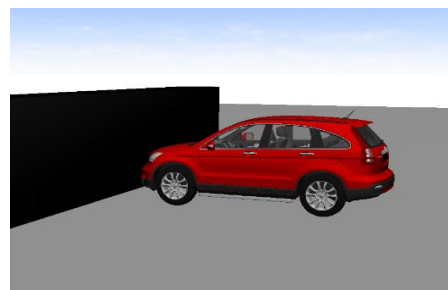


Figure 1. PC-Crash reconstruction
图 2. PC-Crash 碰撞工况重建

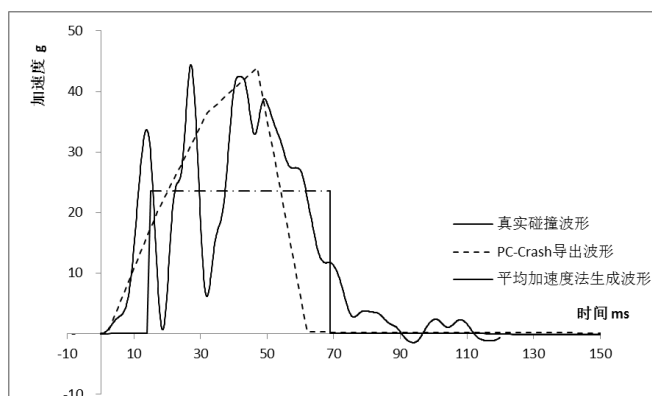


Figure 3. Vehicle acceleration waveform
图 3. 车辆加速度波形

将试验加速度波形、平均加速法生成波形和 PC-Crash 导出的加速度波形分别加载到 MADYMO 自带的正碰乘员约束模型（图 4）中，在该模型中，驾驶员佩戴安全带且气囊正常点爆。计算假人主要部位如头部（图 5）、胸部（图 6）和骨盆（图 7）的加速度曲线。

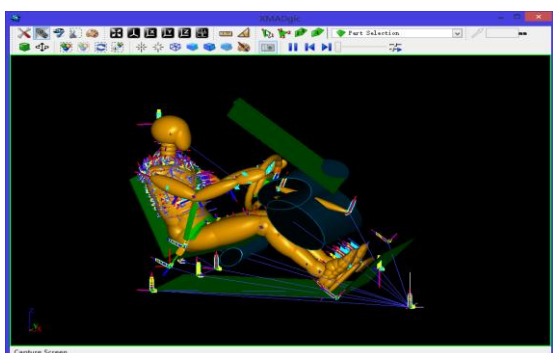


Figure 4. MADYMO touch model
图 4. MADYMO 自带正碰模型

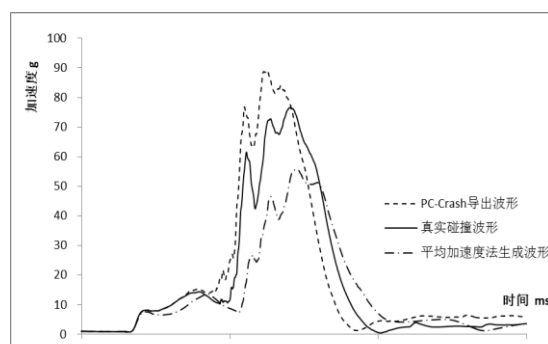


Figure 5. The dummy head acceleration curve
图 5. 假人头部加速度曲线

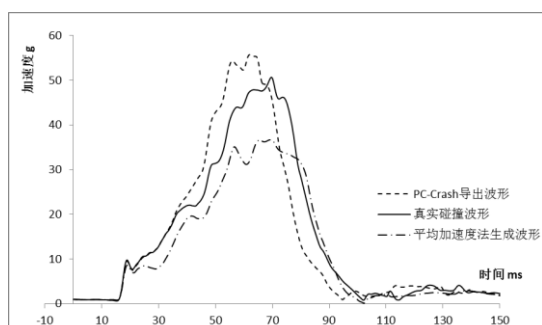


Figure 6. Dummy chest acceleration curve

图 6. 假人胸部加速度曲线

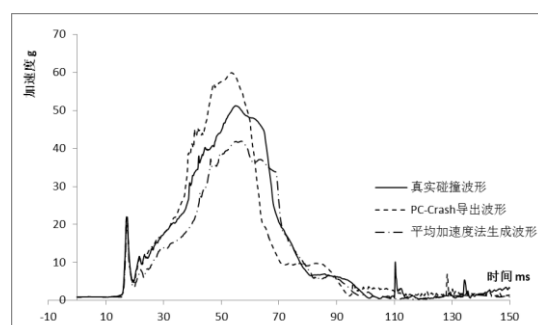


Figure 7. Dummy pelvis acceleration curve

图 7. 假人骨盆加速度曲线

这三种车辆加速度波形下的假人主要伤情指标如表 1 所示，平均加速度法生成波形和 PC-Crash 导出波形的 VC 值误差均较小，相较于平均加速度法生成波形，PC-Crash 导出波形在 HIC 和胸部 3ms 累积最大加速度这两项伤情评价指标中的误差明显更小，因此在该碰撞工况下，用基于刚度碰撞模型得到的车辆加速度波形比平均加速度法生成的波形的准确性更好。

Table 1. Main damage index

表 1. 主要伤害指标

伤情指标	真实波形	PC-Crash 导出波形	平均加速度法生成波形
HIC 36	864.7	1123.0(+29%)	372.7(-57%)
3ms max m/s^2	473.3	541.1(+14%)	357.8(-24%)
VC m/s	0.234	0.240(+4%)	0.230(-2%)

2.2 乘员约束系统模型的建立

本文利用 MADYMO 建立的乘员约束系统模型，主要包括：车体模型、约束系统模型和假人模型三个部分，在乘员约束系统建立的基础上，对假人进行定位（图 11），对模型施加加速度场，进行仿真。

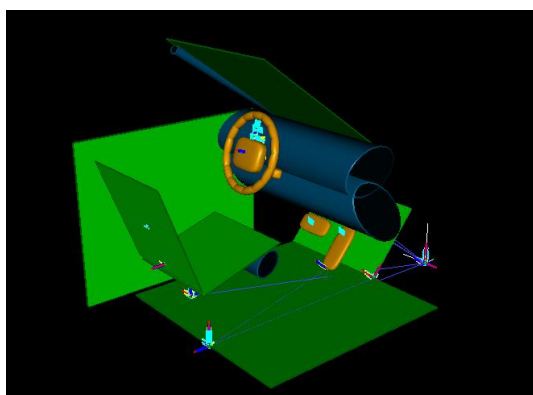


Figure 8. Vehicle model

图 8. 车体模型



Figure 9. Restraint system model

图 9. 约束系统模型

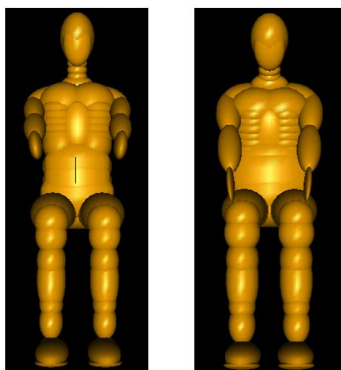


Figure 10. Dummy scaling model
图 10. 假人模型缩放

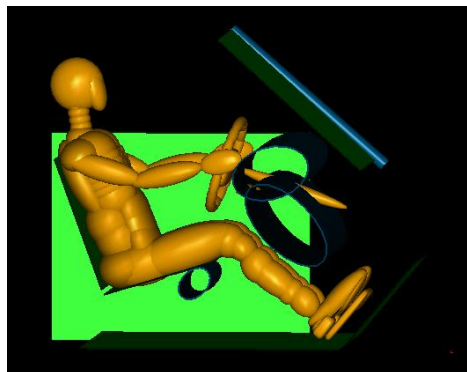


Figure 11. The dummy position
图 11. 假人定位

2.2.1 车体模型

车体模型根据车辆内部布局进行建立，主要包括：座椅、仪表板、转向系统、油门踏板、制动踏板、地板、车门和前挡风玻璃等。其中座椅、地板和车门模型用平面刚体建立，其余部件模型用椭球体建立，各部件的材料特性使用 MADYMO 软件中的正碰模型数据，各部件的相对位置按照事故车辆的真实测量数据进行确定，如图 8。

2.2.2 约束系统模型

约束系统模型包括安全带模型和安全气囊模型。安全带和假人作用的部分用两节点的桁架单元组成，材料模型为具有迟滞效应的各向同性的弹性材料，安全带织带的延伸率为 9%。安全带和车体之间连接的部分用多体安全带模型。气囊模型沿用 MADYMO 软件自带的气囊模型，如图 9。

2.2.3 假人模型

通过 MADYMO/Scaler 模块对 MADYMO 中提供的假人模型进行人体缩放，从而得到事故再现所需的符合乘员人体测量参数的假人模型，如图 10。

3 基于典型事故的致伤再现方法的验证

本文从上海联合道路交通安全科学研究中心（SHUFO）的交通事故数据库中选取一起车与车事故，对车辆的运动状态和车内乘员的动力学响应进行再现。

3.1 事故概况

波罗和凯越均在道路快车道上相向行驶，波罗驾驶员因酒后驾驶，无意识越过道路中央双黄线而占道行驶，导致波罗车头与凯越车头发生正面相撞。相撞后波罗顺时针旋转 120 度左右，凯越沿着与原行驶方向相反的方向向后行驶，最终也停在对方车道上。事故过程图如图 16 所示。

事故造成波罗和凯越车头损坏严重，凯越车上仅驾驶员一人，胸部伤情严重，波罗车上仅驾驶员一人，肇事逃逸，未受伤。凯越驾驶员无违法行为，波罗驾驶员负事故全部责任。

本起事故中，凯越驾驶员的具体伤情如表 2 所示。

Table 2. Excelle driver's injuries description and AIS score
表 2. 凯越驾驶员伤情

姓名	年龄	性别	乘车位置		
XX	54	男	凯越驾驶座		
受伤情况	脾脏切除，肋骨断了 3 根				
评伤结果	AISM	AISM 头部	AISM 面部	AISM 颈部	AISM 胸部
	3	0	0	0	3
	AISM 腹部	AISM 脊柱	AISM 上肢	AISM 下肢	AISM 体表其他
	0	0	0	0	0

3.2 运用 PC-Crash 进行车辆运动再现

根据事故车辆名称、尺寸和参数等，从车辆数据库中载入对应车辆，并对车辆参数和车辆外形进行修改，使得所用模型参数（图 12）尽可能与真实事故工况参数一致。

Vehicle Geometry		Vehicle Geometry	
Suspension Properties	1 VW-Polo 1.6 -	Type: Automobile	2 Buick-Cent
Occupants & Cargo	Driver	Weight: 1030.0 kg	Weight: 1250.0 kg
Rear Brake Force	No. of axes: 2	Distance of C.G. from front axle: 1.232 m	Distance of C.G. from front axle: 1.385 m
Trailer	Length: 3.915 m	C.G. height: 0.500 m	C.G. height: 0.500 m
Vehicle Shape	Width: 1.650 m	Moments of Inertia:	Moments of Inertia:
Impact parameters	Height: 1.465 m	Yaw: 1261.4 kgm ²	Yaw: 1864.2 kgm ²
Stability control	Front overhang: 0.783 m	Roll: 378.4 kgm ²	Roll: 559.2 kgm ²
	Steeringratio: 20	Pitch: 1261.4 kgm ²	Pitch: 1864.2 kgm ²
	Track - Axle 1: 1.430 m	Wheelbase 1-2: 2.465 m	Wheelbase 1-2: 2.600 m
	Track - Axle 2: 1.430 m		

Figure 12. Parameter setting of vehicle model in PC-Crash
图 12. PC-Crash 中车辆模型参数设置

利用“Crash3 EBS Calculation”模块，计算波罗和凯越的 EBS 分别是 40km/h、35km/h，计算结果与车辆实际车损情况（如图 13 所示）吻合。

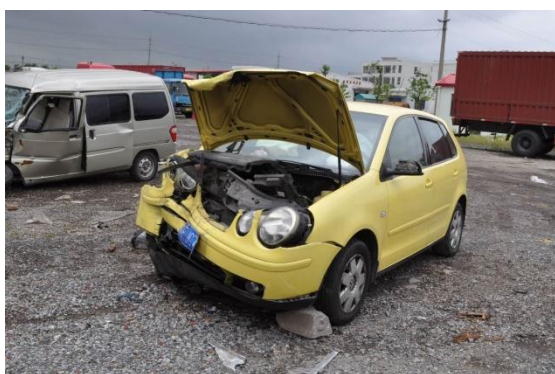


Figure 13. Actual vehicle damage
图 13. 车辆实际损坏

通过调整车辆碰撞位置、角度、事故车辆碰撞车速、碰撞序列等一系列参数，最终使车辆达到事故现场所述的最终位置，见下。完整的 PC-Crash 仿真过程图如图 16 所示。

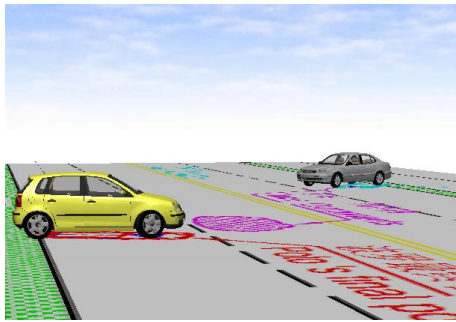


Figure 14. PC-Crash reproduction results

图 14. PC-Crash 再现结果



Figure 15. Site final location

图 15. 现场最终位置

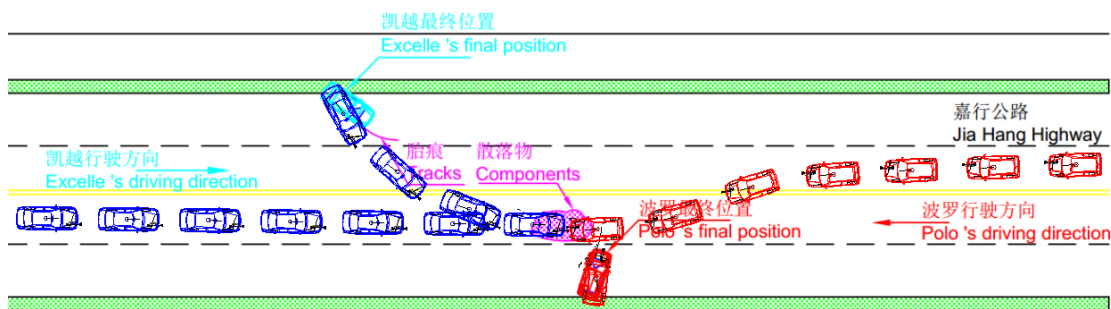


Figure 16. PC-Crash accident simulation process diagram

图 16. PC-Crash 事故仿真过程图

从最终的计算结果可以得出，波罗和凯越的碰撞车速分别为 66km/h 和 40km/h，EES 分别为 36km/h 和 33km/h，这与两车的 EBS 40km/h、35km/h 总体上是一致的，误差在可接受范围内，证明 PC-Crash 的计算结果是有效的。获得的凯越驾驶座位置处 X 方向的加速度-时间曲线如图 18 所示。

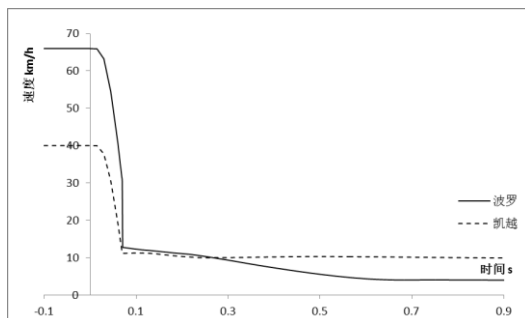


Figure 17. Vehicle speed time curve

图 17. 车辆速度-时间曲线

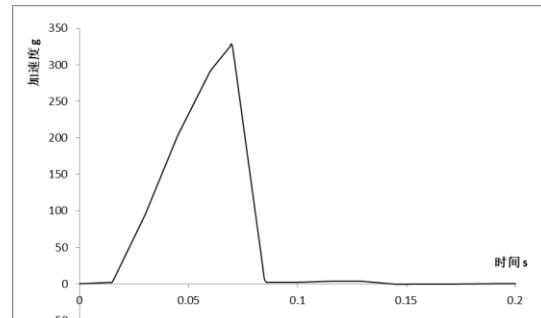


Figure 18. Driving seat at X direction Excele acceleration time curve

图 18. 凯越驾驶座处 X 方向加速度-时间曲线

3.3 运用 MADYMO 进行车内乘员运动再现

本起事故中，凯越正面安全气囊正常点爆，凯越驾驶员未佩戴安全带，不建立安全带模型，凯越驾驶员为中等身材男性，选取第 50 百分位混合 III 型假人，调整假人坐姿，并对假人进行定位。将凯越的车辆加速度时间-曲线作为初始边界条件输入到 MADYMO 模型中，加载重力场，进行车内乘员的运动再现。

如图 19 所示，碰撞发生后，凯越驾驶员在惯性力的作用下向前运动，碰撞后约 30ms 时刻，凯越正面安全

气囊点爆；40ms 时，凯越驾驶员胸部与正在充气的气囊发生接触；40ms-70ms，气囊在充气的同时，驾驶员依旧向前运动，在此过程中，驾驶员胸部和弹出的气囊发生碰撞；85ms 时，驾驶员胸部和方向盘发生碰撞，此后驾驶员胸部和方向盘发生剧烈碰撞；130ms 时，驾驶员回弹，在此后的一段时间内，凯越驾驶员继续向后运动，碰撞结束。

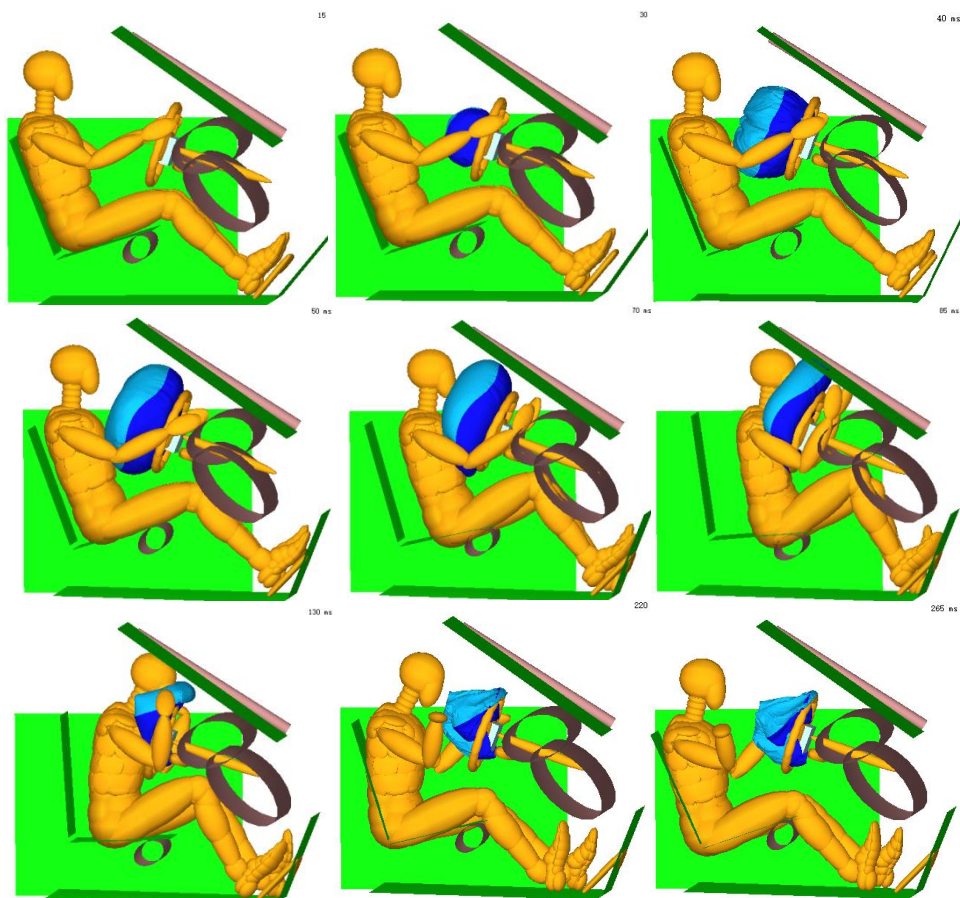


Figure 19. The driver collision dynamic response process

图 19. 凯越驾驶员碰撞动态响应过程

3.4 伤情分析

凯越驾驶员头部合成加速度-时间曲线如图 20 所示，头部加速度波形峰值出现在碰撞后约 110s 时刻，驾驶员头部在向前运动的过程中和气囊以及方向盘发生碰撞。驾驶员头部伤害指标 $HIC_{36}=308$ ，小于人体头部耐受值 1000，驾驶员头部 $AIS \geq 3$ 的概率很小。根据文献[6]中 AIS 和 HIC 值的关系曲线（如图 21）， $HIC_{36}=308$ 对应的头部 $AIS \leq 1$ ，这与驾驶员头部实际伤情（AIS0）吻合。

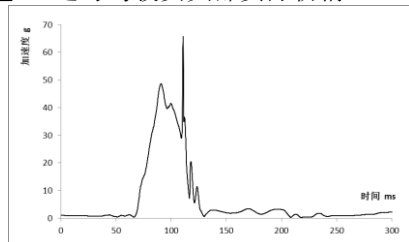


Figure 20. Driver head acceleration time curve

图 20. 凯越驾驶员头部合成加速度-时间曲线

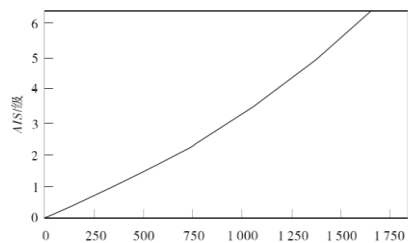


Figure 21. Relationship curve between AIS and HIC

图 21. AIS 和 HIC 值的关系曲线

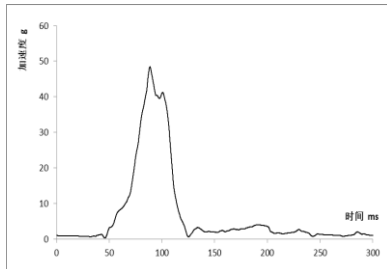


Figure22. Chest acceleration
图 22. 胸部合成加速度-时间曲线

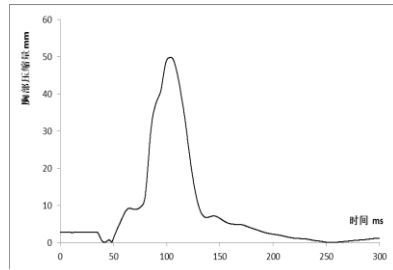


Figure 23. Chest compression
图 23. 胸部压缩量-时间曲线

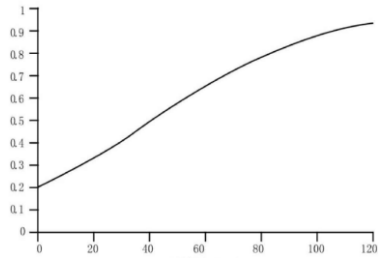


Figure 24. Chest compression vs AIS3+ injury
图 24. 胸部压缩量 vs AIS3+损伤率

凯越驾驶员胸部合成加速度-时间曲线如图 22 所示, 计算得出 3ms 累积最大加速度值为 46.5g, 小于人体耐受极限 60g。胸部压缩量-时间曲线如图 23 所示, 胸部最大压缩量为 50mm, 大于 48mm, 根据 Patrick[7]和 Kroell[8]等进行了大量尸体胸部正碰试验, 得出胸部压缩量和 AIS3+损伤概率的关系 (图 24), 得出本起事故中驾驶员胸部受到 AIS3+伤害的概率超过 50%, 胸部压缩严重可能会导致肋骨骨折, 这与本起事故中驾驶员胸部伤情吻合。

驾驶员下肢伤害中, 大腿压缩力为 6kN, 小于 C-NCAP 低性能限值 9kN; 胫骨指数 TI 为 0.7, 小于 C-NCAP 低性能限值 1.3; 小腿压缩力为 4kN, 小于 C-NCAP 低性能限值 8kN。根据 Morgan 等人[9]的研究结果, 驾驶员大腿 AIS2+伤害的概率为 6%, 这与驾驶员下肢未受伤的实际伤情 (AIS0) 比较吻合这与驾驶员下肢未受伤的实际伤情 (AIS0) 比较吻合。主要伤情指标对比如表 3 所示, MADYMO 中再现的伤情信息与驾驶员实际伤情是比较一致。

表 1 驾驶员主要部位伤害指标和实际伤情 AIS 对比

身体部位	伤害指标	仿真结果	耐受极限/C-NCAP 低性能限值	再现对应 AIS 评分	实际 AIS 评分
头部	HIC36	308	1000	≤1	0
	3ms 累积加速度值 (单位: g)	46.5	60		
	胸部最大压缩量 (单位: mm)	50	48	≥3	3
胸部	VC (单位: m/s)	0.5	1		
	大腿压缩力 (单位: kN)	6	9		
	小腿压缩力 (单位: kN)	4	8	<2	0
下肢	TI	0.7	1.3		

4 结论

本论文的主要研究结论如下:

基于刚度碰撞模型的计算方法, PC-Crash 能够导出车辆在碰撞过程中的加速度波形, 经过验证, 该方法计算出来的车辆加速度波形是有效的, 能够作为后续研究的输入数据。

用 PC-Crash 和 MADYMO 的联合仿真进行车与车事故再现是有效的, 用 PC-Crash 能够准确再现车辆的运动状态, MADYMO 软件能够完成车内乘员的运动和损伤再现, 二者一起能够完整进行事故再现。

致 谢 (Acknowledgement)

特此感谢上海联合道路交通安全科学研究中心(SHUFO)为本文提供事故数据信息。

参考文献 (References)

- [1] 中汽协会行业信息部. 2015 年汽车工业经济运行情况[DB/OL].<http://www.caam.org.cn/xiehuidongtai/20160112/1705183569.html>, 2016-01-12.
- [2] 刘恩猛. 道路交通事故经济损失计算方法研究[D]. 吉林大学, 2014.
- [3] McHenry B G, McHenry R R. SMAC-97: Refinement of the collision algorithm[J]. SAE transactions, 1997, 106: 1523-1536.
- [4] Geigl B C, Hoschopf H, Steffan H, et al. Reconstruction of occupant kinematics and kinetics for real world accidents[J]. International journal of crashworthiness, 2003, 8(1): 17-27.
- [5] Steffan D. PC-Crash Operating Manual[J]. Macinnis Engineering Associates, 2005.
- [6] Association for the Advancement of Automotive Medicine. Abbreviated injury scale; 1990 revision: update 98[M]. AAAM, 1998.
- [7] Patrick L M, Mertz H J, Kroell C K. Cadaver knee, chest and head impact loads[R]. SAE Technical Paper, 1967.
- [8] Lobdell T E, Kroell C K, Schneider D C, et al. Impact response of the human thorax[M]//Human Impact Response. Springer US, 1973: 201-245.
- [9] Morgan R M, Eppinger R, Marcus J, et al. Human cadaver and Hybrid III responses to axial impacts of the femur[C]//Proceedings of the 1990 International IRCOBI Conference on The biomechanics of impacts, Lyon, France. 1990: 12-14.