

汽车—自行车碰撞事故重建及参数研究

李松庆¹, 杨济匡^{1,2}

¹ 湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室

² 瑞典查尔摩斯大学

摘要: 本文采用 MADYMO 仿真分析软件针对长沙地区一起汽车—自行车碰撞事故进行事故重建,仿真结果与实际事故情况比较,验证了仿真方法和模型的可行性和准确性。通过改变自行车车速、碰撞位置、汽车车速及汽车前部结构设计参数,研究其对骑车人颅脑损伤的影响。仿真结果可作为车辆安全设计的依据。

关键词: 骑车人 颅脑损伤 事故重建 参数研究

A vehicle—bicyclist accidents reconstruction and parameter study

LI Songqing¹, YANG Jikuang^{1,2}

¹ State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body, Hunan University, Changsha, China

² Chalmers University, Gothenburg, Sweden

Abstract: A real word of vehicle-bicycle accident was reconstruction using MADYMO program. The simulation result compare with real accident, validate the feasibility of simulation methodology and accuracy of muti-body model. Research the effect on biomechanical parameters related to head-brain injuries of bicyclist with the change of bicycle velocity, impact position, vehicle impact velocity and front—end structure. Result of the simulation can be adopted as a basis of the vehicle safety design.

keywords: Bicyclist; Head-brain injury; Accident reconstruction; Parameter study

1 引言

目前我国已拥有大约 5 亿多辆自行车,是世界上自行车最多的国家。汽车保有量的迅速增长和混合式交通的运行方式使得我国自行车与车辆碰撞导致交通事故数量和伤亡人数居世界之首^[1]。2005 年,全国因交通事故死亡 98,738 人,受伤 469,911 人,其中骑自行车者死亡 11,407 人,受伤 51,302 人,分别占道路交通事故死亡和受伤总人数的 11.55% 和 10.92%^[2]。

占道路弱势群体死亡总数很大部分的骑车者的碰撞伤害及保护研究,相对行人来讲,国内外研究都较少。目前人口密集的日本,一些汽车研究所和交通部门对自行车与汽车碰撞事故进行了一些分析和碰撞机理、伤害机理及保护措施的研究;Tetsuo Maki 等人对行人和自行车分别与汽车碰撞进行了对比分析,提出行人法规中的部件实验要针对骑自行车者的保护进行一些更改;美国的 Stutts and Hunter 等人提出和其他道路使用者一样,头部严重损伤是造成骑自行车者死亡的主要原因。国内只有少数科研机构和高校对自行车事故形态及伤害保护方面进行了初步的分析和讨论;吉林大学曾对汽车与自行车碰撞时碰撞速度的确定进行过分析和讨论。

本文采用计算机仿真模型对一起典型汽车—自行车交通事故进行事故重建,用因子试验法对较不同车速及汽车前部结构参数条件下人体的头部动力学响应及生物力学响应,并结合行人颅脑损伤防护措施对汽车安全性设计进行了综合分析研究和讨论。

2 材料与方法

2.1 多刚体系统动力学理论

本文模型建立的理论基础为多刚体系统动力学理论。根据动量守恒规律,多刚体系统中的

每个刚体在进行直线与旋转运动时的运动控制方程可以由牛顿—欧拉方法得到。刚体关于它自身惯性中心的运动方程为：

$$m_i \ddot{r}_i = F_i \quad (1)$$

$$J_i \cdot \dot{\omega}_i + \omega_i \times J_i \cdot \omega_i = T_i \quad (2)$$

式中： m_i —质量； J_i —关于惯性中心的惯性矩； ω_i —角速度向量； F_i —力向量； r_i —位移向量； T_i —力矩(相对于惯性中心)向量。

对于刚体系统中的某一个刚体来说， F_i 和 T_i 还包括铰节点的力，与整个系统的加速度场相关。在1式中对位移向量 δr_i 取变分，2式中对方位 $\delta \omega_i$ 取变分，然后两式相加，则取变分后的*i*个刚体有

$$\sum \delta r_i \cdot (m_i \ddot{r}_i - F_i) + \delta \omega_i \cdot (J_i \cdot \dot{\omega}_i + \omega_i \times J_i \cdot \omega_i - T_i) = 0$$

应用变分原理、矩阵运算和数值积分可计算出各刚体的速度和角速度。Madymo 软件中的数值积分方法主要有欧拉方法，固定时间步长的四阶龙格—库塔 (Runge-Kutta) 法或可变时间步长的五阶龙格—库塔法等。

2.2 建立汽车-自行车碰撞模型

模型的建立主要包括骑车人的人体多刚体模型、汽车多刚体模型及自行车多刚体模型 (图1)，以及三者碰撞的接触定义。

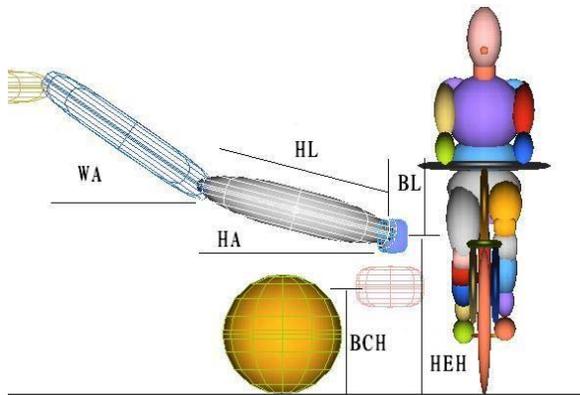


图1 汽车—自行车—骑车人仿真模型

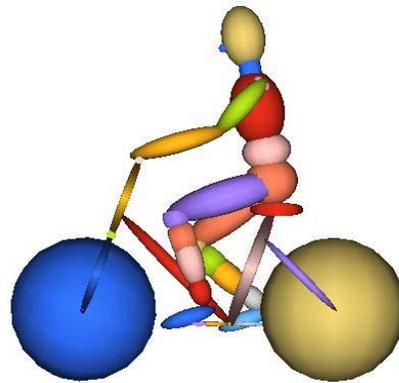


图2 自行车—骑车人仿真模型

2.2.1 自行车—骑车人模型

本文骑车人模型采用瑞典查尔摩斯大学的 CPMi (Chalmers Pedestrian Model 1) 多刚体行人模型^[3]。该人体模型为 50 百分位成人男子模型 (身高 175cm, 体重 78kg), 模型由 24 个椭球体组成, 分别表示行人的头、颈、胸、腹、骨盆、上肢、大腿、小腿、足, 身体各部位通过十四个关节连接, 并增加了可旋转的膝盖以及可模拟骨折的腿骨部分。该人体模型通过尸体实验验证, 是目前行人多刚体模型中生物逼真度较高的模型之一。该模型建立基于欧洲人平均身材, 代表了我国中等身材偏高的行人, 可以用来分析汽车—自行车—骑车人碰撞的动力学过程。

自行车选取我国较为普遍的 26 式自行车建立自行车模型。自行车由一个平面铰, 一个万向铰和一个平移铰与全局坐标连接。采用四个转动铰链来描述部件之间相对转动, 包括前后轮、踏板轴、龙头处转动铰链。自行车重量为 15kg, 车轮半径为 33cm, 轮距为 113cm, 坐高为 85cm。自行车—骑车人仿真模型见图 2。

2.2.2 汽车模型

汽车前部结构根据 IHRA (国际协调研究机构) 研究结果和日本法规草案, 可以将车型分为三种较为常见车型, 分别为 Sedan (轿车)、SUV、1-Box (一厢车, 即国内面包车)。



图3 车型分类

本文根据这三种常见车型建立汽车模型，各车型的尺寸参考欧美及日本等国主流车型的统计数据。汽车的保险杠、引擎盖边缘、引擎盖顶、挡风玻璃、车顶、车轮等部件用椭球表示，底盘用平面表示。汽车前部保险杠、发动机盖板前缘、发动机盖板、发动机盖板后缘等各部分的机械特性数据从 EuroNCAP 碰撞试验获得。

2.2.3 汽车—自行车—骑车人碰撞模型

定义骑车人身体各部位与自行车及汽车前部碰撞时的接触摩擦系数定义为 0.5；定义自行车与汽车前部碰撞时接触摩擦系数定义为 0.3，碰撞过程中的汽车制动（70%的事故采取了紧急制动）减速度为：0 至 50 毫秒线性变化，对应加速度从 0 至 -5m/s^2 ；50 毫秒至 1 秒加速度为 -5m/s^2 。汽车—自行车碰撞事故形态一般分为：汽车与自行车侧面碰撞、汽车与自行车正面碰撞、汽车与自行车追尾碰撞。由于汽车与自行车侧面碰撞事故比较常见。故本文仿真研究只考虑汽车与自行车侧面碰撞。

2.3 事故重建

本文利用MADYMO碰撞仿真软件,重现了长沙地区的一起汽车—自行车碰撞事故，仿真结果与现实事故进行比较分析，来初步验证仿真方法和模型的可行性和准确性。

2.4 仿真参数设计

针对骑车人颅脑损伤的防护，本文的参数研究主要考虑四个方面：自行车车速、自行车碰撞位置、汽车车速、前部结构几何参数。参数分析方法采用因子试验方法，通过改变单一输入变量或多个输入变量研究对目标值的影响。

自行车的速度一般在 5km/h — 20km/h ,本次参数研究取两组自行车车速 10km/h 、 20km/h 。自行车碰撞位置分以下几种（如图 4）：Type 1 中骑车者头部离汽车中心线 1.2m ，Type 2 中骑车者头部与汽车中心线重合。Type 3 中骑车者头部与汽车边线重合。

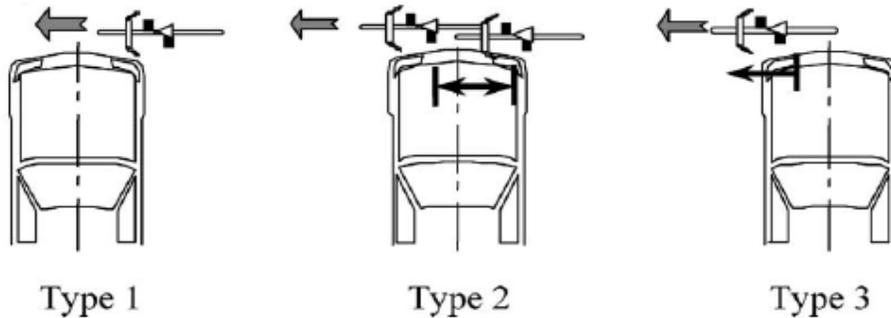


图4 自行车碰撞位置的分类

汽车-自行车碰撞发生时，汽车的行驶速度与骑车人的损伤程度有着直接的联系。汽车与自行车发生碰撞瞬间，汽车车速范围一般在 20km/h — 40km/h 之间。因此，在参数研究中取四组车速： 20km/h 、 30km/h 、 40km/h 和 50km/h 。

汽车前部结构几何参数尺寸参考欧美及日本等国主流车型的统计数据根据车型各参数真值

设定^[4]，如表 1，长度单位为：mm。其中 HL 为引擎盖长度，WA 为挡风玻璃家度，HA 为引擎盖角度，BCH 为保险杠中心高度，HEH 为引擎盖边缘高度，BL 为保险杠伸出量（如图 1）。

表 1 三种车型参数设计真值表

参数分析变量	Sedan			SUV			1-BOX		
	最小值(-1)	中间值(0)	最大值(1)	最小值(-1)	中间值(0)	最大值(1)	最小值(-1)	中间值(0)	最大值(1)
HL	635	918	1200	844	1000	1168	157	259	361
WA	29°	35°	40°	36°	40°	43°	30°	38°	46°
HA	11°	15°	18°	9°	10°	11°	40°	40°	40°
BCH	435	476	516	544	640	736	448	576	704
HEH	565	702	839	832	1000	1168	864	1004	1144
BL	127	127	127	195	195	195	188	188	188

分析自行车车速和碰撞位置影响，汽车车型与尺寸选择 Sedan 车型和中间值尺寸。分析某项或多项前部结构参数的影响时，其余参数均取中间值，自行车车速取 10km/h，车速取 40km/h。

2.5 主要输出参数及评价指标

本文主要讨论骑车人颅脑损伤的防护，故只对头部相关输出参数加以讨论。由 MADYMO 软件仿真输出的主要参数有：HIC 值、头部线性速度、角速度、角加速度，碰撞力等，与之相对应的颅脑损伤机理如表 2。头部损伤标准 HIC（Head Injury Criterion）是目前最为常用头部伤害评价指标，其定义为：

$$HIC = MAX\left[\left(\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a_{Head} dt\right)^{2.5} (t_2 - t_1)\right]$$

式中： $a(t)$ ——碰撞过程中头部质心合成加速度

$t_2 - t_1$ ——HIC 达到最大值时的时间间隔

HIC 值 1000 代表 20% AIS 3^[5]（简明损伤定级法表示的较重伤）以上的头部损伤风险。脑损伤评价除 HIC 值之外，还有其它的评价方法，如 Lowenhielm 等人提出了一个脑损伤的阈值^[6]，根据角加速度峰值和角加速度的变化值，用脑组织临界曲线来表示（图 5）。它指出当头部角加速度达到 4500rad/s² 并且角速度变化量超过 50 rad/s 时，将长生 5%的应变，桥静脉将会发生断裂。

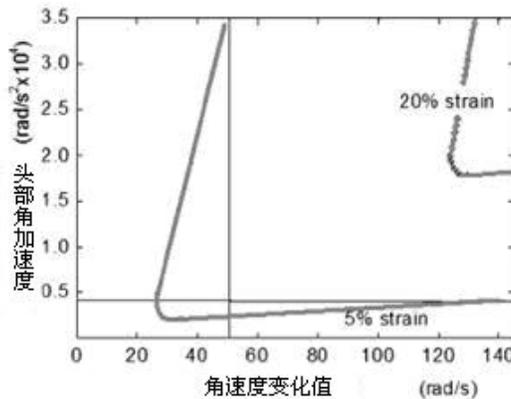


图 5 临界应变曲线

表2 颅脑伤损伤机理简表[6]

颅脑损伤类型	损伤机理
¹ 颅骨骨折	头部与车体的碰撞力
² 冲击伤	碰撞力的作用造成碰撞点一侧的损伤
² 对侧冲击伤	碰撞力的作用造成碰撞点对侧的损伤
² 脑膜外血肿	碰撞力的作用造成碰撞区域的损伤
² 脑硬膜下血肿	碰撞力、头部线性及角加速度
³ 脑震荡	角速度及角加速度，颅骨大脑相对运动
³ 神经轴突损伤	角速度及角加速度

1-碰撞力造成的颅骨损伤

2-动脉或桥静脉断裂造成的颅内血管损伤

3-脑组织内的神经轴突受到剪切应力造成的脑神经损伤

3 事故重建

3.1 事故来源

美国通用公司资助的中国城市道路交通中弱势群体与汽车碰撞事故的深入调查研究课题于2006年10月份在湖南大学启动，以行人和自行车事故为主要调查对象。事故数据分为两部分来源，一部分是直接长沙各区大队调出可事故重建详细案卷，对事故重建所缺数据通过回访和回勘的方式尽量取回。另一部分由湖南大学建立的交通事故现场调查小组与交警大队122处警中心合作，派出专业人员，与交警同时到达事故现场，采集得来相关的事故数据。每一起事故采集的信息主要包括伤者信息，事故车辆信息，现场信息及当事人和目击证人的陈述等。本事故来自于第一部分数据。

3.2 事故信息

本事故于2006年10月23日7时20分发生在长沙市芙蓉区荷花路万家丽路口。汽车由西往东行驶，自行车从人行道边由南往北行驶。汽车右前部与自行车前轮左侧接触碰撞。地面留下6.8m刹车印，地面潮湿。事故现场草图与现场全局照片如图6-7，车辆碰撞信息描述及挡风玻璃受损位置照片如图7-8，伤者损伤信息为：左锁骨远端骨折，左侧5-8根肋骨多发性骨折，全身多处软组织擦伤。

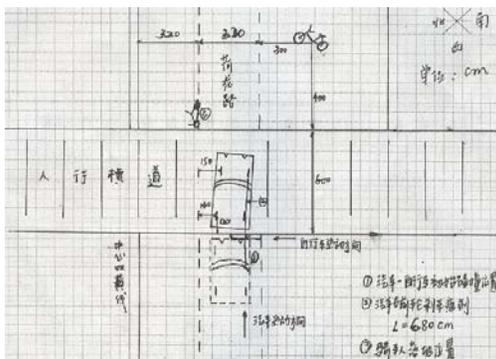


图6 现场草图



图7 现场全局照片

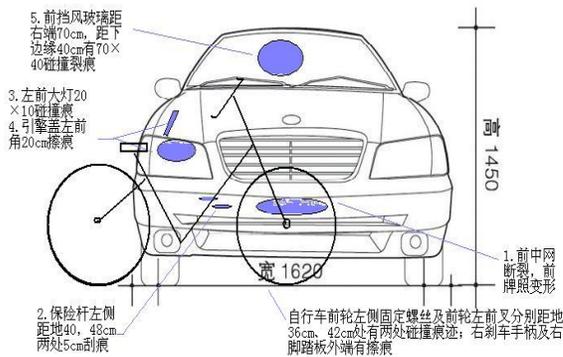


图8 车损信息示意图



图9 挡风玻璃受损位置照片

3.3 模型建立

3.3.1 汽车模型

根据交警记录肇事者行驶证信息显示，肇事车辆为吉利美日 MR7310。汽车多的刚体模型基于事故车同年份车型的几何模型建立。事故车前部结构根据 EuroNCAP 行人碰撞法规分区建立椭圆模拟，各区刚度参照相似车型 EuroNCAP 试验得到各区刚度特性曲线^[7]。

3.3.2 骑车人模型

由于针对特定事故案例，涉及的受害者性别、年龄、身高、体重等条件对于人体关节的机械特性和运动响应都有一定的影响。因此需要在参考 50 百分位行人模型的基础上进行比例缩放，以确保仿真的准确性。通过 Madymo 的命令行操作，调用 GEBOD 模块，定义人体模型的身高、体重等基本信息，可以得到案例事故中人体模型。

由于交警不会记录伤者身高、体重信息。通过回访我们得到骑车人身高为 168cm，体重为 67 公斤，再通过调用 GEBOD，得到仿真所需骑车人模型。

3.3.3 仿真参数设定

定义人体各部位与汽车前部碰撞时的接触摩擦系数为 0.5，人与自行车的摩擦系数为 0.5，自行车与汽车前部碰撞时的接触摩擦系数为 0.3，由于地面潮湿，汽车车轮与地面摩擦系数取 0.55，地面与人体摩擦系数取 0.5，自行车与地面取 0.3。

根据现场情况，设定汽车—自行车相对位置，汽车碰撞时刻速度，自行车速度，骑车者姿态为分析的自变量，在设定的范围内调整，以获得与事故情况相符的仿真动态响应过程。最后得到一组仿真结果的骑车人头部碰撞挡风玻璃位置，骑车人最终落地位置，自行车最终位置与实际结果吻合最好。该组输入参数为：汽车与自行车夹角为 4°，骑车人距离汽车中心线 1.05m，设定汽车初始速度为汽车碰撞时刻速度，值为 7.8m/s，自行车速度为 4.4m/s，骑车者两脚掌在同一水平位置。

3.3.4 结果分析讨论

事故重建的准确性可以通过事故重建动态响应过程和损伤情况分析。

事故重建动态响应过程可以通过车辆受损信息，车上碰撞点位置，自行车落地位置和骑车者落地的位置来评估^[7]。整个仿真过程计算时间为 2500ms，图 10 可以看出汽车前保险杠右中部与自行车前轮左侧接触，这与图 8 显示汽车与自行车的受损情况非常符合。图 11 为 190ms 骑车者头部接触挡风玻璃位置，与图 8 显示挡风玻璃受损位置基本符合。图 12 与图 13 为现场最终位置与仿真最终位置，比较得知汽车最终停止位置，自行车落地位置基本符合。

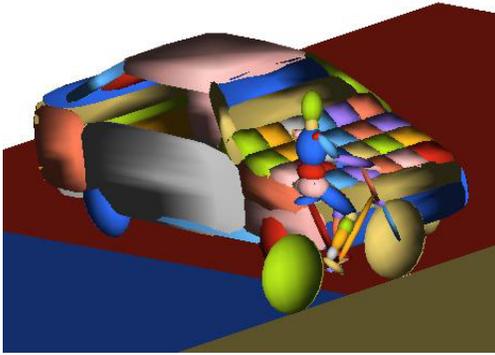


图 10 0ms 仿真图

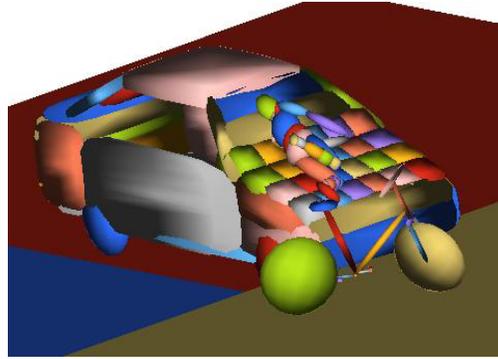


图 11 190ms 仿真图



图 12 现场最终位置照片



图 13 仿真最终位置

表 4 相关损伤参数输出

损伤参数	单位	结果
HIC	—	386
角速度变化值 (Δ HAV)	rad/s	27
角加速度峰值(HAA)	rad/s ²	1.9E+04
胸部合成加速度峰值 (Res.chest acc)	g	74g

损伤相关参数如表 4 所示。研究表明，HIC 极限值为 900-1000，仿真得到的 HIC15 值为 386 (T1=190ms, T2=196ms)，头部角速度峰值和角加速度峰值放入图 5 中的临界曲线中可发现位于 5%的组织应变曲线之外，由此推断骑车人颅脑损伤的几率很小，实际损伤情况中骑车人头部没有损伤。仿真中骑车人胸部与挡风玻璃和引擎盖上沿交接处接触，这一位置刚度较大，胸部合成加速度峰值达到 74g，这超过了耐受极限 60g[8]，表明胸部有发生肋骨骨折的可能，实际损伤情况中骑车人左侧胸部 5—8 根肋骨发生了多发性骨折。

经过事故的动态响应过程和损伤情况的分析对比，仿真和实际情况基本吻合。初步验证了仿真方法的可行性和事故车辆与自行车及人碰撞的仿真模型的准确性。

实际损伤中骑车人左侧锁骨还发生了骨折，由于仿真人体模型无法模拟锁骨骨折故没有输出值进行比较。

事故重建得到的头部损伤参数为理解头部损伤机理提供了可行的途径，同时也可以对现行的损伤标准和临界值进行评估。仿真得到的损伤参数对骑车损伤机理的研究有很大的意义。

4 仿真结果与讨论

4.1 自行车速度和碰撞位置的影响

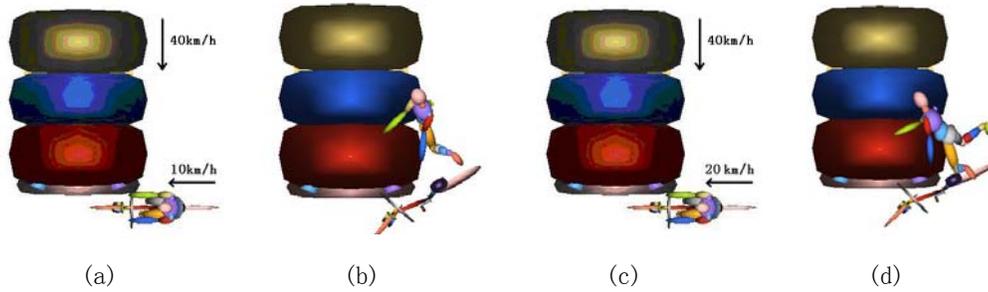


图 14 自行车碰撞位置和速度影响（俯视图）

(a)、(b)为自行车速度为 10km/h, 汽车与自行车前轮相撞
(c)、(d)为自行车速度为 20km/h, 汽车与自行车前轮相撞

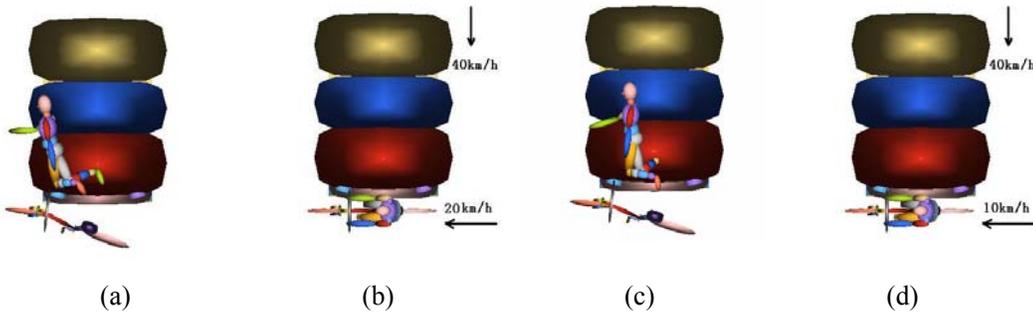


图 15 自行车碰撞位置和速度影响（俯视图）

(a)、(b)为自行车速度为 10km/h, 汽车与自行车中间相撞
(c)、(d)为自行车速度为 20km/h, 汽车与自行车中间相撞

当 Sedan 车型与自行车发生碰撞时, 由于骑车者有一向前速度, 骑车者是与汽车成一定夹角撞向汽车引擎盖, 当汽车速度一定时, 这一夹角大小取决于自行车的速度。当 Sedan 车与自行车前轮相撞时, 骑车者头部很有可能不与汽车挡风玻璃相撞, 自行车速度越大, 骑车者头部撞向汽车挡风玻璃的几率也越大。图 14 为汽车与自行车前轮相撞, (a) (b)中骑车者头部与汽车右侧 A 柱（视图方向）相撞, (c) (d)中, 由于自行车速度增大, 骑车者头部撞向右侧挡风玻璃边缘。图 15 为汽车与自行车中部相撞, (a) (b)中骑车者头部撞向挡风玻璃偏左侧, 随着自行车车速增大, 骑车者头部有可能越过挡风玻璃而不与车体接触。在图 15(c) (d)中, 骑车者头部撞向了左侧挡风玻璃边框。当汽车与自行车后轮碰撞时, 由于此时骑车人头部已经几乎越过汽车的边线, 骑车者头部与车体接触的几率很小。

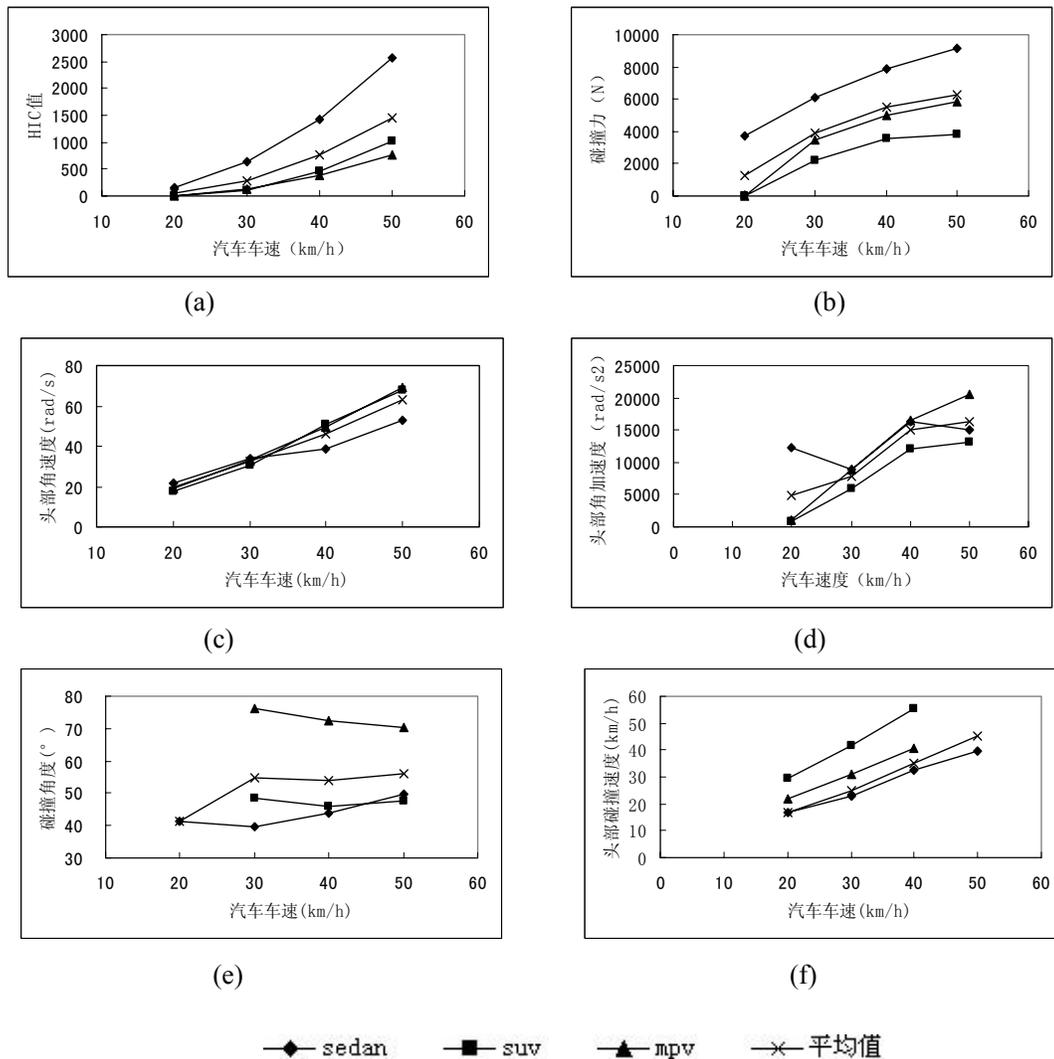
综上所述, 自行车的速度和碰撞位置对骑车者头部的接触位置有很大的影响。当汽车与自行车前部、中部相撞时, 骑车者头部撞向车体的几率要比汽车与自行车后部相撞大得多。

4.2 汽车碰撞速度的影响

仿真结果图 16(a)显示, 三种车型在汽车车速增加的情况下, 输出的 HIC 值也越高, 且相同车速下, Sedan 的 HIC 值要大于 SUV 和 1-Box。可见汽车车速越高, 发生碰撞时, 骑车人的头部损伤也将越严重。可以看出当车速高于 30km/h 时, HIC 值上升趋势增大, 当车速超过 50km/h 时, HIC 平均值已经达到 1500, Sedan 车型更是高达 2500 以上。与行人相比, 20-50km/h 同等车速时, 骑车人的 HIC 值要低于行人[9], 骑车人头部损伤风险要比行人小, 这与日本的交通事故综合分析中心 (ITARDA) 数据分析结果保持一致[10]。

从碰撞力分析, 从图 16(b)可看出, 三种车型随着汽车车速增加, 碰撞力都在增加, 且相同车速下 Sedan 的碰撞力要大于 SUV 和 1-Box。导致颅骨骨折的相关参数主要为碰撞力, 颅骨各

部分的耐受限度有所不同,如前额的耐受限度为 3.6-9.0KN,颧骨为 0.5-2.9KN,颞骨为 5.0-12.5 KN,枕骨为 6.4 KN,上颌骨为 2.0-4.2 KN,下颌骨为 0.8-3.4 KN[6]。当车速大于 50km/h 时,碰撞力平均值超过 5kN,颅骨骨折的发生率也会相对较高。



◆ sedan ■ SUV ▲ MPV × 平均值

图 16 汽车车速对骑车人头部损伤参数的影响

(a)HIC 值 (b)碰撞力峰值 (c)角速度变化值 (d)角加速度峰值 (e)头部碰撞角度 (f)头部碰撞速度

从能量角度解释,车速越高,碰撞的能量也就越大。头部碰撞吸收的能量也就越高,其损伤程度就增大。由于在仿真中,定义三种车型是根据前部几何参数划分,没有考虑车型整备质量的差别,而实际中,SUV 和 1-Box 车型的整备质量要大于 Sedan 车型,故实际中 SUV 和 1-Box 车型的 HIC 值和碰撞力比仿真还要大些。

角速度和角加速度的值如图 16 中(c)和(d),40km/h 以上的头部角速度平均值在 45rad/s 以上,角加速度平均值在 4500 rad/s² 之上,这表示车速超过 40km/h,大脑均有桥静脉断裂的可能,也预示骑车人将会受到脑震荡及神经轴突损伤等脑损伤。对于三种车型,随着车速增加,角速度和角加速度都在增加,且同等速度下,三种车型角速度和角加速度相差不大。对于 SUV 和 1-BOX 车型,车速达到 40km/h 时,骑车人 HIC 值可能没有达到 1000,但是,由于加速度变化值和角加速度峰值过大,也有可能受到脑损伤。

目前已建立的行人法规中,EEVC Phase2 的头部冲击器(40km/h)实验中,不分车型,成

人头部冲击器相对水平面的角度为 $65^{\circ} \pm 2^{\circ}$ ，IHRA 提出把试验车型分为 Sedan、SUV、1-Box 三种车型，日本的法规草案与 IHRA 研究结果类似。从图 14 左下图可看出，对于三种车型，骑车人头部碰撞角度有一定差异，从 40-70 不等。从这一点看，IHRA 和日本法规草案比 EEVC 要更加的合理。从仿真可看出，与行人相比[9]，当碰撞车型为 Sedan 时，头部碰撞角度和碰撞位置都有所不一样。为了更有效的评价骑车人的头部损伤风险，应该在制定法规的时候充分考虑骑车人的头部运动学响应过程。头部碰撞速度与车速的关系如图 16(f)。可见汽车前部结构影响骑车人的运动学响应，也会对骑车者的颅脑损伤有着或轻或重的影响。

4.3 汽车前部结构几何参数的影响

汽车与自行车碰撞时，骑车人主要是与汽车的保险杠、引擎盖边缘、引擎盖、挡风玻璃接触。本文分别分三种车型分别讨论保险杠高度、引擎盖边缘高度、引擎盖角度、挡风玻璃角度对骑车人头部损伤参数的影响。

4.3.1 保险杠高度的影响

如表 5 所示，对于 Sedan 车型，保险杠高度增加对 HIC 有一定影响，随着保险杠高度从 435mm 变化到 516mm，HIC 值增加了 13%。碰撞力和角速度变化不大，角加速度峰值增加了 83%。适当减小 Sedan 车型的保险杠高度对于减少骑车人头部损伤风险有一定作用。对于 SUV 和 1-BOX 车型，保险杠高度变化对骑车人头部损伤参数影响不大。

表 5 保险杠高度对头部损伤参数的影响

结构参数		输出参数		HIC15	碰撞力 (N)	角速度变化值 (rad/s)	角加速度峰值 (rad/s ²)
保险杠 高度 (mm)	Sedan	435(-1)		1316.6	8253.1	41.116	8943.6
		476(0)		1426	7891.2	38.63	16368
		516(1)		1485.3	7805.9	40.1	19541
	SUV	544(-1)		357	3704.4	43.254	10700
		640(0)		466.57	3530.9	50.569	12100
		736(1)		409.79	3620.6	44.376	11374
	1-BOX	448(-1)		378.67	5089.7	46.39	16165
		576(0)		374.32	5912.1	49.352	16452
		704(1)		410.95	4923.4	50.546	17486

4.3.2 引擎盖边缘高度影响

从仿真结果表 6 可看出，引擎盖高度对骑车人头部损伤参数影响比保险杠高度的影响要显著些。三种车型随着引擎盖高度的增加，HIC 值和碰撞力都有很大下降。对于 Sedan 车型，引擎盖高度从 565mm 变化到 839mm，HIC 值降低到了 540.97，降低了 72%。碰撞力下降到了 4776.1，下降了 43%。但是，角加速度有所升高。对于 SUV 和 1-BOX 两种车型，当引擎盖边缘高度在高位变化时，角加速度值有所降低，SUV 角加速度峰值从 15972 降低到了 6616.3，1-BOX 车型从 19353 下降到了 13087。这说明对于不同车型，引擎盖对骑车人头部损伤参数的影响有一定相同之处，也有不同的地方。考虑降低骑车人头部损伤风险情况下，不同车型设计引擎盖高度时，也要区别对待。

由于 SUV 和 1-BOX 车型普遍比 Sedan 的引擎盖高度要高，从三种车型仿真输出参数比较可看出 SUV 和 1-BOX 车型的 HIC 值普遍比 Sedan 要低，角速度变化值和角加速度峰值却普遍要比 Sedan 车型要高。

从能量角度来看，当引擎盖高度增高接近重心位置时，实际上是增加了骨盆和大腿吸收碰撞中的能量，也就增大了骨盆和大腿的损伤。

表 6 引擎盖高度对头部损伤参数影响

结构参数		输出参数		HIC15	碰撞力 (N)	角速度变化值 (rad/s)	角加速度峰值 (rad/s ²)
		引擎盖高度 (mm)	碰撞力 (N)				
引擎盖边缘高度 (mm)	Sedan	565(-1)	1944	8307.3	54.565	12207	
		702(0)	1462	7891.2	38.63	16368	
		839(1)	540.97	4776.1	42.485	13879	
	SUV	832(-1)	660.44	4150.5	32.308	15972	
		1000(0)	466.57	3530.9	50.569	12100	
		1168(1)	113.89	2708.9	39.186	6616.3	
	1-BOX	864(-1)	1015.8	6483.4	60.61	19353	
		1004(0)	374.32	5912.1	49.352	16452	
		1144(1)	214.61	4241.4	50.654	13087	

4.3.3 引擎盖角度与挡风玻璃角度影响

图 14 为 Sedan 车型引擎盖角度和挡风玻璃角度变化对头部损伤参数的影响,引擎盖角度和挡风玻璃角度分取 3 值,共做了 9 次仿真。从图 14 可看出, Sedan 车型引擎盖倾角对人体碰撞后的运动有一定的影响,从输出各参数来看,当引擎盖倾角从 11° 增加到 18° 时, HIC 值和碰撞力均有所下降,角加速度却呈现出相反的趋势。仿真中可以看出,骑车人头部大多挡风玻璃碰撞,也就是说相同情况下,骑车人的绕转距离要大于行人。挡风玻璃从 29° 增加到 40°, 头部损伤参数均有所上升。实际设计中,要综合考虑设计引擎盖角度和挡风玻璃角度,适当增加引擎盖角度,也就增加了引擎盖与引擎盖下面较硬部件的距离,可以减少行人头部撞击引擎盖下硬点几率。

由于 SUV 和 1-Box 车型的挡风玻璃角度和引擎盖角度在设计范围内变化不大,所以对损伤参数的影响也不是很大。

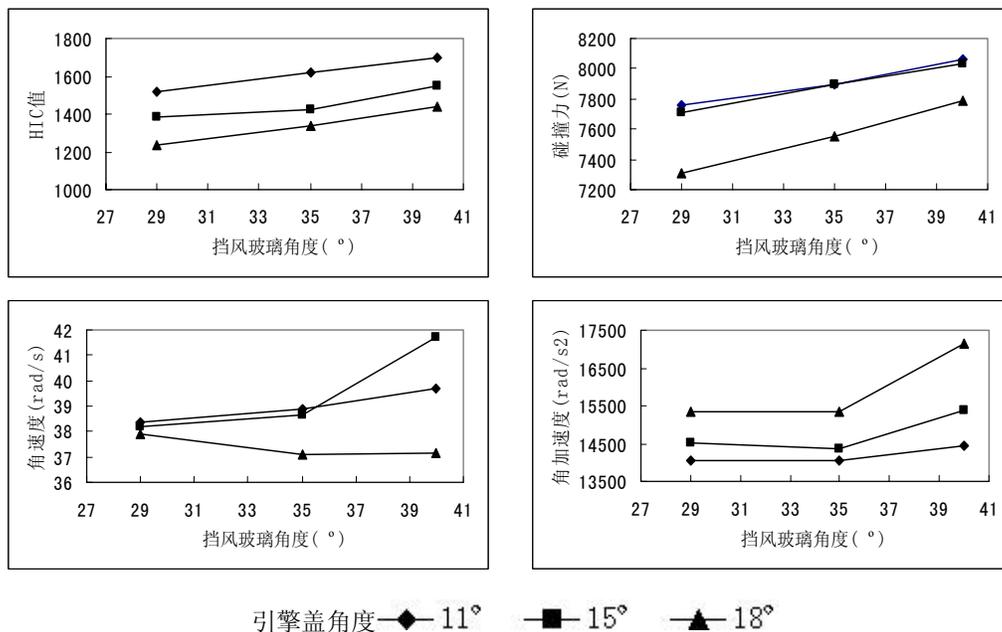


图 15 Sedan 车型挡风玻璃与引擎盖角度变化对头部损伤参数影响

5 结论

(1) 本文通过对一起汽车—自行车碰撞事故进行事故重建,有效验证了仿真方法的可行性和仿真模型的有效性。

(2) 自行车的速度和碰撞位置对骑车者头部的接触位置有很大的影响。

(3) 为了更有效的评价骑车人的头部损伤风险，应该在制定法规的时候充分考虑骑车人的头部运动学响应过程如头部碰撞角度和绕转距离。

(4) 由于当汽车车速达到 40km/h 时，骑车者头部会受到严重的损伤，所以为了降低骑车者的损伤风险，有必要限制城区行驶车速低于 40km/h。

(5) 对于 Sedan, SUV 和 1-BOX 三种车型，骑车人的颅脑损伤类型不一样。自行车与 Sedan 车型发生碰撞时，骑车人的头部 HIC 值和碰撞力比较高，而对于 SUV 和 1-BOX 车型，头部角速度和头部角加速度相对比较高。

(6) 引擎盖高度对骑车人头部损伤参数影响比保险杠高度的影响要显著。对于不同车型，引擎盖对骑车人头部损伤参数的影响不尽相同。考虑降低骑车人头部损伤风险情况下，不同车型设计引擎盖高度时，要区别对待。

Acknowledgements:

This study is sponsored by the National Natural Science Foundation of China (NSFC) (No. 10472031), the GM Research and Development (RD209), and 985 Program of National Education Ministry of China.

参考文献

- [1] 乔维高.摩托车自行车行人碰撞事故形态分析及行人伤害保护的研究:[武汉理工大学博士论文],2005
- [2] 公安部.中华人民共和国道路交通事故统计年报(2005年度).北京:公安部交通管理局,2006.
- [3] Yang J.K. . A Human-Body 3D Mathematical Model for Simulation of Car-Pedestrian Impacts[J]. Crash Prevention and Injury Control, 2000, Vol. 2(2): 131-149.
- [4] Mizuno, Y. and Ishikawa, H. Summary of IHRA Pedestrian Safety WG Activities-Proposed Test Methods to Evaluate Pedestrian Protection Afforded by Passenger Cars[C] //The 17th ESV Conference, Amsterdam: ESV.
- [5] AAAM. The abbreviated injury scale[S]. USA: Des Plaines Avenue, 1990.
- [6] Yang, J.K. . Review of Injury Biomechanics in Car-Pedestrian Collisions [J]. Vehicle Safety, 2005, Vol. 1(1):1-3.
- [7] Luis Martinez .Stiffness corridors of the European fleet for pedestrian simulation. In :the 20th ESV Conference: Paper Number 07-0267.
- [8] Liu ,X .J. Improvement to vehicle front-end design for the protection of child and adult pedestrians using mathematical simulation. Journal of crashworthiness,2002.
- [9] 李凡, 杨济匡. 基于车辆-行人碰撞颅脑伤防护的参数研究, 期刊论文, 中国机械工程, 2007/09.
- [10] Tetsuo M. Comparative analysis of vehicle-bicyclist and vehicle-pedestrian accidents in Japan, Accident Analysis & Prevention, 2003(35):927-940