

# 汽车与电动自行车正面碰撞事故重建研究

程前, 邵毅明, 董兆福

(重庆交通大学 交通运输学院, 重庆 400074)

**摘要:** 依据典型汽车—电动自行车正面碰撞事故建立 PC—Crash 和 MADYMO 联合仿真碰撞模型, 重现碰撞事故过程和人、车停止位置, 并利用事故现场信息验证模型的准确性。结果表明, 仿真推算的汽车发生碰撞瞬间速度和案例信息非常接近, 对提高事故再现水平、减少或预防事故发生具有重大意义。

**关键词:** 汽车; 电动自行车; 正面碰撞; 事故重建; 联合仿真

中图分类号: U491.3

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2019)01-0006-05

电动自行车是一种介于自行车和摩托车之间的新型二轮交通工具, 具有速度快、移动灵活、高性价比、无须接受交通法规考核等特点。但由于电动自行车数量增加、道路设施滞后及骑车人经常随意变道、闯红灯等导致交通事故频频发生。关于汽车—两轮车的事事故分析一直是交通事故研究热点之一。Severy D. 等通过试验发现摩托车—汽车碰撞过程中随相对碰撞速度的变化摩托车轴距减少量成线性相关; 聂进等对汽车与自行车碰撞过程中的动力学响应进行了分析; 曹文娟等对汽车—自行车碰撞速度进行了研究; 许洪国等提出了骑车人和二轮车抛距差与碰撞速度之间的经验公式; Steffan H. 基于 MADYMO 多刚体仿真模型分析了自行车前叉结构碰撞失效对骑车人碰撞响应的影响; Otte D. 对汽车和骑车人及碰撞速度进行了研究。但关于汽车—电动自行车正面碰撞事故的研究较少。

目前常用的事故重建仿真软件有 PC—Crash 和 MADYMO, 单一的重建软件在匹配精度、重建周期、定性和定量验证误差等方面存在不足, 造成模型性能难以达到最优。因此, 该文采用 PC—Crash 和 MADYMO 联合仿真方法重建一起典型的汽车—电动自行车正面碰撞事故, 并通过已有事故信息进行验证。

## 1 汽车—电动自行车碰撞形式

汽车—电动自行车常见碰撞形式见图 1。其中: 第一种碰撞事故最多, 常见于电动自行车横穿公路, 汽车车头正面碰撞电动自行车侧面; 第二种碰撞形式也较常见, 汽车驾驶人在发现电动自行车横穿公路时紧急打方向, 车头右(左)前角碰撞电动自行车中部; 第三、四种碰撞形式分别为刮蹭和追尾, 发生概率较低。

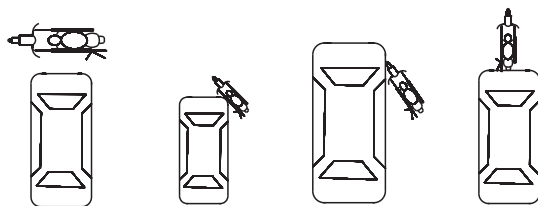


图 1 汽车—电动自行车常见碰撞形式

## 2 事故重建软件平台

PC—Crash、MADYMO 是目前重建交通事故最常用的软件, 其计算方式建立在多刚体运动学的基础上, 其中有可供调取的假人模型(见表 1); PC—Crash 中有市场上流通的多数车辆模型可供调取, MADYMO 中车辆模型需根据车辆特性参数自行

表 1 PC—Crash 和 MADYMO 软件参数

模型名称	输入	输出	模型误差	人工建模时间	适用范围
PC—Crash	车辆参数、减速度、碰撞区域	$V_0$ 碰撞对应关系、最终位置	定性和定量验证误差	1 d 左右	适用范围广, 考虑人、车、路因素的综合影响
MADYMO	车辆参数、减速度、碰撞区域	$V_0$ 碰撞对应关系、损伤指标	定性和定量验证误差	1 周左右	适用范围广, 注重人体损伤指标等因素

搭建。PC-Crash 功能较全面且重建周期短, MADYMO 在人体损伤分析方面性能更优、精确度更好。利用 PC-Crash 软件对汽车-电动自行车事故进行再现重建,然后把重建得到的信息应用于 MADYMO 中,即采用 PC-Crash 和 MADYMO 联合仿真方法进行事故重建。

### 3 汽车-电动自行车碰撞事故信息

#### 3.1 信息类型

按照事故发生过程,汽车与电动自行车正面碰撞事故分为碰撞前、碰撞中、碰撞后 3 个阶段。主要采集以下信息:1) 骑车人和汽车状态,包括碰撞前的骑行姿态、骑行方向、相对位置,碰撞中两车接触位置,碰撞后损伤情况,汽车驾驶人是否存在注意力不集中的现象等。2) 环境信息,包括事发时天气状况,是否存在视线遮挡,道路类型、道路新旧、道路材料、路面情况,路面上制动痕迹、碰撞位置、散落物抛撒情况、电动自行车和骑车人停止位置等。3) 常用速度重建素材,包括制动痕迹、监控视频、EDR 等。

根据汽车内行车记录仪视频计算汽车碰撞前的速度。根据监控视频,在画面中设定一条虚拟参照线,利用事发路段上两特征点之间的距离及参照线先后通过两特征点的时间间隔计算车辆的行驶速度。利用车载监控视频根据车头下沉、车内可移物件摆动、道路参照物等移动距离,应用帧间差法分析计算碰撞时刻的汽车速度。

如图 2 所示,以参照线 L 行驶至斑马线上游第二段白色虚线头端时为初始时刻,经过 23 帧后,参照线 L 尚未驶至第一段白色虚线头端,再经过 1 帧,参照线 L 已驶过第一段白色虚线头端,则汽车通过斑马线上游第二段到第一段白色虚线头端间的行驶速度  $v$  满足下式:

$$\frac{sf}{n+1} \times 3.6 < v < \frac{sf}{n} \times 3.6 \quad (1)$$

式中: $s$  为斑马线上游第二段、第一段白色虚线头端间的距离(m); $f$  为视频帧率(fps); $n$  为计算所用视频帧数。

#### 3.2 案例信息采集

事故案例发生在 312 国道某区段,一名男性驾驶电动自行车以约 12 km/h 的速度从南向北穿越马路时与一辆以约 70 km/h 的速度在左侧车道由西向东直行的釉金色帕萨特轿车发生碰撞。碰撞前轿车司机采取制动措施,碰撞瞬间电动自行车、轿车

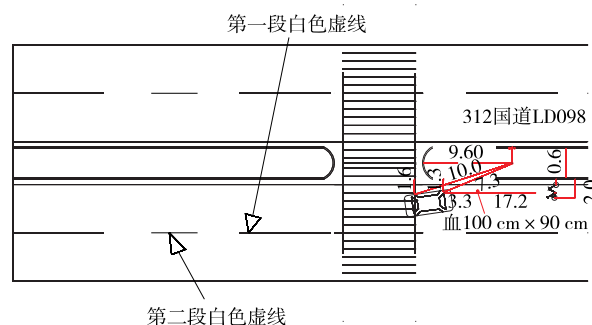


图 2 事故现场示意图(单位:m)

行驶方向矢量夹角约  $80^\circ$ ;轿车前部与电动自行车左侧面发生碰撞,电动自行车翻倒后向前方滑出并伴随绕电动自行车中心旋转运动;骑车人向左倒向发动机罩,臀部先与发动机罩前部接触,随后上身、肩部及头部与发动机罩及挡风玻璃下缘碰撞,最后从发动机罩抛出落地(见图 3)。骑车人、电动自行车与轿车前轮距离分别为 3.3、17.2 m。事故导致骑车人右侧颞顶骨粉碎性骨折(AIS4),头部硬下膜水肿、左侧额颞顶叶脑挫裂伤、血肿、脑肿胀、脑疝(AIS5),致死原因为失血性休克伴颅脑损伤。

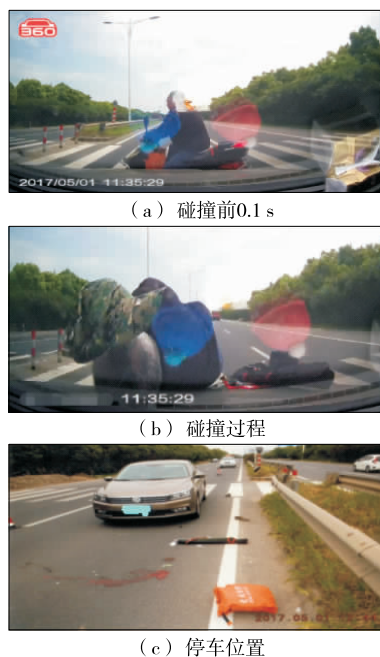


图 3 碰撞时刻画面

根据事故现场图, $s=15.0\text{ m}$ , $f=30\text{ fps}$ , $n=23$ ,代入式(1),得  $67.5\text{ km/h} < v < 70.4\text{ km/h}$ 。

以汽车内抽纸作为计算车速的参照物。碰撞前汽车采取制动,故碰撞时刻的速度小于其行驶速度,由车载行车记录仪视频画面可推测碰撞时刻轿车速度。图 4(a)中,行车记录仪画面中抽纸无明显位置

变化;经过 2 帧后,汽车制动,抽纸由于惯性作用位置发生变化[见图 4(b)];再经过 17 帧后,轿车与电动自行车发生碰撞,视频帧率为 30 fps,则制动时间约为 0.5 s。根据经验,制动减速度取  $8 \text{ m/s}^2$ ,则碰撞时刻轿车速度约为  $14.72 \text{ m/s}$ ,即  $53 \text{ km/h}$ 。

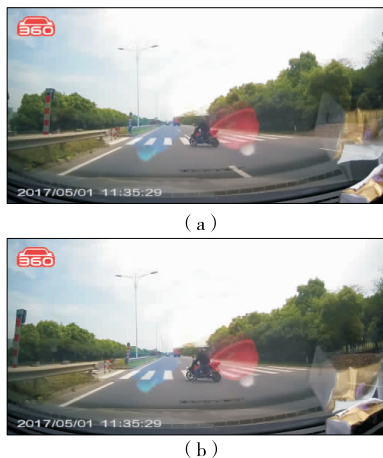


图 4 汽车—电动自行车碰撞时刻轿车速度的确定

事故中轿车和电动自行车的基本信息分别见表 2、表 3。电动自行车骑车人为男性,58 岁,身高 176 cm,体重 75 kg。

表 2 汽车的基本信息

参数	参数值
品牌	帕萨特
质量/kg	1 500
保险杠质量/mm	500
车头高度/mm	740
发动机罩水平长度/mm	1 100
发动机罩上部高度/mm	970
挡风玻璃水平长度/mm	900
挡风玻璃上部高度/mm	1 350

表 3 电动自行车的基本信息

参数	参数值
品牌	祥龙
长×宽×高/mm	1 850×650×1 050
质量/kg	65
轴距/mm	1 230
坐垫高度/mm	730
车把高度/mm	980
车轮半径/mm	210

## 4 模型建立

### 4.1 建模流程

采用 PC—Crash 和 MADYMO 软件联合仿真

进行事故重建的流程见图 5。根据事故车辆信息调用汽车和二轮车(连同骑车人)模型,设置汽车和二轮车重量、高度、外形尺寸等特征参数,结合路面痕迹、车辆变形等信息设置初始速度、制动过程、碰撞角度、碰撞位置等事故参数。

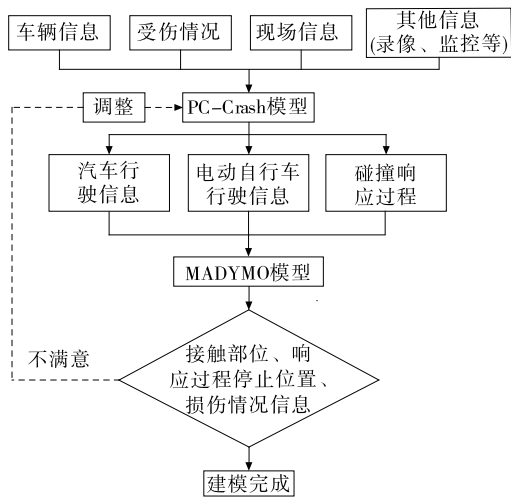


图 5 汽车—电动自行车碰撞事故重建流程

### 4.2 建立模型

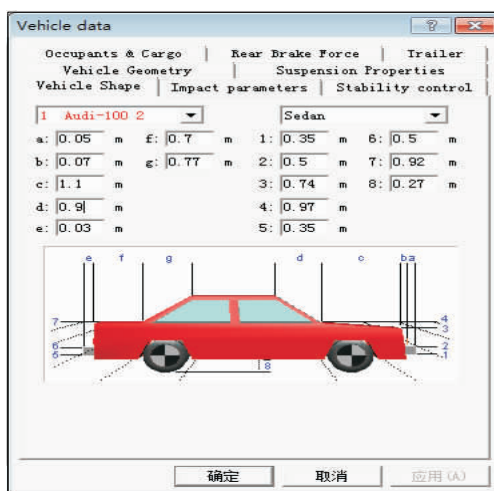
#### 4.2.1 PC—Crash 模型

根据事故现场信息在 PC—Crash 软件中建立道路模型,调入外形及质量相近的汽车模型,调整外形参数、初始速度、制动操作;调入电动自行车模型(连同骑车人)并调整相关参数、设置初始速度;根据行车记录仪视频画面设置轿车和电动自行车的相对位置;路面摩擦系数根据路面状况设定(见图 6)。

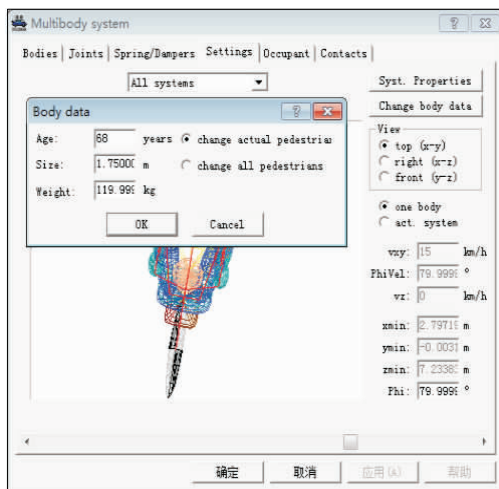
#### 4.2.2 MADYMO 碰撞模型

将 PC—Crash 模型输出的仿真结果作为定义 MADYMO 模型的边界条件。定义轿车与电动自行车、骑车人与电动自行车、轿车与骑车人及三者各自与地面的多组接触,按涉及到的接触情况分别定义接触组,包括车轮与地面接触,轿车保险杠、发动机罩与电动自行车车体接触,电动自行车车把、坐垫与骑车人手部、臀部接触,轿车保险杠、发动机罩、挡风玻璃与骑车人腿部、臀部、胸部、头部接触,电动自行车车轮、车体及骑车人身体与地面接触。

根据事故信息输入汽车质量、质心高度、转动惯量等,同时根据文献[8]中给出的典型接触特性曲线得到汽车各部分的接触特性,从而得到汽车模型(见图 7)。与汽车模型不同的是,电动自行车模型中需考虑车把的转动及前后轮相对车身的转动,为此把整个车体简化为 4 个刚体,刚体之间通过铰链连接,



(a) 汽车参数设置



(b) 电动自行车参数设置

图 6 PC-Crash 模型建立



图 7 汽车模型

设置各椭圆重量和重心高度,参考文献[9]设置转动惯量及接触特性、文献[10]设置模型各部分的接触特性。电动自行车及骑车人模型见图 8。

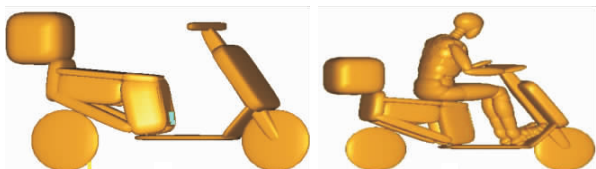


图 8 电动自行车及骑车人模型

## 5 联合仿真模型验证

### 5.1 停止位置验证

最终人、车停止位置与事故现场是否相同是验证事故重建模型是否有效的最直接方法。由行车记录仪拍摄视频发现事发路段路面较新且干燥,设置路面摩擦系数为 0.75。轿车完全制动,电动自行车与轿车车头右向左 1/3 处为碰撞点,调整车辆速度及碰撞夹角(轿车与二轮车速度矢量之间的夹角)。将 PC-Crash 中输出的参数作为 MADYMO 仿真模型的边界条件对事故进行仿真,不断调整参数,发现当轿车速度为 52 km/h、电动自行车速度为 10.7 km/h、碰撞夹角为  $79^\circ$  时,仿真结果与事故现场最相近(见图 9)。

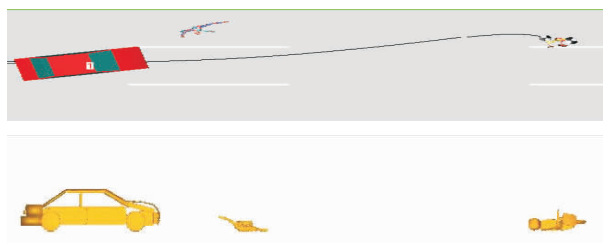


图 9 人、车停止位置模拟结果

### 5.2 骑车人动态响应过程验证

事故中行车记录仪拍摄视频的角度刚好能观察碰撞全过程,采取对比视频画面和仿真模型中骑车人动态响应过程的方法进一步检验模型的准确性。如图 10 所示,初始时刻,电动自行车横穿马路; $t = 33$  ms 时,轿车车头与电动自行车碰撞,骑车人臀部与电动自行车坐垫开始分离且与发动机罩前端接触,上身倒向发动机罩; $t = 100$  ms 时,骑车人与电动自行车分离,上身以臀部为中心向车头绕转; $t = 133$  ms 时,已发生碰撞; $t = 3\,477$  ms 时,骑车人与电动自行车停止滑移。仿真模型中电动自行车、骑车人与轿车、路面的接触位置和时刻及静止位置与视频记录相符。

观察碰撞过程,发现由于电动自行车座椅高度与轿车车头高度非常接近,碰撞开始后很短的时间内骑车人臀部会从座椅滑移到发动机罩前缘上,且从汽车车头接触电动自行车开始到骑车人头部碰撞发动机罩这段时间内骑车人在每一帧时间内头部绕转距离逐渐增大,说明骑车人上身在这段时间内运动速度不断增大。



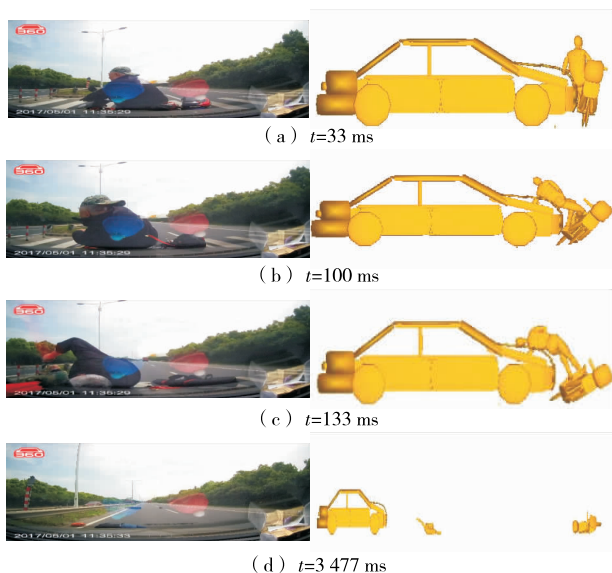


图10 碰撞响应过程对比

### 5.3 骑车人损伤特征验证

MADYMO 事故重建不仅可再现电动自行车碰撞过程的动力学响应,还可输出骑车人头部质心合成加速度及  $HIC$  数据。头部加速度以加速度曲线形式输出,可从 peak 文件中读取  $HIC$  值。如图 11 所示,骑车人头部加速度变化过程存在两次峰值: $t=118\text{ ms}$  时刻,骑车人头部与挡风玻璃下缘的碰撞加速度达  $3\,744.73\text{ m/s}^2$ ,远远超过 ECE R21 法规要求的  $80g$ ;仿真输出的  $HIC_{15}=2\,892$ ,大大超过 NHTSA 规定的 50 百分位男性耐受限度值 700; $t=1\,027\text{ ms}$  时刻,骑车人头部与地面的碰撞加速度为  $1\,446.68\text{ m/s}^2$ ,峰值较低。由此可推断骑车人头部和挡风玻璃碰撞为致死的主要原因,与尸检报告中致死原因一致。

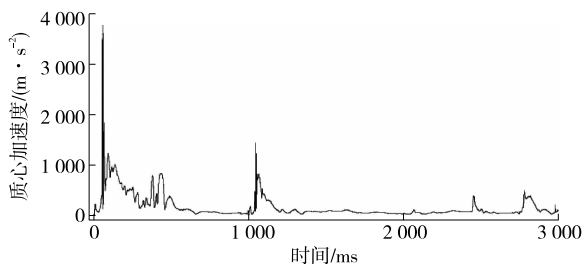


图11 不同时刻骑车人头部的质心加速度

## 6 结语

该文通过 PC-Crash 和 MADYMO 联合仿真重建一起汽车—电动自行车交通事故模型,利用精

确的碰撞时刻车速,通过对比仿真模型与事故现场的最终人、车停止位置,得到驾驶人碰撞响应过程及骑车人头部加速度和  $HIC$  值,分析得到的电动自行车驾驶人死亡原因和尸检报告致死原因吻合,采用的仿真方法及建立的汽车—电动自行车碰撞事故模型可靠。道路交通管理部门可据此采取有效防治手段改善交通安全现状,预防事故的发生。

### 参考文献:

- [1] Severy D, Brink H, Blaisdell D. Motorcycle collision experiments[R]. SAE Technical Paper, 1970.
- [2] 聂进, 杨济匡. 基于汽车—自行车碰撞事故重建的骑车人动力学响应和损伤研究[J]. 汽车工程, 2015, 37(2).
- [3] 曹文娟, 王剑梅, 邓群. 汽车与自行车碰撞速度的不确定度分析[J]. 农家科技: 下旬刊, 2014(7).
- [4] 许洪国, 林庆峰, 成波. 交通事故行人、骑车人和自行车抛距模型[J]. 交通运输系统工程与信息, 2006, 6(6).
- [5] Steffan H. Validation of the coupled PC-CRASH-MADYMO occupant simulation model[R]. SAE Paper, 2000.
- [6] Otte D. Use of throw distances of pedestrians and bicyclists as part of a scientific accident reconstruction method[R]. SAE Paper, 2004.
- [7] 冯浩, 潘少猷, 陈建国. 基于视频的车速鉴定方法[J]. 中国司法鉴定, 2009(5).
- [8] Deguchi M. Modeling of a motorcycle for collision simulation[A]. Proceedings of the 18th International Conference on the Enhanced Safety of Vehicles(ESV)[C]. 2003.
- [9] Van Rooij L, Bhalla K, Meiss Nerm, et al. Pedestrian crash reconstruction using multi-body modeling with geometrically detailed, validated vehicle models and advanced pedestrian injury criteria[A]. Proceedings of the 18th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles(ESV)[C]. 2003.
- [10] 许洪国, 高蔚, 苏键, 等. 汽车交通事故碰撞速度多值问题的研究[J]. 中国公路学报, 1996, 9(1).
- [11] 朱建武, 黄家城, 李文勇. 基于车辆变形的事故再现反推方法研究[J]. 公路与汽运, 2014(4).
- [12] 王鑫, 张道文, 张光辉. 汽车与自行车碰撞事故重建研究[J]. 湖北汽车工业学院学报, 2016, 30(2).