

# 轿车与自行车碰撞事故仿真研究及骑车者致伤特点分析

邹冬华<sup>1,2</sup>, 刘宁国<sup>1</sup>, 陈建国<sup>1</sup>, 张建华<sup>1</sup>, 金先龙<sup>3</sup>, 张晓云<sup>3</sup>, 陈忆九<sup>1</sup>

(1.司法部司法鉴定科学技术研究所, 上海 200063; 2.复旦大学上海医学院法医学系, 上海 200032; 3.上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200030)

[摘要] 目的 研究计算机仿真技术重建自行车骑行状态下交通事故发生过程, 并探讨此技术在分析真实事故中骑车者人体致伤方式、特点及损伤程度上的可行性。方法 通过对事故人、车痕迹鉴定和模型建立, 构建相关碰撞环境并利用高性能计算机及 PC-Crash 软件对事故进行再现研究。结果 计算机仿真技术建立的人、车模型在模拟碰撞过程中, 骑车者发生的运动过程、损伤分布及损伤动力学响应结果与法医学尸表检验人体损伤部位、程度基本吻合。结论 利用计算机仿真技术重建自行车骑行状态下的事故碰撞过程、分析骑车者致伤方式及提供损伤部位动力学响应参数等, 对于交通伤法医学鉴定及深化交通伤机制研究具有参考价值。

[关键词] 自行车; 交通事故; 计算机仿真; 骑车者; 损伤特点

[中图分类号] DF795.4 [文献标识码] A [文章编号] 1004-5619(2007)04-0250-04

## Simulation Study on the Bicyclist Involved Traffic Accident and Analysis of the Injury

ZOU Dong-hua<sup>1,2</sup>, LIU Ning-guo<sup>2</sup>, CHEN Jian-guo<sup>2</sup>, ZHANG Jian-hua<sup>2</sup>, JIN Xian-long<sup>3</sup>, ZHANG Xiao-yun<sup>3</sup>, CHEN Yi-jiu<sup>2</sup>

(1.Institute of Forensic Sciences, Ministry of Justice, P.R.China, Shanghai 200063, China; 2.Department of Forensic Medicine, Shanghai Medical College, Fudan University, Shanghai 200032, China; 3.Department of Mechanical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: Objective This study aimed at computer simulation of reconstruction of vehicle-bicyclist traffic accidents and investigation of the injury characteristics. Methods To use the model established by high performance computer and PC-Crash software to study the bicyclists and vehicles and to reconstruct the accident. Results The model of computer simulation response perfectly reconstructed phases of the traffic collision and explained the mechanisms of the injuries of the bicyclists, which correlated with details found in forensic investigation. Conclusion Computer simulation is feasible for forensic analysis on the injury mechanism of bicyclists in traffic related accidents.

Key words: bicycle; traffic accident; computer simulation; bicyclist; injury mechanism

我国素有自行车王国之称, 平均每 3 人就有一辆自行车, 作为轻便、低价、无耗材的交通工具, 自行车给人们的出行带来了诸多便利, 但与此同时自行车交通事故的发生率却持久不下。据报道我国 70% 的交通事故与自行车有关, 其中以自行车与机动车发生为主, 在此类事故中自行车骑车者常常损伤重、死亡率高, 颅脑损伤是造成骑车者死亡的主要原因, 而所有相关事故中自行车拥有者承担第一责任的仅占 4%~7%<sup>[1]</sup>。作为交通事故中的弱势群体, 由于自行车及骑车者在发生碰撞后, 短时间内的运动过程极为复杂, 目前通过计算机仿真再现事故碰撞过程推断致伤方式在国内法

医学上尚未见报道。本文以一起真实的轿车与自行车交通事故为研究对象, 通过计算机仿真研究建立人、车模型, 运用 PC-Crash 软件进行碰撞试验并对自行车骑车者的致伤方式、损伤特点及程度进行分析。

## 1 材料和方法

### 1.1 案例资料

某日夜, 小雪, 一辆桑塔纳 SVW7180CEI 轿车沿快速机动车道由南向北行驶至某路口时, 与由东向西行驶的一辆优耐特 26 英寸女式自行车相撞, 造成骑车人当场死亡。

#### 1.1.1 人体损伤情况

双侧眼睑青紫, 口、鼻腔及两侧外耳道积血, 下颌、右颧部、额部正中皮肤擦伤, 右眉弓外侧皮肤擦挫伤, 鼻背部见三处浅表挫裂创。右侧季肋部、右肩胛处皮肤擦伤, 左侧季肋部皮肤擦挫伤, 肩背部左侧散在皮肤擦伤。左上肢多处皮肤擦伤, 左肱骨中段骨折, 左

[基金项目] 科技部科研院所社会公益研究专项(2004D1B2J046)

[作者简介] 邹冬华(1981-), 男, 上海人, 硕士研究生, 主要从事法医学病理学研究, (电子邮箱)052101054@fudan.edu.cn。

[通讯作者] 陈忆九(1961-), 男, 上海人, 研究员, 主要从事法医学病理学研究, (电子邮箱)yijiuchen@yahoo.com.cn。

手小鱼际挫裂创形成,左大腿下段外侧大片皮肤青紫伴擦伤,左胫骨中段骨折,左小腿中段内侧刺创形成,左内踝皮肤擦伤,左外踝前下方皮肤擦伤,右大腿下段内侧皮肤青紫,右膝外下方皮肤擦伤,右小腿内侧皮肤擦挫伤。

### 1.1.2 车辆损坏情况

轿车前保险杠断裂脱落,面罩破裂缺损,发动机罩前端见多处擦痕伴凹陷,前挡风玻璃碎裂,左前照灯与雾灯灯罩破损。自行车前叉左侧分支向右挤压变形,前轮扭曲变形,车轴断裂,前挡泥板扭曲变形,车架向右弯曲,鞍座向左偏转约 45°,座套豁裂,锁具左侧及后三角架局部粘有灯罩玻璃碎屑,后轮扭曲变形,左支撑杆向右弯曲,见图 1。

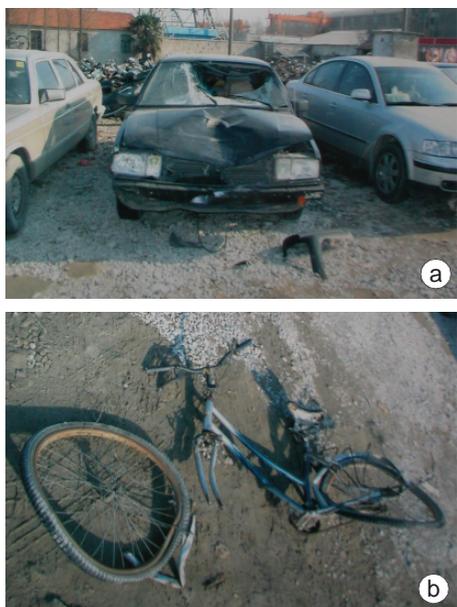


图 1 事故车辆照

## 1.2 计算机仿真方法

### 1.2.1 事故建模方法

根据事故现场情况,利用多刚体动力学方法,建立路面、轿车、自行车和骑车者的模型。

地面建模:用位面表示地面,根据现场情况建立合适的平面大小。

车辆建模:确定车本身的坐标系,车前方为 X 轴正方向,车左侧为 Y 轴正方向,上方为 Z 轴正方向,坐标原点选在车的重心位置。车的表面选取椭球面来表示,根据车的具体外形参数确定椭球面的中心位置及半轴。把车的表面分为若干椭球面,而这些表面都是粘附在重心位置的一个刚体上,刚体用一个自由铰链(human joint)与参考空间相连接,用来控制车的位置及旋转;同时输入椭球面的材料刚度、重力加速度及轮胎等材料特性。

骑车者建模:依据骑车者的身高、体重等信息建立人体假人模型,调节假人中各个铰链的旋转使其符合骑行状态下的姿势。调整假人位置及假人关节的旋转,使假人模型能够自然地坐在自行车模型之上,如图 2 所示。

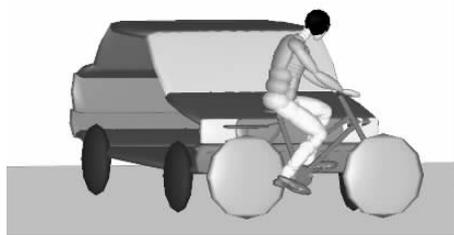


图 2 轿车、自行车、骑车者模型

### 1.2.2 设置接触类型

设置所有可能接触到的面与面之间的接触,如车与地面、自行车与地面、人与车、车与自行车之间的接触。接触面类型有主面变形、从面变形以及两种变形的“复合类型”。

### 1.2.3 再现方法

运用 PC-Crash 软件<sup>[2]</sup>,根据事故现场留下的痕迹、车辆停止位置以及人体抛距、落点等信息,并利用轨迹优化方法使计算的碰撞后轨迹与实际碰撞后轨迹在允许误差范围内尽可能地相吻合,据此可推算出碰撞前轿车的速度在 70km/h 左右。自行车以 15km/h 正常速度行驶。

### 1.2.4 损伤生物力学计算方法

利用多刚体动力学方法建立的假人模型得到人体各受伤部位的生物力学响应数值,如加速度、力和力矩等。根据美国联邦机动车安全标准 FMVSS208<sup>[3]</sup>中所规定的乘员头部伤害评价方法,人体头部损伤采用下式计算:  $HIC = \max \left[ (t_2 - t_1) \left( \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a_{Hend} dt \right)^{2.5} \right]$ 。HIC 即头部伤害指数(head injury criterion),式中:  $t_2, t_1$  为碰撞过程中所选择的两个时刻,  $a$  为头部重心加速度,用重力加速度  $g$  的倍数表示, 2.5 是由实验得到的头部权重指标。

## 2 结果

### 2.1 人、车的碰撞过程

图 3 分别反映了骑车者在  $T=0\text{ms}, 20\text{ms}, 50\text{ms}, 100\text{ms}$  4 个不同时刻,与保险杠、发动机罩、挡风玻璃下沿等碰撞的运动过程。根据计算仿真结果显示,骑车者的左小腿和小轿车保险杠发生了碰撞,臀部、肩背部和头部分别与发动机罩和前挡风玻璃下沿相撞,与事故车辆的保险杠断裂、发动机罩凹陷、前挡风玻璃碎裂等信息相吻合。另外,由于在轿车与自行车事

故中,自行车的抛出机理要比骑车者复杂得多,存在很多不确定因素,所以本文模拟过程中只关注骑车者的落点和抛距,如图4所示,计算模拟所得人体的抛距与落点位置与事故现场基本吻合。

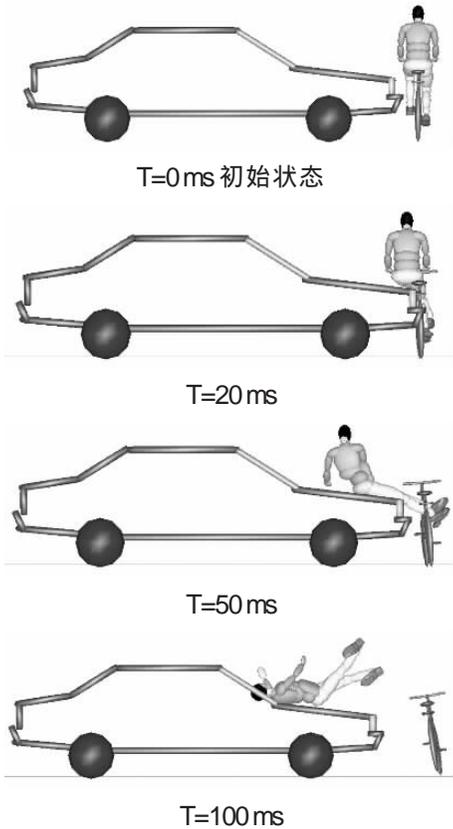


图3 骑车者碰撞运动过程

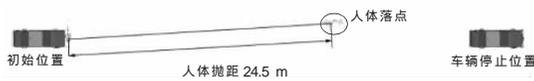


图4 模拟终点人、车位置示意图

### 2.2 骑车者的致伤方式

试验过程中,骑车者的左小腿与小轿车发生直接碰撞后,人体向左侧倾倒并在小轿车发动机罩上发生滑移,头部与挡风玻璃下沿发生二次碰撞,后摔落至地面。根据事故模拟结果,人体主要部位致伤方式如表1所示。

表1 骑车者主要部位致伤方式

碰撞部位	头颈部	胸腹部	腰背部	会阴部及阴囊	虎口	大腿内侧	膝内侧	胫、腓骨	内踝
小轿车									
保险杠	-	-	-	-	-	-	-	+	-
发动机罩	+	+	+	-	-	-	-	-	-
面罩	-	-	+	-	-	-	-	-	-
挡风玻璃	+	-	-	-	-	-	-	-	-
自行车									
把手	-	-	-	-	+	-	-	-	-
鞍座	-	-	-	-	-	+	-	-	-
管梁	-	-	-	-	-	+	+	-	+
脚踏管、链轮、链条	-	-	-	-	-	-	+	-	+
地面	+	+	+	-	-	-	-	-	-

### 2.3 骑车者损伤动力学响应结果

应用 PC-Crash 碰撞软件,由多刚体动力学建立的假人模型可以得到骑车者头部、胸部加速度及左小腿受力曲线,如图5所示。

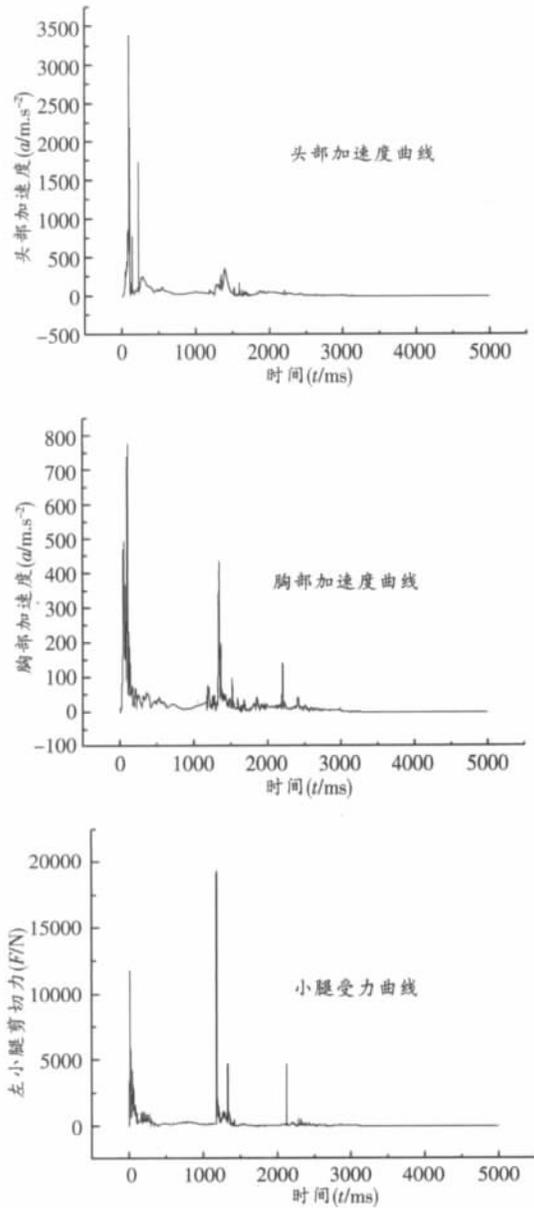


图5 骑车者损伤部位动力学响应结果

由仿真结果得到, 骑车者头部、肩背部、臀部及左下腿在分别与轿车前挡风玻璃下沿、发动机罩、保险杠发生碰撞。此时仿真动力学响应结果示头部最大加速度为  $3400\text{m/s}^2$ , HIC 为 5030, 胸部持续 3ms 加速度为 79g, 左小腿最大剪切力为 11.8kN, 左小腿最大力矩为 1064Nm。与法医学检验结果相比较, 发现死者口、鼻腔及两侧外耳道积血, 头面部多处皮肤擦挫伤、浅表挫裂创; 右侧季肋部、右肩胛处、肩背部皮肤擦伤, 左肋弓上缘皮肤擦挫伤; 左大腿下段外侧皮肤青紫伴擦伤, 左胫骨中段骨折伴刺创形成, 上述损伤与动力学响应结果可以相互印证。尤其是头部伤害指数 HIC 为 5030, 远大于标准中 1000 的界限, 该次撞击可造成头部严重损伤致骑车者死亡, 与法医学检验结论相吻合。

### 3 讨论

由于自行车骑车者遵章守法观念淡薄、行动随意、成群结队、打伞骑车、骑车带人等, 加之自行车本身轻便灵活、稳定性差, 尤其是遇到冰雪路面、刮风下雨等更容易摔倒, 是造成自行车交通事故发生的主要原因。作为交通事故中的弱势群体, 骑车者往往一碰就倒、一倒就伤, 而且损伤严重, 谭宗奎等<sup>[4]</sup>报道 376 例自行车伤显示此类事故损伤以头部为主, 其次是四肢, 其中骑车者死亡的主要原因是颅脑损伤。

目前, 与汽车碰撞是自行车事故发生的主要形式, 对于不同的车辆款型, 由于车身撞击平面、碰撞方式各有千秋, 人体的致伤方式及特点也存在着诸多差异, 本文仅以轿车与自行车事故为例进行计算机仿真研究并探讨此类事故中骑车者的致伤特点。

#### 3.1 自行车与小轿车事故碰撞运动特点

自行车骑车者与汽车相撞的运动过程一般可分为接触、自由飞行和滑移三个阶段<sup>[5-6]</sup>。碰撞开始自行车与汽车接触, 吸收汽车的冲撞能量, 骑车者身体上部迅速倾倒向或上翻摔落于汽车发动机罩, 下肢及自行车向上抛起并先后被抛向汽车前方落地后, 自行车和骑车者分别以滑动和/或滚动的形式向前运动至最后终止位置, 即事发后的第一现场。本文通过计算机仿真技术, 基本再现了事故发生的过程, 如图 4 所示。法医学检验见锁具左侧及后三角架局部粘有灯罩玻璃碎屑、鞍座向左偏转约  $45^\circ$  及左胫骨骨折, 符合小轿车撞击自行车(含骑车者), 致使骑车者向左倾倒并在发动机罩上发生滑移的特点。另外, 对于碰撞点高于自行车骑车者系统质心的情形, 接触过程可以视为瞬间完成的, 即整个运动过程仅由自由飞行和滑移两个运动阶段组成, 不在本文讨论的范畴内。

#### 3.2 自行车骑行者致伤特点

骑自行车者坐在自行车鞍座上, 会阴部及阴囊、大腿根部内侧与鞍座紧密接触, 事故发生时, 由于鞍座硌垫和摩擦作用, 往往形成以上部位的损伤, 本案例中, 鞍座向左偏转约  $45^\circ$ ; 座套豁裂, 与形成大腿内侧多处皮肤青紫相互印证。同时, 双下肢之间因自行车管梁(上管、立管和下管)的硌垫, 容易形成大腿内侧、膝部内侧条、片状皮肤擦伤或皮下出血; 并随脚踏管上下运动, 脚踏管、链轮和链条与足弓内侧、内踝关节周围接触磕碰, 可造成内踝关节及周围皮肤损伤, 形态为孤立、不规则的皮下出血和皮肤擦伤<sup>[7]</sup>; 由于紧急制动紧握车把, 造成双手虎口或大、小鱼际皮下出血、皮肤擦伤等。在本起事故中, 除阴囊损伤未检见外, 上述损伤均有发现, 模拟结果也基本再现了上述部位损伤的成伤过程。

同时, 本试验中骑车者左胫骨中段骨折, 为典型的保险杠骨折, 由小轿车保险杠直接撞击所致, 该处损伤中心距足底约 21cm, 自行车脚踏管运动范围在距地面 13~42cm 之间, 桑塔纳小轿车保险杠碰撞中心距地面高度约 48cm, 结合自行车锁具左侧及后三角架局部粘有灯罩玻璃碎屑、碰撞中心距地面高度约 42cm, 在计算仿真结果中, 三者损伤高度可以相互印证。另外, 任建安等<sup>[8]</sup>报道 22 例“自行车把综合征”, 即自行车把手突然撞击腹部(常为左季肋部)造成脾破裂伴肠穿孔和腹膜后血肿, 在本起案例中未检见, 事故模拟过程亦未仿真得出。

#### 3.3 碰撞部位损伤生物力学响应

骑车者的头部、胸部加速度曲线及左小腿受力曲线如图 5 所示, 第一次加速度最大值出现在 100ms 左右, 此时骑车者头部与前挡风玻璃下沿发生碰撞; 另一次峰值出现在 1300ms 左右, 此时人体已经落地, 为头部与地面发生摔跌所致。由图 5 可以看出, 第一次撞击时头部最大加速度达到  $3400\text{m/s}^2$ , 计算得到 HIC 值为 5030, 远超过安全标准<sup>[9]</sup>中 1000 的极限, 足以造成头部严重损伤, 与法医学尸体检验的重型颅脑损伤结果吻合, 同时可以认定头部与前挡风玻璃撞击是造成骑车者死亡的直接原因。胸部持续 3ms 最大加速度为 79g, 略超过 60g 的上限, 法医学检验见骑车者肩背部、左季肋部多处皮肤擦挫伤, 参照计算机仿真结果, 理论上应造成胸腔器官的损伤。

图 5 中骑车者左小腿碰撞过程的受力曲线, 第一次峰值出现在 20ms 左右, 模拟结果显示骑车者小腿与保险杠发生碰撞, 此时左小腿受力最大值为 11.8kN, 参考标准<sup>[9]</sup>规定的大腿轴向受力最大 10kN 的危险界限, 理论上应造成小腿骨折等, 与实际(下转第 257 页)

彩色图形 VEP 在视力推断方面的价值应予重视。

[参考文献]

[1] 张经纬. 眼损伤夸大伪装视力下降 20 例分析[J]. 法医学杂志, 1995, 11(1): 21- 22.

[2] 段艳华, 梁彩虹. 图形 VEP 在弱视检查中的应用护理[J]. 中华临床医学研究杂志, 2004, 10(83): 110- 111.

[3] 徐国兴, 洪金针, 林玲, 等. 弱视儿童治疗前后 PR-VEP P100 波变化探讨[J]. 中国斜视与小儿眼科杂志, 1998, 6(4): 154- 156.

[4] 吴军. 人体损伤程度司法鉴定指南[M]. 北京: 中国检察出版社, 2002. 55- 56.

[5] 李海生, 潘家普. 视觉电生理的原理与实践[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2002. 141- 156.

[6] 吴德正, 刘妍. 罗兰视觉电生理仪测试方法和临床应用图谱学[M]. 北京: 北京科学技术出版社, 2006.3- 5.

[7] 夏文涛, 董大安, 沈彦, 等. 视觉诱发电位在客观视力检测中的运用[J]. 中国司法鉴定, 2002, (2): 28- 33.

[8] Smon JW, Segfried JB, Mills MD, et al. A new visual evoked potential system for vision screening in

infants and young children[J]. Acta Ophthalmol Scand, 2004,82(6):701- 706.

[9] Vedanthan V, Ratnagiri PK. The Sweep- VEP: A faster estimation of visual acuity in preverbal children [J]. Indian J Ophthalmol, 2004,52(2):175.

[10] Lauritzen L, Jorgensen MH, Michaelsen KF. Test-retest reliability of sweep visual evoked potential measurements of infant visual acuity and contrast sensitivity[J]. Pediatr Res, 2004,55(5):701- 708.

[11] 刘瑞珏, 朱广友, 范利华. 视觉电生理与客观视功能检查[J].法医学杂志, 2002, 18(2): 115- 117.

[12] 朱捷, 李海生. 扫描翻转图像视觉诱发电位视力与对数视力表视力的比较 [J]. 眼科研究, 2001, 19 (3): 246- 249.

[13] 朱捷, 李海生. 扫描图像视觉诱发电位视敏度[J].国外医学.眼科学分册, 1999, 23(5): 301- 306.

(收稿日期: 2007- 06- 19)

(本文编辑: 刘宁国)

(上接第 253 页)法医学检验发现当事人左胫骨中段骨折相一致。第二、三次峰值分别出现在 1 330 ms、2 150 ms 左右, 此时人体已经与小轿车分离, 为腿部与地面发生接触时所造成的。

通过上面的分析可以看到, 模拟结果在多方面与实际情况吻合, 并且能够相互印证, 因此可以认为所建立的事故再现模型是合理正确的, 该技术在法医学交通伤的鉴定中具有一定的参考价值。

[参考文献]

[1] 王正国. 自行车伤[J]. 中华创伤杂志, 1999, 15(3): 222- 226.

[2] Steffan H, Moser A, Geigl BC, et al. A new approach to occupant simulation through the coupling of PC-Crash and MADYMO[J]. SAE, 1999, 108(6): 785- 793.

[3] FMVSS208. Occupant Crash Protections[S].

[4] 谭宗奎, 陈庄洪, 徐永年. 自行车事故伤情特点[A]. 第二届全国交通事故伤会议暨第三届全国创伤学术交流会议文摘摘要汇编[C]. 北海, 中华医学会创伤学分会, 1996. 262.

[5] Maki T, Kajzer J, Mizuno K, et al. Comparative analysis of vehicle - bicyclist and vehicle- pedestrian accidents in Japan[J]. Accid Anal Prev, 2003, 35: 927- 940.

[6] Maki T, Kajzer J. The behavior of bicyclists in frontal and rear crash accidents with cars [J]. JSAE Review, 2001, 22: 357- 363.

[7] 张弢, 王繁泷, 梅冰松, 等. 自行车道路交通事故损伤特征研究与应用[J]. 中国法医学杂志, 2003, 18(1): 21- 22.

[8] 任建安, 黎介寿. 自行车导致的腹部外伤自行车把综合征[J]. 中华创伤杂志, 1994, 10(2): 58- 59.

(收稿日期: 2007- 04- 13)

(本文编辑: 秦志强)

欢迎订阅 《法医学杂志》