

Comparison Analysis of Car-Pedestrian and Car-Bicyclist Crash

Fuhao Mo, Jikuang Yang

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

Email: mofuhao1986@163.com

Abstract: Car-pedestrian and car-bicyclist accidents reconstructions were carried out using selected accident data from an in-depth study database for validating the simulation model. Based on the validated model, this paper set up the parameter analysis model as well as adopting different vehicle velocity, pedestrian/bicyclist velocity, crash position and percent Human-Body 3D Mathematical Model. Then, the influence of these parameters on pedestrian and bicyclist head kinematics responses were analyzed. Considering pedestrian and bicyclist safety at the same time, the research results provide the references for the establishment and improvement of traffic safety regulation.

Keywords: pedestrian; bicyclist; accident reconstruction; kinematics response

行人及骑自行车人与轿车碰撞的对比分析

莫富灏，杨济匡

湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室，长沙，中国，410082

Email: mofuhao1986@163.com

摘要：本文提取了深入的事故调查研究中的数据，利用多刚体动力学软件MADYMO重建了轿车-行人与轿车-自行车事故，验证了仿真模型的有效性。基于验证模型建立参数分析模型，设定不同的汽车车速、行人/骑自行车人速度、碰撞位置及百分位人体模型，从而对比分析了这些参数对两者头部动力学响应的影响。在同时考虑保护行人和骑自行车人安全的情况下，研究结果为法规测试程序的制定和完善提供了参考依据。

关键词：行人；骑自行车人；事故重建；动力学响应

1 引言

行人与骑自行车人是易受伤道路使用人群的主要组成部分，其交通伤的防护也一直是人们关心的焦点。2007年我国因道路交通事故死亡的行人21106人，骑自行车人7553人，分别占道路交通事故死亡人数的24.76%、9.25%^[1]。

行人与骑自行车人交通伤中颅脑损伤较为常见，如在湛江市医院2003年前收集的4000例交通伤案例中，行人和自行车人占总数的63.1%，头部损伤占到36.34%，开放性颅脑损伤占总数的23.8%^[2]。

2 仿真方法

行人和骑自行车人事故重建主要依靠采集和推算

科技部国家“十一五”863计划项目(2006AA110101)，教育部、国家外国专家局“111计划”项目(111-2-11)，国家财政部“中气项目”(2007-237)，湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室自主项目(60870004)。

汽车的初始速度、汽车的碰撞速度、反应地点、碰撞点、行人和骑自行车人的速度和方向等数据。详尽的事故数据信息是事故重建真实性的前提，本文中事故数据通过事故现场、交警部门及医院采集并核对整理。

本文利用MADYMO碰撞仿真软件，重现了长沙地区的大众捷达车型的轿车-自行车及轿车-行人碰撞事故，并将仿真结果与现实事故进行对比分析，从而验证了仿真方法的有效性和汽车及自行车模型的准确性。事故重建中，行人和骑自行车人仿真模型是根据事故实际数据，通过缩放50百分位CPM人体模型得来，自行车尺寸通过测量现场事故自行车得来。基于事故车型，建立了轿车-行人与轿车-自行车碰撞仿真参数分析模型，分析了碰撞位置、行人/骑自行车人速度、人体百分位模型以及轿车速度对行人或骑自行车人头部动力学响应的影响，并进一步对两者仿真结果进行了对比分析。

3 事故重建

3.1 事故信息

3.1.1 行人事故信息

事故发生时，行人由东往西行，大众捷达轿车由南往北行驶。虽然司机采取了紧急刹车措施，但轿车的汽车左侧仍撞到了行人，行人头部与挡风玻璃相撞，碰撞时刻轿车的速度约为30km/h。如图1所示落地后最终位置，车辆在其右后方留下了最长达5.13m的刹车印，行人头部与双黄线横向距离为0.59m，与车辆左前轮纵向距离为4.08m，行人抛出距离约为6m。

行人是一名17岁的学生，身高171cm，体重80kg；他受到的主要伤害是脑震荡(AIS2)及左腿外伤(AIS1)。

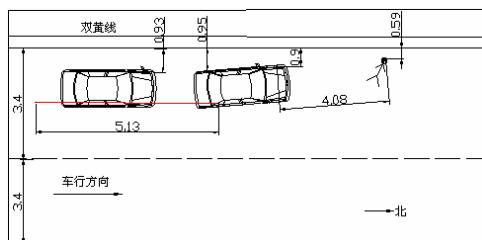


Figure 1. Scene sketch

图1. 事故现场草图

3.1.2 骑自行车人事故信息

一名男性骑自行车人被一辆VW捷达撞伤，估计当时碰撞速度为30km/h左右。当时骑自行车人正骑车穿过街道，轿车正准备通过红绿灯路口。由于速度较快，当司机发现骑自行车人时，尽管他全力刹车，但轿车仍撞上了骑自行车人，现场草图如图2。

当时正在下雨，因而事故车辆并未留下明显的刹车痕。骑自行车人与自行车的抛出距离范围分别是 $10m \pm 2m$ 和 $11 \pm 2m$ 。骑自行车人的具体损伤情况是头皮破裂(AIS1)以及胫骨骨折(AIS2)。

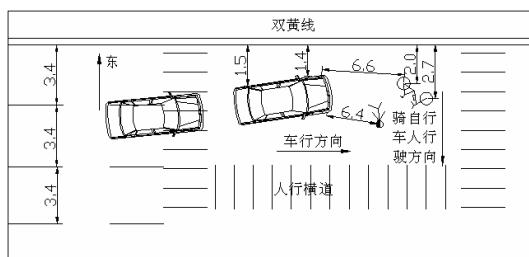


Figure 2. Scene sketch

图2. 现场草图及照片

3.2 事故重建

3.2.1 行人事故重建

碰撞速度设定在 $30km/h \pm 3km/h$ ，通过回访记录设定行人在碰撞时刻静止站立图3对比了仿真中碰撞点与实际事故的碰撞点。最初，行人下肢与保险杠发生碰撞，之后大腿与图示发动机边缘位置碰撞；紧接着行人头部与挡风玻璃下部相撞。仿真中行人抛出距离为5.8m，仿真中车辆的碰撞速度为28.6km/h。这与实际事故的结果基本相符，仿真模型可用作进一步分析模型。

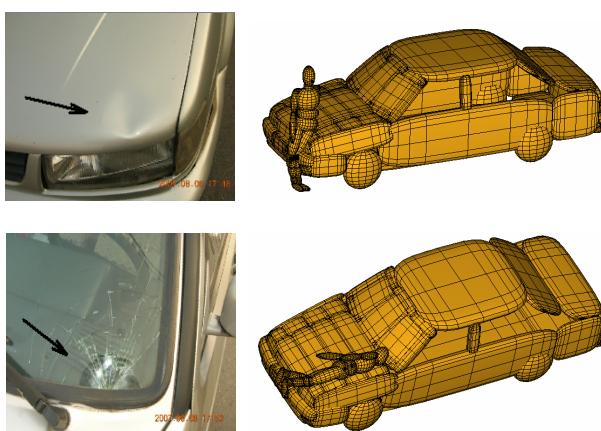


Figure 3. The comparison between scene marks and reconstruction

图3. 现场痕迹与事故重建对比

3.2.2 骑自行车人事故重建

事故重建中如现场照片(图4)设定初始碰撞点为大灯处；碰撞时刻轿车速度约为 $30 \pm 3km/h$ ，自行车与骑自行车人速度为 $2m/s$ 。碰撞初始时刻，轿车左大灯与骑自行车人右侧相撞，之后骑车者头部与雨刮器处相撞。事故重建结果中，轿车碰撞时刻速度为 $30.2km/h$ ，在最终位置上自行车后轮距轿车左前轮距离为 $6.9m$ ，骑自行车人头部距轿车右前轮 $5.9m$ ，可见重建结果与事故现场数据基本相符，仿真模型可用作进一步分析模型。

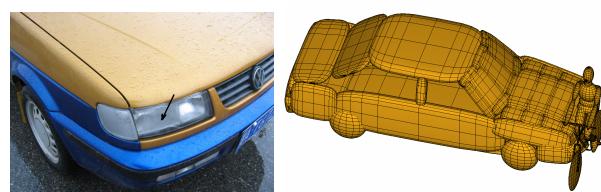


Figure 4. The comparison between scene marks and reconstruction

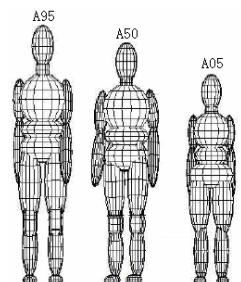
图4. 碰撞痕迹与仿真结果的对比

4 参数分析模型

4.1 模型建立

4.1.1 行人/骑自行车人模型

本文行人/骑自行车人模型采用瑞典查尔摩斯大学的CPM (Chalmers Pedestrian Model) 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。由50百分位假人的缩放可得到95百分位和5百分位的假人模型（图5），本文将使用三个多刚体人体模型全面考查典型的的不同百分位人群在碰撞中的动力学响应的区别；人体模型的有效性均在查尔摩斯进行与不同车型碰撞的参数研究中得到过验证^[4]。



假人模型 A95 A50 A05

图5. 假人模型人体测量学参数

4.1.2 轿车及自行车模型

轿车模型基于两起事故中的大众捷达轿车模型建立(图6 a.), 主要包含保险杠、发动机罩前缘、发动机罩、挡风玻璃、车顶、车轮等部件, 各部件分别采用一个或多个刚体椭球进行拟合; 而各部件的机械特性则根据Luis Martinez等人总结的EuroNCAP行人保护试验中部件力-变形曲线设定^[5]。

如图6 b.,选取事故中我国较为普遍的26式自行车建立自行车模型。自行车由一个自由铰链与全局坐标系相连，并采用四个转动铰链来描述部件间相对转动。自行车重量为15kg，车轮半径为300mm，轮距为950mm，坐高为850mm，刚度曲线采用Tetsuo Makin

等人的试验曲线设定^[6]。

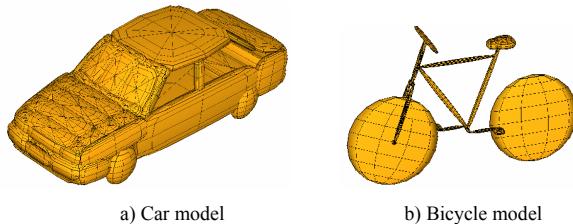


Figure 6. The car and bicycle models

图6. 轿车及自行车模型

4.2 仿真参数设计

本文参数研究主要考虑汽车行驶速度、行人或自行车行驶速度、碰撞位置以及三种不同百分位的人体模型。参数分析方法主要采用Box等人1978年提出的因子试验方法，该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。

行人及自行车事故中， 30km/h - 50km/h 是常见的事故车辆速度范围。Astrid Linder等人的研究表明一个正常男性在跑步机上测试：快速走动在 1.5 - 2.1m/s 之间，跑步时则超过 3m/s ^[7]。考虑到行人及自行车的通常速度，并兼顾行人的快速跑动及自行车较低速度下运行，设定其运行速度在 2.1m/s - 3.5m/s 之间。分析中碰撞位置右侧偏移若超过 0.25m ，骑车人头部将不予车辆前部结构发生碰撞，因此，为对比行人和骑自行车人相对车辆前部结构的动力学响应区别，设定人体重心左右偏移 0.25m 进行对比分析。而选用三种不同百分位下人体模型则为了分析典型的不同身高人群在碰撞中的动力学响应的区别。

Table 1. Input parameters

表1. 碰撞模型输入参数

输入参数	取值		
	最小值	中间值	最大值
汽车速度	30km/h	40km/h	50km/h
行人/骑自行车人速度	2.1m/s	2.8m/s	3.5m/s
碰撞位置	左则偏置 0.25m	车辆保险杠中心	右侧偏置 0.25m
人体模型	5 百分位	50 百分位	95 百分位

输入参数设置如表1,首先利用单因子法分析行人/骑自行车人速度、碰撞位置对人体模型头部运动学响应的影响,而其余输入参数均取中间值;考虑到车辆

速度和人体模型的差异对头部动力学响应有着显著的影响，利用全因子法对它们进行分析，其余值取中间值。考虑到骑自行车人坐立时的头部高度与行人站立时头部高度的差异，表2记录了骑自行车人模型及行人模型的头部及臀部高度的详细的数据对比。图7则给定了轿车-骑自行车人碰撞位置示意图，轿车-行人碰撞位置设定类似。

Table 2. The contrast between pedestrian and bicyclist
表2. 行人及骑自行车人模型头部及臀部高度对比(单位: mm)

不同百分位 人体模型身 高	1522		1750		1850	
	臀部	头部	臀部	头部	臀部	头部
行人	850	1522	1000	1750	1060	1850
骑自行车人	900	1472	980	1730	1010	1800

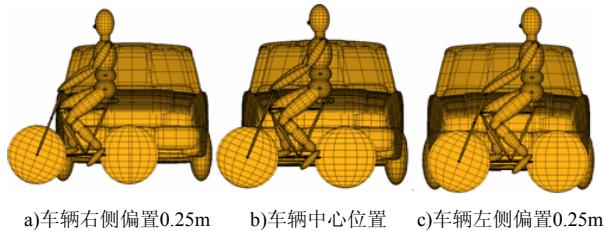


Figure 7. The collision position between car and bicycle
图7. 汽车-骑自行车人碰撞位置

4.3 主要分析参数

针对Euro NCAP行人头部保护测试程序，本文输出参数的对比分析主要考虑人体模型头部与车辆碰撞的时刻、角度、相对速度和WAD。

4.3.1 头部碰撞相对速度

头部与车辆接触时刻头部绝对速度，定义如下(图8):

$$V = (V_x^2 + V_z^2)^{1/2} \quad (1)$$

而头部碰撞相对速度则为:

$$V' = [(V_x - V_{Cx})^2 + V_z^2]^{1/2} \quad (2)$$

式(1)、(2)中 V_x 为头部水平方向的速度， V_z 为头部竖直方向的速度， V 为头部绝对速度；式2中 V_{Cx} 为碰撞时刻轿车行驶速度， V' 为头部碰撞相对速度。

4.3.2 头部碰撞角度

头部碰撞角度是碰撞开始时刻头部相对于水平地面的角度，定义如下：

$$\beta = \arctan V_z / V_x \quad (3)$$

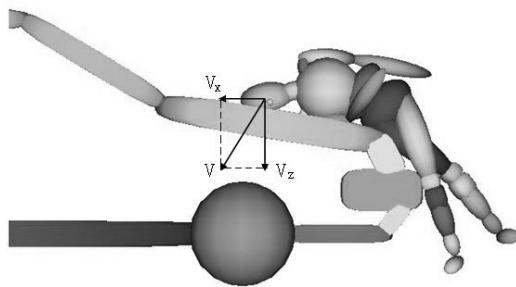


Figure 8. The head response at impact point
图8. 碰撞时刻头部响应

式(3)中 β 定义为头部合成线性速度与水平线的夹角，其余同3.3.1中所述。

5 仿真结果分析与讨论

5.1 仿真结果分析

5.1.1 行人/骑自行车人速度

如表3所示，改变行人与骑自行车人的速度对人体头部动力学响应参数的影响幅度并不大，但较显著的一条规律是：随着行人与骑自行车人速度的增加碰撞时刻逐渐增大。行人与车辆碰撞的角度在60°左右，此与Euro NCAP设定的65°差别不大，行人的WAD值均未超过2100mm的行人保护碰撞测试程序最大边界。在相同的行人与骑自行车人速度下，骑自行车人头部与车辆碰撞时刻均比行人要迟，而头部碰撞相对速度及碰撞角度均比行人要大，WAD则均大于行人并接近甚至超过2100mm的行人法规最大边界。

Table 3. The influence of speed of pedestrian and bicyclist
表3. 行人及骑自行车人速度改变的影响

输出参数	碰撞时 刻(ms)	碰撞速 度(m/s)	碰撞角 度(°)	WAD (mm)
2. 行人	127.1	12.37	62.2	1921
1 骑自行车人	143.3	12.71	78.6	2123
2. 行人	127.7	12.4	61.4	1880
8 骑自行车人	144.9	12.63	76.4	2097
3. 行人	129	12.33	59.9	1863
5 骑自行车人	147.7	12.39	74.6	2079

注：表中头部碰撞相对速度均简写为碰撞速度，文章中表格均如此。

5.1.2 行人/骑自行车人碰撞位置

不同的碰撞位置对行人及骑自行车人的头部运动学响应有着显著的影响(表4)，碰撞时刻、速度及角度和WAD均在较大的范围内变化。而行人与车辆碰撞相

对角度在60°到65°之间，WAD均落在成人头部碰撞测试区域1500-2100之间。值得注意的是：同一碰撞位置时，骑自行车人头部与车辆碰撞时刻均比行人要迟，而碰撞角度均比行人大，WAD也均大于行人并接近甚至超过2100mm的行人法规最大边界。

**Table 4. The influence of impact position
表4. 碰撞位置的影响**

输出参数	碰撞时刻 碰撞速度 碰撞角度 WAD			
	(ms)	(m/s)	(°)	(mm)
车辆中心	行人	127.7	12.4	61.4
	骑自行车人	144.9	12.63	76.4
车辆左侧偏置 0.25m	行人	125.8	12.81	64.3
	骑自行车人	140.4	12.80	80.1
车辆右侧偏置 0.25m	行人	132.3	12.07	59.9
	骑自行车人	160.3	10.53	69.3

5.1.3 车辆速度及不同人体模型

改变车辆速度及涵盖不同身高体重的人体百分位模型，仿真结果如表5。

**Table 5. The influence of impact speed of the car
表5. 车速及不同人体模型的影响**

	车辆速度 30km/h			
	碰撞时刻 (ms)	碰撞速度 (m/s)	碰撞角度 (°)	WAD (mm)
5 百分位	行人	129.7	7.16	54.3
	骑自行车人	174.2	6.34	47.5
50 百分位	行人	173.2	7.15	51.9
	骑自行车人	192.7	8.43	67.2
95 百分位	行人	179	9.41	67.7
	骑自行车人	197.6	8.78	70.3
车辆速度 40km/h				
	碰撞时刻 (ms)	碰撞速度 (m/s)	碰撞角度 (°)	WAD (mm)
5 百分位	行人	99.5	9.97	52.2
	骑自行车人	133.4	10.15	57.5
50 百分位	行人	127.7	12.40	61.4
	骑自行车人	144.9	12.63	76.4
95 百分位	行人	134.6	14.45	78.4
	骑自行车人	148.5	13.03	81.9

	车辆速度 50km/h			
	碰撞时刻 (ms)	碰撞速度 (m/s)	碰撞角度 (°)	WAD (mm)
5 百分位	行人	80.0	12.84	52.3
	骑自行车人	107.0	13.26	60.0
50 百分位	行人	104.2	15.41	64.1
	骑自行车人	116.9	16.29	82.6
95 百分位	行人	111.1	17.42	84.0
	骑自行车人	119.9	16.51	2218

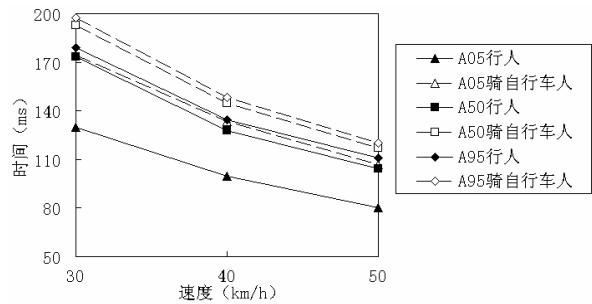


Figure 9. The influence of velocity of car and deferent human model on impact moment

图9. 车速及不同人体模型对碰撞时刻的影响

就碰撞时刻而言，如图9，不同车速和不同百分位人体模型下，骑自行车人头部与车辆发动机罩或挡风玻璃接触时刻均明显迟于行人。随着车速的增加，碰撞时刻均逐步减少；而随着人体模型百分位的增加，碰撞时刻均有所延迟。这也为车辆主动式发动机罩设计的时间定义提供了参考依据。

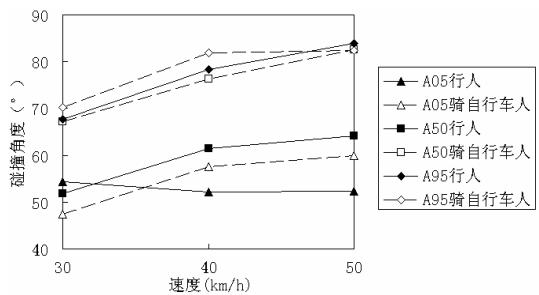


Figure 10. The influence of velocity of car and deferent human model on impact angle

图10. 车速及不同人体模型对碰撞角度的影响

如图10，行人与车辆碰撞相对角度基本上控制在65度以内，而相同的车辆速度及人体模型时，大多数情况下骑自行车人头部与车辆碰撞的角度大于行人，且多数已超过70度，与Euro NCAP测试程序设定的成

人头部65度有着较大的差异。随着人体模型百分位或车速的增加，骑自行车人头部碰撞角度均呈上升趋势；对于行人，除5百分位人体模型外，其余情况下车速的增加亦与其头部碰撞角度呈正比关系。

随着车速的增加和人体模型百分位的增加，头部绕转距离也不断增大。此外，不论骑自行车人初始头部高度比行人的大还是小，行人头部碰撞WAD均在法规设定范围内，骑自行车人的WAD均大于行人，大多数超过1800mm，且超过1/3的WAD已超过Euro NCAP测试区域的最大绕转距离2100mm。

对于头部相对碰撞速度来说而言，车速和人体模型百分位的增加会导致其有显著的上升趋势，在这一点上骑自行车人和行人有着一致的特点。然而行人与车辆碰撞相对速度的波动范围在25.7km/h-62.7km/h之间波动，与Euro NCAP中设定的40km/h时差别较大；同样车速及同样人体模型下，骑自行车人与行人的头部碰撞相对速度差别并不明显。

5.2 行人/骑自行车人头部动力学响应讨论

行人头部动力学响应值基本位于Euro NCAP测试程序设定范围内，而骑自行车人与行人头部动力学响应有一定区别，通常碰撞时刻迟于行人，碰撞角度及WAD大于行人，而碰撞速度与行人差别不大。

与行人相比，仿真中发现骑自行车人臀部在发动机罩上有一定的滑动，与Tetsuo Maki等人^[8]的研究结果是一致的，这可能是造成骑自行车人WAD值较大的原因。骑自行车人与车辆碰撞的WAD多数已超过1800mm，因此其与轿车碰撞区域中大部分为对人体头部产生较轻损伤的挡风玻璃区域，同时包含可能引起较大损伤的A柱及车顶。因此，在考虑骑自行车人损伤情况下，是否基于行人法规测试程序进行一定的改进而建立骑自行车人法规，有待进一步讨论。

此外，行人与车辆碰撞相对速度的波动范围在25.7km/h-62.7km/h之间，与Euro NCAP中设定的40km/h差别较大，是否有必要增大测试程序中的碰撞相对速度，有待进一步讨论。

6 结论

(1)头部碰撞条件与车辆速度、人体百分位、行人

/骑自行车人速度、人体与车辆碰撞位置有明显的联系；行人/骑自行车人速度则对其影响较小；

(2)不论行人还是骑自行车人，人体头部相对碰撞速度、WAD会随着车辆碰撞速度增加而呈上升趋势；

(3)当采用同样的车辆速度、人体百分比模型及行人/骑自行车人速度时，骑自行车人头部与车辆前部结构接触的时间往往比行人要迟，碰撞角度及WAD则通常大于行人。因此，本文为如何建立保护骑自行车人头部的法规，以及设计防护骑自行车人头部损伤的措施提供了参考依据。

致谢

科技部国家“十一五”863计划“汽车开发先进技术”重点项目(2006AA110101)，教育部、国家外国专家局“111计划”项目(111-2-11)，国家财政部“高水平汽车自主能力建设-中气项目”(2007-237)，湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室自主研究项目(60870004)。

References (参考文献)

- [1] Traffic Administration, the Ministry of Public Security. Statistics of Road Traffic Accidents in P.R. of China (2007) [R]. 2008. (in Chinese)
公安部.中华人民共和国道路交通事故统计年报(2007年度).北京：公安部交通管理局，2008.
- [2] Kong Shenglu, Oyang Xianghua, Peng Zian. Epidemiological Characteristics of 4000 traffic injuries [J]. J Trauma Surg,2003,Vol.5,No.2
孔禄生,欧阳向华,彭自安. 4000 例交通事故伤流行病学特征[J]. 创伤外科杂志, 2003, 5 (2) : 141.
- [3] J.K. YANG, et al. 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] J.K. YANG. Effects of Vehicle Front Design Parameters on Pedestrian Head-brain Injury Protection [C]. In: The 18th ESV Conference. Nagoya, 19-22 May, 2003, Paper Number: 289
- [5] Luis Martinez, et al. Stiffness Corridors of the European Fleet For Pedestrian Simulation[C]. In: The 20th ESV Conference. Lyon, 18-21 June, 2007, Paper Number: 07-0267
- [6] Tetsuo Maki, Janusz Kajzer. The behavior of bicyclists in frontal and rear crash accidents with cars [C]. JSME, 2001(22):357-363
- [7] Astrid Linder, Clay Douglas, et al. Mathematical Simulations of Real-world Pedestrian-vehicle Collisions[C]. In: The 19th ESV Conference. Washington DC, 6-7 June 2005, Paper Number: 05-0021
- [8] Tetsuo Maki, et al. Comparative analysis of vehicle-bicyclist and vehicle-pedestrian accidents in Japan. Accident Analysis & Prevention [J]. 2003(35):927-940