

# Pedestrian Motion Simulation of Pedestrian-Vehicle Accidents for Vehicle Velocity Analysis

GUO Rui, YUAN Quan, LI -Yi Bing

(State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Through computer simulation of pedestrian-vehicle accidents based on the proved pedestrian-vehicle accidents finite element model to study the link between the collision velocity and the human body throw distance, the human body flying distance, the human body sliding distance, the velocity analysis model was established. If information was missing in the above circumstances, according to study the relationship between the collision velocity and the turning angle of the human body, the height limits of human flight, the analysis of the collision velocity can also be provided a reference.

**Keywords:** Accident reconstruction, Pedestrian-vehicle accidents model, Vehicle velocity analysis

## 面向车速分析的人车碰撞事故行人运动仿真研究

郭锐, 袁泉, 李一兵

(清华大学 汽车安全与节能国家重点实验室, 北京 100084)

**摘要:** 基于经过验证的人车碰撞有限元模型对不同车速情况下的人车碰撞事故进行仿真, 研究人体抛距、人体空中飞行距离、人体落地滑行距离等事故现场信息与碰撞车速之间的联系, 建立车速分析模型。在以上信息缺失的情况下, 通过研究人体空中翻转角度、人体空中飞行极限高度等事故信息与碰撞车速之间的关系, 亦可为车辆碰撞车速的估算提供参考。

**关键词:** 交通事故再现, 人车碰撞事故模型, 车速分析

### 1 引言

人车碰撞交通事故是我国一种典型的交通事故类型, 人车碰撞事故中的行人死亡人数长期居高不下。以 2008 年为例, 根据交管部门的统计数据, 我国步行交通方式死亡人数达 18913 人, 占到全部道路交通事故死亡人数的 25.74%<sup>[1]</sup>。人车碰撞交通事故的责任认定关系到众多家庭的实际利益与社会的和谐稳定, 而碰撞车速鉴定又是交通事故处理的重要一环, 因此, 对人车碰撞事故的车速分析方法进行深入研究有着重要的现实意义。

本文主要利用人车碰撞有限元模型进行仿真试验, 重点研究人体空中飞行距离、人体落地滑行距离、人体空中翻转角度、人体空中飞行极限高度等事故信息与碰撞车速之间的联系, 构建基于以上信息的人车碰撞事故车速分析模型。

### 2 人车碰撞有限元仿真

在人车碰撞事故研究领域, 早期人们主要采用理论分析和实验的方法, 如日本的林洋提出了车速—人体抛距理论公式<sup>[2]</sup>。随着计算机技术的高速发展, 基于多刚体动力学的仿真软件如 MADYMO 等普遍应用于人车碰撞事故研究领域<sup>[3]</sup>。目前, 有限元仿真模型由于其诸多优点, 在人车碰撞事故研究领域发挥越来越重要的作用<sup>[4]</sup>。

#### 2.1 人车碰撞有限元模型

采用研究室已建立的经过验证的人车碰撞有限元模型进行仿真试验。其中, 行人模型的各体段尺寸及惯性参数均根据《中国成年人人体尺寸》(GB 10000—88)<sup>[5]</sup>、《人体模板设计和使用要求》(GB/T 15759—1995)<sup>[6]</sup>、《成年人人体惯性参数》(GB/T 17245—2004)<sup>[7]</sup>中 P50 男子均值取值。车辆建模可根据事故案例的具体车型, 设置车辆几何外形及整备质量参数, 在此采用我国保有量较大的 A 级轿车“捷达”作为车辆有限元模型的原型。路面建模可根据交通事故案例的具体路况, 设置道路的材料参数, 在此采用沥青混凝土材料路面。

所建立的行人模型、车辆及路面模型如图 1 所示。



图 1 车辆、行人及路面有限元模型

#### 2.2 人车碰撞仿真试验

这里设置车辆在 15—90km/h 的速度范围内，以每 5km/h 为速度间隔，从行人模型左侧共进行 16 次仿真碰撞试验。假设车辆进行全制动，制动减速度为  $7m/s^2$ 。根据实验数据，行人与车辆表面的摩擦系数设置为 0.3，行人与路面的摩擦系数设置为 0.5。

在仿真试验中，假设车辆以 40km/h 的初速度撞击站立于人行横道上的行人，同时车辆以  $7m/s^2$  的制动减速度进行制动，仿真得到的碰撞过程如图 2 所示，从左至右依次为典型碰撞过程的左视图、正视图和俯视图。

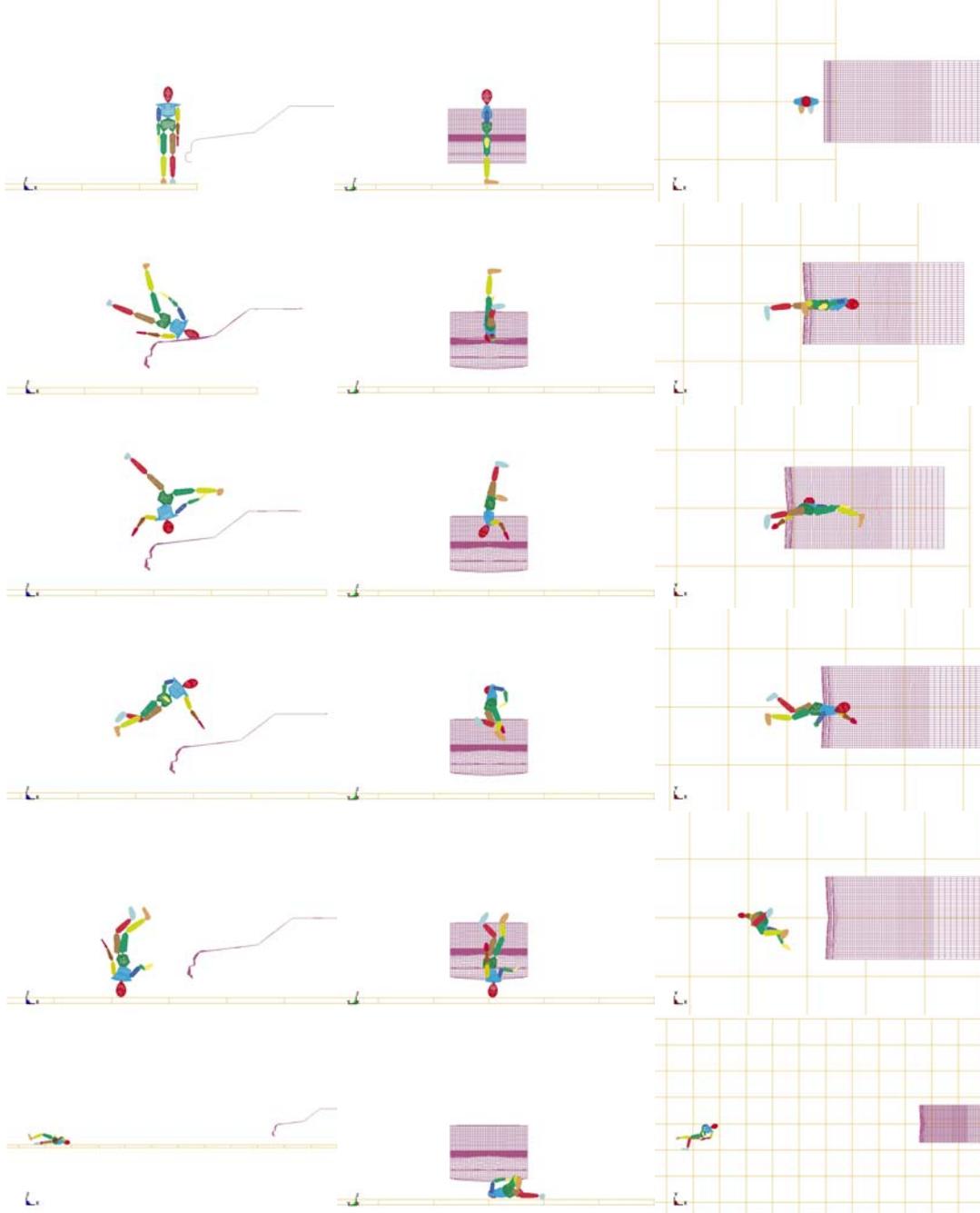


图 2 典型人车碰撞过程

### 3 碰撞车速—人体抛距研究

在经典的人车碰撞事故研究中，行人人体抛距对碰撞车速分析起着重要的作用，其中人体抛距又由人体空中飞行距离和人体落地滑行距离两部分组成。根据车速—人体抛距理论公式<sup>[2]</sup>可得：

$$x = v \sqrt{\frac{2h}{g} + \frac{v^2}{2g\mu}} \quad (1)$$

此处行人撞飞高度  $h$  取 1m, 重力加速度  $g$  取 9.8 m/s<sup>2</sup>, 摩擦系数  $\mu$  取 0.5, 速度  $v$  单位为 m/s。

这里以式 (1) 的计算结果与仿真试验数据进行对比研究。不同车速下由式 (1) 计算得出的公式法理论人体抛距、仿真试验人体抛距、人体空中飞行距离、人体落地滑行距离数据如表 1 所示:

表1 碰撞车速-人体抛距数据表

仿真试验车速 (km/h)	理论计算		仿真试验	
	公式法理论人体抛距 (m)	仿真试验人体抛距 (m)	人体空中飞行距离 (m)	人体落地滑行距离 (m)
15	3.65	3.46	2.00	1.46
20	5.66	5.41	3.64	1.77
25	8.06	8.27	5.14	3.13
30	10.85	11.61	5.88	5.73
35	14.03	14.40	6.31	8.09
40	17.61	17.80	8.21	9.59
45	21.58	22.87	11.14	11.73
50	25.95	26.56	12.56	14.00
55	30.71	30.52	14.48	16.04
60	35.86	35.50	17.86	17.64
65	41.40	39.50	19.29	20.21
70	47.35	46.44	22.90	23.54
75	53.68	55.69	27.75	27.94
80	60.41	61.52	29.48	32.04
85	67.53	71.65	34.16	37.49
90	75.04	77.90	35.83	42.07

对仿真试验数据进行拟合, 并与公式法理论人体抛距曲线对比如图 3 所示:

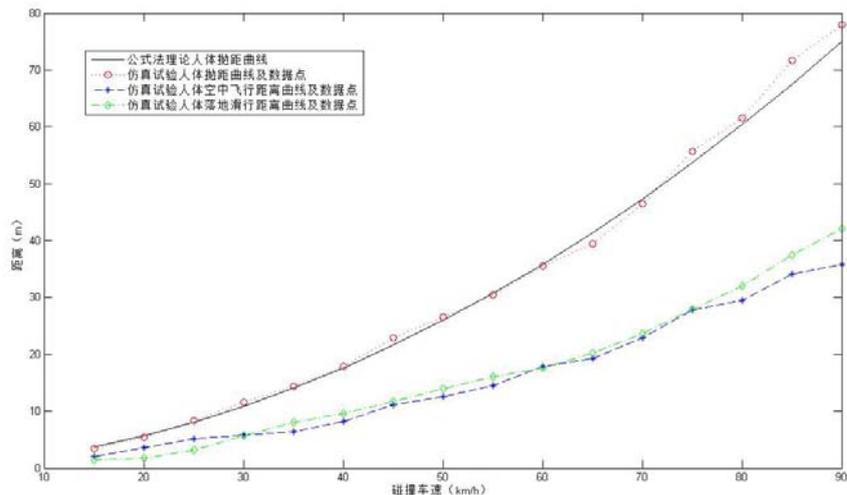


图3 仿真试验数据对比

对人体空中飞行距离仿真试验数据进行二次多项式拟合可得:

$$x_1 = 0.0042v^2 + 0.0172v + 1.2874 \quad (2)$$

$x_1$  为人体空中飞行距离 (单位: m),  $v$  为仿真试验车速 (单位: km/h)。

将仿真试验数据曲线与二次多项式拟合曲线对比如图 4:

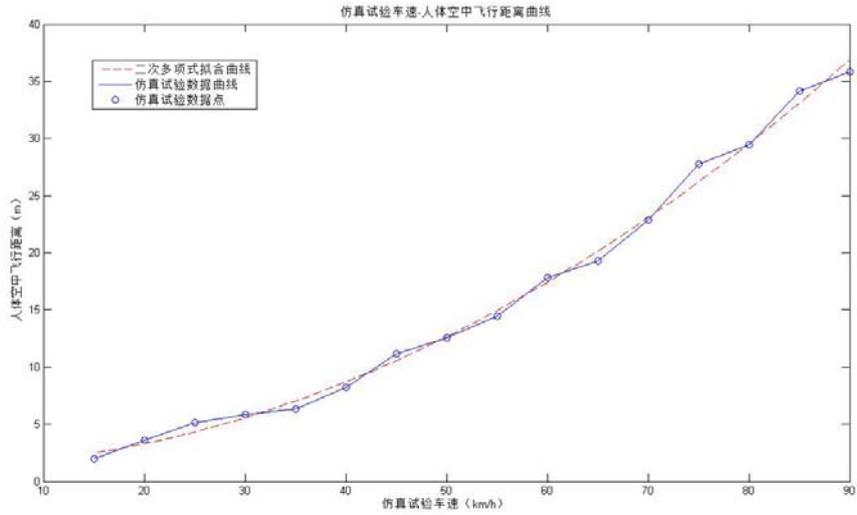


图 4 仿真试验车速-人体空中飞行距离曲线

由此可知,人车碰撞事故中碰撞车速与人体空中飞行距离之间存在着一定的关系,在碰撞后车辆未留制动印迹或事故后行人被抢救离开现场,无法确认行人的最终倒地位置的情况下,如能确定碰撞点与人体首次落地点之间的人体空中飞行距离,也可利用式(2)对碰撞车速进行估算。

对人体落地滑行距离仿真试验数据进行二次多项式拟合可得:

$$x_2 = 0.005v^2 - 0.001v + 0.7288 \quad (3)$$

$x_2$  为人体落地滑行距离(单位: m),  $v$  为仿真试验车速(单位: km/h)。

将仿真试验数据曲线与二次多项式拟合曲线对比见图 5:

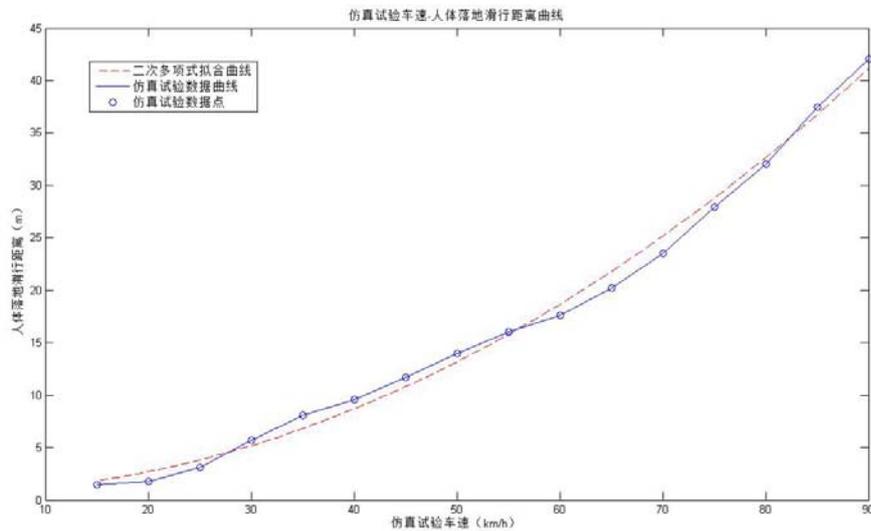


图 5 仿真试验车速-人体落地滑行距离曲线

由此可知,人车事故中碰撞车速与人体落地滑行距离之间存在着一定的关系,在碰撞后车辆未留制动印迹、碰撞接触点具体位置未知的情况下,如果已知人体落地的滑行距离,也可利用式(3)对碰撞车速进行估算。

#### 4 碰撞车速—人体空中飞行极限高度研究

人车碰撞事故中,因伤员被抢救、人车碰撞点位置不确定等各种因素的影响,很多情况下无法获取准确的行人人体抛距相关数据,由此导致无法利用经典理论方法对肇事车辆碰撞车速进行鉴定。但是通过研究行人被撞后在空中飞行的过程

发现，人体下躯干飞行轨迹是事故现场目击证人及事故现场录像较易获取的事故信息，且人体下躯干质心与人体整体质心位置较接近<sup>[7]</sup>，人体在空中翻转对人体下躯干质心运动轨迹的影响较小，因而利用人体下躯干质心运动轨迹极限高度研究碰撞车速是合理可行的。在仿真研究中，以人体下躯干质心运动轨迹极限高度值作为人体空中飞行极限高度。

不同碰撞车速下人体空中飞行极限高度数据如表 2 所示：

**表2 碰撞车速-人体空中飞行极限高度数据表**

仿真试验车速 (km/h)	人体空中飞行极限高度 (m)
15	1.09
20	1.33
25	1.46
30	1.55
35	1.62
40	1.81
45	2.21
50	2.38
55	2.55
60	2.88
65	3.18
70	3.61
75	3.95
80	4.32
85	4.43
90	4.73

对以上仿真试验数据进行二次多项式拟合可得：

$$H = 0.0003v^2 + 0.0142v + 0.8183 \quad (4)$$

$H$  为人体空中飞行极限高度（单位： $m$ ）， $v$  为仿真试验车速（单位： $km/h$ ）。

将仿真试验数据曲线与二次多项式拟合曲线对比如图 6：

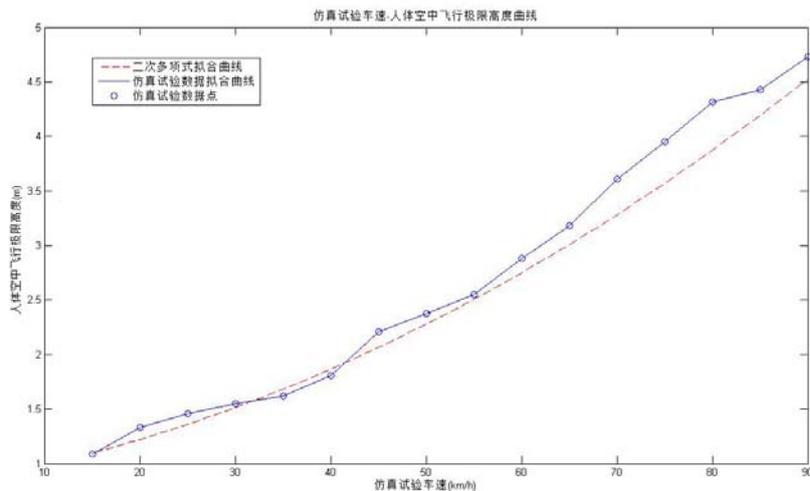


图 6 仿真试验车速-人体空中飞行极限高度曲线

由此可知，人车碰撞事故中碰撞车速与人体空中飞行极限高度之间存在着一定的关系，在实际的交通事故车速分析过程中，如果事故目击证人证言中有人体抛出高度的相关描述，或事故现场录像中可获取人体抛出高度数据，就可利用式（4）对碰撞车速的范围进行估算或辅助分析验证。

## 5 碰撞车速—人体空中翻转角度研究

通过研究行人被撞后在空中飞行的过程发现,人体空中翻转角度亦是事故现场目击证人及事故现场录像较易捕捉到的事故信息,因而研究人体空中翻转角度与碰撞车速的关系对事故的深入分析有一定意义。在仿真研究中,以人体落地时上身轴线相对于初始站立位置转过的角度作为人体空中翻转角度。

不同车速下人体空中翻转角度数据如表 3 所示:

**表3 碰撞车速-人体空中翻转角度数据表**

仿真试验车速 $v$ (km/h)	人体空中翻转角度 ( $^{\circ}$ )
15	110
20	220
25	305
30	340
35	410
40	540
45	665
50	845
55	920
60	1045
65	1095
70	1260
75	1350
80	1480
85	1690
90	1965

对以上仿真试验数据进行二次多项式拟合可得:

$$\theta = 0.1261v^2 + 9.9676v - 47.6922 \quad (5)$$

$\theta$  为人体空中翻转角度 (单位:  $^{\circ}$ ),  $v$  为仿真试验车速 (单位: km/h)。

将仿真试验数据曲线与二次多项式拟合曲线对比见图 7:

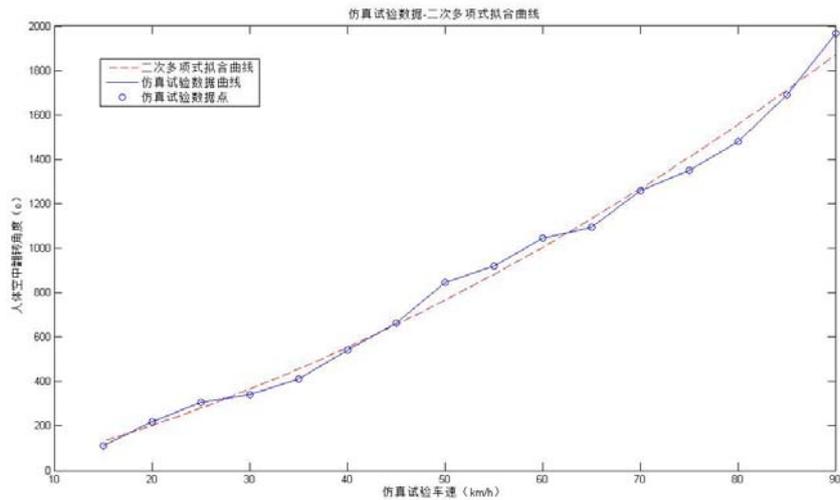


图 7 仿真试验车速-人体空中翻转角度曲线

由此可知,人车事故中碰撞车速与人体空中翻转角度之间存在着一定的关系,在实际的交通事故车速分析过程中,如果事故目击证人证言中有人体空中翻转角度的相关描述,或事故现场录像中可获得人体空中翻转角度数据,就可利用式(5)

对碰撞车速范围进行估算或辅助分析验证。

## 6 结论

- 1) 在人车碰撞事故仿真研究中, 利用人体空中飞行距离、人体落地滑行距离等事故现场信息与碰撞车速之间的联系构建了新的车速分析模型, 对原有的仅利用人体抛距进行车速分析的模型是有效的补充。
- 2) 在路面痕迹信息缺失的情况下, 通过研究行人被撞后的运动状况, 构建了基于人体空中飞行极限高度和人体空中翻转角度的碰撞车速分析模型, 提供了利用事故目击证人证言和事故现场录像资料辅助进行车速分析的可行性方案。

## 参考文献

- [1] 杨钧, 等. 中华人民共和国道路交通事故统计年报(2008年度) [R]. 北京: 公安部交通管理局, 2008
- [2] (日)林洋. 实用汽车事故鉴定学. 北京: 人民交通出版社, 2001
- [3] Robert.K, M.M,J.C.. The Causes of Head Injury in Vehicle-Pedestrian Impacts: Comparing the Relative Danger of Vehicle and Road Surface. SAE 2006-01-0462
- [4] Jaeho.S, C.U.. Investigating Pedestrian Kinematics with the Polar-II Finite Element Model. SAE 2007-01-0756
- [5] 中国成年人人体尺寸, GB 10000-88. 中华人民共和国国家标准
- [6] 人体模板设计和使用要求, GB/T 15759-1995. 中华人民共和国国家标准
- [7] 成年人人体惯性参数, GB/T 17245-2004. 中华人民共和国国家标准