

Factors Influence Drivers' Steering Evasive Maneuvers in Car - pedestrian Collision Accidents

Sun Xiaoyu, Zhu Xichan, Li Lin, Ma Zhixiong

Tongji University, Shanghai, 201804, P.R.China.

Email: tjsunxiaoyu@163.com

Abstract: The paper is based on the 58 pedestrian accident cases with steering evasive behavior, with the statistical analysis of existing accident information and motion information got through the PC - CRASH accident reconstruction software. By using Logistic regression analysis method, it is concluded that significant influencing factors of steering behavior taking time are light conditions, the types of scenarios, distance between vehicles and pedestrians. It can provide the technical reference for the setting of triggering conditions and the early warning mechanism in the development of emergency avoidance strategy and related products performance test.

Keywords: Steering evasive; Car-Pedestrian collision accidents ; PC-CRASH; Logistic regression model

车-行人碰撞事故下驾驶员转向避撞相关因素分析

孙晓宇, 朱西产, 李霖, 马志雄

同济大学, 上海, 中国, 201804

Email: tjsunxiaoyu@163.com

摘要: 本文基于 58 例驾驶员具有转向避撞行为的车-行人碰撞事故案例, 对已有事故信息及通过 PC-CRASH 软件进行事故重建得到的运动信息等进行统计分析。再经过 Logistic 回归分析, 得出光照条件、场景类型、车辆与行人之间距离对驾驶员转向避撞行为采取时刻影响显著, 可为车辆紧急避让策略开发中转向避撞的触发条件和预警机制的设定提供技术参考。

关键词: 转向避撞; 车-行人碰撞事故; PC-CRASH; Logistic 回归模型

1 引言

在人、车、环境共同作用的条件下, 引发交通事故的因素众多, 人和车的运动响应也相对复杂。据 2012 年美国、日本的交通事故统计数据显示, 行人死亡总人数占全部交通死亡总人数的 14.13% 和 36.35%^[1], 而在整个交通环境中, 行人作为弱势群体, 行人保护一直是汽车安全技术研究的重要组成部分。目前, 行人保护也更多的由传统的被动安全向主动安全发展, 以实现避免汽车与行人碰撞的主动预警。同时车辆对行人的探测能力较于对其他车辆的难度较大, 这给相关的主动安全技术开发提出难题。同时根据美国的 100car 对应的 500 例工况数据统计显示, 在危险工况中仅采取制动的占 64.6%, 仅采取转向的占 25.2%, 既采取转向又采取制动的占 10.2%^[2]。可见转向避撞在紧急避让行为中的重要性, 故而作为汽车主动安全研究热点的先进驾驶辅助系统 ADAS (Advanced Driver Assistance System) 的研究也从原来的纵向控制, 更多的向横向控制领域拓展, 所以针对驾驶员有转向行为的行人事故研究能够为紧急转向避撞策略的开发提供理论基础, 目前典型的系统有 Continental 的紧急转向辅助 ESA (Emergency Steering Assist) 系统^[3]、 Bosch 的 ESS (Evasive Steering Support) 系统^[4]和 Toyota 的预碰撞系统^[5]等。

在我们进行相关事故数据库统计时发现当事故工况是车辆直行与骑车人冲突时, 司机所采用的紧急避撞行为中, 转向避撞所占比例接近一半。同时我国事故工况与国外事故工况相比, 车辆行驶与骑行人的冲突所占比例明显增高, 这与我国国情密不可分。本次研究的基础是我国大陆地区的 58 例驾驶员有转向行为的车-行人碰撞事故, 从而获得驾驶员转向避撞采取时刻的相关因素, 为侧重于行人保护的转向避撞系统的介入时机和控制策略提供理论基础, 对于提高行人安全以及车辆的避撞能力具有研究意义。

2 事故信息统计分析

本文研究的 58 例档案事故中, 参与方为如轿车、面包车的小型车辆以及行人、骑车人, 对事故中已有的事故信息进行统计, 并通过 PC-CRASH 软件对事故进行重建, 以及通过 SPSS 软件进行数据分析, 考虑到事故重建获得数据的完整度和精度相当有限, 难以获得精准的车辆运动信息, 进而以定性分析为主探讨事故中影响转向行为采取时刻的因素。

2.1 确定相关因素

为保证统计质量、统计参数的准确性以及事故档案客观条件, 综合考虑事故准确性、国内外研究成果以及经典的汽车碰撞理论对事故影响因素初试筛选, 以保证数据统计的全面性与准确性, 所选事故因素应包括以下信息:

人员信息: (驾驶员、行人) 年龄, 性别, 身高, 体重, 是否饮酒, 是否佩戴安全带、衣服厚度, 驾驶员驾龄, 视野情况;

车辆信息: 车辆类型、汽车总质量、车辆使用时间, 车辆行驶里程, 车辆碰撞速度, 安全气囊是否打开, 前后排乘员乘坐情况;

事故信息: 事故场景类型, 碰撞部位, 接触范围, 行驶状态, 碰撞力方向, 初始碰撞位置, 事故时间, 天气情况;

道路信息: 道路类型、道路干湿情况、限速、道路线性、路面信号灯、路面材料、路面情况、道路流量。

就 58 例档案事故数据而言, 部分影响因素数据不完整, 例如驾驶员、行人的相关信息, 车辆的使用时间、行驶里程、安全气囊的打开情况等。部分影响因素数据过于集中, 包括道路类型、限速、路面材料, 车辆类型均为车长为 3.8m~5.5m, 车宽为 1.6m~2.0m 之间的轿车和面包车等小型车。数据的不完整以及过于集中, 以及相关的汽车质量, 前后排乘员乘坐情况主要用于后续的事故重建中车辆的设置, 此处不存在统计意义。

基于本次研究目的——探讨影响紧急转向避撞采取时刻的相关因素, 已有研究表明影响驾驶员在紧急情况下是否采取转向行为的显著性影响因素有驾驶员年龄、TTC (time-to-contact) 值、转向梯度、注意力集中程度、驾驶员是否疲劳驾驶、光照条件以及可利用的避撞空间^[6]。

最终综合考虑事故因素以及影响驾驶员紧急转向行为的因素, 最终选择相关因素为: 碰撞速度、事故场景类型、碰撞部位、光照条件、干湿情况, 具体含义及相关统计情况见下文。

2.2 相关因素统计分析

碰撞速度是事故的重要组成部分, 一定程度上能够反映驾驶员及行人的伤亡情况和驾驶员是否超速驾驶以及是否采取及时避撞措施。关于本次碰撞速度统计如表 1 所示。

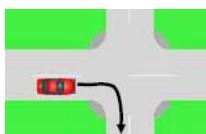
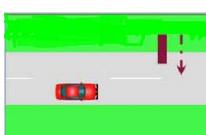
Table 1. Impact velocity
表 1. 碰撞速度

碰撞速度 (km/h)	≤ 20	20~40	40~60	> 60
数量	34	3	16	5
比例	58.62%	5.17%	27.59%	8.62%

由上述统计结果可知, 碰撞速度对应的中低速 ($\leq 40\text{km/h}$) 占比较多 (63.79%), 这与事故中采取了相应的避撞措施有关。

事故场景类型的分类参考了ASPECSS (Assessment methodologies for forward looking Integrated Pedestrian and further extension to Cyclists Safety) 项目当中的分类标准, 该标准参考了APROSYS(The European 6th Framework Programme Integrated Project on Advanced Protection Systems)、AEB测试机构、The vFSS group (“advanced Forward - looking Safety Systems”)所提供的事故场景分类标准, 并在其基础上研究了德国、英国的事故场景和GIDAS (German In Depth Accident Study) 德国深入交通事故研究的相关数据, 将事故场景分为如表2中8类, 并对其进行统计分析^[7]。

Table 2. The accident scene type
表 2. 事故场景类型

场景编号	示意图	描述	事故数量	比例
1		行人从近端直接横穿马路与车辆发生碰撞。无障碍物。	14	24.2%
2		行人从远端直接横穿马路与车辆发生碰撞。无障碍物。	31	53.4%
3		十字路口，汽车转向穿过中心转盘与行人发生碰撞。	1	1.7%
4		十字路口，汽车转向但没有穿过中心转盘与行人发生碰撞。	0	0
5		在障碍物阻碍视线的情况下，行人从近端直接横穿马路与车辆发生碰撞。	2	3.4%
6		在障碍物阻碍视线的情况下，行人从远端直接横穿马路与车辆发生碰撞。	2	3.4%
7		车辆与同向行驶的行人发生碰撞。	7	12.2%
8	----	其他情况（如行人静止）	1	1.7%

从数据分析可以得知，有转向行为的行人碰撞事故中，事故场景 2 占比最多，达到 53.4%。其次是事故场景 1，占比 24.2%，两者之和达到 77.6%。由此可以分析得知，在具有转向行为的交通事故中，大部分是车辆在直行的情况下，行人横穿马路发生碰撞，主要是由于行人随意横穿马路或驾驶员未按规定礼让行人，同时碰撞事故中行人从车辆远端横穿马路的场景比例比从近端横穿马路的情况大，可能是因为驾驶员和行人在场景 1 的情况下具有更大警觉性，同样其他事故场景中，包括有障碍物，以及处于道路交口处，相对于场景 1、2 较为复杂，都会引起驾驶员和行人相对较高的警觉性。

在研究车-行人碰撞事故中，驾驶员转向避撞行为采取的是否及时，在碰撞点的位置上有一定程度的反应，同时碰撞点也与场景类型有相关性，为便于统计，将碰撞点所在车辆前部位置分为四部分，以及其他侧碰、尾部碰撞等，其中关于碰撞部位的划分如图 1 所示，统计结果如表 3 所示，从中可知驾驶员有转向行为行人事故碰撞多发生在汽车前端两侧。

Table 3. Colliding parts
表 3. 碰撞部位

碰撞部位	1	2	3	4	5
描述	车辆前脸最右端至右端 25% 之间的区域	车辆前脸右端 25% 至中间 50% 之间的区域	车辆前脸 50% 区域至右端 75% 之间的区域	车辆前脸右端 75% 至前脸最左端之间的区域	其他
数量	18	9	9	16	6
比例	31.0%	15.5%	15.5%	27.6%	10.4%



Figure 1. Collision parts diagram
图 1. 碰撞部位示意图

行车中的光照条件对行车安全有着重要的影响，不仅对驾驶者和行人的视距有影响，也容易使驾驶员产生焦虑、烦躁情绪，过早产生心理疲劳，进而影响驾驶员的操作决策及驾驶安全。根据事故中的光照条件，将其分成四种，第一种是白天，认为光照条件好，第二种是傍晚，天色开始变暗起来，但是路灯仍未开启，第三种是晚上有路灯的情况，最后一种是晚上没有路灯的情况。数据统计结果如表 4，从结果可看出白天的事故发生率较高，和与人们的出行率有关。

Table 4. Light condition
表 4. 光照条件

光照条件	白天	傍晚	晚上(有路灯)	晚上(无路灯)
数量	34	3	16	5
比例	58.6%	5.17%	27.6%	8.6%

道路信息中据本次 58 例档案交通事故的数据显示，事故发生地多为直线道路或是曲率很小的道路，且以城市道路或城际道路的水泥沥青路面为主，少部分为乡村道路环境，且信号灯设置以及限速情况类似，故主要考虑路面湿滑，依据路面的干湿程度将其分为干燥、冰雪、雨水三种类型，事故分布情况如表 5 所示。由数据分析可知事故多发生在干燥的路面上，这与整体的天气情况中晴朗天气居多有关，且该种天气下道路流量较大有关。

Table 5. Dry and wet condition
表 5. 干湿情况

干湿情况	干燥	冰雪	雨水
数量	47	7	4
比例	81.0%	12.1%	6.9%

3 基于 PC-CRASH 软件的事故重建碰撞信息

PC-CRASH 软件是交通事故再现常用的一款仿真软件, 对建立行人模型与车辆模型进行事故再现的研究具有现实意义。

PC-CRASH 中的人体模型采用了多刚体系统, 在 multibody 模块中的 50 百分位人体模型由二十个椭球体组成, 身体各部分通过球形关节连接。在对应的参数设置时, 包括身高、体重、人体表面摩擦系数、行人移动速度等, 对已有的行人信息采取具体设置, 对信息不完善的根据 50 百分位的人体特征做相关设置, 同时对应于行人的移动速度根据经验值设定。

根据事故中车辆的参数设置汽车模型, 首先确定车辆的型号, 再设置包括车辆外形、参数及重量、载重等参数, 以使得事故重建更加准确。同时设置相关的道路环境特征, 包括道路的摩擦系数等。

作为行人碰撞事故中重要的因素之一——车辆和行人相对位置, 为深入研究驾驶员采取转向行为时刻与其之间的关系, 本次数据分析当中统计出转向时刻车辆质心以及行人的坐标, 并计算出最终车辆与行人之间距离 s, 如图 2 所示, 通过统计可知最终小于 10m 的占 56%, 同时由于转向避撞空间与 TTC 值及此时车速关系密切, 不能由车与行人间的距离完全取代, 此处只作为定性分析。

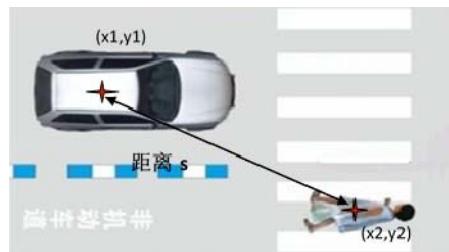


Figure 2.Car-pedestrian distance diagram
图 2.车-行人距离示意图

根据所得的事故信息, 设置相关的车辆运动序列, 主要包括转向角、减速度、运动行程的设置等, 以使得车辆的运动符合采集到的事故信息、客观现实等, 从而通过后续的处理分析得到整个运动过程当中行人和车辆的位移、速度、横向及纵向加速度、横摆角速度、人体各部位的运动速度及加速度等信息。基于事故分析目的是研究影响转向行为的因素, 所以在数据分析时提取了本次研究的 58 例事故当中的车辆在转向时刻的纵向、横向减速度和转向时刻的速度以便进行综合分析。提取过程主要是通过前期车辆运动序列的设置确定转向时刻, 然后再在生成的加速度、速度等信息中提取该时刻的相关信息。

同时依据序列的设置提取出驾驶员意识到危险时(驾驶员采取制动或转向行为)的 TTC 值, 并进行统计如表 6.

Table 6. TTC value
表 6.TTC 值

TTC (s)	≤0.1	0.1~0.2	0.2~0.3	0.3~0.5	0.4~0.5	>0.5
数量	19	7	9	12	5	6
比例	32.76%	12.07%	15.52%	20.69%	8.62%	10.34%

由于研究样本是事故案例, 事故的参与方是行人和车辆, 相对速度较大, 同时对应的人员伤亡严重, 故而对应的 TTC 值较小, 这与实际情况相符。

4 事故数据分析

主要采用 SPSS (Statistical Product and Service Solutions)数据分析软件进行分析, 本次研究中主要探讨的是采取转向行为的影响因素, 而转向行为减缓碰撞的伤害的作用体现之一为是否在碰撞前采取转向行为, 基于本次研究特点选用数据分析中的二元逻辑 (Logistic) 回归模型。

逻辑回归一般模型如公式所示, 即

$$\ln \frac{P}{1-P} = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_n x_n$$

其中: P--事件发生的可能性;

x_1, x_2, x_3, x_n ——不同自变量;

b_1, b_2, b_3, b_n ——自变量的影响系数。

本次研究中将碰撞之前转向和碰撞之后转向作为逻辑回归模型的因变量, 将前述统计的包括事故场景分类、光照条件、转向时车辆与行人间距离、道路条件、碰撞部位、转向时刻纵向减速度、转向时刻横向减速度、转向时刻的速度、碰撞速度、TTC 值共 10 项可能影响转向行为采取时刻的因素作为自变量。

在数据统计操作的相关设置当中选择向前条件法作为变量进入回归模型的方法, 该方法变量引入的根据是得分统计量的显著水平, 变量被剔除的依据是条件参数估计所得的似然比统计量的概率值。得到最终回归模型中所含的变量, 而其他的变量被踢除。

Table 7. Logistic regression analysis result
表 7. 逻辑回归分析结果

		回归系数	标准误差	比值比	P 值
步骤 1a	车辆与行 人间距离	-0.257	0.087	0.773	0.003
	常量	0.791	0.596	2.206	0.185
步骤 2b	光照条件	0.882	0.376	2.416	0.019
	车辆与行 人间距离	-0.295	0.097	0.744	0.002
步骤 3c	常量	-0.766	0.867	0.465	0.377
	场景类型	0.450	0.224	1.568	0.045
	光照条件	1.290	0.481	3.634	0.007
步骤 3c	车辆与行 人间距离	-0.338	0.107	0.713	0.002
	常量	-2.654	1.386	0.070	0.055

注:a. 在步骤 1 中输入的变量: 车辆与行人间距离。

b. 在步骤 2 中输入的变量: 光照条件。

c. 在步骤 3 中输入的变量: 场景类型。

最终得到影响驾驶员在车-行人碰撞事故当中, 驾驶员采取转向行为时刻的变量是场景类型、光照条件、车辆与行人间距离。表中 P 值 <0.05 代表显著, 上述表格中的自变量对因变量显著影响, 且模型预测准确度为 85.7%, 同时由各自变量的比值比 (自变量的变化对结果的影响程度) 可看出影响车辆转向行为采取时刻的影响程度由强至弱依次是光照条件、场景类型、转向时刻车辆与行人之间的距离。同时建立如下模型:

$$\ln \frac{p_1}{p_2} = -2.654 - 0.338x_1 + 1.290x_2 + 0.450x_3$$

其中: p_1 : 碰撞之前不转向, p_2 : 在碰撞之前转向;

x_1 : 车辆与行人间距离;

x_2 : 光照条件;

x_3 : 场景类型;

Table 8. Parameters mean
表 8. 参数含义

参数	取值	含义
x_1	0	$\leq 10m$
	1	$> 10m$
x_2	0	好 (白天)
	1	坏 (其余)
x_3	0	表 2 中 1,2 场景

由建立的模型,以及实际事故数据可知,车辆最终撞击了行人,故并未获得足够的转向空间,在此基础上,当车辆与行人间距离大于10m,即有相对较大的转向空间,车辆行驶过程中有较好的光照条件,且车辆行驶附近无视觉障碍物且行人横穿马路时,驾驶员更容易在撞击行人之前采取转向行为。

5 结论

驾驶员在车辆与行人的碰撞事故中何时采取转向行为受多方面因素影响,通过对58例驾驶员有转向行为的车辆与行人碰撞事故的转向行为影响因素探究中,对相关因素统计并分析,得到有转向行为行人事故特征的相关规律,最终通过逻辑回归分析得出影响转向行为采取时刻的显著影响因素。具体结论如下:

1、对于驾驶员有转向行为的车-行人碰撞事故,事故多发生在车辆直行、附近无视觉障碍物且行人横穿马路的场景,占比约77.6%;行人与车辆的碰撞位置多集中在车辆两端,占比约58.6%;事故多发生在行人或车辆出行量较多时。故要规范行人横穿马路以及加大警示设施的设置,同时控制地面人流量和车流行。

2、在驾驶员有转向行为的车-行人碰撞事故当中驾驶员采取转向行为的时刻与光照条件、场景类型、车辆与行人之间距离有密切关系,且密切程度由强至弱,故应提高车辆及道路照明系统的智能性,同时增加主动安全产品与光照条件的协调性以及优化其探测能力、预警机制。

3、因该探究基于车-行人碰撞事故,处于紧急危险工况,且现实中的紧急危险工况下,转向空间有限,基于此在较大的转向空间,较好的光照条件以及无视觉障碍且行人横穿马路时,驾驶员在危急状况中更易采取转向避撞。

致 谢(Acknowledgement)

在论文书写过程中感谢朱西产教授提供的丰富科研资源,以及课题组李霖等师兄们提供的帮助,以完善论文思路,同时感谢马志雄老师的整体审核。

参考文献 (References)

- [1] Word Health Organization. Word Health Statistics 2008[R],2008
- [2] The 100-Car Naturalistic Driving Study, Phase II – Results of the 100-Car Field Experiment.nhtsa.DOT HS 810 503, April 2006
- [3] Eckert A, Hartmann B, Sevenich M, et al., editors. *Emergency steer & brake assist: a systematic approach for system integration of two complementary driver assistance systems*. Proc 22nd Int Technical Conf Enhanced Safety of Vehicles, Washington DC, USA; June 2011: 11-0111.
- [4] Fausten M. *Accident avoidance by evasive manoeuvres*. Proceedings of the 4th Tagung Sicherheit durch Fahrerassistenz (TVSD, Munich, April 15-16). 2010.
- [5] Suzumura M, Fukatani K, Asada H. *Current State of and Prospects for the Vehicle Dynamics Integrated Management System (VDIM)*. Toyota Technical Review. 2007,55(222): 554-565.
- [6] Muttart.J, *Influence of Age, Secondary Tasks and Other Factors on Drivers' Swerving Responses before Crash or Near-Crash Events*. SAE Technical Paper 2015-01-1417, 2015, doi:10.4271/2015-01-1417.
- [7] Marcus Wisch, Patrick Seiniger, Claus Pastor, ect. *Scenarios and weighting factors for pre - crash assessment of integrated pedestrian safety systems*. ASPECSS D1.1.2013.