

城市道路人车冲突和碰撞概率微观模型研究

陆斯文, 方守恩, 李 刚

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要: 利用临界间隙理论, 定义了城市道路行人过街的安全感知特征; 在此基础上, 利用概率论方法, 研究行人与机动车之间的交通冲突和碰撞微观机理, 分别推导出人车冲突和碰撞概率微观模型. 采用贝叶斯全概率公式和蒙特卡洛仿真方法求出具体的概率值, 来分析行人安全感知、驾驶人反应时间、车流量及车速等对行人安全造成的影响. 最后, 基于人车冲突概率的 90% 置信水平, 建立了行人过街的危险度评价指标, 从而为交通管制实施提供最佳依据.

关键词: 交通安全; 行人; 冲突和碰撞概率微观模型; 蒙特卡洛仿真方法; 危险度评价指标

中图分类号: U 491

文献标识码: A

Study on Probabilistic Microscopic Models for Pedestrian-vehicle Traffic Conflict and Collision on Urban Road

LU Siwen, FANG Shouen, LI Gang

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: The safety perception characteristics of pedestrian crossing the urban road was defined according to the critical theory. Based on a study of the microscopic mechanism of pedestrian-vehicle traffic conflict and collision, the probabilistic microscopic models for pedestrian-vehicle traffic conflict and collision were established. Then, the probability value was calculated by the formula of Bayesian statistics and Monte Carlo simulation for an analysis of the influence of safety perception, reaction time, traffic volumes and vehicle speed on pedestrians. Finally, the indicator of risk evaluation was established on the basis of 90% confidence level of probability. The results can provide the best foundation for the implementation of traffic regulation.

Key words: traffic safety; pedestrians; probabilistic microscopic models for traffic conflict and collision; Monte Carlo simulation; indicator of risk evaluation

近年来, 在城市道路交通环境中随着机动车保有量的迅速递增, 行人事故也呈逐渐上升趋势. 根据交通冲突理论, 行人与机动车辆发生的事故通常是由两者之间发生的严重冲突所导致^[1]. 目前利用交通冲突技术来研究行人过街安全性主要方法就是通过长期观测大量的人车冲突数来建立行人流量和车流量的宏观回归模型, 从而说明行人流量、车流量对行人过街安全的影响^[2], 但缺少对人车冲突时空关系的分析, 而且忽略了行人过街方式、车道宽对行人过街安全的影响. 同时, 人车事故宏观模型也存在同样问题, 忽略了驾驶人反应时间、车辆制动减速度等影响^[3]. 因此, 为了有效地解决行人过街安全问题, 最好应该从微观角度研究行人与机动车所发生的冲突和碰撞规律. 以此为基础, 更好地分析人车事故发生机理, 并建立行人过街危险度评价指标, 为交通管制实施提供最佳依据. 本文正是从这个角度出发, 利用临界间隙理论及有关的概率统计方法, 分析行人与机动车的交通冲突和碰撞规律, 来建立相关的风险概率模型.

1 单车道冲突和碰撞概率微观模型的建立

由于单车道人车冲突和碰撞概率微观模型是多车道冲突和碰撞概率微观模型建立的基础. 因此, 为了计算行人与机动车冲突的风险概率, 首先建立单

收稿日期: 2008-09-11

作者简介: 陆斯文(1983—), 男, 博士生, 主要研究方向为道路交通安全. E-mail: lusiwenwinner@163.com
方守恩(1961—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为道路安全、道路规划与设计.
E-mail: fangsek@tongji.edu.cn

$$\begin{cases} P_{n,cls3} = P(t_b + t_r < t_{p2} \cap t_{p1} < t_v < t_{p2} \cap \\ v_v/2a > t_v - t_r \cap t_{v,\min} < t_v < t_c) \cdot \\ P(t_{n,\min} < t_{n,v}) \\ P_{n,cls4} = P(t_b + t_r < t_{p2} \cap t_{p1} < t_v < t_{p2} \cap \\ v_v/2a > t_v - t_r \cap t_{v,\min} < t_v < t_c) \end{cases} \quad (5)$$

式中: $P_{n,cls3}$ 和 $P_{n,cls4}$ 分别表示车辆制动时有无非机动车流情况下的人车碰撞概率。

1.3 机非安全感知下单车道的冲突和碰撞概率微观模型

1.3.1 单车道冲突概率微观模型

在行人做机非安全感知情况下,到达的非机动车流和机动车流都大于各自的临界间隙时,行人认为过街安全,往往进行穿越,此时车辆与行人发生冲突机理用无条件概率表示在有无非机动车道的情况下为

$$\begin{cases} P_{s,cf1} = P(t_{p1} < t_v < t_{p2} \cap \\ t_v > t_c) \\ P_{s,cf2} = P(t_{p1} < t_v < t_{p2} \cap \\ t_v > t_c) \cdot P(t_{n,v} > t_{n,c}) \end{cases} \quad (6)$$

式中: $P_{s,cf1}$ 表示无非机动车流情况下做安全感知后的人车冲突概率; $P_{s,cf2}$ 表示机非安全感知后的人车冲突概率; $t_{n,c}$ 表示行人穿越非机动车流的临界间隙。

1.3.2 单车道碰撞概率微观模型

由于通常情况下行人穿越机动车流的临界间隙 t_c 大于驾驶人的反应时间 t_r ,所以发生的碰撞概率认为符合上述驾驶人虽采取制动,但仍与行人发生碰撞这种情况.因此,车辆与行人发生碰撞机理用无条件概率表示在有无非机动车道的情况下为

$$\begin{cases} P_{s,cls1} = P(v_v/2a > t_v - t_r > 0 \cap t_v > t_c \cap \\ t_b + t_r < t_{p2} \cap t_{p1} < t_v < t_{p2}) \\ P_{s,cls2} = P(v_v/2a > t_v - t_r > 0 \cap t_v > t_c \cap \\ t_b + t_r < t_{p2} \cap t_{p1} < t_v < t_{p2}) \cdot \\ P(t_{n,v} > t_{n,c}) \end{cases} \quad (7)$$

式中: $P_{s,cls1}$ 表示无非机动车流情况下行人做安全感知后的人车碰撞概率; $P_{s,cls2}$ 表示行人做机非安全感知后的人车冲突概率。

1.4 模型参数的标定和模型假设

根据国内外相关的研究^[5-9],本文机动车的车道宽度取 3.75 m,路缘带宽为 0.25 m,非机动车道宽度取 2 m;考虑行人差异性,取行人穿越速度满足 $N(1.5,1)$ 正态分布, $v_{p,\min} = 0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $v_{p,\max} = 4.5$

$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;车辆到达的车头时距 t_v 服从负指数 λ 分布,而其临界间隙 $t_c = 4.5 \text{ s}$,行人最小可接受车头间距为 2 s;非机动车流到达的车头时距服从负指数 $\lambda_{n,v}$ 分布,穿越非机动车流的临界间隙为 2.5 s,行人穿越最小可接受车头间距为 1.2 s;根据 Lerner 对驾驶人的反应时间研究成果^[9],当驾驶人注意到行人过街警示标志或人行横道菱形预告标示就会产生警觉性,则相应的反应时间 t_r 服从对数正态分布 $\text{LN}(-0.63,0.0324)$,单位为 s;当没有注意上述标志和标线或路段无人行横道线时就会放松警惕,则相应的 t_r 服从对数正态分布 $\text{LN}(0.17,0.194)$,单位为 s;车辆的紧急制动减速度为服从正态分布 $N(5.5,1)$, $a_{e,\min} = 3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 和 $a_{e,\max} = 7.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。

1.5 人车冲突和碰撞概率微观模型计算方法

本文采用连续形贝叶斯全概率公式将上述各种情况下车辆与行人冲突和碰撞概率模型进行展开.其连续形贝叶斯全概率公式为

$$\int_{-\infty}^{+\infty} P(A|X=x)f_x(x)dx = P(A) \quad (8)$$

式中: $f_x(x)$ 为 x 的概率密度函数; $P(A)$ 为事件 A 发生的概率。

因此,以机动车道无安全感知条件下的人车冲突概率模型为例,具体如下:

$$P_{n,cf1}(A) = \left[\int_c^b P(A|v_p)f_{v_p}(v_p)dv_p \right] \cdot$$

$$P(t_{n,\min} < t_{n,v}) = \left\{ \int_c^b \{ \Omega[t_2(v_p)] - \Omega[t_1(v_p)] \} f_{v_p}(v_p)dv_p \right\} \cdot \phi_{n,v}(t_{n,\min}) \quad (9)$$

式中: A 表示人车冲突事件; $f_{v_p}(v_p)$ 为行人穿越速度的概率密度函数; $\Omega(t_v)$ 为车辆到达车头时距概率分布函数; c, b 分别是行人速度 v_p 的上下限值; $t_1(v_p), t_2(v_p)$ 分别是行人过街速度 v_p 的函数; $\phi_{n,v}(t_{n,\min})$ 为非机动车到达的车头时距概率分布函数.但由于人车碰撞概率模型涉及到的随机变量很多,很难通过常用的微积分公式得到其概率值,因此选用广泛应用于工程领域内的蒙特卡洛法,来产生满足上述变量所需的随机数,从而计算出人车的碰撞和冲突概率值。

2 模型的概率计算结果及分析

2.1 单机车道无安全感知下的单车道冲突和碰撞概率

2.1.1 冲突概率

行人与机动车辆发生的概率冲突见表1. 根据计算结果,在非机动车流量一定时,发现行人在单机动车道无安全感知情况下,其冲突概率值很大,而且随

着车流量的增大而增大. 这说明了行人不做安全感知这一冒险行为是导致人车冲突发生的主要因素之一,这跟实际情况也比较吻合.

表1 冲突概率与流量的关系

Tab.1 Relationship between the probability of conflicts and flow volume

非机动车流量/ (辆·h ⁻¹)	机动车流量/(辆·h ⁻¹)						
	200	300	400	500	600	700	800
400	0.052 6	0.072 6	0.089 0	0.105 1	0.113 2	0.121 0	0.128 7
800	0.046 0	0.063 5	0.077 9	0.092 0	0.099 1	0.105 9	0.112 6

2.1.2 碰撞概率

(1) 当反应时间 $t_r > t_v$ 时,如果驾驶人未注意到人行横道的标志标线或路段没有人行横道线,则驾驶人不知前方是否有行人会过街,导致其反应时间延长,从而可能与行人发生碰撞,其概率计算值如

表2所示. 然而一旦驾驶人因注意到人行横道的标志标线就会产生警觉,则能在车辆到达人行横道前迅速做出制动反应,从而有效避免因反应不及时与行人发生的碰撞. 这充分说明行人过街安全设施设置的重要性.

表2 驾驶人放松警惕时碰撞概率与流量的关系

Tab.2 Relationship between probability of collision and flow volume due to drivers' unalertness

非机动车流量/ (辆·h ⁻¹)	机动车流量/(辆·h ⁻¹)						
	200	300	400	500	600	700	800
400	0.001 3	0.002 1	0.002 4	0.003 2	0.003 8	0.004 2	0.004 6
800	0.001 1	0.001 8	0.002 1	0.002 8	0.003 3	0.003 7	0.004 0

(2) 当 $v_v/2a > t_v - t_r > 0$ 时,在驾驶人不同反应条件和非机动车流量 400 辆·h⁻¹下,其发生的碰撞非条件概率计算结果见图2. 从图中可以看出,当车速一定时,机动车流量的增大会导致行人与机动车的碰撞概率的增加;当机动车流量一定时,车速的

增加会导致人车碰撞概率的增加. 同时,在所有其他条件不变的情况下,驾驶人处于警惕状态时发生的碰撞概率小于放松警惕时的情况. 因此,行人过街危险性受到车速、车流量以及驾驶人的注意力影响很大.

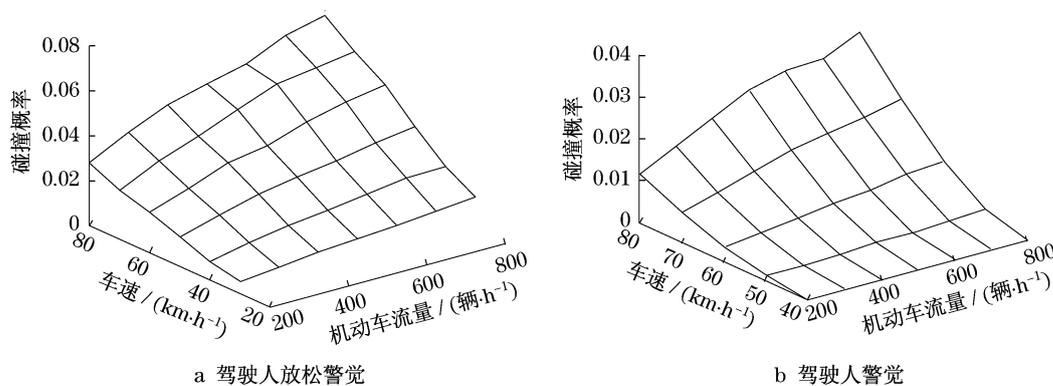


图2 机动车仍无法完全制动停止与行人发生碰撞的概率

Fig.2 Probability of pedestrian-vehicle collision caused by nonstopping of vehicles

2.2 机非安全感知过街方式下单车道的冲突与碰撞概率

2.2.1 冲突概率

在行人作机非安全感知后,与车辆发生的冲突概率值如表3所示. 从计算结果中能明显看出:与表1相比,当非机动车流量一定时,行人作机非安全感

知后与车辆发生冲突的概率随着车流量的增大先增大后减少,且出现波峰现象. 主要原因是当车流量增大时其影响幅度逐渐小于可穿越的车头时距减少的影响幅度. 而且通过对比发现,其值相应地远低于行人做单机动车道无安全感知时的风险概率. 这充分说明行人对所处环境作安全感知的重要性.

表 3 行人作机非安全感知后与车辆发生冲突的概率

非机动车车流量/ (辆·h ⁻¹)	机动车流量/(辆·h ⁻¹)						
	200	300	400	500	600	700	800
400	0.021 1	0.028 4	0.030 9	0.031 6	0.033 6	0.032 3	0.031 1
800	0.016 0	0.021 5	0.023 4	0.023 9	0.025 4	0.024 5	0.023 5

2.2.2 碰撞概率

根据最大紧急制动减速度 a 、驾驶人放松警惕时 95% 分位值的反应时间以及碰撞条件 $v_v/2a > t_v - t_r > 0$, 可推导出驾驶人在行人作安全感知的条件下, 当车速小于 $90 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时, 车辆在到达冲突点前可以完全制动停止, 避免碰撞. 这说明目前行人事故直接原因主要是行人未作安全感知或感知错误.

3 冲突风险的应用

根据行人单机动车道无安全感知方式的定义, 在多车道环境下其单车道上产生的冲突基本不受其他车道车流的影响. 同时, 通过计算表明, 行人无安全感知方式是行人违规穿越方式下最具有危险性的过街方式. 因此, 假设每车道发生冲突的概率为行人单机动车道无安全感知方式下的冲突概率, 那么当行人逐个过街时通过计算出来的路段理论冲突概率所得出的冲突次数是最大的. 所以, 该方式下产生的冲突概率可以衡量行人过街危险性水平, 其具体临界冲突数的计算方法如下.

假设行人穿越的单向机动车车道数为 N , 当每小时单向人流量 Q_p 逐个过街与单向车流总量 Q_v 发生的冲突总数为 C 次时, 则根据路段交通冲突的特性^[10], 可以认为路段上发生的交通冲突次数在单位时间内服从正二项分布, 即 $C \sim B(Q_p, P_h)$, 其中概率 P_h 的计算如下:

通过观测发现, 行人实际过街穿越半幅多车道时往往发生 1 次冲突, 很少发生 2 次及以上冲突. 因此, 假设行人每条机动车道无安全感知过街条件下, 其路段发生的 1 次冲突的概率 $P_{n,a}$ 为

$$P_{n,a} = NP_{n,cf}(1 - P_{n,cf})^{N-1} \quad (10)$$

$$P_h = P_{n,a}/2 \quad (11)$$

而 P_h 可以表示行人过街以一种安全感知和无安全感知相结合的过街方式产生的冲突概率, 因为通过计算表明, 无安全感知产生的冲突概率远大于安全感知产生的冲突概率, 可以忽略不计安全感知

产生的冲突概率. 这在实际交通环境中相当于行人逐车道过街方式, 只对近车道作安全感知, 而对远车道无安全感知, 穿完近车道后与接下去的远车道上车辆发生冲突时, 再做安全感知.

因此, 根据正二项分布的中心极限定理(又称德莫弗拉普拉斯定理), 随机变量

$$Z \approx \frac{C - Q_p P_h}{\sqrt{Q_p P_h (1 - P_h)}} \quad (12)$$

当 $k \rightarrow \infty$ 时, 随机变量 Z 近似服从正态分布 $N(0, 1)$.

由于 90% 以上的可靠度能够满足精度要求^[10], 因此选择概率分布函数的 90% 置信水平来划分行人过街安全性, 最终得出单向路段临界冲突值分别为

$$C_{cr1} = Q_p P_h + u_{1-\alpha/2} \sqrt{Q_p P_h (1 - P_h)}$$

$$C_{cr2} = Q_p P_h - u_{1-\alpha/2} \sqrt{Q_p P_h (1 - P_h)} \quad (13)$$

依据上述冲突次数临界值, 可以将行人过街危险水平划分为表 4 所示的等级^[11].

表 4 行人过街危险水平等级划分

人车冲突次数	$[0, C_{cr1}]$	(C_{cr1}, C_{cr2})	$[C_{cr2}, +\infty]$
危险水平	低	一般	高
交通管制要求	无需任何措施	重点观测, 酌情处理	原因分析, 采取措施

根据上述判断方法, 本文假设调查了上海市曲阳路段单向 3 车道的行人与车辆之间的冲突情况, 晚高峰小时单向路段车流总量为 $1800 \text{ 辆} \cdot \text{h}^{-1}$, 非机动车流量 $400 \text{ 辆} \cdot \text{h}^{-1}$, 行人单向人流量为 $350 \text{ 人} \cdot \text{h}^{-1}$, 冲突总数为 55 次, 则通过计算得出其 $C_{cr1} = 57$ 次, $C_{cr2} = 37$ 次. 因此, 得出该路段行人过街危险水平一般, 需重点观测, 酌情处理.

4 结论

根据临界间隙理论, 定义了行人安全感知过街特征. 以此为基础, 描述了行人单机动车道无安全感知和机非安全感知过街特征. 据此, 分别建立了单车道人车冲突和碰撞概率微观模型, 来描述其冲突和

碰撞的时空关系. 并利用蒙特卡洛方法, 计算出行人过街冲突和碰撞的数值解, 说明了反应时间、临界间隙、减速度、车流量及车速等影响程度. 同时, 计算出在单机动车道无安全感知过街特征过街方式下的路段人车冲突概率. 依据该值, 定义了路段临界冲突概率, 取其90%的置信水平得出其临界冲突次数, 来评价行人过街的危险性, 从而为行人交通管制提供设置依据.

参考文献:

- [1] 张苏. 中国交通冲突技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2000.
ZHANG Su. China traffic conflict technology[M]. Beijing: China Communications Press, 2000.
- [2] Javid M. Applying conflict technique to pedestrian safety evaluation[J]. ITE Journal, 1991, 61(3): 21.
- [3] Per E Garder. The impact of speed and other variables on pedestrian safety in Maine [J]. Accident Analysis and Prevention, 2004, 36: 533.
- [4] 王俊骅, 方守恩. 路段行人-机动车冲突观测方法及冲突特性[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2008, 36(4): 503.
WANG Junhua, FANG Shouen. Pedestrian-vehicle conflict observation and characteristics of road section[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2008, 36(4): 503.
- [5] 陆斯文, 方守恩. 行人穿越的平均临界间隙值计算方法[C]// 第七届世界华人交通运输学术大会论文集. 北京: 人民交通出版社, 2007: 553 - 557.
- LU Siwen, FANG Shouen. The calculation method of the average critical gap when the pedestrians cross the vehicle flows[C]// Proceeding of the 7th International Conference of Chinese Transportation Professionals. Beijing: China Communications Press, 2007: 553 - 557.
- [6] 徐良杰, 王伟. 信号交叉口行人过街时间模型[J]. 交通工程运输学报, 2005, 5(1): 111.
XU Liangjie, WANG Wei. Model of pedestrians crossing time at signalized intersection [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2005, 5(1): 111.
- [7] 刘小明. 平面交叉口交通冲突技术标准化研究[J]. 北京工业大学学报, 1997, 23(3): 43.
LIU Xiaoming. Study of traffic conflict technology standard of intersection[J]. Journal of Beijing Industry University, 1997, 23(3): 43.
- [8] 周商吾. 交通工程[M]. 上海: 同济大学出版社, 1987.
ZHOU Shangwu. Traffic engineering [M]. Shanghai: Tongji University Press, 1987.
- [9] 王殿海. 交通流理论[M]. 北京: 人民交通出版社, 2002.
WANG Dianhai. Traffic flow theory [M]. Beijing: China Communications Press, 2002.
- [10] 周伟. 路段交通事故多发点的冲突判定方法[J]. 中国公路学报, 2000, 13(1): 81.
ZHOU Wei. Traffic conflict identification of road accident blackspots[J]. China Journal of Highway and Transport, 2001, 13(1): 81.
- [11] 郭忠印, 方守恩. 道路安全工程[M]. 北京: 人民交通出版社, 2002.
GUO Zhongyin, FANG Shouen. Road safety engineering [M]. Beijing: China Communications Press, 2002.

(上接第 1575 页)

参考文献:

- [1] Wang Y C. Post-buckling behavior of axially restrained and axially loaded steel columns under fire conditions[J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130(3): 371.
- [2] Franssen J M. Failure temperature of a system comprising a restrained column submitted to fire[J]. Fire Safety Journal, 2000, 34(2): 191.
- [3] Neves I C, Valente J C, Rodrigues J P C. Thermal restraint and fire resistance of columns[J]. Fire Safety Journal, 2002, 37(8): 753.
- [4] 李国强, 王培军. 轴向约束钢框架柱火灾升温下屈服后性能研究[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2008, 36(4): 438.
LI Guoqiang, WANG Peijun. Post-buckling behaviors of axially restrained steel columns in fire [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2008, 36(4): 438.
- [5] 中国工程建设标准化协会. CECS 200: 2006 建筑结构防火技术规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2006.
China Association for Engineering Construction Standardization. CECS 200: 2006 Technical code for steel structures in buildings [S]. Beijing: China Planning Press, 2006.
- [6] 中华人民共和国建设部. GB50017—2003 钢结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
Ministry of Construction of Peoples' Republic of China. GB50017—2003 design code for steel structures [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2003.
- [7] 王培军. 约束钢柱抗火性能试验与理论研究[D]. 上海: 同济大学土木工程学院, 2008.
WANG Peijun. Experimental and theoretical study on restrained steel columns in fire [D]. Shanghai: Tongji University. School of Civil Engineering, 2008.
- [8] European Committee for Standardization. Eurocode3; Design of steel structures, Part1 - 2; General rules-structural fire design [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2005.