

行人车辆冲突参数分析与安全评价

张盈盈¹, 刘 帅¹, 邱志军², 姚丹亚¹, 彭黎辉¹

(1. 清华大学 自动化系, 100084 北京; 2. 阿尔伯塔大学 土木与环境系, T6G2W2 加拿大 阿尔伯塔)

摘 要: 为了评价混合交通环境中的行人和车辆冲突的安全性, 对比分析了目前常用的行人车辆冲突参数, 提出了个体行人和车辆之间冲突的安全评价模型, 并将模型应用于不同的混合交通场景, 验证模型的鲁棒性和适用性. 结果表明, 冲突时间差(Time difference to collision, TDTC)和车辆速度对行人车辆冲突的安全性影响最大. TDTC 越接近于零, 行人越危险; 车辆速度越快, 行人越危险. 以此建立的行人车辆冲突评价模型可正确评估 86.2% 的行人车辆冲突安全, 对于危险冲突的漏检率为 2.1%.

关键词: 行人车辆冲突; 冲突时间差(TDTC); 车辆速度; 行人安全

中图分类号: TP29

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2012)12-0123-06

Pedestrian-vehicle conflict parameter analysis and safety evaluation

ZHANG Ying-ying¹, LIU Shuai¹, QIU Zhi-jun², YAO Dan-ya¹, PENG Li-hui¹

(1. Dept. of Automation, Tsinghua University, 100084 Beijing, China;

2. Dept. of Civil and Environmental Engineering, University of Alberta, T6G2W2 Alberta, Canada)

Abstract: To evaluate the pedestrian-vehicle conflict safety in mixed traffic condition, this paper analyzes and compares the commonly used parameters on traffic conflict and presents a model to classify independent pedestrian-vehicle conflict safety. The model is validated by using video data from two different traffic scenes. The result shows that the pedestrian-vehicle conflict safety is highly sensitive to the Time Difference to Collision (TDTC) parameter and the vehicle speed. The closer to zero a TDTC value is and the faster a vehicle is, the more dangerous a pedestrian-vehicle conflict may be. Comparing with independent observation, the model can correctly classify about 86.2% conflicts; only 2.1% conflicts are classified as safer by the model.

Key words: pedestrian-vehicle conflict; time difference to collision (TDTC); vehicle speed; pedestrian safety

行人在交通中处于弱势地位. 在行人和车辆间的冲突中, 行人往往会受到更严重的伤害. 但相对于车辆间事故的建模和分析, 行人和车辆间事故的分析更难于展开, 这主要受到 3 个方面的影响^[1-2]: 首先, 交通事故是随机事件, 即便是事故多发路口也可能连续数月没有事故发生, 因此对事故数据的观测和采集较难; 其次, 相对于车辆, 行人体积小, 可以轻易改变行进方向和速度, 受到

的交通约束相对少^[3], 因此测量行人交通行为较困难; 第三, 交通事故的历史数据往往更关注含有重大人员伤亡的事故, 事故过程描述也通常掺杂了交警的个人主观评断^[4]. 因此, 近年来各国学者开始从以下 3 个方面着手进行研究: 1) 研究数据量相对更大的行人和车辆冲突(交互行为)^[5-6]; 2) 采用视频数据来精确分析行人和车辆间的交互行为^[7]; 3) 采用替代参数来评价交互行为的安全性^[1,8]. 目前, 常用的行人和车辆冲突参数^[4,9]包括: 冲突时间(Time to collision, TTC)、后侵占时间(Post encroachment time, PET)、冲突距离、冲突速度、间隙时间(Gap time, GT)、时间优势(Time advance, TAdv)和冲突时间差(Time difference to collision, TDTC)等. 其中, TTC 是最有效的车辆冲突参数. 文献[1]通过对视频数据的

收稿日期: 2012-02-19.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60721003, 60834001);
国家高技术研究发展计划项目(2011AA110401, 2012AA112305).

作者简介: 张盈盈(1982—), 女, 博士;

姚丹亚(1966—), 男, 研究员, 博士生导师.

通信作者: 姚丹亚, yaody@mail.tsinghua.edu.cn.

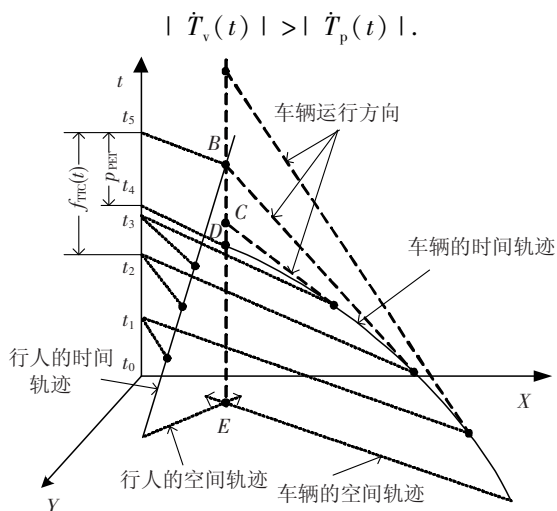


图2 行人与车辆冲突示例

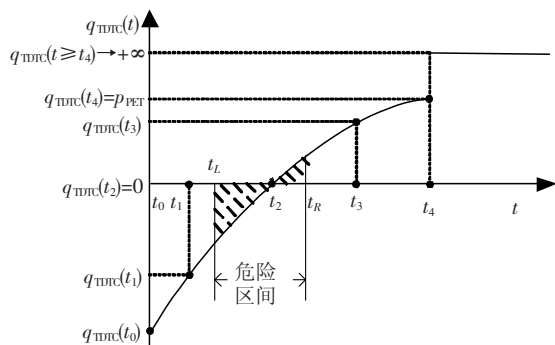


图3 行人与车辆冲突示例中的 TDTC 参数变化趋势

到 t_2 时刻, TDTC 减小至 0, 行人和车辆之间可能会发生碰撞, 因此可以计算 TTC 参数, 即

$$f_{\text{TTC}}(t_2) = T_p(t_2) = T_v(t_2) = t_5 - t_2.$$

t_2 时刻后,车辆拥有了时间优势,TDTC 值大于零。 t_3 时刻的 TDTC 值为

$$q_{\text{TDTc}}(t_3) = T_p(t_3) - T_v(t_3) = (t_B - t_3) - (t_C - t_3) = t_B - t_C > 0.$$

t_4 时刻,车辆抵达潜在冲突点 E ,行人和车辆间的冲突结束. 因此,行人和车辆之间的冲突时间差为无穷. 直至 t_5 时刻,行人通过了冲突点,可计算此次冲突的 PET 参数为

$$p_{\text{PET}} = |t_B - t_D| = |t_5 - t_4| > 0.$$

对于实际的交通冲突,其过程可能更为复杂,如行人可能发现车辆的靠近而忽然加速或停止甚至后退,车辆可能急刹车或改变运行方向等.用单一的参数来描述冲突的结果显然是不够的.同时,TDTC 参数通过赋予时间差中小于 0 的部分以物理含义,使得该参数可以用来描述冲突中时间优先权轮换过程.而 TAdv 定义中只考虑了先抵达车辆和后抵达车辆的抵达时间差,这可以用来描述大部分的车辆间冲突,但对于行人安全分析则略显不足.

同时,不能单纯地考虑行人和车辆抵达侵占

地点的时间差的绝对数值。例如,行人先于车辆 0.5 s 抵达冲突地点(TDTC 为 -0.5 s)和车辆可先于行人 0.5 s 抵达侵占地点(TDTC 为 0.5 s)的安全状况是不同的。对于前者,行人可能会选择先于车辆通过,但稍有不慎极可能发生冲突;对于后者,行人更可能会选择等候车辆先行通过,情况可能会比前者更为安全。

综合以上分析,相比于 TTC、PET、GT 和 TAdv,TDTC 更适用于对行人和车辆冲突的安全分析。同时,考虑到 TDTC 参数为相对参数,只考虑行人和车辆抵达冲突地点的“相对时间”,对于相隔较远的行人和车辆冲突,或是极慢行驶的车辆与行人的冲突,采用 TDTC 参数进行评价会存在误差。由此,还需引入速度参数作为辅助参数,以提高安全评价模型的精度。

2 实验设计

2.1 实验场景与数据采集

对比实验数据均采自北京市。图 4(a) 为清华大学东门内第 1 个 T 型交叉口(无交通管制,无交通信号),平均车速约 20 ~ 30 km/h;图 4(b) 为中关村地区含信号控制的十字路口(无交通管制),平均车速约 15 ~ 25 km/h。数据采集期间的两个路口的交通量相当,约为车辆 1 500 辆/h,行人 1 100 人/h,两个路口的平均行人速度均约为 4 ~ 6 km/h,两个路口均含有人行横道。



(a) 清华大学路口 (b) 中关村路口

图 4 对比实验场景

实验数据拍摄记录于 2009 年 3 月,每个路口拍摄 2 d,每天拍摄 2 h. 选取的摄像机每秒采集 25 帧图像. 考虑行人速度相对较慢(约 0.85 像素/s^[13]),且在行人和车辆的冲突中,行人有可能会处于停止或缓慢移动状态. 为了保证数据采集精度,实验每隔 10 帧进行一次数据采集.

对于每个行人车辆冲突,将行人和车辆其中一方抵达冲突地点的时刻(特定帧)作为冲突的结束时间,并向前回溯 2 s 作为冲突的开始时间.由此,可将每个行人和车辆冲突表示为 1 个 2 s 长的连续事件,由于每隔 0.4 s 进行 1 次数据采集,因此每个冲突事件均由 6 个 TDTC 值来描述.同时,实验只分析不受其他行人和车辆影响的独

立行人车辆冲突,并不着眼于分析人群行为和较为复杂的交通场面. 实验在清华大学路口采集 100 组冲突数据,在中关村路口采集 87 组数据,共计 187 组.

2.2 冲突安全的观测结果

将冲突的安全性划分为 3 个等级,即: A 级(安全),B 级(潜在危险)和 C 级(危险). 观测由 39 个独立观测者对截取到的实验视频进行观测,实验要求每个观测者需观测视频至少 3 遍. 安全评价结果则以多数观测者的观测结论为准. 其观测结果如表 1 所示.

表 1 冲突的安全等级观测结果

路口	等级 A	等级 B	等级 C
清华大学	47	47	6
中关村	27	49	11

3 结果与分析

3.1 TDTC 参数的分布特征

图 5 显示了不同安全等级下 TDTC 参数的分布特性. 图 5(a)~5(c) 分别对应清华大学路口 3 个安全等级的 TETC 参数,图 5(d)~5(f) 分别对应中关村路口 3 个安全等级 TDTC 参数. 为了便于比较,图中只展示了 -10~20 s 的 TDTC 参数的盒形

图. 以图 5(a) 为例, $t = 0$ 时刻对应的盒形图为从清华大学路口采集的 100 组冲突的 TDTC 在 $t = 0$ 时刻的分布. 盒中线段表示 TDTC 的中位数,盒子的上下边界分别对应于数据的上下四分位数,从盒子上下两边延伸出的纵向线段的截止点分别对应于数据的本体最大值和最小值,“+”表示奇异值. 对比 3 个安全等级的 TDTC,大部分等级 A 的 TDTC 均大于 0 s;大部分等级 B 的 TDTC 在 0 s 左右,近 50% 的 TDTC 小于 0 s;大部分等级 C 的数据趋近于 0 s,多于 50% 的 TDTC 小于 0 s.

对比左右两侧数据,可以发现,中关村路口数据更为分散. 这是由于中关村路口是信号控制路口. 场景中的车辆和行人会受到交通信号的影响,存在更多的交互运动. 但每组数据中 3 个等级之间的参数分布特征基本一致,这说明 TDTC 参数在描述行人和车辆冲突的安全性时与路口的几何特征关系不大. 同时,观察表 1 中的数据,发现观测者在中关村路口有更多的潜在危险和危险冲突,路口交通情况更为混杂,行人和车辆的冲突距离较近. 同时,部分路口等级 A 的 TDTC 远远大于 20 s,这是由行人停止前行造成的. 此时,行人抵达潜在冲突地点的时间为无穷,TDTC 相应也为无穷(本实验中设为 99 s).

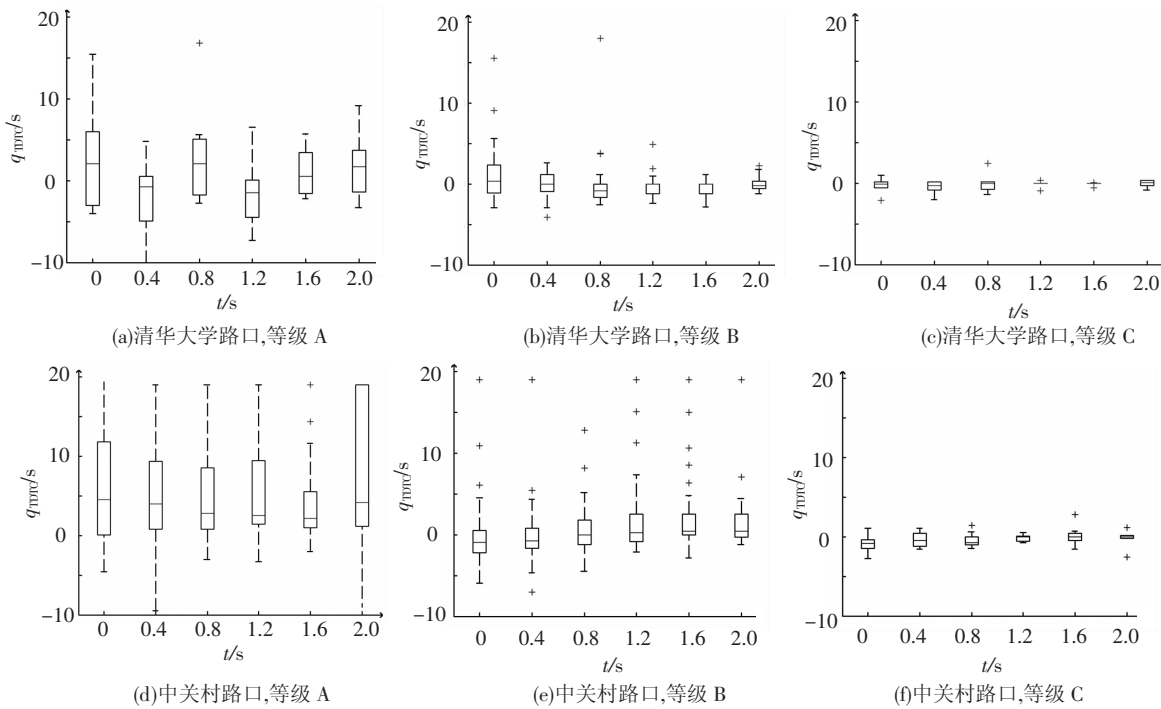


图 5 TDTC 参数在两个实验路口的分布特征

可见,TDTC 越接近于零,行人越危险;相同 TDTC 参数绝对值的情况下,含有负 TDTC 值的行

人车辆冲突可能比含有正 TDTC 参数的冲突危险.

3.2 基于 TDTC 参数的安全评价模型

通过对 TDTC 参数特征的分析, 可以初步建立评价行人和车辆冲突安全的模型 1 为

$$S_1 = \begin{cases} 1, & \sum_i X_i = 0; \\ 2, & \sum_i X_i > 0 \text{ 且 } \sum_i \prod_i^{i+2} X_i = 0; \\ 3, & \sum_i \prod_i^{i+2} X_i > 0. \end{cases}$$
$$X_i = \begin{cases} 0, & q_{\text{TDTC}}(t_i) \notin [t_L, t_R); \\ 1, & q_{\text{TDTC}}(t_i) \in [t_L, t_R). \end{cases}$$

其中: i 为实验中的 TDTC 参数采集的序号, 本实验中, $i = 1, 2, \cdots, 6$, $[t_L, t_R)$ 为危险区间, 若 TDTC 参数落入此区间, 则认为此瞬间可能是危险的, 令 $X_i = 1$, 否则 $X_i = 0$. 由此, 若 TDTC 参数在每个检测点均在危险区间外 ($S_1 = 1$), 则认为冲突是安全的 (对应等级 A); 若 TDTC 参数时而落入危险区间, 时而在危险区间外 ($S_1 = 2$), 这说明行人和车辆和可能已经发现了彼此, 并产生了避让行为, 则认为冲突存在潜在的危险 (对应等级 B); 若 TDTC 参数持续的落入危险区间 ($S_1 = 3$), 则很可能行人和车辆之间没有避让行为, 或是避让行为不够迅速及时 (碰撞的可能性一直存在), 此时, 行人是危险的 (对应等级 C).

表 2 给出了模型 1 在以上两个路口的安全评价结果 (取 $t_L = -1 \text{ s}$, $t_R = 0.5 \text{ s}$). 表中, 带有下列划线的数字对应于模型检测正确, 即对于清华大学路口等级 A 的 47 组数据, 模型 1 可以正确检测 40 组, 将其中 5 组判定为潜在危险, 将其中两组判定为危险. 可以计算出模型 1 在该路口的评价准确率为 80.0%, 中关村路口为 86.2%, 总体准确率为 82.9%.

其中, 造成模型误检的主要原因为: 车辆速度过低和存在转弯车辆. 车辆行驶速度过低 (低于 10 km/h) 导致 9 个冲突的模型评价结果比独立观测结果更为危险. 这是由于速度较慢的车辆不会对行人造成威胁, 但 TDTC 参数只反映了行人和车辆抵达同一地点的相对时间, 是相对参数, 不受冲突速度的影响. 此外, 由于存在右转弯车辆 (且行人在车辆的左侧), 12 个冲突被模型 1 评价为更危险. 这是由于, 观测者可以发现车辆的转弯意图, 因此将此类冲突评价为安全. 但如果转弯没有发生, 行人必将受到潜在的安全威胁. 因此, 此类案例也可以被划分为潜在危险. 其他误判多是由于测量误差或冲突开始阶段的 TDTC 参数较小等因素造成的.

表 2 基于模型 1 的冲突安全评价结果

路口	独立观测结果	评价结果			准确率/%
		$S_1 = 1$	$S_1 = 2$	$S_1 = 3$	
清华大学	等级 A	40	5	2	85.1
	等级 B	5	34	8	72.3
	等级 C	0	0	6	100.0
中关村	等级 A	22	4	1	81.5
	等级 B	1	42	6	89.4
	等级 C	0	0	11	100.0

共计 6 个冲突被模型评价为更安全 (漏检). 其中, 3 个冲突是由于左转弯车辆 (行人在车辆的左侧) 造成的, 由于观测者可以发现车辆的转弯意图, 因此认为冲突中存在危险, 但由于此种情况下的潜在冲突点会在离行人和车辆较远的位置, 行人抵达时间较长, TDTC 参数值会相应较大. 两个冲突是由于行人正在向车辆的后方行进, 但行人与车辆距离较近, 被观测者划分为潜在危险的冲突. 1 个冲突是由于冲突车辆为大型车辆, 观测者普遍认为案例潜在危险, 但当前模型并没有考虑车辆大小对行人安全的影响.

3.3 采用速度参数进行模型修正

考虑到 TDTC 为相对参数, 引入车辆速度参数对模型 1 进行修正, 得到模型 2 为

$$S_2 = \begin{cases} 1, & \sum_i X_i = 0 \text{ 且 } \min\{V_v(t_i)\} < V_A, \\ & \text{或 } \sum_i X_i > 0 \text{ 且 } \max\{V_v(t_i)\} < V_B; \\ 2, & \sum_i X_i = 0 \text{ 且 } \min\{V_v(t_i)\} \geq V_A, \\ & \text{或 } \sum_i X_i > 0 \text{ 且 } \sum_i \prod_i^{i+2} X_i = 0 \\ & \text{且 } \max\{V_v(t_i)\} \geq V_B, \\ & \text{或 } \sum_i \prod_i^{i+2} X_i > 0 \text{ 且 } \max\{V_v(t_i)\} < V_C; \\ 3, & \sum_i \prod_i^{i+2} X_i > 0 \text{ 且 } \max\{V_v(t_i)\} \geq V_C. \end{cases}$$

此处, $V_v(t_i)$ 表示车辆在 i 时刻的速度. 如果车辆速度快, 即使未来发生碰撞的可能性相对较小 (TDTC 参数值较大), 行人和车辆冲突也可能是潜在危险的. 因此用速度阈值参数 A (V_A) 来校正由于车速过快造成的漏检. 由于十分慢速的车辆通常不会给行人带来安全威胁, 因此用速度阈值参数 B (V_B) 来校正由于车速过慢带来的误检. 同时, 采用速度阈值参数 C (V_C) 来区分等级 B (潜在危险) 和等级 C (危险). 表 3 给出了采用模型 2 获得的以上两个场景的安全评价结果. 此处取: $V_A = V_C = 20 \text{ km/h}$, $V_B = 15 \text{ km/h}$.

表 3 基于模型 2 的冲突安全评价结果

路口	独立观测结果	评价结果			准确 率/%
		$S_2 = 1$	$S_2 = 2$	$S_2 = 3$	
清华大学	等级 A	40	5	2	85.1
	等级 B	3	39	5	83.0
	等级 C	0	0	6	100.0
中关村	等级 A	23	4	0	85.2
	等级 B	1	42	3	91.8
	等级 C	0	0	11	100.0

根据此模型可将清华大学路口的冲突安全评价准确率提高至 85.0%，中关村路口提高至 87.4%，总体准确率为 86.1%。同时，相对于独立观测，模型 2 可以检测出更多的危险，漏判率相对较低，只有 2.1%。可见，模型 2 可以用于评价混合交通场景中的行人与车辆冲突的安全性。

4 结 论

1)通过分析混合交通中的行人车辆冲突来研究行人安全问题。对比了目前常用的几个交通参数在分析混合交通条件下的行人和车辆冲突的安全性方面的作用,分析了 TDTC 参数在不同安全等级下的分布规律,建立了基于 TDTC 参数的行人车辆冲突安全评价模型,最终采用速度参数对模型进行了修正。

2)由于行人和车辆在冲突中处于不对等的地位,TDTC 参数比其他冲突参数(如 TTC、PET 等)更适于描述此类冲突的安全情况。

3)TDTC 越接近于零,行人越危险;相同 TDTC 绝对值的情况下,含有负 TDTC 值的行人车辆冲突可能比含有正 TDTC 参数的冲突危险。

4)由于 TDTC 参数为相对参数,需要引入车辆速度参数对模型进行优化。基于 TDTC 和速度参数的安全评价模型可以实现对 86.1%的行人车辆冲突的准确检测。模型可用于评价混合交通场景中的行人和车辆冲突的安全性。

参考文献:

[1] ISMAIL K, SAYED N. Automated analysis of pedestrian-vehicle conflicts using video data[J]. Transportation Research Record,2009, 2140: 44 – 54.

[2] PETRITSCH T A, CHALLA H, HUANG H, *et al.* Evaluation of geometric and operational characteristics affecting the safety of six-lane divided roadways: final re-

port, BD 543 RPWO 5 [R]. Florida: Florida Department of Transportation, 2007.

[3] KAPARIAS I, BELL M G H, GREENSTED J, *et al.* Development and implementation of a vehicle-pedestrian conflict analysis method adaptation of a vehicle-vehicle technique [J]. Transportation Research Record, 2010, 2010(2198): 75 – 82.

[4] SVENSSON A, HYDEN C. Estimating the severity of safety related behaviour[J]. Accident Analysis and Prevention,2006, 38(2):379 – 385.

[5] CATER D L, HUNTER W W, ZEGERER C V, *et al.* Pedestrian and bicyclist intersection safety indices: final report, FHWA-HRT-06-125 [R]. McLean, VA: FHWA, 2006.

[6] LAURESHYN A, SVENSSON A, HYDEN C. Evaluation of traffic safety, based on micro-level behavioural data: theoretical framework and first implementation [J]. Accident Analysis and Prevention, 2010, 42(6): 1637 – 1646.

[7] BOUNET L, MIDENET S. Pedestrian crossing detection based on evidential fusion of video-sensors [J]. Transportation Research: Part C Emerging Technologies, 2009, 17(5): 484 – 497.

[8] GETTMAN D, PU L, SAYED T, *et al.* Surrogate safety assessment model and validation: final report FHWA-HRT-08-051 [R]. McLean, Virginia: Federal Highway Administration, 2008.

[9] HYDEN C. The development of a method for traffic safety evaluation: the Swedish traffic conflict technique [D]. Lund, Sweden: Lund University, 1987.

[10] MINDERHOUD M M, BOVY P H L. Extended time-to-collision measures for road traffic safety assessment [J]. Accident Analysis and Prevention, 2001, 33(1): 89 – 97.

[11] HASSON A. Studies in driver behaviour, with applications in traffic design and planning: two examples (in Swedish) [D]. Bulletin: University of Lund, 1985.

[12] 一汽 - 大众. 捷达车技术参数[EB/OL]. [2012 - 02 - 12]. http://vw.faw-vw.com/index.php/component/brand/?task=carmodel&brand_id=5.com.

[13] ZHANG Yingying, LIU Shuai, Qiu T Z, *et al.* Video based pedestrian-vehicle conflict analysis in mixed traffic condition (accepted) [C]//Proceedings of Transportation Research Board. Washington DC: National Academy of Sciences, 2011.

(编辑 魏希柱)