DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.260622

基于后侵入时间和冲突车速的无信号交叉口安全评价

张新昊
(西安市政设计研究院有限公司,陕西 西安 710000)

摘 要: 随着城市道路交通量逐年增长,交通安全评价愈发重要。交通事故数据通常不易得到,因此,采用后侵入时间(PET)作为交通冲突判断指标。然而,仅依靠交通冲突数和PET值来判断交叉口的安全水平,存在一定的局限性,是否会发生事故还取决于前车与后车的速度,因此,引入前车与后车的临界相对速度及后侵入时间,对无信号交叉口进行安全评价。首先,采用PET值对西安市2个无信号灯交叉口进行安全评价,结果为不安全;其次,引入临界相对速度进行安全评价,结论为交叉口是安全的,这更符合实际情况。分析发现,在无信号交叉口,快速行驶的车辆可接受的临界冲突PET阈值较小,因此,发生严重冲突的概率较高;而质量较大的车辆,由于低速管控和较大的跟驰车距,发生严重冲突的概率反而较低,这表明车辆类型也会影响PET值和严重冲突数量。为无信号交叉口的安全评价提供了一套不需要依靠事故数据且更准确的方法。

关键词: 城市交通;交通安全评价;交通冲突;无信号交叉口;后侵入时间
中图分类号: U491 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-7716(2026)11-0104-05

Safety Evaluation of No-signal Intersection Based on Post-entering Time and Conflict Vehicle Speed

ZHANG Xinhao
(Xi'an Municipal Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710000, China)

Abstract: With the increasing traffic volume of urban roads year by year, traffic safety evaluation is becoming more and more important. Traffic accident data are usually not easy to obtain. Therefore, the post entering time (PET) is used as an indicator for judging traffic conflicts. However, judging the safety level of an intersection solely based on the number of traffic conflicts and the PET value has certain limitations. Whether an accident will occur also depends on the speed of the vehicle in front and the vehicle behind. Therefore, the critical relative speed of the front and rear vehicles and the PET are introduced to evaluate the safety of a no-signal intersection. Firstly, the PET value is used to evaluate the safety of two no-signal intersections in Xi'an, and the result is unsafe. After introducing the critical relative speed for safety evaluation, the conclusion is that the intersection is safe and more in line with the actual situation. It is found that at no-signal intersections, the acceptable critical conflict PET threshold for fast-moving vehicles is relatively small. So the probability of serious conflicts occurring is relatively high. However, for larger vehicles, due to low-speed control and a greater following distance, the probability of serious conflicts is actually lower, indicating that the vehicle type will also affect PET value and the number of serious conflicts, which provides a set of methods for the safety assessment of no-signal intersections that do not rely on accident data and are more accurate.

Keywords: urban transportation; traffic safety evaluation; traffic conflict; no-signal intersection; post entering time (PET)

0 引 言

随着经济发展,我国机动车保有量不断增加。全国每年的车辆增长率约为9%,导致道路拥堵和交通事故频发。近五年,全国平均每年因交通事故受伤的人数达到26万人,死亡人数接近5万人。交通事故通常发生在平面交叉口,特别是在无信号灯管控的交叉口,由于交通流存在合流、分流和交叉冲突,交通运行情况更加复杂。

为提高交通安全,国内外学者提出多种解决方法。由于交通事故历史记录数据的可用性和可靠性较差,且事故统计必须等待事故实际发生,需要更长的观察时间来积累足够的样本,才能得出可靠的统计结论[1]。因此,研究人员采用交通冲突替代交通事故,进行安全分析。Perkins等[2]将冲突定义为,观

收稿日期:2026-06-03
作者简介:张新昊(1995—),男,硕士,工程师,从事道路交通设计工作。

察到的 2 个或多个道路使用者,在行驶过程中相互靠近时,任何一方都要采取回避行动,以阻止事故发生。以往的研究使用了多种交通冲突指标,如距离碰撞事件(TTC)[3-4]、后侵入时间(PET)[5-6]、车头时距(TH)[7-8]等。这些指标可以很好地替代事故记录,以较少的观测时间收集更多的数据,从而更准确地评价交通安全水平。Mohanty 等[9]采用 PET 和 PET 速度比,评估中央分隔带开口的安全水平。Gastaldi 等[10]采用以 TTC 和 PET 为评价指标的双变量极值方法,评估了无信号交叉口的安全水平。Navarro 等[11]将交叉口的停车管控方案,从就近停车(MAS)转换为全方位停车(AWS),可降低车辆运行的速度和平均 PET 值,并提高安全性。杨紫龙等[12]结合模糊综合评估法,对城市无信号灯控制的 T 形交叉口的交通安全进行评价。彭玮玥[13]分析了机动车与电动自行车交通冲突的影响因素,并建立了交通冲突严重程度分析模型。本文以 PET 为交通安全评价指标,对无信号交叉口的交通安全进行评价。现阶段,大多数研究仅依靠跟驰车辆的速度来判定严重冲突,而本文引入前车与后车的临界相对速度,更准确地识别不同车辆类型的交叉口严重冲突。

1　调查对象

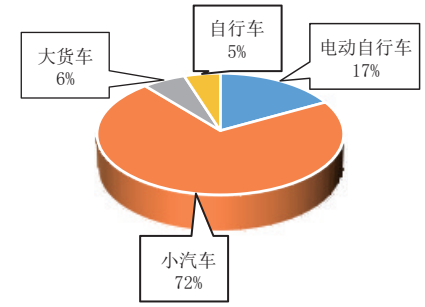
选取西安市 2 个主干路与支路直角相交的 T 形无信号灯管控交叉口Ⅰ和Ⅱ,作为调查对象。2 个交叉口均为右进右出。交叉口Ⅰ的主路为双向 10 车道,被交路为双向 4 车道。交叉口Ⅱ的主路为双向 8 车道,被交路为双向 4 车道。

2　交叉口数据调查

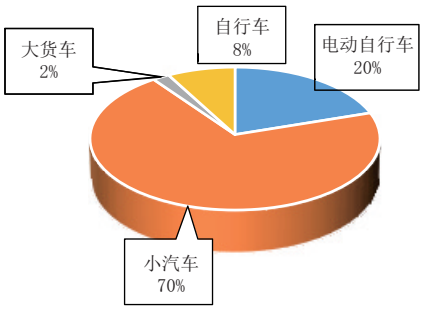
2.1　数据收集

在初步调查中,2 个交叉口均出现 2 个高峰期,分别为 07:30—09:30 和 17:30—19:30。由于夜间高峰时段的光照条件较差,本文仅将上午高峰时段作为调查时间。

在上午高峰时段,通过在无信号灯交叉口上空布置无人机摄像头,采集交通运行视频图像数据。本文依据车辆质量划分,选取了 4 种类型的车辆,包括电动自行车、小汽车、大货车和自行车。采用机动车测速仪测量各类车辆的行驶速度,在距离交叉口 10 m 处测量车辆的定点速度,每种车型随机测量 10 辆车的速度值。每条道路的进出口处各测量 60 次,单个交叉口共测量 180 个有效速度样本。在数据收集期间,交叉口Ⅰ共有 4 325 辆车通过,交叉口Ⅱ共有 3 248 辆车通过。2 个交叉口的车辆组成如图 1 所示。



(a)交叉口Ⅰ



(b)交叉口Ⅱ

图 1　交叉口的车辆组成

2.2　PET 测量

利用 Adobe Photoshop CS6 软件制作网格,在网格的辅助下,本文测量了车辆交通冲突的 PET 值。当 2 个交叉口的车道宽度为 3.5 m 时,网格尺寸选择为 3.5 m×3.5 m。首先,将交叉口Ⅰ和Ⅱ的网格数分别制作为 50 个和 42 个,通过划分的网格,观察车辆的运行操纵情况,并导出为 JPG 格式的透明图像。其次,将图像叠加在视频上,使用 After Effect CS6 视频编辑软件进行渲染。视频的帧速率设置为 60 帧/s,PET 值的测量精度为 0.01 s。交叉口Ⅰ覆盖网格的视频屏幕截图如图 2 所示。最后,针对每起交通冲突,记录前车离开网格的时间和后车进入同一网格的时间,并将时间差作为两车之间的 PET 值。



图 2　交叉口Ⅰ的冲突区域网格图像

2.3　严重冲突与临界相对速度

大多数事故在发生前都会有冲突,但并非所有的冲突都以事故结束。在许多情况下,参与冲突的驾驶员并未意识到冲突。因此,将所有冲突判定为潜在事故并不准确。早期研究按照事故发生的概率,将冲突分为一般冲突和严重冲突,并使用阈值对两者进行区分。

将阈值与获取的PET值进行比较,从而判断冲突是否严重。这种方法较为适合低复杂度交通场景的安全评价。而同时考虑前车与后车运行速度的评价思路,是一种更精准的交通安全评价方法。既有相关研究也曾试图将后车速度纳入严重冲突的识别范畴,认为严重冲突仅与后车车速有关,通过比较车辆之间的临界距离(基于后车的制动距离)来计算临界速度。但后车并不总是必须停车以避免碰撞,更多是根据前车运行状态减速,以规避车辆之间的碰撞。因此,本文采用前车与后车的相对速度来判别严重冲突——将后车减速至前车速度所需的跟驰距离及前车与后车间避免碰撞的临界距离进行关联,定义了临界相对速度。为获得后车从速度V_1减速至V_2所需的行驶距离,本文将后车降低的动能与减速时的摩擦做功进行比较。

后车降低的动能计算如下:

$$W_1 = \frac{1}{2}mv_1^2 - \frac{1}{2}mv_2^2 = \frac{1}{2}\frac{G}{g}\left(v_1^2 - v_2^2\right) \tag{1}$$

式中:W_1为后车降低的动能;v_1为后车速度,m/s;v_2为前车速度,m/s;G为车辆质量;g为重力加速度,m/s^2。

车辆在减速时的摩擦做功为

$$W_2 = Fl_1 = Gfl_1 \tag{2}$$

式中:F为车辆的制动力;f为轮胎与路面之间的附着摩擦系数;G为车辆质量;l_1为后车减速所需的距离,m。

比较式(1)和式(2),可得

$$\begin{aligned} Gfl_1 &= \frac{1}{2}\frac{G}{g}\left(v_1^2 - v_2^2\right) \\ l_1 &= \frac{\left(v_1^2 - v_2^2\right)}{2gf} \end{aligned} \tag{3}$$

由此得到前车和后车之间的临界距离:

$$l_2 = t_{\mathrm{PET}} \times v_1 \tag{4}$$

式中:l_2为车辆之间的临界距离,m;t_{PET}为后侵入时间,s。

对于一般冲突,车辆之间避免碰撞的临界距离大于后车减速至前车速度所需的距离。即:

$$\begin{aligned} l_2 &> l_1 \\ t_{\mathrm{PET}} \times v_1 &> \frac{\left(v_1^2 - v_2^2\right)}{2gf} \\ t_{\mathrm{PET}} &> \frac{\left(v_1^2 - v_2^2\right)}{2gfv_1} \end{aligned} \tag{5}$$

为简化计算,本文提出临界相对速度v_3。

$$v_3 = \frac{\left(v_1^2 - v_2^2\right)}{v_1} \tag{6}$$

$$t_{\mathrm{PET}} > \frac{v_3}{2gf} \tag{7}$$

利用式(7),可为不同区间的t_{PET}值确定对应的临界相对速度阈值(见表1)。计算取值如下:假设摩擦系数(f)为0.35,重力加速度(g)为10 m/s^2。

表1　各种PET值的阈值

t_{PET}值/s	临界相对速度阈值/(m·s^{-1})
$0<t_{\mathrm{PET}}\leqslant0.5$	3.5
$0.5<t_{\mathrm{PET}}\leqslant1.0$	7
$1.0<t_{\mathrm{PET}}\leqslant1.5$	10.5
$1.5<t_{\mathrm{PET}}\leqslant2.0$	14
$2.0<t_{\mathrm{PET}}\leqslant2.5$	17.5
$2.5<t_{\mathrm{PET}}\leqslant3.0$	21
$3.0<t_{\mathrm{PET}}\leqslant3.5$	24.5
$3.5<t_{\mathrm{PET}}\leqslant4.0$	28
$4.0<t_{\mathrm{PET}}\leqslant4.5$	31.5
$4.5<t_{\mathrm{PET}}\leqslant5.0$	35

针对每起交通冲突,使用前车和后车的运行速度,计算得到PET值和临界相对速度。将网格长度除以车辆覆盖网格所用时间,测量得到前车和后车的速度。对于每起交通冲突,如果测得的车辆间临界相对速度大于表1中对应的临界相对速度阈值,则其被视为严重冲突。

3　冲突数据分析

识别交通冲突并为每起冲突收集必要的数据,如前车离开的时间、后车驶入的时间,以及前车与后车的速度。每起冲突的PET值,根据前车离开网格的时间与后车进入同一网格的时间差计算得到。交叉口Ⅰ和Ⅱ的冲突数分别为845次和389次。交叉口Ⅰ和Ⅱ的平均PET值分别为1.42 s和1.37 s。2个交叉口PET值的频率分布如图3所示。

3.1　严重冲突百分比

观察交叉口PET值的频率分布曲线图可知,约60%的PET值在1.5 s以下。PET平均值较低,且大量的PET值低于平均值。因此,可判定2个交叉口都不安全。然而,仅考虑平均PET值并不能完全准确

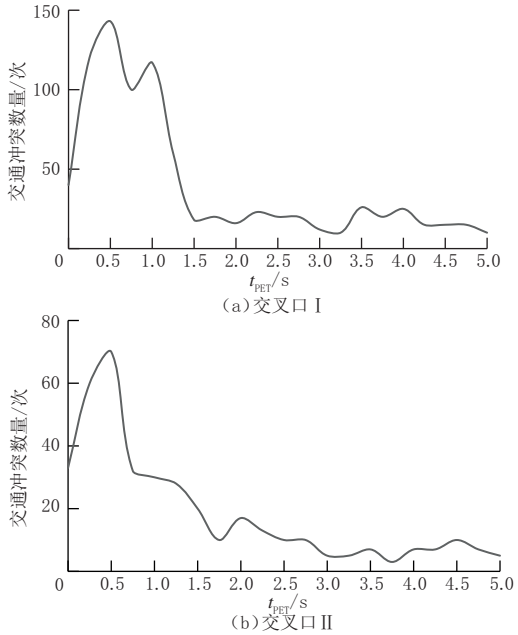


图3　交叉口PET值频率分布曲线图

地判断交叉口的安全水平,因未考虑冲突中前车与后车的速度。如前所述,低速行驶的车辆发生事故的概率较低,因其停车难度较小。因此,车速也会影响碰撞发生概率。本文旨在利用前车与后车的速度来识别严重冲突。因此,首先采用式(6),依据前车和后车的速度,计算得到两车的临界相对速度;其次,将临界相对速度与表1中对应的临界相对速度阈值进行比较,得到严重冲突数量。表2展示了2个交叉口严重冲突数量占冲突总数的百分比(简称"严重冲突百分比")。

表2　2个交叉口的冲突数量和严重冲突数量占冲突总数的百分比

t_{PET}/s	交叉口Ⅰ			交叉口Ⅱ		
	冲突总数/次	严重冲突数量/次	严重冲突百分比	冲突总数/次	严重冲突数量/次	严重冲突百分比
$0<t_{PET}\leqslant0.5$	303	58	19.1	163	21	12.9
$0.5<t_{PET}\leqslant1.0$	217	27	12.4	62	2	3.23
$1.0<t_{PET}\leqslant1.5$	78	2	2.56	48	1	2.08
$1.5<t_{PET}\leqslant2.0$	36	1	2.78	27	1	3.70
$2.0<t_{PET}\leqslant2.5$	43	1	2.33	23	1	4.35
$2.5<t_{PET}\leqslant3.0$	32	1	3.13	15	0	0
$3.0<t_{PET}\leqslant3.5$	36	0	0.00	12	0	0
$3.5<t_{PET}\leqslant4.0$	45	0	0.00	10	0	0
$4.0<t_{PET}\leqslant4.5$	30	0	0.00	17	0	0
$4.5<t_{PET}\leqslant5.0$	25	0	0.00	12	0	0
共计	845	90	10.7	389	26	6.68

严重冲突的PET阈值为0~1.5 s。PET值大于2 s的冲突,大多不是严重冲突,这表明,既有研究提出5 s的PET阈值并不准确。数据分析结果表明,2个交叉口PET值小于1.5 s的冲突为严重冲突。交叉口Ⅰ和Ⅱ的严重冲突数量占冲突总数的百分比分别为10.65%和6.68%。2个交叉口的严重冲突百分比均小于20%,表明2个交叉口在目前的交通条件下均较为安全。

3.2　不同类型车辆间的严重冲突

分析交叉口不同类型车辆间的严重冲突分布特征,有助于了解各类车辆的安全性。表3和表4反映了不同类型车辆的冲突总数、严重冲突数量及其占冲突总数的百分比。

表3　交叉口Ⅰ严重冲突

前车类型	后车类型	冲突总数/次	严重冲突数量/次	严重冲突百分比
电动自行车	电动自行车	305	48	15.74
	小汽车	41	5	12.20
	大货车	13	0	0.00
	自行车	62	5	8.06
小汽车	电动自行车	53	2	3.77
	小汽车	156	19	12.18
	大货车	3	0	0.00
	自行车	7	0	0.00
大货车	电动自行车	1	0	0.00
	小汽车	29	1	3.45
	大货车	5	0	0.00
	自行车	1	0	0.00
自行车	电动自行车	61	5	8.20
	小汽车	36	1	2.78
	大货车	16	0	0.00
	自行车	56	4	7.14
共计		845	90	10.65

表4　交叉口Ⅱ严重冲突

前车类型	后车类型	冲突总数/次	严重冲突数量/次	严重冲突百分比
电动自行车	电动自行车	132	13	9.85
	小汽车	17	1	5.88
	大货车	5	0	0.00
	自行车	30	1	3.33
小汽车	电动自行车	25	1	4.00
	小汽车	76	8	10.53
	大货车	1	0	0.00
	自行车	3	0	0.00
大货车	电动自行车	1	0	0.00
	小汽车	14	1	7.14
	大货车	4	0	0.00
	自行车	1	0	0.00
自行车	电动自行车	30	1	3.33
	小汽车	27	0	0.00
	大货车	8	0	0.00
	自行车	15	0	0.00
共计		389	26	6.68

图 4 展示了 2 个交叉口不同类型车辆发生严重冲突的占比。

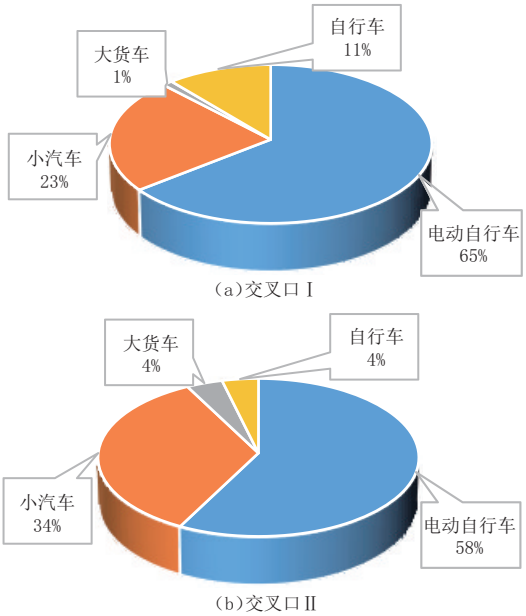


图 4　交叉口严重冲突的车辆类型占比

由表 3 和表 4 可知，在 2 个交叉口处，电动自行车与电动自行车、小汽车与小汽车等快速行驶车辆之间的冲突较为严重。电动自行车在交叉口Ⅰ处发生严重冲突的百分比约为 65%，在交叉口Ⅱ处发生严重冲突的百分比约为 58%。小汽车在交叉口Ⅰ处发生严重冲突的百分比约为 23%，在交叉口Ⅱ处发生严重冲突的百分比约为 34%。原因是：在交叉口处，电动自行车和小汽车的到达率相对高于其他类型的车辆；当前车速度较快时，速度较快的后车更易接受较小的跟驰车距，进而诱发交通事故。

由表 3 可知，小汽车与小汽车、电动自行车与小汽车的严重冲突百分比均低于 15%。这表明车速较快的车辆间跟驰车距较小，对应的 PET 值较低，冲突发生数量较多。但由于前车车速较快，后车减速至前车车速所需时间较短，因此并不容易发生交通事故，体现了相对临界速度作为识别严重冲突的准确性。

2 辆小汽车、2 辆电动自行车间的严重冲突数量，显著大于小汽车与电动自行车间的严重冲突数量，主要原因在于交叉口主路机非分隔，有效降低了机动车与非机动车发生严重交通冲突的概率。

此外，当重型车辆产生冲突时，车辆之间较少出现严重冲突。因重型车辆的车辆尺寸较大、操纵性较差，即使快速行驶，车辆也会保持更大的跟驰车距，从而提高了 PET 值，使后车有更多的时间作出相应反应和行动。

4　结　论

本文以后侵入时间为交通冲突指标，同时引入临界相对速度，更准确地识别严重冲突，避免采用单一阈值进行判定的局限性。本文收集了 2 个无信号灯管控交叉口的冲突数量、平均 PET 值、严重冲突数量及其占冲突总数的百分比等数据。交叉口Ⅰ和Ⅱ的平均 PET 值分别为 1.42 s 和 1.37 s，交通冲突数量分别为 845 次和 389 次。仅依靠冲突数量和平均 PET 值作出判断，2 个交叉口都不安全。但引入临界相对速度和严重冲突识别后，发现在不同类型前车与后车的组合情境下，严重冲突数量占冲突总数的百分比均小于 20%。这表明在目前的交通条件下，2 个交叉口都较为安全，这一结论也更符合实际的道路情况。因此，即使平均 PET 值较低，但由于严重冲突百分比较低，交叉口被认定是安全的。这表明引入临界相对速度，有助于更精准地评价交叉口的交通安全水平。通过对比分析不同类型车辆组合情境下的严重冲突数量，发现车速较快的车辆间跟驰车距较小，冲突发生数量较多。但由于后车减速至前车车速所需时间较短，并不容易发生交通事故，体现了相对临界速度作为识别严重冲突的准确性。而重型车辆在超车和会车时更加谨慎，因此发生严重冲突的数量较少。本文为无信号交叉口的安全评价提供了一套更精确的方法。

参考文献：

[1] 吴凡. 基于交通冲突分析技术的道路交叉口交通安全管理研究：以 N 市为例[D]. 杭州：浙江大学，2024.
[2] Perkins S R, Harris J I. Traffic conflict characteristics-accident potential at intersections[C]. Highway Research Record, 1968(224): 35-43.
[3] 徐道祥. 基于交通冲突理论的城市道路交叉口评价与优化[D]. 大连：大连交通大学，2023.
[4] 王子鸣. 主干路合流区交通冲突空间分布特征及安全研究[D]. 济南：山东建筑大学，2023.
[5] 马双虎. 基于极值统计的信号交叉口交通冲突样本量估计方法研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2023.
[6] 姚远. 基于极值理论的无信号交叉口交通冲突模型构建及应用研究[D]. 成都：西南交通大学，2022.
[7] 赵欣怡. 城市合流车道交通流分析与交通管控手段研究[D]. 重庆：重庆交通大学，2025.
[8] 王乙婷. 考虑机非冲突影响的信号交叉口右转专用相位设置研究[D]. 西安：长安大学，2022.
[9] Mohanty M, Dey P P, Panda B. Assessment of traffic safety at medianopenings using surrogate safety measures:a case study in India[J]. EuropeanTransport/Trasporti Europei, 2020(80): 1-12.
[10] Gastaldi M, Orsin F, Gecchele G, et al. Safety analysis of

（下转第 156 页）