

基于 SSM 的信号交叉口交通安全分析

陈哲鸣

【摘要】代理交通安全性指标 (Surrogate Safety Measure, SSM) 是识别交通冲突和量化其严重程度措施, 通过 SSM 可以在短时间内捕获大量交通冲突数据。在分析过程中发现对于信号交叉口中发生交通冲突的时间点和空间点存在研究空白。本文收集并分析了 T 形信号交叉口的交通视频数据, 并提出了一种使用改进的碰撞时间 (MTTC) 和碰撞指数 (CI) 等 SSM 指标来识别交叉口潜在交通冲突的算法。此外, 还使用自研算法分析信号周期交通冲突频率的时间和空间分布。结果显示, 在所选 T 形交叉口中, 交通冲突最频发的时间点是绿灯开始后前 10% 的绿灯时间, 交通冲突最频发的位置在停车线上游 10m 内。这些发现为信号交叉口的安全分析和安全措施的使用提供了量化支撑。

【关键词】代理交通安全性指标 (SSM); 信号交叉口; 交通冲突; MTTC

1 概述

道路安全是全球关注的问题, 道路交通事故每年造成 135 万人死亡, 主要发生在发展中国家, 超过 50% 的事故涉及弱势道路使用者 (vru) (世界卫生组织, 2018 年)。信号交叉口是交通事故的多发区, 根据《中国统计年鉴 2023》, 2022 年全国发生交通事故 256409 起, 死亡人数 60675 人, 受伤 263621 人, 其中交叉口交通事故率大约为 30%, 因此研究交叉口的交通安全是十分必要的。

传统的信号交叉口交通安全分析^[1]是通过将历史碰撞记录与年度交通量和交叉口的几何特征等信息关联起来进行评估。然而, 这种方法存在局限性, 因为积累足够的交通事故碰撞数据需要足够长的时间, 并且依赖于年度交通量, 不能反映实时的情况^[2]。

随着现代交通安全分析的进步, 交通安全工程师提倡使用交通冲突作为安全评估的替代安全措施。

交通冲突技术 (TCT) 最早于 1967 年开发出来, 用于观察十字路口的交通冲突^[3]。交通冲突技术通常被称为“代理交通安全性指标”或“替代安全措施”, 涉及在短时间内捕获与碰撞频率和严重程度相关的潜在交通冲突事件^[4]。代理交通安全性评估中经常使用的交通冲突指标有很多, 例如碰撞时间 (Time-to-collision, TTC) 和侵入后时间 (Post-encroachment-time, PET), 这是最常用的两个。与传统使用交通事故数据相比, 使用冲突指标可以在更短的时间内客观地捕获冲突数据^[5]。此外, 使用此方法还可以避免收集长期历史事故数据相关的道德伦理问题。

通过回顾相关文献，可以看出采用代理交通安全性指标（SSM）来分析交叉口信号周期内不同时间段和交叉口内不同位置的安全性能的研究相对较少。因此，本研究弥补相关研究中的空白。

2 代理交通安全性指标的文献综述

本节将介绍之前使用代理交通安全性指标进行道路安全分析的工作。在已经提出了的几种衡量碰撞的接近程度的代理交通安全性指标中，碰撞时间（TTC）和侵入后时间（PET）类型是最常用的两种。碰撞时间（TTC）是指车辆继续以目前的速度和方向行驶，那么直到车辆之间发生碰撞的时间。TTC 指标包括事故发生时间（TA）^[6]、暴露时间 TTC、时间积分 TTC 和优化的 TTC^[7]。其他指标包括侵入后时间（PET））、间隙时间（gap time）^[8]。

PET 表示从一个道路使用者离开冲突区到另一个道路使用者到达该区域的时间间隔^[9]。一般来说，TTC 和 PET 值越低，发生交通事故风险越高^[10]。加速度、距离和车辆接近时的速度在确定交叉口口事故碰撞的严重程度方面都发挥着重要作用^[11]。考虑到原始的 TTC 指标没有考虑车辆加速度的局限性，研究人员开发了一种改进的 TTC 指标（Modified Time-to-collision, MTTC）指标，以考虑驾驶员驾驶行为的差异^[12]。它还适用于分析变道冲突。然而，由于两辆相撞车辆可能具有相同的 MTTC 值，仅 MTTC 不足以确定碰撞的严重程度。为了表明碰撞的严重程度（反映速度对碰撞动能的影响），研究人员开发了碰撞指数（CI），其中包括碰撞前的时间间隔等其他因素。

3 研究地点和数据收集

3.1 T 字路口概览

研究地点是广东省佛山市内一处 T 型信号交叉口，该交叉口交通量适中。它有三个入口车道（分别命名为 K1、K2 和 K3）以及自行车车道和人行道。据调查所得，该交叉口为固定信号交叉口，信号周期为 90 秒，分为两个相位。作为参考，K1 和 K2 前面的人行横道标记为 F1 和 F2。

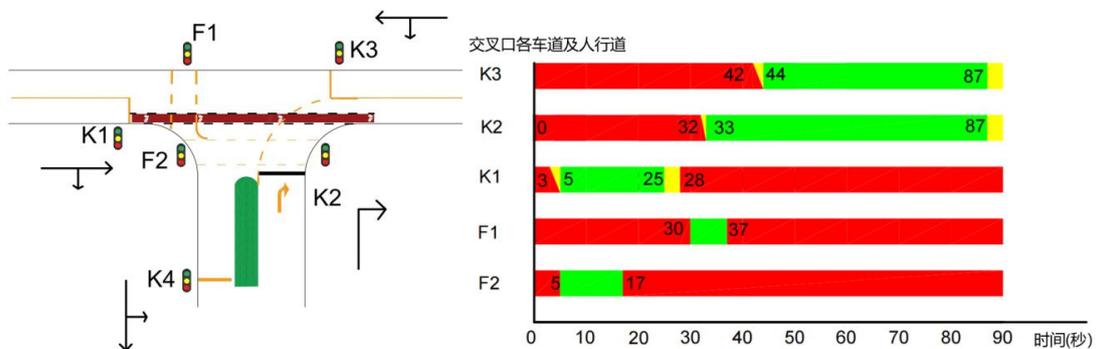


图 1 交叉口概括和信号配时表

3.2 数据收集

本研究使用提前预装在交叉口的热成像摄像头来拍摄视频数据，一共提取了 9 个时长为 10 分钟的视频(如图 2 所示)。为提高数据采集和处理效率,本研究基于 YOLOV9 和 OpenCV 对车辆进行跟踪计数和提取所有交通参与者的运动轨迹并进行坐标转换和处理。视频以 0.1 秒/帧为单位进行拆分,每一帧里所有交通参与者的坐标都被提取并存储。本研究所有数据都存储在 MySQL 数据库中以供将来检索。最后收集的数据包含以下字段,如表 1 所示。

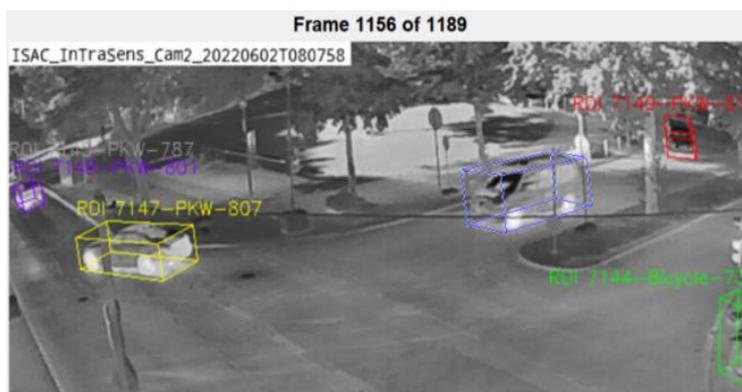


图 2 基于 YOLO 和 OpenCV 的数据收集

字段名	字段解释
idObject	交通参与者的 ID 号
idClass	交通参与者类型: 汽车、公交、摩托车、货卡车、行人、自行车、电动滑板车
FrameTimeStamp	时间戳(单位: 秒)
FrameTimeStamp_MicroSec	时间戳(单位: 微秒)
StartX_corr	移动目标中心的 X 坐标
StartY_corr	移动目标中心的 Y 坐标
StartZ_corr	移动目标中心的 Z 坐标
Length_corr	目标的长度
Width_corr	目标的宽度
Height_corr	目标的高度
YawAngle_corr	运动方向与 X 轴方向的夹角

表 1 数据字段信息表

4 研究方法

不同的代理交通安全性指标有不同的适用场景。侵占后时间 PET 指标更多用于分析信号路口处潜在的横向冲突。由于该交叉口的信号灯保证了从不同进口道进入交叉口的车辆不会发生横向冲突，因此本研究重点讨论机动车的追尾冲突。与 TTC 相比，MTTC 考虑了车辆的加速度，可以更准确地识别潜在的交通冲突，因此采用 MTTC 来分析该交叉口。此外，碰撞指数 (CI) 通常与 MTTC 结合来指示交通冲突的严重程度。MTTC 指标的计算公式如下：

如果($\Delta a \neq 0$)

$$t_1 = \frac{-\Delta V - \sqrt{\Delta V^2 + 2\Delta a D}}{\Delta a} \quad t_2 = \frac{-\Delta V + \sqrt{\Delta V^2 + 2\Delta a D}}{\Delta a}$$

如果($t_1 > 0$ 和 $t_2 > 0$)

如果($t_1 \geq t_2$) $MTTC = t_2$

否则如果 ($t_1 < t_2$) $MTTC = t_1$

否则如果($t_1 > 0$ 和 $t_2 \leq 0$) $MTTC = t_1 = \frac{-\Delta V - \sqrt{\Delta V^2 + 2\Delta a D}}{\Delta a}$

否则如果 ($t_1 \leq 0$ 和 $t_2 > 0$) $MTTC = t_2 = \frac{-\Delta V + \sqrt{\Delta V^2 + 2\Delta a D}}{\Delta a}$

如果($\Delta a = 0$ 和 $\Delta V > 0$) $MTTC = \frac{D}{\Delta V}$

$\Delta V =$ 相对速度 (m/s),

$V = V_F - V_L$, F 指后方跟随的车, L 指前方领头的车

$\Delta a =$ 相对加速度 (m/s^2), $\Delta a = a_F - a_L$,

$D =$ 初始相对距离 (m), 和 $t =$ 时间 (s)

由于所研究的交叉口车道均为单车道，因此本研究不考虑变道冲突。由此可得，发生在该交叉口车辆追尾冲突只有两种类型：一种发生在直行车道上，另一种发生在转弯时（如图 3 所示）。

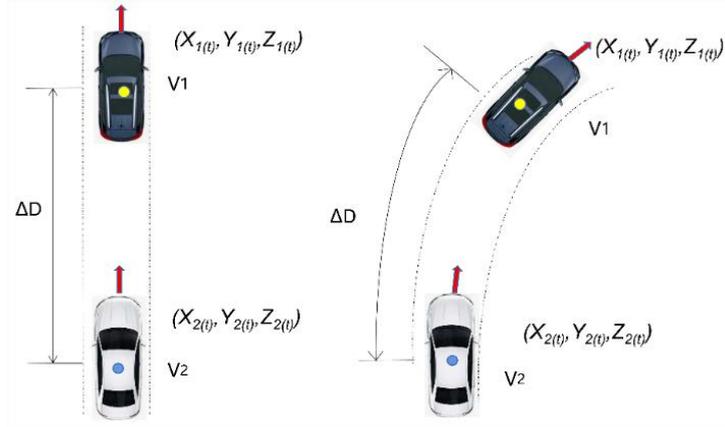


图 3 直行道和转弯道追尾冲突

对于直线车道上的冲突，根据图 3 所示，两车之间的距离 D 为：

$$D = \sqrt{(X_1(t) - X_2(t))^2 + (Y_1(t) - Y_2(t))^2 + (Z_1(t) - Z_2(t))^2}$$

然而，对于转弯车辆来说，两车之间的距离无法直接使用坐标来计算，因为车辆转弯行驶轨迹并不是规则的。因此，本研究采用单位时间内后车移动的距离来求 D ，计算原理如图 4 所示。

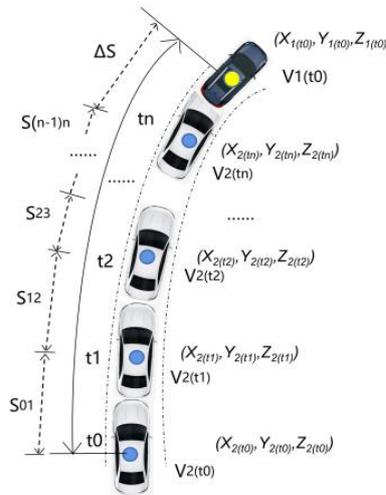


图 4 两车距离计算原理

如图 4 所示，计算时刻为 t_0 时两车之间的距离，此时前车和后车所在坐标分别为 $(X_1(t_0), Y_1(t_0), Z_1(t_0))$ 和 $(X_2(t_0), Y_2(t_0), Z_2(t_0))$ 。首先保持前车始终处于 t_0 时的状态，后车以单位时间 Δt 进行逐帧移动。从 t_0 到下一个时刻 $t_1 = (t_0 + \Delta t)$ 这一个时间内，后车行驶的距离为 S_{01} ，此时后车还没有追上前车，所以后车将继续移动。在下一单位时间 Δt 后，如果后车仍未追上前车，则继续移动，直至后车与前车重叠。

$$t_1 = t_0 + \Delta t, \quad t_2 = t_1 + \Delta t, \quad t_3 = t_2 + \Delta t \dots$$

$$t_n = t_{(n-1)} + \Delta t$$

后车移动到与前车重叠的时间为 $t = (t_n - t_0)$ ，后车在单位时间内移动的距离分别为：

$$S_{01} = \sqrt{(X_2(t_1) - X_2(t_0))^2 + (Y_2(t_1) - Y_2(t_0))^2 + (Z_2(t_1) - Z_2(t_0))^2}$$

$$S_{12} = \sqrt{(X_2(t_2) - X_2(t_1))^2 + (Y_2(t_2) - Y_2(t_1))^2 + (Z_2(t_2) - Z_2(t_1))^2}$$

.....

$$S_{(n-1)n} = \sqrt{(X_2(t_n) - X_2(t_{n-1}))^2 + (Y_2(t_n) - Y_2(t_{n-1}))^2 + (Z_2(t_n) - Z_2(t_{n-1}))^2}$$

判断 t_n 时刻时后车是否与 t_0 时刻的前车重叠的公式为：

$$\Delta S = \sqrt{(X_1(t_0) - X_2(t_n))^2 + (Y_1(t_0) - Y_2(t_n))^2 + (Z_2(t_0) - Z_2(t_n))^2} < \left(\frac{1}{2}L_1 + \frac{1}{2}L_2\right)$$

其中 L_1 表示前车长度， L_2 表示后车长度。当时间为 t_n 时，若后车与前车重叠，则此时后车从 t_0 到 t_n 所行驶的距离即为所需 D ：

$$D = S_0 + S_1 + S_2 + \dots + S_n$$

得到 MTTC 后，CI 表示为：

$$CI = \frac{(\Delta V + \Delta a \cdot MTTC) \cdot [(V_F + V_L) + (a_F + a_L) \cdot MTTC]}{2} \times \frac{1}{MTTC}$$

式中， V_F 、 a_F 、 V_L 、 a_L 分别为后车和前车的速度 (m/s) 和加速度 (m/s^2)。

将路口划分为 8 个区域，就可以直观地表示出车辆实时坐标点所在的区域。为了更准确地分析运动物体的轨迹，使用单变量插值法对轨迹进行平滑。下图 5 所示为计算 MTTC 值时的数据处理流程。本研究所有的数据处理和计算以及结果分析均通过 Python 语言进行编程。



图 5 获取 MTTC 和 CI 值的过程

5 结果分析

本研究总共获得了 29,003 个有效 MTTC 值。对应的三个进口车道是 K1 (有 810 个)、K2 (有 17,907 个) 和 K3 (有 9,796 个有效 MTTC 值)。

5.1 交通冲突在各个进口道时间上的分布

交叉口中每个进口道的信号灯红绿黄信号时长是不同的,因此,需要对每个进口车道进行详细分析,以全面了解路口交通冲突的时间分布。常用的 MTTC 值阈值有 1 秒、1.5 秒和 4 秒^[13]。本研究使用 1 秒和 4 秒作为指标的阈值。

下面三图是路口三个入口处发生潜在交通冲突(阈值分别为 1 秒和 4 秒)的频率分布。

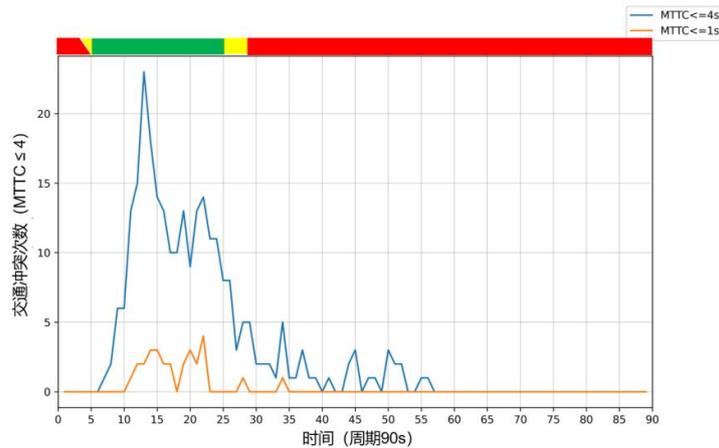


图 6 K1 进口道交通冲突频率(基于不同 MTTC 阈值)在信号周期中的波动

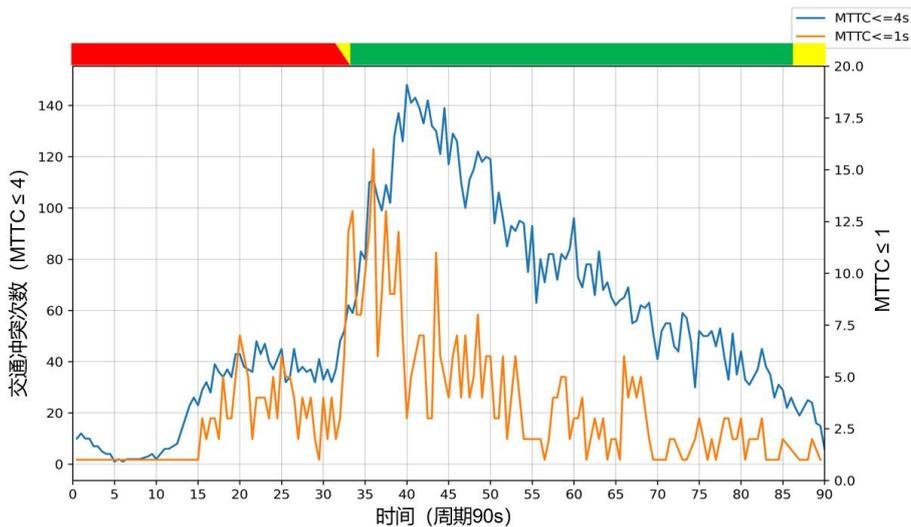


图 7 K2 进口道冲突频率(基于不同 MTTC 阈值)在信号周期中的波动

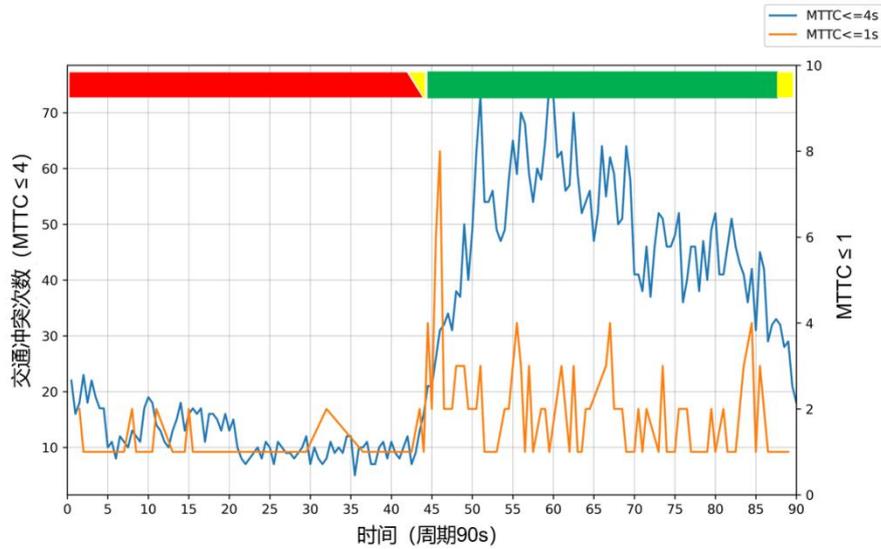


图 8 K3 进口道冲突频率（基于不同 MTTC 阈值）在信号周期中的波动

结果显示，绿灯亮起后第 10 秒，三个入口的交通冲突次数都达到高峰，随后不断减弱。但红灯时 K2 进口道交通冲突次数也达到一个小的峰值。

5.2 整个交叉口中交通冲突的时间分布

在分别分析了三个进口道的冲突次数和严重程度分布后，需要统一分析整个交叉口的冲突频率分布。为此，根据记录的冲突时间与信号时间的关系，将信号周期时长分为 22 个格子。为了考虑信号时序的差异，特别是每个进口道不同的绿灯和红灯时间，以百分比来表示发生交通冲突的时间段（例如，冲突发生在第 15% 的红灯时间）。绿灯和红灯时长均划分为 10 个格子（即 0-10% 为一格、10-20% 为一格、一直到 90-100%）。黄灯时间，指红灯结束到绿灯开始的时间段，以及绿灯结束到红灯开始的时间段，这两个时间则各以一格表示。图 9 显示了基于不同 MTTC 阈值的冲突分布。

根据结果所示，交通冲突最容易发生在第 10%—20% 的绿灯时间。随着绿灯持续，冲突的次数会逐渐减少，直至绿灯期结束。相反，交通冲突通常随着红灯亮起而增加。然而，在红灯即将结束时（即在红灯时间的最后 20% 期间），冲突频率略有下降。

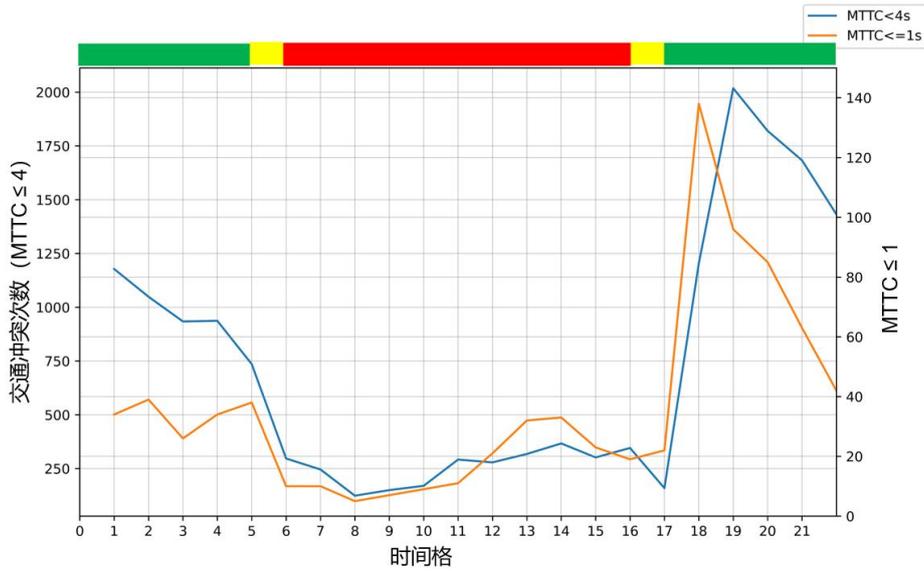


图 9 整个交叉口的冲突次数（基于不同的 MTTC 阈值）在信号周期中的波动

5.3 交叉口内交通冲突的空间分布

图 10 显示了两个 MTTC 阈值（分别为 1 秒和 4 秒）下的交通冲突热力图。两张冲突热力图显示，交通冲突主要集中在停车线上游，其他区域没有观察到明显的冲突集中情况。因此，空间分布结果表明，该交叉口最危险的区域是进口道停车线附近。

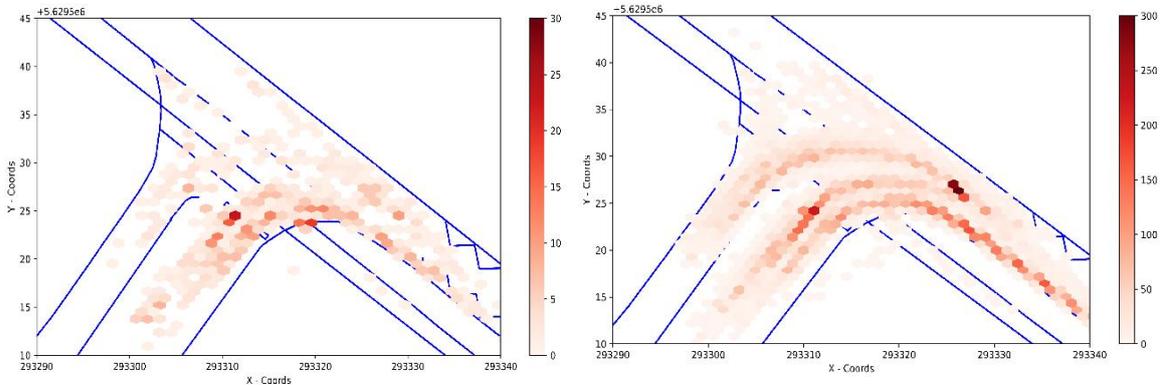


图 10 追尾冲突的空间热力分布图（ $MTTC < 1s$ （左）和 $MTTC < 4s$ （右））

5.4 交通冲突在交叉口时空中的分布

为了研究交通冲突的分布，除了分别分析交通冲突在时间、空间的分布之外，还应将时间与空间相结合分析交通冲突的时空分布以获得更准确的结果。图 11 为 MTTC 阈值为 1s 和 4s 时追尾冲突时空分布热图。图中横轴为交通信号的时间格，纵轴为冲突位置相对于停止线位置的位置。

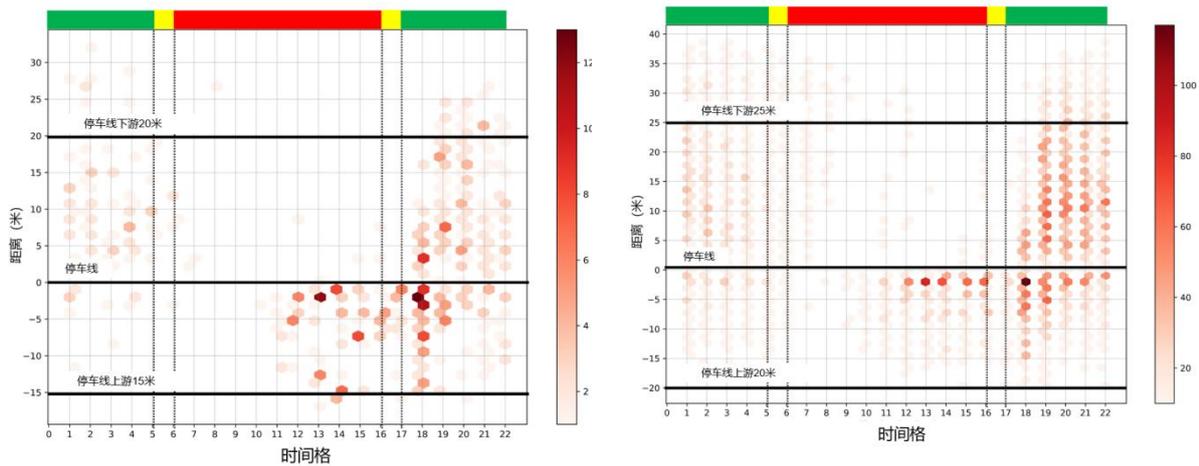


图 11 交叉口追尾冲突时空分布热力图 (MTTC < 1s (左) 和 MTTC < 4s (右))

结合交通冲突时空分布图可以发现, 交通冲突主要发生在绿灯开始后的前 10% 时间以及进口道停车线上游 10 米范围内。

5.5 代理交通安全性指标的优化

在得到交通冲突的结果后, 确定哪些冲突比其他冲突程度更严重对于评估交叉口安全非常重要。然而, 单独使用 MTTC 指标无法洞察潜在冲突的严重程度。为了解决这个问题, 碰撞指数 CI (Crash Index) 被提议作为 MTTC 的补充, 以便更好地了解潜在冲突的严重性。图 12 显示了信号周期内 K3 入口车道最小 MTTC 值的分布, 其相应的碰撞指数值也显示为蓝色虚线。

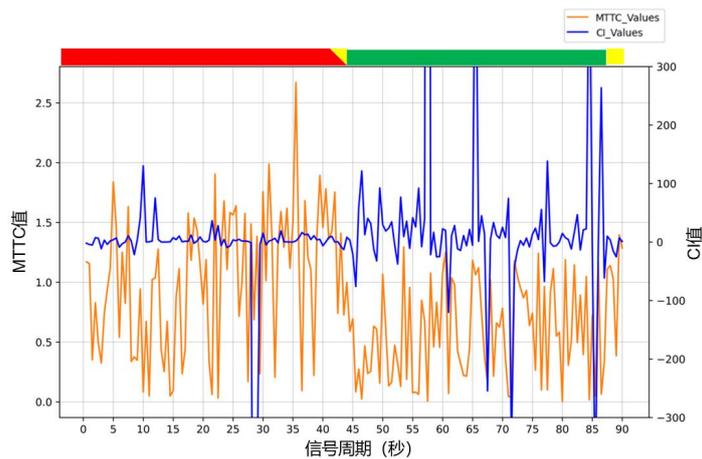


图 12 基于信号周期的 K3 入口车道最小 MTTC 值分布及其对应的碰撞指数值分布

选取图 12 信号周期第 70-90 秒时间段进行观察, 得到图 13, 可以观察到, 在某些情况下, 即使 MTTC 值相同 (例如, 绿色三角形两个 MTTC 值相同), CI 值 (例如, 红色圆形两个 CI 值不同) 可能有所不同, 更能表达出差异。这凸显了一个事实: 即使两个冲突以相

同的概率发生,它们也可能产生不同的结果,而 CI 可以捕获潜在冲突之间严重程度差异。因此,CI 可以更好地表示不同场景的安全级别,特别是在 MTTC 不是很重要的情况下。

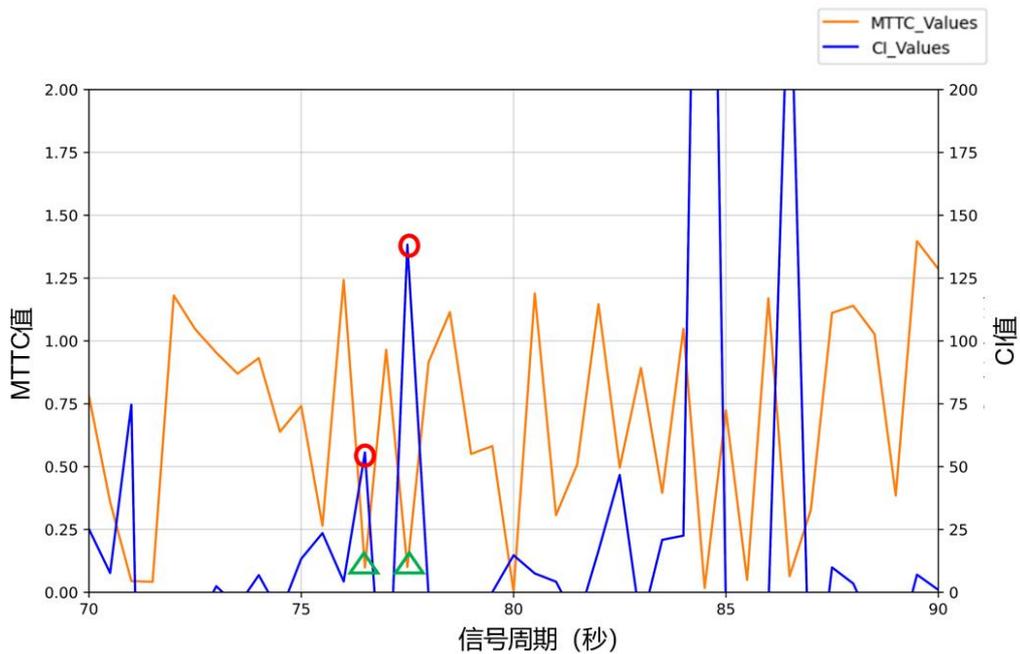


图 13 基于信号周期第 70 秒至第 90 秒的 K3 入口车道最小 MTTC 值和碰撞指数值的分布

6 结论与展望

本研究通过利用代理交通安全性指标 (Surrogate Safety Measure) 来评估 T 型信号交叉口追尾事故,分别分析了交通冲突在交叉口中的时间和空间分布,然后将它们结合创建交通冲突时空热图。结果表明,所研究的 T 型信号交叉口交通冲突主要分布在绿灯信号启动的第 10%时间左右以及进口道路停车线上游 10 米范围内。此外,MTTC 和 CI 的结果表明,具有相同概率(相同 MTTC 值)的冲突可能会产生不同的结果,而 CI 有效地捕捉了冲突严重程度差异。

此外,本文还介绍了一种利用前车和后车坐标数据实时计算车辆之间距离的方法。该技术用途广泛,不受几何限制,适用于多种场景。

所提出的用于识别信号交叉口潜在交通冲突并将其转化为时空分布的方法有望增强信号交叉口的实时优化。该方法和相关算法可以很容易地应用于其他交叉口环境中的安全分析。

值得注意的是,本研究存在一些局限性,可概括如下:

- 1) 轨迹数据的样本量有限。仅考虑了一个有信号控制 T 型交叉口。
- 2) 仅考虑交叉路口引道处的追尾冲突。没有考虑交叉口区域内其他类型的交通冲突,例如横向冲突。
- 3) 未考虑弱势道路使用者与机动车之间的潜在交通冲突。

参考文献

- [1] 江欣国, 任瀚堃, 范英飞, 等. 信号协调控制干线交通安全仿真分析[J]. 中国安全科学学报, 2020, 30(3): 143.
- [2] Essa, M., & Sayed, T. (2019). Full Bayesian conflict-based models for real time safety evaluation of signalized intersections. *Accident Analysis & Prevention*, 129, 367 - 381.
- [3] Kassabian, N. (1990). Traffic flow, capacity, roadway lighting, and urban traffic systems, 1990. Transportation Research Board.
- [4] Trinh, L. T., Sano, K., & Hatoyama, K. (2021). Modelling and simulating head-on conflict-solving behaviour of motorcycles under heterogeneous traffic condition in developing countries. *Transportmetrica A: Transport Science*, 17(4), 921 - 945.
- [5] 成卫. 城市交通冲突技术理论与应用[M]. 科学出版社, 2006.
- [6] Hydén, C. (1987). The Development of a Method for Traffic Safety Evaluation: The Swedish Traffic Conflicts Technique. Ch. Hydén.
- [7] Ozbay, K., Yang, H., Bartin, B., & Mudigonda, S. (2008). Derivation and validation of new simulation-based surrogate safety measure. *Transportation Research Record*, 2083(1), 105 - 113.
- [8] Gettman, D., & Head, L. (2003). Surrogate safety measures from traffic simulation models. *Transportation Research Record*, 1840(1), 104 - 115.
- [9] 科军, 张燕, 邹志云, 等. 基于车辆轨迹的信号交叉口机非冲突判别[J]. 交通运输系统工程与信息, 2021, 21(1): 69.
- [10] 兰柳亭, 徐磊, 龚毅. 行人与右转车辆冲突严重度评估[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2022, 36(7): 70-77.
- [11] Shekhar Babu, S., & Vedagiri, P. (2018). Proactive safety evaluation of a multilane unsignalized intersection using surrogate measures. *Transportation Letters*, 10(2), 104 - 112.
- [12] Zhao, P., & Lee, G. (2018). Assessing rear-end collision risk of cars and heavy vehicles on freeways using a surrogate safety measure. *Accident Analysis & Prevention*, 113, 149 - 158.
- [13] Mahmud, S. S., Ferreira, L., Hoque, M. S., & Tavassoli, A. (2017). Application of proximal surrogate indicators for safety evaluation: A review of recent developments and research needs. *IATSS Research*, 41(4), 153 - 163.

作者简介

陈哲鸣，男，硕士，佛山市城市规划设计研究院有限公司，工程师。电子邮箱：
chenzheming97@163.com