

基于慢行交通密度的转角交通岛设置方法研究

王云婕, 张智勇*

北京工业大学交通工程北京市重点实验室, 北京

收稿日期: 2025年10月28日; 录用日期: 2026年1月14日; 发布日期: 2026年1月28日

摘要

转角交通岛是平面交叉口重要的渠化交通设施, 其设置条件和设计方法存在较大争议。非机动车和行人在转角交通岛上的停驻交通量与交通岛容纳能力不匹配是导致交通岛拥堵的根本原因。基于对5个交叉口共计20小时的实地观测数据分析发现慢行交通在交通岛上呈不均匀分布, 因此提出对交通岛进行分区, 引入分区密度作为关键量化指标; 基于Kaplan-Meier生存分析法, 确定了不同分区的停放密度临界阈值, 进而构建了慢行交通在转角交通岛的溢出概率预测模型; 最后, 给出了信号交叉口转角交通岛设置条件。

关键词

转角交通岛, 分区密度, 溢出概率预测模型, 交通岛设置条件

Study on the Setting Methodology of Channelized Islands Based on Non-Motorized Traffic Density

Yunjie Wang, Zhiyong Zhang*

Beijing Key Laboratory of Traffic Engineering, Beijing University of Technology, Beijing

Received: October 28, 2025; accepted: January 14, 2026; published: January 28, 2026

Abstract

Channelized islands are critical traffic-calming facilities at at-grade intersections, yet significant controversy exists regarding their installation criteria and design methodology. The fundamental cause of congestion stems from the mismatch between the dwelling volume of non-motorized traffic (pedestrians/cyclists) and the island accommodation capacity. Field observation data analysis (20 hours across five intersections) revealed a non-uniform spatial distribution of slow-mode traffic on

*通讯作者。

文章引用: 王云婕, 张智勇. 基于慢行交通密度的转角交通岛设置方法研究[J]. 交通技术, 2026, 15(1): 87-101.
DOI: 10.12677/ojtt.2026.151008

these islands. Consequently, a subzone division framework is proposed, with subzone density introduced as a key performance metric. Using the Kaplan-Meier survival analysis method, critical density thresholds for different zones were determined. This enabled the development of a spillover probability prediction model for non-motorized traffic on channelized islands. Finally, installation criteria for channelized islands at signalized intersections are proposed.

Keywords

Channelized Island, Partition Density, Spillover Probability Prediction Model, Installation Criteria for Channelized Islands

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

转角交通岛[1]是平面交叉路的重要交通渠化设施,一般兼具导流岛和安全岛的功能。导流功能是将不同流向的交通进行分流,控制和指导车辆按预设轨迹行驶;安全功能是在人行横道或机动车道附近为过街慢行交通提供驻足等待空间,降低其暴露于车流的距离与时间(如图1[2]所示)。

实践中,转角交通岛在城市道路交叉口应用广泛,但其运行状况存在较大差异,部分交叉口秩序得以规范,部分则拥堵加剧。典型案例为2001年北京市广安大街改造工程,在磁器口、虎坊桥、菜市口三个交叉口设置转角交通岛,开通首日引发秩序混乱与严重拥堵,一周后紧急铲除才得以缓解。近二十多年来类似案例频发,实践表明,由于《城市道路交叉口设计规程(CJJ152-2010)》[1]仅规定了转角交通岛设计参数的最小值,导致依规设置的转角交通岛在部分交叉口引发的拥堵问题持续存在。究其原因有以下几点:一是凸起式交通岛阻碍非机动车连续通行;二是转角交通岛面积不足容纳交叉口大量的非机动车。故亟需研究设置转角交通岛的适用条件。

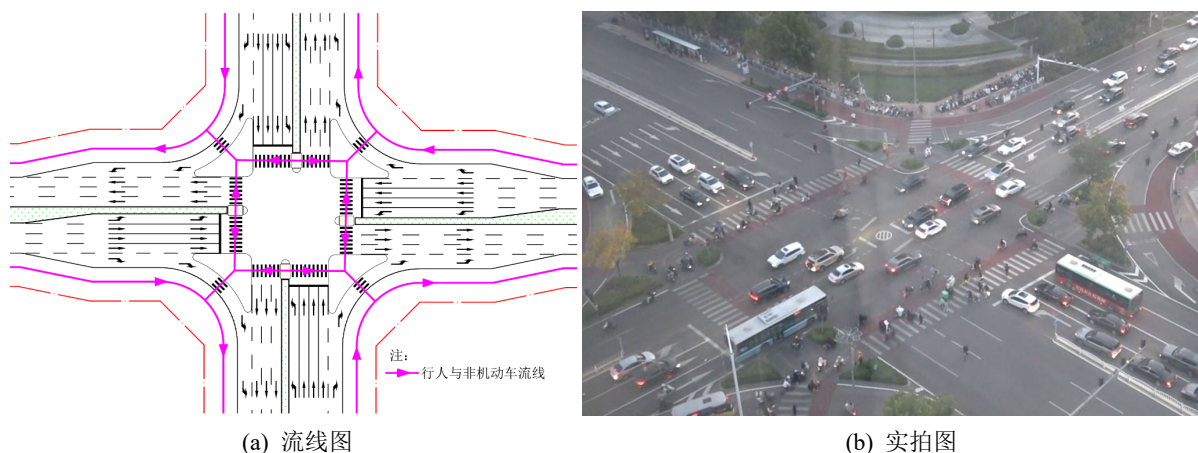


Figure 1. Traffic organization and layout schematic for pedestrians and non-motorized traffic at intersections with channelized islands

图 1. 有转角交通岛的交叉口行人与非机动车交通组织及布置型式图

理论上,设置转角交通岛可缩短慢行交通过街距离,降低转弯车辆车速,减少交通事故,且实体岛

降速效果优于标线岛[3]。Deliali 发现较大的交通岛会占据机动车空间, 从而降低右转车速[4]。Tang 发现合理设计的交通岛可显著降低右转车速并减少变道冲突[5]。Tan 发现实体岛对车辆轨迹和速度的约束强度是标线岛的 1.5~2 倍[3]。

然而, 也有研究发现设置转角交通岛可能加剧机非冲突[6][7], 矛盾结论可能源于交通岛类型差异、交通岛设置不合理及慢行交通量不匹配等因素。Fitzpatrick 发现设置转角交通岛会影响右转车速并提高事故率, 增加行人安全风险[6]。揭文祺亦发现转角交通岛的设置会导致交通冲突增加[7]。

多位学者指出交通岛设置应基于交通量及交通环境[8]-[10], 但目前仍缺乏明确的定量指标作为指导。杨静从通行效率、行人过街安全性与土地利用三方面探究不同类型交通岛的适用条件, 但未纳入非机动车因素[11]; 郭延永提出不同交通岛选型流程, 但未提出具体的适用条件[12]。综上, 转角交通岛的适用条件尚未明确界定, 缺乏可量化的关键指标及参数作为设置依据。

综上所述, 当前研究主要集中于转角交通岛功能特性, 对慢行交通待行、冲突等运行特性的考虑相对不足, 缺乏明确的适用条件及其相关的指标和参数。因此, 研究交叉口转角交通岛运行特征及慢行交通待行分布规律, 定量提出设置转角交通岛的适用条件, 对提高交叉口的设计水平和管理质量有较大意义。

2. 交通调查及慢行交通待行分布特性

2.1. 交通调查

为研究转角交通岛处慢行交通运行特性, 本文选取 5 个有转角交通岛交叉口, 采用人工调查法和摄像机录像法, 在天气晴朗的工作日 14:00~15:00、17:00~18:00 采集共 20 小时视频数据, 交通调查包括交叉口的道路条件、交通环境、非机动车和行人待行行为, 交叉口基本信息见表 1。

Table 1. Consolidated data sheet for intersection research

表 1. 研究交叉口基本信息汇总表

交叉口编号	交通岛位置	交通岛面积/m ²	信号周期时长/s	绿信比	非机动车交通量/(辆·h ⁻¹)	行人交通量/(人·h ⁻¹)
交叉口 1	西北	146	160	0.26	202	63
	东北	112		0.26	132	81
	西南	89		0.26	195	49
	东南	152		0.26	180	43
交叉口 2	西北	123	160	0.25	244	61
	东北	56		0.32	153	164
	西南	86		0.32	111	65
	东南	53		0.25	326	32
交叉口 3	西北	95	160	0.36	159	97
	东北	56		0.32	154	161
	西南	86		0.32	108	68
	东南	86		0.36	112	52
交叉口 4	西北	111	160	0.26	131	83
	东北	152		0.26	183	40
	西南	89		0.26	193	52
	东南	145		0.26	201	65

续表

交叉口 5	西北	123	160	0.25	240	58
	东北	53		0.36	321	35
	西南	86		0.36	115	49
	东南	95		0.25	156	95

采用 YOLOv12 (You Only Look Once) [13]算法(实时目标检测算法)对视频进行目标识别, 通过网格化图像与边界框预测机制[14] [15], 提取慢行交通量及位置等参数[16]。识别结果如图 2 所示。



Figure 2. Traffic organization and layout schematic for pedestrians and non-motorized traffic at intersections with channelized islands

图 2. YOLOv12 算法对交叉口慢行交通识别情况

基于 YOLOv12 检测结果, 提取类别标签为 pedestrian、bike、e-bike 的检测目标时间序列位置点, 生成其移动路径轨迹。图 3 所示轨迹分布特征表明: 区域 A 为慢行交通等待过街区域, 区域 B 为慢行交通正常通行区域, 区域 C 为相交方向慢行交通冲突集中区域, 区域 D 为慢行交通溢出交通岛通行的区域。

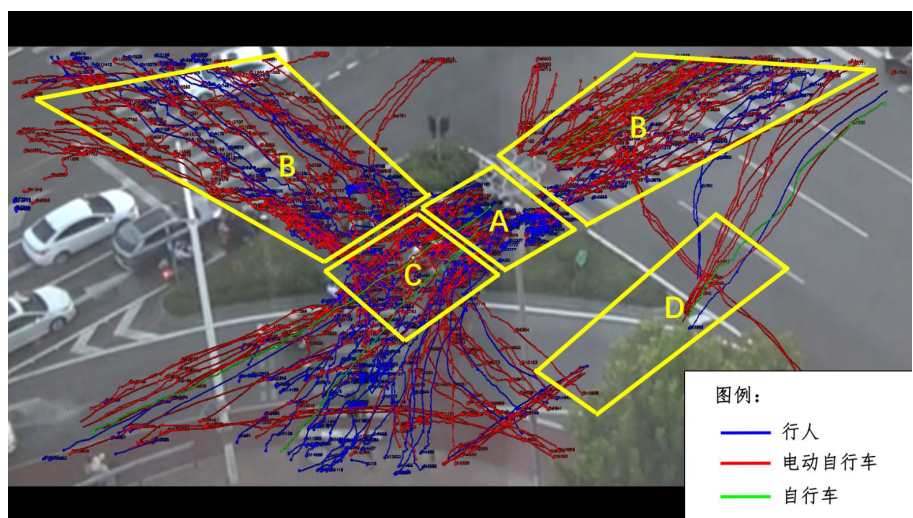


Figure 3. Trajectory schematic of non-motorized traffic at intersections

图 3. 慢行交通在交叉口的运行轨迹图

基于目标检测数据检测识别框的中心点坐标, 应用高斯滤波方法处理后生成空间分布热力图。由图

4 可知, 当慢行交通量达到 400~600 辆/小时, 该交通岛外空间开始出现慢行交通等待通行, 说明此时交通岛空间区域饱和并开始出现溢出现象, 此流量范围为该交通岛发生溢出的交通量临界阈值。

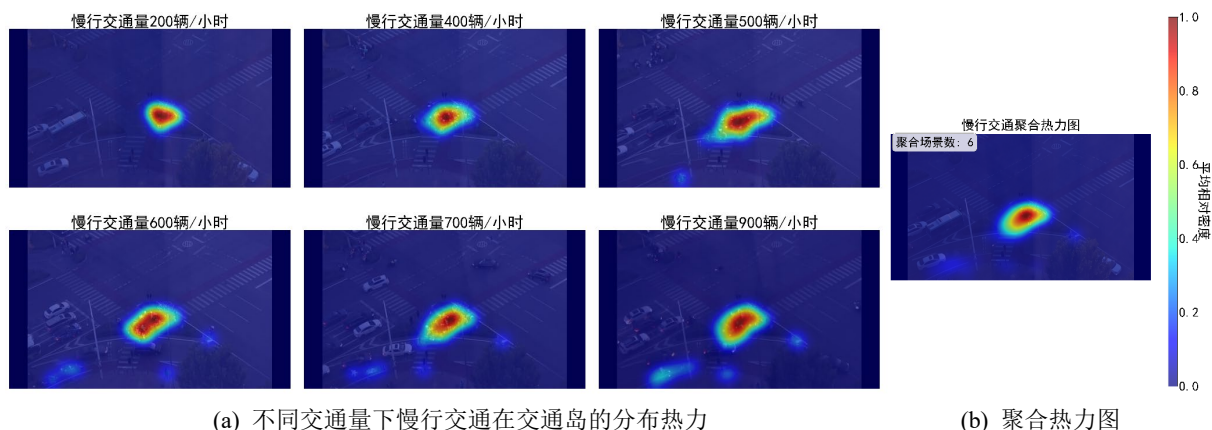


Figure 4. Heatmap of Non-Motorized Traffic Distribution on Channelized Islands

图 4. 慢行交通在转角交通岛分布热力图

如图 4 所示, 慢行交通岛在交通岛上的分布呈明显的聚集特性。基于实地调研数据和空间分布热力图分析, 转角交通岛慢行交通呈显著空间异质性: 慢行交通主要集中在交通岛中间区域等待通行, 交通岛出入口处尤其是交通岛入口处的慢行交通较少。

2.2. 停车区域划分

鉴于转角交通岛慢行交通分布的空间不均匀特性, 依据交通岛几何条件与慢行交通分布情况, 将待行位置划分为以下 9 个区域(图 5)。其中, 待行区域 1~4 分布于转角交通岛内部, 为慢行交通主要集中等待区, 待行区域 5~9 分布于转角交通岛外, 为慢行交通溢出等待区域。

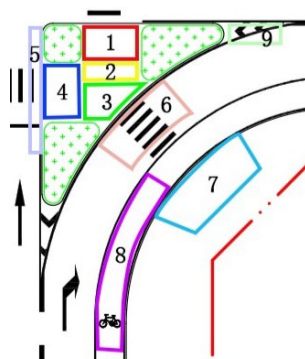


Figure 5. Layout schematic of waiting areas for non-motorized traffic

图 5. 慢行交通待行区域划分示意图

慢行交通待行位置具有显著的空间偏好: 骑行者和行人倾向于优先选择区域 1、2, 饱和后将进一步向区域 3、4 停放。然而, 由于区域 4 距离交通岛入口较远, 骑行者更偏好区域 3, 区域 4 的停放率显著偏低。

2.3. 折算系数

慢行交通包括电动自行车、传统自行车和行人, 信号交叉口慢行交通车混行行为较为常见, 首先需

要对电动自行车、行人进行换算。

电动自行车(或行人)对标准自行车换算系数可定义为:在一定的道路和交通条件下,单位时间内一辆电动自行车(或行人)所等效的标准自行车的当量数[17]。既有研究中,徐兴针对具有机非隔离设施的杭州市城市道路得出换算系数 1.35 [17];叶晓飞针对具有物理隔离设施的城市路段得出换算系数 1.23 [18];韩宝睿基于静态、动态的时空结合法得出换算系数 1.27 [19]。综合现有研究成果,本文将电动自行车对标准自行车换算系数定量为 1.28。依据《城市道路工程设计规范(CJJ37-2012)》[20],采用行人对标准自行车折算系数为 0.20。

2.4. 停车区域划分

在交通调查的基础上,将行人与电动自行车折算为标准自行车当量。对所有调查交通岛慢行交通集中等待区每个周期数据的统计分析(如表 2 所示),发现各区域交通量水平差异显著,峰值交通量差异悬殊,区域 3、区域 4 变异系数极大,区域交通量波动幅度大,流量不稳定。

Table 2. Traffic volume data table for non-motorized traffic at holding positions
表 2. 慢行交通待行位置分布交通量统计表

区域	样本量	最大值	最小值	均值	标准差	变异系数
1	194	11	0	3.71	2.02	0.55
2	194	9	0	2.86	1.91	0.67
3	194	7	0	1.51	1.77	1.18
4	194	3	0	0.33	0.60	1.81

3. 分区密度与溢出现象分析

密度是指在单位面积的交通岛上,某一瞬间存在的车辆数,用辆/m²表示,在本文中用交通岛内待行车辆数和交通岛面积之比计算,表征某一时刻交通岛内单位面积的待行慢行交通车辆数。鉴于不同交通岛面积存在差异,其容纳的慢行交通数量(即静态容纳量)必然具有异质性。因此,采用慢行交通待行交通量作为溢出现象的判断标准缺乏普适性与可比性,故提出基于密度的溢出概率模型,构建统一评估标准。

3.1. 溢出现象

转角交通岛慢行交通溢出现象是指慢行交通量超过转角交通岛的空间承载力,导致慢行交通在交通岛外排队并侵占其他方向车辆通行空间的现象。转角交通岛慢行交通溢出现象有两种类型:一是转角交通岛面积有限,交通岛内等待过街的慢行交通量超过交通岛容纳能力,慢行交通溢出至右转机动车道;二是慢行交通绿灯相位时,慢行交通通过人行横道通过交叉口横穿交通岛,当交通岛内有大量的慢行交通通行或排队时,人行横道处会有部分慢行交通溢出。

转角交通岛内溢出的慢行交通会挤占右转机动车通行空间,迫使机动车减速甚至停车,等待间隙通过。慢行交通在人行横道的溢出会影响直行机动车通行,迫使机动车驾驶员减速避让。本文中主要研究第一种溢出现象。

因此,量化转角交通岛慢行交通溢出的临界条件至关重要。具体而言,需要识别并确定当转角交通岛上瞬时聚集的慢行交通量(即一个信号周期内在交通岛上的停驻交通量)超过其静态容量阈值时,触发溢出现象的临界交通量水平。

3.2. 不同待行区域密度分布特性

慢行交通待行密度公式可表示为:

$$K = \frac{N}{S} \quad (1)$$

式中, K 为慢行交通待行密度, 辆/ m^2 ; N 为交通岛上待行车辆数, 辆; S 为交通岛面积, m^2 。

皮尔逊相关系数需要数据符合正态分布, 对调查数据进行检验后发现密度数据不符合正态分布, 因此采用斯皮尔曼相关系数。转角交通岛内慢行交通待行密度与溢出现象间的相关系数 $\rho = 0.67$ (显著性 $p < 0.05$), 表明二者之间存在显著的强正相关关系。

基于对调查交叉口转角交通岛内慢行交通待行行为调查数据, 通过统计分析各待行区域慢行交通待行密度空间分布特征(如表 3 所示), 发现不同区域慢行交通待行密度存在显著差异。

表 3 统计结果表明, 区域 2 平均密度高, 区域 3 密度变异系数显著, 密度波动幅度大, 密度离散程度高, 流量不稳定。

区域 3 和区域 4 慢行交通待行密度显著低于区域 1 和区域 2, 实地调查发现导致这两个区域密度偏低的原因存在差异。对于区域 3, 由于其位于交通岛内部靠后位置, 骑行者和过街行人普遍自发预留出一条通行通道保障相交方向通行需求, 该通道通常不停车, 降低了区域 3 整体密度。对于区域 4, 由于其相对远离交通岛入口, 慢行群体优先选择空间可达性更高的区域 1、2、3 等候, 避免绕行至距离较远的区域 4, 导致该区域待行车辆数较少, 待行密度相对较低。

Table 3. Spatial density data table for non-motorized traffic at holding positions

表 3. 慢行交通待行位置分布密度统计表

区域	样本量	密度最大值	密度最小值	密度均值	密度标准差	变异系数
1	194	0.68	0	0.24	0.13	0.54
2	194	1.39	0	0.43	0.28	0.65
3	194	0.43	0	0.08	0.10	1.23
4	194	0.25	0	0.03	0.05	1.03

3.3. 不同待行区域慢行交通密度与溢出现象相关性

鉴于转角交通岛内不同区域慢行交通密度存在差异, 需进一步分区域探究慢行交通密度与溢出现象的关联关系, 识别与溢出现象相关性最强的关键区域(如表 4 所示)。

Table 4. Correlation between density and spillover occurrences in holding positions

表 4. 交通岛各待行区域密度与溢出现象相关性

区域	相关系数 ρ	显著性 p 值	相关性强度
总区域	0.67	< 0.05	强相关
区域 1	-0.03	0.68	不相关
区域 2	0.37	< 0.05	中等相关
区域 3	0.72	< 0.05	强相关
区域 4	0.20	< 0.05	弱相关

由表 4 可知, 慢行交通密度与其在转角交通岛溢出现象存在显著的正相关关系。区域 3 待行密度和

溢出现象呈强正相关关系($\rho = 0.72$), 区域 2 呈中等正相关关系($\rho = 0.37$), 区域 4 呈弱正相关关系($\rho = 0.20$), 区域 1 未发现慢行交通密度与溢出现象间的相关关系($\rho \approx 0$, $p > 0.05$)。

4. 基于密度阈值的溢出概率预测模型

4.1. 基于生存分析的密度阈值函数

为量化转角交通岛相关区域的慢行交通待行密度与其在转角交通岛的溢出现象之间的动态关系, 引入生存分析法中的 Kaplan-Meier 估计, 该方法通过计算在每个事件发生时间点的生存概率, 并将这些概率连乘得到生存函数, 适用于单变量分析[21]。

为表征区域 3 慢行交通密度与其在转角交通岛溢出概率的关系, 构建其生存概率曲线和累积风险函数曲线(如图 6 所示)。

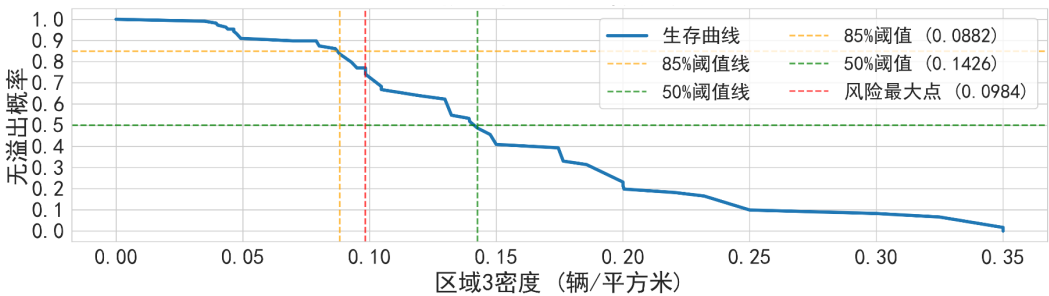


Figure 6. Survival probability curves for zone 3 density and spillover probability
图 6. 区域 3 密度与溢出概率生存概率曲线

生存曲线呈“S 型”下降, 临界转折阶段(0.04~0.17 辆/ m^2)是溢出风险的核心控制区。本文中 Kaplan-Meier 生存函数是各密度取值下的条件生存概率连续乘积构建的, 且生存概率小于 1, 当生存函数降至 0.5 时, 条件生存概率大于 0.5, 据此选取生存概率中位值(50%)对应的慢行交通密度作为阈值, 确定区域 3 密度阈值为 0.14 辆/ m^2 , 此临界值表示密度超过该水平时, 转角交通岛溢出概率显著增加。

区域 2 慢行交通密度与其在转角交通岛溢出现象存在中等正相关关系, 同理构建区域 2 密度与溢出风险的生存概率曲线(如图 7 所示), 取 50%概率为区域 2 慢行交通密度阈值, 确定区域 2 慢行交通待行密度阈值为 0.55 辆/ m^2 。

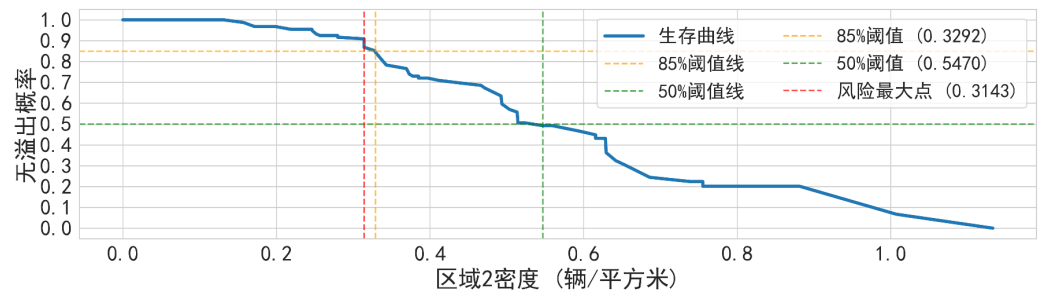


Figure 7. Survival probability curves for zone 2 density and spillover probability
图 7. 区域 2 密度与溢出概率生存概率曲线

4.2. 基于分区密度阈值的溢出概率预测模型

实证分析表明, 慢行交通待行密度与其在转角交通岛溢出现象存在显著正相关关系, 其中区域 3 密

度与溢出现象的关联性最强, 据此建立基于不同待行区域密度的慢行交通溢出现象概率预测模型。

4.2.1. 车辆到达概率计算

交叉口某进口方向折算后的混合慢行交通小时交通量可表示为:

$$Q_{pb} = Q \times \eta_p \times E_{pb} + Q \times (1 - \eta_b) \times \eta_e \times E_{eb} + Q \times (1 - \eta_p) \times (1 - \eta_e) \quad (2)$$

式中, Q_{pb} 为交叉口某进口方向折算后的标准自行车小时交通量, 辆/h; Q 为交叉口某进口方向的慢行交通小时交通量, 辆/h; η_p 为慢行交通流中行人比例, 是行人交通量与慢行交通量的比值; E_{pb} 为行人对标准自行车折算系数, 本文中取 0.20; η_e 为混合非机动车流中电动自行车比例, 是电动自行车交通量与非机动车交通量的比值; E_{eb} 为电动自行车对标准自行车折算系数, 本文中取 1.28。

假设慢行交通到达转角交通岛的数量服从泊松分布, 且不受上游交叉口信号控制的影响, 该进口方向红灯时间内平均到达交叉口的标准自行车车辆数 λ 可表示为:

$$\lambda = \frac{Q_{pb}}{3600} \quad (3)$$

根据泊松分布的概率计算公式, 红灯时间内, 慢行交通进入转角交通岛等待, 到达 n 辆车的概率可表示为:

$$P(q_R = n) = \frac{(\lambda T_R)^n e^{-\lambda T_R}}{n!} \quad (4)$$

$$T_R = T - T \times \lambda_G \quad (5)$$

式中, λ 为红灯时间内平均到达交叉口的慢行交通车辆数, 辆/s; T_R 为一个周期内的红灯时间, s; T 为交叉口的信号周期时长, s; λ_G 为绿信比。

根据该概率公式, 带入不同的车辆数 n , 可计算得到相应的车辆到达概率 $P(q_R = n)$ 。通过求解, 可以得到使 $P(q_R = n)$ 达到最大值的 n , 即为一个红灯信号周期内最大到达概率对应的车辆数 N_{\max} 。

4.2.2. 交通岛面积计算

若已知目标交通岛详细设计参数, 可以用区域面积计算公式计算区域 1、2、3 面积; 若目标交通岛详细设计参数未知, 可以基于本文实测交通岛各待行区域面积占比推算目标交通岛各待行区域的规模。

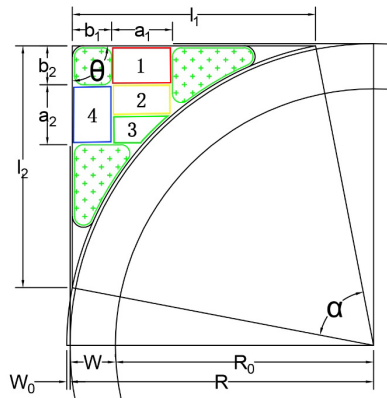


Figure 8. Schematic diagram for calculating channelized island area
图 8. 转角交通岛面积计算示意图

通过计算三角形和扇形面积, 可以得出转角交通岛整体的面积, 如图 8 所示。转角交通岛的总面积

可表示为:

$$S_{\text{总}} = \frac{1}{2} l_1 l_2 \sin \theta + \frac{1}{2} (R + W_0)^2 (\sin \alpha - \alpha) \quad (6)$$

$$R = R_0 + W \quad (7)$$

式中, $S_{\text{总}}$ 为转角交通岛总面积, m^2 ; l_1 为交通岛前侧边界线边长, m ; l_2 为交通岛左侧边界线边长, m ; R 为右转机动车道外侧转弯半径, m ; R_0 为右转机动车道内侧转弯半径, m ; W 为右转专用车道加宽后的宽度, m ; W_0 为路缘带宽度, m ; θ 为相交道路中心线夹角; α 为交通岛右侧弧心角度数。

本文中调查的信号交叉口均为正路交叉口, 为了简便计算, 取 $\theta = \frac{\pi}{2}$ 。区域 1、2、3 面积计算公式可表示为:

$$S_1 = a_1 b_2 \quad (8)$$

$$S_2 = a_1 \left[R - b_2 - \sqrt{(R + W_0)^2 - (R - a_1 - b_1)^2} \right] \quad (9)$$

$$S_3 = (a_1 + b_1) \sqrt{(R + W_0)^2 - (R - a_1 - b_1)^2} + (R - a_2 - b_2) \sqrt{(R + W_0)^2 - (R - a_2 - b_2)^2} + (a_2 + b_2 - R) R - \int_{R - \sqrt{(R + W_0)^2 - (R - a_2 - b_2)^2}}^{a_1 + b_1} \sqrt{(R + W_0)^2 - (x - R)^2} dx \quad (10)$$

式中, S_i 为待行区域 i 面积 ($i = 1, 2, 3$), m^2 ; a_1 为交通岛前侧待行区停止线长度, m ; a_2 为交通岛左侧进口道宽度, m ; b_1 为交通岛前侧出口左侧边缘到交通岛左侧边线延长线的距离, m ; b_2 为交通岛左侧进口道左侧边缘到交通岛前侧边线延长线的距离, m 。

若目标交通岛详细设计参数未知, 可以基于本文实测交通岛各待行区域面积占比推算目标交通岛各待行区域的规模。经实地勘测, 本文实测交通岛各待行区域面积占比情况如表 5。

Table 5. Proportion statistics for holding positions at surveyed intersections

表 5. 调查交叉口转角交通岛各待行区域面积占比情况

区域	调查交叉口面积占比范围	面积占比平均值
1	[0.16, 0.20]	0.18
2	[0.06, 0.15]	0.10
3	[0.17, 0.28]	0.23
4	[0.14, 0.22]	0.17

因此, 可以估算目标交通岛各待行区域面积为:

$$S_i = S_{\text{总}} \times \gamma_i \quad (11)$$

式中, γ_i 为区域 i 面积占总面积的比例 ($i = 1, 2, 3$)。

4.2.3. 区域 3 停放密度计算

由于区域 4 慢行交通停放率显著偏低, 模型构建中忽略区域 4 待行交通量。

区域 3 的待行车辆数公式可表示为:

$$N_3 = N_{\text{max}} - N_1 - N_2 = N_{\text{max}} - K_1 S_1 - K_2 S_2 \quad (12)$$

式中, N_3 为区域 3 的待行车辆数, 辆; N_{max} 为一个红灯信号周期内最大到达概率对应的车辆数, 辆; K_1

为区域 1 内慢行交通待行密度, 因其与溢出现象无显著相关关系, 取统计均值 0.24 辆/m^2 ; K_2 为区域 2 内慢行交通待行密度, 取生存模型 50%密度阈值 0.55 辆/m^2 。

区域 3 的慢行交通待行密度公式可表示为:

$$K_3 = \frac{N_3}{S_3} \quad (13)$$

式中, K_3 为区域 3 内慢行交通待行密度, 辆/m^2 。

若 $K_3 \leq 0$, 则说明该进口方向非机动车较少, 车辆停放主要集中在区域 1 和区域 2, 溢出概率不大, 可以设置转角交通岛; 若 $K_3 > 0$, 则说明慢行交通在区域 3 等待的概率较大, 需要进行下一步计算计算其溢出概率。

4.2.4. 转角交通岛非机动车溢出概率

基于生存模型及生存分析图(图 6)建立区域 3 密度与慢行交通溢出概率 $P(K_3)$ 的映射关系。为便于应用, 开发基于 Python Tkinter 的 GUI (Graphical User Interface) 程序, 集成交通流理论、泊松分布与生存分析模型, 实现转角交通岛慢行交通溢出概率预测。程序输入输出参数见表 6。

Table 6. Input and output specifications for the spillover probability calculation GUI

表 6. 溢出概率计算 GUI 程序输入输出内容表

参数分类		内容
输入	交通流参数	某进口方向慢行交通量、行人比例、电动车比例、信号周期时长、绿信比
	交通岛几何参数	交通岛面积、区域 1 面积占比、区域 2 面积占比、区域 3 面积占比
输出	计算过程	交通量转换、到达车辆分布概率计算、密度计算、溢出概率计算
	计算结果	区域 3 密度、溢出预测概率 $P(K_3)$

若溢出概率 $P(K_3) < 0.2$, 判定溢出风险较低, 可以设置转角交通岛; 若溢出概率 $0.2 \leq P(K_3) < 0.5$, 判定存在一定的溢出风险, 是否设置转角交通岛应结合现场情况判定; 若溢出概率 $P(K_3) \geq 0.5$, 判定溢出风险较高, 不适合设置转角交通岛。

4.3. 模型验证

为确保模型评估的客观性, 采用系统抽样的方法, 从已有调查数据中选取 4 个交叉口(合计 16 小时)的数据用于模型的构建与训练, 剩余 1 个交叉口(合计 4 小时)的数据作为测试集, 用于后续模型的验证与性能评估。在整个建模过程中, 严格保证测试集数据完全未被使用, 以体现评估结果的独立性和有效性。再次采用 Kaplan-Meier 生存分析法, 以区域 3 密度作为自变量, 以溢出事件作为失效事件, 构建相应的生存曲线, 并确定生存概率为 50%时所对应的密度为基于此训练集的临界密度阈值, 即 0.14 辆/m^2 。

将测试集每周期的交通量数据扩大为小时交通量, 并将其输入经训练的训练集模型中, 计算各周期的溢出概率。设定溢出概率阈值为 0.5, 若预测溢出概率 $P(K_3) \geq 0.5$, 则判定该周期将发生溢出现象, 反正则判定该周期不会发生溢出现象。统计预测溢出周期数、预测不溢出周期数、实际溢出周期数与实际不溢出周期数, 构建混淆矩阵, 并将相应统计结果填入表 7 中。

通过 ROC 分析确定了模型的最优决策阈值为 0.14 辆/m^2 。在此阈值下, 模型的分类性能和 ROC 曲线分别如表 8 和图 9 所示。模型的准确率达到 0.89, 表明其总体预测正确率较高, 有 96%的概率是真实发生的, 保证了预测的可信性。同时, 模型的召回率为 0.88, 具备了良好的风险检测能力; 综合指标 F1-Score 为 0.92, 体现了模型在精确率与召回率之间较为平衡; 0.10 的假正率和 0.90 的 G-Mean 值证实了模

型在正负类样本上的稳健性能。

Table 7. Confusion matrix between predicted and actual results
表 7. 预测结果与实际结果混淆矩阵

	预测溢出周期数	预测不溢出周期数	合计
实际溢出周期数	46	6	52
实际不溢出周期数	2	18	20
合计	48	24	72

Table 8. Model classification performance table based on the optimal threshold
表 8. 基于最优阈值的模型分类性能表

评估指标	数值	指标描述
最优阈值	0.14 辆/ m ²	模型判定溢出的临界密度值
准确率	0.89	预测正确的总体比例
精确率	0.96	预测溢出的周期中，实际溢出周期的比例
召回率	0.88	实际溢出周期中被成功预测的比例
F1-Score	0.92	准确率与召回率的调和平均数
假正率	0.1	正常周期被误判为溢出的比例
G-Mean	0.90	模型在正负类上综合性能和几何平均数

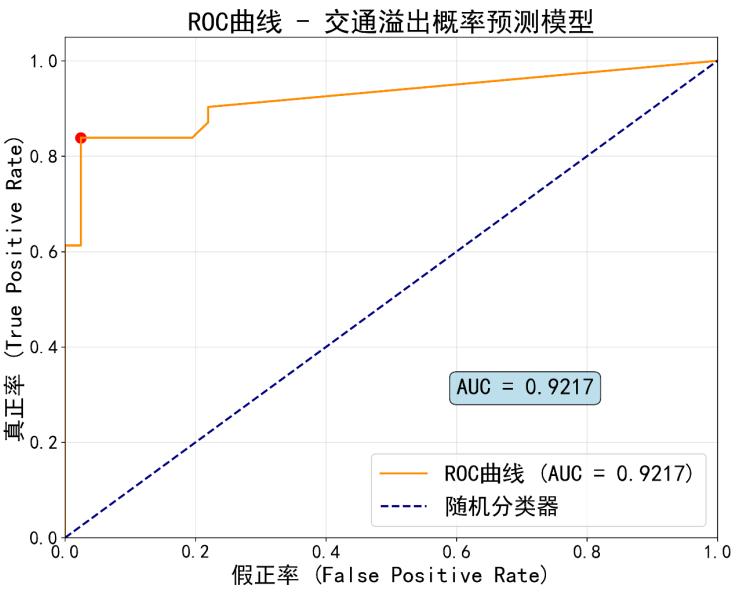


Figure 9. ROC curve of the spillover probability prediction model based on zonal density threshold
图 9. 基于分区密度阈值的溢出概率预测模型的 ROC 曲线

综合以上验证结果，基于分区密度阈值的溢出概率预测模型预测效果良好，核心指标 AUC 达到 0.92，表明模型对交通岛慢行交通溢出现象有较强的内在区分能力，同时模型高灵敏度(召回率 0.88)与高特异性(假正率 0.1)的平衡，表明模型既能捕捉到大多数溢出风险，同时也能将误报干扰降至较低水平，保证了管理措施的有效性与高效性。

4.4. 转角交通岛设置条件

将相关数据带入转角交通岛溢出概率预测模型进行计算, 基于双三次样条插值法构建三维响应曲面(图 10)。模型计算过程中, 信号周期时长输入范围设定 30~180 秒, 转角交通岛面积输入范围 20~200 平方米, 行人比例、电动自行车比例、信号相位绿信比、各区域面积占比均采用模型默认值。

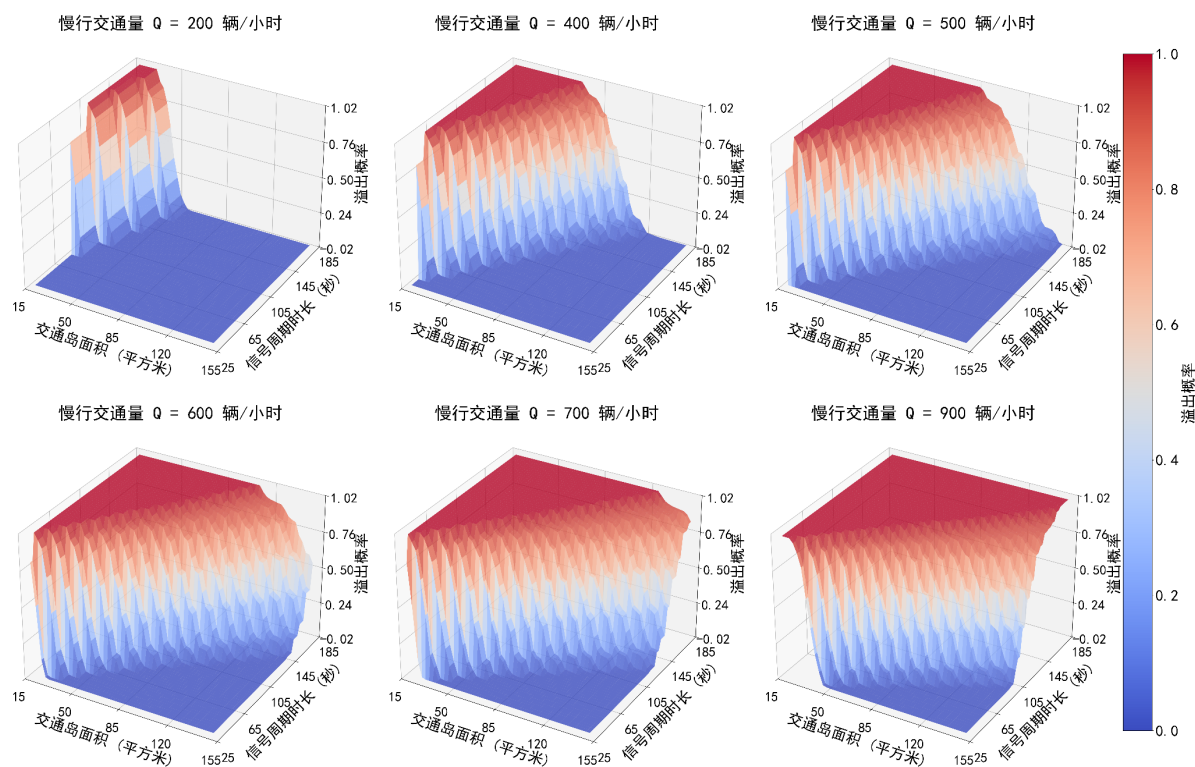


Figure 10. Spillover probability curves for channelized islands under varying non-motorized traffic volumes

图 10. 不同慢行交通量下交通岛溢出概率曲线图

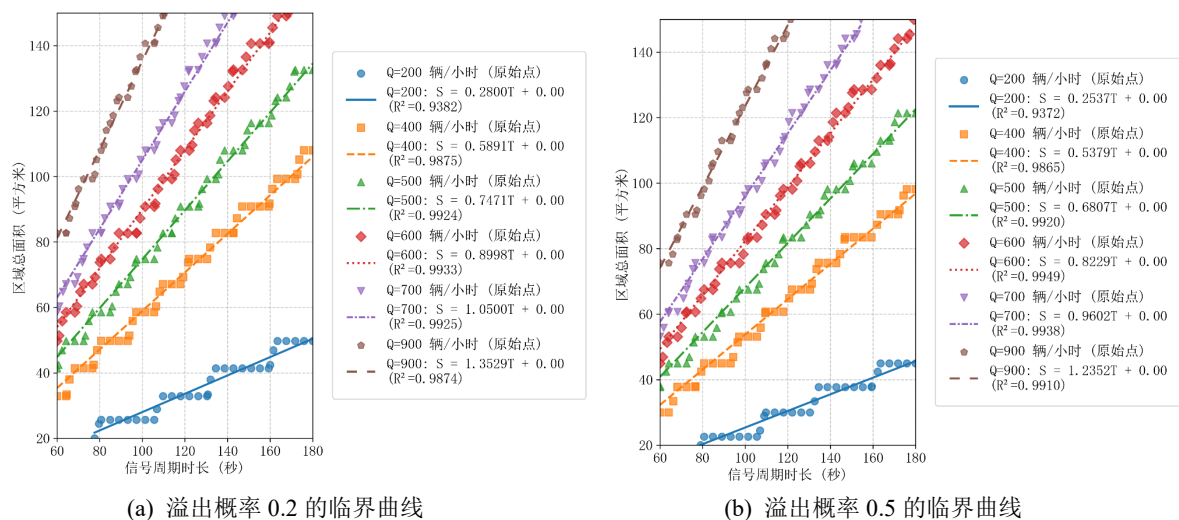


Figure 11. Critical threshold curves for 0.5 spillover probability under varying non-motorized traffic volumes

图 11. 不同慢行交通量下不同溢出概率的临界曲线图

交通岛面积、信号周期时长和慢行交通量之间存在显著的相互制约关系。在一定的交通量下, 增大交通岛面积或缩短信号周期均可有效减低溢出概率, 但是在实际交通运行过程中, 交叉口内可用于设置交通岛的面积是有限的, 缩短信号周期则可能会影响机动车通行效率, 因此需要找到交通岛面积和信号周期时长的平衡点。

提取不同交通量下不同溢出概率的临界曲线(如图 11), 该曲线表征了区域面积与信号周期时长在临界状态下的关系, 通过回归函数模型拟合:

$$S_{\text{总}} = aT + b \tag{14}$$

得到在不同慢行交通量下的拟合曲线方程。所有拟合的确定系数 R^2 均大于 0.95, 表明回归模型能准确描述临界曲线方程。

综合以上分析, 提出表 9 所示信号交叉口转角交通岛设置建议。

Table 9. Design recommendation table for channelized islands at signalized intersections
表 9. 信号交叉口转角交通岛设置建议表

某进口方向慢行交通量/(辆·h ⁻¹)	信号周期时长 T /s	交通岛总面积 $S_{\text{总}}$ /m ²	是否建议设置转角交通岛
[0, 200)	[60, 180]	≥ 20	建议设置
	[60, 90)	[20, 0.90 T)	谨慎设置, 需现场评估
		$\geq 0.90T$	建议设置
	≥ 90	[20, 0.25 T)	不建议设置
		[0.25 T , 0.90 T)	谨慎设置, 需现场评估
[200, 600)	≥ 90	$\geq 0.90T$	建议设置
		[20, 0.82 T)	不建议设置
	[60, 120)	[0.82 T , 1.35 T)	谨慎设置, 需现场评估
		$\geq 1.35T$	建议设置
[600, 900)	≥ 120	[20, 0.82 T)	不建议设置
		$\geq 0.82T$	谨慎设置, 需现场评估
	≥ 900	[60, 180]	≥ 20
			不建议设置

5. 结语

本文以慢行交通分区密度作为关键量化指标, 绘制了 Kaplan-Meier 生存分析曲线, 确定了转角交通岛溢出的临界密度阈值, 构建了基于生存分析方法的交通岛溢出预测模型。在此基础上提出了转角交通岛设置建议表, 系统的给出了设置转角交通岛的适用条件。

本研究的数据均来自超大城市的 5 个交叉口, 其交通组成、行人行为习惯、道路设计标准可能具有地域特性, 因此模型密度阈值 0.14 辆/m² 在其他类型的城市中可能需要调整。同时, 本研究基于固定的分区密度, 未考虑慢行交通流的动态波动和集群效应, 未考虑天气、特殊事件等外部因素对慢行交通停驻行为和交通岛容纳能力的影响。

未来将在不同规模、不同地域的城市中采集数据, 探索建立基于城市特征的密度阈值修正系数, 同时也会尝试更复杂的模型来模拟慢行交通的动态聚集与消散过程, 将天气、特殊事件等外部因素纳入分析框架, 构建更全面的综合评价体系。

参考文献

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. CJJ152-2010 城市道路交叉口设计规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB50647-2011 城市道路交叉口规划规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2011.
- [3] Tan, D., Asano, M. and Nakamura, H. (2011) Impacts of Channelization Islands on the Left-Turning Vehicle Maneuvers at Signalized Intersections in Japan. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, **8**, 1938-1952.
- [4] Deliali, A., Campbell, N., Knodler, M. and Christofa, E. (2020) Understanding the Safety Impact of Protected Intersection Design Elements: A Driving Simulation Approach. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, **2674**, 179-188. <https://doi.org/10.1177/0361198120909382>
- [5] Tang, R., Ma, M., Lu, G. and Liu, M. (2024) Exploring the Impact of Channelized Islands on the Driving Behavior of Right-Turning Vehicles at Intersections. *CICTP 2024*, Shenzhen, 23-26 July 2024, 2303-2313. <https://doi.org/10.1061/9780784485484.218>
- [6] Fitzpatrick, K., Schneider, W.H. and Park, E.S. (2006) Operation and Safety of Right-Turn Lane Designs. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, **1961**, 55-64. <https://doi.org/10.1177/0361198106196100107>
- [7] 揭文祺, 马社强. 信号交叉口右转渠化岛区域非机动车过街冲突[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(15): 6485-6492.
- [8] Ukkusuri, S., Ling, L., Le, T., *et al.* (2020) Performance of Right-Turn Lane Designs at Intersections. <https://docs.lib.purdue.edu/jtrp/1747/>
- [9] 叶华宝. 市政道路交叉口组织设计分析[J]. 工程技术研究, 2023, 8(16): 206-208.
- [10] 姚凌俊. 城市道路平面信号交叉口导流岛设置分析[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2015, 11(2): 255-257.
- [11] 杨静, 史玉茜, 杨晓光. 典型信号交叉口右转渠化岛设计模式的适用性研究[J]. 交通与运输(学术版), 2011, 27(12): 124-128.
- [12] 郭延永, 刘攀, 吴瑶, 等. 基于交通冲突模型的信号交叉口渠化岛设置方法[J]. 交通运输工程学报, 2017, 17(4): 140-148.
- [13] Tian, Y., Ye, Q. and Doermann, D. (2025) YOLOv12: Attention-Centric Real-Time Object Detectors. arXiv: 2502.12524. <https://arxiv.org/pdf/2502.12524>
- [14] Zhang, Y., Sun, P., Jiang, Y., Yu, D., Weng, F., Yuan, Z., *et al.* (2022) ByteTrack: Multi-Object Tracking by Associating Every Detection Box. In: Avidan, S., Brostow, G., Cissé, M., Farinella, G.M. and Hassner, T., Eds., *Computer Vision—ECCV 2022*, Springer, 1-21. https://doi.org/10.1007/978-3-031-20047-2_1
- [15] Aharon, N., Orfaig, R. and Bobrovsky, B.Z. (2022) BoT-SORT: Robust Associations Multi-Pedestrian Tracking. arXiv: 2206.14651. <https://arxiv.org/pdf/2206.14651>
- [16] Khanam, R. and Hussain, M. (2024) YOLOv11: An Overview of the Key Architectural Enhancements. arXiv: 2410.17725. <https://arxiv.org/pdf/2410.17725>
- [17] 徐兴, 仲海鹏, 赵芸. 面向非机动车生产制造的城道路路段非机动车换算系数改进方法[J]. 计算机集成制造系统, 2020, 26(2): 455-461.
- [18] 叶晓飞, 陈峻, 顾姗姗. 城道路路段电动自行车相对于自行车的换算系数[J]. 公路交通科技, 2012, 29(10): 109-116.
- [19] 韩宝睿, 马健霄, 仲小飞. 电动自行车的交通特性研究[J]. 森林工程, 2008, 24(6): 29-32, 48.
- [20] 中华人民共和国住房和城乡建设部. CJJ37-2012 城市道路工程设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [21] 李冰, 杨静丰, 陆大志, 等. 基于生存分析法与改进 NaSch 模型融合的机非混行交通流研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2025, 44(00): 1-8.