

2022年度中国交通运输协会科学技术奖表彰大会  
暨中国交通运输新技术新成果推广大会

# 道路交通二维建模与仿真

**赵 靖 教授、博导、副院长**

**上海理工大学**

微信: 15921026666

邮件: jing\_zhao\_traffic@163.com

2023/7/5

# 报告提纲

1

• 问题描述

2

• 模型建立

3

• 模型求解

4

• 模型分析

5

• 验证方法

6

• 实测数据验证

7

• 理论模型小结

8

• 仿真框架

9

• 仿真示例

10

• 经验数据

11

• 仿真分析

12

• 模型验证

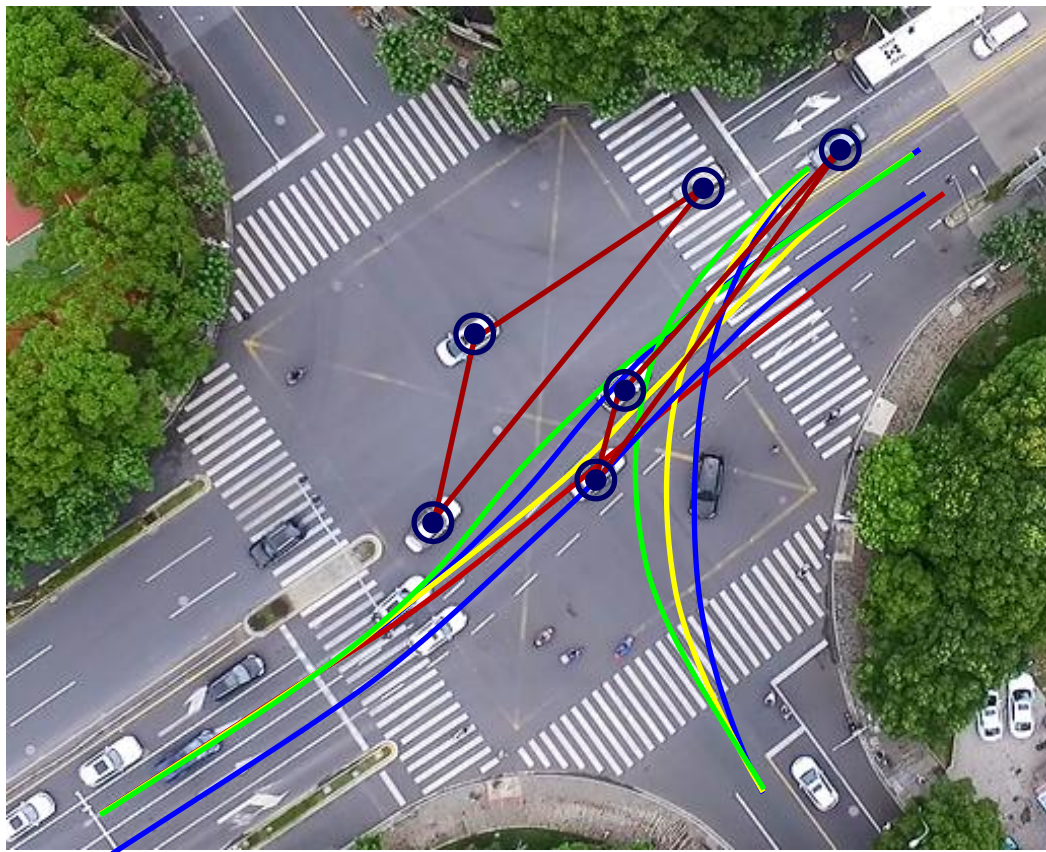
13

• 模型应用

14

• 结论

# 问题描述



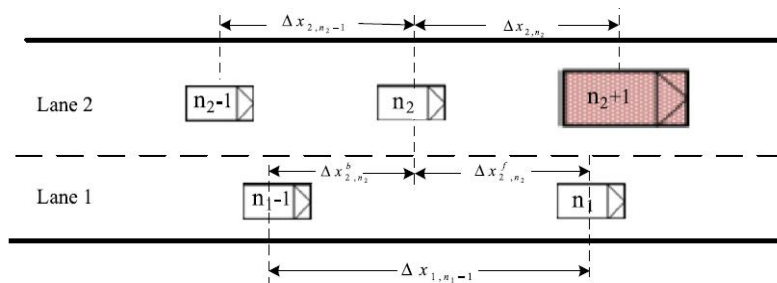
- ▶ 驾驶员在交叉口内部可以随意**进行路径和速度变化**，轨迹离散程度大。
- ▶ 行车轨迹还会受到**交叉口其他冲突车辆行为**的影响。
- ▶ 现有的仿真工具中，车辆**始终准确地沿着建模者设置的路径运行**，这种情况是不现实的。

**考虑车辆之间相互作用，描述交叉口内部车辆行为是困难的**

# 问题描述

## 跟驰模型

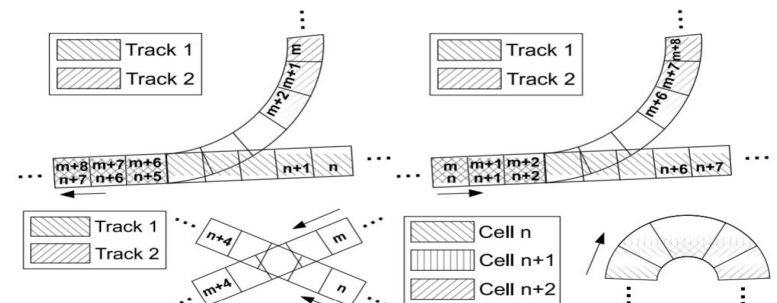
- 跟驰模型可以描述交通流的许多微观属性，但其中大多数只适用于单一车道上车辆排队形式。



(Zhao et al., 2016)

## 元胞自动机

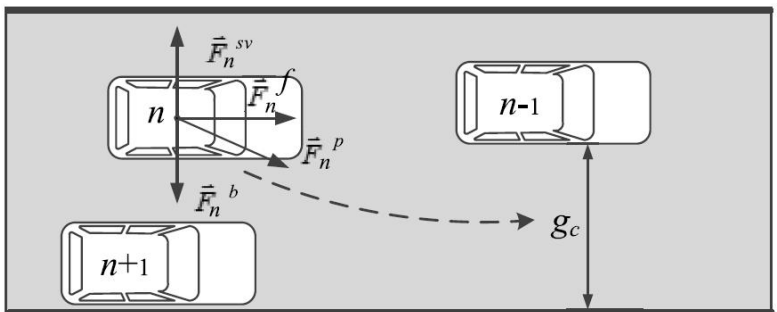
- 每一个元胞具有相等的大小，并且车辆必须沿着给定的元胞行驶轨迹运行。



(Vasic et al., 2012)

## 社会力模型

- 轨迹**不是**直接根据**驾驶员的行为**计算获得的，例如转方向盘的角度和刹车或踩油门踏板的行为。



(Yang et al., 2018)

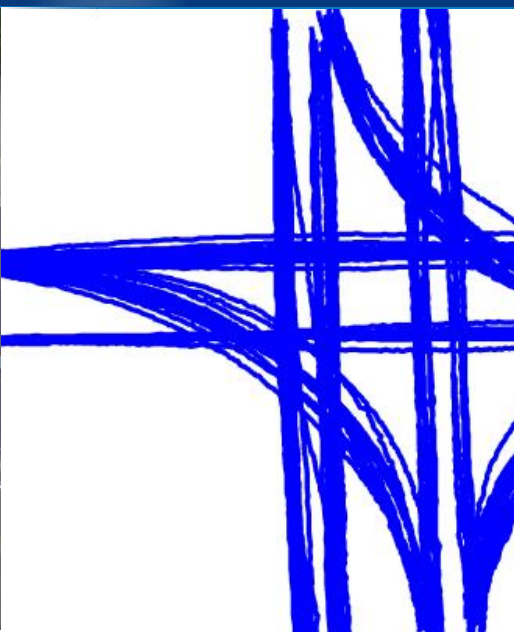
# 研究目的

- 真实轨迹与现有微观软件模拟获得的轨迹之间存在差异

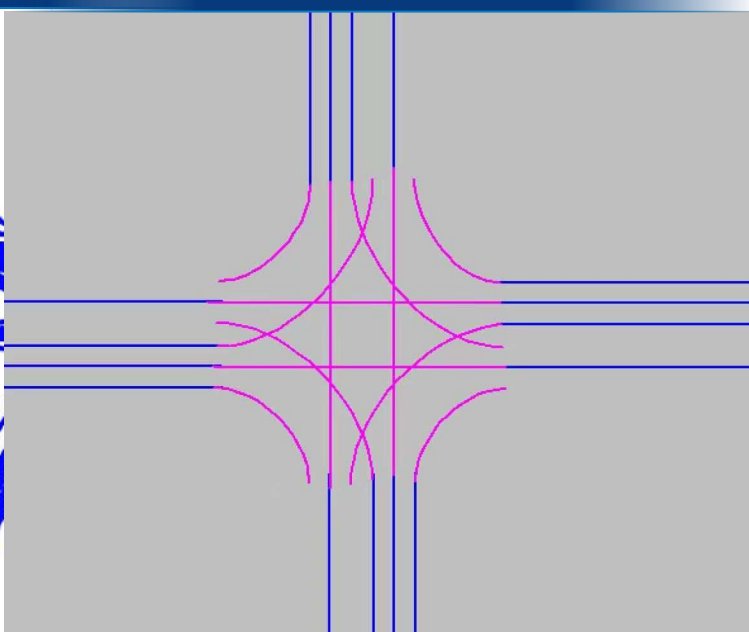
现实交叉口



现实轨迹



Vissim 仿真



旨在模拟人工驾驶车辆轨迹，将车辆间二维交互作用列入考虑。

# 模型建立

输入

冲突车辆的初始和终止状态

输出

冲突车辆的完整轨迹

模型框架

该问题被描述成一个**最优控制**模型

- 车辆的动态变化
- 运动的目标函数
- 约束

控制变量

**转向和加速度的变化**为该模型的控制变量。

**创新点**

描述二维平面内车辆交互影响下的路径和速度变化。

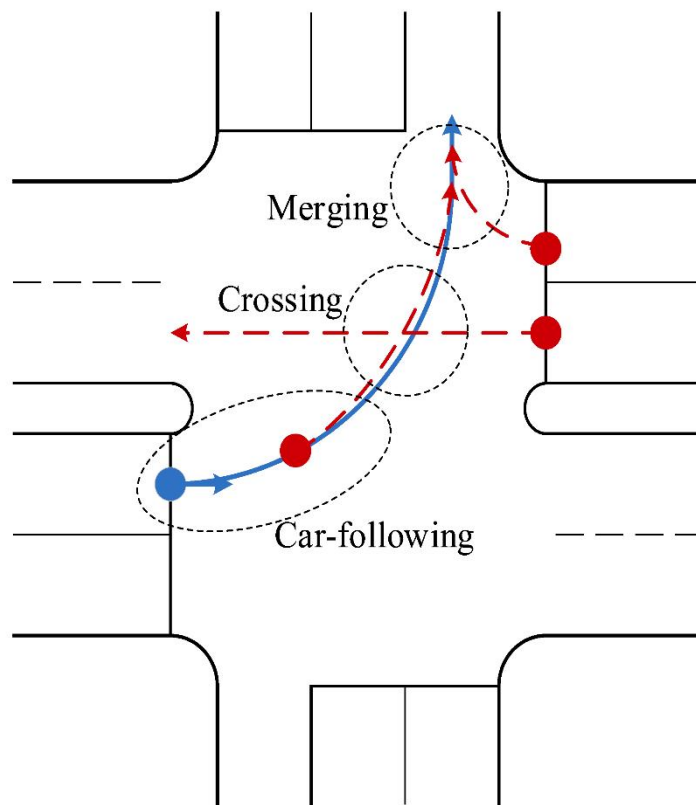
# 模型建立

## 车辆的动态变化

- ▶  $\mathbf{X}_i(s)$  表示车辆的移动距离  $s$  时的车辆的状态，他可以由下列参数描述：

- ▶  $x_i(s)$  和  $y_i(s)$  -- 水平坐标
- ▶  $\theta_i(s)$  -- 车辆的转弯角度
- ▶  $p_i(s)$  -- 车辆配速  
(速度的倒数)

$$\mathbf{X}_i(s) = \begin{bmatrix} x_i(s) \\ y_i(s) \\ \theta_i(s) \\ p_i(s) \end{bmatrix}$$



- 选择**车辆行驶的距离**而不是时间作为状态描述的自变量。
- 实现纵向和横向控制的分离。

# 模型建立

## 车辆的动态变化

- ▶ 状态 $\mathbf{X}_i(s)$
- ▶ 系统的动态变化

$$\frac{d}{ds}\mathbf{X}_i(s) = \frac{d}{ds}\begin{bmatrix} x_i(s) \\ y_i(s) \\ \theta_i(s) \\ p_i(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_i(s) \\ \sin \theta_i(s) \\ \kappa_i(s) \\ \alpha_i(s) \end{bmatrix}$$

- ▶  $\kappa_i(s)$  -- 车辆轨迹的曲率（转弯半径的倒数）
- ▶  $\alpha_i(s)$  -- 车辆加速度



- 选择**车辆行驶的距离**而不是时间作为状态描述的自变量。
- 实现纵向和横向控制的分离。

# 模型建立

## 目标函数

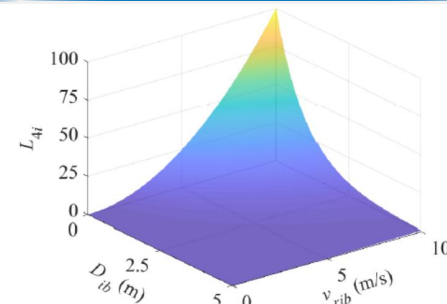
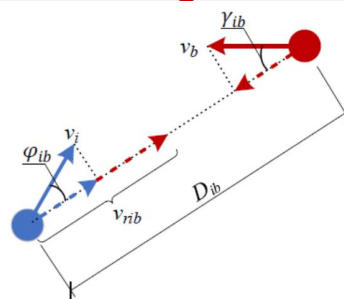


$$L_i = \sum \beta_{ji} L_{ji} = \beta_{1i} p_i + \beta_{2i} \frac{1}{2} \kappa_i^2 p_i^{-4} + \beta_{3i} \frac{1}{2} \alpha_i^2 p_i^{-6} + \beta_{4i} v_{rib}^2 e^{-D_{ib}}$$

- ▶ 时间
- ▶ 舒适度
  - ▶ 向心加速度
  - ▶ 纵向加速度
- ▶ 安全性能

安全性能的组成

安全的目标函数值



## 约束

### ▶ 行驶速度

$$\frac{1}{v_{\max}} \leq p \leq \frac{1}{v_{\min}}$$

### ▶ 轨迹曲率

$$-\frac{1}{r_{\min}} \leq \kappa \leq \frac{1}{r_{\min}}$$

### ▶ 加速度

$$\alpha_{\min} \leq \alpha \leq \alpha_{\max}$$

- ▶ 在常规的人类驾驶行为中，我们一般不会对车辆到达其物理性能极限。因此，我们在约束中简化了车辆相关约束。

车辆

交互车辆的轨迹被**同时规划**。

模型

1. 本研究提出的二维轨迹规划问题是一个终点自由的问题。**行驶距离缩放为**  $\zeta = \frac{s}{s_{fi}}$ 。终点处的缩放距离为1。
2. 考虑到约束的形式，我们将控制变量离散化。  
该离散问题转为约束优化问题求解。

求解

**创新点**

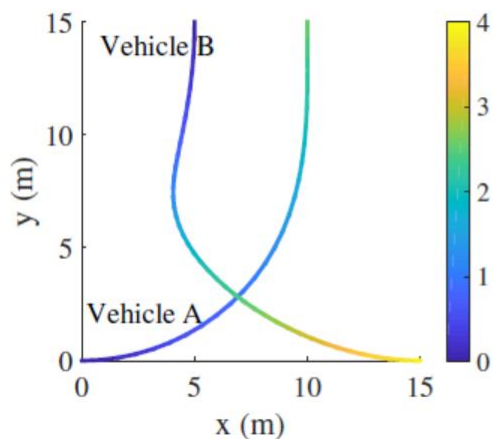
该模型可内生给出车辆通过的先后顺序。

# 模型分析

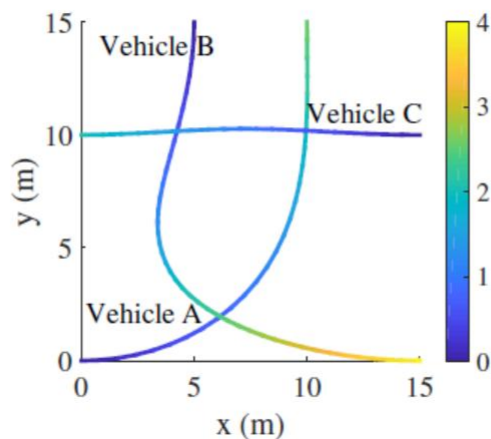
## 模型的描述能力分析

- ▶ 所提出的方法可以同时规划多辆车的轨迹。
- ▶ 为了方便理解，我们在下面的分析中以两辆车为例进行分析。

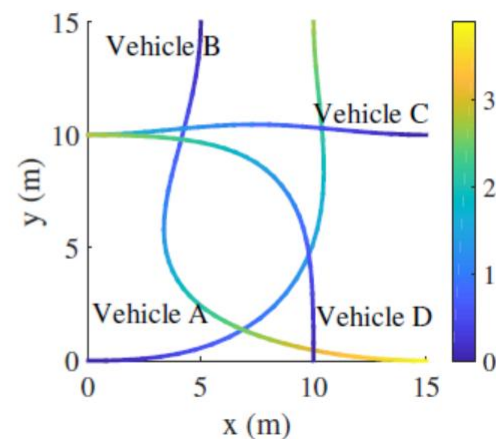
(a) Two vehicles (A and B)



(b) Three vehicles (A, B and C)



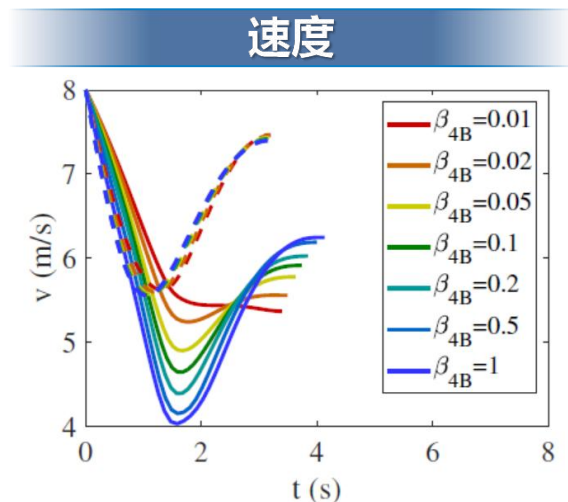
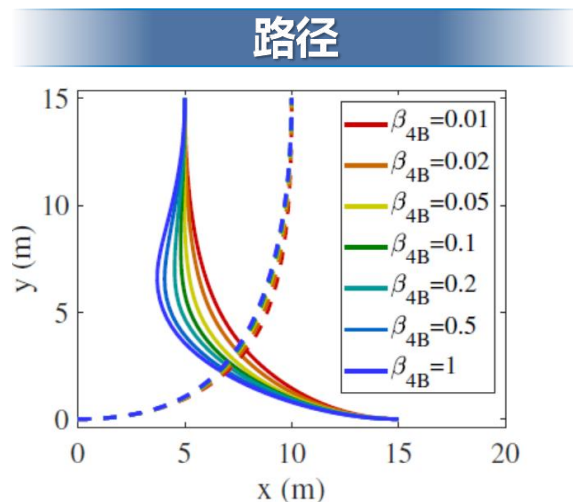
(b) Four vehicles (A, B, C and D)



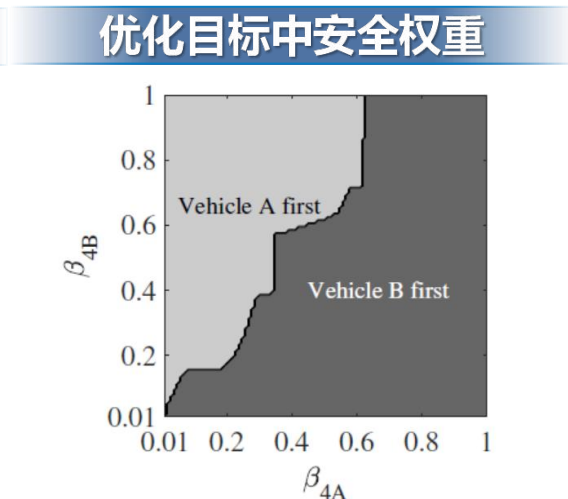
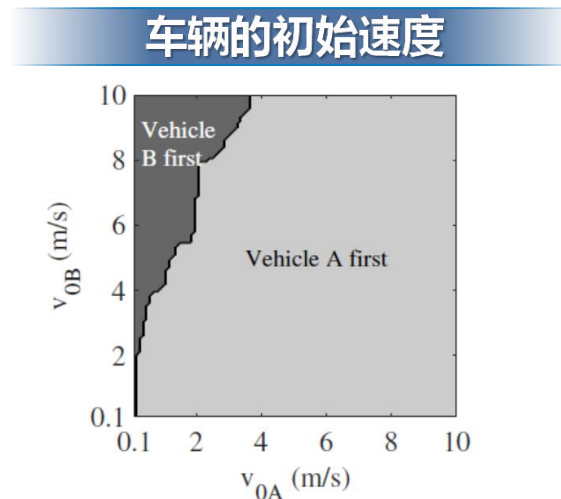
# 模型分析

## 模型的可行性分析

- 交叉
- 轨迹分析



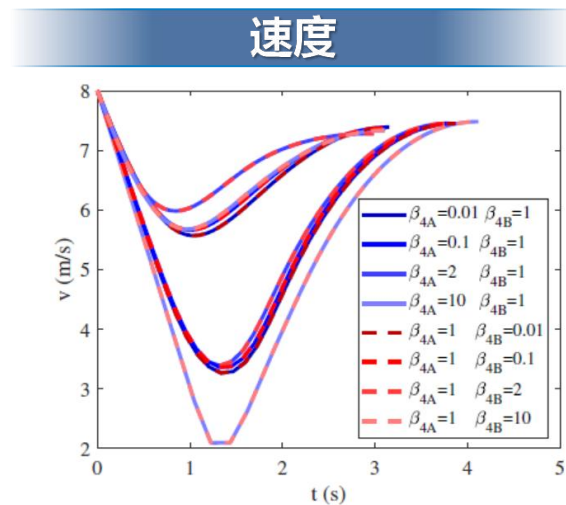
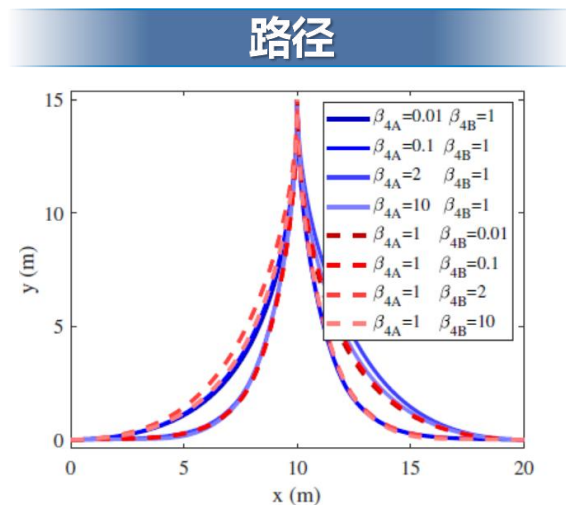
- 通行顺序分析



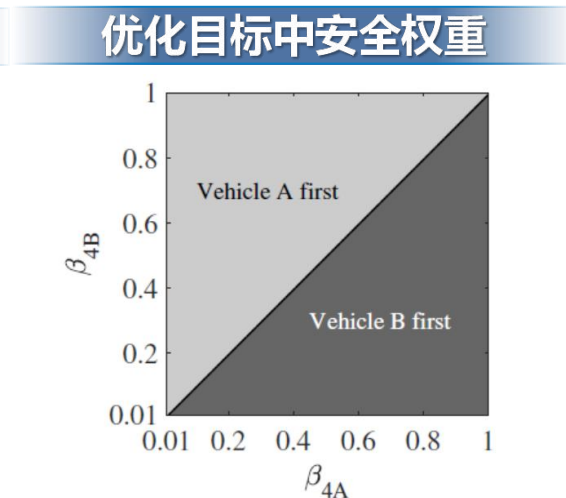
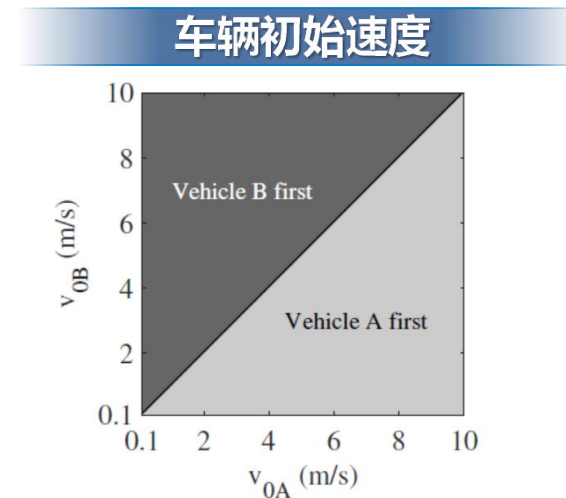
# 模型分析

## 模型的可行性分析

- ▶ 合流
- ▶ 轨迹分析



- ▶ 通行顺序分析



# 验证方法

## 以往研究的验证方法

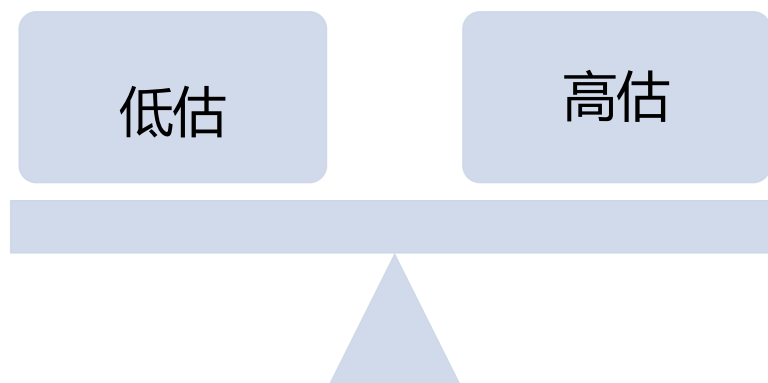
### 两步法

参数标定 → 模型验证

不足之处

1. **关于评价指标的选择：**虽然该模型可以使用单个车辆性能去进行验证，但在验证中通常使用总体性能指标。

**关于随机模型的验证：**选择一组随机参数进行验证？或是尝试使用最佳参数集验证？



# 验证方法

## 聚类验证方法

参数标定

使用微观的性能指标为每辆车生成一组最优的参数。



参数聚类

根据校准结果对参数进行聚类，以选出最特性因素较为明显的驾驶员。

模型验证

基于微观的性能指标，使用这些代表性的驾驶员的特征参数去进行模型的验证。

**创新点**

适用于考虑个体驾驶行为随机性的轨迹模拟验证方法。

# 实测数据验证

## 参数标定

### 参数:

▶  $\beta_i = \{\beta_{1i}, \beta_{2i}, \beta_{3i}\}$

▶  $B = \{\beta_A, \beta_B\}$

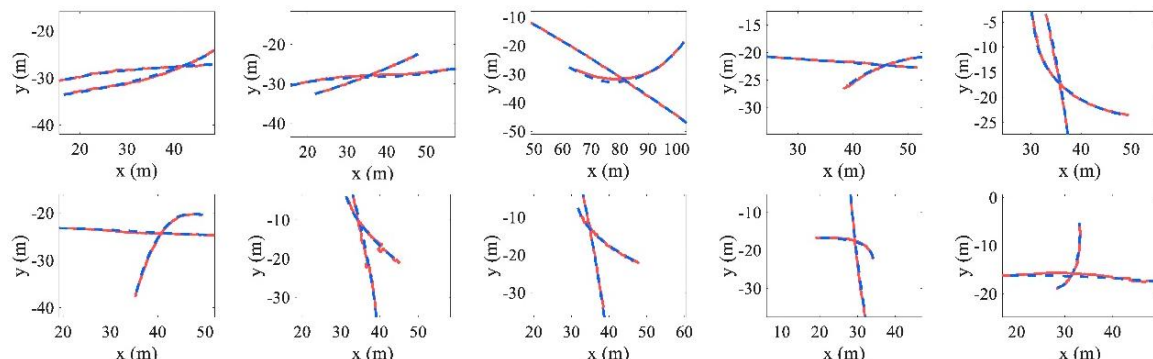
### 目标函数

▶  $\min_B \sqrt{\sum_{t=1}^n [(x_t^p - x_t^r)^2 + (y_t^p - y_t^r)^2]}$

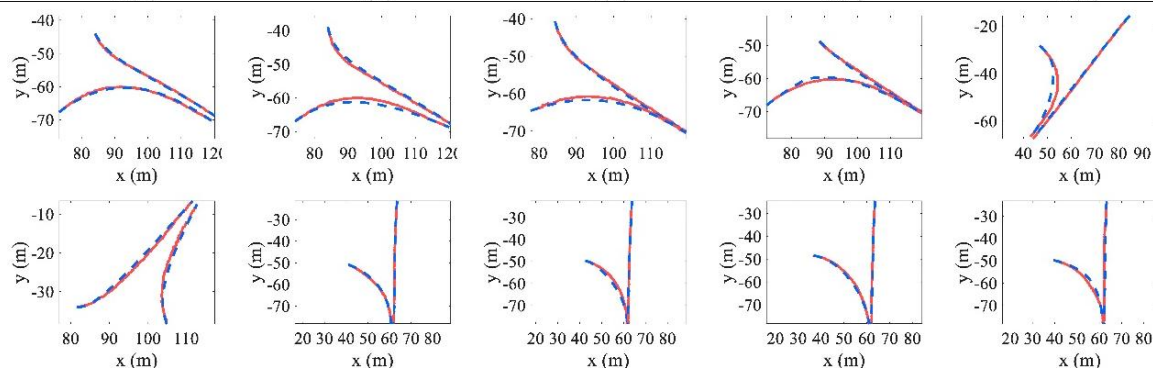
### 结果

	RMSE
mean	1.049 m
maximum	2.235 m
minimum	0.206 m

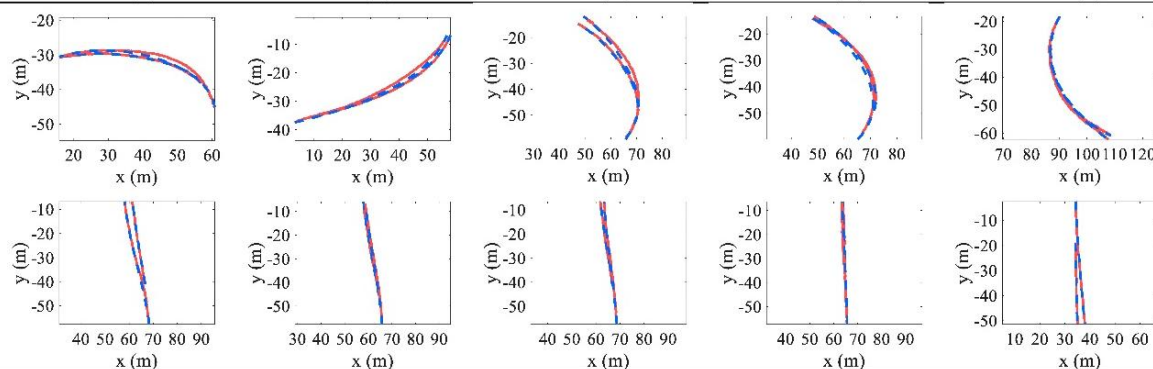
Crossing



Merging



Car-following



Legend

— Real trajectory

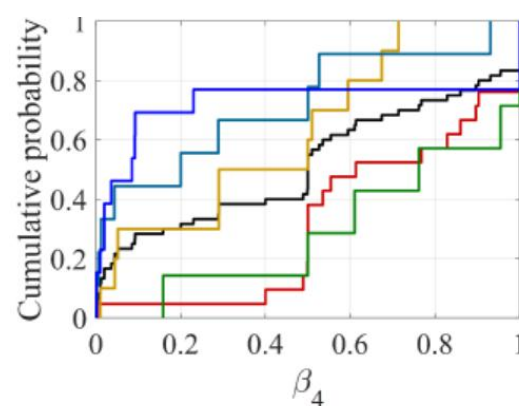
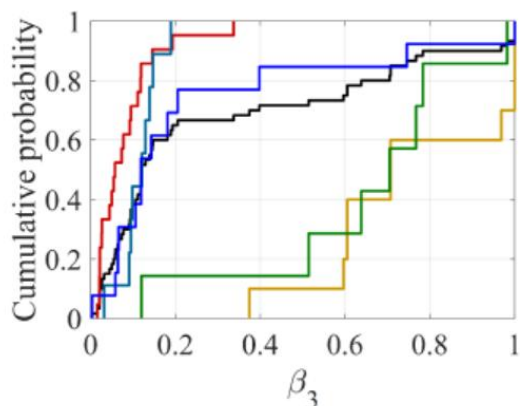
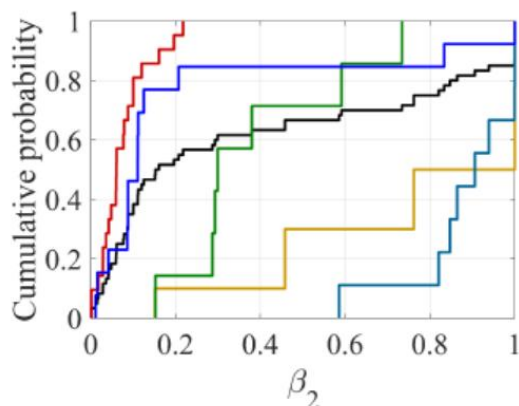
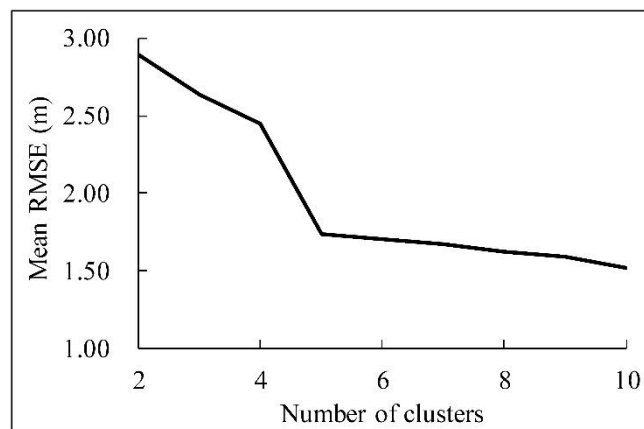
- - Planned trajectory

# 实测数据验证

## 参数聚类

### ► 使用K-means方法进行聚类

聚类类别	聚类中心			占比
	$\beta_2, \text{s}^5/\text{m}^3$	$\beta_3, \text{s}^5/\text{m}^3$	$\beta_4, \text{s}^2/\text{m}$	
1	0.085	0.093	0.790	35.00%
2	0.869	0.824	0.309	16.67%
3	0.437	0.751	0.689	11.67%
4	0.906	0.134	0.229	15.00%
5	0.103	0.294	0.094	21.66%

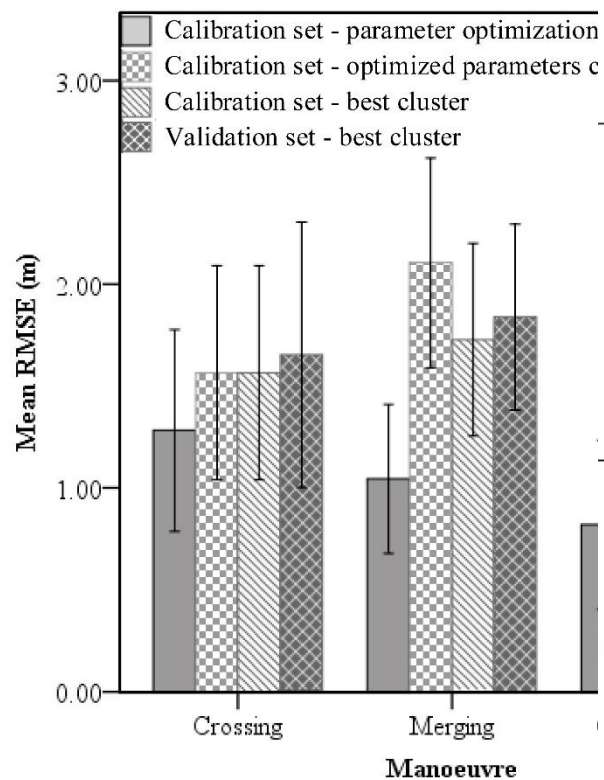


Legend — All calibrated vehicles — Vehicles in Cluster 2 — Vehicles in Cluster 4  
— Vehicles in Cluster 1 — Vehicles in Cluster 3 — Vehicles in Cluster 5

# 实测数据验证

## 验证结果

mean RMSE = 1.453 m

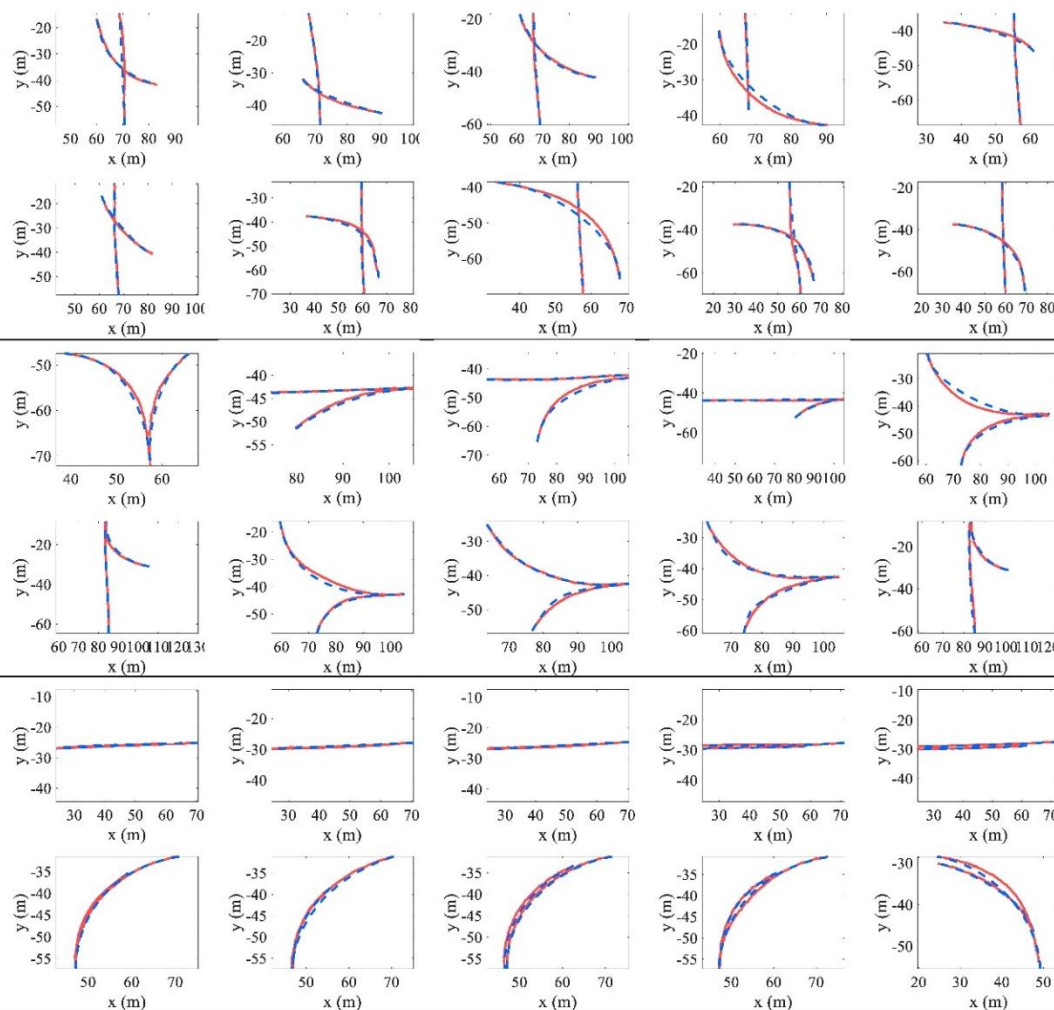


Crossing

Merging

Car-following

Legend



## 验证结果

- ▶ 本研究认为模型模拟的车辆轨迹误差**1.5米**，这是合理的误差范围，原因如下：
  - ✓ 交叉路口的交互车辆的完整轨迹仅通过**给出的车辆的初始和终止状态**就可以确定。
  - ✓ 每辆车仅使用了**四个参数和五种代表性的**驾驶员类型。
  - ✓ 在比较了同一时刻的位置后发现，车辆在**10m/s**的速度下，在同一路径上的1秒延迟内将产生**10m**的误差。因此，本文轨迹的1.5米的误差距离是合理的。

总体而言，本文所提出的模型可以较好地描述交叉口交互车辆的轨迹。

# 理论模型小结

## 模型建立

本研究**提出了一种二维平面交通流模型**来描述交叉口人工驾驶车辆轨迹。

## 模型验证

该模型为每个车辆组合提供了一组参数。并且**提出了一种通用的“校准-聚类-验证”方法**，用于验证交叉口处交互车辆的轨迹规划模型的适用性。

## 结论

该模型规定了车辆之间距离的安全成本。当车辆的轨迹被共同规划时，较好地**对多车轨迹进行模拟（误差为1.5米）**

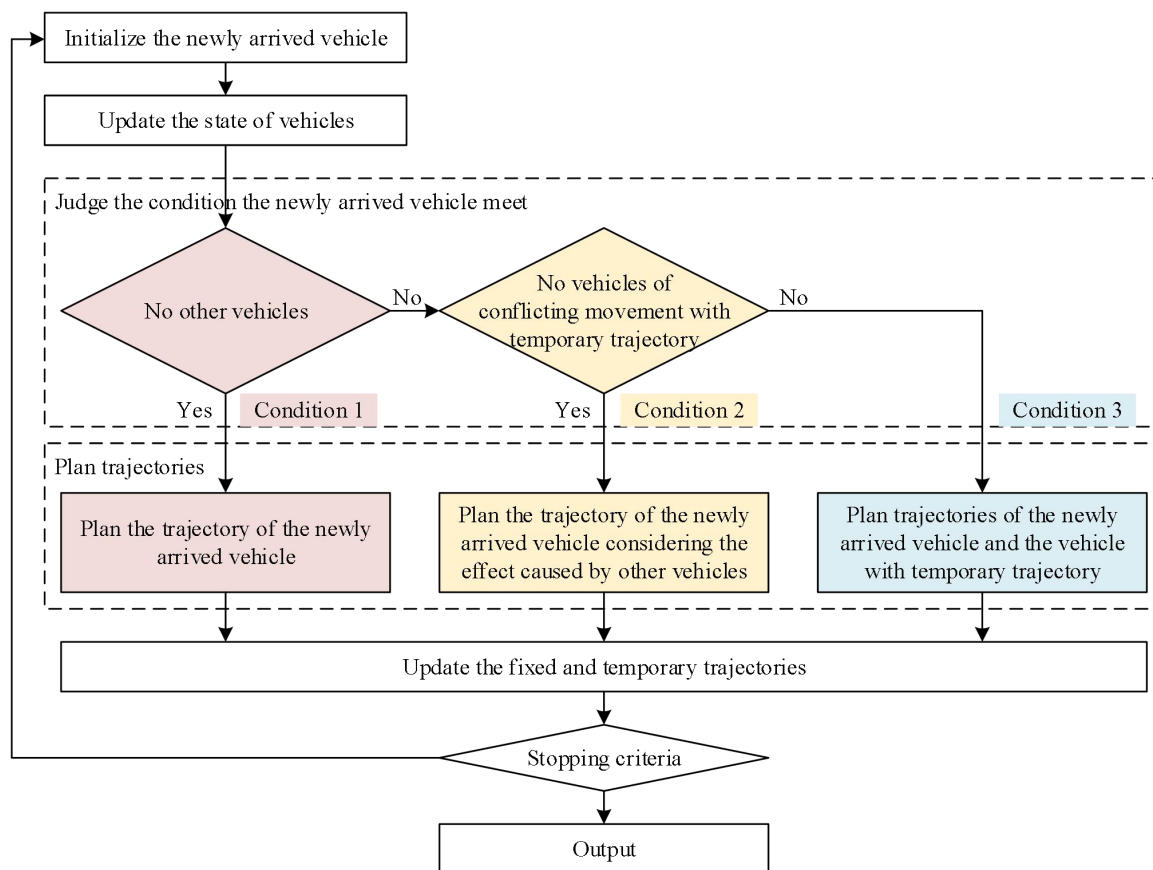
Jing Zhao, Victor L. Knoop, Meng Wang. Microscopic traffic modeling inside intersections: interactions between drivers. *Transportation Science*, 2023. 57(1): 135-155.

Jing Zhao, Victor L. Knoop, Meng Wang. Two-dimensional vehicular movement modelling at intersections based on optimal control. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2020, 138, 1-22.

# 仿真框架

- ▶ 仿真框架包含决策层和操作层。
- ▶ 使用离散事件仿真框架。当一辆车到达时，仿真过程包含以下六个步骤。

- ▶ **Step 1: 初始化新到达车辆**
- ▶ **Step 2: 更新分析区内所有车辆状态**
- ▶ **Step 3: 判断新到车辆面对的工况**
- ▶ **Step 4: 轨迹规划**
- ▶ **Step 5: 更新固定和临时轨迹**
- ▶ **Step 6: 输出车辆轨迹**



# 仿真框架

- ▶ 仿真框架包含决策层和操作层。
- ▶ 使用离散事件仿真框架。当一辆车到达时，仿真过程包含以下六个步骤。

## Condition 1

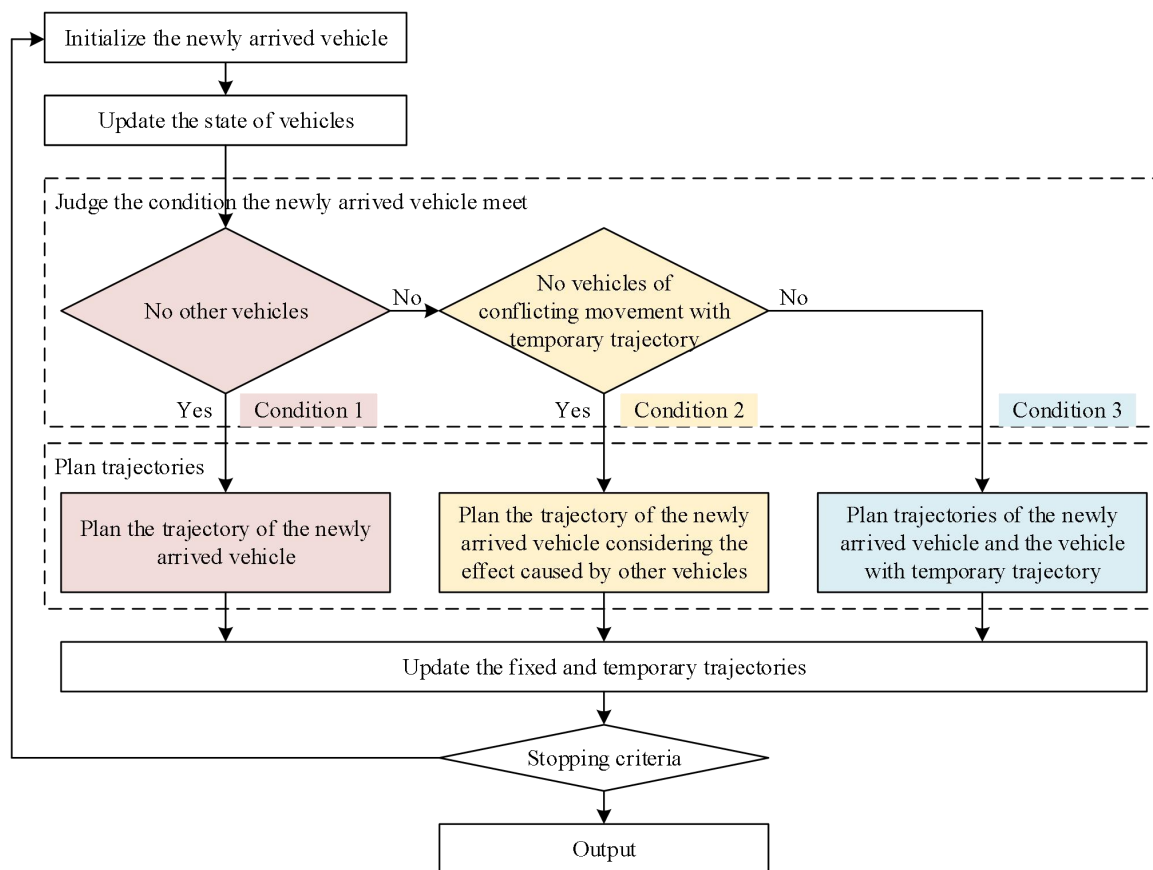
- ▶ 分析区域无其他车辆

## Condition 2

- ▶ 存在其他车辆但无具有临时轨迹冲突车辆

## Condition 3

- ▶ 存在具有临时轨迹的冲突车辆












# 仿真示例



数据采集

- ▶ 左转和通过车辆的坐标以每秒 24 帧的精度进行收集。
- ▶ 九个采集路口包含六个十字路口、两个T字路口、一个Y字路口。进口道类型包括单车道、两车道和三车道。

Intersection	Recording view	Collected vehicles		Intersection	Recording view	Collected vehicles		Intersection	Recording view	Collected vehicles	
		Left-turn	Through			Left-turn	Through			Left-turn	Through
No. 1: Yangtai Road - Zhentai Road		66	107	No. 4: Zuchongzhi Road - Gaosi Road		18	32	No. 7: Pingdu Road - Jinyang Road		14	39
No. 2: Youyi Road - Tieli Road		22	41	No. 5: Taolin Road - Linshan Road		16	26	No. 8: Tangxing Road - Tangzhen Road		25	22
No. 3: Cangyi Road - Yuansheng Road		18	78	No. 6: Gaokezhong Road - Zhangdong Road		40	130	No. 9: Jiaodong Road - Mouping Road		21	18

# 模型分析

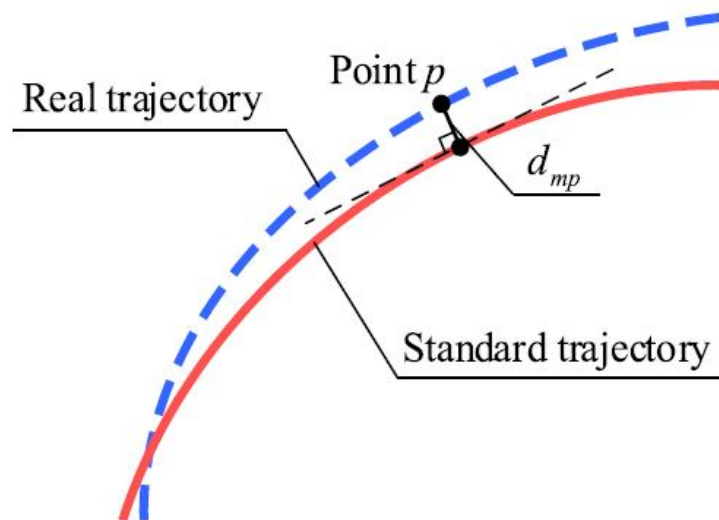
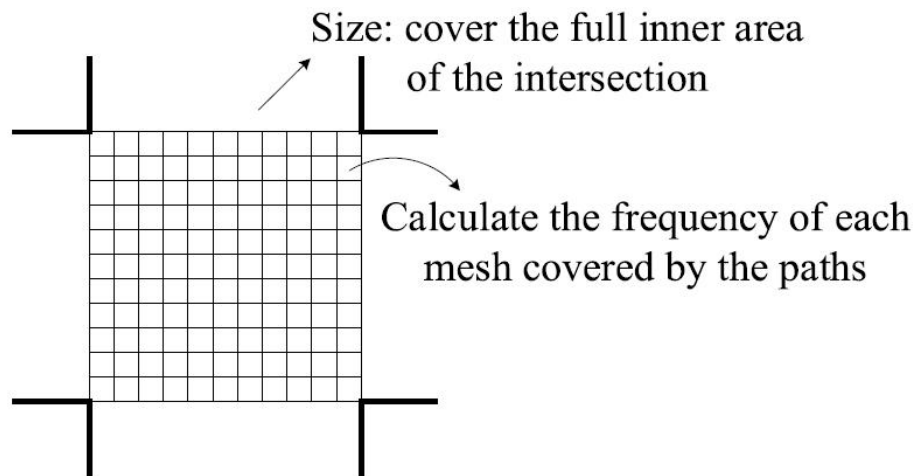
## 轨迹离散性分析

- ▶ 定量指标:
- ▶ FPC: 对轨迹在空间的分布
- ▶ SD: 路径的标准偏差
- ▶ 每个格子的路径覆盖频率 (FPC)

$$FPC_l = \frac{N_l}{N}, \forall l \in L$$

- ▶ 路径的标准偏差 (SD)

$$SD = \sqrt{\frac{1}{\sum_{m=1}^2 P_m} \sum_{m=1}^2 \sum_{p=1}^{P_m} d_{mp}^2}$$

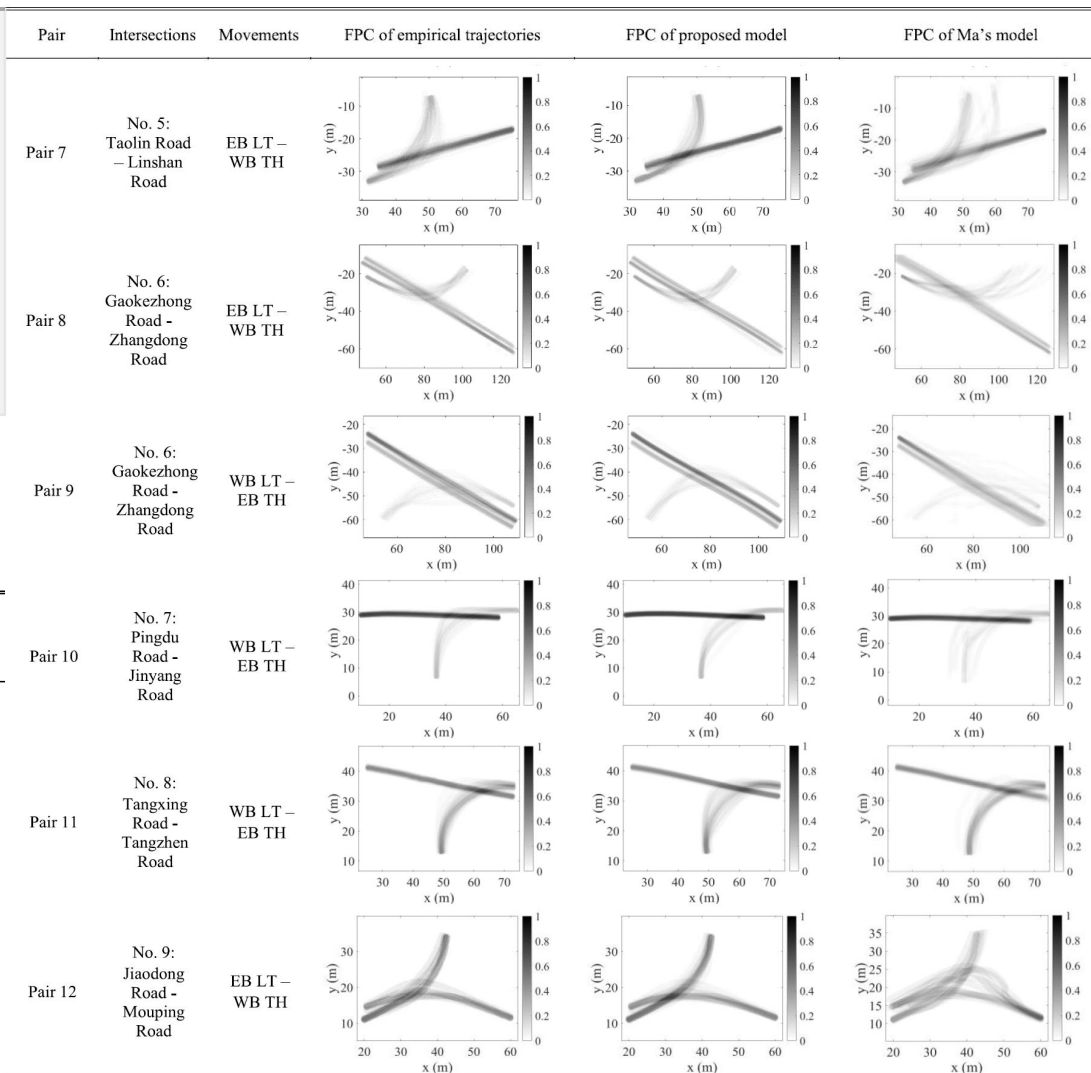


# 模型分析

## 经验数据和仿真结果的FPC和SD值

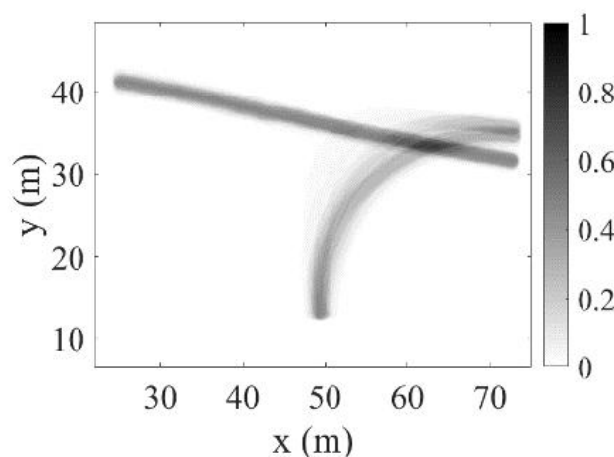
- 为了进行比较，将所提出的模型与基于社会力的仿真模型进行了比较。
- 数据直观地显示出路径离散情况。

Pair	SD of empirical trajectories	Proposed model		Ma's model	
		SD	Relative error	SD	Relative error
Pair 1	1.323	1.184	10.53%	3.491	163.87%
Pair 2	1.162	1.163	0.15%	3.128	169.19%
Pair 3	1.289	1.385	7.47%	1.535	19.08%
Pair 4	1.893	1.763	6.88%	2.678	41.47%
Pair 5	1.114	1.055	5.31%	3.424	207.36%
Pair 6	0.567	0.641	13.00%	1.209	113.23%
Pair 7	1.328	1.103	16.93%	3.083	132.15%
Pair 8	1.421	1.502	5.70%	2.951	107.67%
Pair 9	1.177	1.346	14.35%	3.201	171.96%
Pair 10	1.209	1.258	4.05%	2.204	82.30%
Pair 11	1.563	1.376	11.95%	1.790	14.52%
Pair 12	0.909	0.851	6.32%	1.210	33.11%
Average			8.55%		104.66%

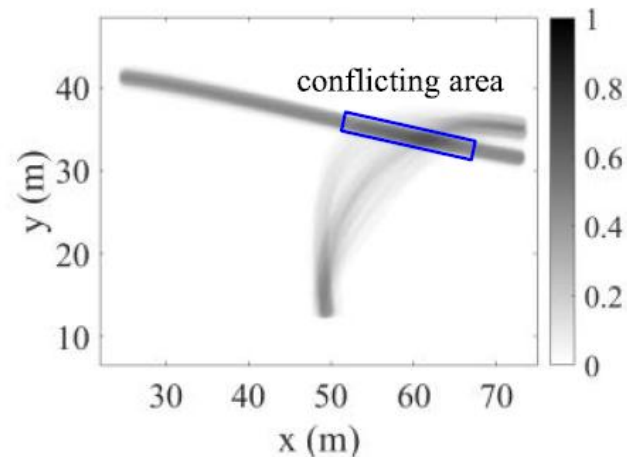


# 模型验证

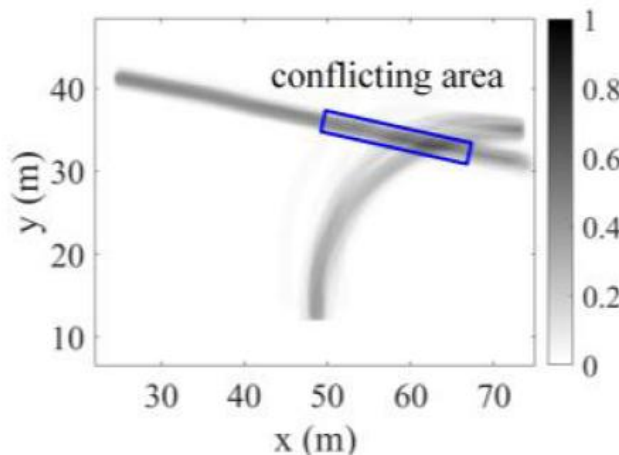
## 经验数据和所提出模型的轨迹离散性



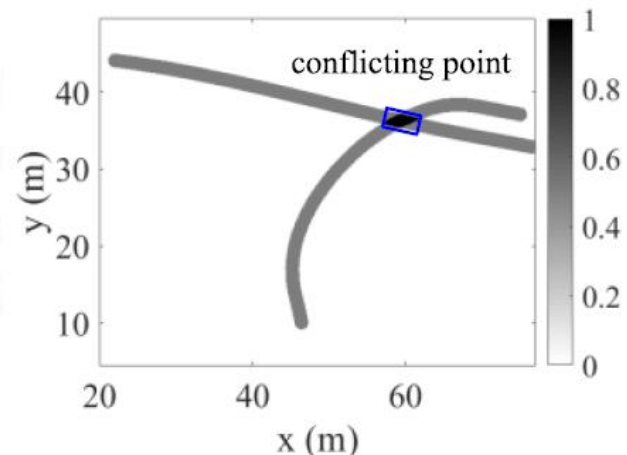
(a) Empirical data



(b) Proposed model



(c) Ma's model



(d) Vissim simulation

## FPC的配对样本T检验

- ▶ 仿真结果与经验数据 ( $p > 0.05$ ) 没有显著差异。
- ▶ 社会力模型也能反映轨迹离散性，但准确性低于所提出模型。

Pair	Proposed model						Ma's model					
	Paired Differences					Sig. (2-tailed)	Paired Differences					Sig. (2-tailed)
	Mean	Std. deviation	Std. error mean	95% Confidence interval of the difference			Mean	Std. deviation	Std. error mean	95% Confidence interval of the difference		
				Lower	Upper					Lower	Upper	
1	0.00034	0.02855	0.00050	-0.00063	0.00131	0.490	0.00085	0.03250	0.00056	-0.00025	0.00196	0.130
2	-0.00047	0.06776	0.00125	-0.00293	0.00199	0.706	0.00066	0.03596	0.00063	-0.00058	0.00190	0.298
3	0.00031	0.02535	0.00045	-0.00056	0.00118	0.489	-0.00057	0.04316	0.00080	-0.00214	0.00099	0.472
4	0.00116	0.04048	0.00060	-0.00002	0.00233	0.054	0.00037	0.03505	0.00052	-0.00065	0.00139	0.478
5	0.00049	0.05179	0.00098	-0.00143	0.00240	0.617	0.00382	0.02698	0.00051	0.00282	0.00481	0.000
6	0.00057	0.03714	0.00078	-0.00096	0.00210	0.464	0.00109	0.04121	0.00097	-0.00082	0.00299	0.262
7	0.00165	0.03397	0.00090	-0.00010	0.00341	0.065	-0.00107	0.03129	0.00072	-0.00248	0.00033	0.135
8	0.00070	0.04045	0.00060	-0.00047	0.00188	0.241	-0.00050	0.03840	0.00057	-0.00161	0.00061	0.380
9	0.00095	0.04410	0.00081	-0.00063	0.00253	0.239	0.00194	0.03285	0.00060	0.00076	0.00311	0.001
10	-0.00079	0.03004	0.00078	-0.00232	0.00074	0.312	-0.00079	0.02814	0.00069	-0.00215	0.00057	0.255
11	-0.00091	0.05222	0.00126	-0.00337	0.00155	0.468	-0.00028	0.03052	0.00073	-0.00172	0.00116	0.700
12	0.00116	0.05573	0.00157	-0.00192	0.00424	0.460	-0.00397	0.07001	0.00197	-0.00784	-0.00010	0.044

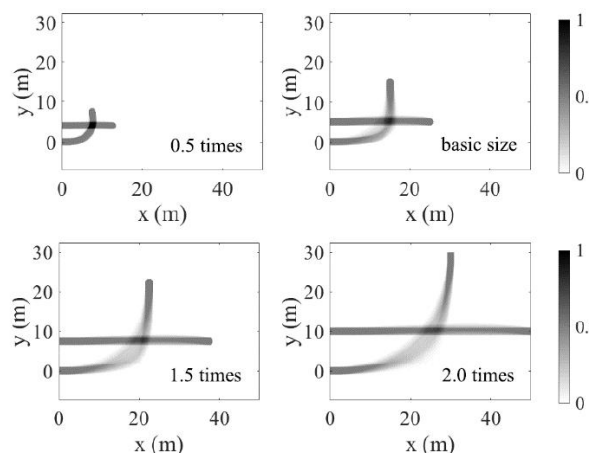
## SD验证

- ▶ 所提出模型与经验数据之间的 SD 值的最小、最大和平均相对误差分别为 0.15%、16.93% 和 8.55%。
- ▶ 差异的显著性检验（配对样本T检验）表明两者之间的SD差异不显著（ $p > 0.05$ ）。

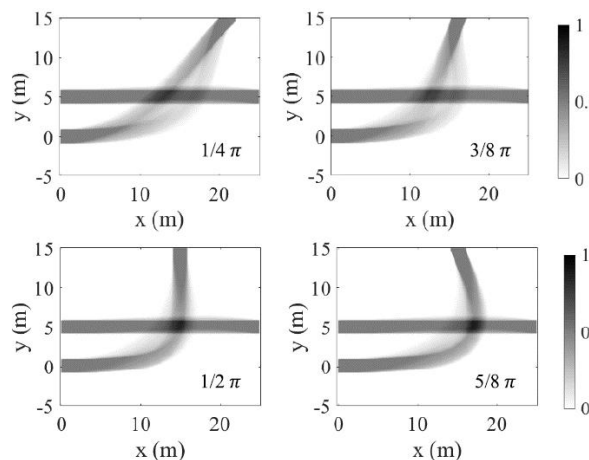
Pair	SD of empirical trajectories	Proposed model		Ma's model	
		SD	Relative error	SD	Relative error
Pair 1	1.323	1.184	10.53%	3.491	163.87%
Pair 2	1.162	1.163	0.15%	3.128	169.19%
Pair 3	1.289	1.385	7.47%	1.535	19.08%
Pair 4	1.893	1.763	6.88%	2.678	41.47%
Pair 5	1.114	1.055	5.31%	3.424	207.36%
Pair 6	0.567	0.641	13.00%	1.209	113.23%
Pair 7	1.328	1.103	16.93%	3.083	132.15%
Pair 8	1.421	1.502	5.70%	2.951	107.67%
Pair 9	1.177	1.346	14.35%	3.201	171.96%
Pair 10	1.209	1.258	4.05%	2.204	82.30%
Pair 11	1.563	1.376	11.95%	1.790	14.52%
Pair 12	0.909	0.851	6.32%	1.210	33.11%
Average			8.55%		104.66%

Model	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference		Sig. (2-tailed)
				Lower	Upper	
Proposed model	0.027	0.125	0.036	-0.052	0.107	0.465
Ma's model	-1.246	0.799	0.231	-1.753	-0.738	0.000

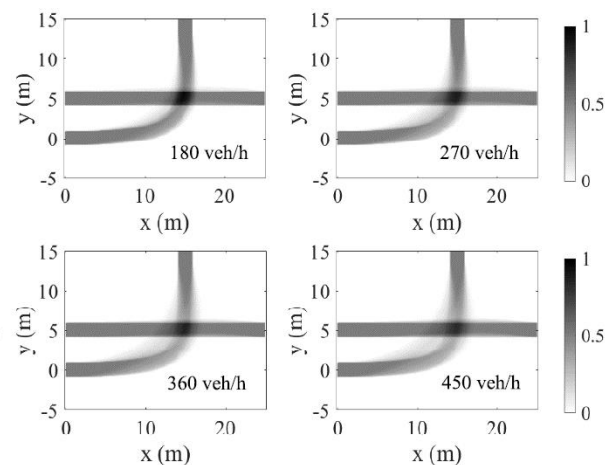
## 道路布局 and 交通条件的影响



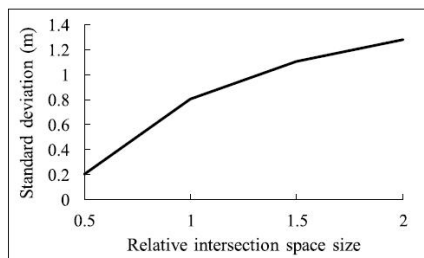
(a) FPC under different spatial sizes of the intersection



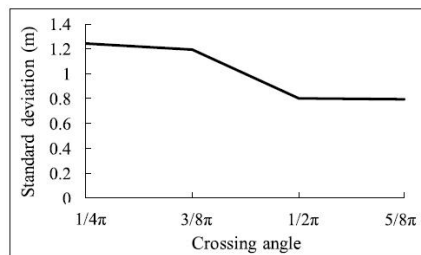
(a) FPC under different crossing angles



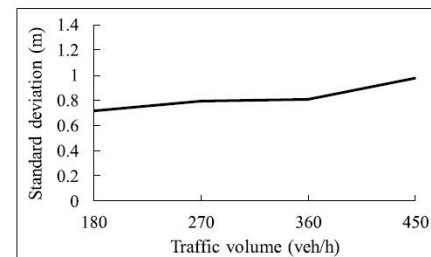
(a) FPC under different traffic volumes



(b) Change of SD against the size of the intersection



(b) Change of SD against the crossing angle



(b) Change of SD against the traffic volume

交叉口空间大小的影响

交叉角的影响

交通量的影响

## 仿真建立

本研究**建立了考虑驾驶员行为的仿真模型**来探讨交叉口无保护左转和对向直行运动的整体轨迹离散。

## 模型验证

所提出的仿真模型在没有模型参数重新校准的情况下对校准交叉口和新增交叉口均表现良好。该模型可以表示左转和逆向通过运动的路径离散度，平均误差为**8.92%**。

## 结论

左转和直行的轨迹离散度随着**交叉口空间规模和交通量的增大而增大**，随着**交叉口角度的增大而减小**。与交通条件（交通量）相比，道路布局对路径分散的影响更为显著。

Jing Zhao, Victor L. Knoop, Jian Sun , Meng Wang. Unprotected Left-Turn Behavior Model Capturing Path Variations at Intersections. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2023. <https://doi.org/10.1109/TITS.2023.3270962>.

## 欢迎加盟上海理工大学

- ▶ 硕士研究生招生：学硕 + 专硕
- ▶ 博士研究生招生
- ▶ 博士后岗招聘：常年招聘，成果可直聘副教授（副研究员）
- ▶ 教学科研岗招聘：常年招聘





## 谢谢 · 期待深入交流



**赵 靖** 教授、博导、副院长

**上海理工大学**

微信: 15921026666

邮件: jing\_zhao\_traffic@163.com

2023/7/5

