

# 基于认知理论的驾驶人建模及风险评估

Driver modeling and risk assessment based on cognitive theory

汇报人：唐揽月

指导老师：孙剑 教授  
岳李圣飒 助理教授

2025年1月9日星期四



同濟大學  
TONGJI UNIVERSITY



# 0 汇报目录

1

研究绪论

2

基于认知理论的驾驶行为建模

3

驾驶行为实验与数据分析

4

模型应用评价与驾驶行为风险评估

5

研究总结与展望



# 01 研究背景

- 1.1 研究背景
- 1.2 理论需求
- 1.3 现实问题
- 1.4 技术路线

# 01 研究背景

## • 1.1 研究背景

人类驾驶人



人机混驾



人类驾驶员



自动驾驶车辆



人机共驾



辅助驾驶



状态监测



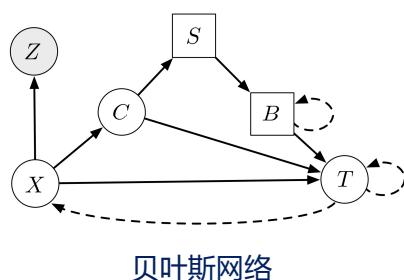
系统提前主动管控

人类驾驶员仍然是整个交通系统的核心，需要对驾驶员行为进行精确建模

# 01 研究背景

## • 1.2 理论需求——基于数据驱动的建模方法缺陷

### 基于概率推断驾驶行为建模



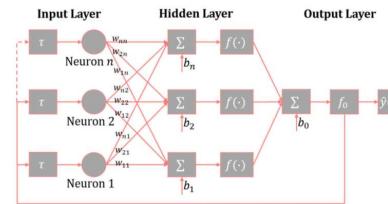
#### 方法缺陷

缺少通用方法论

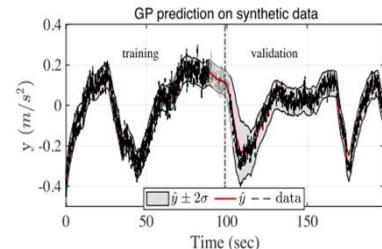
行为阶段划分真实认知机制不符

建模过程与认知机制不符，模型往往限制于特定场景

### 基于深度学习驾驶行为建模



#### 参数模型层堆叠



#### 方法缺陷

重特征忽视认知

数据依赖性强，泛化能力差

难以洞悉认知机制，模型可解释性差，泛化能力差

**丰田研究机构**在2023年7月针对现有驾驶人模型的评述文章中发表了以下总结评论：

- 目前的驾驶人模型无法深入内在认知机制

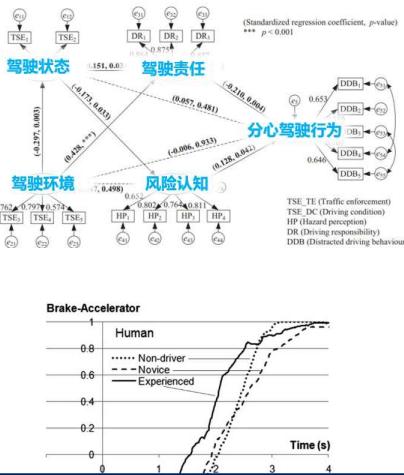
建立**基于认知理论的驾驶人模型**已然成为研究趋势与热点

# 01 研究背景

## • 1.2 理论需求——基于认知理论的驾驶人模型优势分析

### 深化驾驶行为理解

- 驾驶行为属于一类**刺激-反应人**  
**类基本行为范式**, 具有内在的  
认知理论基础



➤ 刺激-有机体-  
反应用于分心  
驾驶行为防治  
(Zhong et al,2014)

➤ 驾驶经验对于  
反应时间的影响,  
应用于风险评估

### 先验知识优化模型泛化性

- 通过**先验知识**减少样本偏差  
影响, 提升模型泛化能力

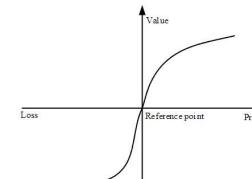
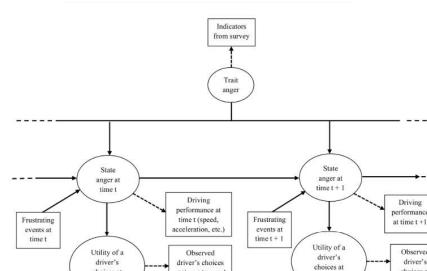


Figure 1. Curve of value function.

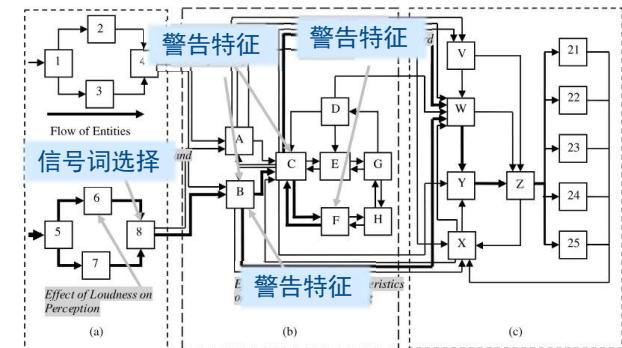
➤ 引入认知前景理  
论, 提升速度选  
择行为建模准确  
度  
(Zhong et al,2019)



➤ 状态特质认  
知理论, 显著优  
化预测性能。  
(Danaf et al,2015)

### 提升模型可解释性

- 认知理论为驾驶人行为模型提供一个**可解释框架**, 促进**针对性方案**的制定



➤ 调整刺激输入, 靶向优化驾驶人认  
知, 实现期望行为

基于**认知理论**建立驾驶人行为建模**具有重要意义**

# 01 研究背景

## • 1.3现实问题



驾驶中总是产生多种情绪

Step1：如何  
预测情绪状态  
下的驾驶行为？

有关（每周至少经历一次）<sup>[3]</sup>



行为更激进、高风险

易忽略潜在风险



Step2：如何准确  
评估驾驶风险？

（每周至少经历一次）<sup>[3]</sup>

愤怒



惊恐



行为更谨慎、低风险

风险评估是过于敏感

建立的**驾驶人模型**重点解决和验证对于**驾驶员情绪状态**的建模效果

# 01 研究背景

## • 1.4 技术路线

研究  
问题

研究  
目标

研究  
内容

### 基于认知理论的驾驶人建模及风险评估

#### 目标一：基于认知理论的驾驶人行为建模

#### 目标二：结果评价与风险评估

##### 模型构建

###### 内容一 基于SOR认知理论的驾驶人模型

- **问题挑战：**构建综合性框架描述整个认知过程以及所涉及的多个认知因素

##### 应用场景

###### 内容二 强交互场景下的驾驶行为实验

- **问题挑战：**驾驶员情绪驾驶行为数据难以获得

##### 结果评价

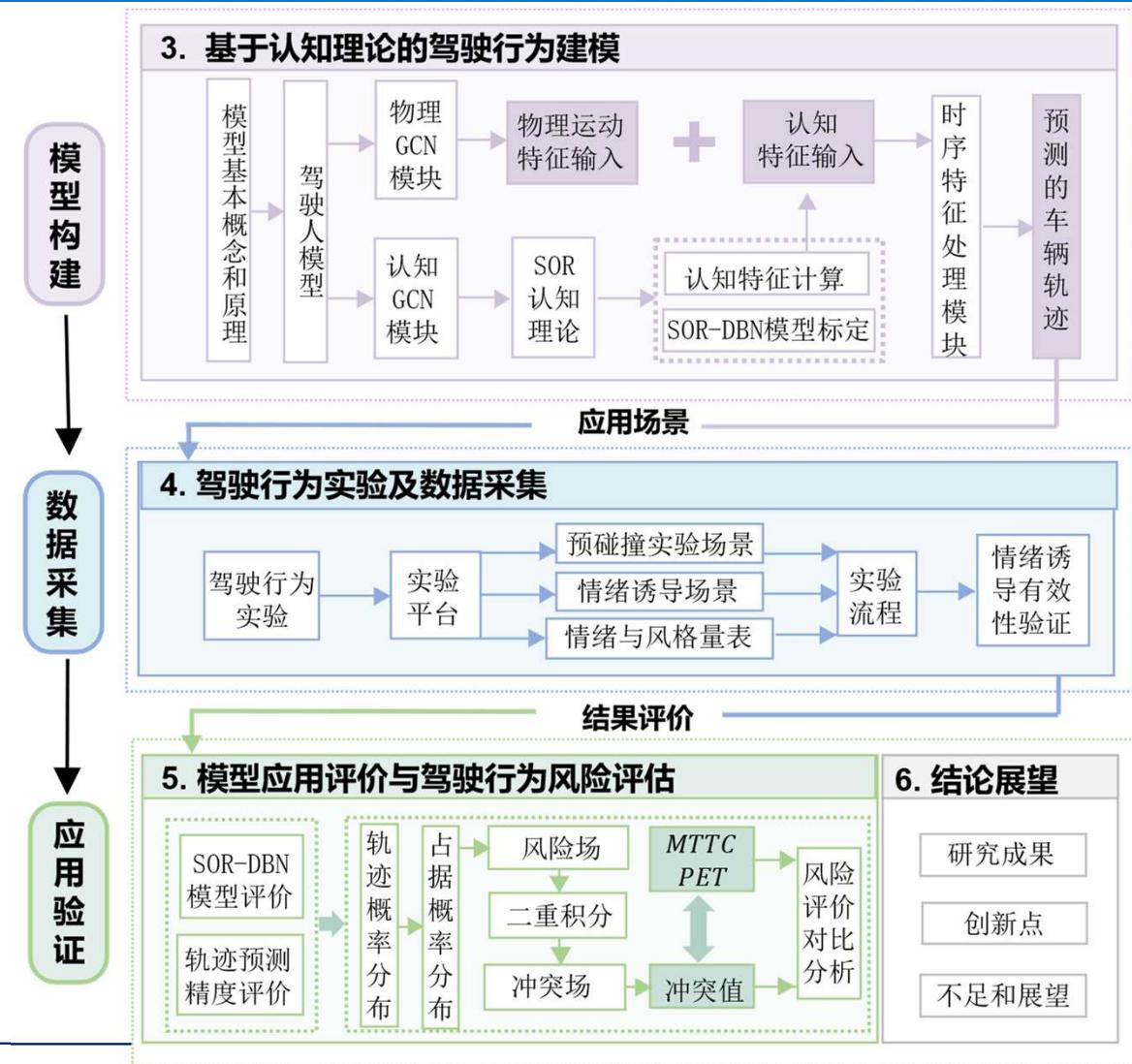
###### 内容三 模型应用评价与风险评估

- **问题挑战：**如何证明SOR认知理论的有效性？
- **问题挑战：**一种考虑驾驶员认知因素状态的风险评估方法

# 01 研究背景

## • 1.4 技术路线

### 研究背景





## 02 基于认知理论的驾驶人建模

- 2.1 本章概述
- 2.2 模型框架
- 2.3 认知GCN模块

## 02 基于认知理论的驾驶人建模

### • 2.1 本章概述

#### 问题挑战

如何在驾驶行为模型中考虑驾驶员认知过程?

如何对认知因素的因果关系建模?

如何同时保证特征的高效学习，确保预测精度?

#### 解决方案

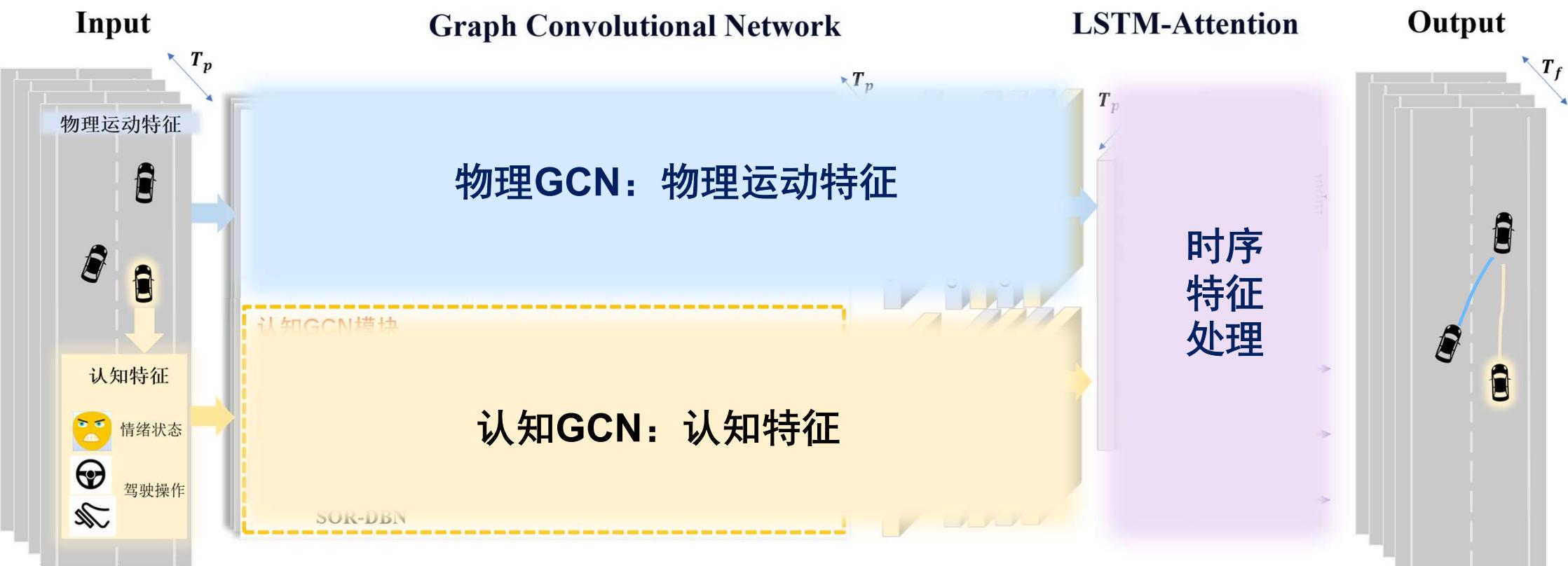
- 基于**刺激-有机体-反应 (SOR)** 理论描述全面的认知过程。



- 融合**概率推断**和**深度学习**方法，**优势互补**。利用贝叶斯描述因果关系的同时，对**物理运动-认知特征**的高效学习。

## 02 基于认知理论的驾驶人建模

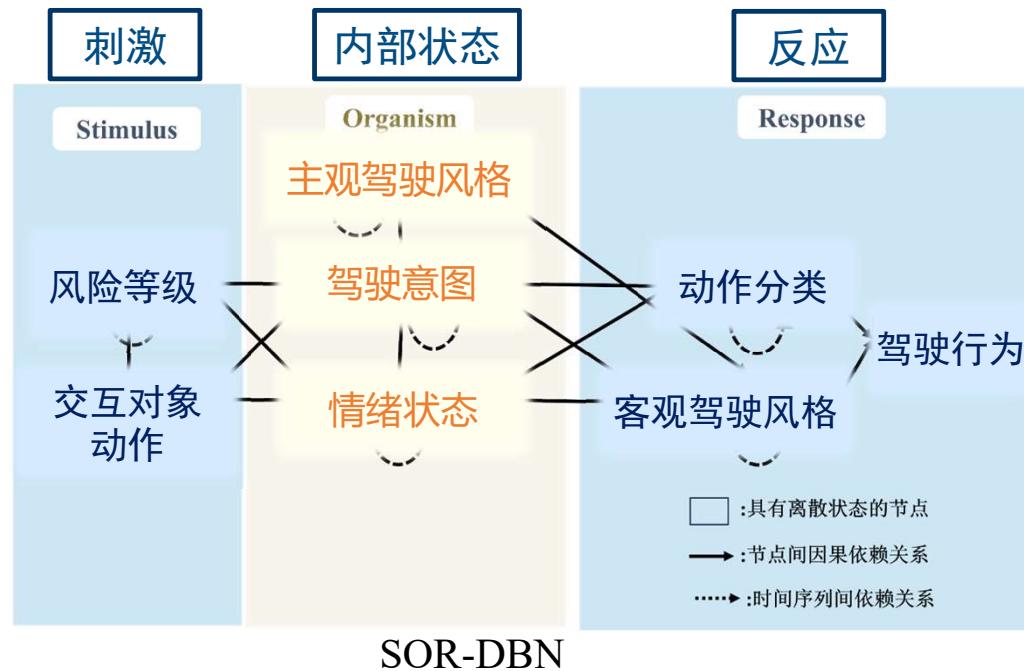
### • 2.2 模型框架



## 02 基于认知理论的驾驶人建模

### • 2.3 认知GCN模块

**SOR认知理论:** 描述人类驾驶员受到外界环境刺激, 影响其内部状态, 最后产生动作反应的认知机制



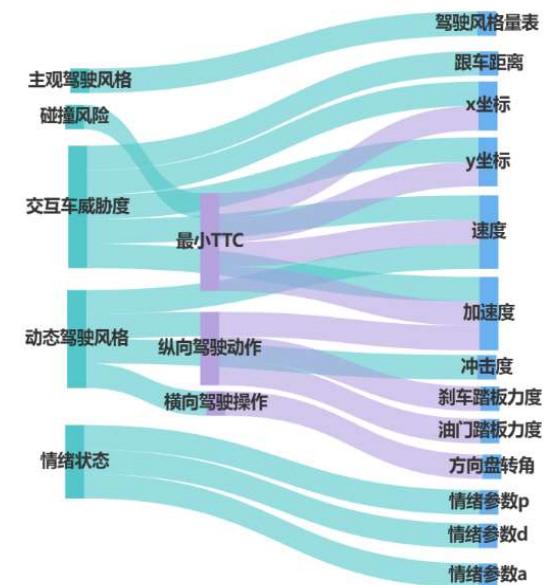
模型输入: **认知特征矩阵、认知邻接矩阵**

特征  
矩阵

$$\begin{aligned}
 C_t = & \{Npc\_a_t, Risk\_grade_t, \dots\} && \text{Stimulus} \\
 & Emo\_cluster_t, Ego\_a_t, Sub\_style_t, \dots && \text{Organism} \\
 Obj\_style_t, Maneuver_t, Behavior_t \mid t \in T_p \}
 \end{aligned}$$

阈值  
划分

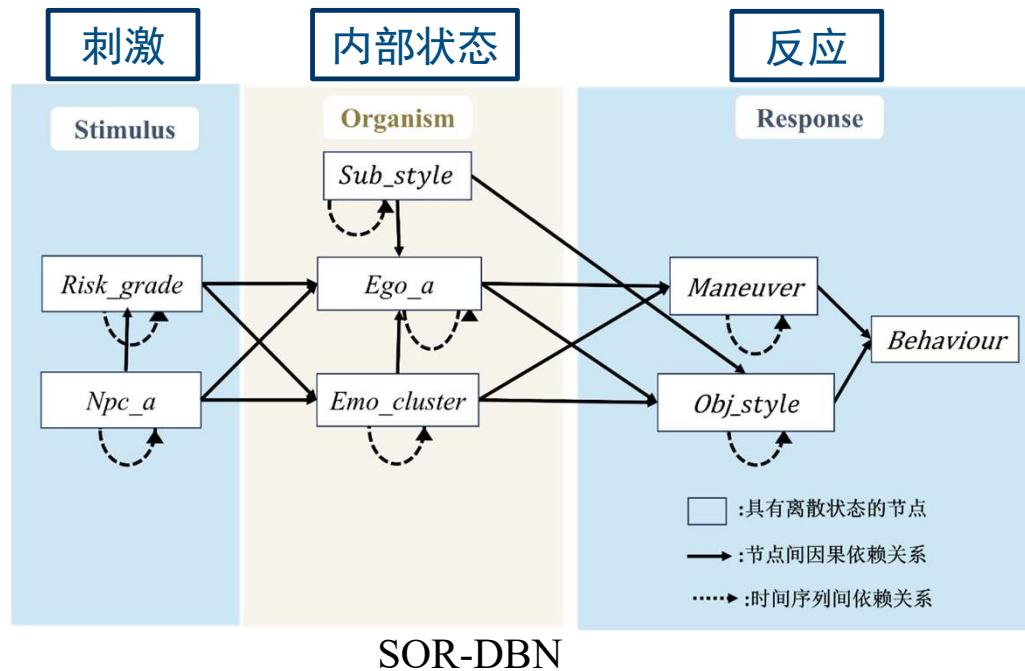
特征  
聚类



## 02 基于认知理论的驾驶人建模

### • 2.3 认知GCN模块

**SOR认知理论：**描述人类驾驶员受到外界环境刺激，影响其内部状态，最后产生动作反应的认知机制



模型输入：认知特征矩阵、认知邻接矩阵

特征  
矩阵

$$\begin{aligned}
 C_t = \{ & Npc\_a_t, Risk\_grade_t, & \text{Stimulus} \\
 & Emo\_cluster_t, Ego\_a_t, Sub\_style_t, & \text{Organism} \\
 & Obj\_style_t, Maneuver\_t, Behavior\_t \mid t \in T_p \} & \text{Response}
 \end{aligned}$$

认知邻接矩阵：SOR-DBN标定

$$p(\text{ condition: } v_i^t = m \mid \text{ event: } v_j^t = n)$$

$$\mathcal{A}_{ijt}^{cog} = \begin{cases} p, & \text{if edge } \langle v_i^t, v_j^t \rangle \in E_{cog} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

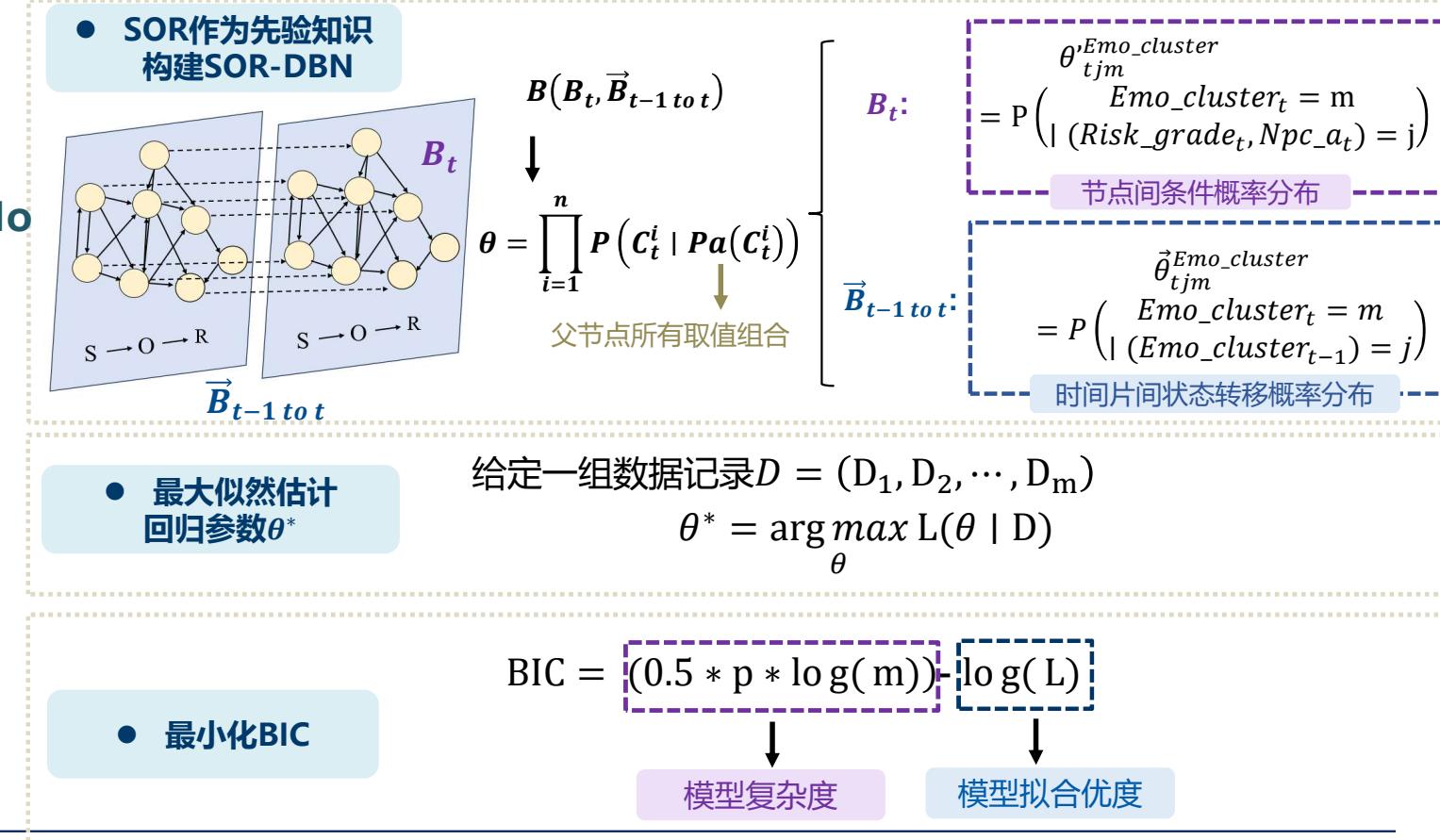
邻接  
矩阵

## 02 基于认知理论的驾驶人建模

### • 2.4 SOR-DBN认知特征



动态贝叶斯网络模型：建立贝叶斯网络模型，通过标定SOR-DBN得到节点间条件概率以及状态转移概率量化因果关系的强弱。





# 03 驾驶行为实验及数据分析

- 3.1 本章概述
- 3.2 实验设计
- 3.3 情绪诱导有效性分析

# 03 驾驶行为实验及数据分析

## • 3.1 本章概述



### 实验目的

选取强交互风险场景中，驾驶员在愤怒、中性、惊恐情绪状态下的驾驶行为作为驾驶人模型的应用场景，为模型验证提供基础数据集

### 问题挑战



如何获取驾驶员**风险场**景中的**驾驶行为**数据？



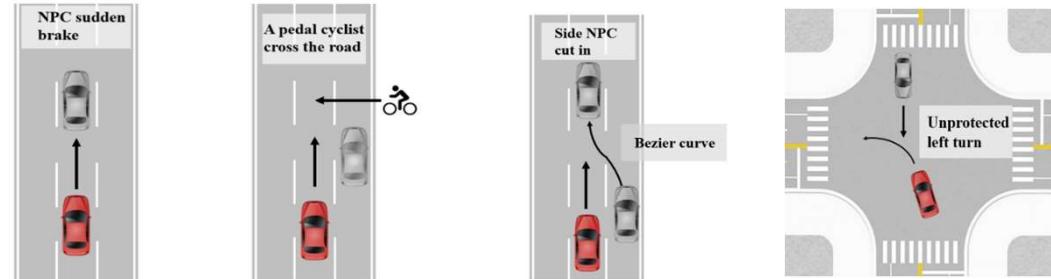
如何**有效诱导**驾驶员**情绪**？

图片视频等材料诱导？

### 解决方案

■ 驾驶模拟器实验为数据采集提供了**受控、安全**的实验方案。基于驾驶模型器开发了四个典型的**风险驾驶场景**

- 前车急刹
- 鬼探头
- 侧方车辆切入
- 无保护左转



■ 路怒、驾驶心理研究报告，**复现**特定的**驾驶场景**以诱导情绪

## 03 驾驶行为实验及数据分析

### • 3.3 实验设计

#### 场景设计依据

##### 路怒诱因分析报告

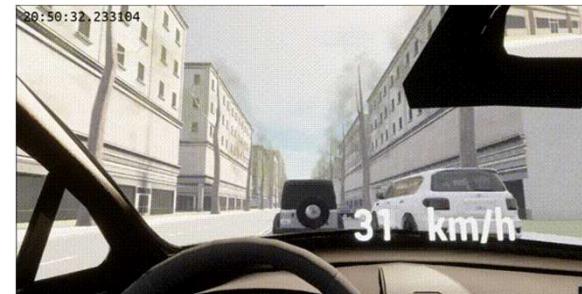
- 基于驾驶视频数据研究发现，**80%以上的路怒事件由20%关键诱因（拥堵、缓慢行驶等）引起** (Chen. et al. 2016)
- Wang等人的研究指出，**50%以上的路怒事件由乡村道路或高速公路违规使用远光灯造成。** (Wang. et al. 2020)

##### 惊恐诱导

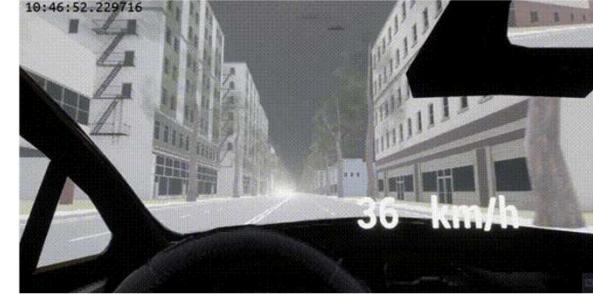
- 研究表明，在驾驶员**目睹过交通事故后**会引发极端**恐惧**的情绪，甚至发展成为与驾驶有关的恐惧。  
(BOYLE. et al. 1984)

#### 情绪诱导场景设计

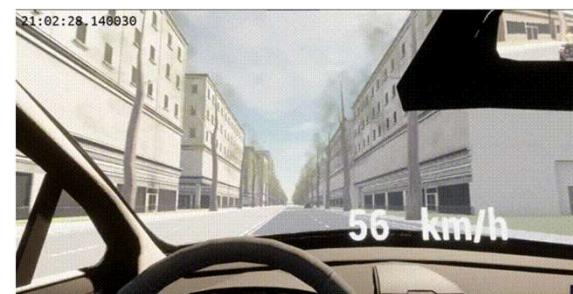
##### ● 愤怒诱导2：拥堵



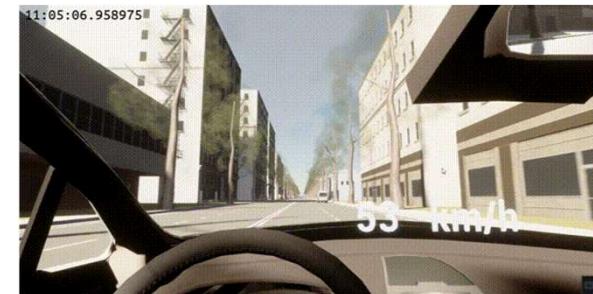
##### ● 愤怒诱导1：对向车远光灯挑衅



##### ● 惊恐诱导1：目击事故



##### ● 惊恐诱导2：行人碰撞



# 03 驾驶行为实验及数据分析

## • 3.3 实验设计

**驾驶数据采集**

多维度主观驾驶风格量表



驾驶主观驾驶风格

操作数据与车辆数据

- 行驶速度、加速度、位置
- 方向盘转角、刹车踏板、油门踏板

**情绪状态采集**

Affect Button情绪量表

■ 理论基础：  
情绪三维模型  
[愉悦 唤醒 支配] ↓ [P A D]

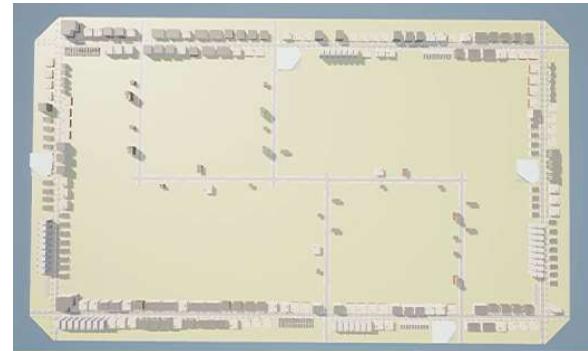
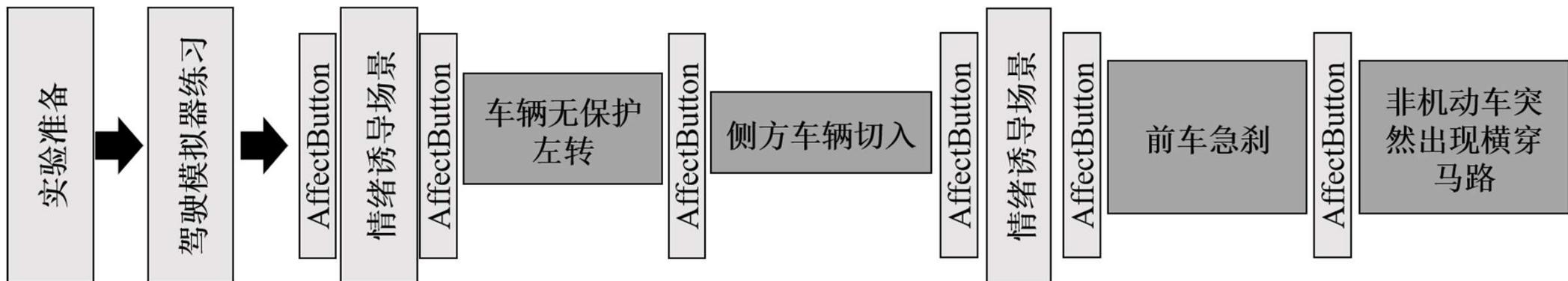
■ 使用方法：  
被试点击选择与情绪相对应的表情，可在1-2s内完成。  
(Broekens. et al. 2013)

## 03 驾驶行为实验及数据分析

### • 3.3 实验设计

#### 实验流程

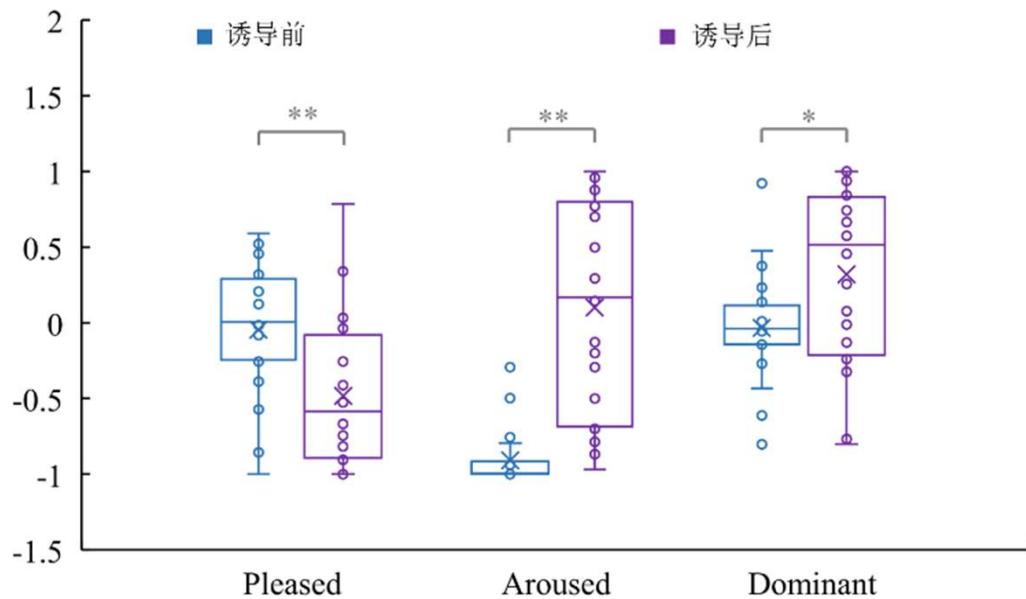
- **参与者**: 共邀请**26位**实验被试者， 分别在**愤怒、中性、惊恐**的情绪状态下完成**单次驾驶实验流程**；
- **实验顺序**: 当固定实验顺序不变时，会产生**学习效应**或者造成**驾驶员的疲劳**。为**消除顺序误差**，我们采用**拉丁方设计**实验场景的顺序来平衡顺序效应。



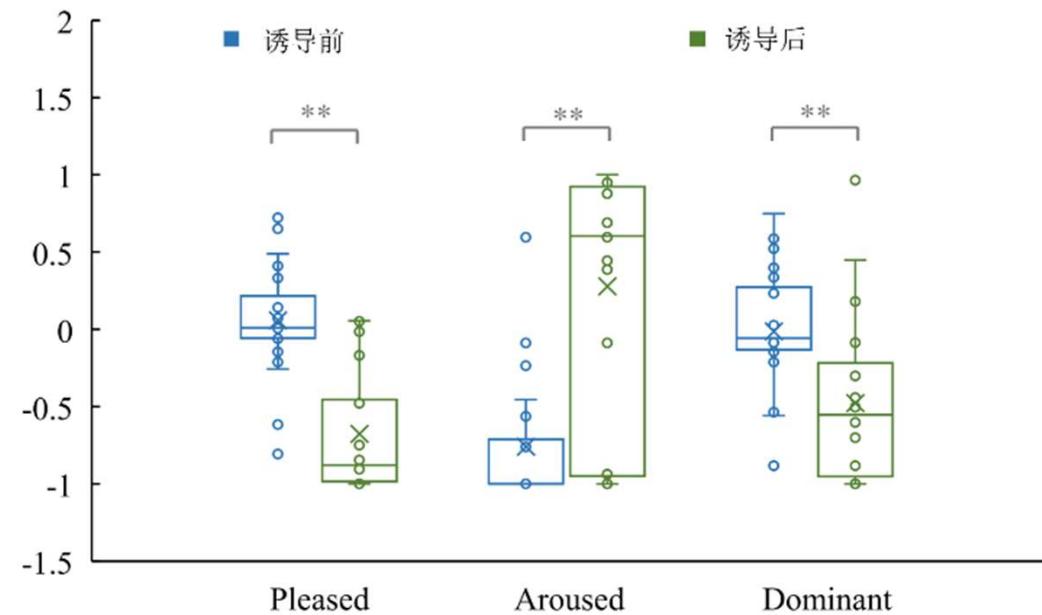
## 03 驾驶行为实验及数据分析

- 3.3 情绪诱导有效性分析
- 情绪PAD值统计分析

愤怒情绪诱导前后PAD值



惊恐情绪诱导前后PAD值



情绪PAD值在诱导场景前后存在显著差异，情绪诱导有效性较好



# 04 模型应用评价与驾驶行为 风险评估

- 4.1 本章概述
- 4.2 模型评价
- 4.3 基于驾驶人模型的风险评估方法
- 4.4 案例分析

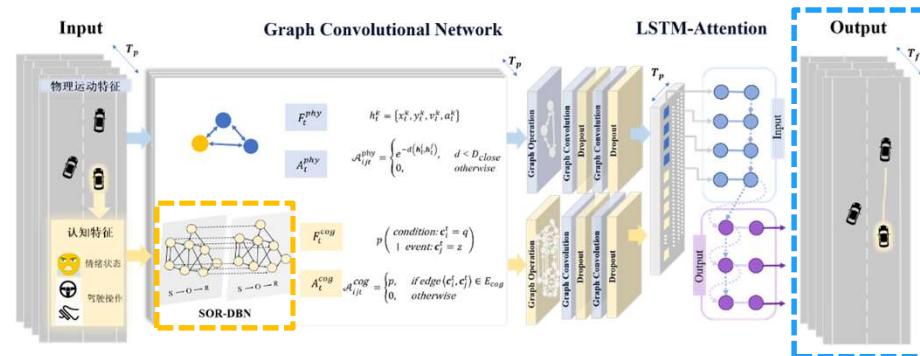
# 04 模型应用评价与驾驶行为风险评估

## • 4.1 本章概述

### 问题挑战

如何验证SOR认知理论的有效性

### 解决方案



- SOR-DBN模型评价
- 驾驶人模型轨迹预测精度评价

一种考虑驾驶员认知状态的风险评估方法?

驾驶员  
认知状态

驾驶人模型  
CPSOR-GCN

预测的轨迹点  
+  
风险场方法

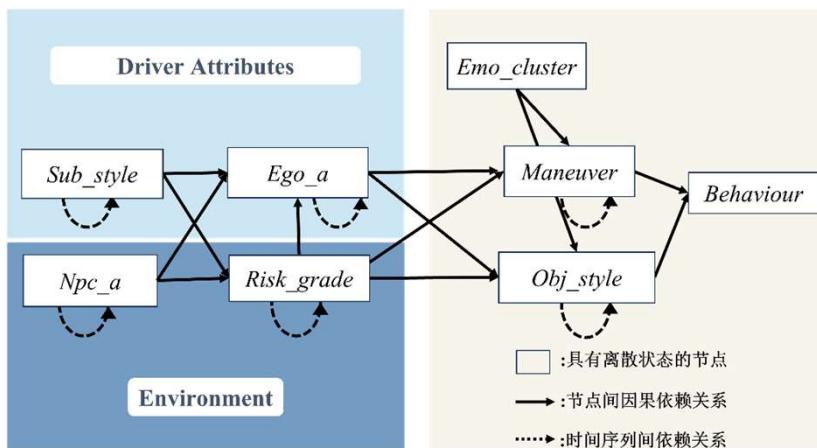
潜在冲突风险  
可视化

# 04 模型应用评价与驾驶行为风险评估

## • 4.2 模型评价 ◆SOR-DBN模型评价

### 对比的DBN结构

- 当缺乏SOR专家先验知识时，依据以往研究中对变量间作用关系的结论建立一般DBN结构  
( Danaf et al,2015 )

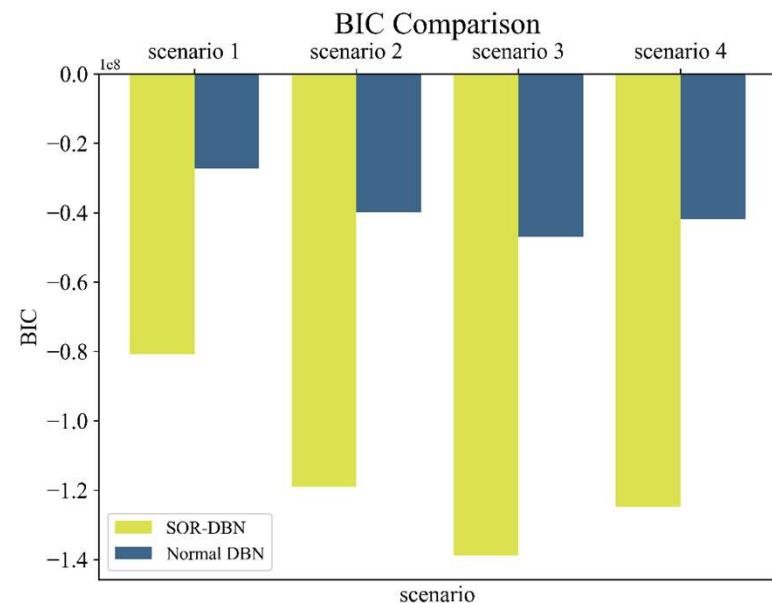


### DBN框架对比

$$BIC = \frac{(0.5 * p * \log(m))}{\log(L)}$$

↓                      ↓

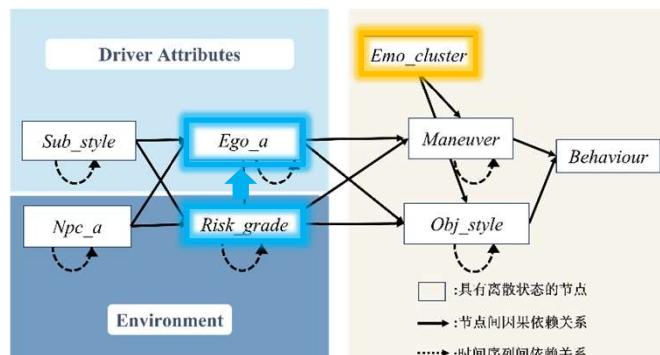
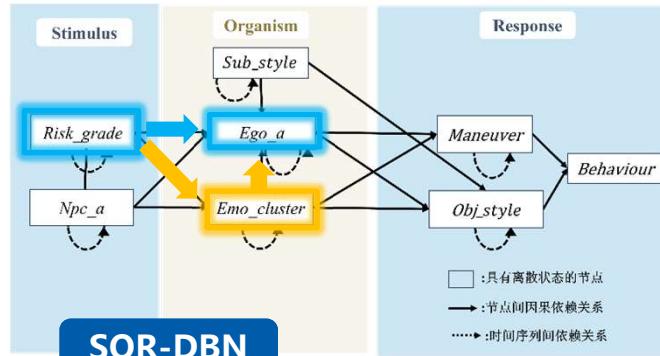
模型复杂度
模型拟合优度



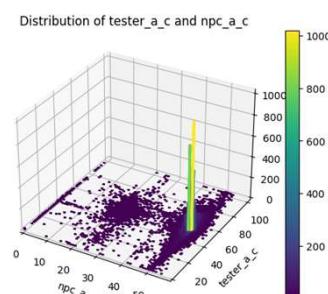
# 04 模型应用评价与驾驶行为风险评估

## • 4.2 模型评价 ◆SOR认知理论优势机理分析

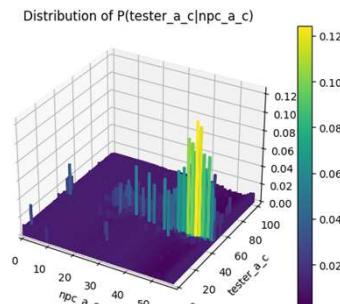
### 认知模型对比



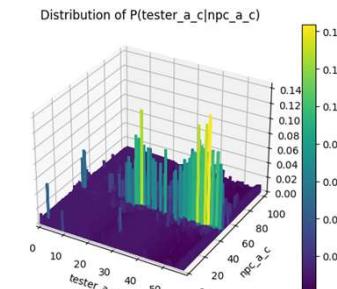
### ■ *Npc\_a*与*Ego\_a*



真实部分情况



CPSOR-GCN推断结果



### 机理分析

$$\begin{aligned} P(Ego\_a | Npc\_a) \\ = P(Npc\_a) \end{aligned}$$

- \*  $P(Emo\_cluster | Npc\_a)$
- \*  $P(Ego\_a | Emo\_cluster)$

■ SOR认知框架将情绪作为内部变量，更准确地捕捉了NPC加速度对本车加速度的影响机制

以SOR框架考虑刺激对内部状态的影响，可以更准确的反映真实的概率分布

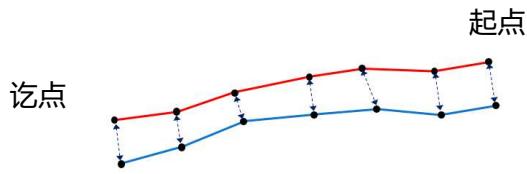
# 04 模型应用评价与驾驶行为风险评估

## • 4.2 模型评价

### ◆轨迹预测精度评价指标

(Nikos *et al.*, 2007; Yao *et al.*, 2021) :

#### 1. RMSE: 均方根误差



$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_{pred}^t[i] - P_{true}^t[i])^2}$$

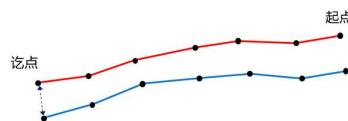
#### 2. MAE: 均方绝对误差

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |P_{pred}^t[i] - P_{true}^t[i]|$$

#### 3. ADE: 平均距离误差

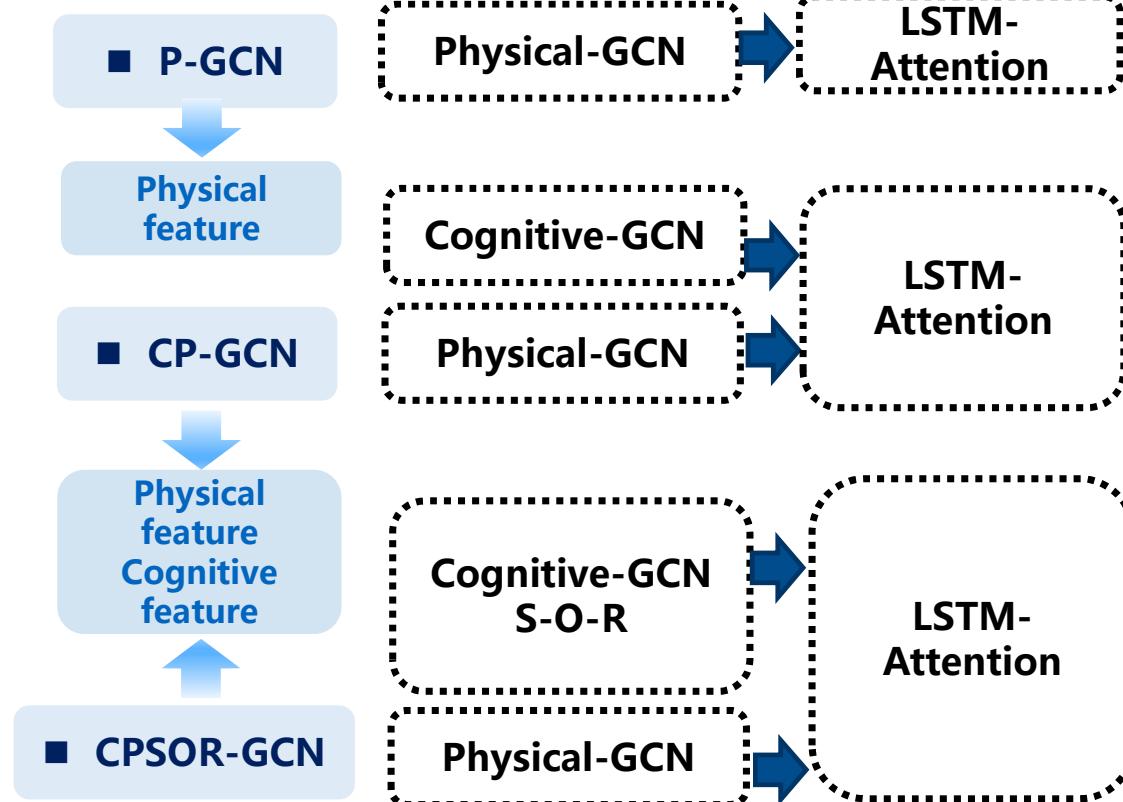
$$ADE = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T RMSE^t$$

#### 4. FDE: 最终距离误差



$$FDE = RMSE^T$$

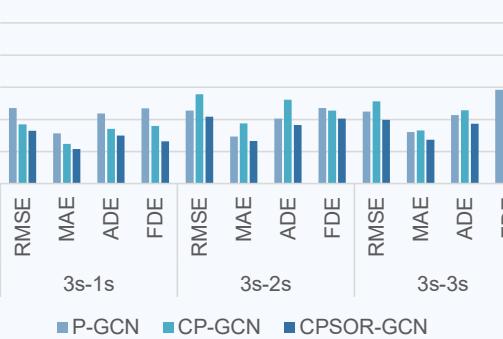
### ◆消融实验对比项



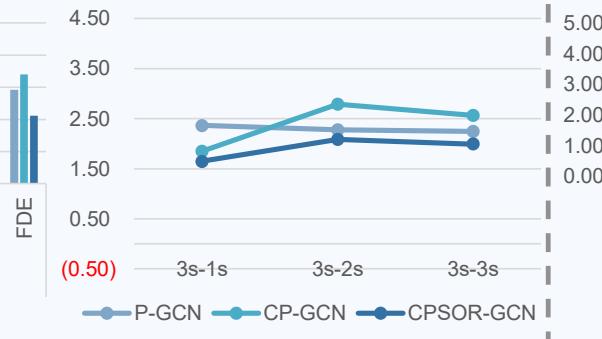
# 04 模型应用评价与驾驶行为风险评估

## • 4.2 模型评价

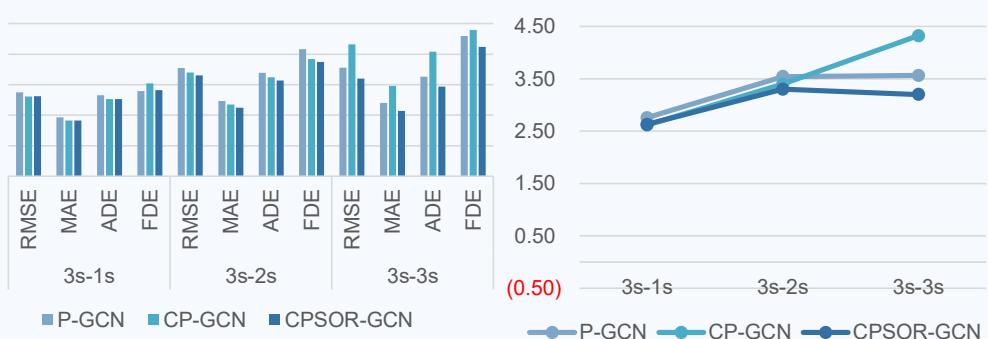
### ◆消融实验：精度指标对比



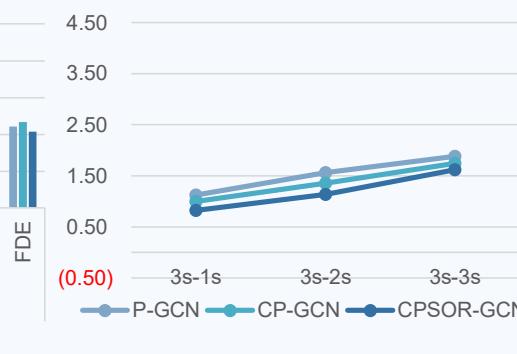
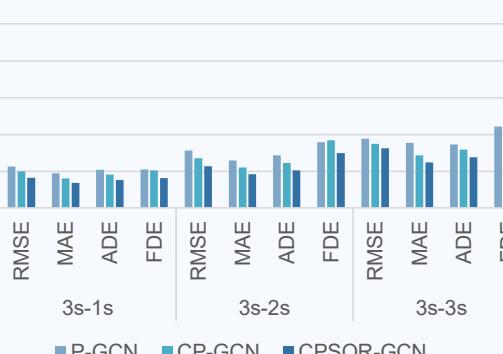
前车急刹-RMSE



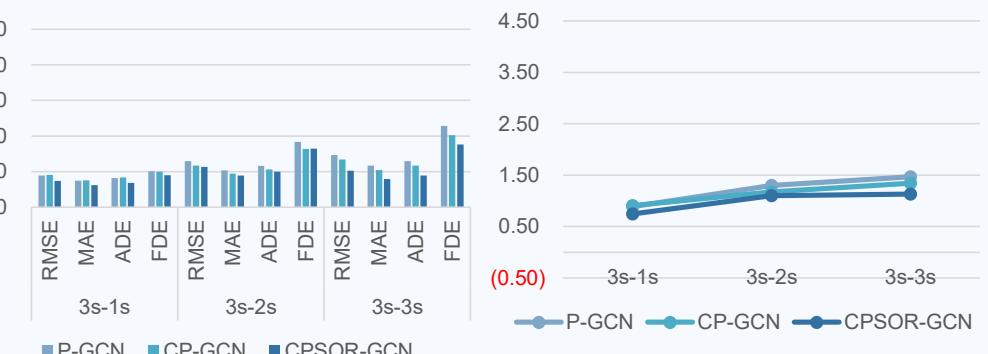
(0.50)



侧方车辆切入-RMSE



(0.50)



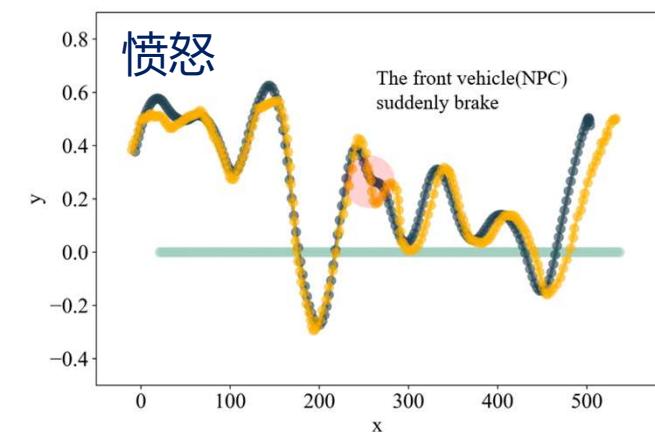
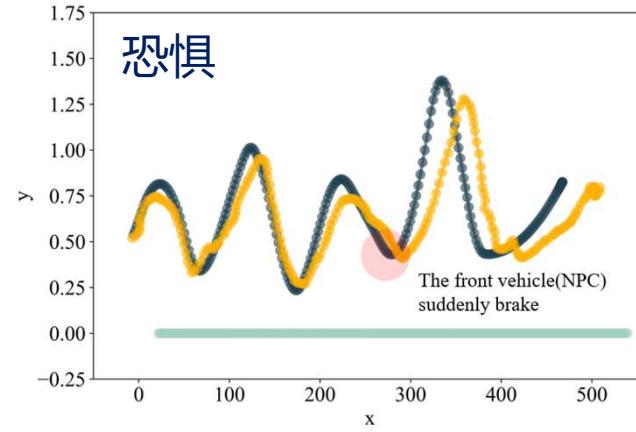
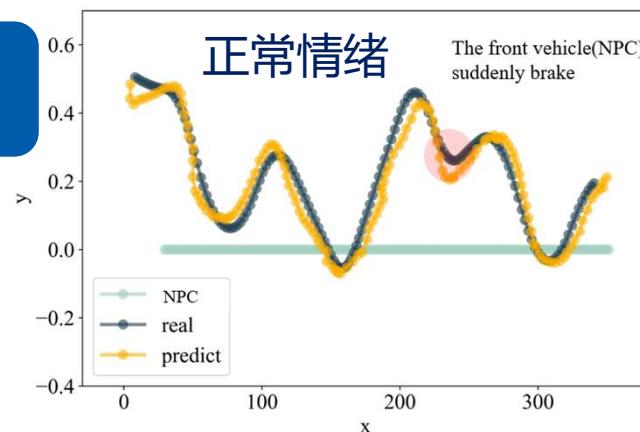
(0.50)

考収认知特征，预测精度提高21.14%，考収SOR,精度进一步提升15.93%

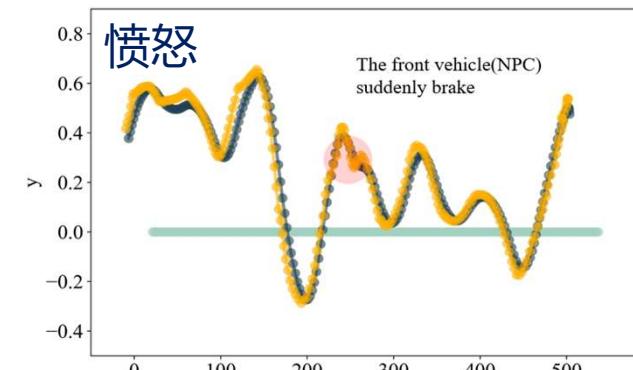
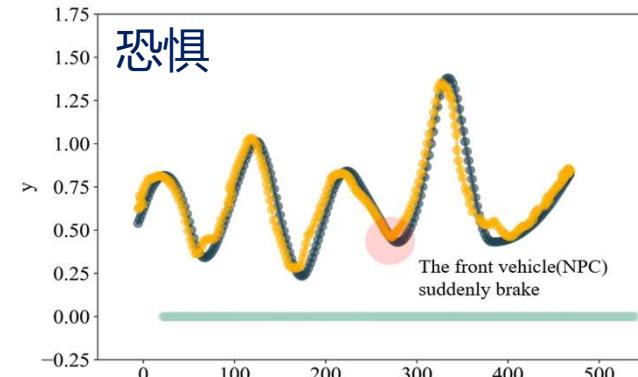
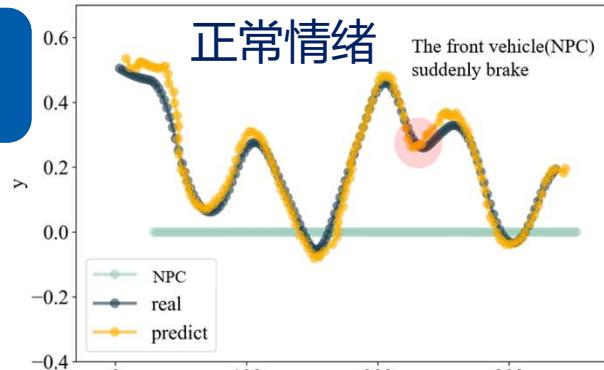
## 04 模型应用评价与驾驶行为风险评估

### • 4.2 模型评价 ◆消融实验：个体轨迹案例分析

CP-GCN



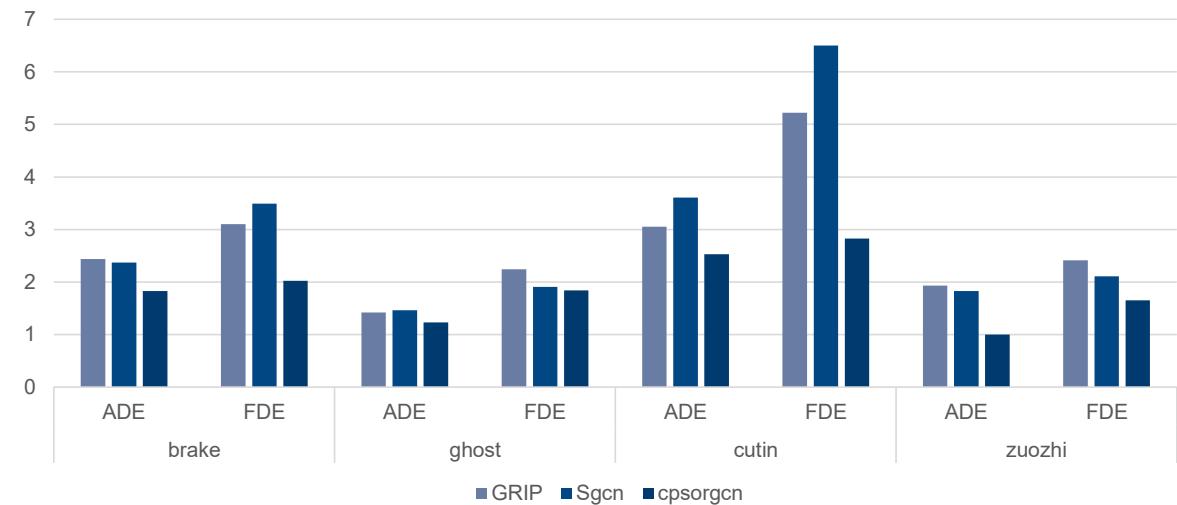
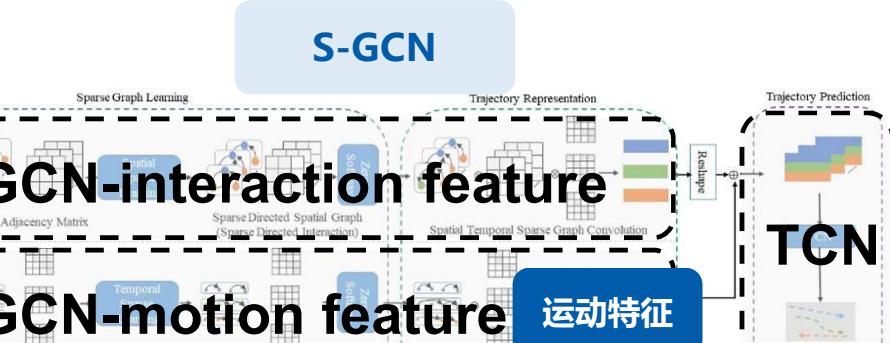
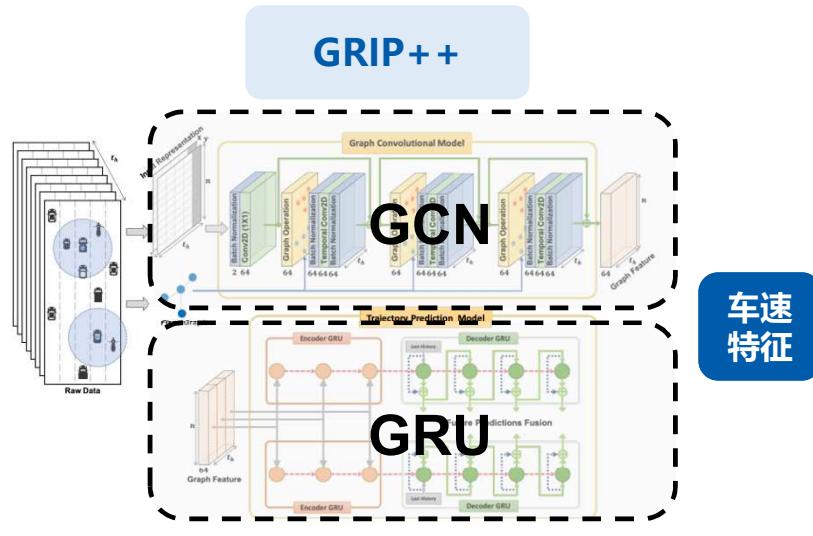
CPSOR-GCN



CPSOR-GCN模型强交互场景下，情绪突变之后对于轨迹有较好的预测精度

# 04 模型应用评价与驾驶行为风险评估

## • 4.2 模型评价 ◆模型对比：与数据驱动的模型对比



	前车急刹		鬼探头		侧方测量切入		无保护左转	
	ADE	FDE	ADE	FDE	ADE	FDE	ADE	FDE
GRIP++	2.44	3.10	1.42	2.24	3.05	5.22	1.93	2.41
S-GCN	2.37	3.49	1.46	1.91	3.61	6.50	1.83	2.11
CPSOR-GCN	1.83	2.02	1.23	1.84	2.53	2.83	1.00	1.65

**CPSOR-GCN模型融合SOR认知理论，能够捕捉驾驶员内部认知机制**

# 04 模型应用评价与驾驶行为风险评估

## • 4.3 基于驾驶人模型的风险评估方法

### 现实问题回顾

#### 情绪驾驶行为如何预测?



#### 如何评估情绪驾驶的风险?



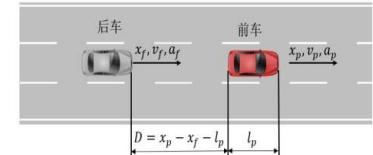
■ 汽车风险感知与自动驾驶认知状态

驾驶员状态造成的不确定是复杂环境中风险评估的重要挑战

### 风险评估研究现状

#### 基于冲突点

交通冲突指标在量化风险中广泛应用，但选择合适的指标、阈值使其适应多变驾驶状态的连续可靠的风险评估方法，仍面临巨大挑战。

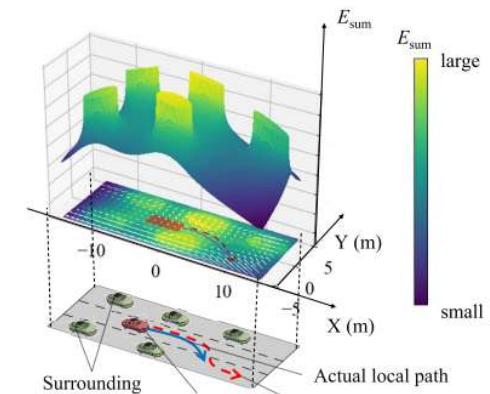


MTTC  
(跟驰换道)



PET  
(交叉口)

场理论通过空间分布的风险场来分析和预测潜在碰撞，但实际应用中仍需解决驾驶员状态不确定性的挑战。



# 04 模型应用评价与驾驶行为风险评估

## • 4.3 基于驾驶人模型的风险评估方法 ◆ 风险评估方法

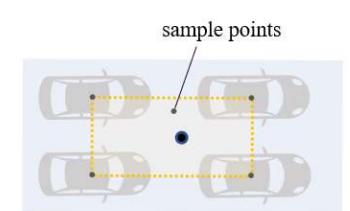
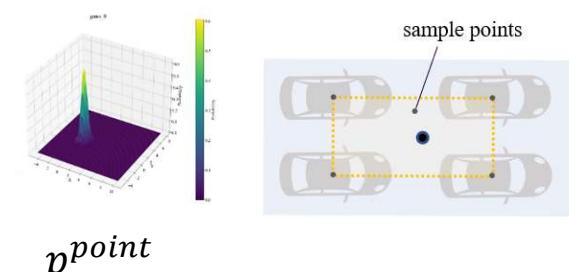
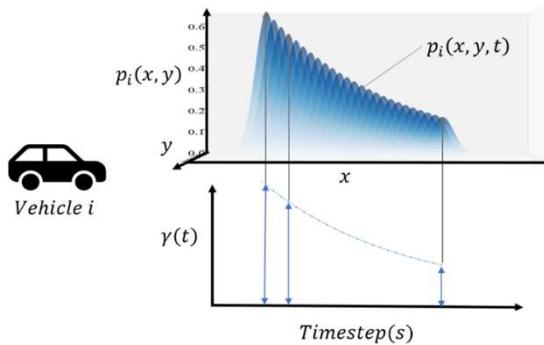


- 预测点坐标为均值的高斯分布
- 随时间衰减函数。

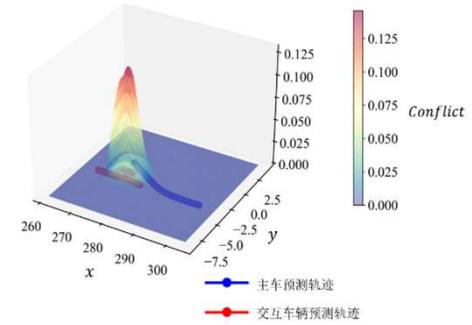
考虑驾驶员对近期交通状况的更多关注的**认知规律**。

- 考虑车辆的**占用空间**。
- 将**轨迹点概率分布**换算为**车辆占用概率分布**。

- 引入**等效质量**
- 对车辆风险场进行**二重积分计算乘积**，量化冲突场。



场景2:侧方车辆切入冲突场



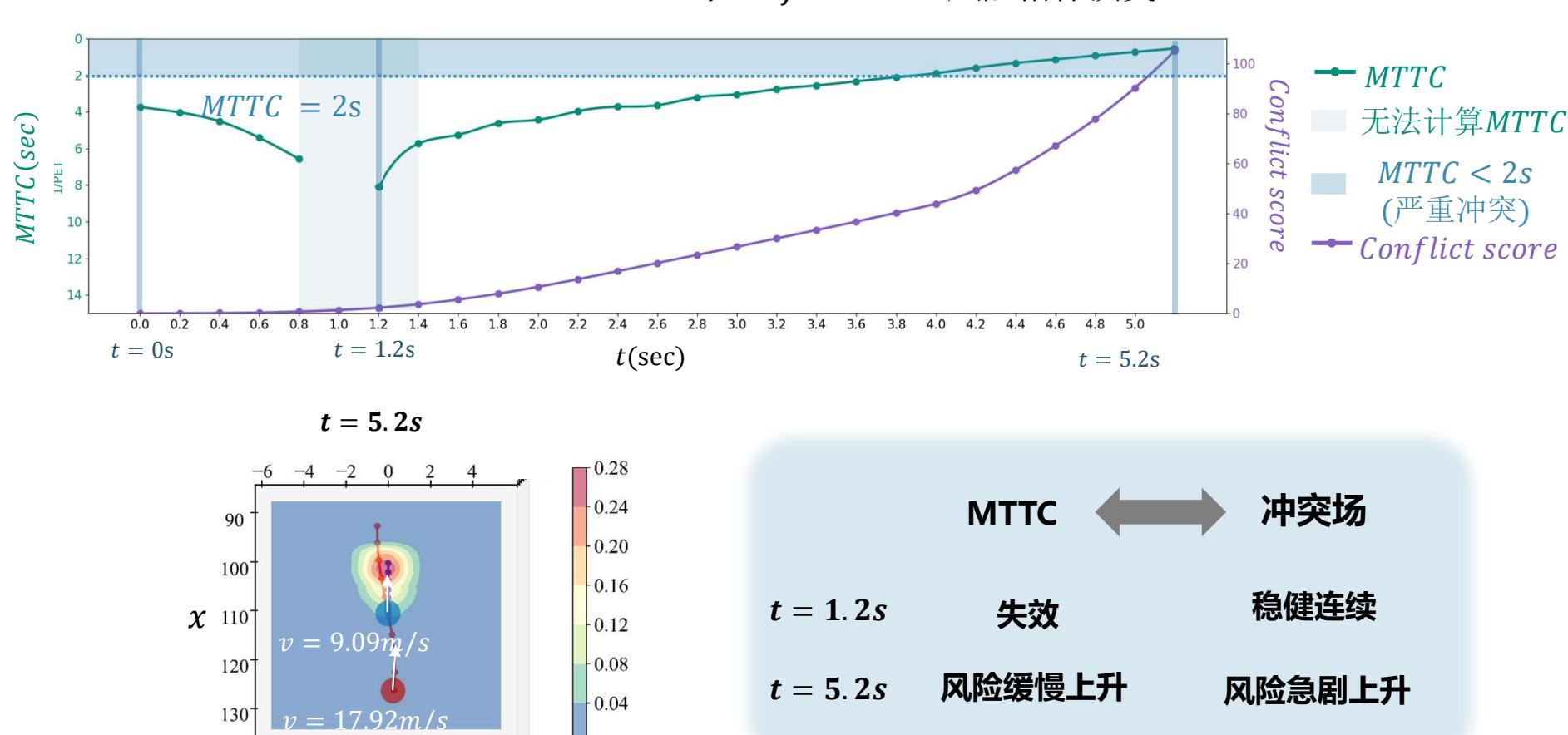
## 04 模型应用评价与驾驶行为风险评估

### • 4.4 案例分析

风险评估  
案例分析

愤怒情绪  
案例1

1



冲突场方法对驾驶员愤怒情绪导致风险增加的高敏感度

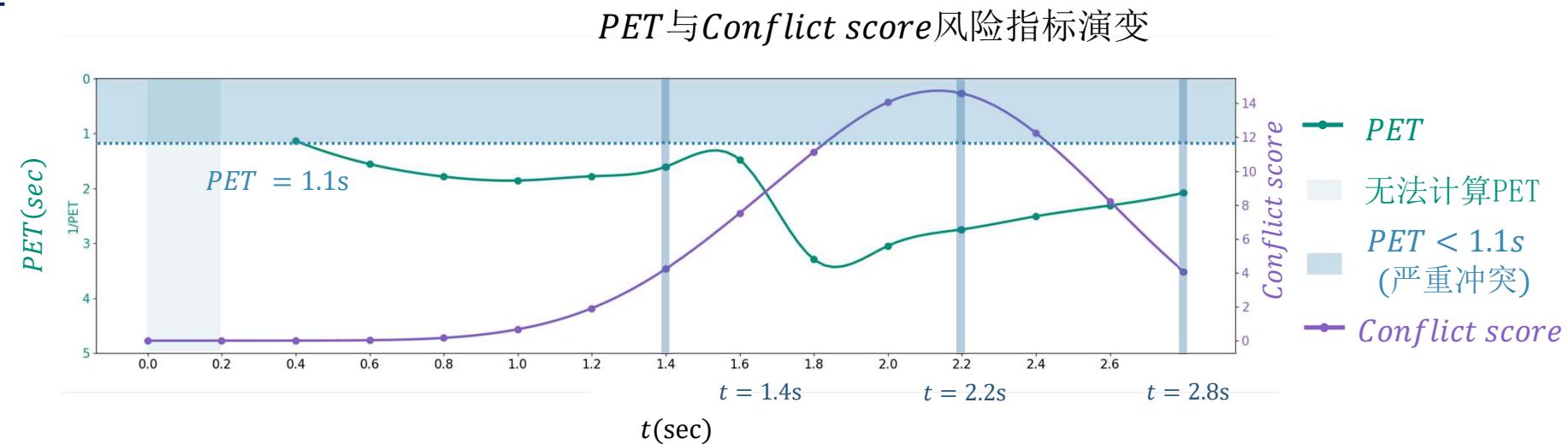
# 04 模型应用评价与驾驶行为风险评估

## • 4.4 案例分析

### 风险评估 案例分析

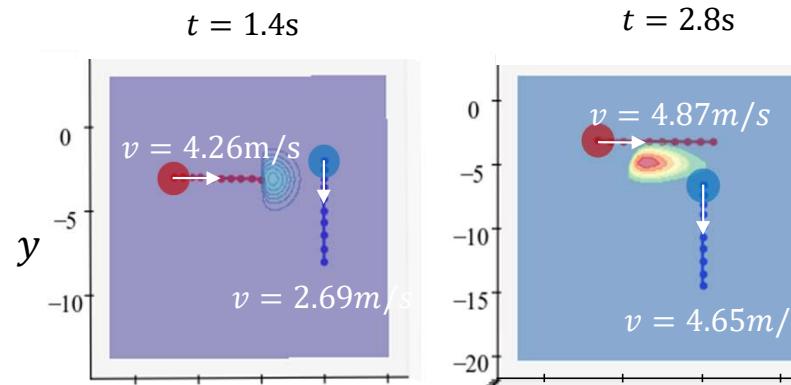
#### 愤怒情绪 案例1

1



#### 惊恐情绪 案例2

2



$t = 1.4s$   
 $t = 5.2s$

$t = 1.4s$   
 $t = 5.2s$

PET  
两者速度高  
风险较高  
主车速度高  
风险较高

冲突场  
驾驶员控制车速  
风险较低  
两车逐渐远离  
风险较低

风险评估方法避免了驾驶员在惊恐情绪下对于风险的过高估计



# 05 总结与展望

- 5.1 研究总结
- 5.2 研究创新点
- 5.3 不足与展望

# 5 研究总结

## 5.1 研究总结

### 研究目标

目标一：基于认知理论的驾驶人行为建模

目标二：结果评价与风险评估

### 难点挑战

#### 模型构建

对认知过程，因果关系建模难  
精确预测驾驶行为，对情绪建模难

#### 结果验证

获取情绪驾驶行为数据难  
验证SOR认知理论有效性难

#### 风险评估

驾驶状态不确定性下准确评估风险难

### 研究内容

#### SOR认知理论

物理运动 + 认知特征

验证

#### 应用

#### 驾驶行为实验

SOR-DBN + 预测轨迹精度

前提

CPSOR-GCN  
+  
风险场

### 研究成果

精度提升15.93%

精度提升27.33%

更稳健

更能适应愤怒、惊恐情绪状态

其他认知  
模型

数据驱动  
方法

传统冲  
突指标

冲突场

CPSOR-GCN

## 5 研究总结

### 5.2 研究创新点



#### 基于认知理论构建驾驶人模型

- （难）认知机制复杂难以描述；难以同时考虑物理运动特征与认知特征  
（解）基于刺激-有机体-反应（SOR）认知理论构建；结合概率推断与深度学习方法



#### 考虑驾驶员认知因素状态的风险评估方法

- （难）稳健连续的风险评估难；考虑驾驶员认知状态的风险评估难  
（解）基于车辆风险场的方法描述量化冲突；考虑不同认知状态下的驾驶行为特征



#### 采集驾驶员不同情绪状态下的驾驶行为数据的实验方法

- （难）情绪驾驶数据难以获取；现有实验中情绪诱导方法难以保证有效  
（解）搭建Carla-Sumo联合驾驶模拟实验平台；设计情绪诱导驾驶场景有效诱导情绪

# 5 研究总结

## 5.3 不足与展望



### 结构优化

#### 稀疏样本的预测精度有待提高

- 缺 对于样本空间中出现频率相对较低的行为预测效果不佳  
应 扩大样本量、给予稀疏样本更大的学习权重



### 方法拓展

#### 假设场景中驾驶员的情绪状态只发生一次改变

- 缺 驾驶员的情绪可能会出现多次波动，难以采集PAD情绪数据  
应 与情绪识别的研究相结合，利用面部表情等客观数据实时识别情绪



### 效率提升

#### 风险评估计算效率有待提高

- 缺 无法满足实时评估驾驶风险的工程应用需求  
应 使用蒙特卡洛采样随机抽样，近似计算风险场的二重积分

謝謝

敬请各位老师批评指正

汇报人：唐揽月

指导教师：孙剑教授, 岳李圣飒助理教授

2025年1月9日星期四



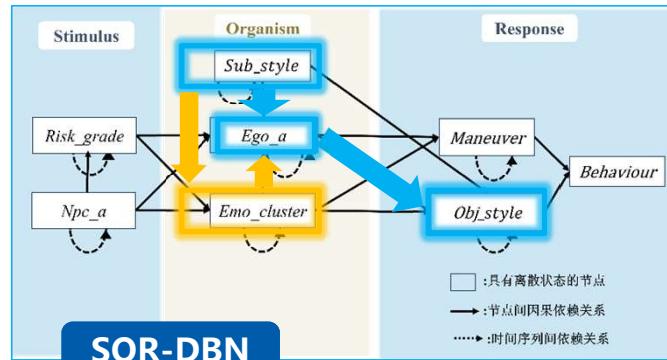
同濟大學  
TONGJI UNIVERSITY



# 04 模型应用评价与驾驶行为风险评估

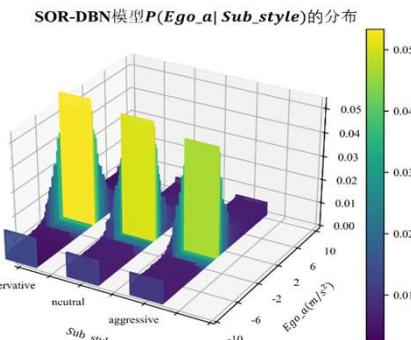
## • 4.2 模型评价 ◆SOR认知理论优势机理分析

### 认知模型对比



### 内部状态→反应 ( O→R )

#### CPSOR-GCN 推断结果

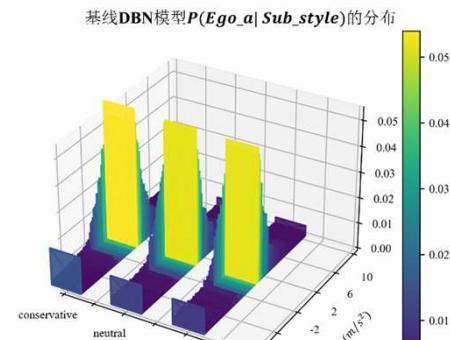
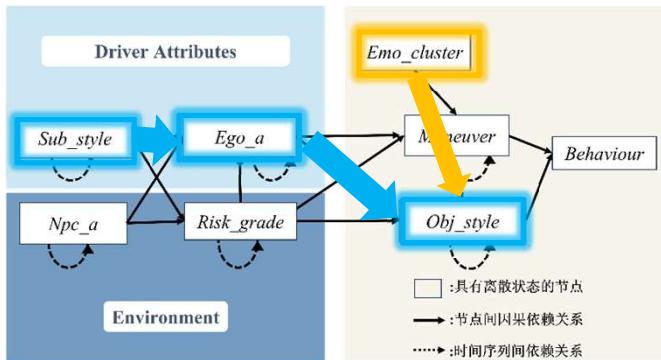


### 机理分析

$$P(Ego\_a|Sub\_style) = P(Sub\_style)$$

$$* P(Emo\_cluster|Sub\_style)$$

$$* P(Ego\_a|Emo\_cluster)$$



- 面对同样的外界环境刺激，不同主观风格的驾驶员会倾向于产生不同的情绪状态，从而间接影响驾驶员的驾驶行为反应

**SOR刺激-内部状态-行为反应的因果链，可以深入理解驾驶行为异质性。**