



同济大学交通运输工程学院
COLLEGE OF TRANSPORTATION ENGINEERING
TONGJI UNIVERSITY

CPSOR-GCN: An Interactive Vehicle Trajectory Prediction Method Considering Emotion Based on SOR Cognitive Theory

——2023人因建模与增强国际会议

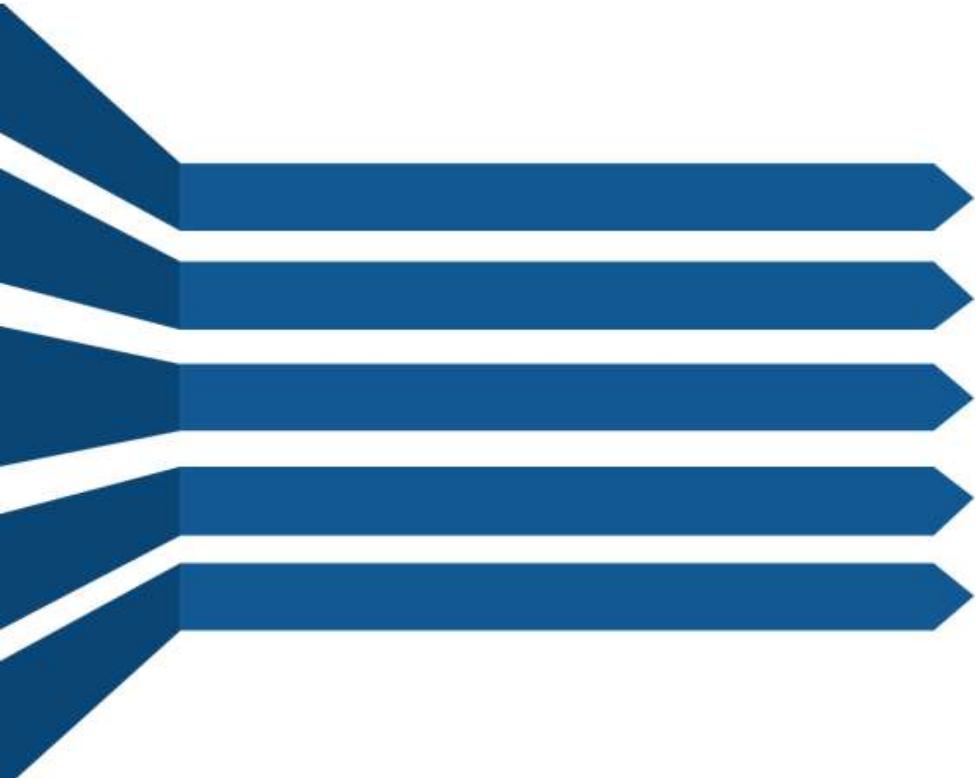
报 告 人：岳李圣飒 唐揽月

问题引入



为何会有此类路怒引起的严
重交通事故发生?

此类由于驾驶员发泄愤怒情绪
而导致的交通事故该如何避免?

- 
- 1 研究背景
 - 2 研究目标与技术路线
 - 3 研究内容与成果
 - 4 创新特色与应用前景

1 研究背景

1.1 选题背景——主动安全系统在强交互驾驶场景中表现不佳

- 目前绝大多数现代化车辆都配置了车辆主动安全系统



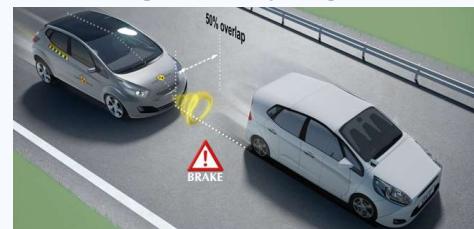
实际应用场景中，主动安全系统常常在强交互场景中触发

- 主动安全系统表现欠佳，以自动紧急制动系统（AEB Autonomous Emergency Braking）为例



截至2019年3月，美国NHTSA对仅仅某一日系品牌汽车AEB的投诉就收到高达129起

● 车厂测试误报



《中国智能驾驶产业发展年度报告（2022）》中指出，当年量产车组完成自动紧急制动测试中实现零误报的车辆占比为0%。

● 实际应用误报



驾驶员存在路怒现象，直行抢行，AEB仍误作，AEB误触发，导致触发，几近造成事故。急转急刹危险动作。

亟需解决主动安全系统在强交互场景中误报率极高安全性不足的痛点难题

1 研究背景

1.2 现存问题



异常状态对驾驶行为的影响

- 在中国有60.7%，在美国有78%的驾驶员报告在过去一年有过**路怒驾驶经历**

驾驶员状态	O.R.(几率比)
嗜睡/疲劳	3.4
情绪激动（愤怒/ 惊恐/悲伤）	9.8

- 情绪激动（明显**愤怒/惊恐/悲伤**）下会有**9.8倍的撞车风险**，危险程度高于其他异常状态

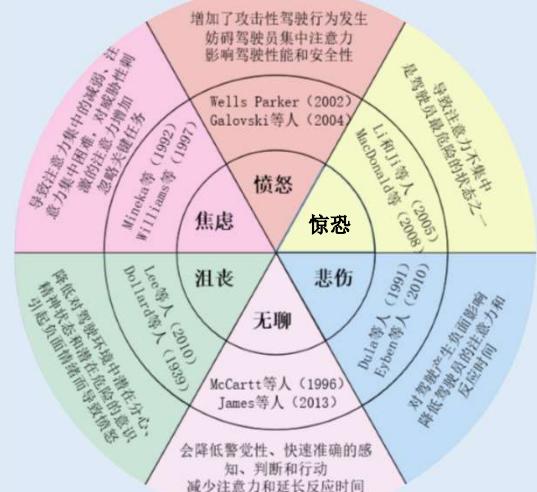
基于正常状态构建的主动安全系统**未考虑情绪异常状态对驾驶行为的影响**

1 研究背景

1.3 文献综述

情绪对驾驶行为的影响

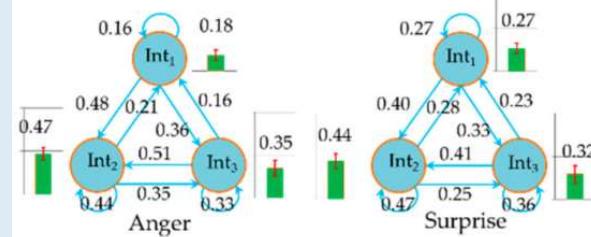
情绪对驾驶行为的相关性分析



仅反应了数据关联特征，无法反应情绪对驾驶行为的因果作用机制。

(胡乾静. 不同情绪在典型驾驶场景中对驾驶行为的影响研究[D].重庆大学,2019.)

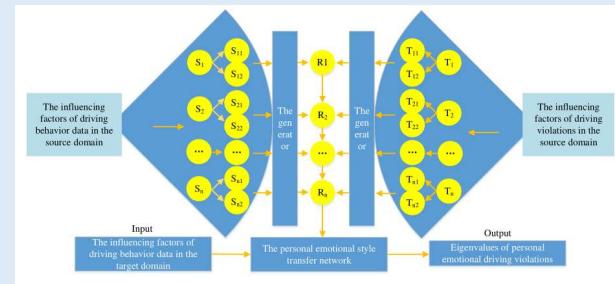
情绪与驾驶意图的概率分析



通过隐马尔可夫模型，分析了相同驾驶环境参数但不同情绪状态下驾驶意图的概率分布，**情绪仅为独立变量，缺乏与其他因素的耦合关系，可解释性较差。**

(Yaqi Liu, et al, 2020)

情绪与驾驶行为的深度学习模型



直接对情绪等影响因素建模得到行为规律，使用GAN-LSTM对驾驶行为高精度复现，考虑了其他驾驶要素，**但未建立因果关系，导致预测精度较低。**

(Mingze Wang et al, 2023)

缺乏对情绪与其他因素耦合下影响驾驶行为的**因果机制的研究**

1 研究背景

1.3 文献综述



SOR认知理论

人类驾驶员

刺激

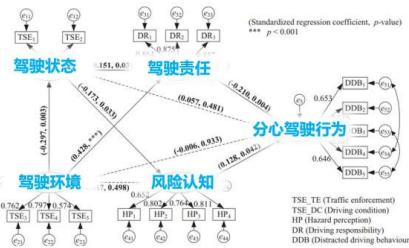


反应

- SOR 模型通过三个步骤描述人们对刺激的反应：**刺激、有机体和反应** (Mehrabian & Russell 1974)
- 不同于传统的刺激-反应回答，SOR模型从个体的**情感和认知状态**的角度来解释刺激到行为的认知过程

现有相关应用研究

- 对驾驶分心行为进行分析



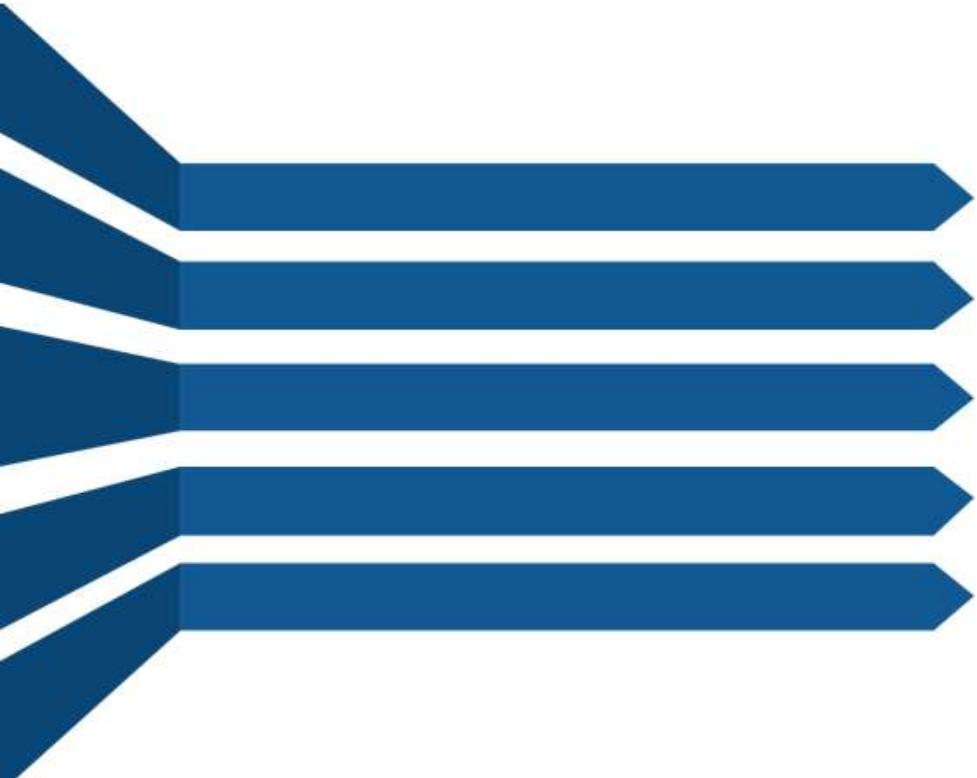
(Zhong et al,2014)(Changxu, W et al, 2004)

其他消费行为：20+ 危险行为：5+
购买行为：40+
参与行为：8+ 社会焦虑行为：5+

应用领域
(2015~2022)



SOR心理学模型适用于当前场景，且得到广泛验证

- 
- 1 研究背景
 - 2 研究目标与内容
 - 3 研究内容与成果
 - 4 创新特色与应用前景

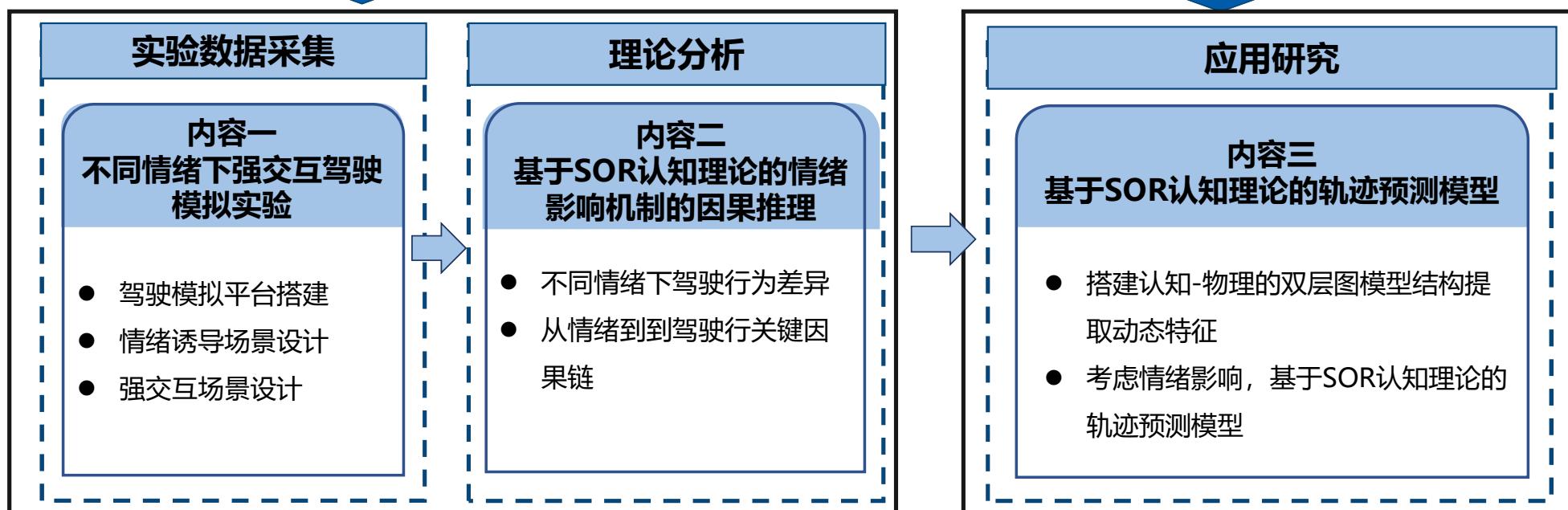


2 研究目标

强交互场景下考虑情绪影响的轨迹预测

目标一：解析强交互场景下驾驶行为的情绪影响机制

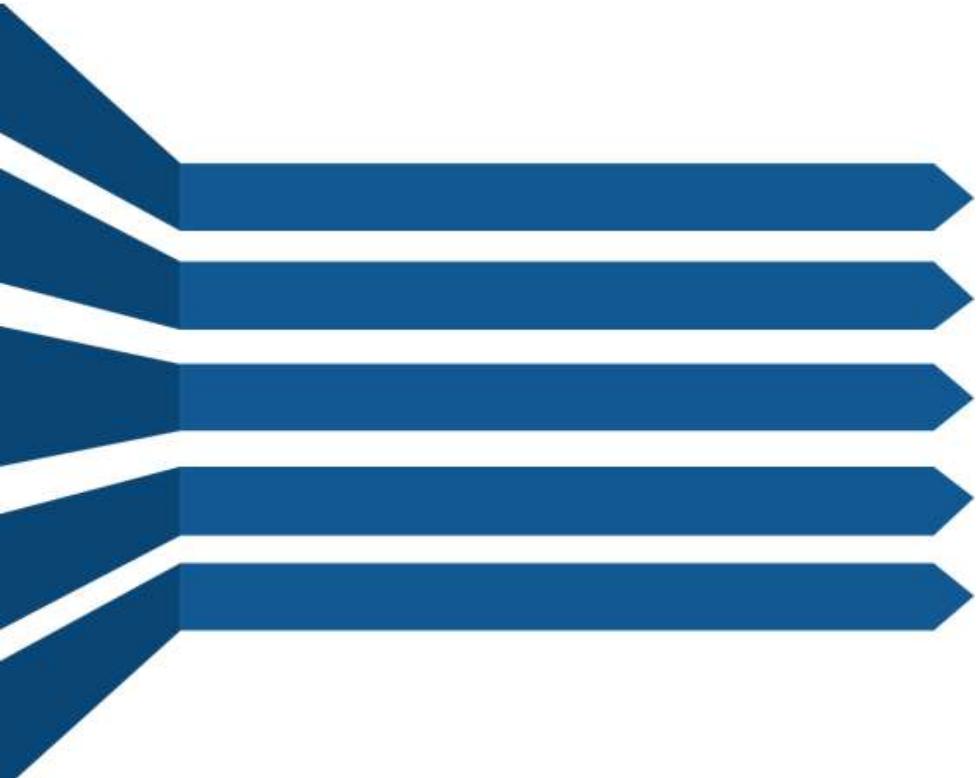
目标二：轨迹预测模型搭建



研究问题

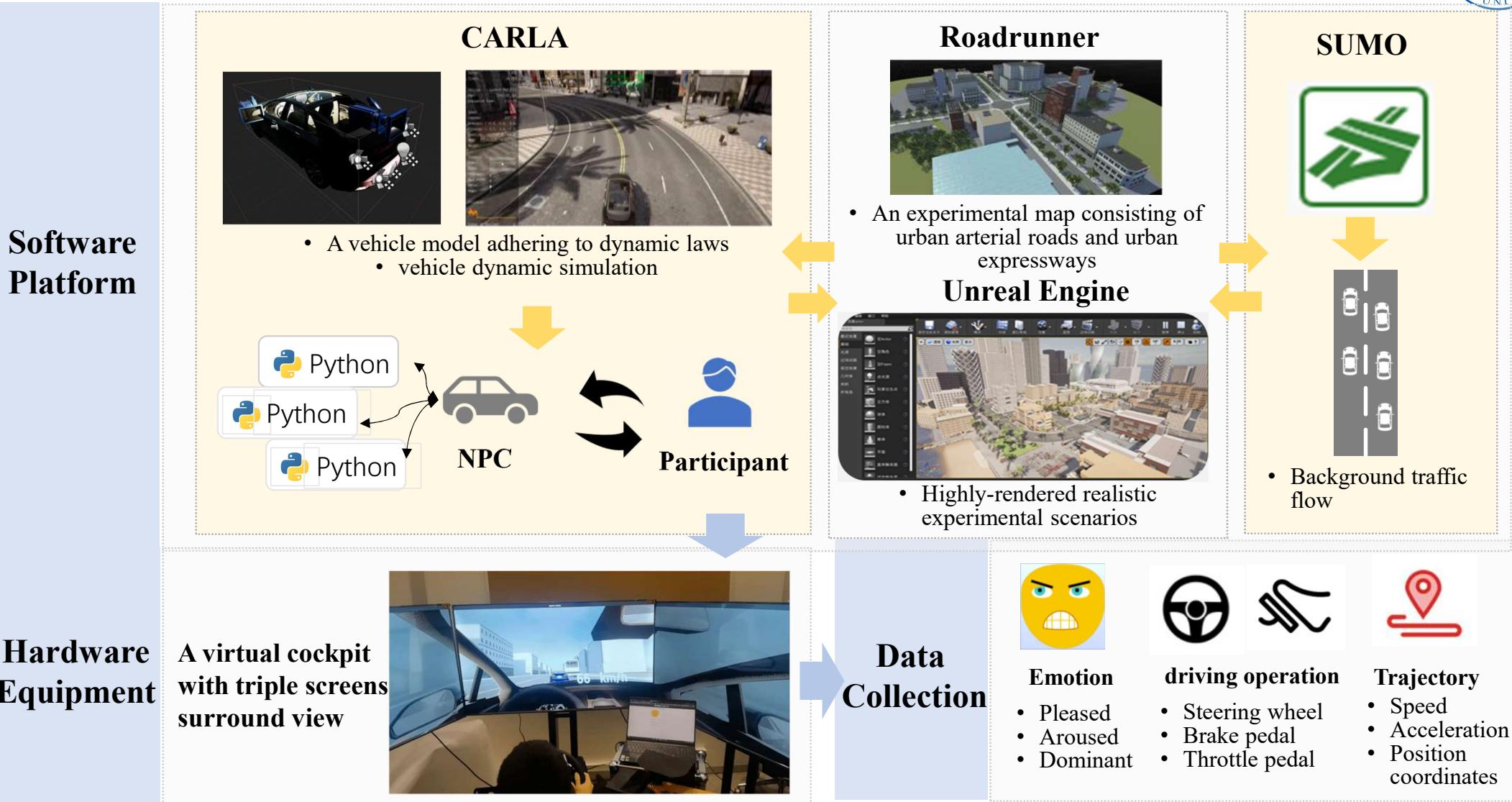
研究目标

研究内容

- 
- 1 研究背景
 - 2 研究目标与技术路线
 - 3 研究内容与成果
 - 4 创新特色与应用前景

3 研究内容与成果

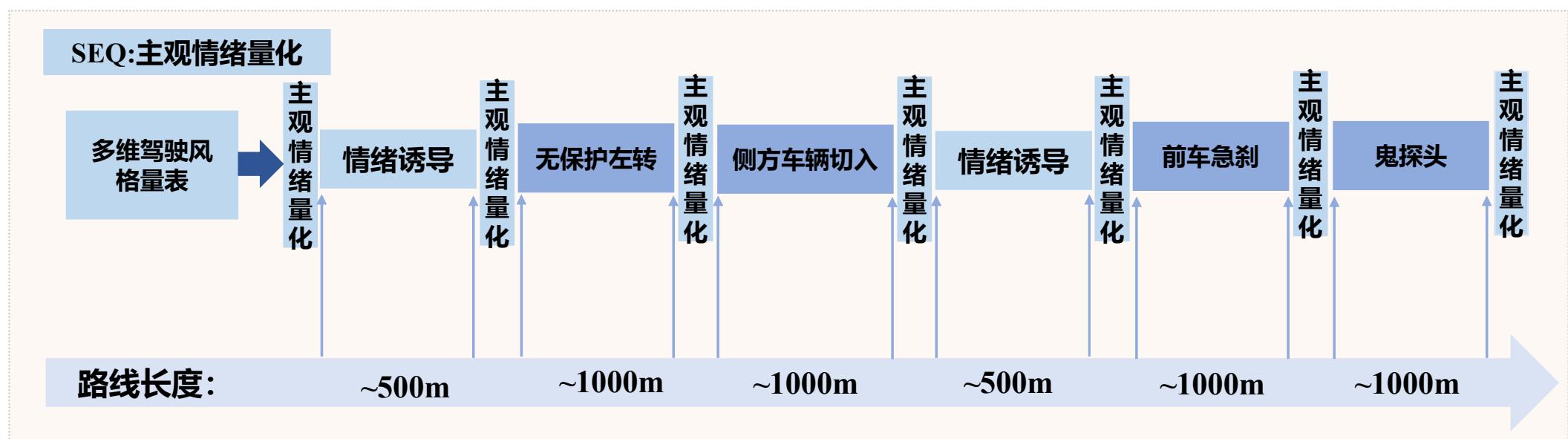
3.1 强交互驾驶实验开展——实验平台搭建



3 研究内容与成果

3.1 强交互驾驶实验开展——实验流程

➤ 实验流程 (以一条路径为例)



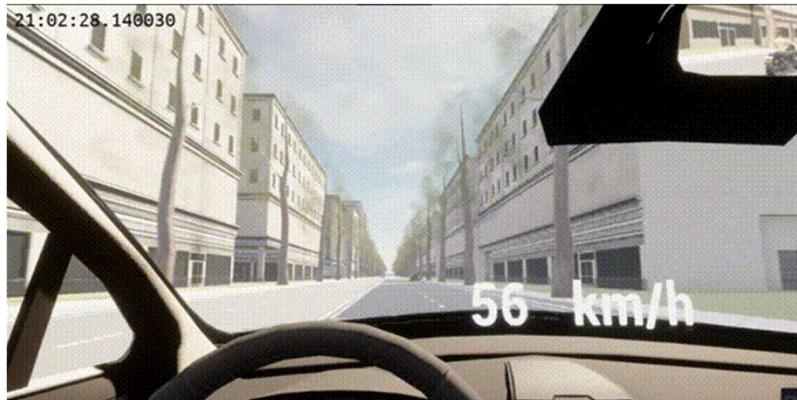
3 研究内容与成果

3.1 实验开展——情绪诱导场景搭建

场景设计依据：

郑璞, 刘聪慧, 俞国良. 情绪诱发方法述评[J]. 心理科学进展. 2012(1):44-45

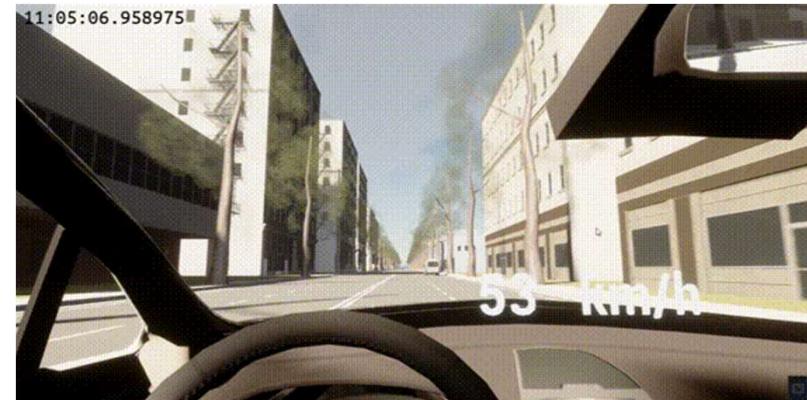
- 惊恐诱导1：目击事故



- 愤怒诱导1：对向车远光灯挑衅



- 惊恐诱导2：行人碰撞



- 愤怒诱导2：拥堵



3 研究内容与成果

3.1 实验开展——强交互实验场景搭建

场景设计依据：

美国国家公路交通安全管理局（NHTSA）的典型碰撞场景，欧盟新车安全评鉴协会（EURO NCAP）的最新AEB测试场景

● 前车急刹



● 鬼探头



● 侧方车辆切入



● 无保护左转



3 研究内容与成果

3.1 实验开展——实验数据采集



主观驾驶风格自评

多维度驾驶风格量表



驾驶激进度

信度分析: $\alpha_{CRONBACH}$ 为0.765
效度分析: p 近似于0

本问卷信效度良好

(孙龙,常若松.驾驶风格研究现状与展望[J].人类工效学,2013.)

驾驶数据采集

操作数据与车辆数据

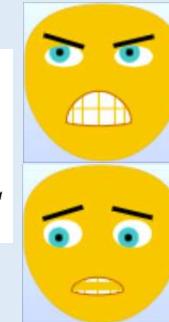
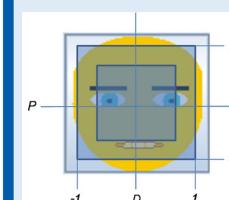
- 1: 行驶速度
- 2: 加速度
- 3: 行驶位置
- 4: 方向盘转角
- 5: 刹车踏板
- 6: 油门踏板

主观情绪采集

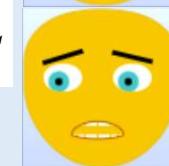
Affect Button情绪量表

映射

[P A D] \longrightarrow [愉悦 唤醒 支配]
完成了情绪的有效量化



极度愤怒:
 $Pleased = -1$
 $Aroused = 1$
 $Dominant = 1$



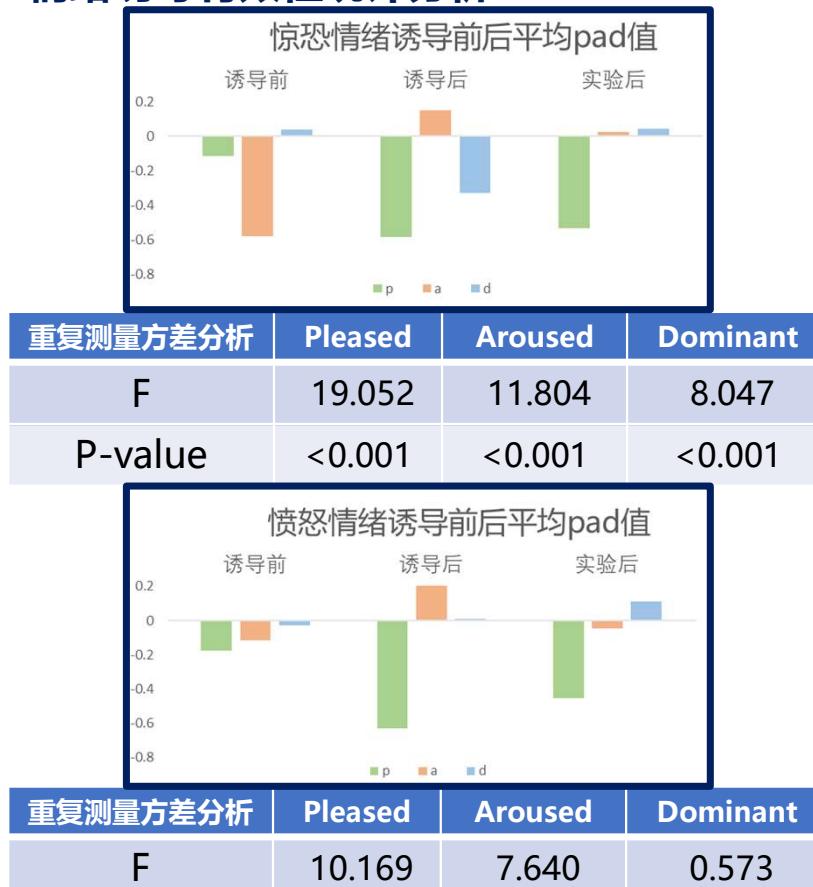
极度惊恐:
 $Pleased = -1$
 $Aroused = 1$
 $Dominant = -1$

(Joost Broekens, The AffectButton: a Digital Self-report Tool for Emotion. International Journal of Human-Computer Studies, 2013.)

3 研究内容与成果

3.2 情绪影响机制解析——情绪诱导有效性及对驾驶行为影响显著性

● 情绪诱导有效性统计分析



● 不同情绪下驾驶行为差别显著性统计分析

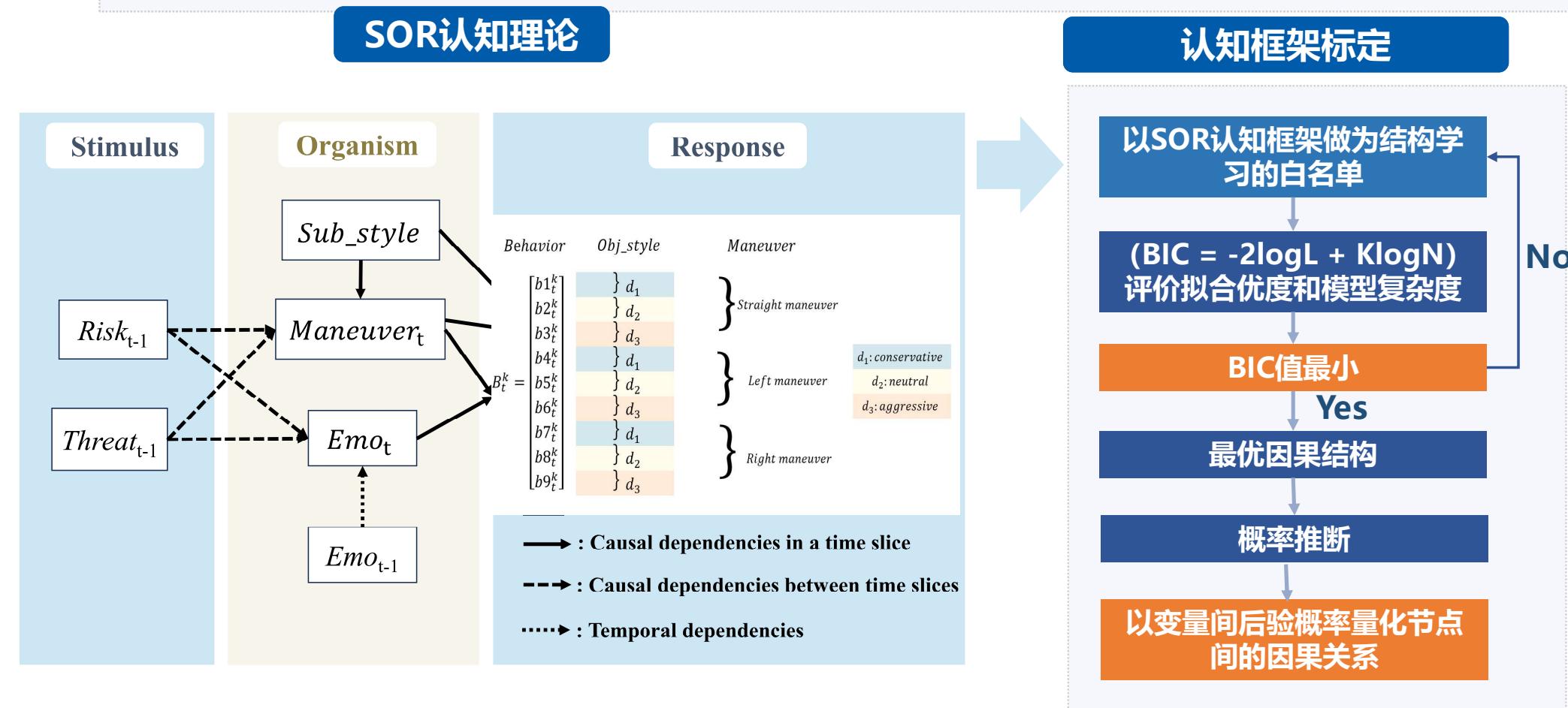
Pre-collision scenario	Comparison index (比较指标)	Conditions (M:平均值, SD:标准差)	Statistic (方差分析)
Emergency Brake	Max_jerk_during_deceleration (最大冲击度)	Anger(M=758.31, SD=2114.75) Neutral(M=124.84, SD=119.18) Fear(M=326.94, SD=1019.56)	F=3.231, P=0.045<0.05
Cut-in	Min TTC (最小碰撞时间)	Anger(M=1.05, SD=0.57) Neutral(M=0.81, SD=0.29) Fear(M=0.69, SD=0.26)	F=4.915, P=0.010<0.05
Ghost Emerging	Mean_acc (平均加速度)	Anger(M=3.55, SD=1.72) Neutral(M=1.64, SD=1.09) Fear(M=2.02, SD=1.38)	F=9.798, P=0.001<0.01
Unprotected left-turn	Std_speed (油门脚踏板力度的标准偏差)	Anger(M=0.34, SD=0.13) Neutral(M= 0.23, SD=0.1) Fear(M=0.26, SD=0.11)	F=9.888, P=0.003<0.01

情绪诱导有效性较好，不同情绪下驾驶行为指标差别显著，愤怒情绪下驾驶行为更具冲动性

3 研究内容与成果

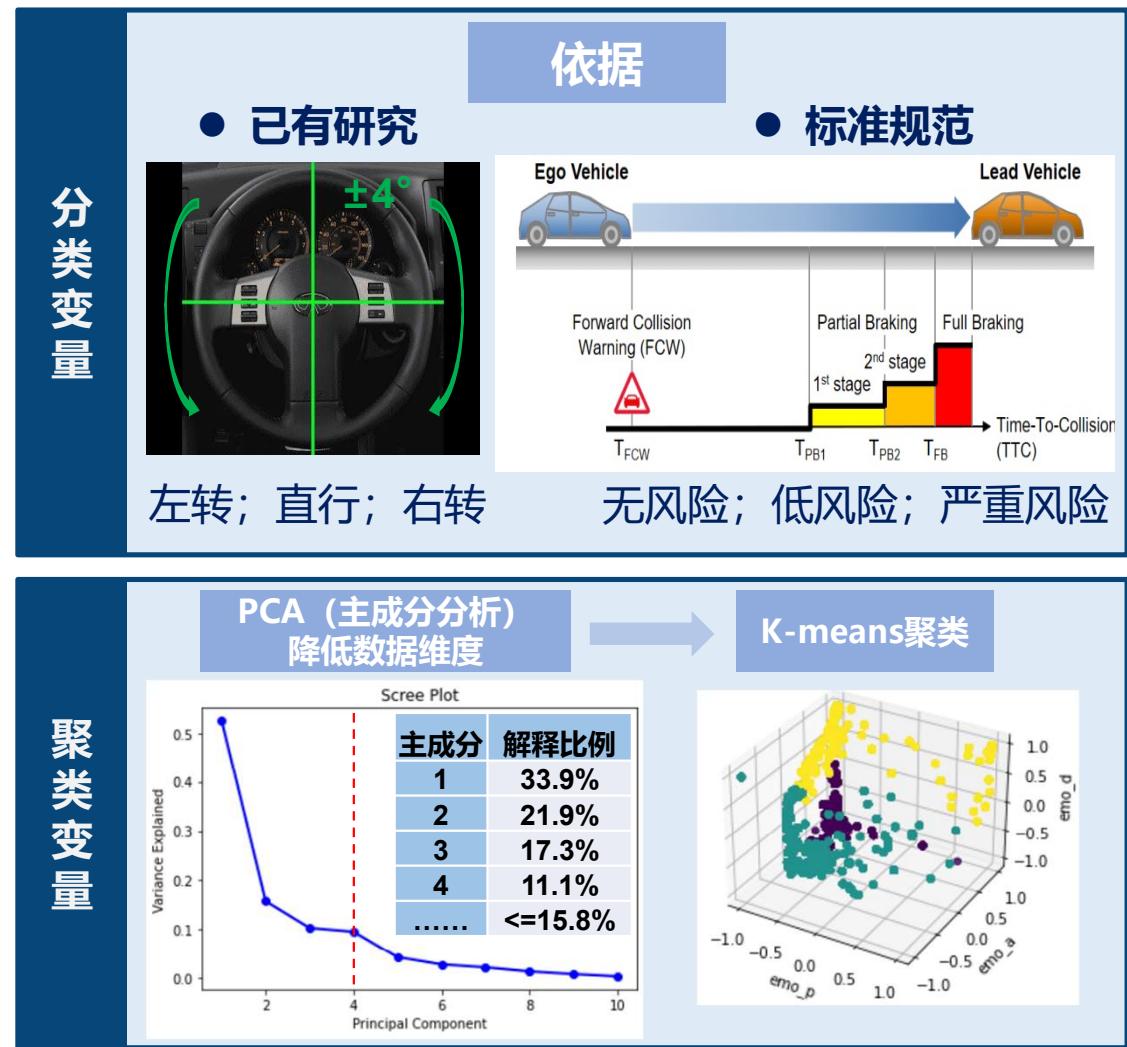
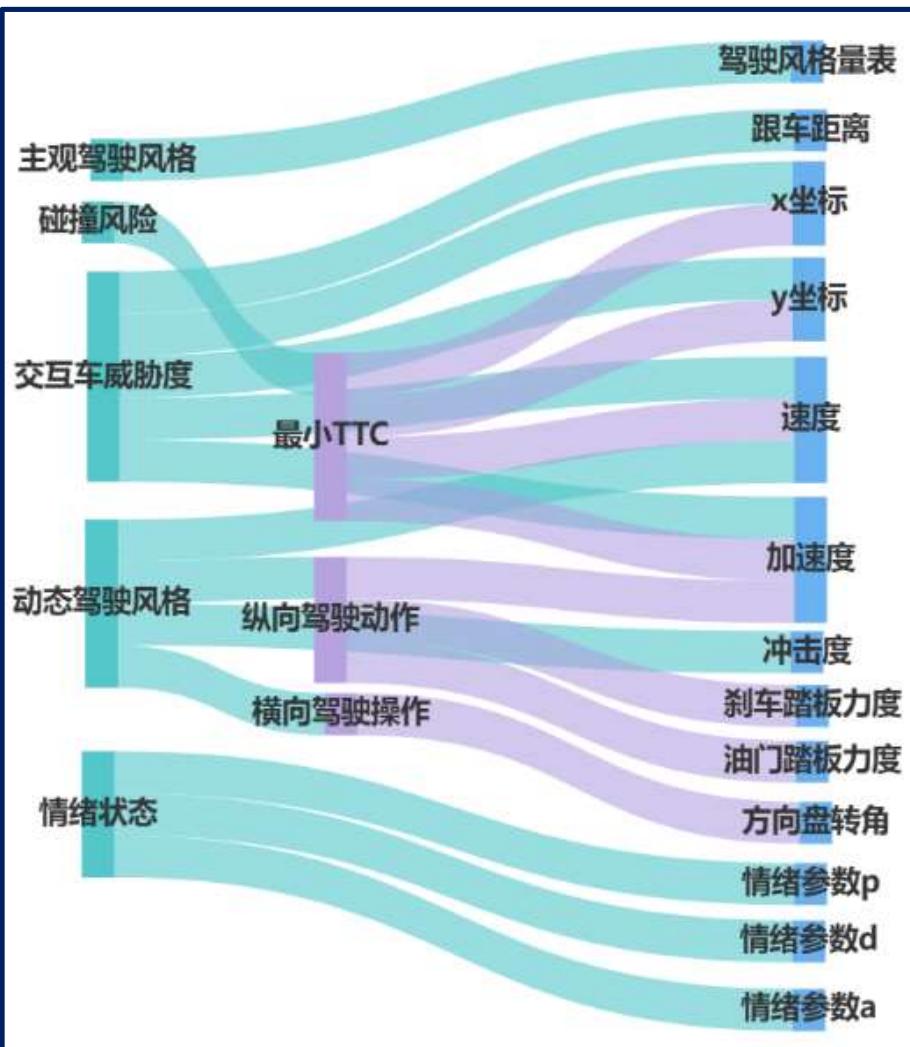
3.2 情绪影响机制解析——基于贝叶斯网络的SOR认知框架标定

模型概念：一种基于概率图模型的因果关系分析方法，通过表示变量之间的条件概率来描述因果关系



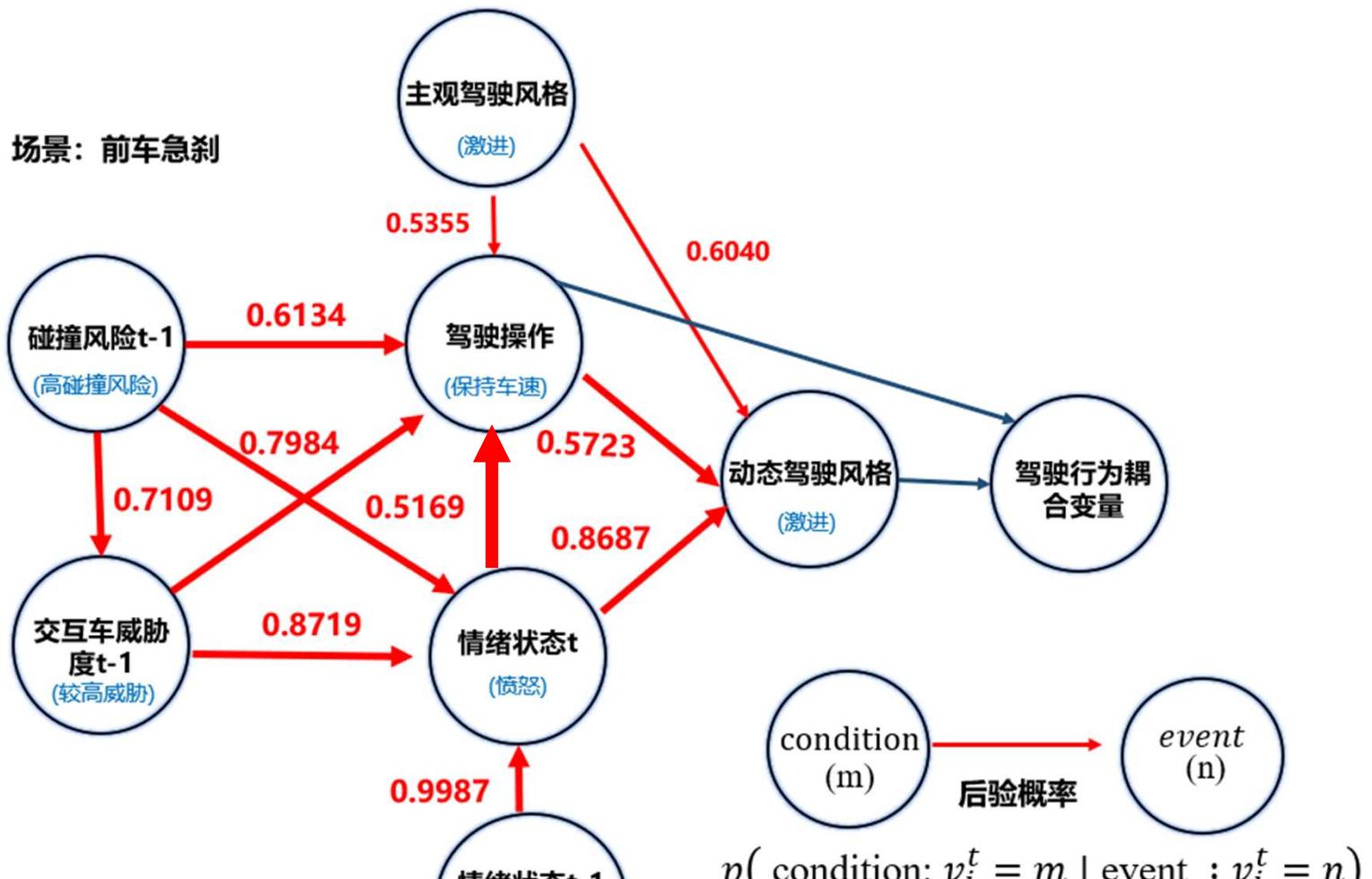
3 研究内容与成果

3.2 情绪影响机制解析——贝叶斯网络数据离散化处理



3 研究内容与成果

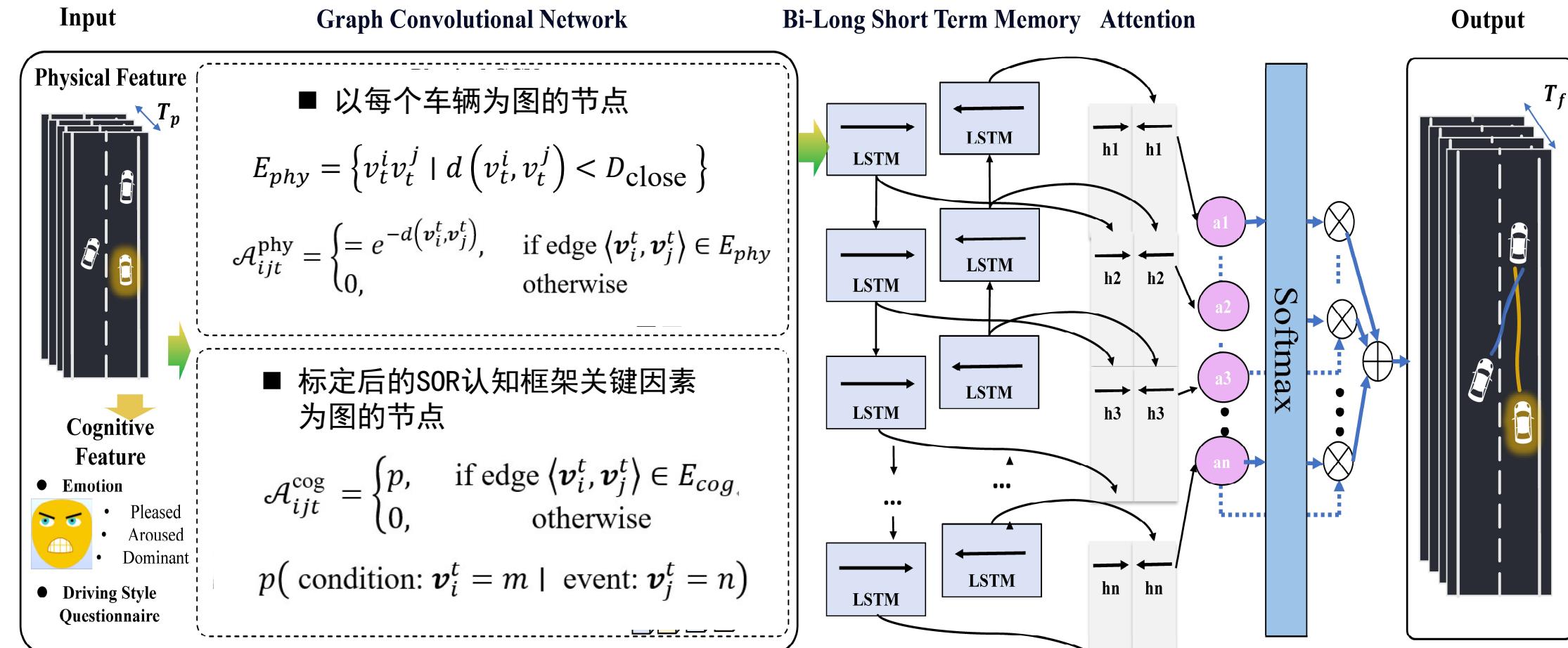
3.2 情绪影响机制解析——关键因果链推理



以节点状态间的后验概率量化节点间的因果关系
交互车高威胁度→愤怒→{激进，保持车速}

3 研究内容与成果

3.3 轨迹预测模型——Cognitive-Physical-SOR-GCN



考慮认知-物理特征的基于SOR认知理论的轨迹预测框架CPSOR-GCN

3 研究内容与成果

3.4 轨迹预测模型

70%训练集

15%验证集



驾驶实验数据

15%测试集

Sampling

历史3s的轨迹预测未来2秒 (0.04s/step)

原始轨迹

1	2	3	...	74	75	...	123	124	125
---	---	---	-----	----	----	-----	-----	-----	-----

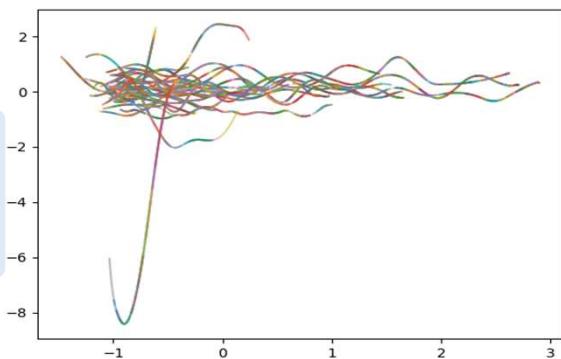
Input

1	2	3	...	74	75
---	---	---	-----	----	----

Output

76	...	124	125
----	-----	-----	-----

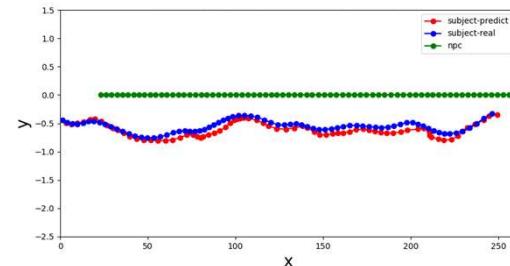
前车急刹场景
主车轨迹
samples



已训练的模型

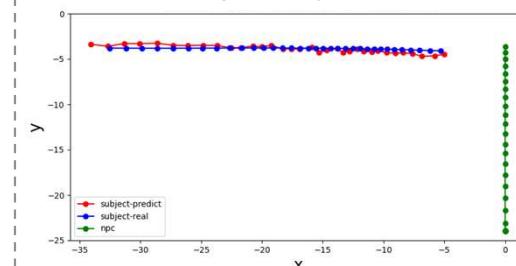
前车急刹

Trajectory Plot



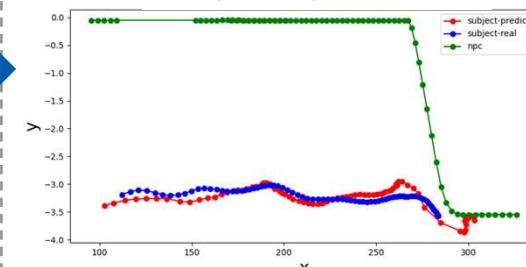
鬼探头

Trajectory Plot



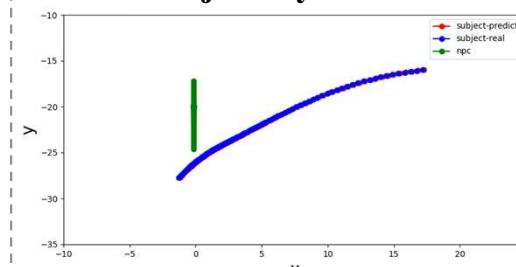
侧方车辆切入

Trajectory Plot



无保护左转

Trajectory Plot

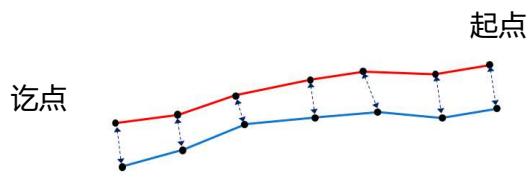


3 研究内容与成果

3.4 消融实验——预测结果

◆评价指标(Nikos *et al.*,2007; Yao *et al.*, 2021) : ◆消融实验对比项

1. RMSE: 均方根误差



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

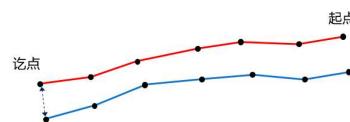
2. MAE: 均方绝对误差

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

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



$$FDE = RMSE^T$$

P-GCN

Physical feature

CP-GCN

Physical feature
Cognitive feature

CPSOR-GCN

Physical-GCN

Cognitive-GCN

Physical-GCN

Cognitive-GCN
S-O-R

Physical-GCN

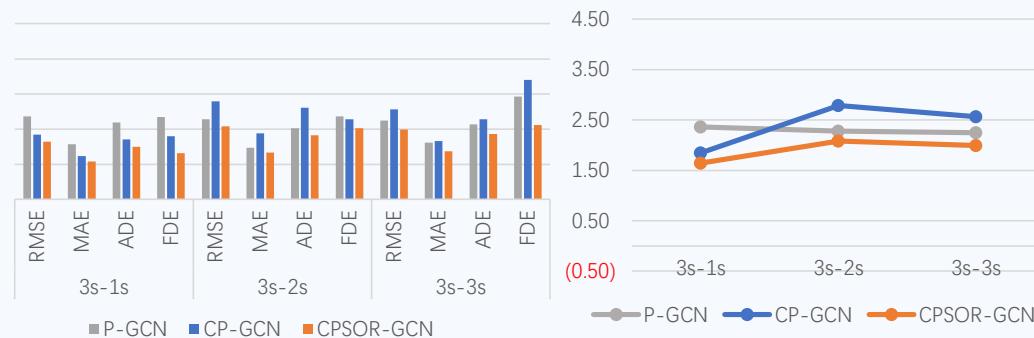
BiLSTM-Attention

BiLSTM-Attention

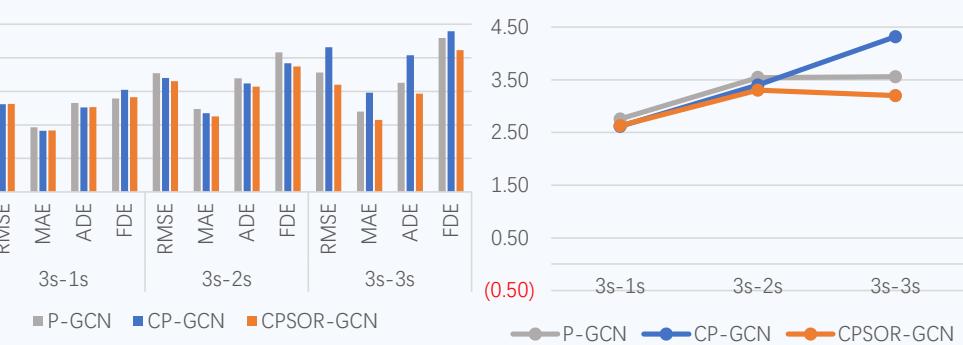
BiLSTM-Attention

3 研究内容与成果

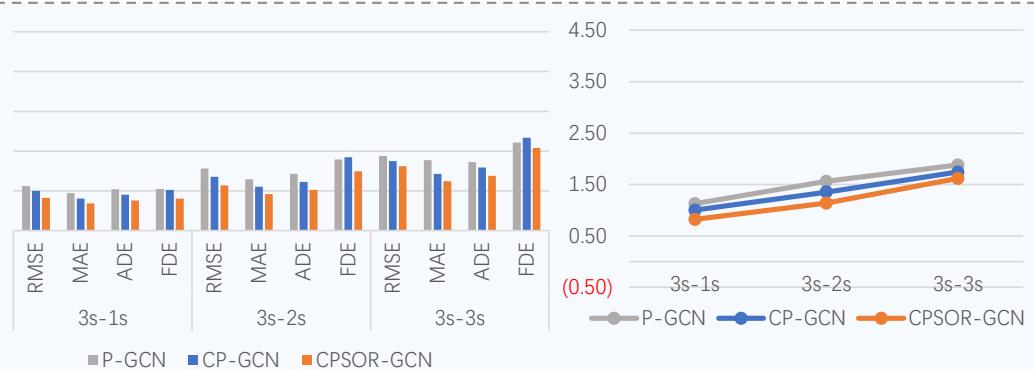
3.4 消融实验——预测结果



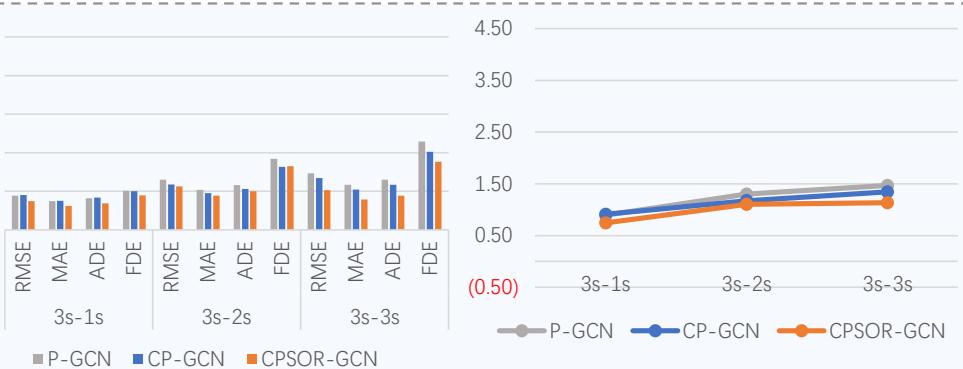
前车急刹-RMSE



侧方车辆切入-RMSE



左探头-RMSE



无保护左转-RMSE

SOR认知理论的考虑使得模型在较长的预测窗口时精度较好

3 研究内容与成果

3.4 轨迹预测模型——案例分析

◆前车急刹场景（5号实验人员）

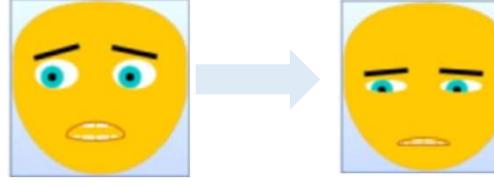
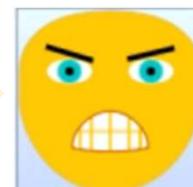
情绪变化

愤怒

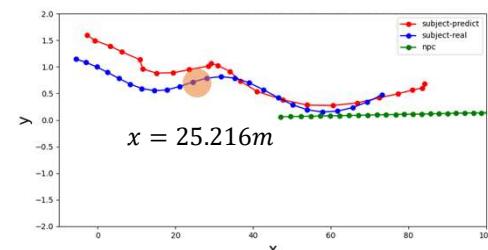
惊恐

中性

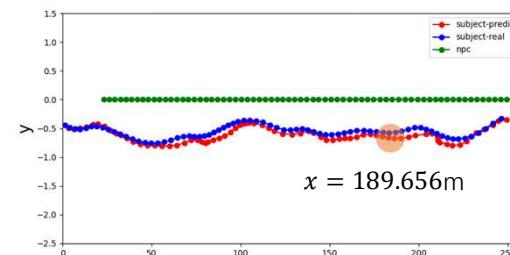
CPSOR-GCN



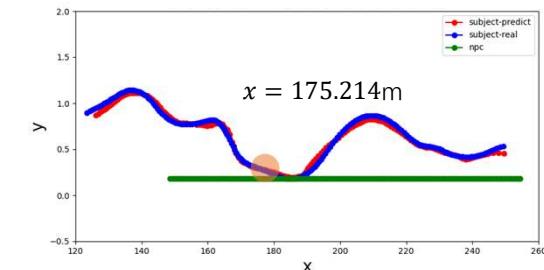
Trajectory Plot



Trajectory Plot

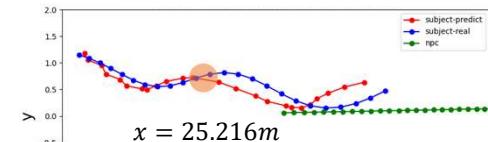


Trajectory Plot

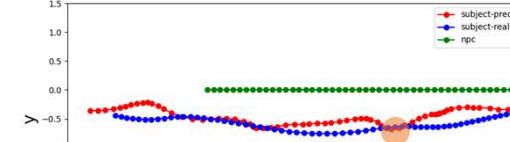


CP-GCN

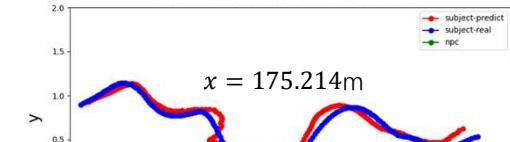
Trajectory Plot



Trajectory Plot



Trajectory Plot

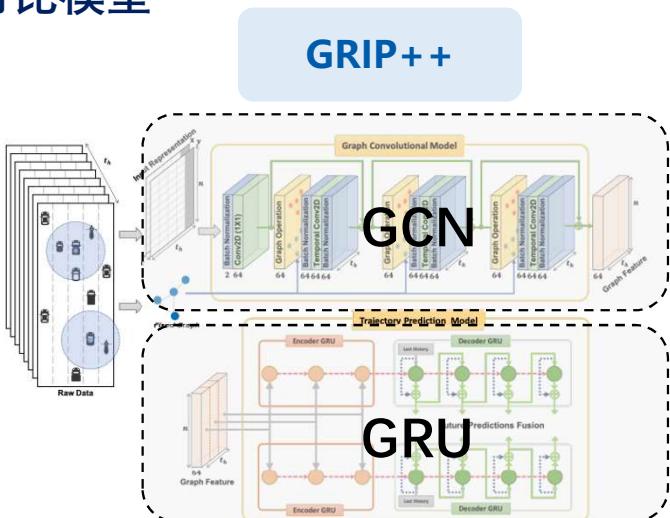


CPSOR-GCN模型在强交互场景下，情绪突变之后对于轨迹有较好的预测精度

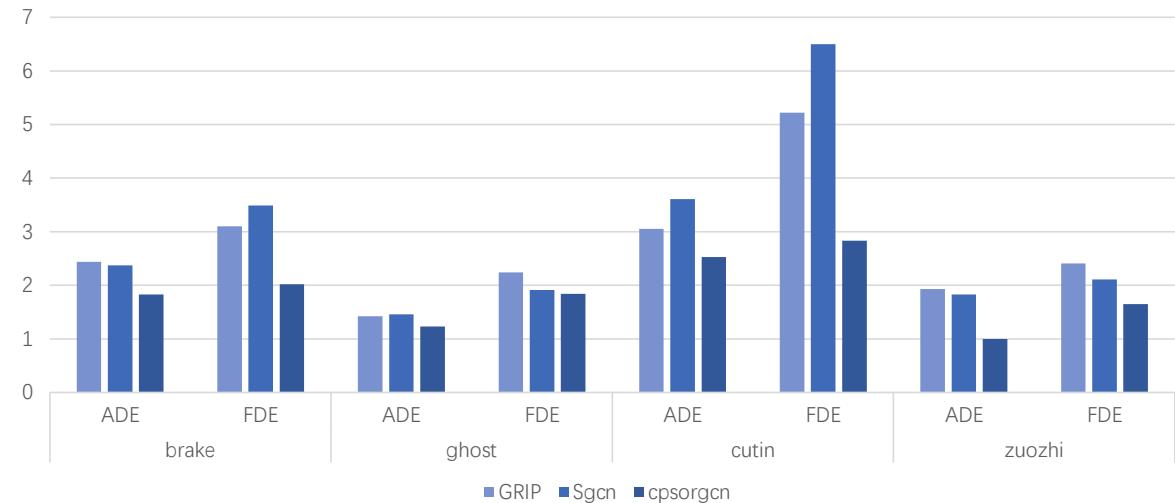
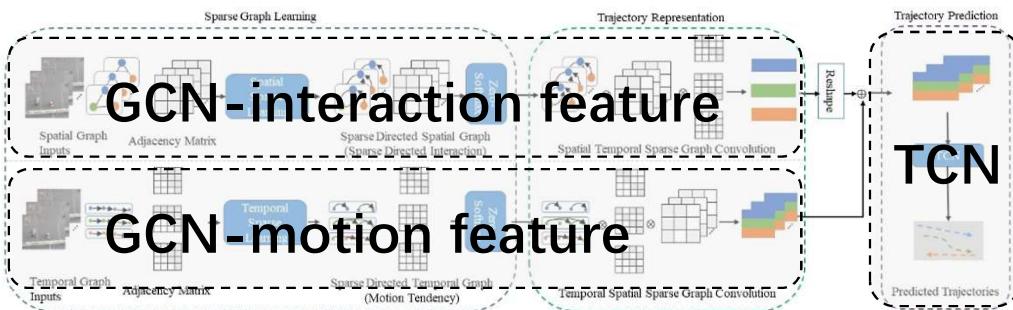
3 研究内容与成果

3.4 轨迹预测模型——预测结果

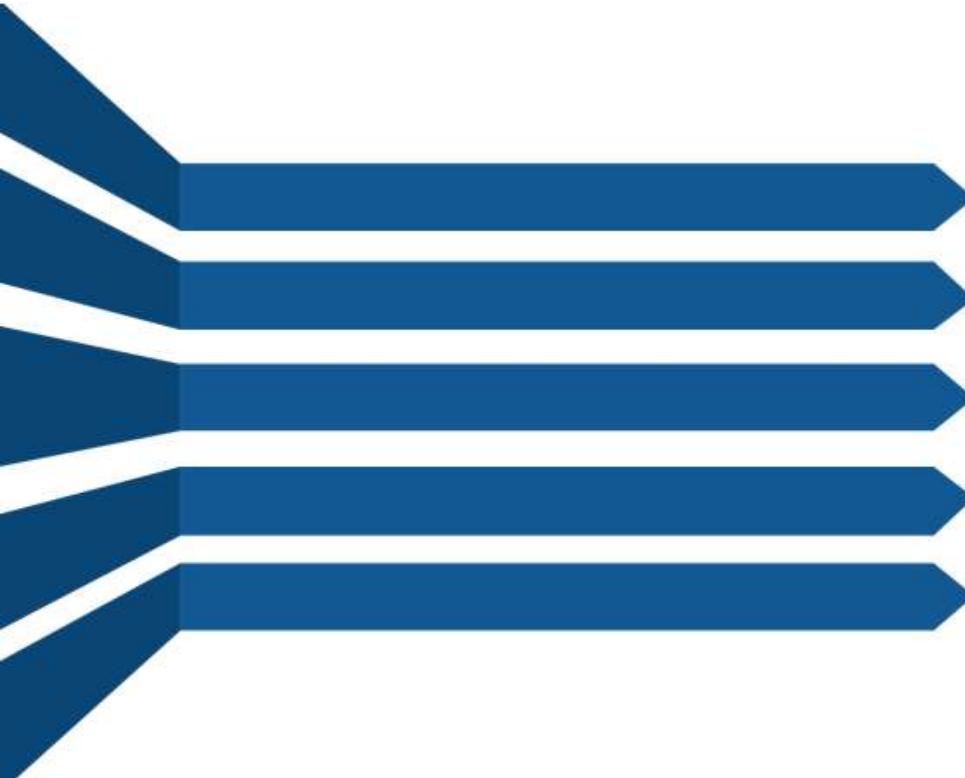
◆ 对比模型



S-GCN



	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 (ours)	1.83	2.02	1.23	1.84	2.53	2.83	1.00	1.65

- 
- 1 研究背景
 - 2 研究目标与技术路线
 - 3 研究内容与成果
 - 4 创新特色与应用前景



4 创新特色与应用前景

4.1 创新点

情绪诱导场景设计

- 通过**交通场景设计**诱导驾驶员愤怒、紧张情绪，提高了**驾驶实验过程的连续性和真实性**。

传统方案
游戏或视频诱导



优化方案
交通场景诱导



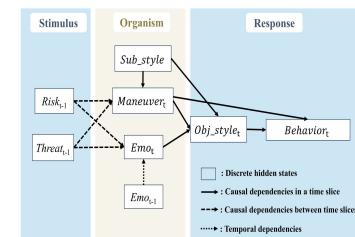
可作为其他类似实验的参考方法

情绪-驾驶行为因果推理

- 通过**贝叶斯网络因果模型**量化愤怒、惊恐异常情绪因素在强交互场景下对驾驶行为的影响机制，分析各个因素间的**因果关系**。推理得到表征情绪到驾驶行为到碰撞风险的关键因果链

传统方案
深度学习

优化方案
驾驶机理+
深度学习



使得深度学习的预测结果更具有可解释性

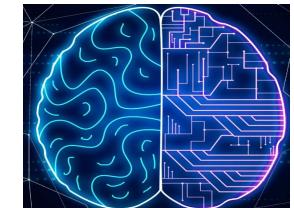
考虑情绪机制的轨迹预测模型

- 在AEB预测算法中嵌入了基于**SOR认知理论**的情绪影响机制。搭建**CPSOR-GCN模型**，预测本车的运动状态。

传统方案
物理运动特征



优化方案
基于**SOR**的动态认知特征



提高了强交互场景下的轨迹预测精度

问题回顾



本研究成果可以**联合情绪识别**的相关研究成果进一步完善车辆主动安全系统的设计，对提升驾驶安全性、优化车辆控制策略都有重要意义。



同济大学交通运输工程学院
COLLEGE OF TRANSPORTATION ENGINEERING
TONGJI UNIVERSITY

Thanks! Q&A

报 告 人：岳李圣飒 唐揽月

2 技术路线

前期驾驶模拟实验

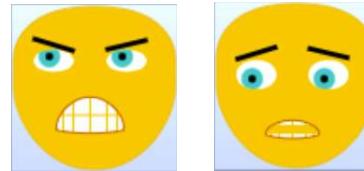


自主搭建实验平台

实验场景设计与构建



主观情绪状态记录



驾驶数据采集



情绪影响机制因果推理

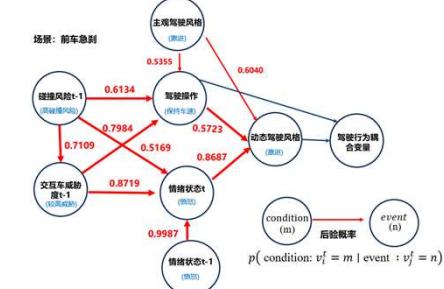


变量节点选取

最优结构标定

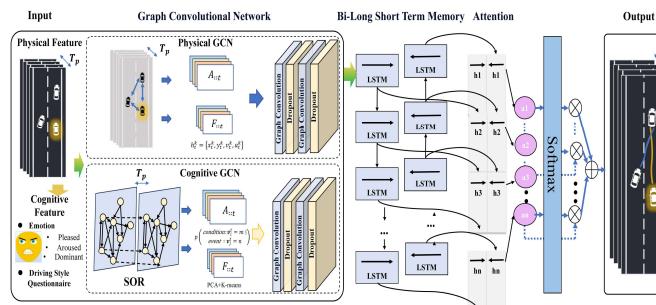
因果关系量化

→ 标定的
SOR认知框架



AEB优化应用

考虑情绪影响的,
基于SOR认知理论
的轨迹预测模型
CPSOR-GCN



消融实验

精度验证

