



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

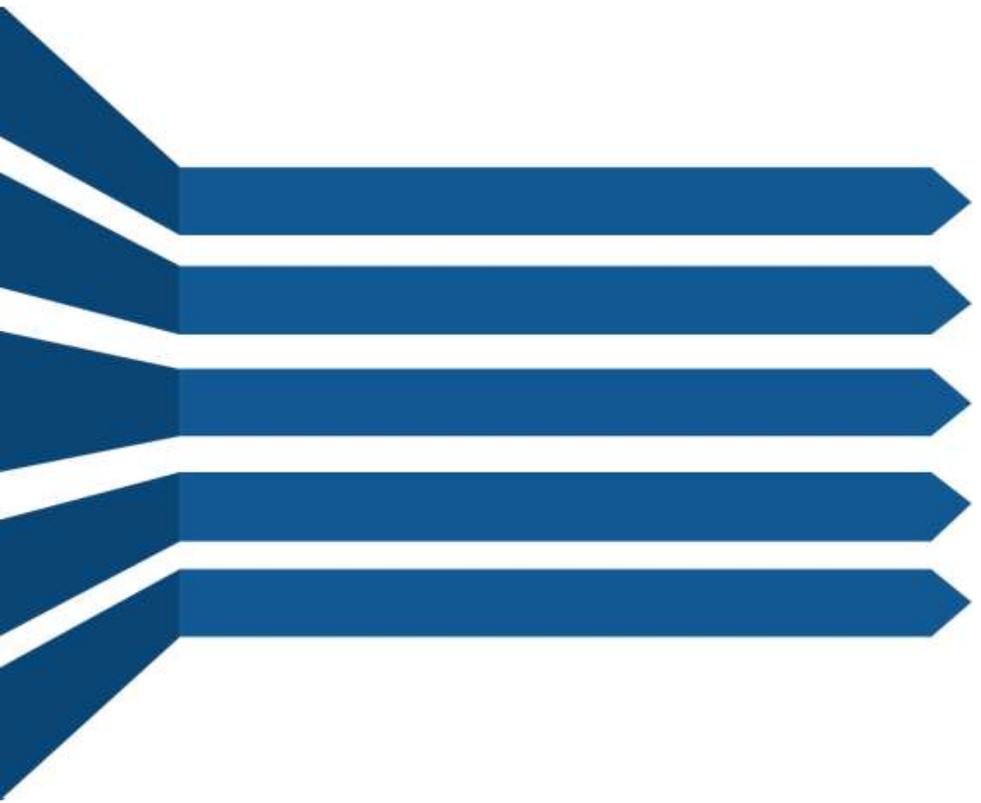
报告人：岳李圣飒 唐揽月

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



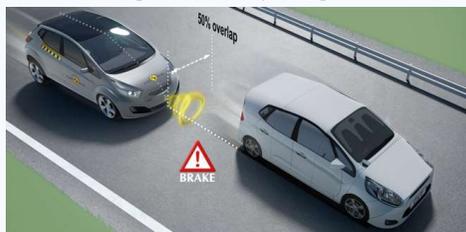
实际应用场景中，主动安全系统常常在强交互场景中触发

- 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仍误触发，几近造成事故。



驾驶员紧急执行换道操作，AEB误触发，导致急转急刹危险动作。

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

主动安全系统原理



- 基于驾驶员正常状态来预测的运动状态和碰撞风险，没有考虑异常状态的影响，所以可能存在运动状态预测不精准的问题

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

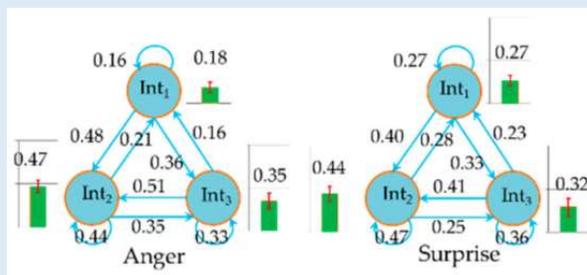
情绪对驾驶行为的相关性分析



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.)

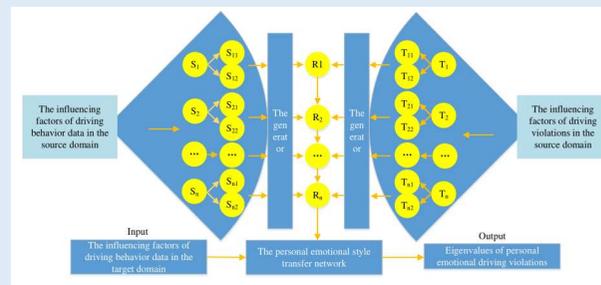
情绪与驾驶意图的概率分析



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

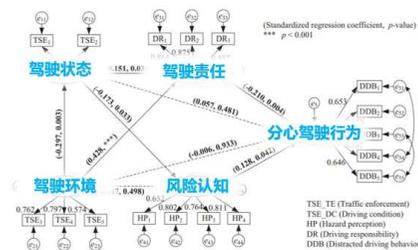


反应

- 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-反应理论，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



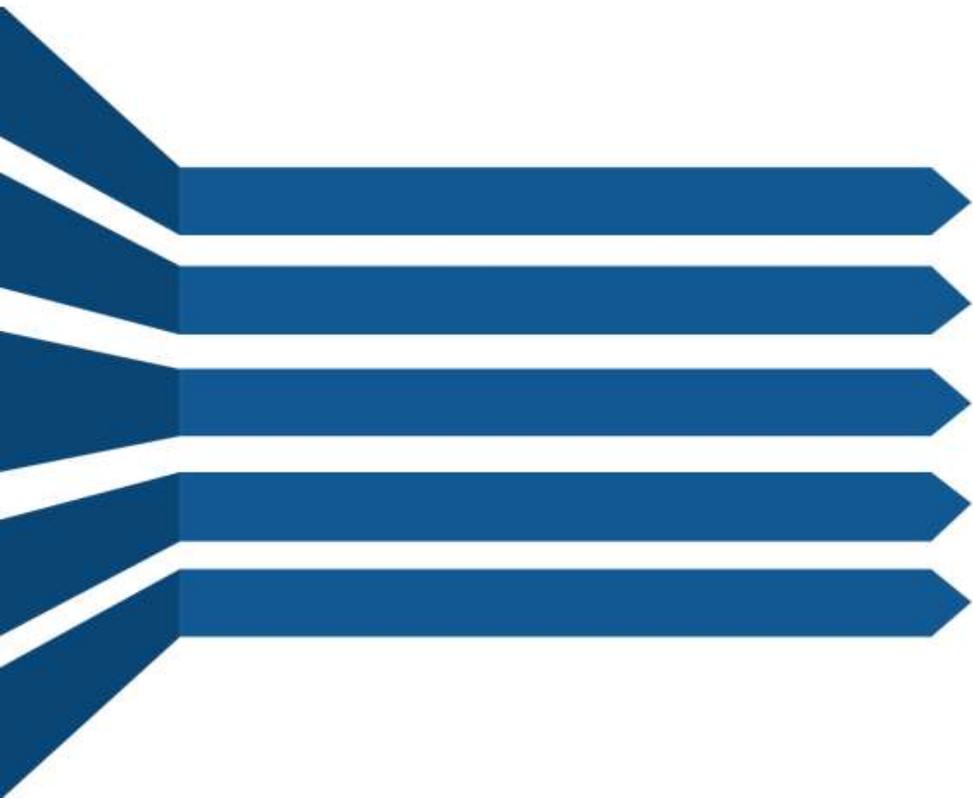
(Zhong et al, 2014)(Changxu, W et al, 2004)

危险行为: 5+
 其他消费行为: 20+
 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

实验数据采集

内容一
不同情绪下强交互驾驶
模拟实验

- 驾驶模拟平台搭建
- 情绪诱导场景设计
- 强交互场景设计

理论分析

内容二
基于SOR认知理论的情绪
影响机制的因果推理

- 不同情绪下驾驶行为差异
- 从情绪到到驾驶行关键因果链

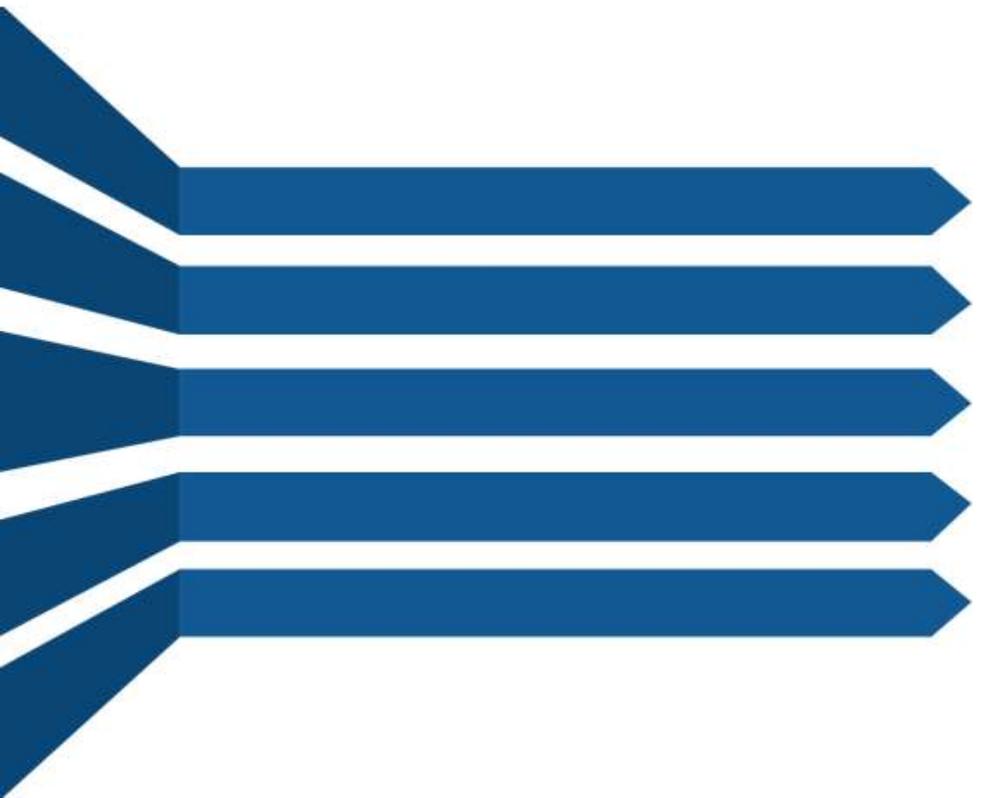
应用研究

内容三
基于SOR认知理论的轨迹预测模型

- 搭建认知-物理的双层图模型结构提取动态特征
- 考虑情绪影响，基于SOR认知理论的轨迹预测模型

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

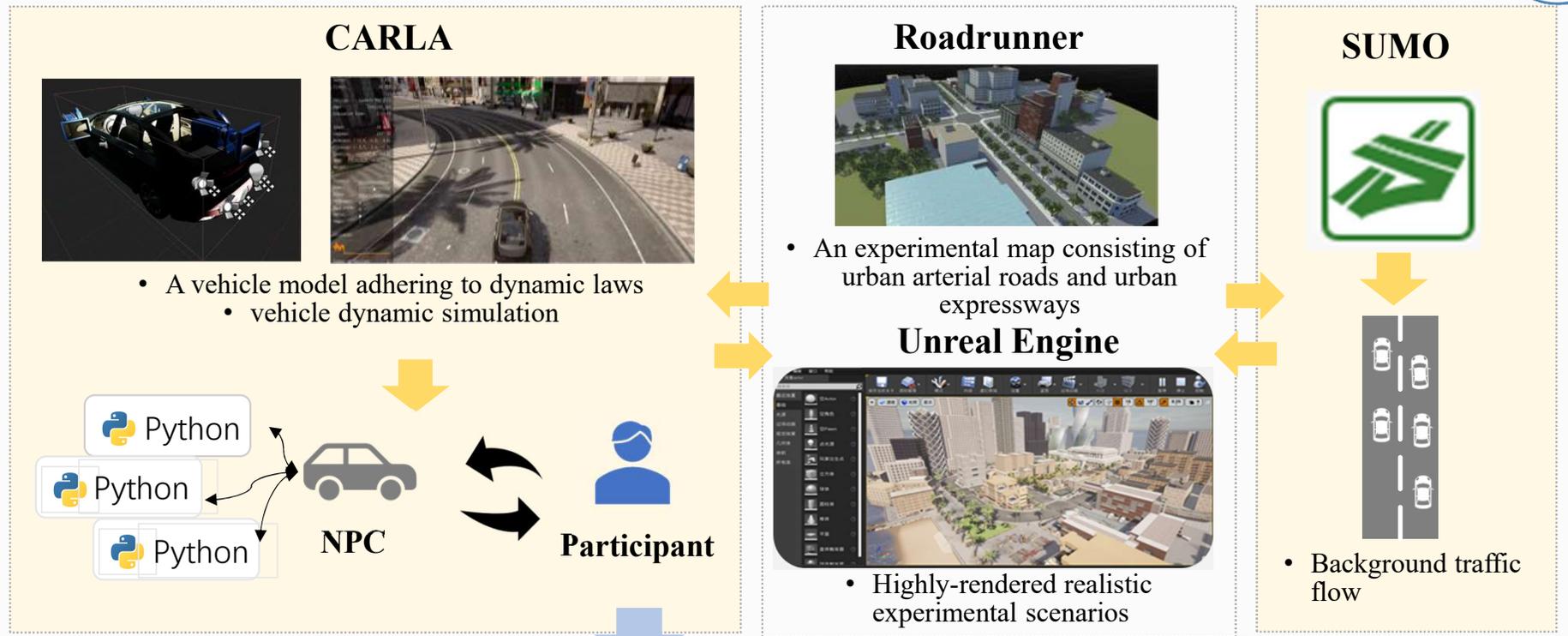
4 创新特色与应用前景

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



Software Platform



Hardware Equipment

A virtual cockpit with triple screens surround view



Data Collection



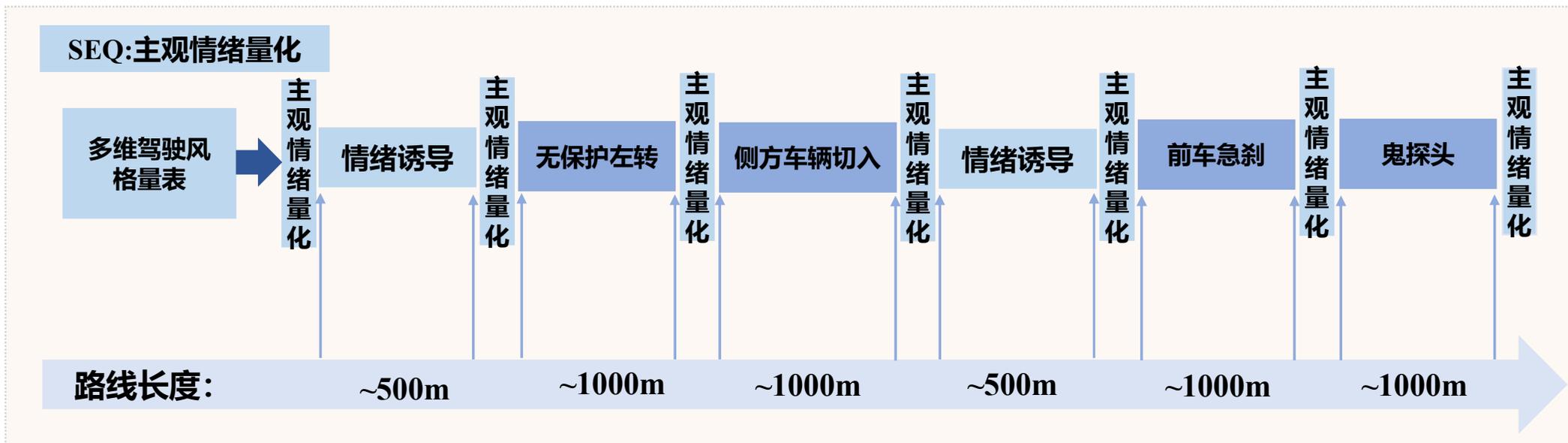


3 研究内容与成果

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)

情绪诱导 + 驾驶场景 → 26名驾驶员参与实验 → 拉丁方顺序实验



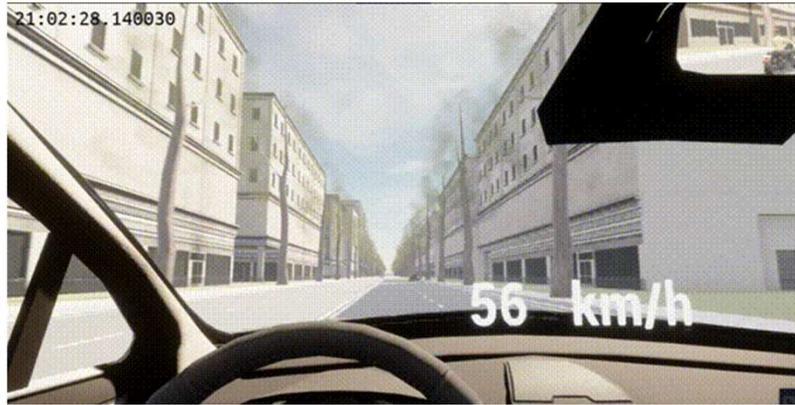
3 研究内容与成果

3.1 实验开展——情绪诱导场景搭建

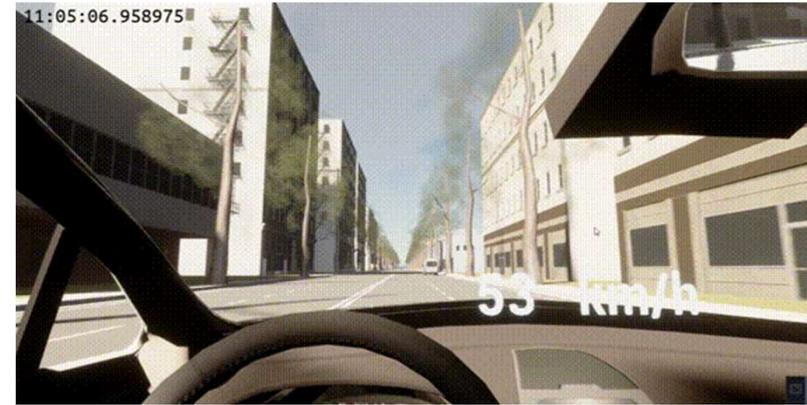
场景设计依据:

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



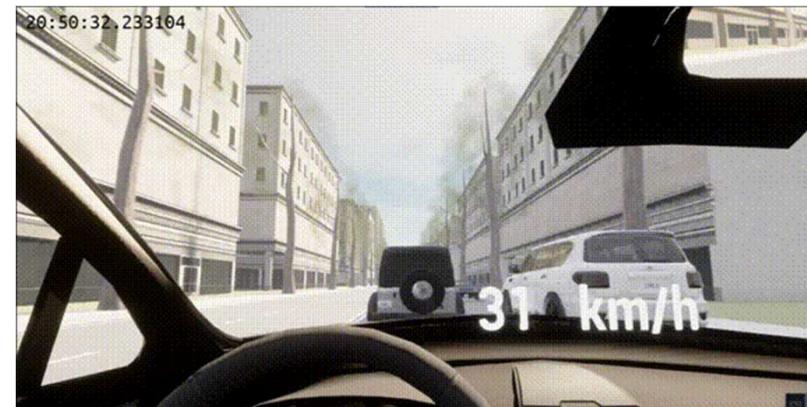
- 惊恐诱导2: 行人碰撞



- 愤怒诱导1: 对向车远光灯挑衅



- 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: α 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

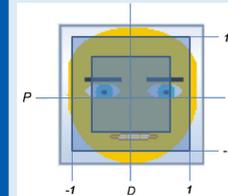
操作数据与车辆数据

- 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 

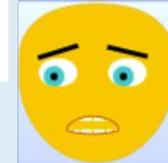
主观情绪采集

Affect Button情绪量表

映射
[P A D] → [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

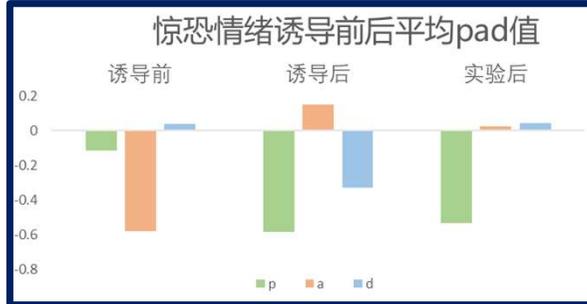
(Joost Broekens, The AffectButton: a Digital Self-report Tool for Emotion. International Journal of Human-Computer Studies, 2013.)



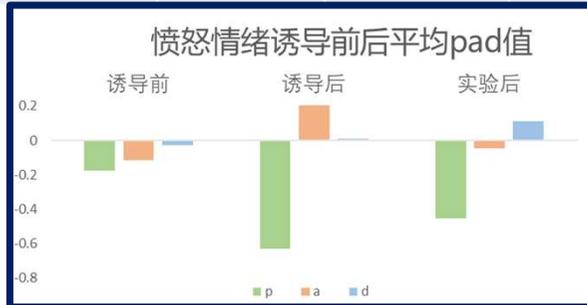
3 研究内容与成果

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



重复测量方差分析	Pleasant	Aroused	Dominant
F	19.052	11.804	8.047
P-value	<0.001	<0.001	<0.001



重复测量方差分析	Pleasant	Aroused	Dominant
F	10.169	7.640	0.573

● 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

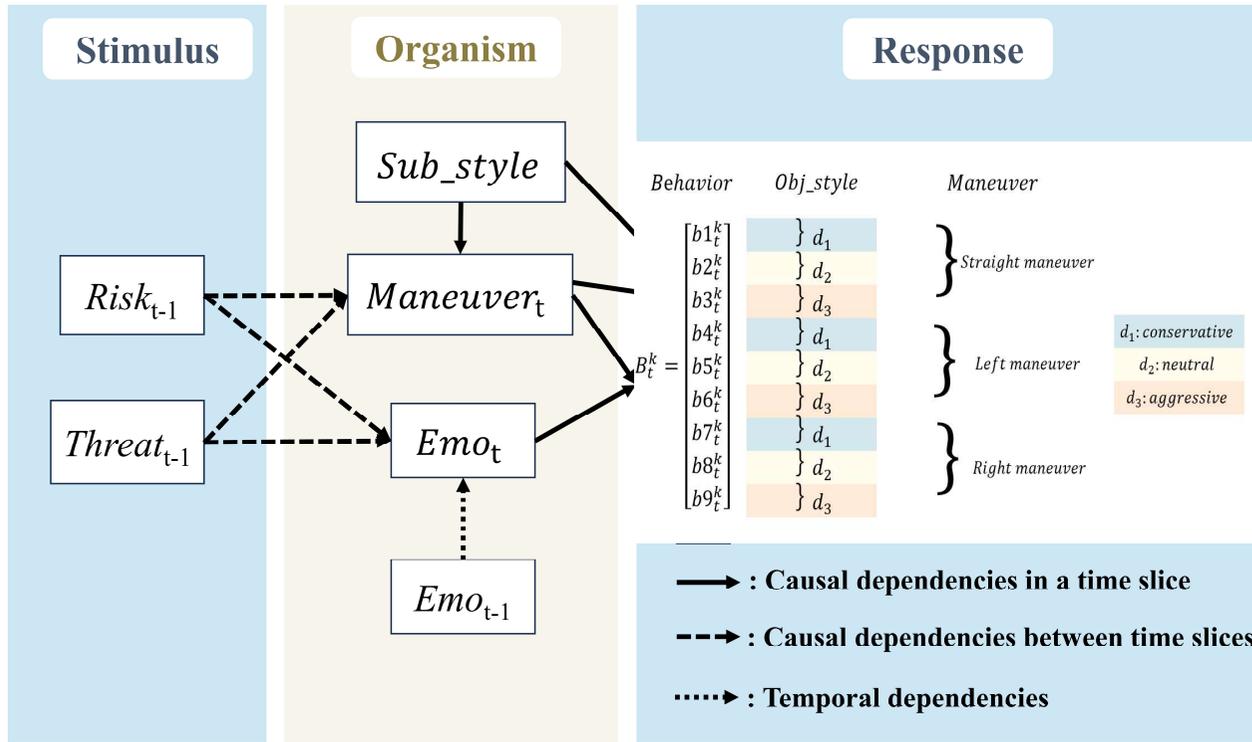


3 研究内容与成果

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

SOR认知理论

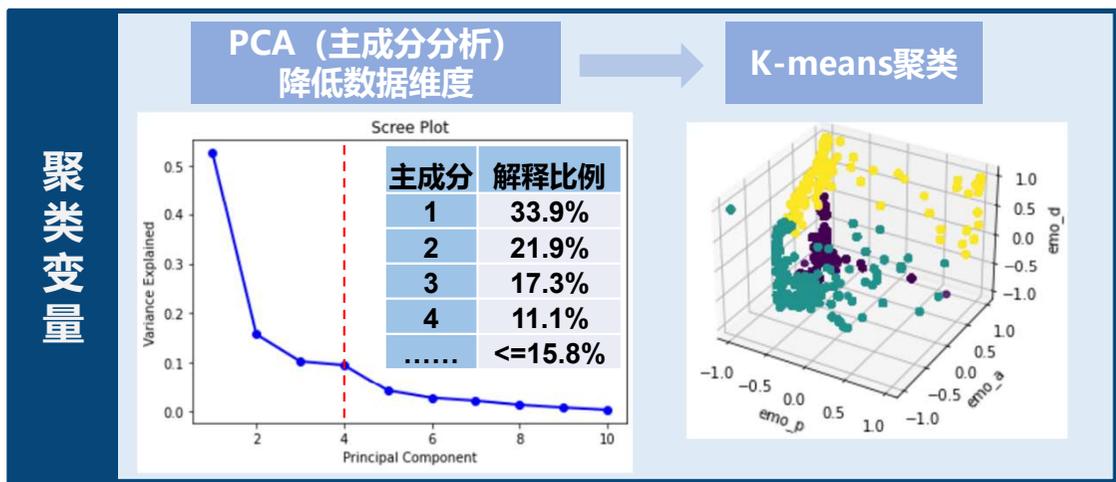
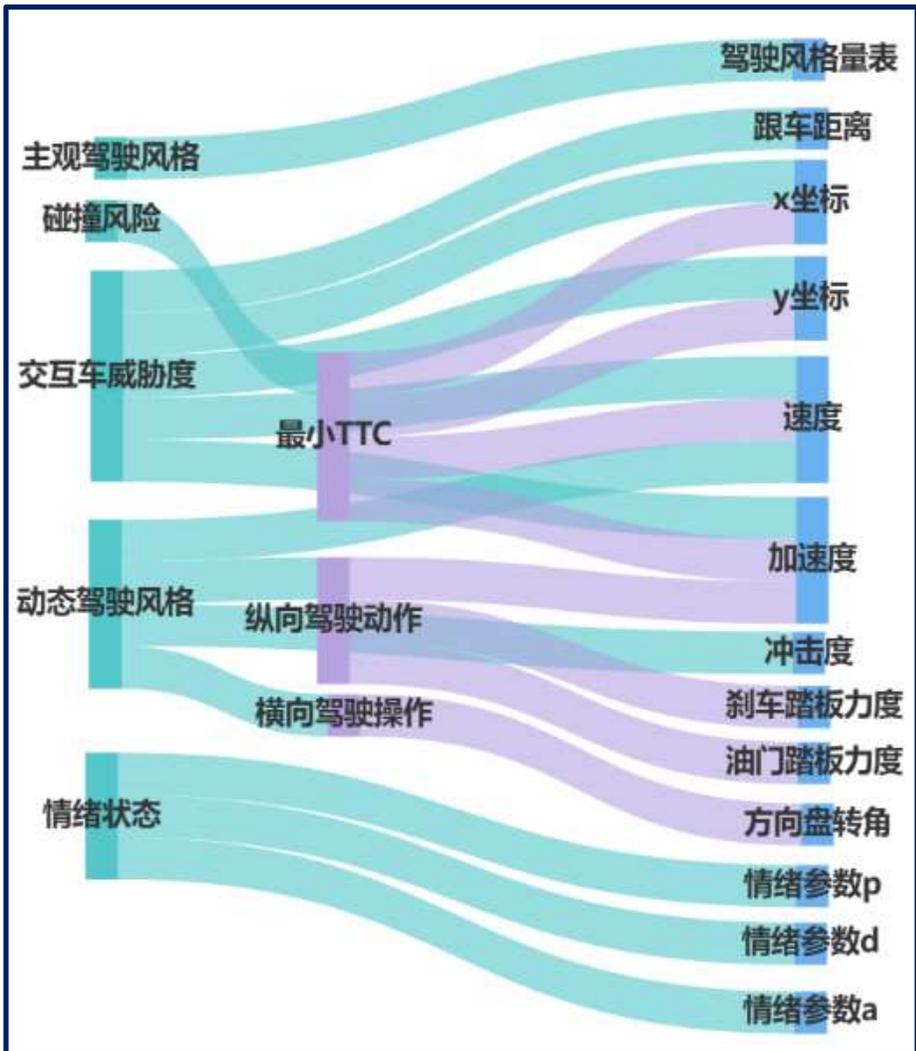


认知框架标定



3 研究内容与成果

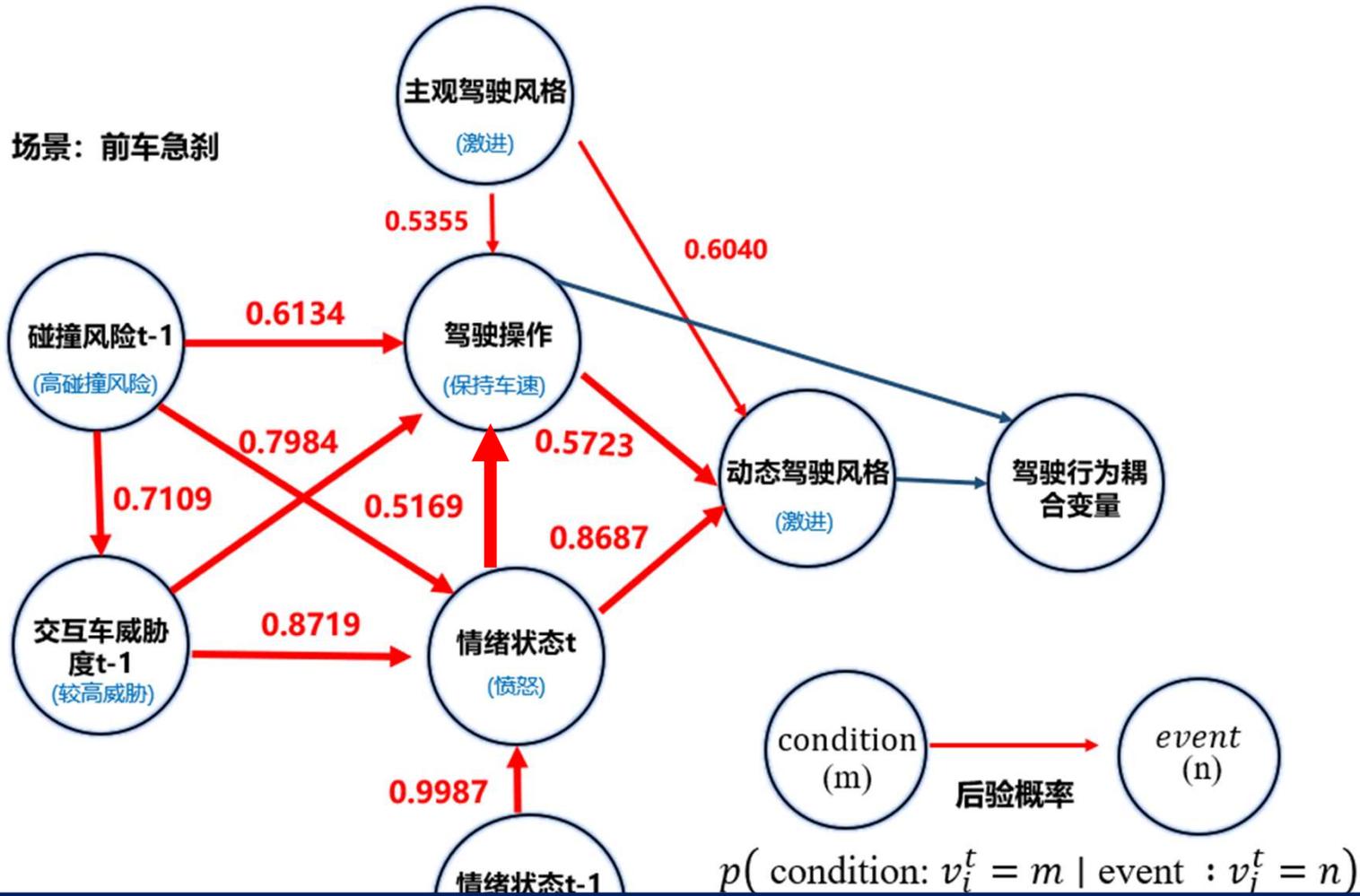
3.2 情绪影响机制解析——贝叶斯网络数据离散化处理





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}

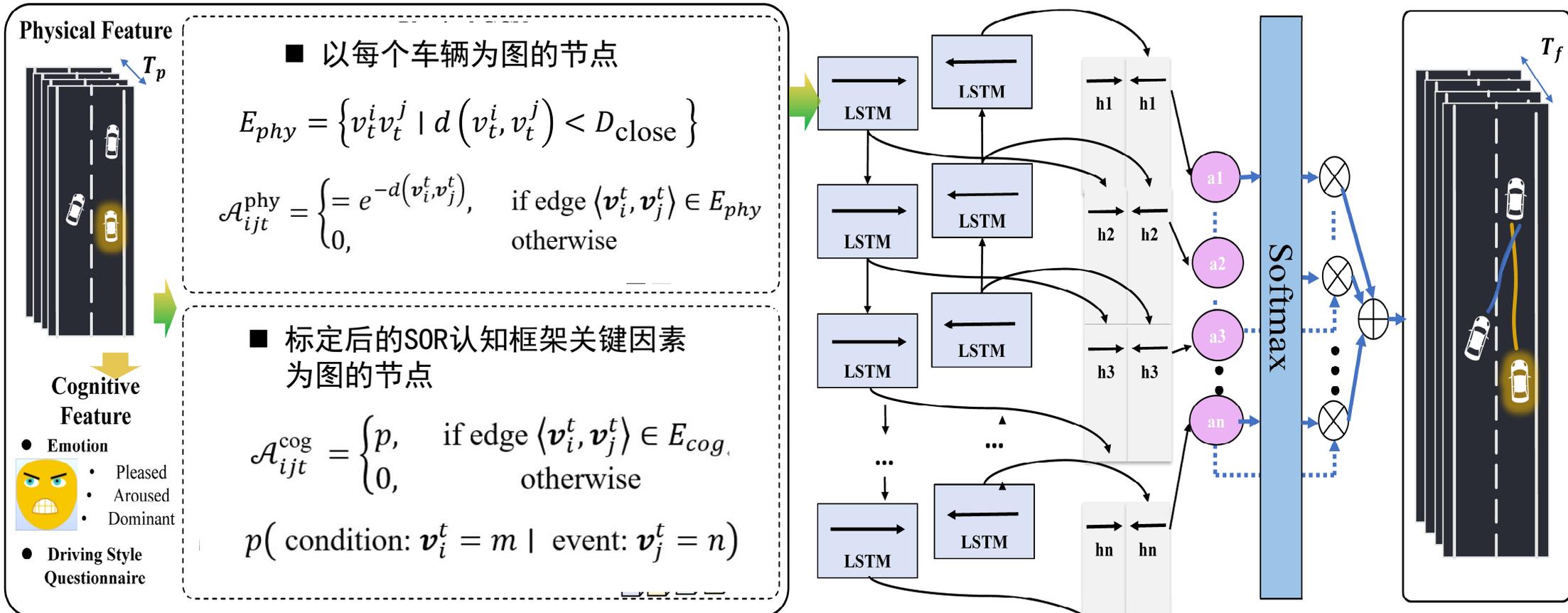
3 研究内容与成果 3.3 轨迹预测模型——Cognitive-Physical-SOR-GCN

Input

Graph Convolutional Network

Bi-Long Short Term Memory Attention

Output



考虑认知-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

15%测试集



驾驶实验数据

Sampling

历史3s的轨迹预测未来2秒 (0.04s/step)

原始轨迹



Input

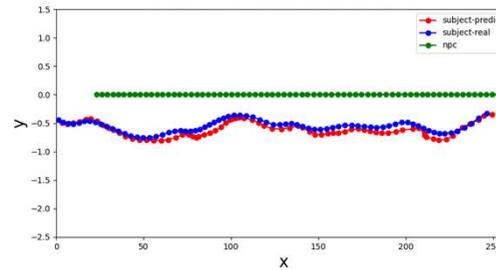


Output



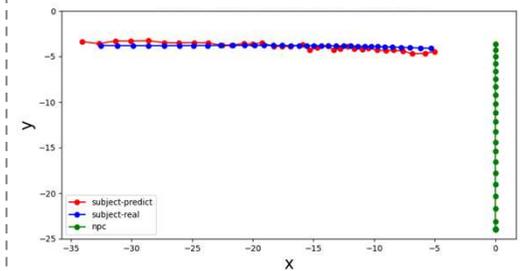
前车急刹

Trajectory Plot



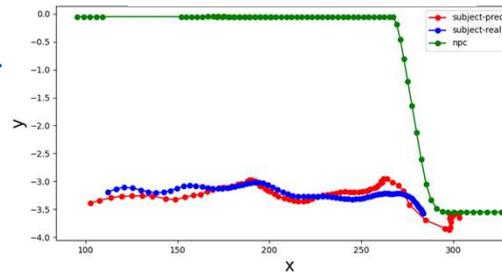
鬼探头

Trajectory Plot



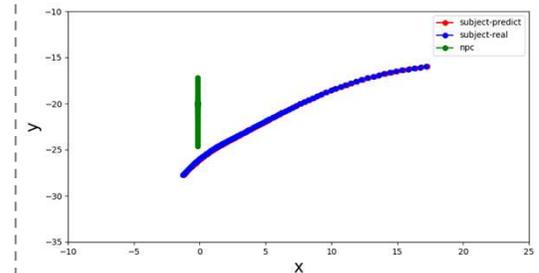
侧方车辆切入

Trajectory Plot

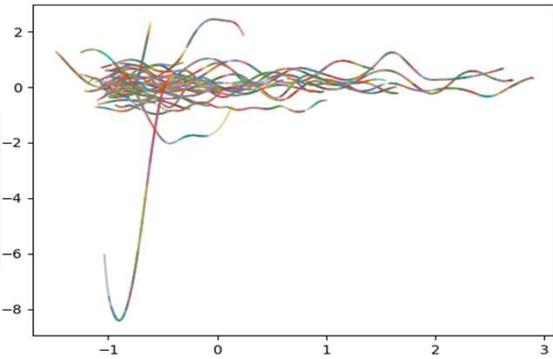


无保护左转

Trajectory Plot



前车急刹场景
主车轨迹
samples



已训练的模型



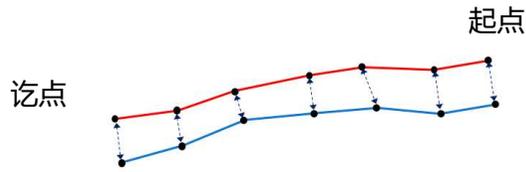


3 研究内容与成果

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



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

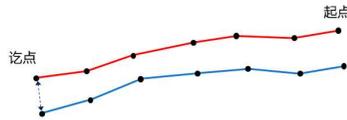
2. MAE: 均方绝对误差

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

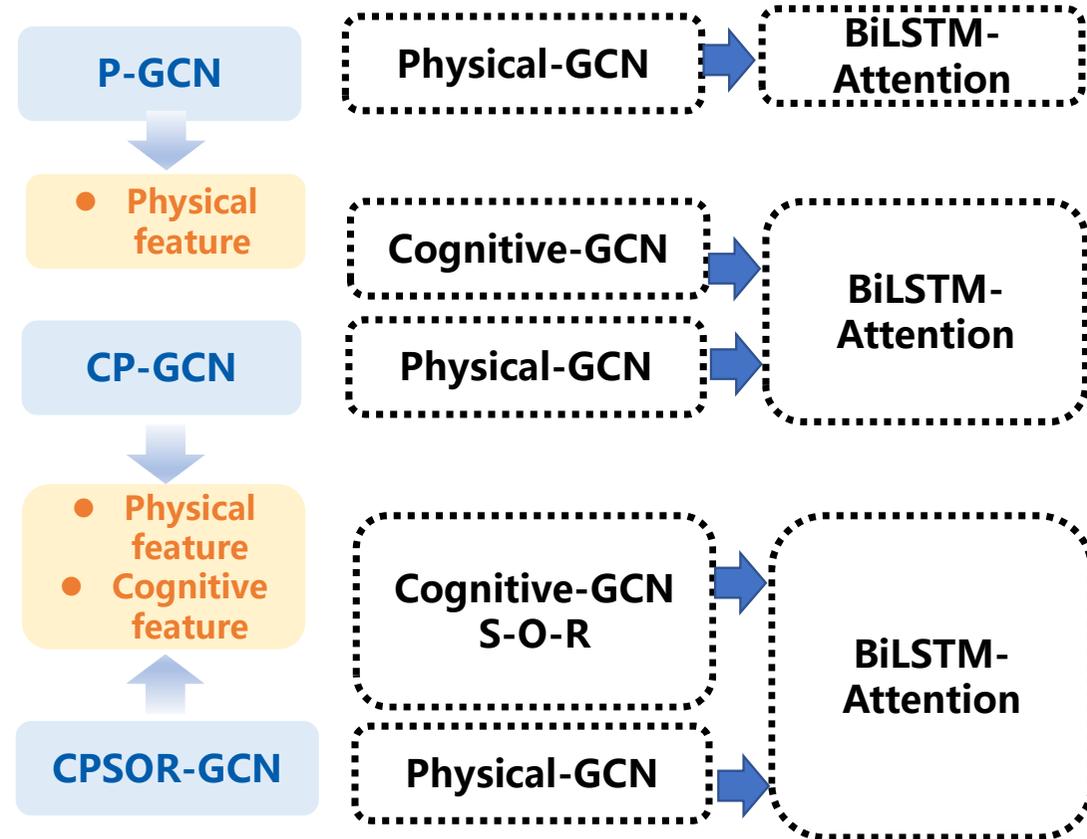
3. ADE: 平均距离误差

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

4. FDE: 最终距离误差



$$FDE = RMSE^T$$





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



电控头-RMSE

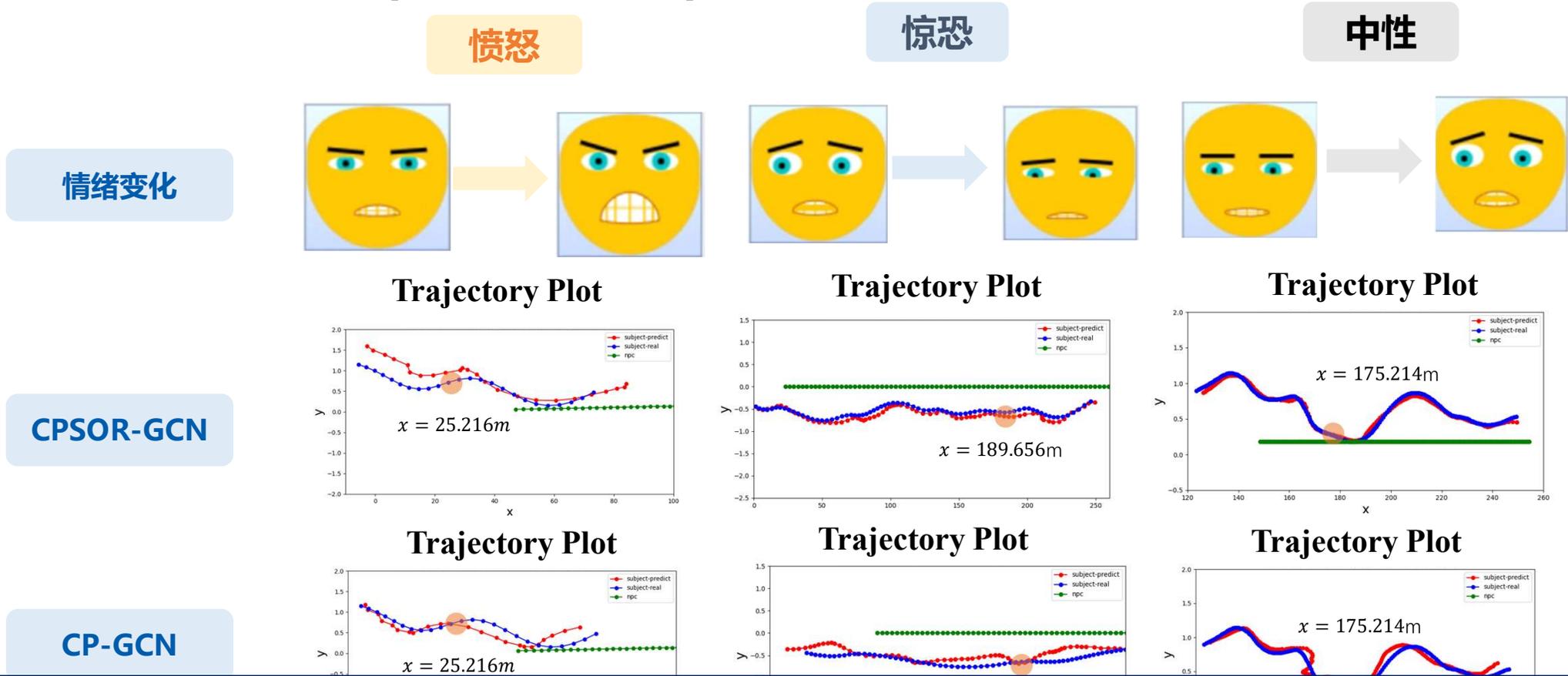


无保护左转-RMSE

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)



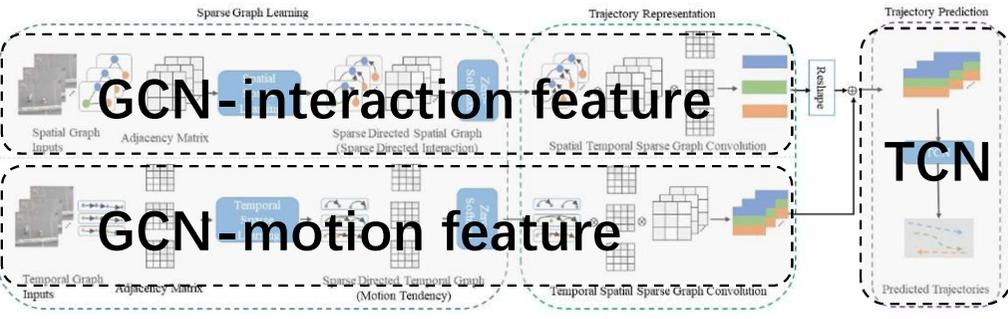
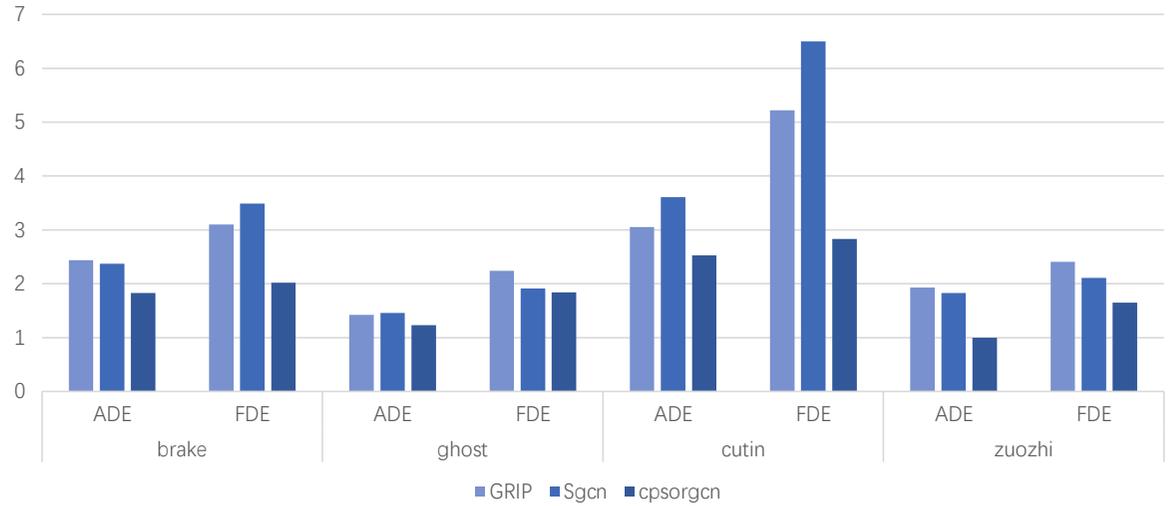
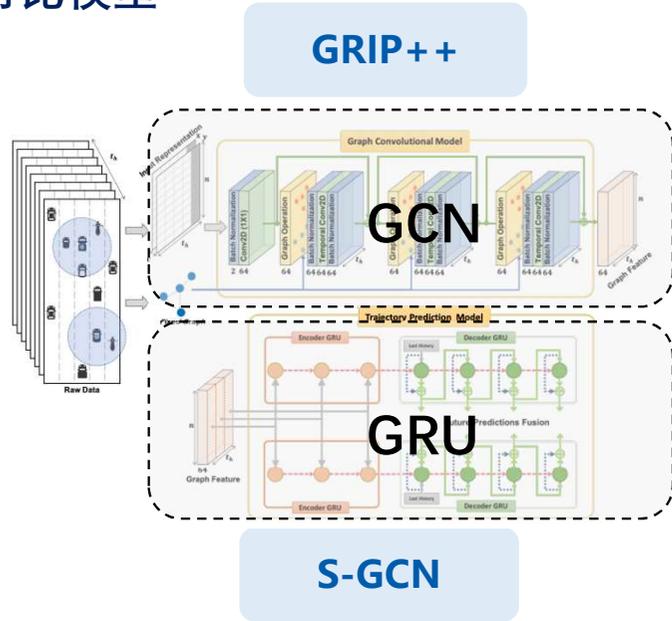
CPSOR-GCN模型在强交互场景下，情绪突变之后对于轨迹有较好的预测精度



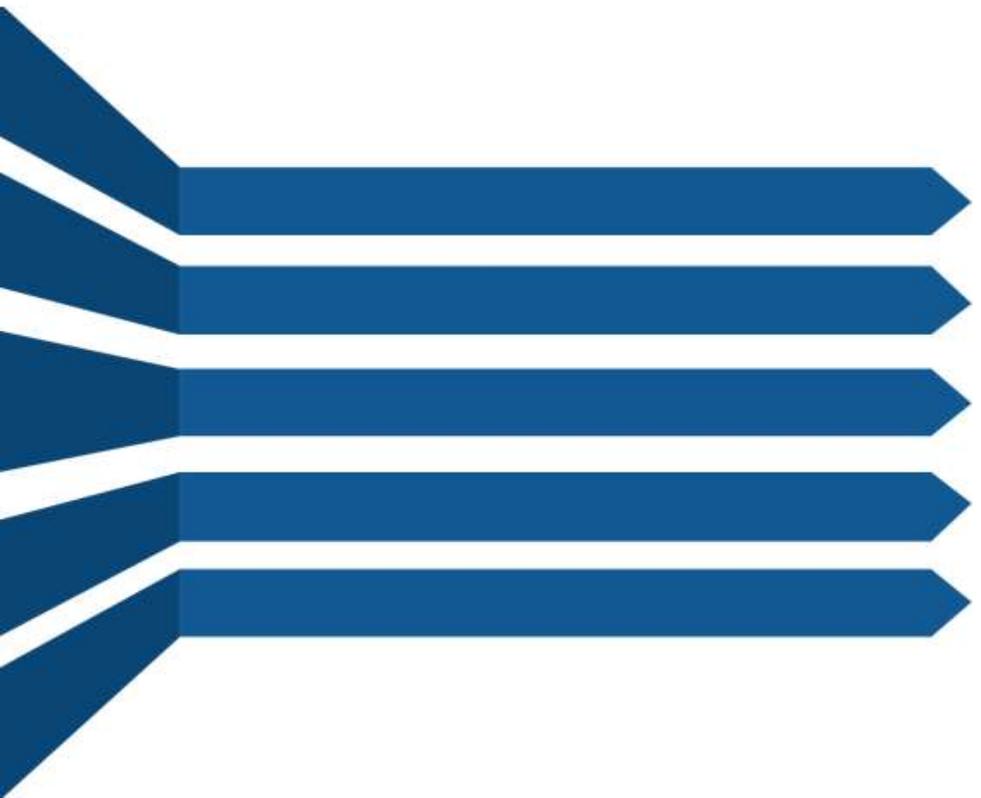
3 研究内容与成果

3.4 轨迹预测模型——预测结果

◆对比模型



	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



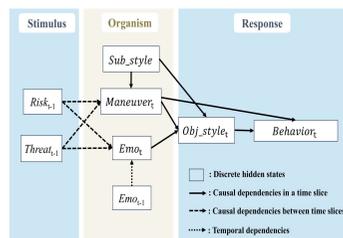
可作为其他类似实验的参考方法

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**的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	<p>Environment The behavior of Interactive Vehicles Stimulus</p> <p>Attitude Towards Risk (Safety) Emotion (anger, sad, happy) Organism</p> <p>Driving Behavior Response</p>	<p>变量节点选取</p> <p>最优结构标定</p> <p>因果关系量化</p>	<p>标定的SOR认知框架</p> <p>场景：前车急刹</p> <p>节点：主观驾驶风险、驾驶操作、动态驾驶风险、驾驶行为耦合变量、情绪状态-1、情绪状态、交互车威胁、碰撞风险-1</p> <p>权重：0.5355, 0.6134, 0.7984, 0.5723, 0.6040, 0.7109, 0.5169, 0.8687, 0.8719, 0.9987</p> <p>公式：p(condition: v_f = m event: v_f = n)</p>
----------------------------	--	---	---

AEB 优化 应用	<p>考虑情绪影响的，基于SOR认知理论的轨迹预测模型 CPSOR-GCN</p> <p>Input: Physical Feature, Cognitive Feature, Driving Style Questionnaire</p> <p>Graph Convolutional Network: Physical GCN, Cognitive GCN</p> <p>Bi-Long Short Term Memory Attention</p> <p>Output: Trajectory Prediction</p>	<p>消融实验</p> <p>精度验证</p> <table border="1"> <caption>精度验证数据 (Estimated)</caption> <thead> <tr> <th>Scenario</th> <th>Model</th> <th>RMSE</th> <th>MAE</th> <th>ADE</th> <th>FDE</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="3">3s-1s</td> <td>P-GCN</td> <td>~2.5</td> <td>~1.5</td> <td>~1.5</td> <td>~1.5</td> </tr> <tr> <td>CP-GCN</td> <td>~2.0</td> <td>~1.2</td> <td>~1.2</td> <td>~1.2</td> </tr> <tr> <td>CPSOR-GCN</td> <td>~1.8</td> <td>~1.0</td> <td>~1.0</td> <td>~1.0</td> </tr> <tr> <td rowspan="3">3s-2s</td> <td>P-GCN</td> <td>~3.0</td> <td>~2.0</td> <td>~2.0</td> <td>~2.0</td> </tr> <tr> <td>CP-GCN</td> <td>~2.5</td> <td>~1.5</td> <td>~1.5</td> <td>~1.5</td> </tr> <tr> <td>CPSOR-GCN</td> <td>~2.2</td> <td>~1.3</td> <td>~1.3</td> <td>~1.3</td> </tr> <tr> <td rowspan="3">3s-3s</td> <td>P-GCN</td> <td>~4.0</td> <td>~2.5</td> <td>~2.5</td> <td>~2.5</td> </tr> <tr> <td>CP-GCN</td> <td>~3.0</td> <td>~1.8</td> <td>~1.8</td> <td>~1.8</td> </tr> <tr> <td>CPSOR-GCN</td> <td>~2.8</td> <td>~1.6</td> <td>~1.6</td> <td>~1.6</td> </tr> </tbody> </table>	Scenario	Model	RMSE	MAE	ADE	FDE	3s-1s	P-GCN	~2.5	~1.5	~1.5	~1.5	CP-GCN	~2.0	~1.2	~1.2	~1.2	CPSOR-GCN	~1.8	~1.0	~1.0	~1.0	3s-2s	P-GCN	~3.0	~2.0	~2.0	~2.0	CP-GCN	~2.5	~1.5	~1.5	~1.5	CPSOR-GCN	~2.2	~1.3	~1.3	~1.3	3s-3s	P-GCN	~4.0	~2.5	~2.5	~2.5	CP-GCN	~3.0	~1.8	~1.8	~1.8	CPSOR-GCN	~2.8	~1.6	~1.6	~1.6
	Scenario	Model	RMSE	MAE	ADE	FDE																																																		
3s-1s	P-GCN	~2.5	~1.5	~1.5	~1.5																																																			
	CP-GCN	~2.0	~1.2	~1.2	~1.2																																																			
	CPSOR-GCN	~1.8	~1.0	~1.0	~1.0																																																			
3s-2s	P-GCN	~3.0	~2.0	~2.0	~2.0																																																			
	CP-GCN	~2.5	~1.5	~1.5	~1.5																																																			
	CPSOR-GCN	~2.2	~1.3	~1.3	~1.3																																																			
3s-3s	P-GCN	~4.0	~2.5	~2.5	~2.5																																																			
	CP-GCN	~3.0	~1.8	~1.8	~1.8																																																			
	CPSOR-GCN	~2.8	~1.6	~1.6	~1.6																																																			