

博士学位论文

无人驾驶智能行为信息加工及典型工况测评研究

高薪

2012 年 12 月

中图分类号: U491

UDC 分类号: 629

无人驾驶智能行为信息加工及典型工况测评研究

作者姓名	<u>高 薪</u>
学院名称	<u>机械与车辆学院</u>
指导教师	<u>高 利 教授</u>
答辩委员会主席	<u>王云鹏 教授</u>
申请学位	<u>工学博士</u>
学科专业	<u>载运工具运用工程</u>
学位授予单位	<u>北京理工大学</u>
论文答辩日期	<u>2012 年 12 月 19 日</u>

**Research on Information Processing and Typical
Working Condition Evaluation of Intelligent Behaviors
for Unmanned Ground Vehicles**

Candidate Name:	<u>Gao Xin</u>
School or Department:	<u>School of Mechanical Engineering</u>
Faculty Mentor:	<u>Prof. Gao Li</u>
Chair of Thesis Committee:	<u>Prof. Wang Yunpeng</u>
Degree Applied:	<u>Doctor of Engineering</u>
Major:	<u>Vehicle Operation Engineering</u>
Degree by:	<u>Beijing Institute of Technology</u>
The Date of Defense:	<u>2012.12.19</u>

无人驾驶智能行为信息加工及典型工况测评研究

北京理工大学

研究成果声明

本人郑重声明：所提交的学位论文是我本人在指导教师的指导下进行的研究工作获得的研究成果。尽我所知，文中除特别标注和致谢的地方外，学位论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得北京理工大学或其它教育机构的学位或证书所使用过的材料。与我一同工作的合作者对此研究工作所做的任何贡献均已在学位论文中作了明确的说明并表示了谢意。

特此申明。

签 名： 日期：

关于学位论文使用权的说明

本人完全了解北京理工大学有关保管、使用学位论文的规定，其中包括：①学校有权保管、并向有关部门送交学位论文的原件与复印件；②学校可以采用影印、缩印或其它复制手段复制并保存学位论文；③学校可允许学位论文被查阅或借阅；④学校可以学术交流为目的，复制赠送和交换学位论文；⑤学校可以公布学位论文的全部或部分内容（保密学位论文在解密后遵守此规定）。

签 名： 日期：
导师签名： 日期：

摘要

计算机对于图像、语音和文本（语言）信息的处理与理解能力远逊于人类，借鉴人类的认知机理，提出和建立新的计算模型和方法，可推动我国无人驾驶领域的快速发展。依托国家自然科学基金“视听觉信息的认知计算”重大研究计划重点支持项目“无人驾驶车辆智能行为综合测试环境设计与测评体系研究”和培育项目“无人驾驶车辆认知能力测试及验证环境设计与实现”，基于认知心理学解析有人驾驶行为和无人驾驶智能行为的信息加工机理，以刺激感知——判断决策——刺激解释为主线逐阶段展开研究，通过有人驾驶行为机理探究和评价无人驾驶智能行为机制，针对通过交叉口、直线跟驰和避障三种典型工况中的驾驶行为，建立基于图形熵的城市交通环境复杂度计算模型，提出无人驾驶智能行为刺激感知工作机制及多复杂度测试环境；基于熵值和 ID3 决策树建立有人驾驶行为判断决策模型，揭示无人驾驶智能行为判断决策工作机制；对比剖析有人驾驶行为和无人驾驶智能行为的刺激解释，利用基于三角模糊数的多级模糊综合评判和正三角形法，评价无人驾驶智能行为，基于信息加工机理和 AHP 熵权法，构建无人驾驶车辆智能行为测评指标体系和评分体系，为中国智能车“未来挑战赛”提供测试环境、测试标准和评价方法，为无人驾驶车辆研发提出新思想和新方法。

深入研究有人驾驶行为与无人驾驶智能行为信息加工机理，对比分析有人驾驶与无人驾驶在信息加工三个阶段中的优缺点，通过有人驾驶行为信息加工系统，建立无人驾驶智能行为信息加工系统，分别结合知觉建构学说和原型模式识别理论补充论述无人驾驶智能行为信息加工模型，基于驾驶行为信息加工，将刺激库与知识库划分为 12 类驾驶行为对应的环境刺激和知识经验，选取通过交叉口、直线跟驰和避障三种典型工况中的驾驶行为进行信息加工研究。

通过城市交通环境刺激库构成，从静态与动态两方面建立基于图形熵的城市交通环境复杂度计算模型，将不同刺激组合的城市交通环境复杂程度数值化；基于 NASA-TLX 量表，对驾驶人脑力负荷与城市交通环境复杂度进行影响分析，并以环境复杂度为输入，以感知强度为输出，建立有人驾驶行为刺激感知模型，从而确定无人驾驶智能行为感知强度的计算方法，提出传感设备应用配置及安装位置；利用交通环境复杂度计算模型，确定赛程考点复杂度分布原则，提出中国智能车“未来

挑战”比赛的多复杂度测试环境设计方案。

根据驾驶行为知识库表示方法及获取途径,基于神经元动力学建立有人驾驶行为判断决策微观模型,从模式识别角度揭示了人脑决策过程的动力学规律;依据试验数据,针对冲突车横向右转时通过交叉口、前导车匀速-加速-减速-停车时直线跟驰、静止车停止于同车道时避障的三种典型工况中的驾驶行为,定量解析踏板行程、车速和偏距的效应特征,建立车速与交通环境复杂度的函数关系,利用灰关联熵和粗糙熵理论,进行属性影响分析和属性约简,采用改进的 ID3 决策树算法,建立上述三种有人驾驶行为判断决策宏观模型,通过试验数据验证模型有效性,进而提出无人驾驶智能行为判断决策工作机制,为中国智能车“未来挑战”比赛提供部分测试标准,为无人驾驶车辆研发提供新思路。

根据有人驾驶行为判断决策模型,依次针对冲突车横向右转时通过交叉口、前导车匀速-加速-减速-停车时直线跟驰、静止车停止于同车道时避障的三种复杂度不同的驾驶行为,从轨迹和决策两方面对比剖析有人与无人、无人与无人的驾驶行为刺激解释特性,利用三角模糊数确定隶属函数,建立参赛车辆的智能行为刺激解释的多级模糊综合评判模型,并采用正三角形法解析各参赛车辆的单项智能行为能力。

依据信息加工系统三阶段的分析和研究,利用信息加工机理及城市交通环境复杂度计算模型,构建无人驾驶车辆智能行为测评指标体系,分别确定贯穿信息加工三阶段的一级指标:刺激感知指标、判断决策指标、刺激解释指标和信号传输指标,利用 AHP 熵权法确定各指标权重,构建无人驾驶车辆智能行为评分体系,为中国智能车“未来挑战”比赛提供相对完备的测评指标体系和评分体系。

关键词: 无人驾驶车辆; 智能行为; 信息加工; 复杂度; 熵

Abstract

Computer has poorer abilities in processing and understanding information like images, voice and text (language) than human, so based on human cognitive mechanism, proposing and establishing new computational models and methods, can absolutely improve computer's understanding ability and processing efficiency, also can powerfully drive rapid development of unmanned ground research in China. Depended on “Research on Comprehensive Test Environment Design and Evaluation Architecture of Intelligent Behavior for Unmanned Ground Vehicles” supported by National Natural Science Foundation of China, information processing mechanism on manned and unmanned driving behaviors were deeply analyzed, and according to information processing system “stimulus perceiving-judging and deciding-stimulus performing”, research had been carried out by stages, exploring and evaluating intelligent driving behaviors of unmanned ground vehicles by means of manned driving mechanism, could provide test environment, test standards and evaluation system for “Future Challenge” of China. Relying on research status and development trends all over the world, manned and unmanned driving behavior information processing mechanisms were reviewed accurately. First, in research on stimulus perceiving stage of manned and unmanned driving behaviors, multi-complexities test environments were designed; second, in judging and decision-making stage of manned and unmanned driving behaviors, decision-making models were quantitatively analyzed on intersection behavior, car-following behavior and obstacle-avoiding behavior, after which judging and decision-making mechanism of unmanned ground vehicles were put forward efficiently; third, after research on stimulus performing stage of unmanned ground vehicles intelligent driving behaviors was finished, evaluation system of intelligent driving behaviors on unmanned ground vehicles were successfully structured, in order to assessing intelligent behavior abilities of unmanned ground vehicles effectively.

Information processing mechanism on manned and unmanned driving behaviors was studied, and characteristics are compared and parsed through “stimulus perceiving-judging and deciding-stimulus performing”. Information processing model of unmanned ground vehicles was also established based on construction doctrine, by

blending the old knowledge in the memory, and getting perceived stimulus and existed knowledge and experiences into repeated assuming, testing until successfully validating some hypothesis, and the optimal stimulus performance was finally output. Based on prototype pattern recognition theory information processing model of intelligent behaviors for unmanned ground vehicles was set up, which could make new unfamiliar stimuli similarly analyzed, confirmed and identified, so as to get approximate match with a prototype model.

According to composition and classification of urban traffic environment, urban traffic environment complexity calculation model based on graphics entropy was built in both static and dynamic factors, complexity degrees of different stimulus combinations was quantized; impact analysis on both drivers' mental workload and the complexity of urban traffic environment were carried out on basis of NASA-TLX, and drivers' stimulus perceiving model was established considering environment complexity as independent variable, and perceiving intensity as dependent variable, which proposes perceiving intensity calculations for intelligent behaviors of unmanned ground vehicles, and also application configuration and installation location for in-car sensors; multi-complexities test environmental design for unmanned ground vehicles contributed to complexity calculation model, and also the complexity distribution principle of the test.

Driving behavior knowledge system contained 12 types depending on different vehicle status and driving tasks; drivers' decision pattern recognition model was established based on neuron dynamics, which revealed human brain kinetics regular pattern of the decision-making process microscopically; in accordance with experimental data, quantitative analysis on features of intersection, car-following, and obstacle-avoidance were carried out, including pedal stroke, speed, and latitudinal distance, using gray relational entropy and rough entropy parse and reduce attribute variables, by improved ID3 algorithm, manned driving behavior decision models on intersection, car-following, and obstacle-avoidance were established, and corresponding judging and deciding rules were generated. Models were validated by experiment, and judging and deciding mechanism were successfully proposed for unmanned ground vehicles.

Based on manned judging and deciding model above, stimulus performing of intelligent driving behaviors for unmanned ground vehicles was deeply researched in

three kinds of situations like intersection behavior, car-following behavior, and obstacle-avoiding behavior. Focused on vehicle track and decision comparisons between manned and unmanned stimulus performing behaviors, also between different unmanned stimulus performing behaviors were proposed, according to which multi-levels fuzzy comprehensive evaluation model was performed and tells high-medium-low intelligent behavior level for different unmanned ground vehicles. Especially, single intelligent behavior of unmanned ground vehicles could be assessed by regular triangle method.

In accordance with analysis and research of the three stages on information processing, by use of information processing mechanism and urban traffic environment complexity computing model, evaluation index system for intelligent behaviors of unmanned ground vehicles was built, which was defined through the three stages in information processing system, those were stimulus-perceiving indexes, judging and deciding indexes, stimulus performing indexes, and signal transmitting indexes. Based on AHP entropy weight each index could be calculated, in order to put forward more complete score marking method for intelligent driving behaviors of unmanned ground vehicles.

Key Words: unmanned ground vehicle; intelligent behavior; information processing; complexity degree; entropy

目 录

摘 要.....	I
ABSTRACT.....	III
第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景和意义.....	1
1.2 有人驾驶行为国内外研究综述.....	3
1.2.1 驾驶行为模型研究.....	3
1.2.2 通过交叉口有人驾驶行为研究.....	4
1.2.3 直线跟驰有人驾驶行为研究.....	6
1.2.4 避障有人驾驶行为研究.....	7
1.3 无人驾驶车辆智能行为国内外研究综述.....	9
1.3.1 无人驾驶智能行为研究.....	9
1.3.2 无人驾驶车辆测评研究.....	12
1.4 研究内容.....	14
1.4.1 主要研究内容.....	15
1.4.2 论文结构.....	16
第 2 章 有人驾驶行为与无人驾驶智能行为信息加工机理解析.....	19
2.1 信息加工理论概述.....	19
2.1.1 感知觉基本概念.....	21
2.1.2 模式识别原理.....	22
2.2 有人驾驶行为信息加工机理.....	23
2.3 无人驾驶智能行为信息加工机理.....	25
2.3.1 无人驾驶智能行为的信息加工系统.....	25
2.3.2 基于建构学说的无人驾驶智能行为信息加工模型.....	27
2.3.3 基于原型模式识别的无人驾驶智能行为信息加工模型.....	28
2.4 基于驾驶行为信息加工的刺激库与知识库层次归类.....	29
2.5 本章小结.....	31
第 3 章 有人驾驶行为与无人驾驶智能行为刺激感知研究.....	33
3.1 城市交通环境刺激库构成.....	33
3.2 城市交通环境复杂度计算模型建立.....	36
3.2.1 信息熵理论.....	36
3.2.2 基于图形信息熵的城市交通环境复杂度计算模型.....	38
3.2.3 “未来挑战赛” FC’2011 某考点处交叉口环境的算例.....	40
3.3 有人驾驶行为刺激感知回归分析.....	43
3.3.1 脑力负荷与城市交通环境复杂度的影响分析.....	43
3.3.2 有人驾驶行为刺激感知回归模型建立.....	47

3.4 无人驾驶智能行为刺激感知工作机制.....	48
3.4.1 无人驾驶智能行为感知强度确定.....	48
3.4.2 无人驾驶车辆传感设备应用配置.....	48
3.5 无人驾驶车辆多复杂度测试环境设计.....	50
3.6 本章小结.....	53
第 4 章 有人驾驶行为与无人驾驶智能行为判断决策研究.....	55
4.1 驾驶行为知识库表示方法及获取.....	55
4.2 基于神经元动力学的有人驾驶行为判断决策微观模型.....	58
4.3 有人驾驶行为虚拟视景仿真试验及道路试验.....	59
4.3.1 虚拟视景仿真试验.....	59
4.3.2 道路试验.....	60
4.4 有人驾驶行为判断决策效应解析.....	61
4.4.1 通过交叉口有人驾驶行为判断决策效应分析.....	62
4.4.2 直线跟驰有人驾驶行为判断决策效应分析.....	65
4.4.3 避障有人驾驶行为判断决策效应分析.....	67
4.5 基于熵值和决策树的有人驾驶行为判断决策宏观模型.....	69
4.5.1 通过交叉口有人驾驶行为判断决策宏观模型.....	69
4.5.2 直线跟驰有人驾驶行为判断决策宏观模型.....	79
4.5.3 避障有人驾驶行为判断决策宏观模型.....	85
4.5.4 有人驾驶行为判断决策宏观模型的验证.....	88
4.6 无人驾驶智能行为判断决策工作机制.....	89
4.7 本章小结.....	90
第 5 章 有人驾驶行为与无人驾驶智能行为刺激解释研究.....	91
5.1 通过交叉口行为刺激解释剖析.....	91
5.1.1 通过交叉口的有人与无人驾驶行为刺激解释对比.....	91
5.1.2 通过交叉口的无人与无人驾驶智能行为刺激解释对比.....	95
5.2 直线跟驰行为刺激解释剖析.....	96
5.2.1 直线跟驰的有人与无人驾驶行为刺激解释对比.....	96
5.2.2 直线跟驰的无人与无人驾驶智能行为刺激解释对比.....	98
5.3 避障行为刺激解释剖析.....	99
5.3.1 避障的有人与无人驾驶行为刺激解释对比.....	99
5.3.2 避障的无人与无人驾驶智能行为刺激解释对比.....	102
5.4 无人驾驶智能行为刺激解释多级模糊综合评判.....	104
5.4.1 多级模糊综合评判基本理论.....	104
5.4.2 基于三角模糊数的无人驾驶智能行为刺激解释多级模糊综合评判.....	105
5.4.3 基于正三角形法的无人驾驶车辆智能行为刺激解释评判分析.....	109
5.5 本章小结.....	110
第 6 章 无人驾驶车辆智能行为测评研究.....	111

6.1 基于信息加工的无人驾驶车辆智能行为测评指标体系.....	111
6.1.1 无人驾驶车辆智能行为刺激感知指标.....	112
6.1.2 无人驾驶车辆智能行为判断决策指标.....	113
6.1.3 无人驾驶车辆智能行为刺激解释指标.....	113
6.1.4 无人驾驶车辆智能行为信号传输指标.....	114
6.2 基于信息加工的无人驾驶车辆智能行为评分体系.....	117
6.2.1 无人驾驶车辆智能行为评分体系建立原则及层次结构.....	117
6.2.2 基于 AHP 熵权法的无人驾驶车辆智能行为测评指标权重计算.....	117
6.2.3 无人驾驶车辆智能行为评分方案.....	120
6.3 本章小结.....	122
结论与展望.....	123
结论	123
创新点	124
展望	125
参考文献.....	126
附录 A 部分城市交通静态环境刺激元量值.....	134
附录 B 城市交通静态环境刺激类权值.....	135
附录 C 部分城市交通动态环境刺激元量值.....	136
攻读学位期间发表论文及研究成果清单.....	137
致谢.....	139

图目录

图 1.1	研究内容总体框架.....	17
图 2.1	人脑信息加工模型.....	20
图 2.2	原型匹配模式识别.....	23
图 2.3	有人驾驶行为信息加工系统.....	24
图 2.4	有人驾驶行为感受器及效应器的功效.....	25
图 2.5	无人驾驶智能行为信息加工系统.....	26
图 2.6	基于建构学说的无人驾驶智能行为信息加工模型.....	28
图 2.7	基于原型模式识别的无人驾驶智能行为信息加工模型.....	29
图 2.8	驾驶行为归类.....	30
图 2.9	基于驾驶行为的刺激库与知识库层次归类.....	31
图 3.1	城市交通环境刺激库构成.....	34
图 3.2	城市交通静态环境构成.....	34
图 3.3	城市交通动态环境构成.....	35
图 3.4	FC'2011 某考点处交叉口.....	40
图 3.5	FC'2011 某考点处交叉口静态环境的图形结构及节点编号.....	41
图 3.6	虚拟视景仿真系统总体框架.....	44
图 3.7	虚拟视景仿真系统循环流程图.....	44
图 3.8	受试驾驶人 NASA-TLX 主观评定量表典型记录图.....	45
图 3.9	脑力负荷值随城市交通环境复杂度变化的散点分布.....	46
图 3.10	无人驾驶车辆智能行为的感知指标.....	48
图 3.11	无人驾驶车辆测试环境的复杂度分布图.....	50
图 3.12	无人驾驶智能行为多复杂度测评环境设计.....	51
图 4.1	驾驶行为知识库结构.....	56
图 4.2	有人驾驶行为知识获取.....	57
图 4.3	各模拟神经元活动和序参量动力学的关系.....	59
图 4.4	激光雷达及 GPS.....	60
图 4.5	直行通过交叉口判断决策图.....	62
图 4.6	通过交叉口行为试验车加速踏板和制动踏板行程随路程变化的曲线图.....	63
图 4.7	通过交叉口行为试验车速度和偏距曲线图.....	64
图 4.8	直线跟驰行为试验车加速踏板和制动踏板行程随路程变化的曲线图.....	66
图 4.9	直线跟驰行为试验车速度曲线图.....	66
图 4.10	避障行为试验车加速踏板行程随路程变化的曲线图.....	67
图 4.11	避障行为试验车速度和偏距曲线图.....	68

图 4.12	通过交叉口有人驾驶行为图解.....	70
图 4.13	冲突车横向往右转时的通过交叉口有人驾驶行为决策树	78
图 4.14	直线跟驰有人驾驶行为图解.....	80
图 4.15	前导车匀速-加速-减速-停车时的直线跟驰有人驾驶行为决策树	83
图 4.16	前导车匀速-加速-减速-停车时的直线跟驰有人驾驶行为决策机制	84
图 4.17	避障有人驾驶行为图解.....	85
图 4.18	静止车于同车道上的避障有人驾驶行为决策树	88
图 4.19	基于灰关联熵法和决策树的无人驾驶智能行为判断决策机制	89
图 5.1	FC' 2011 中某考点处交叉口环境示意图	91
图 5.2	参赛车 A 在某考点通过交叉口的行驶轨迹示意图	93
图 5.3	通过交叉口的有人与无人驾驶行为刺激解释对比	94
图 5.4	通过交叉口的无人与无人驾驶智能行为刺激解释对比	95
图 5.5	FC 比赛中某处直线跟驰行驶环境示意图	96
图 5.6	直线跟驰的有人与无人驾驶行为刺激解释对比	98
图 5.7	直线跟驰的无人与无人驾驶智能行为刺激解释对比	99
图 5.8	FC' 2011 中某考点处避障环境示意图	100
图 5.9	参赛车 B 在某考点避障时的行驶轨迹示意图	101
图 5.10	避障的有人与无人驾驶行为刺激解释对比	102
图 5.11	避障的无人与无人驾驶智能行为刺激解释对比	103
图 5.12	无人驾驶智能行为刺激解释多级模糊综合评判指标	105
图 5.13	三角形模糊数隶属函数图.....	106
图 5.14	多级模糊综合评判模型.....	108
图 5.15	基于正三角形法的参赛车通过交叉口、直线跟驰和避障行为刺激解释评价	109
图 6.1	无人驾驶智能行为信息加工系统测评指标	111
图 6.2	基于信息加工的无人驾驶车辆智能行为测评指标体系	112
图 6.3	无人驾驶智能行为的信息加工系统时延表示	114
图 6.4	无人驾驶智能行为的信息加工系统丢包率表示	115
图 6.5	Markov 跳变模型	116
图 6.6	基于信息加工的无人驾驶车辆（参赛车）比赛评分体系	122

表目录

表 2.1	有人驾驶行为与无人驾驶智能行为信息加工对比	26
表 3.1	FC'2011 某考点处交叉口刺激元构成图的节点分组	42
表 3.2	脑力负荷值与城市交通环境复杂度回归系数	46
表 3.3	无人驾驶车辆各传感设备用途及安装位置	49
表 3.4	无人驾驶与有人驾驶刺激感知能力对比	49
表 3.5	无人驾驶智能行为多复杂度测试环境刺激元分布	52
表 4.1	有人驾驶行为虚拟试验任务	60
表 4.2	通过交叉口有人驾驶行为属性值选取及部分试验数据	71
表 4.3	通过交叉口有人驾驶行为灰关联系数	73
表 4.4	通过交叉口有人驾驶行为灰关联熵	73
表 4.5	通过交叉口有人驾驶行为灰熵关联度	73
表 4.6	通过交叉口有人驾驶行为数据离散化	75
表 4.7	冲突车横向右转时的通过交叉口有人驾驶行为决策规则表	79
表 4.8	直线跟驰有人驾驶行为属性值选取及部分试验数据	81
表 4.9	直线跟驰有人驾驶行为灰关联系数	81
表 4.10	直线跟驰有人驾驶行为灰关联熵	82
表 4.11	直线跟驰有人驾驶行为灰熵关联度	82
表 4.12	直线跟驰有人驾驶行为数据离散化	82
表 4.13	前导车匀速-加速-减速-停车时的直线跟驰有人驾驶行为决策规则表	83
表 4.14	避障有人驾驶行为属性值选取及部分试验数据	86
表 4.15	避障有人驾驶行为灰关联系数	87
表 4.16	避障有人驾驶行为灰关联熵	87
表 4.17	避障有人驾驶行为灰熵关联度	87
表 4.18	避障有人驾驶行为数据离散化	87
表 4.19	静止车于同车道上的避障有人驾驶行为决策规则表	88
表 4.20	判断决策模型识别结果与实验数据对比	89
表 6.1	无人驾驶车辆智能行为刺激感知权重分配	119
表 6.2	无人驾驶车辆智能行为判断决策权重分配	119
表 6.3	无人驾驶车辆智能行为刺激解释权重分配	119
表 6.4	无人驾驶车辆智能行为信号传输权重分配	120
表 6.5	基于信息加工的无人驾驶车辆单个考点分值计算表	121

第 1 章 绪论

1.1 研究背景和意义

国家自然科学基金委员会重大研究计划“视听觉信息的认知计算”，围绕国家重大需求，充分发挥信息、生命和数理科学的交叉优势，以人类的视听觉认知机理出发，研究并建立新的计算模型与计算方法，提高计算机对视听觉感知信息的理解能力和海量异构信息的处理效率，克服图像、语音和文本（语言）信息处理所面临的瓶颈困难，为确保国家安全与公共安全、推动信息服务及相关产业发展以及提高国民生活和健康水平做出重要贡献。集成视听觉信息处理的基础理论、脑-机接口技术等相关研究成果，研制具有自然环境感知与智能行为决策能力的无人驾驶车辆验证平台，并达到世界先进水平，从而提升我国在视听觉信息处理领域的整体研究实力，培养具有国际影响力的优秀人才与团队，为国家安全和社会发展提供相关研究环境与技术支撑^[1]。

根据重大研究计划“视听觉信息的认知计算”的总体目标和研究要求，目的是规范未来无人驾驶车辆比赛，有利于科学准确地考核无人驾驶车辆平台及相关研究的阶段性成果，实现“视听觉信息的认知计算”重大研究计划的总体目标。重点支持项目“无人驾驶车辆智能行为综合测试环境设计与测评体系研究”和培育项目“无人驾驶车辆认知能力测试及验证环境设计与实现”，旨在解决如何测试和评价无人驾驶车辆在未知环境中的智能行为，包括 4 个研究内容：第一，测试内容，即测什么；第二，测试环境设计，即在什么环境下测；第三，测试方法与技术，即用什么方法和手段测；第四，测试标准与评价体系，即建立什么样的标准体系以及如何评价。针对我国无人驾驶车辆的发展现状，明确我国无人驾驶车辆发展的分阶段测试目标，设计合理的测试内容和测试环境。结合模糊综合评价与层次分析法等方法对无人驾驶车辆智能行为进行综合评价，并选择城市道路、乡村道路、高速公路中基本和共性的测评内容，为比赛设计测试环境、测试方法与技术、测试标准和评价体系，从而建立测评体系，提供具有高水平的测评理论、方法与技术，为未来无人驾驶车辆智能行为的测评服务。重点研究测试环境设计和测试标准与评价体系，为无人驾驶车辆设计未知环境，提出测试标准，构建无人驾驶车辆智能行为的测评指标体系和

评分体系。

依托“视听觉信息的认知计算”重大研究计划国家自然科学基金重点支持项目“无人驾驶车辆智能行为综合测试环境设计与测评体系研究”和培育项目“无人驾驶车辆认知能力测试及验证环境设计与实现”，充分发挥信息科学、生命科学和数理科学的交叉优势，从人类的视听觉认知机理出发，研究并构建新的计算模型与计算方法，提高计算机对非结构化视听觉感知信息的理解能力和海量异构信息的处理效率，克服图像、语音和文本（语言）信息处理所面临的瓶颈困难，为推动信息服务及相关产业发展以及提高国民生活和健康水平、确保国家安全与公共安全做出重要贡献。研制具有自然环境感知与智能行为决策能力的无人驾驶车辆验证平台，是国家自然科学基金委员会“视听觉信息的认知计算”重大研究计划的总体目标之一。国家自然科学基金委员会相关学部与重大研究计划指导专家组确定举办中国智能车“未来挑战”系列比赛，科学准确地考核无人驾驶车辆平台及相关研究的阶段性成果，以推动和促进视听觉信息认知计算模型、关键技术与验证平台研究的创新与发展，确保“视听觉信息的认知计算”重大研究计划的总体目标实现。

虽然无人驾驶车辆的研究在国内外属前沿研究内容，很多科研机构纷纷研制功能各异的智能车辆，但大都是针对于研制无人驾驶车辆中的新型技术，对于无人驾驶车辆智能行为的研究不多，而且以有人驾驶行为的感知——决策——操作为依据，研究无人驾驶车辆智能行为的不多；这也直接导致无人驾驶车辆的综合测试体系不完善，评价指标也不甚系统；驾驶行为研究的新兴理论还处于起步阶段，基于信息加工理论与驾驶人行为学的有机结合对驾驶行为的研究也不多。

本文基于信息加工理论深入剖析人的认知机理，结合信息在完成驾驶任务中的加工方式，以驾驶人对信息的刺激感知、判断决策、刺激解释三个阶段为主线，集中考虑通过交叉口、直线跟驰、避障三种典型工况，研究有人驾驶行为规律，为无人驾驶车辆提供认知依据，并将安全可靠的有人驾驶行为及其规律进行改进，使其适用于无人驾驶车辆，从而有效测评和考核无人驾驶车辆的智能行为，提高我国无人驾驶车辆智能水平。因此，基于信息加工理论研究有人驾驶行为，对无人驾驶车辆智能行为测评，及无人驾驶车辆研发具有重要意义。

1.2 有人驾驶行为国内外研究综述

1.2.1 驾驶行为模型研究

20 世纪中期以来,国外众多学者应用各种控制理论陆续提出了多种驾驶行为模型。1984 年,Rasmussen 将驾驶行为划分为基于技能、基于规则和基于知识,基于技能的驾驶行为适用于低层次、普通的驾驶状态;基于规则的驾驶行为是应用于较为复杂的行为;基于知识的驾驶行为应用于基于规则系统无法解决的某些状态^[2]。

Michon 提出了驾驶行为的层次控制结构,把驾驶行为分为任务层、规划层和操作层,在任务层明确目标后,进行全局规划,合理选择路线;规划层是沿任务层确定的路线前进时,根据所遇到的交通状况,规划应采取何种驾驶行为;操作层用于完成规划层的规划,进行转向、变速等行为,此后驾驶行为的研究都基于此类模型,但 Michon 模型没有过多考虑驾驶过程中驾驶员情感和性格状态的因素^[3]。

2002 年,Hatakka 采用了知识技能、风险增加因素、自进化三个参数来描述驾驶行为,但对于复杂驾驶行为来说,仍然过于线性化^[4]。

Kim 等人基于情感的 PWL 分段线性驾驶行为模型,很好地解释了制动行为中驾驶员感觉器官与行为器官的分段线性关系,基于 MILP 采用两个变量描述将制动转换条件,得出了驾驶员根据感觉信息进行制动行为控制的结论^[5]。

Sekizawa 等人基于 SS-ARX 随机摆动的自回归外生模型研究了驾驶行为识别过程,根据参数估计算法开发了多输入输出的 SS-ARX 模型,通过驾驶模拟器获得驾驶参数,用来识别驾驶员避碰行为^[6]。

我国对驾驶行为的研究大多停留在宏观和经济学角度,缺乏行为角度的实证研究。吉林大学郭孔辉院士于 2002 年提出了预瞄优化人工神经网络驾驶员模型,简称 POANN 驾驶员模型,在驾驶员——车辆闭环系统的功能框图基础上,根据人工神经网络拓扑结构,驾驶员依靠前方道路轨迹信息和车辆的反馈状态信息驾驶汽车,建立了基本预瞄优化人工神经网络驾驶员模型^[7]。

广州工业大学对虚拟环境下的驾驶行为进行研究,娄燕武等从微观角度研究一种更具有通用性、更符合实际情况的智能驾驶行为模型^[8],将驾驶行为分为五个单元,感知单元、情感单元、碰撞避免单元、决策单元和操作单元,考虑了性格、心情、驾驶经验和驾驶技能等因素;其对驾驶员的个性化行为也进行了研究^[9, 10],在驾驶员视觉行为研究方面提出一种具有个性化行为的视觉行为信息处理模型,该模

型由信息获取、碰撞避免、目的地追踪和行为融合四部分组成，采用模糊神经网络控制来处理视觉信息、决策行为。

北京理工大学的陈雪梅对多因素刺激下驾驶员生理心理与行为进行深入研究，建立了心率、方向盘转速、制动踏板力、制动踏板速度这四个指标分别与车距障碍物距离和行驶车速的回归模型，前者成负幂关系，后者成正线性相关关系^[11]。

随着研究领域的不断扩展，许多复杂的车辆数学力学模型相继被提出，但这些数学模型是建立在汽车的理想化假设基础上的，而且求解速度很低，难以满足汽车运动实时控制的要求，对于方向盘转角或油门、制动踏板等控制较为模糊。而且，在应用这些模型时，缺乏基于心理学对驾驶员特性的基本认识，难以从本质上得知驾驶行为的形成过程及规律特性。

1.2.2 通过交叉口有人驾驶行为研究

国外对交叉口行为的研究较多较细，Toshinori H.等为阻止由失误引起的交通事故，对交叉口的不寻常右转行为进行预测，并通过驾驶模拟器的试验数据得到验证^[12]。

Kosaka H.等通过试验对无信号控制交叉口的安全驾驶规则展开深入研究，如在交叉口的停止线停止，并对有无驾驶规则的驾驶行为进行对比，并讨论驾驶规则的有效性^[13]。

Georges S. Aoude 等基于支持向量机（SVM）和隐式马尔可夫模型（HMM）建立了道路交叉口处的驾驶行为的评价算法，将驾驶员评价为顺从型和违背性两类，最后利用在 Christiansburg 试验所收集到的交叉口数据，成功验证了该算法的有效性^[14]。

J.K.Caird 等研究了黄灯时对年轻和年老驾驶员的知觉反应时间（PRT）和交叉口行为的影响，并采用驾驶模拟器进行试验，记录了黄灯时 77 位受试驾驶员以 70 公里/时的速度接近交叉口的距停止线时间（TSL），建立了车辆在黄灯时停止或者前进的 Logistic 回归模型，结果表明知觉反应时间对年轻和年老驾驶员没有明显区别；年老驾驶员在接近交叉口时比年轻驾驶员速度更低、停止线前停车更准确^[15]。

Barbara Preston 在 1989 年对于按钮信号控制人行横道处行人的行为和安全性问题进行了研究，表明男性比女性更不愿意遵守交通信号灯，等待时间内车流的空挡分布直接影响了行人是否遵守信号指示^[16]。

Puala D. Raymond 和 Richard L. Knobluach 在研究中表明人行横道使机动车驾驶

员更加小心和更加留意过街行人^[17]；Marsha S. Nitzburg 通过调查美国 4 个州 11 个不同的无控制交叉口，得到 Paula D. Raymond 的研究相类似的结果，同时还表明人行横道的设置只有在需要时才能发挥效用，并且是车速慢、宽度比较窄的道路^[18]。

北京交通大学的李志鹏主要研究了机动车的微观驾驶行为，包括机动车与混合车流中其他类型车辆的影响及冲突，从而对城市交叉口交通流微观仿真提供必要的参数支持，基于神经网络、模糊逻辑等跟驰模型，采用模糊逻辑控制的方法建模，在描述了各类跟驰模型的基础上，对路口上跟车车辆的特性进行了定性、定量分析，基于模糊逻辑方法，进一步提出了当机动车辆处于信号交叉口路口上的车辆跟驰驾驶行为的模糊逻辑控制模型，结合了信号交叉口上非机动车流对机动车流的影响，增加了其它车流对机动车的压力，使模型更符合实际^[19]。

北京工业大学的常书金立足于道路交叉口探索驾驶员的行为规律，从社会、心理、行为和工程等角度分析和研究驾驶员行为，并基于行为理论建立驾驶行为模型^[20]。

吉林大学的吴文静等基于驾驶员心理，分析驾驶员行至交叉口处的决策过程，通过对交叉口数据采集和分，建立了倒计时信号交叉口行为决策 Logistic 模型，并表明驾驶员的决策严重受到倒计时信号显示时间的影响^[21]。

东南大学的葛兴等将通过交叉口的驾驶行为分为单独通过、跟随通过、等待通过、挤占通过，采用数据统计的方法确定每种驾驶行为的权重，提出了驾驶行为特征值的分析方法和模型，建立了这四种驾驶行为与冲突率的关系模型，该模型表明冲突率和驾驶行为特征值能够较好的符合线性关系^[22]。Fan Xiaoqi 等研究了驾驶行为对道路交叉口的交通安全影响，建立驾驶行为与交通冲突的关系模型，从而评价道路交叉口的交通安全^[23]。

哈尔滨工业大学的徐良杰等针对我国典型四相位信号控制交叉口，分析了行人、非机动车以及机动车的运行特征，通过设置行人、非机动车专用信号，在考虑尽量不损失机动车通行绿信号的情况下，减少了机动车通过交叉口所受到的行人、非机动车交通流的干扰，避开了混合交通流在交叉口的冲突，有效地提高了交叉口的交通安全性^[24]。

综上所述，虽然国外对通过交叉口行为的研究很多，但是偏于微观，主要研究了某一因素或某一条件下对驾驶行为的影响，而国内在这方面的研究又偏于宏观，对交叉口的研究主要集中在通行能力、交通流特性等，对于驾驶员在通过交叉口时

具体的操作流程及全面感知交互等缺乏相关研究，因此，有必要针对过交叉口的有人驾驶行为展开研究。

1.2.3 直线跟驰有人驾驶行为研究

国内外学者从很早就对直线跟驰行为展开了研究，如今已有大量的跟驰模型被提出，主要有 GM 模型、CA 模型、线性跟车模型、AP 模型和基于期望间距的跟驰模型等。

20 世纪 50 年代后期逐渐发展车辆跟驰的 GM 模型。假设车辆在 75 英尺以内未超车或变换车道，采用“ $\text{反应}(t+T)=\text{灵敏度} \times \text{刺激}(t)$ ”，改进驾驶动力学模型(Driving Dynamic Model) [25]。

CA 模型，也称安全距离模型，被 Kometani 和 Sasaki 提出，与 GM 所提出的刺激-反应机理不同，而是对于固定的安全跟车距离，由牛顿运动学基本公式建立跟驰模型，表明了前导车突然制动时安全间距内可避免碰撞的结论，该模型用驾驶行为的感性假设标定，即驾驶员即将使用的最大制动减速度，但是仍存在局限性，实际驾车行驶中，驾驶员在多数情况下并未保持安全距离行驶[26]。

Helly (1959) 为线性跟车模型的发展作出了重要的贡献，基于前方两车是否制动减速对后车加速度的影响提出了新线性跟车模型，在一个模拟时钟内先移动前车，再移动后车，当后车的位置满足模型所设的约束条件时，可在计算机上应用，但模拟的时钟长度不易缩短；模拟时钟限制了驾驶员的制动反应时间；前后车的串行处理方法不适用现实中支配智能车辆[27]。

AP 模型，也称生理心理模型，利用阈值和期望距离来体现人的感觉和反应，在不同的值域中，前后车存在不同的影响，并考虑了驾驶员在不同交通环境下的不同反应，从建模方法上更接近实际交通流的运行状况，但是对各种阈值的调查策略很困难，且将其运用于其它的运行环境时，难以评价原有参数的适用性[28]。

Peter Hidas (1998) 建立了基于期望间距的车辆跟驰模型，在假定期望间距为速度的线性函数的前提下，不同的驾驶员期望间距也不同，并且在加、减速过程中期望间距也不同，该模型需要大量的试验数据，由于驾驶员跟驰行为受很多复杂因素影响，将其量化到模型中非常困难，仍需进一步深入研究[29]。

J.J. Gibson 的视觉感知生态学理论对测试者与环境发生相对运动时的感知机理进行了详细的描述[30]。

Evans 将跟车间距作为衡量指标对驾驶行为的影响因素进行分析，表明跟车间

距随着驾驶员年龄的增长而增加，男性驾驶员一般比女性驾驶员跟车间距小^[31]。

Van Winsum 的研究表明，前后车空间距离等于前后车时距与后车车速的乘积，对于给定的驾驶员，一定情况下前后车时距不随车速的变化而变化。当车速增加或减小时，车辆之间的空间距离会随之增大或减小，与实际情况是一致的^[32]。

Hoogendoorn 研究了车辆跟驰中的纵向驾驶行为特性，驾驶员生理心理的差异性成为驾驶行为不同的主要因素，通过试验得出了其他车道的事故可严重影响驾驶员情感和其纵向驾驶行为^[33]。

根据 Heino 的研究，驾驶员在很大的时间压力下会选择较小的跟车时距跟随前车，它反映了驾驶员的驾驶技术、疲劳程度、驾驶员视力及驾驶员的心理状态^[34]。

在国内也有很多研究，韩直通过车辆跟驰模型的分析，在考虑了车辆性能和道路因素的前提下，引入动力因子项，提出了改进的车辆跟驰模型，车辆跟驰模型的提出是建立在对灵敏度的考虑不同、对刺激的内涵不同，表现为速度、距离或速度与距离，推导过程的假设不同、反应时间内行驶距离与减速行驶距离计算方法不同的基础上^[35]。

荣建提出了基于可变跟驰时间和随机因素的车辆跟驰模型，考虑到反应时间通常指驾驶员从感受刺激、判断到操作之间的时间间隔，没有考虑车辆机械反应的时间，荣建提出了跟驰时间的概念，指驾驶员从感受刺激、判断、操作，一直到车辆开始加、减速反应的时间长度^[36]。

许轮辉着重研究了滞后时间与跟驰状态的关系，提出了基于滞后时间的非线性模型，驾驶员从感觉到前车运行状态的改变到采取措施使后车速度实现相应的调整需要过程和时间，因此，后车的速度相对于前车的速度而言，不仅具有跟随性，而且还具有滞后性^[37]。

1.2.4 避障有人驾驶行为研究

车辆避障行为，从一定意义上来说，是通过超车来实现的，国外学者对超车行为很早就开始了深入研究。

Matson 提出了超车开始和结束的超车过程划分方式，引入快速超车、加速超车、强制回车和主动回车的概念，得出了强制超车所产生的超车距离和时间小于主动超车的距离和时间的结论^[38]。

Jenkins 通过 Vissim 仿真软件和驾驶模拟器进行超车试验，研究超越小客车和卡车的驾驶行为，超车开始时，试验车与前方车辆的速度差越大，试验车的加速度

就越小，超车结束时，试验车与对向车会车时间越长，试验车的减速度越大^[39]。

Vlahogianni 采用贝叶斯网络建立了两车道年轻驾驶员的超车行为模型，揭示了微观特征会影响其超车决策，验证了男性驾驶员的超车间距要小于女性驾驶员，距障碍车的距离比车速对超车行为更有影响^[40]。

Onieva 提出基于模糊逻辑结构的超车行为模型可有效处理对方车辆阻挠的问题，采用开放式车辆模拟器进行试验，将驾驶员的超车策略进行对比，可以成功超越场景中大部分对车车辆^[41]。

Fuchs 指出交通标志和道路条件严重影响了超车行为，并基于逻辑方法建立超车辅助系统，包括当前车速、距障碍车辆的距离在内的影响因素动态限制了超车行为，并通过优先模糊分类评估潜在的超车风险^[42]。

国内对超车模型的研究起步时间晚于国外。长安大学的严宝杰建立了基于概率论双车道公路超车可能性的数学模型^[43]，王元庆等提出了超车完成合流与超车未完成合流的概念^[44]。吉林大学的张袅雄利用计算机模拟分析了双车道公路换车道次数和路段流量的关系^[45]。

北京工业大学的刘江在基于超车行为的双车道公路通行能力研究中，定义了可回车车头时距与可超车车头时距，通过超车试验的临界间隙值分析了单向、双向车道的最小通行能力^[46]，提出了双车道公路流量饱和度与超车率的关系，并根据不同的超车行为特征将双车道公路服务水平分为四等，给出各级之间平均速度和延误率的取值范围^[47]。邵长桥采用超车试验研究了超车驾驶员对同向车流间隙的接受行为，该行为可用二项模型来刻画，提出了可接受临界车头时距和临界车头间距的计算方法，分析了临界车头时距离、临界车头间距与速度之间的关系^[48]。

荣建在双车道公路仿真系统中的应用研究中建立了四步骤的超车模型，并用超车率和超车次率等参数证明了模型的有效性，模型的仿真试验发现，当双车道公路流量达到时，超车率几乎变为零^[49]。

单晓峰基于超车行为分析，提出了双车道公路超车行为的两难区域概念，在该区域内超车车辆既无法完成超车动作又不能在避免与对向车辆相撞前安全避让^[50]。

综上所述，针对通过交叉口、直线跟驰、避障三种驾驶行为，目前的研究多是通过建立数学模型来体现行驶参数间的函数关系，少有对于具体的驾驶行为，基于认知心理学从驾驶行为的产生到结束的行为标准及特性，为了提高对无人驾驶车辆测评的准确性，有必要对此进行研究。

1.3 无人驾驶车辆智能行为国内外研究综述

1.3.1 无人驾驶智能行为研究

智能车辆的研究已经有 20 多年的历史，最早主要应用于军事领域，之后逐步转为民用。起初，智能车辆研究重点用以实现车辆无人驾驶，也就是实现车辆在各种道路环境下的无人行驶，第一个成功应用是在高速公路环境。期间代表性工作有德国联邦国防军大学的 VaMP 系统，该系统使用视觉检测道路和障碍物，于 1995 年进行了从德国慕尼黑到丹麦欧登塞的长距离试验，系统行驶 1600 多公里，其中 95% 部分是无人驾驶^[51]。针对高速公路系统大部分采用视觉导航，但视觉系统在实际演示中仍存在可靠性和鲁棒性问题，目前系统才达到 95% 左右的正确率，无法实现真正意义上的完全无人驾驶。

自上世纪 80 年代以来，单台智能车辆控制系统理论的研究工作已经初步完成，具备开发能够在试验环境下无人驾驶前进的智能概念车辆，并进行了许多富有成效的演示。为了有效融入目前复杂的实际交通环境中，智能车辆的研究开始转向智能车辆在交通系统中的交互行为，其中主要包括：智能车辆与道路信息的交互行为、智能车辆与其他普通车辆行人的交互行为、及智能车辆之间的交互行为。

无人驾驶车辆智能行为的研究，各国均正处于起步阶段。欧洲学者侧重于复杂的城市环境无人驾驶研究，以证明其在城市环境中的可行性，其中欧盟第五框架的 Cyber Cars 项目最具代表性^[52]。Frog 公司 1997 年在阿姆斯特丹国际机场搭建了世界上第一套无人载客系统——Park Shuttle，该系统可 24 小时不间断运行，短距离运输客流。此后荷兰园艺博览会上使用 25 辆 Cyber Cab 车接送游客，6 个月内运送旅客 30 万人次。无人驾驶控制技术已经相对成熟，在已知环境下可实现车辆自主行驶和障碍物检测，并具备人车交流功能，完成既定路线上的乘客运送服务。

90 年代末，波士顿东北大学的虚拟现实实验室从微观角度提出一个新的智能驾驶行为框架，主要是增加了情感部分，并基于此框架开发了激进型、老年型和酗酒型驾驶行为模型，使生成的交通状况非常生动，但是这是以 3D 模型和驾驶行为模型捆绑在一起为前提来模拟人类驾驶行为的。

后来，研究重点转向智能车辆在交通环境中的行为。2005 年，Cyber Car-2 计划诞生，旨在城市范围内对智能车辆系统进行更大规模的应用，目前主要的研究方向有智能车跟随和车队管理、智能车交叉口交互以及相应的交叉口仿真软件等。

法国国家自动化所研究了不同类型的智能车辆在交叉口的交互问题，在已有的 CyberCab 平台上，通过车间通讯、设计路径规划算法，在交通交叉口实现多车交互。该所还研发了交叉口实时控制终端，实时观测试验车辆运行的位置和路径^[53]。

南洋理工大学开发了双车跟随仿真和实验系统，通过建立复杂的双车运动学模型，控制前后车辆的距离和相对角度，实验中充分应用 Matlab/Simulink 功能建立精确模型，在实验中达到较高的跟踪精度。TNO 利用四辆智能车，设计了车辆距离控制算法，分别测试了多车在只用激光雷达的速度距离控制，以及在通讯情况下的速度距离控制，得出很多具有实际应用价值的控制结论^[54]。日本 Toyota 在这方面也展开了研究，采用五辆 GPS 导航的车辆作自动巡航研究，虽然车间没有通讯，但仍然达到较好的跟随效果。

美国加州大学是智能车交叉口交互研究的先驱，研究了行人和公交车的交互。通过路边传感器感应行人过马路的情况，通过无线通讯发送给公交车的车载系统，并通过 HMI 系统提醒公交车驾驶员^[55]。

美国路特格斯大学的学者研究了智能车与红绿灯通讯的交叉口场景。通过获得各车道的车辆排队长度和车流，按照 MOE 效率评价体系，实时调整交叉口的红绿灯信号周期和绿灯时间，并研发了仿真软件对两个交叉口进行仿真，事实证明效率比传统的交叉口交通控制提高大约 20%，充分证明了智能通过交叉口的效率性。

德国 INTERSAFE 项目致力于防止交叉口车辆交互的碰撞问题，通过通讯手段，载有提醒系统的智能车辆可估计其它方向来车的碰撞系数，同时用指示灯的方法提醒驾驶员刹车或前进，使得车辆在交叉口的碰撞系数大大减小。

目前，无人驾驶车辆智能行为大多是导向行为，可在前进中根据当前虚拟环境以实时几何信息处理为主规划路径；随着计算机速度的提高和多学科交叉研究的进展，将驾驶员的心理状态作为影响行为的因素，可使智能驾驶行为模型逐步贴近真实，除寻求可行路径外，还具备一定的意图，规划较复杂的行为。

在国内，智能车辆的研究基本与世界保持同步，但受到技术条件的限制，我国对无人驾驶车辆的研究起步较晚，但是发展较快。1986 年开始的高技术研究发展计划(“863 计划”)制定了智能机器人主题的总体战略目标。1994 年 10 月清华大学研制成我国第一台“室外智能移动机器人。清华大学、国防科技大学、北京理工大学、南京理工大学、解放军交通学院等研究团体均卓有成效地开展了此领域的研究，吉林大学和上海交通大学已经分别研制了第一代样车。其中上海交通大学负责了欧盟

Cyber C3 项目, 已研制 4 辆无人驾驶车辆, 并于 2007 年 5 月在上海公开演示无人驾驶客系统^[56]。西安交通大学的 Spring Robot 智能车, 国家 ITS 中心的新疆扫雪车。

清华大学计算机科学与技术系的人工智能与智能控制实验室已进行了多年的研究, 并且取得了阶段性的成果。目前, 他们研制的自主移动机器人试验车 THMR-V TsingHua Mobile Robot 已经能够在较复杂的环境自行行驶, 面向高速公路和一般道路的功能车体采用道奇 7 座厢式车, 装备有彩色摄像机和激光测距仪组成的道路与障碍物检测系统, 由差分 GPS 磁罗盘和光码盘组成的组合定位导航系统等, 并对驾驶行为开始了研究, 用 Kuipers 定性仿真算法来分析各种驾驶行为^[57]。

北京航空航天大学对智能驾驶行为进行了初步的探索研究, 采用 Michon 层次控制模型分别研究了虚拟个体对虚拟环境的感知和虚拟世界中的智能行为, 用虚拟现实造型软件 Reality Build 构建了一个逼真的综合城市交通环境, 并在 Eagle IG 仿真系统上得以实现^[58]。

装甲兵工程学院教研室对计算机生成兵力 CGF 的智能行为模型进行了研究^[59], 它将 CGF 的智能行为分为高级智能行为和低级智能行为。高级智能行为包括实时的分析决策与任务规划, 低级智能行为包括实时速度方向控制和通过速度确定目标等编队行驶。

吉林大学也对驾驶行为开始了研究, 利用 Kuipers 定性仿真算法来分析各种驾驶行为^[60]。同济大学汽车学院也于 2006 年 10 月开始了春晖“无人驾驶车辆”项目的研发, 该项目的初步成果“无人驾驶场馆车”于 2007 年 10 月参加第十届“挑战杯”全国大学生课外学术作品竞赛, 获得了三等奖的佳绩, 应用价值已经凸现端倪。

北京理工大学对无人驾驶车辆展开了深入研究, 描述了其研制的无人驾驶车辆系统结构, 包含环境感知模块、规划决策模块、低层控制模块、车辆数据获取模块、紧急停车模块和交流模块, 并开发了 U-Turn 行为的复杂轨迹生成策略^[61]。

上海交通大学在该领域也进行了研究, 研发了协调大规模车辆通行的交叉口仿真平台, 不仅能够适用到各种交通交叉口的智能车辆协调仿真, 也能对车辆通行效率、延误时间、停车次数等进行评估。2008 年, 与欧盟共建的 Cyber C3 智能车, 已经具备了自动驾驶的功能, 主要依靠车头的摄像头、保险杠上安装的“磁眼”和激光雷达来共同探测定位, 并计划研制 4 辆无人驾驶车辆, 并在上海进行面向公众的大规模演示。

1.3.2 无人驾驶车辆测评研究

自 2002 年 DARPA 主持的 DEMO 计划完成以后,美国军方重点支持“未来作战系统(Future Combat System, FCS)”计划^[62, 63],并对相关研究进行测试,目标是将军用机器人系统扩散到 21 世纪战斗系统的每个角落,执行恶劣危险环境下的任务以及单调乏味的工作,同时为一系列的冲突和军事任务提供全新的作战能力,其研制的地面机器人也面向这些需求进行设计和检验。所组织的三届比赛均以无人驾驶车辆完成所有比赛项目的长短为评价指标,分别是 2004 年、2005 年的 Grand Challenge 和 2007 年的 Urban Challenge^[64]。

2004 年, DARPA 举办的无人驾驶车辆的比赛,共 142 英里的赛程包括了路况较好的公路、Z 字形爬坡路、丘陵道路、急转弯和陡坡等^[65, 66]。

2005 年, DARPA 举办了第二次沙漠越野挑战赛,比赛中 5 支队伍完成全程,本次赛程 212 公里,主要由 3 个窄隧道和 100 余个急转弯构成,资格赛分为 4 轮,以完成任务的总时间、通过的门数、避开障碍物的数目为考核指标,但是具体的比赛中只是以前两项进行排名,比赛考察了车辆在高速公路、沙漠和涵洞等复杂地形上的自主行驶能力,这对无人驾驶车辆通过主动式激光雷达和被动式的视觉感知系统对前方环境进行分析和决策提出了很高的要求。

2007 年,比赛环境转为模拟的城市道路,由 96.5 公里的城市交通环境构成,参赛车辆必须遵守交通规则,其他车辆、障碍物等发生碰撞,并需完成三项军事运输任务,比赛中还需要面对 GPS 屏蔽、下雨及雾中行驶等状况,完成全部任务的时间不得超过 6 小时,最终 6 个参赛队伍完成全程,CMU 大学的 Boss 以 4 时 10 分获得冠军。

澳大利亚于 2005 年举办了 Smart Demo 比赛,侧重于试验车辆主动安全领域的技术进展,如前向避碰警告、盲点监视、自适应巡航控制、车道偏离警告、夜视、辅助操纵、主动安全系统和拥塞控制系统等^[67]。

美国 2011 年举办的 GCDC (Ground Cooperation Driving Challenge) 比赛,利用车间距离等指标来评价无人驾驶车辆的智能行为^[68]。

同时,欧洲也开展了各种测试无人驾驶车辆智能行为的比赛。2006 年 5 月,以军方为背景的机器人汽车试验 ELROB(European Land-Robot Trial),共 20 个参赛队伍参加了在德国 Hammelburg 军方训练场举行的比赛,全程穿越 240 公里的沙漠,允许车辆以自主或遥控方式行驶。

2007 年, 面向城市环境的 C-ELROB 比赛设计了针对城市环境的多种场景, 用于考察无人驾驶车辆在未知环境中感知、导航和控制的能力, 要求参赛车辆能够在指定的未知环境中自动驾驶和采集相关指定信息。此后, 2008 年 6 月、2009 年 8 月、2010 年 5 月、2011 年 6 月, ELROB 继续举办了四次赛事, 比赛环境根据任务分民用和军用而不同, 每年交替进行^[69]。意大利帕尔玛大学车队, 与 2010 年 7 月 20 日从意大利帕尔玛出发, 开始州际挑战 (Intercontinental Autonomous Challenge), 历时三个月, 行程 13000 公里^[70]。谷歌公司于 2010 年 10 月 9 日在其官方博客宣布, 公司正在测试无人驾驶汽车, 已行驶 14 万英里^[71]。

美国国家标准研究院 (NIST) 试图建立 ALFUS (Autonomy Levels for Unmanned systems) 框架来测试评价基于人工独立度、环境复杂度和任务复杂度的智能系统自主水平^[72, 73, 74]。

Evans 在对无人驾驶车辆 XUV 和博弈系统深蓝进行分析后, 提出了一种通用的基于 Cost 分析的测试方法^[75]。

韩国国民大学的学者建立了基于 PC 和 CAN 卡的智能机器人的行为评价系统, 将若干传感器、执行器和控制器安装在机器人内部用来检测智能行为, 通过该评价系统, 可分析控制系统的实时操作^[76]。

国内无人驾驶车辆测评的发展也经过以研究单位为主的单方测试及其它机构为主的第三方测试两个阶段。

20 世纪 80 年代末国防科技大学、哈尔滨工业大学、沈阳自动化研究所等单位联合对国家“863”计划自动化领域智能机器人主题确定立项进行遥控驾驶的智能移动平台进行了相关研制与测试。同时, 南京理工大学、北京理工大学、国防科技大学、清华大学、浙江大学等重点高校也对国家部委“八五”和“九五”预研项目中的地面智能机器人技术进行研究与测试, 并确定研制自主式的无人驾驶平台演示验证系统。

2009 年 6 月, 我国首次出现了以第三方为主的测试。来自中国的西安交通大学、上海交通大学、北京理工大学、湖南大学、国防科技大学, 和来自意大利的帕尔玛大学等 10 余辆无人驾驶车辆参加首届中国智能车“未来挑战赛”。该比赛包括指定路线的规定动作测试 I 与规定动作测试 II、挑战性测试以及特色表演 4 部分。其中, 规定动作测试 I 包含无人驾驶车辆基本行驶能力两项测试任务; 规定动作测试 II 包含遵守交通规则情况下的交通信号、交通基础设施的识别以及障碍物自动避障等 5 项性能测试任务; 挑战性测试为指定路线、规定动作的综合测试和指定模拟交通场景内无人驾

驶车辆的行驶性能测试，特色表演主要由参赛车辆自由展示^[77]。

北京理工大学的熊光明等人，针对首届中国智能车“未来挑战赛”进行了测评研究，基于多平台多传感器，建立了全方向视频监视测试系统，并将基于 AHP 的模糊综合评价应用于参赛车辆的综合测评中^[78]。

2010 年 10 月，国家自然科学基金委员会主办了第二届中国智能车“未来挑战赛”，在为期 3 天的比赛中，各队进行了基本能力测试和复杂环境综合测试的角逐。其中，基本能力测试包括交通标志识别能力测试和基本驾驶能力测试。基本驾驶能力测试有曲线弯道行驶和定点泊车；复杂环境综合主要测试无人驾驶车辆在运动过程中识别交通标志、综合控制机动车、正确使用灯光等装置以及正确感知道路交通情况等各种能力。

2011 年 10 月，第三届中国智能车“未来挑战赛”（Future Challenge 2011）在鄂尔多斯市的城区道路上公开进行，赛程约 10 公里，不安排单项测试，共设置 8 个考点，考察了交通标志识别、障碍物避让、汇入有人驾驶车流和 U-Turn 等智能驾驶行为，目的是综合测试无人驾驶车辆的环境感知和智能驾驶行为等能力。中国智能车“未来挑战赛”的评价规则采用定性和人机结合的评判方法，在完成比赛用时最短的前提下，以行驶质量指标进行排名。

综上所述，无人驾驶车辆的研究在国内外均属于前沿内容，很多科研机构 and 高校纷纷运用各种新型技术研制功能各异的智能车，但是对于无人驾驶车辆本身所表现出的智能行为研究，尚且不足，并且缺少结合认知心理学对无人车辆智能驾驶行为进行的研究，在这一方面应得到重视。此外，在测试无人驾驶车辆智能行为中，虽然驾驶环境各异，但是基于复杂度的、系统的测试环境没有得到充分体现，并且缺少完备的测评体系及评分方法对无人驾驶车辆进行智能行为评定。本文正是基于这些不足，依据认知心理学的信息加工理论，通过有人驾驶行为机理探究和评价无人驾驶智能行为机制，为无人驾驶车辆的测评和研发提出新思想和新方法。

1.4 研究内容

从无人驾驶车辆的研究现状可知，一方面对无人驾驶智能行为基于认知心理学的研究已迫在眉睫，另一方面基于环境复杂度的测试环境设计、测评体系构建有待完善，因此，依托国家自然科学基金重大研究计划“视听觉信息的认知计算”的重点项目“无人驾驶车辆智能行为综合测试环境设计与测评体系研究”和培育项目“无

人驾驶车辆认知能力测试及验证环境设计与实现”，结合认知心理学和环境复杂度，从研究有人驾驶行为入手，为无人驾驶智能行为的研究提供有力依据和准则，根据历届中国智能车“未来挑战赛”的无人驾驶车辆比赛实况，提出更完备的无人驾驶车辆智能行为的测试环境和测评体系。

1.4.1 主要研究内容

本文以信息加工理论为依据研究无人驾驶智能行为，并根据刺激感知——判断决策——刺激解释的信息加工过程分阶段展开研究，将有人驾驶行为研究与无人驾驶智能行为研究相结合，分别分析其驾驶行为的形成和特性，结合通过交叉口、直线跟驰和避障三种典型工况中的驾驶行为，以有人驾驶行为特性为标准，对比研究无人驾驶智能行为特征，从而有针对性地设计无人驾驶车辆的测试环境和测评方法，为无人驾驶车辆的研发提供新思想，具体研究内容有如下五个方面：

(1) 有人驾驶行为与无人驾驶智能行为信息加工机理解析

围绕刺激感知——判断决策——刺激解释三个阶段对比解析有人驾驶行为与无人驾驶智能行为信息加工机理，分别基于建构学说和原型模式识别理论建立无人驾驶智能行为信息加工模型，结合已有知识，使未知刺激信息经过特征分析、确认而被识别，与原型模式近似匹配后输出刺激解释；将刺激库与知识库划分为 12 类驾驶行为对应的环境刺激和知识经验，选取通过交叉口、直线跟驰和避障三种典型工况中的驾驶行为进行研究。

(2) 有人驾驶行为与无人驾驶智能行为刺激感知研究

通过城市交通环境刺激库构成、刺激类和刺激元分布，建立基于图形熵的城市交通环境复杂度计算模型，将不同刺激组合的城市交通环境的复杂程度数值化，通过有人驾驶行为中脑力负荷与城市交通复杂度的影响分析，建立有人驾驶行为刺激感知回归模型，以此为依据确定无人驾驶车辆感知强度，并提出其传感设备应用配置及安装，最后根据无人驾驶车辆赛程考点的复杂度分布原则，设计无人驾驶车辆多复杂度测试环境。

(3) 有人驾驶行为与无人驾驶智能行为判断决策研究

采用框架式和产生式相结合的方法进行驾驶行为知识库表示，基于神经元动力学建立有人驾驶行为判断决策微观模型，将刺激感知作为输入，刺激解释作为输出。依据试验数据，对冲突车横向右转时的通过交叉口、前导车匀速-加速-减速-停车时的直线跟驰、静止车于同车道的避障三种典型工况中的驾驶行为，定量解析踏板行

程、车速、车辆偏距特性的有人驾驶行为效应，利用灰关联熵、粗糙熵、改进的 ID3 决策树算法，建立上述三种驾驶行为判断决策宏观模型，生成相应的判断决策规则表，通过试验数据验证模型有效性，提出无人驾驶智能行为判断决策工作机制。

(4) 有人驾驶行为与无人驾驶智能行为刺激解释研究

以有人驾驶行为判断决策宏观模型为基础，依次针对上述三种驾驶行为研究无人驾驶车辆智能行为的刺激解释，从行驶轨迹和决策两方面对比剖析有人与无人、无人与无人的驾驶行为特性，基于三角模糊数建立无人驾驶智能行为刺激解释的多级模糊综合评判模型，并利用正三角形法评判无人驾驶车辆单项驾驶行为。

(5) 无人驾驶车辆智能行为测评研究

围绕信息加工机理及刺激解释剖析，构建无人驾驶智能行为测评指标体系，分别确定贯穿刺激感知——判断决策——刺激解释三阶段的认知指标、知识指标、轨迹指标、决策指标、时效指标、交规指标和传输指标，依据无人驾驶车辆智能行为评分体系的建立原则，采用 AHP 熵权法确定各指标的权重，提出相对完备的无人驾驶车辆智能行为评分方案。

1.4.2 论文结构

本文研究内容的总体结构框架如图 1.1 所示。

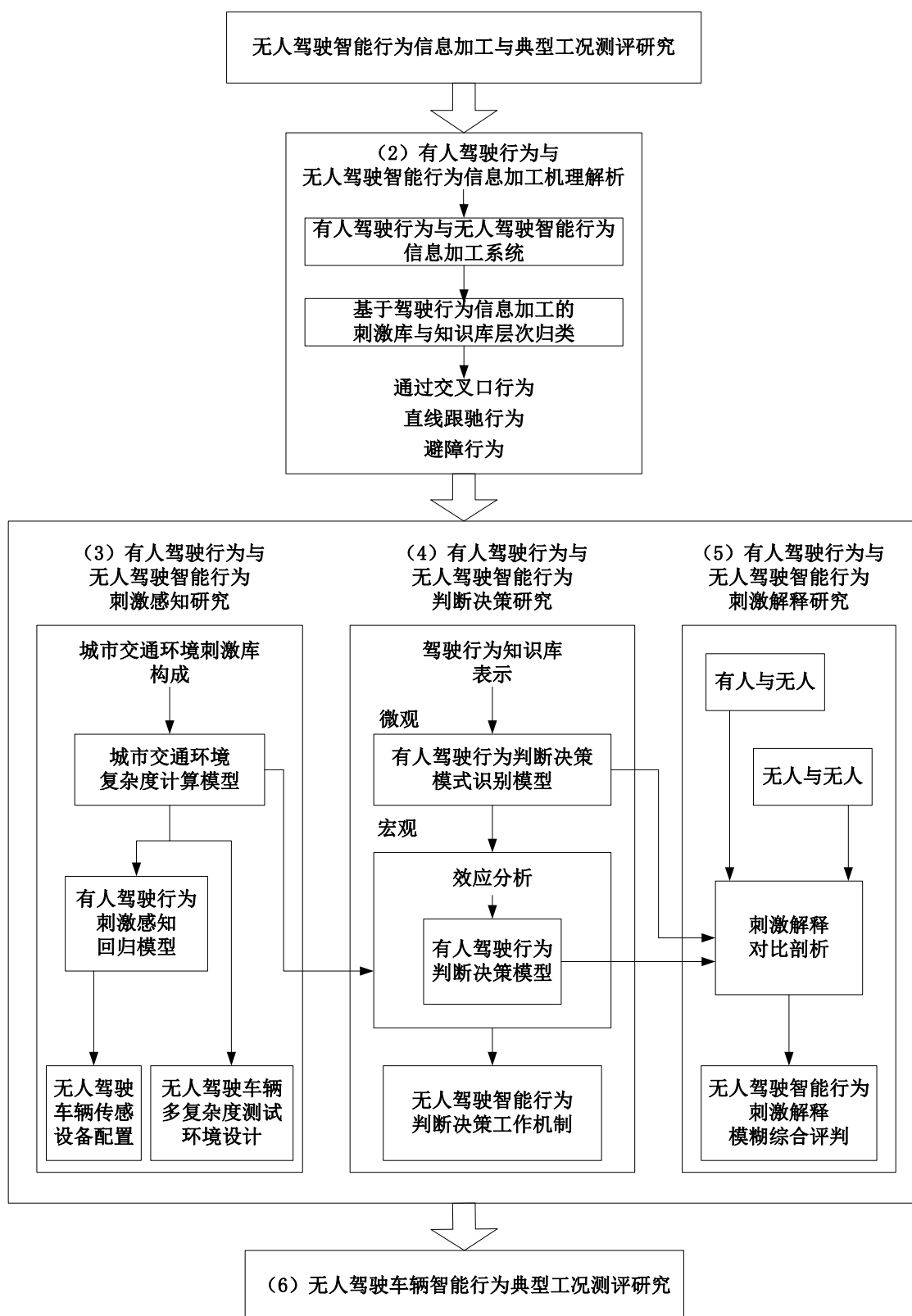


图 1.1 研究内容总体框架

第 1 章“绪论”，主要阐述本论文的研究背景与意义、国内外研究现状，并确定

研究内容和技术路线等。

第 2 章“有人驾驶行为与无人驾驶智能行为信息加工机理解析”，综述信息加工系统，基于建构学说和原型模式识别理论，建立无人驾驶智能行为的信息加工模型基于驾驶行为信息加工系统，将刺激库与知识库相应地分为 12 类。

第 3 章“有人驾驶行为与无人驾驶智能行为刺激感知研究”，根据城市交通环境刺激库构成，建立基于图形熵的城市交通环境复杂度计算模型，利用脑力负荷与城市环境复杂度的关系，建立有人驾驶行为刺激感知模型，并提出无人驾驶车辆感知强度确定及传感设备配置方案，从而设计多复杂度测试环境。

第 4 章“有人驾驶行为与无人驾驶智能行为判断决策研究”，构建驾驶行为知识库；建立基于神经元动力学的有人驾驶行为判断决策微观模型，依据试验数据，分别进行通过交叉口、直线跟驰、避障三种典型工况中的有人驾驶行为效应解析，采用灰关联熵、粗糙熵、改进的 ID3 决策树算法，建立三种驾驶行为的有人驾驶行为判断决策宏观模型，生成相应的判断决策规则表，提出无人驾驶智能行为判断决策工作机制。

第 5 章“有人驾驶行为与无人驾驶智能行为刺激解释研究”，依次针对通过交叉口、直线跟驰和避障三种典型工况中的驾驶行为，从行驶轨迹和决策两方面将有人与无人、无人与无人的驾驶行为进行深入对比分析，最后模糊综合评判无人驾驶智能行为，及单项驾驶行为的智能水平。

第 6 章“无人驾驶车辆智能行为测评研究”，根据无人驾驶智能行为刺激解释的分析结果，依据信息加工系统，构建智能行为测评指标体系，四个一级指标，十个二级指标，利用 AHP 法确定各指标的权重，提出相对完备的无人驾驶车辆智能行为的评分体系。

最后是“结论”，主要是对本研究成果的总结，以及创新点的归纳，并对后续研究方向和领域进行探讨。

第 2 章 有人驾驶行为与无人驾驶智能行为信息加工机理解析

基于认知心理学的信息加工理论，将有人驾驶行为过程被划分为刺激感知、判断决策和刺激解释三个阶段，从而建立无人驾驶智能行为信息加工系统，通过有人驾驶行为的信息加工研究，推导无人驾驶智能行为特性，为无人驾驶车辆的测评和研发奠定基础。

2.1 信息加工理论概述

狭义的认知心理学专指信息加工心理学（Information Processing Psychology）或信息加工论，是 20 世纪 50 年代末期产生的一种西方现代心理学思潮和研究取向，到了 20 世纪 60-70 年代成为心理学研究的主流，遍及心理学的大多数分支和许多国家的心理学研究领域。

信息加工理论不是侧重于了解人在认知活动时神经细胞活动的情况，而是侧重于在较高一级的系统抽象水平上研究人脑的信息加工，并把人的认知和计算机进行功能模拟，用信息加工的观点看待人的认知过程，认为人的认知过程是一个寻找、接受、加工、贮存和使用信息的过程^[79]。

信息加工的过程就是指一个认知系统（人脑或计算机）对输入到该系统中的物理符号进行操作，对这些符号进行选择、接受、储存、处理、提取、输出和传送等，随后利用经过处理的信息进行计划、决策并指导自己的行为的过程^[80]。

信息加工理论自产生以来发展迅速，不但在研究的对象、原则和方法上形成了独特的体系，而且在感知觉、记忆、表象、思维和语言等领域进行了大量的研究，取得了令人瞩目的成就。尽管众多认知心理学家在具体的研究内容和方法上有所不同，但是在认知心理学的研究对象和原则等问题上则比较一致。

(1) 以认知为心理学的研究对象。利用信息加工观点对人类的认知活动进行研究，主要包括感知觉、注意、记忆、表象、概念、推理、问题解决、决策、语言、认知发展和人工智能等研究领域。

(2) 把人看作信息加工系统。将人类看作近似于计算机信息加工系统是信息加工心理学的基本隐喻。虽然计算机的硬件和人脑的神经结构不同，但在计算机的程序所表现的功能和人的认知过程之间可进行类比，人脑和计算机都是信息加工系统。

(3) 强调知识对行为和认知活动的决定作用。不同于行为主义的环境决定论立场,信息加工理论强调已有知识和知识的结构对人类的行为和当前的认知活动的决定作用,力求揭示人类如何获取和利用知识的机制,以探究人类认知活动规律。知觉活动中,作为外部世界内化了的有关知识单元或心理结构的图式被激活,使人类产生内部知觉期望,指导感觉器官有目的地搜寻特定的信息。只有在环境信息与个体所具有的图式有关或适合进入这种图式的情况下,环境信息才有意义。

(4) 强调认知过程的整体性。信息加工理论强调各种心理过程之间的相互联系和相互制约。如在研究知觉时,知觉不仅需要各感觉器官的活动,而且需要对信息进行中枢加工,与过去的知识对照,进行综合分析,以确定知觉对象的意义。强调认知过程的整体性还意味着在研究认知的过程中,要揭示背景因素的影响。

(5) 强调产生式系统(Production System)。20世纪70年代初,纽厄尔和西蒙把计算机科学的术语“产生式系统”引入认知心理学,用以说明人在解决问题时的程序。他们认为,人的信息加工是通过产生式系统来实现的,产生式就是以“如果/那么”形式表达的条件-活动(Condition-Action, C-A)规则。例如,在鉴别三角形的过程中,“如果已知一个图形是两维的,且该图形有三条封闭的边,那么就识别此图形为三角形”。简单的产生式的结合会形成复杂的产生式系统。这种产生式系统对应于一个问题解决的程序,突出了认知活动的整体性、内在性和概括性。

信息是通过感觉系统被短暂地保存在原始的感觉形式中,经过控制系统,进入记忆(即处于信息存储)中,保存在长时记忆中的信息,被提取到短时记忆中,并且通过对问题的解决、决策等过程,完成当前任务^[81],如图2.1所示。

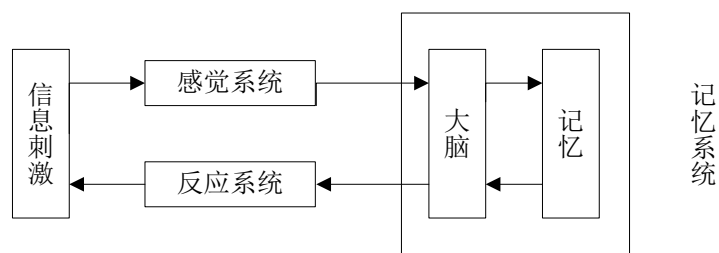


图 2.1 人脑信息加工模型

驾驶行为的产生也是一个完整的信息加工过程,驾驶人通过感觉系统进行刺激感知,通过记忆系统的配合完成匹配与决策,最后从反应系统输出相应的刺激解释。驾驶人对驾驶环境及自身车辆行驶状态的判断和决策,依赖于驾驶人自身存储的交通法律法规、车辆知识与驾驶经验等综合作用的结果,也依赖于这些刺激感知与贮

存在记忆系统中的知识容量大小^[82]。

2.1.1 感知觉基本概念

感觉是对刺激的觉察，知觉是对感觉信息的组织和解释，即获得感觉信息意义的连续信息加工过程，感觉是个体获得的此时此地的事实资料，知觉则是个体将感觉资料与经验联结而产生的组织，个体靠感觉接收到刺激，但决定其行为的则是知觉因素；感知觉是认识外部世界的起点，是认知的基础，为记忆、思维、想象等认知活动提供素材^[80]。

关于信息加工的知觉理论存在两种学说，一是经典的知觉建构学说，也称假设考验说，二是直接知觉学说，也称刺激物说。

建构学说的创始人 Bruner (1957) 和 Gregory (1970) 认为，知觉是一种包含假设考验的建构过程。通过接收信息，形成和考验假设，再接收或搜寻信息，再考验假设，直至验证某个假设，对感觉刺激作出正确的解释，这被称为知觉的建构理论。过去的知识经验主要是以假设、期望或图式的形式在知觉中起作用，依照这个学说，感觉刺激的物理特征、刺激的上下文和有关的概念都可激活长时记忆中的有关知识而形成各种假设。因此，知觉是以假设为纽带的现实刺激信息和记忆信息相结合的再造。知觉建构理论具主动性和智慧性，是目前在认知心理学中有相当大影响力的知觉理论，本文的研究紧密围绕知觉建构理论展开。

过去的知识经验主要是以假设、期望或因果的形式在知觉中起作用。人在知觉时，接收感觉输入，在已有经验的基础上，形成关于当前的刺激是什么，或者激活一定的知识单元而形成对某种客体的期望。知觉是在这些假设、期望等的引导和规划下进行的。H.von Helmholtz 认为来自感觉的不充分信息可因无意识推论而得到增强，无意识推论可对感觉信息追加一层意义。在此基础上，布鲁纳 (J.S.Bruner) 等发展建构理论，认为所有感知都受到人们的经验和期望的影响^[83]。建构理论的基本假设为：

(1) 知觉是一个积极的 (Active) 和建构的 (Constructive) 过程，它在某种程度上要多于感觉的直接登记，其他事件会切入到刺激和经验之中来^[84]。

(2) 知觉并不是由刺激输入直接引起的，而是刺激与内部假设、期望、知识以及动机和情绪因素交互作用的终极产品。

(3) 知觉有时可受到不正确的假设和期望的影响。因而，知觉也会发生错误。

建构理论关于知觉的看法是把记忆的作用赋予极大的重要性，先前经验的记忆

痕迹，加到此时此地被刺激诱导出来的感觉中去，因此构造出一个知觉象。建构论者主张有组织的知觉基础是从一个人的记忆中选择、分析并添加刺激信息的过程，而不是格式塔论者所主张的大脑组织的天生定律所引起的自然操作作用^[80, 85]。

2.1.2 模式识别原理

模式识别（Pattern Recognition）是信息加工理论中知觉研究的重点。模式是指由若干元素或成分按照特定关系组成的某种刺激结构。所谓模式识别就是对模式的觉察、分辨和确认的过程，即把接收的客观事物或刺激信息，与已有知识结构中的有关单元信息进行比较和匹配，从而辨认和确定该刺激信息意义的过程。信息加工心理学提出了一系列模式识别的理论或模型，其中有代表性的是以下三种：

(1) 模板匹配模型（Template matching model）。该模型认为，人的记忆系统中储存着各式各样的刺激物的模板，当输入的刺激信息正好与某一储存的模板相匹配，该刺激信息就得到破译和识别。

(2) 特征分析模型（Feature analysis model）。该模型认为，刺激信息的特征和对这些特征的分析在模式识别中起着关键性作用。首先对刺激信息进行特征分析，抽取有关的特征并确定这些特征之间的关系，然后再与长时记忆中储存的事物特征表进行比较，一旦获得二者之间的最佳匹配，该模式就获得准确识别^[86]。

(3) 原型匹配模型（Prototype matching model）。与模板匹配模型不同，原型匹配模型认为人在记忆系统储存的不是与外部刺激严格对应的模板，而是各种各样的原型的表征，只需要近似的匹配。原型是对某一类客观事物所具有的共同基本特征的概括和表征。

原型匹配模式识别是从特征分析开始的，模式的各个成分（即模式的特征）先得到确认，然后再确认各部分的关系，分为刺激觉察、具体的像、抽象表象三个过程，首先抽取刺激的特征，分析关系、模式解释，与知识记忆中的模板进行匹配，准确匹配后，将其分类、命名，最后进入记忆系统，如果匹配中丢失特征则根据反应倾向进行分类、命名，如果分类不成功就需要再分析，重新进行特征抽取，原型匹配模型显得更加灵活，更富有弹性，如图 2.2 所示。

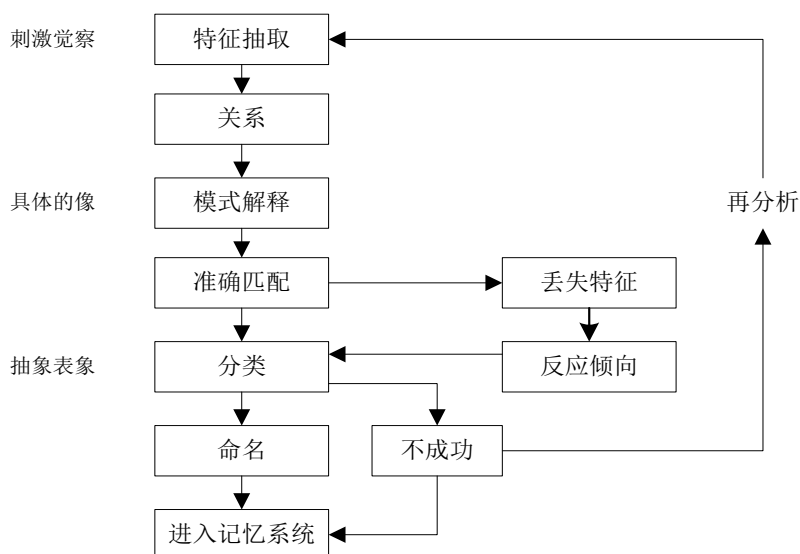


图 2.2 原型匹配模式识别

原型匹配模式识别中，外部刺激只需与原型进行比较，由于原型是一种概括表征，这种比较只需近似的匹配。即使某一范畴的客体之间存在外形、大小等方面的差异，所有这些客体也都可与原型相匹配而得到识别。这意味着，只要存在相应的原型，新的、不熟悉的模式也可识别。

2.2 有人驾驶行为信息加工机理

有人驾驶行为，是指驾驶人通过视觉、听觉等器官感知周围的交通环境，通过控制转向盘、加速踏板、制动踏板等及时调整车辆的方向、速度，并有意图地规划换道、超车等所体现的行为。

将驾驶人视为一个单通道的有限输送容量的信息加工系统，驾驶车辆过程中，驾驶人首先通过自己的感官（主要是眼、耳）从外界环境接收刺激信息，产生感觉（视觉、听觉等），然后经过大脑的综合反应产生知觉，即对刺激信息的综合认识，如目测距离、估计车速和时间等，最后结合驾驶人已有的经验予以加工判断，作出相应的决策，利用手脚等操控车辆改变其运动状态，车辆的速度、方向、位置等变化又会反馈给驾驶人，形成新一轮的信息加工过程。

图 2.3 为有人驾驶行为的信息加工系统，由刺激感知、判断决策、刺激解释三个阶段构成，首先，驾驶人依靠眼、耳、手等接收刺激信息，这些感官构成了一个感觉子系统，也称感受器。感知是由感受器、传导神经和大脑中枢加工器协同活动的结果，是驾驶人感受和分析某种刺激的整个神经装置。其次，感受器将获得的这

些刺激信息通过神经系统传送到大脑，在大脑的信息处理子系统中，也称中枢加工器，外界输入的刺激信息在大脑皮层及皮层下代表区进行分析和识别，产生对刺激信息的感知，从而进行匹配和决策。这些功能都需要贮存子系统中的长时记忆和短时记忆的参与，被处理加工后的信息就可以存入长时或短时记忆中。最后，信息处理系统发放输出信息，通过反应子系统中的手脚、语言等器官，即效应器，产生对车辆的操控，车辆的运动状态会直接作用于交通环境，形成新的刺激被驾驶人感知。在这一过程中，所有刺激信息的集合被称为刺激库，记忆中所有存储的知识和经验的集合被称为知识库。

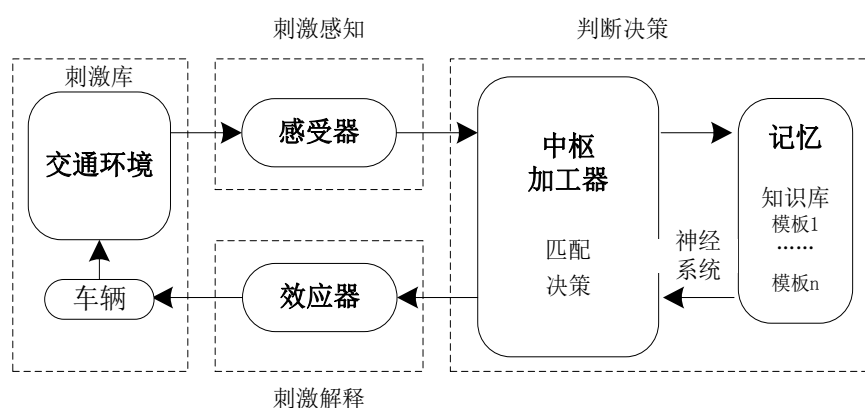


图 2.3 有人驾驶行为信息加工系统

有人驾驶行为实际上是往复不断的“刺激感知——判断决策——刺激解释”的过程，驾驶人通过其感官系统如视觉、触觉等感知车辆内外的各种信息，经大脑处理，并加以判断决策，将决策出的结果以操作手脚的方式解释出来。当下一时刻汽车的状态发生变化后，驾驶人再重复进行上述过程^[87]，刺激感知影响着判断决策，判断决策又制约着刺激解释。

其中，感受器是直接接受刺激产生神经冲动的装置，是一种生物学的换能器，通过传导神经与大脑中枢联系起来，将各种不同的刺激物能量转换成神经系统可传导的生物电能——神经冲动。驾驶人的感受器主要是眼睛、耳朵等器官，用来感受交通环境中的动静态刺激，并通过效应器（手和脚）来操作车辆的开关、转向盘和各种踏板。感受器与效应器发生关系和相互作用的过程中，本质的联系是信息交换，如图 2.4 所示。

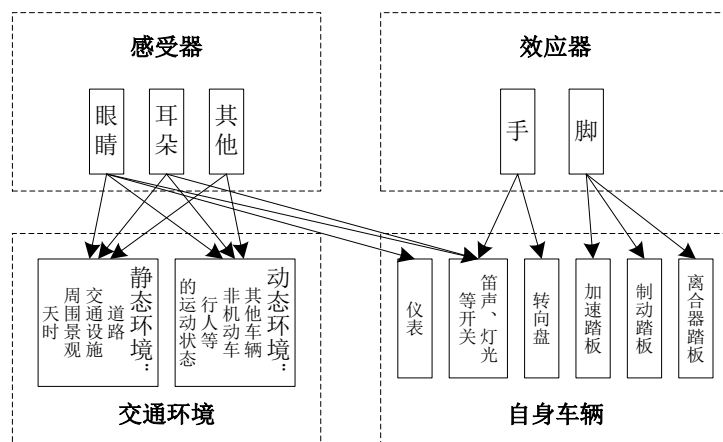


图 2.4 有人驾驶行为感受器及效应器的功效

驾驶人通过感受器对环境刺激进行感知，根据环境刺激和驾驶人个体特性的不同，感受器感知的时间也不同，进而完成驾驶任务的时间就不同。驾驶人的反应时间是从其感受器接收交通环境的刺激到效应器开始执行动作所经历的时间，反应时间的长短取决于环境刺激的性质、强度、数量等，及驾驶人的年龄、性别、心理素质、身体素质、疲劳程度等。比如针对制动行为，驾驶人开始制动前最少需要 0.4s 知觉——反应时间，产生制动效果需 0.3s 时间，共计 0.7s，时间的长短取决于驾驶人的生理素质、心理素质以及工作经验等。根据美国各州公路工作者协会规定，判断时间为 1.5s，制动时间为 1s，故完成制动行为，到制动发生效力全部时间通常为 2.5~3.0s。

2.3 无人驾驶智能行为信息加工机理

2.3.1 无人驾驶智能行为的信息加工系统

无人驾驶智能行为，是指无人驾驶车辆通过车载传感器及其它智能设备^[51]发挥人的视听觉器官效能，感知车辆周围环境，并根据感知所获得的道路、车辆位置和障碍物等环境刺激，智能地作出决策，实时控制车辆的转向和速度，使得车辆能够安全、可靠地在道路上行驶所体现的行为^[88]。

图 2.5 是无人驾驶智能行为信息加工系统，同样由刺激感知、判断决策、刺激解释三个阶段构成，无人驾驶车辆依靠视觉、听觉、触觉等传感器接收刺激信息，这些传感器将获得的刺激信息通过总线协议传输给 ECU。在 ECU 中，传入的刺激信息被识别，作出相应的决策，这些功能同样需要存储设备的知识库参与。最后，

信息加工系统输出刺激解释，通过控制器执行相应的动作，从而控制无人驾驶车辆的运动。

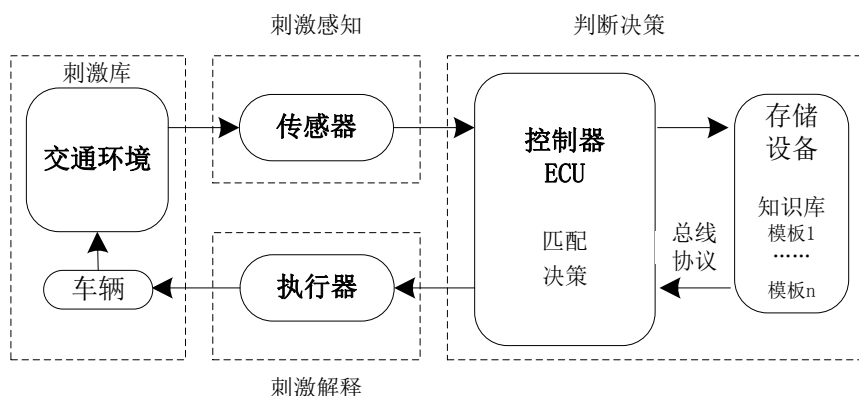


图 2.5 无人驾驶智能行为信息加工系统

因此，无论是有人驾驶还是无人智能驾驶，每一种驾驶行为都是由刺激感知、判断决策、刺激解释三个阶段来完成，但由于有人驾驶与无人智能驾驶信息加工的工具和方式不同，导致了驾驶行为在这三个阶段中的本质区别，如表 2.1 所示。

表 2.1 有人驾驶行为与无人驾驶智能行为信息加工对比

	有人驾驶行为	无人驾驶智能行为
刺激感知	小范围、不精确、有针对性	大范围、精确、无针对性
判断决策	知识综合运用能力较强、 速度较快、 准确性较高、 灵活性较强、 自学习性较强、 记忆随时更新和积累	知识综合运用能力较弱、 速度较慢、 准确性较低、 灵活性较弱、 自学习性较弱、 存储设备更新不及时
刺激解释	动作执行较慢、协调性强	动作执行较快、协调性较弱

刺激感知阶段，驾驶人由于受到自身视听觉等局限性，只能小范围内进行感知，且精度不高，但是可有针对性地筛选刺激信息、区分主次；而无人驾驶车辆依据车载传感器等设备能够大范围、精确地感知刺激信息，但是对刺激信息的取舍缺乏针对性。

判断决策阶段，驾驶人可综合运用知识、经验、和法规等作出判断和决策，且速度较快、准确性较高，在面临突变或复杂交通环境时也可灵活地处理，由于自学习性较强，能够不断从驾驶过程中获取新的知识、积累新的经验，因此记忆得到及

时的更新，驾驶技能不断提高；而无人驾驶车辆综合运用知识的能力较弱，不能很好地结合知识和法规做出判断和决策，且速度较慢、准确性较低，在面临突变或复杂交通环境时，由于存储设备中模板有限，不能灵活处理，并且自学习性较弱，只能定期地人为地通过更新存储设备来增加其驾驶知识和经验。

刺激解释阶段，驾驶人将判断和决策反应到手脚等效应器官需要时间较长，因此动作执行较慢，但各器官的协调性较好；而无人驾驶车辆在得出判断决策后反应时间相当之短，动作执行较快，但是协调性较弱。

2.3.2 基于建构学说的无人驾驶智能行为信息加工模型

依据 Bruner (1957) 和 Gregory (1970) 提出的知觉建构学说^[85]，也称为假设考验说，与信息加工系统相结合，更加深入地解释对刺激信息的加工过程。知觉建构学说认为，对刺激信息的识别是典型的知觉过程，依赖于已有的知识经验，不仅能够识别各种不同的交通环境模式，而且能够识别与其相似的模式，对输入刺激信息的变异或畸变具有很大的适应性。

建构学说是建立在过去经验基础上的知觉理论。外部刺激与知觉经验并没有一一对应关系，同一刺激可引起不同的知觉，不同的刺激又可引起相同的知觉。输入的刺激信息是模糊的和片断的，不能对外部刺激提供真实而完整的描述，需要在过去经验的基础上，作出推断，进行评价或解释，才能实现对外部刺激的感知。感知是定向、抽取特征，与记忆中的知识相对照，然后再定向、再抽取特征并再对照，如此循环，直到确定刺激信息的意义。

图 2.6 是基于建构学说的无人驾驶智能行为的信息加工模型，粗箭头所指部分体现了建构学说的精髓。首先从交通环境中获取刺激信息（刺激元），初步形成某种假设，然后，ECU 对先前的假设进行考验，与存储设备中的模板进行匹配，若不够准确则再次接收信息、形成假设、考验假设，如此反复，直到验证某种假设，得到最佳匹配，最后输出正确的解释。

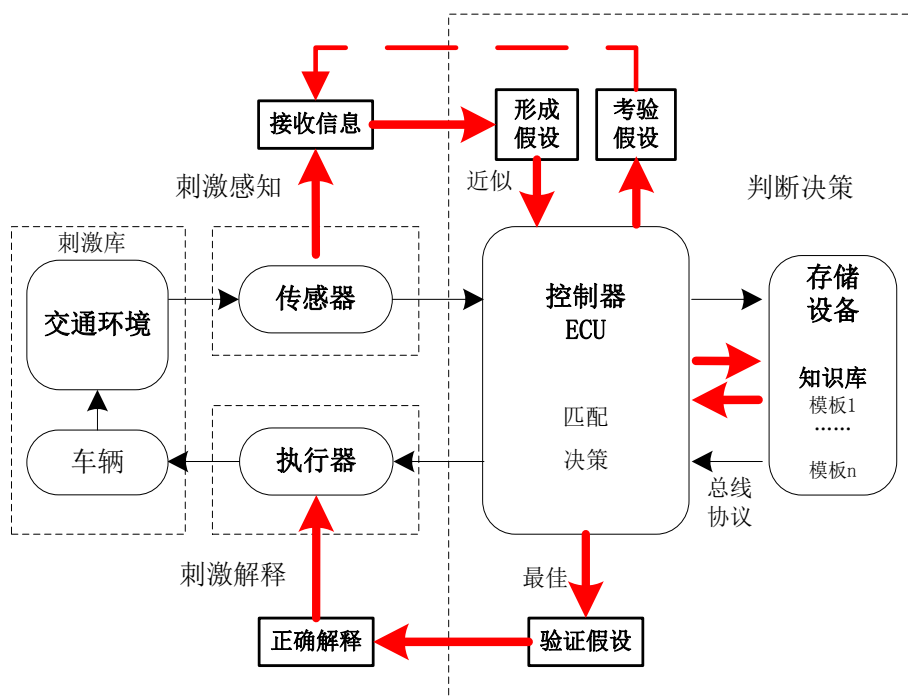


图 2.6 基于建构学说的无人驾驶智能行为信息加工模型

对于简单的交通环境来说，信息加工的时间较短，随着交通环境复杂程度的增加，刺激感知的对象增多，与知识库的模板进行匹配的内容增多，影响判断决策的因素增多，相应地信息加工的时间也就变长。

刺激感知、判断决策和刺激解释三个阶段不断循环反复的过程实际上就是驾驶车辆的过程，建构学说使无人驾驶智能行为的信息加工过程更加清晰明了，提供了新的无人驾驶车辆控制策略。

2.3.3 基于原型模式识别的无人驾驶智能行为信息加工模型

原型模式识别的实质是对各式各样的原型表征进行近似匹配，首先要对刺激进行特征提取，概括出某类刺激所具有的共同基本特征，并提取出知识库现存模板相同的成分，进行近似匹配，即可完成识别过程。

图 2.7 是基于原型模式识别的无人驾驶智能行为信息加工模型。通过对接收刺激信息的特征提取，经过调用存储设备中的知识模板进行匹配和决策，得到一种准确匹配，经过对匹配结果分类，命名最后进入知识存储，若不成功，则需重新进行特征提取，再匹配；若准确匹配的结果出现特征丢失，则需进行反应倾向后，再分类，以致最终进入知识库。

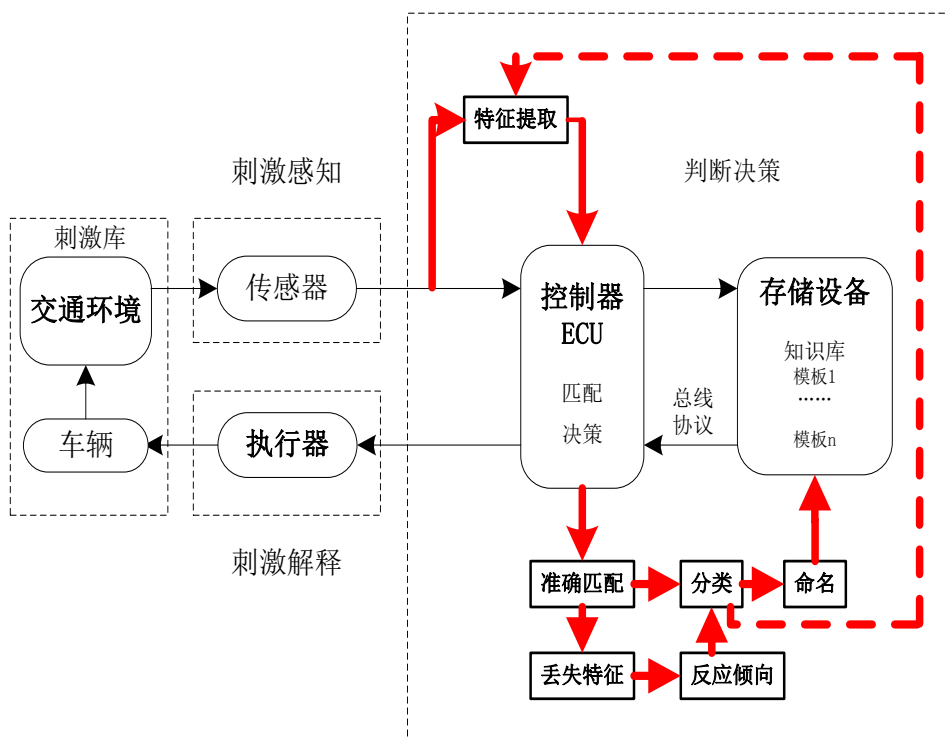


图 2.7 基于原型模式识别的无人驾驶智能行为信息加工模型

模式识别从特征分析开始，模式的各个成分（即模式的特征）先得到确认，然后再确认各部分的关系。外部刺激与原型进行比较，只需近似的匹配，只要存在相应的原型，新的、不熟悉的模式也可被识别。

无人驾驶车辆通过车载传感设备等电子装置进行感知和决策，这些机器的感知和决策能力具有很大局限性，原型模式识别很好地解决了这个问题，只需近似匹配，就可完成对刺激信息的识别以及寻找知识库中近似的模板，使感知和匹配更加灵活，富有弹性。基于原型模式识别的无人驾驶智能行为信息加工模型，揭示了驾驶过程的模板匹配流程，以及知识库中新模板的建立方法，可有效提高无人驾驶车辆的感知和决策能力。

2.4 基于驾驶行为信息加工的刺激库与知识库层次归类

根据有人驾驶行为和无人驾驶智能行为的信息加工系统可知，感受器或传感器感知来自外界环境的刺激信息，这些刺激信息接着被传送到中枢加工器或控制器中，与记忆或存储设备的知识与经验进行匹配和决策，最后从效应器或执行器输出。由此，刺激信息是信息加工系统的前提，而知识与经验是信息加工系统的根本，换言之

之，刺激库与知识库的存在保障了有人驾驶行为和无人驾驶智能行为信息加工系统的进行和往复。

首先将驾驶行为作如下层次分类，共 12 类，其中，每一类行为都要经过刺激感知、判断决策、刺激解释来完成，如图 2.8 所示。

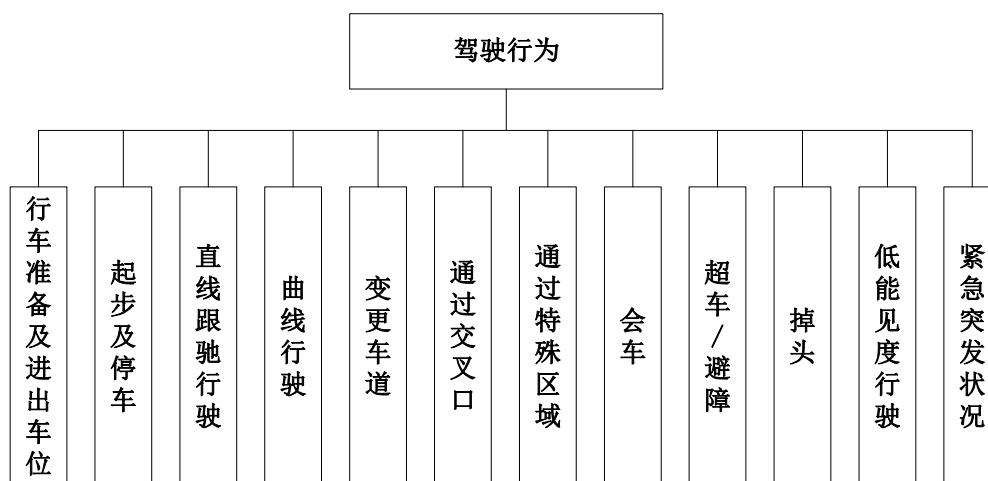


图 2.8 驾驶行为归类

- (1) 行车准备及进出车位：起步前需要做好车辆的安全检查，顺利进出车位。
- (2) 起步及停车：顺利安全起步，包括上坡起步、下坡起步，并视交通情况按交通信号标志及指挥临时停车。
- (3) 直线跟驰行驶：保持直线行驶在所在车道内，并准确控制速度、纵向距离和横向距离。
- (4) 曲线行驶：保持曲线行驶在所在车道内，并准确控制弯道行驶速度、纵向距离和横向距离。
- (5) 变更车道：首先观察目标车道的车流情况，并开启转向灯，躲避障碍，再选择合适时机驶入目标车道。
- (6) 通过交叉口：减速驶入信号灯控制交叉口或无控制交叉口，根据实时交通流改变速度、方向，以至驶出交叉口，汇入目标车道的车流。
- (7) 通过特殊区域：包括通过人行横道、学校、居民区、公共汽车站等。
- (8) 会车：包括窄路或城区街道上会车。
- (9) 超车/避障：当无法继续沿所在车道行驶或所在车道上无法满足期望行车速度，同时超车道存在足够的空闲路面时，首先观察相邻车道的车流情况，选择合适时机驶出原车道，然后在观察原车道的车流，最后顺利返回原车道，包括超越

停放车辆、低速车辆或前车有情况时强行超越。

(10) 掉头：包括在设有隔离设施允许掉头或无隔离设施允许掉头的路段掉头。

(11) 低能见度行驶：在视线不良条件下行驶，如夜间、恶劣天气。

(12) 紧急突发状况：针对突发情况需要采取安全的举措，包括前车突然减速停车，或突然出现行人、自行车及横向行驶车辆。

相应地，根据这 12 种驾驶行为类型，刺激库就是 12 种驾驶行为对应的 12 种环境刺激的集合，知识库就是 12 种驾驶行为对应的 12 种知识经验的集合，每一种驾驶行为的完成都依赖于相应的环境刺激与知识经验，如图 2.9 所示。



图 2.9 基于驾驶行为的刺激库与知识库层次归类

本文针对其中 3 种基本驾驶行为进行信息加工研究，即通过交叉口、直线跟驰和避障三种典型工况，其中，通过交叉口行为的研究集中于试验车遇横向右转冲突车的驾驶行为；直线跟驰行为的研究集中于前导车匀速、加速、减速和停车时试验车的驾驶行为；避障行为的研究集中于试验车避让停止在所行车道上静止车的驾驶行为。

2.5 本章小结

结合信息加工论，深入分析了有人驾驶行为的产生和刺激感知过程，以此为依据，建立了无人驾驶智能行为信息加工系统，对比剖析了有人与无人驾驶行为信息加工的优缺点；分别基于建构学说和原型模式识别建立了无人驾驶智能行为信息加工模型，前者将刺激信息形成假设，不断地与已有知识进行考验和匹配，后者通过

对刺激信息的特征提取，只需完成近似匹配，准确输出未知刺激的匹配结果，为无人驾驶车辆的研发提供新思想。根据对驾驶行为归类，将有人驾驶行为和无人驾驶智能行为信息加工系统中的刺激库和知识库分别划分了 12 种类型，后文针对其中直线跟驰行驶、通过交叉口、和避障三种典型工况中的驾驶行为进行信息加工研究，为无人驾驶智能行为的感知和决策奠定基础。

第 3 章 有人驾驶行为与无人驾驶智能行为刺激感知研究

驾驶行为的刺激感知来自交通环境，而交通环境是作用于道路交通参与者的所有外界影响与力量的总和^[89]，包括道路状况、交通设施、地物地貌、气象条件，以及其他交通参与者的交通活动等，由于 80% 以上的交通环境刺激来自于视觉，本文仅以视觉刺激为研究对象。不同复杂程度的交通环境会产生不同的刺激感知，有必要依据有人驾驶行为及无人驾驶智能行为信息加工模型，分析交通环境要素及复杂程度，这里主要分析城市交通环境刺激感知阶段的理论及应用，并初步建立城市交通环境刺激库的动静态构成。

3.1 城市交通环境刺激库构成

城市交通环境在整个交通环境中最具代表性，要素多，组合千变万化，具有复杂、不可预测的动态特性，不仅考验了驾驶人的驾驶技能和应变能力，而且对无人驾驶车辆关键技术在实际城市交通环境中的应用具有典型性。不同类型的交通环境具有不同的特征内涵，对无人驾驶车辆也提出了不同的认知要求，复杂的城市交通环境包括结构化的道路、交通信号、交叉路口、行人、车辆等，就要求无人驾驶车辆具有识别并遵守交通信号、标志及其它车辆正确交互等能力。

城市交通环境囊括了很多种类的事物和人物，为了使城市交通环境的归类层次清晰，作出如下定义。

刺激元，也称刺激要素，是交通环境中级别最小的个体，如禁止标线、车辆、花草等，某种程度上能够被驾驶人感知到的一种刺激实体；若干刺激元构成刺激类，如道路、道路附属设施等；部分刺激类或刺激元有机地组合在一起，便形成了城市交通环境，如由“十字交叉口的城市道路+交通信号灯+左转交通标志+过街的行人+前方同车道行驶的车辆”构成的刺激组合。任何一种城市交通环境既可以由刺激类组合而成，也可以由刺激元直接组成，也可以是由两者混合组成，可以由不同刺激类的一个刺激元组成，也可以由同一刺激类的多个刺激元组成。组合而成的城市交通环境不同，其复杂程度也不同，并具有瞬时性，随着车辆的前进，城市交通环境中刺激类或刺激元也不断地发生变化。若干种城市交通环境就构成了刺激库，如图 3.1 所示。

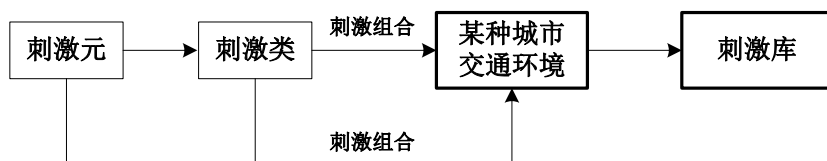


图 3.1 城市交通环境刺激库构成

根据本文 2.4 节提出的 12 类驾驶行为，刺激库包含这 12 类典型驾驶行为所对应的交通环境。首先将城市交通环境分为：静态城市交通环境和动态城市交通环境。静态城市交通环境是指无运动物体的通过视觉可以感受到的区域环境，如道路类型、建筑物等；动态城市交通环境是指一切可能对自身车辆的行驶形成威胁的运动体，如相同车道上的前车突然减速等。某种城市交通环境，就是由相应的静态刺激组合和动态刺激组合构成。

图 3.2 是常见城市交通静态环境构成，按照公路工程技术标准及城市道路规范，将常见城市交通静态环境分为道路、交通设施、周围景观、天时四个一级刺激类，一级刺激类还下分为二级刺激类、三级刺激类，或直接由刺激元构成。按相关规则组合各刺激类或刺激元，研究各种城市交通环境的刺激组合，形成无人驾驶车辆的测试环境，以实现复杂环境的准确模拟。

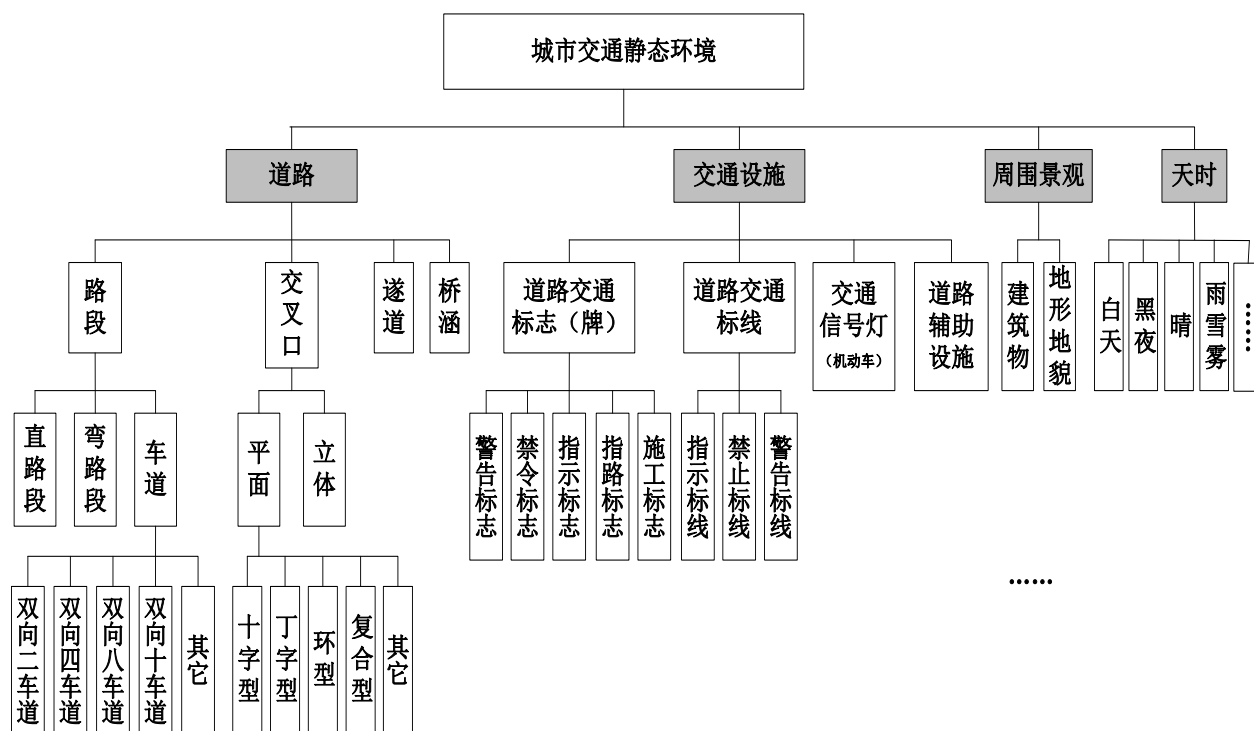


图 3.2 城市交通静态环境构成

道路是静态城市交通环境的核心，分为路段、交叉口、隧道、桥涵四个二级刺激类；路段包括直路段、弯路段、机动车道数。

交通设施作为意义性交通环境，是赋予它一定意义后才对交通起作用的，包括道路交通标志（牌）、道路交通标线、交通信号灯、道路辅助设施四个二级刺激类；继续下分若干刺激元。

周围景观是指路侧的建筑物等，主要由建筑物和地形地貌两种刺激元构成。

天时是交通环境中不可忽视的刺激类，天气和时间的变化都会严重影响驾驶行为，由四种刺激元：白天、黑夜、晴、雨雪雾构成。

图 3.3 是常见城市交通动态环境构成。动态环境的核心是交通实体运动状态的描述，将其主要归成五个刺激类：自身车辆行驶状况，和自身车辆外的机动车、非机动车、行人、声音。通过这五个刺激类可以较全面的描述动态交通实体的大小、形状、远近及方位等。本文对动态交通环境刺激元的归类是以自身驾驶车辆（本车）为参照物，刺激类中的行驶方向、相对位移均是参照自身车辆的相对量。

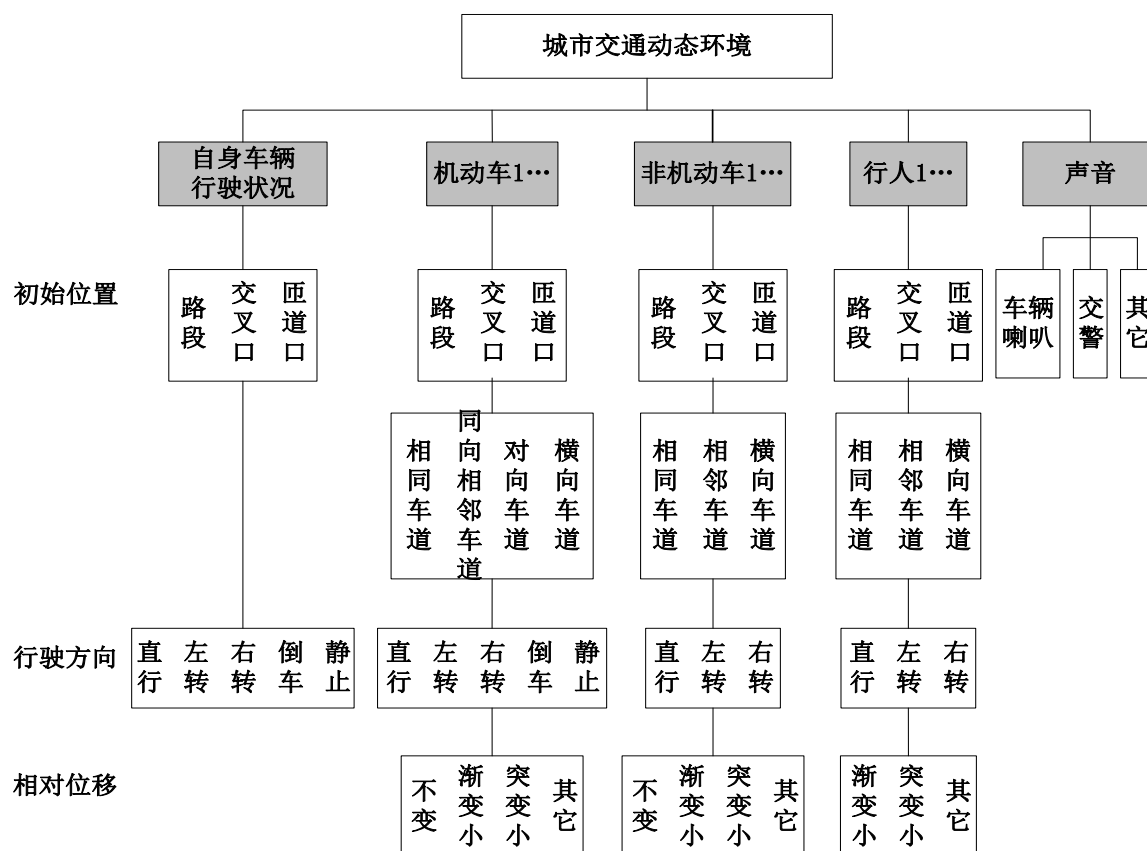


图 3.3 城市交通动态环境构成

除自身车辆行驶状况外，机动车、非机动车和行人等其他道路参与对象，是城市交通动态环境的关键，具有瞬时性、可变性，其运动状态直接影响自身车辆的驾驶行为。因此，城市交通环境分析以动态环境为重点。

3.2 城市交通环境复杂度计算模型建立

无论是有人驾驶还是无人智能驾驶，都要行驶在交通环境中，而交通环境的刺激元变化莫测、数不胜数，同时，驾驶行为又依赖于交通环境刺激，否则就会产生安全隐患。只有对环境刺激及其复杂性有正确的认知及决策，并依据车辆状况准确操作才能保障车辆高效安全运行。因此从城市交通环境入手，研究城市交通环境的复杂程度，规范驾驶行为，实现提高交通安全及效率的目标。

不同的城市交通环境刺激组合，体现不同的复杂程度，驾驶人也会采取不同的驾驶行为来保障安全，这种复杂性是多种刺激综合作用的结果，同时对无人驾驶车辆关键技术也提出了不同的要求，是评价无人驾驶车辆智能性高低的根本，城市交通环境复杂度是一个综合性衡量指标，是城市道路复杂程度的量化。这种复杂程度与环境刺激的平均信息量有关，这就涉及信息熵的相关理论，这里先通过信息熵的理论分析，再讨论基于图形信息熵的城市交通环境复杂度计算模型的建立。

3.2.1 信息熵理论

1948年，香农(C.E.Shannon)在论文《A Mathematical Theory of Communication》中采用概率统计的方法对通信系统进行了研究，揭示了通信系统传递的对象是信息，用不确定性来定义信息，并对信息进行了定量的描述，提出了熵的概念^[90]。

信息论(Information Theory)利用概率论与数理统计的方法研究信息的度量、传递和变化规律的科学，主要研究通信和控制系统中普遍存在的信息传递的共同规律，以及研究最佳解决信息的获限、度量、变换、储存和传递等问题的理论基础。

由于信息论的研究内容极其广泛，可以将信息论定义为：狭义信息论、一般信息论和广义信息论。狭义信息论也称基本信息论，主要研究信息的度量、信道容量以及信源编码等问题；一般信息论也称通信理论，主要研究通信中信号与噪声理论、信号过滤与检测、调制制度、抗干扰编码以及信息处理等一般理论；广义信息论其内容不仅包括上面所述的两个方面，而且还包括与信息有关的其他领域^[91]。

依据香农的理论，信源发出的消息是随机的，接收者对收到的消息不可预知，

这种不确定性是客观存在的，消息的传递是消除信息不确定性的过程，即接收者从不确定到确定的过程。因此，定义获得某消息的信息量，就是信息不确定度的减少量，是收到信息之前关于某事件发生的不确定度与收到信息之后关于该事件发生的不确定度之差。

如果信息在传递中没有产生任何差错，可完全不失真地接收信源所发生的信息，即收到信息后对该事件发生的不确定度为零。

设单符号离散信源 X 输出信息 x_i 的概率为 $p(x_i)$ ，则信息量 $I(x_i)$ 定义为：

$$I(x_i) = \log_2 \frac{1}{p(x_i)} \quad (3.1)$$

信息熵被定义为整个离散信源各个消息的信息量的数学期望，即概率加权的统计平均值，记为 $H(x)$

$$H(x_i) = \sum_{i=1}^n p(x_i) \log_2 \frac{1}{p(x_i)} = - \sum_{i=1}^n p(x_i) \log_2 p(x_i) \quad (3.2)$$

借鉴了热力学中熵的定义，信息熵用来衡量离散信源的平均不确定度，当且仅当信源各符号等概率分布时取得最大值

$$H(X) \leq H\left(\frac{1}{n}, \frac{1}{n}, \dots, \frac{1}{n}\right) = \log_2 n \quad (3.3)$$

以 2 为底的信息量的单位是比特 (bit)，以 2 为底的信息熵的单位是比特 (bit)/符号，本文中所涉及的熵运算都是以 2 为底的对数形式。信息量 $I(x_i)$ 表示信息 x_i 发生的不确定性，即信息 x_i 所含有或所提供的信息量， x_i 发生的概率越小，其信息量越大；熵 $H(x_i)$ 表示信息的平均不确定度，当信源概率分布给定时，是一个确定量。

条件熵 $H(X|Y)$ 表示已知 Y 的情况下， X 仍然存在的平均不确定度，用联合概率加权的统计平均值来计算

$$H(X|Y) = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n p(x_i y_j) \log_2 I(x_i | y_j) = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n p(x_i y_j) \log_2 \frac{1}{p(x_i | y_j)} \quad (3.4)$$

平均互信息量 $I(X, Y)$ 表示刺激信号 Y 所能提供的关于 X 的信息量的大小

$$I(X, Y) = H(X) - H(X|Y) \quad (3.5)$$

因此，采用熵的计算方法度量城市交通环境刺激信息，可从一定程度上可克服城市交通环境中刺激元复杂繁多、不易计算的缺点，实现城市交通环境复杂度计算。

3.2.2 基于图形信息熵的城市交通环境复杂度计算模型

为了计算城市交通环境的复杂度，设城市交通环境复杂度为 C ，由静态环境复杂度 C_1 和动态环境复杂度 C_2 构成，即

$$C = \alpha C_1 + \beta C_2 \quad (3.6)$$

式中，

α ——城市交通静态环境的权重；

β ——城市交通动态环境的权重。

依据图 3.2，建立城市交通静态环境复杂度的计算方法

$$C_1 = \theta_1 \times (\alpha_1 \sum X_1 + \alpha_2 \sum X_2 + \alpha_3 \sum X_3 + \alpha_4 \sum X_4) \quad (3.7)$$

式中，

X_1 ——待求城市交通环境道路类中刺激元的总量值，由专家打分法给定；

X_2 ——待求城市交通环境交通设施类中刺激元的总量值，由专家打分法给定；

X_3 ——待求城市交通环境周围景观类中刺激元的总量值，由专家打分法给定；

X_4 ——待求城市交通环境中天时类中刺激元的总量值，由专家打分法给定；

α_1 、 α_2 、 α_3 、 α_4 ——分别是交通环境刺激类 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 相应的权重；

θ_1 ——城市交通静态环境复杂度系数。

选取 20 位具有丰富驾驶经验的专家进行刺激元和刺激类的打分，满分均为 100 分，通过计算平均值，来量化各刺激元的量值及各刺激类的权值，并为每个刺激元确定编号，刺激元的难易分值即量值，因此，城市交通静态环境刺激元量值，见附录 A，城市交通静态环境刺激类权值，见附录 B。

根据待求城市交通静态环境中所出现的同一刺激类所对应的量值累加，即可得到具体的 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 的值。

城市交通静态环境复杂度系数 θ_1 是整个模型的关键，根据一阶信息熵的物理意义，来求解 θ_1 。熵是复杂程度的量度，其计算公式为^[92]：

$$H = -\sum_{i=1}^h p_i \log p_i \quad (3.8)$$

图形信息熵，简称图形熵，被广泛用于复杂度的计量，信息要以图形结构呈现，根据图形计算出熵值，便可求出复杂度，图形一阶熵通常表示系统逻辑结构的复杂程度，计算中，把图形结构中的节点按照具有相同输入、输出个数的原则进行分组，

图中相似类型的节点越多,分的组数就越少,一阶熵值就越小,复杂度就越小^[93, 94]。根据图形熵的定义,城市交通环境中出现要素的不确定性越大,其所需要的信息量就越大,熵值就越大,即城市交通静态环境越复杂混乱,其熵值越大。

首先计算待求城市交通静态环境的复杂度,将待求城市交通静态环境中出现的刺激类或刺激元,按图 3.2 转换为相应的图形结构,并计算其图形结构的一阶熵。在一阶熵的计算中,需要把图中的节点按照具有相同输入、输出个数的原则进行分组,图中相似类型的节点越多,分的组数就越少,逻辑上就越规范,一阶熵就越小,其中,每组出现的概率为组内节点数与节点总数的比值。最后便得到城市交通静态环境复杂度系数 θ_1 , 即

$$\theta_1 = -\sum_{i=1}^h p_i \log_2 p_i \quad (3.9)$$

式中:

h ——分成的组数;

p_i ——每种环境构成中出现要素的概率,即组内节点数与节点总数的比值。

由此计算得出的 θ_1 , 就是该刺激组合的一阶图形熵,反映了待求城市交通静态环境的逻辑复杂程度,这与刺激元总数、刺激类总数、同刺激类重复次数、同刺激元重复次数等有重要关系,当所有独立刺激出现的概率相等时,熵值最大。

同理,城市交通动态环境复杂度的计算模型为

$$C_2 = \theta_2 \times (\beta_1 \sum Y_1 + \beta_2 \sum Y_2 + \beta_3 \sum Y_3 + \beta_4 \sum Y_4 + \beta_5 \sum Y_5) \quad (3.10)$$

式中,

Y_1 ——自身车辆行驶状况类的总量值,由专家打分法给定;

Y_2 ——机动车类的总量值,由专家打分法给定;

Y_3 ——非机动车类的总量值,由专家打分法给定;

Y_4 ——行人类类的总量值,由专家打分法给定;

Y_5 ——声音类的总量值,由专家打分法给定。

β_1 、 β_2 、 β_3 、 β_4 、 β_5 ——刺激类 Y_1 、 Y_2 、 Y_3 、 Y_4 、 Y_5 相应的权重。

同样,由 20 位具有丰富驾驶经验的专家进行刺激元和刺激类的打分,通过计算平均值量化各刺激元的量值及各刺激类的权值,刺激元的难易分值即量值,因此,城市交通动态环境刺激元量值,见附录 C。

城市交通动态环境复杂度系数 θ_2 ，与自身车辆行驶状况、机动车、非机动车、行人、声音这五种刺激类有关，依据图 3.3，构造动态环境的图形结构，根据图形一阶熵定义，则

$$\theta_2 = -\sum_{i=1}^k p_i \log_2 p_i \quad (3.11)$$

通过计算图形一阶熵的方法，建立城市交通环境复杂度计算模型，克服了环境刺激元复杂繁多、不易计算的缺点，可有效求得待求城市交通环境的复杂度，为驾驶行为的研究奠定基础。

3.2.3 “未来挑战赛” FC'2011 某考点处交叉口环境的算例

以 FC'2011 某考点处交叉口为例，计算其城市交通环境复杂度，该交叉口是典型的十字型交叉口，车道相对较宽，路段 1 入口单向设有 5 个机动车道，其中 1 个专左车道，1 个专右车道，3 个直行车道；路段 3 入口单向设有 4 个机动车道，如图 3.4 所示。

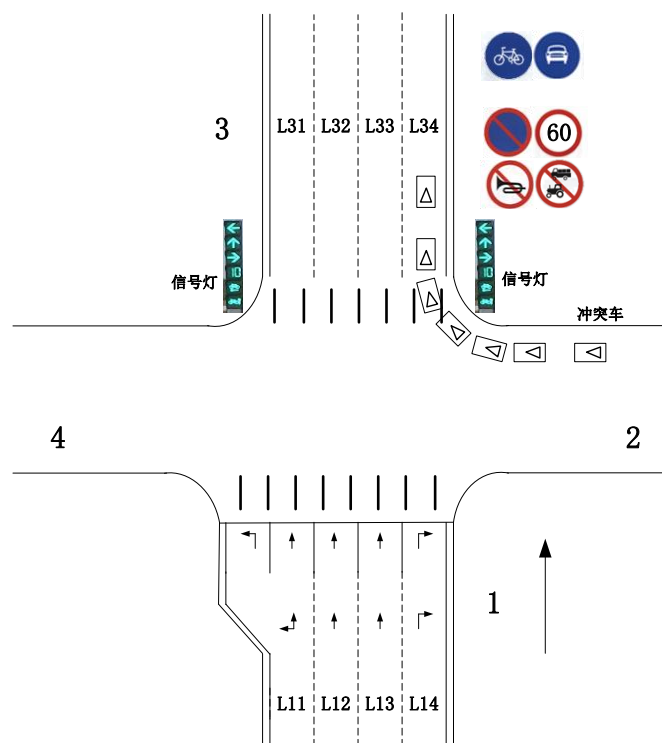


图 3.4 FC'2011 某考点处交叉口

白天晴好天气的情况下，该处静态环境由直线路段、十字型交叉口、禁止停车等交通标志，机动车专用道等交通标志、导向箭头等交通标线、交通信号灯等构成；该处动态环境为参赛车直行通过交叉口、路段 2 行驶的冲突车右转弯汇入路段 3，

相对位移渐变小。

FC'2011 某考点处交叉口静态环境各刺激元构成及节点编号如图 3.5 所示, 图中的数字就是节点编号, 与相应刺激类或刺激元的编号一致, 详见附录 A, 如该图形结构中对于图 3.4 具有的刺激元直线路段, 节点编号为 1.1.1, 属于道路 1-路段 1.1-直路段 1.1.1; 十字型交叉口, 节点编号为 1.2.1.1, 属于道路 1-交叉口 1.2-平面 1.2.1-十字型 1.2.1.1。

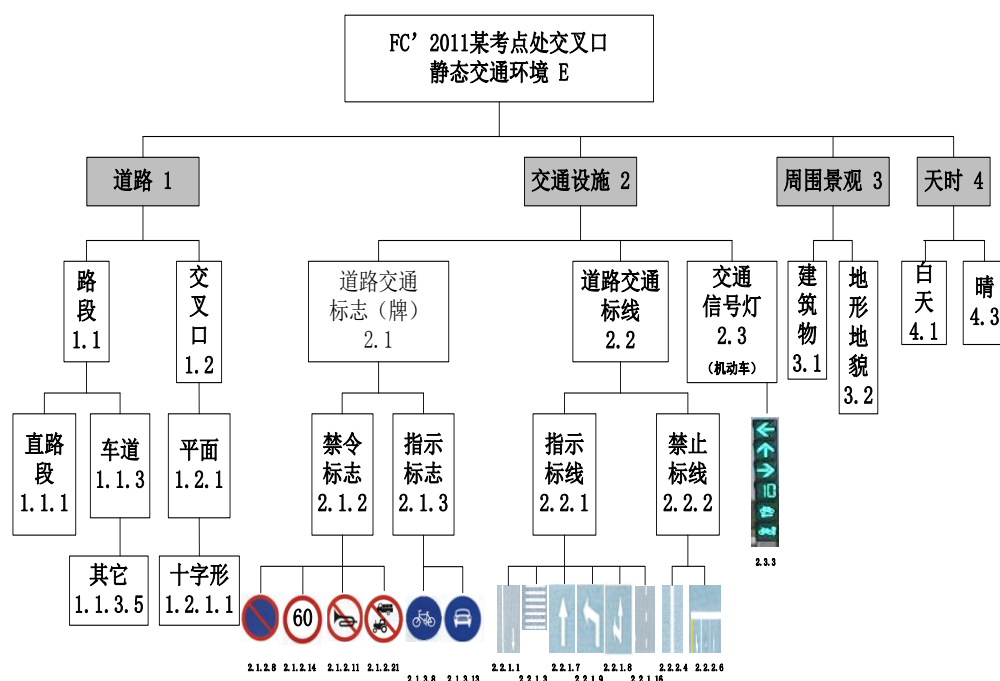


图 3.5 FC'2011 某考点处交叉口静态环境的图形结构及节点编号

根据图形一阶熵定义, 求该交叉口的静态环境复杂度系数。将图 3.5 中标有编号的节点, 由上到下统计每个节点的输入节点和输出节点个数, 并按照具有相同输入、输出节点个数的原则, 将编号对应的节点进行分组, 如节点 E 属于图形结构的始点, 由它开始向下分道路、交通设施、周围景观、天时 4 个节点, 故节点 E 的输入节点数为 0, 输出节点数为 4, 该图形结构中, 与节点编号 E 相同的输入节点数为 0、输出节点数为 4 的节点只有 1 个; 再如节点 3.2 只上连节点 3, 故节点 3.2 的输入节点数为 1, 输出节点数为 0, 该图形结构中, 与节点 3.2 相同的输入节点数为 1、输出节点数为 0 的节点有 22 个, 如表 3.1 所示。

表 3.1 FC'2011 某考点处交叉口刺激元构成图的节点分组

输入 节点数	输出 节点数	节点编号	相同输入输出 的节点数
0	4	{E}	1
1	0	{3.2, 4.1, 4.3, 1.1.1, 1.1.3.5, 1.2.1.1, 2.1.2.8, 2.1.2.14, 2.1.2.11, 2.1.2.21, 2.1.3.8, 2.1.3.13, 2.2.1.1, 2.2.1.3, 2.2.1.7, 2.2.1.8, 2.2.1.9, 2.2.1.16, 2.2.2.4, 2.2.2.6, 2.3.3, 3.2}	22
1	1	{1.2, 2.3, 3, 1.1.3, 1.2.1}	5
1	2	{1, 4, 1.1, 2.1, 2.2, 2.1.4, 2.2.2}	6
1	3	{2}	1
1	4	{2.1.2}	1
1	6	{2.2.1}	1
总计			37

因此，根据图形一阶熵的计算，该处城市交通静态环境复杂度系数为

$$\theta_1 = -\sum_{i=1}^h p_i \log_2 p_i = -\left[4 \times \left(\frac{1}{37} \log_2 \frac{1}{37} \right) + \frac{22}{37} \log_2 \frac{22}{37} + \frac{5}{37} \log_2 \frac{5}{37} + \frac{6}{37} \log_2 \frac{6}{37} \right] = 1.825$$

反映了某考点处交叉口环境的复杂程度。

其次，根据由专家打分法确定的附录 A 和附录 B 所示的权值和量值，其中 α 值为 0.325， β 值为 0.675，计算该处城市交通静态环境复杂度

$$C_1 = 1.825 \times (\alpha_1 \sum X_1 + \alpha_2 \sum X_2 + \alpha_3 \sum X_3 + \alpha_4 \sum X_4) = 27.08$$

同理，FC'2011 某考点处交叉口根据自身车辆及冲突车的运动状态，这里自身车辆即参赛车，直行通过交叉口，动态交通环境为 1 辆冲突车在交叉口处横向车道右转，相对位移渐变小，根据附录 C，该处城市交通动态环境复杂度系数为

$$\theta_2 = -\sum_{i=1}^k p_i \log_2 p_i = -\left[2 \times \left(\frac{1}{6} \log_2 \frac{1}{6} \right) + \frac{4}{6} \log_2 \frac{4}{6} \right] = 1.252$$

$$C_2 = 1.252 \times (\beta_1 \sum Y_1 + \beta_2 \sum Y_2) = 87.501$$

因此，FC'2011 某考点处交叉口环境复杂度为 67.864。根据城市交通环境复杂度计算模型，求得 FC 比赛中直线跟驰行为的交通环境复杂度为 32.387，避障行为

的交通环境复杂度为 21.039。

3.3 有人驾驶行为刺激感知回归分析

如前所述，有人驾驶行为是一个信息加工的过程结果，刺激感知是信息加工系统的第一阶段，是在一定复杂度的交通环境刺激下，通过感知环境中的各刺激元，判断决策后进行反应。这就要求进行有人驾驶行为刺激感知分析，为无人驾驶车辆传感设备应用配置及测评指标奠定基础。

依据前述的有人驾驶行为信息加工模型，吴殿洪等认为人脑的处理过程类似于模拟信号线性处理系统，输出信号由输入和系统本身特性共同决定^[95]。脑力负荷是任务要求需要或占用的脑力资源和人所拥有的脑力资源之间的差值^[96]，Wickens 多重资源理论认为，人的脑力资源有视觉、听觉、认知和响应四种，在驾驶脑力负荷分析中，由于听觉资源的利用率不高，因此常将视觉和听觉资源合并为感知资源^[97, 98]。将感知资源作为输入，也就是由视觉产生的外界分量，将响应资源作为输出，即脑力负荷，再通过传递函数，用来描述这种输入输出关系。

为了建立不同复杂度的城市交通环境的刺激感知模型，为无人驾驶测试环境及测评提供依据，通过虚拟视景仿真试验测试不同复杂度交通环境的脑负荷，并根据城市交通环境复杂度计算模型求得对应的复杂度，通过道路试验检验，从而验证有人驾驶行为刺激感知模型。

3.3.1 脑力负荷与城市交通环境复杂度的影响分析

虚拟视景仿真系统总体框架以江铃全顺牌轻型客车为载体，驾驶人进入驾驶舱，根据交通环境的虚拟视景操纵车辆，由车辆内安装的三组数据采集装置：驾驶参数传感器、摄像装置、生理—心理装置，实时记录驾驶过程中的驾驶参数（如车速、加速度，偏距等）、视频参数（驾驶人面部表情图像）、生理数据（如驾驶人脑电、肌电等），其中传感器直接输出的驾驶参数电压值，由数据采集卡进行 A/D 转换后传输到虚拟视景仿真系统的软件部分，车辆动力学模型对其计算并求解，将结果输入视景仿真程序代码，并实时调用 Vega Prime 和 Creator 软件控制虚拟视景画面，驾驶人通过虚拟视景的变化来完成下一步驾驶任务，如图 3.6 所示。

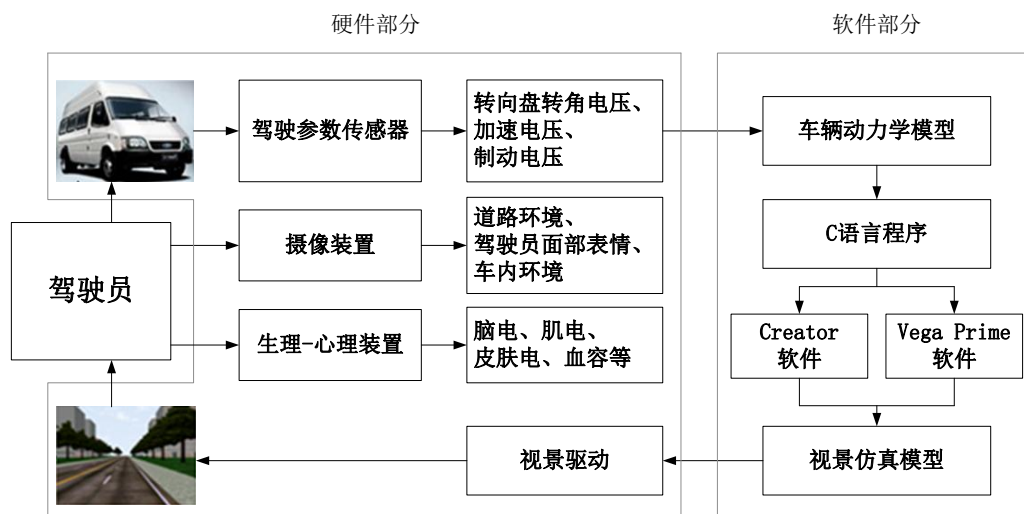


图 3.6 虚拟视景仿真系统总体框架

硬件部分主要包含实车驾驶舱、驾驶人参数传感器系统、生理—心理装置（多导生理反馈测量系统）、视景显示设备，数据采集及视景驱动工作站等。

软件部分是视景仿真系统的核心，采用虚拟视景仿真技术，首先通过对车辆运动受力分析，建立车辆动力学模型；其次结合 LOD、DOF 等技术，利用 Multigen Creator 制作驾驶环境的三维模型；最后，采用 VC++ 与 Vega Prime 混合编程对场景进行驱动和控制，求解车辆动力学模型，将车辆的运动状态赋予视景中的车辆，不断更新视景，从而实现车辆的运动仿真，实现人机交互，循环流程如图 3.7 所示。

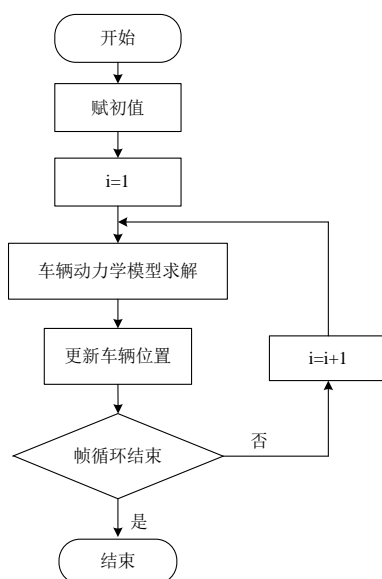


图 3.7 虚拟视景仿真系统循环流程图

Vega Prime 的帧循环方式显然要求车辆动力学模型用 C++ 语言开发，通过在

VC++中调用 Matlab 引擎函数的方式来实现混合编程。

虚拟视景仿真试验中，特别构建了 10 公里的城市道路虚拟视景，静态环境包括交叉口、路段、路侧建筑、交通标志等，动态环境包括不同行驶状态的车辆及其他交通实体，如通过信号交叉口时遇横向右转车、跟驰前车行驶、和避让静止车等，因此按照城市交通环境复杂度的计算模型，随着车辆的驶进，所处的环境复杂度不断变化，受试驾驶人需在城市道路虚拟视景中驾驶车辆，并实时记录试验数据。道路实验中，按照既定路线在城市道路上进行，完成通过交叉口、直线跟驰、避障、转弯等驾驶任务。将试验中采集受试驾驶人的眼动数据、试验后填写的 NASA-TLX 主观评定量表、计算典型的城市交通环境复杂度，经过数据处理和统计，进行如下分析。

根据虚拟视景仿真试验和道路实验采集的数据及主观量表，进行脑力负荷与城市交通环境复杂度的影响分析。脑力负荷通常采用心理测试的方法进行，常用的方法有主观负荷评估法（Subjective Workload Assessment Technique, SWAT）和美国航空航天局任务负荷指数（National Aeronautics and Space Administration—Task Load Index, NASA-TLX）^[99]，典型记录如图 3.8 所示。

第一步：在认真阅读上述各条目的详细说明后，根据自己所执行的工作实际情况，分别在代表六个条目的直线上相应的位置作一标记。除业绩水平外，其余五条目从左至右均为逐渐增加；而业绩水平从左至右为好到差。

脑力需求	
体力需求	
时间需求	
业绩需求	
努力需求	
受挫需求	

第二步：在下列 15 组中，每 2 项进行相互比较，请选出每组 2 项中你认为对工作成绩影响最大的那一条目，在相应项目前打 ☒ 。

☒ 脑力需求 ☒ 时间需求 ☒ 努力程度 ☐ 努力程度 ☒ 脑力需求
☐ 体力需求 ☐ 受挫程度 ☐ 业绩水平 ☒ 体力需求 ☐ 受挫程度

☒ 体力需求 ☐ 业绩水平 ☒ 脑力需求 ☐ 受挫程度 ☒ 时间需求
☐ 时间需求 ☒ 体力需求 ☐ 努力程度 ☒ 体力需求 ☐ 业绩水平

☐ 努力程度 ☐ 时间需求 ☐ 业绩水平 ☐ 受挫程度 ☒ 努力程度
☒ 时间需求 ☒ 脑力需求 ☒ 脑力需求 ☒ 业绩水平 ☐ 受挫程度

图 3.8 受试驾驶人 NASA-TLX 主观评定量表典型记录图

NASA-TLX 主观评定量表，涉及 6 个负荷维度的多维脑力负荷评价量表，即脑力需求(Mental Demand)、体力需求(Physical Demand)、时间需求(Temporal Demand)、

业绩水平 (Own Performance)、努力程度 (Effort) 和受挫程度 (Frustration), 采用 20 等分的 10 分制直线表示各维度强弱值, 两两比较确定各维度的权重, 受试驾驶人根据完成各驾驶任务的实际情况进行标记。

再将 6 个维度对总负荷的贡献进行计算和排序, 得出综合的脑力负荷值, 分值越大表示脑力负荷越大^[100]。脑力负荷是反映工作时人的信息处理系统被使用程度的指标, 脑力负荷与人闲置未用的信息处理能力之和就是人的信息处理能力^[101]。

根据试验中完成的 NASA-TLX 量表计算脑力负荷值, 根据城市交通环境复杂度计算模型求得相应交通环境的复杂度, 从而获得脑力负荷值随交通环境复杂度变化的散点分布, 如图 3.9 所示, 两者呈明显的正相关性, 经 Person 相关性检验, 相关系数为 0.930, 脑力负荷值随交通环境复杂度增加而增加, 并且符合线性相关, 因此拟合脑力负荷值与城市交通环境复杂度的函数关系, 如表 3.2 所示。

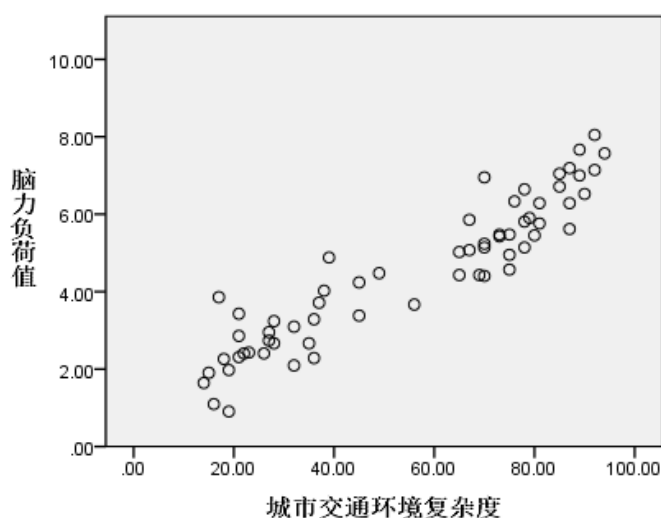


图 3.9 脑力负荷值随城市交通环境复杂度变化的散点分布

表 3.2 脑力负荷值与城市交通环境复杂度回归系数

模型	非标准化系数		标准系数	t	Sig.
	B	标准 误差	试用版		
(常量)	0.965	0.201		4.800	0.000
城市交通环境复杂度	0.064	0.003	0.930	19.541	0.000

由此可知, 根据表 3.2, 驾驶人在驾驶过程中, 随感知到的城市交通环境复杂程度的不同, 其脑力负荷强度也随之不同, 城市交通环境复杂度越大, 其脑力负荷也越大, 两者正线性相关, 城市交通环境复杂度变化 1 个单位, 脑力负荷值变化 0.064 个单位。

3.3.2 有人驾驶行为刺激感知回归模型建立

根据 1956 年 S.S.Stevenson 提出的刺激-感知理论^[102],

$$\phi = k(\omega - \omega_0)^n \quad (3.12)$$

式中, k ——常数, 由所选单元而定; 指数 n 随形态、适应和对比参数而变。

建立有人驾驶行为刺激感知模型, ϕ 为感应强度; 对于有人驾驶车辆的刺激信息感知, k 为常数; ω 为驾驶人实际感应的刺激信息量, 包括视觉、听觉、触觉、嗅觉、味觉、振动觉等, 本文主要研究视觉刺激; ω_0 为所处环境的标准刺激信息量; n 值得大小随视觉特性等而异, 视觉对光亮度 $n=0.33$, 对电击 $n=3.5$ 。

其中, 刺激量的大小可由本章 3.2 节所述的反应环境复杂度的信息熵来度量, 则有

$$\omega = -\sum_{i=1}^{N_s} p_i \log_2 p_i \quad (3.13)$$

式中, N_s 是刺激元 S 中含有的相互独立的不同刺激元的个数, 每个刺激元 S_i 出现

的概率为 p_i , 且 $\sum_{i=1}^{N_s} p_i = 1$, $p_i = \frac{1}{N_s}$ 时, 刺激量 (信息熵) 为最大。

驾驶人实际感应的刺激量 ω 由驾驶人的眼动数据经计算得到; 标准刺激信息量 ω_0 由当前环境直接计算而得, 当所处环境确定时, ω_0 为固定常数。其中感应强度 ϕ 由道路试验中由驾驶人填写的 NASA-TLX 主观评定量表间接得到。

对式 (3.12) 进行变换:

$$\ln \phi = \ln k + n \ln(\omega - \omega_0) \quad (3.14)$$

应用 SPSS 软件对试验数据进行回归, 得到感知强度与交通环境复杂度的回归方程为:

$$\phi = 0.565 \times \ln(\omega - \omega_0)^{3.654} \quad (3.15)$$

有人驾驶行为刺激感知回归模型, 用于计算驾驶人对于干扰小、简单的城市交通环境的感知程度, 城市交通环境由其复杂度大小来衡量, 表明驾驶人对当前城市交通环境中的刺激元是否完全感知, 为确定无人驾驶智能行为的感知强度提供基础。

3.4 无人驾驶智能行为刺激感知工作机制

3.4.1 无人驾驶智能行为感知强度确定

针对无人驾驶车辆,传感器识别交通环境刺激元过程中会有延迟或者丢失现象,即交通环境中所有的刺激元并不能完全被传感器识别,而存在部分刺激信息丢失,如图 3.10 所示。

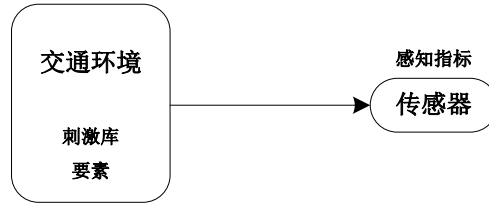


图 3.10 无人驾驶车辆智能行为的感知指标

因此,为了衡量无人驾驶车辆的认知程度强弱,根据 S.S.Stevenson 刺激-感知理论定义认知指标 $S(\omega)$,

$$S(\omega) = \lambda \times 0.565 \times (\omega - \omega_0)^{3.654} \quad (3.16)$$

式中, λ 为无人驾驶车辆感知修正系数, ω 为无人驾驶车辆实际感应的刺激量,本文主要研究视觉刺激; ω_0 为所处环境的标准刺激信息量,由信息熵来度量;由于无人驾驶车辆更多地依靠视觉传感器或雷达来识别环境刺激元,无人驾驶车辆感知强度的计算适用于城市交通简单环境。

3.4.2 无人驾驶车辆传感设备应用配置

及时准确地感知环境刺激是无人驾驶车辆安全行驶的前提,而各种传感设备正是无人驾驶车辆的有力感知工具,收集和感知环境刺激信息,从而完成判断决策,输出刺激解释。影响无人驾驶车辆感知能力的主要因素一方面是传感设备的水平、质量、策略等,另一方面也是传感设备的管理、分配和应用,就需要在不破坏原有车型基本结构的基础上,合理配置各种传感设备,各司其职,各尽其责,构成一个和谐的整体,使无人驾驶车辆基本行为和智能行为相得益彰。

传感设备是能感受规定的被测量件并按照一定的规律转换成可用信号的器件或装置,通常由敏感元件和转换元件组成^[103],以满足信息的传输、处理、存储、显示、记录和控制等要求。无人驾驶车辆的传感设备用来实时接收外界刺激,实时监测自身位置、姿态、速度等,应便于安装、调试、检查、保养和维修;合理利用装配空

间使整体结构紧凑；并克服车辆行驶中由振动造成的工作失效及坠落等，目前主要由数字摄像头、激光雷达传感器、超声波声纳、GPS 构成，如表 3.3 所示。

表 3.3 无人驾驶车辆各传感设备用途及安装位置

传感器类型	工作用途	安装位置
数字摄像头	视觉感知	要保证车辆行驶中路面的可视标志始终处于摄像区域内，可安装于前风挡处或车顶
	导航	一般置于车辆的前部其安装位置应与路面导航标识的位置保持一致
激光雷达传感器	监测车辆行驶方向上的障碍物	一般置于车头、车尾或车顶的中央位置，附近不能有热源或其它遮蔽物阻挡激光的发射和接收
毫米波雷达	毫米波波段的雷达，体积小，质量轻，空间分辨率高	一般置于车头、车尾或车顶的中央位置，附近不能有热源或其它遮蔽物阻挡激光的发射和接收 ^[104]
GPS	定位	一般置于车头、车顶的中央位置或车辆内部
惯性导航仪	测量运动体的加速度、速度和位置，从而实现导航和定位	一般置于车辆内部 ^[105]
里程计	测量行程、速度	一般置于车辆内部
其它传感器	监控车辆控制系统	

据上文所述，刺激感知阶段，有人驾驶行为与无人驾驶智能行为的主要区别在于感知范围大小、精度高低、和有无针对性三方面，如表 3.4 所示。无人驾驶车辆依据车载传感设备可大范围、精确地感知刺激，但是对刺激信息的取舍缺乏针对性，难分主次。若增加传感器数量，可更大程度地扩大感知范围和提高精度，但是对刺激信息的针对性降低，因此，将无人驾驶车辆所配置的各传感器进行优先权分配。

表 3.4 无人驾驶与有人驾驶刺激感知能力对比

环境刺激	无人驾驶	有人驾驶
交通环境 静态刺激信息	<ul style="list-style-type: none"> 感知范围较大； 感知精度较高； 视觉盲点较小； 	<ul style="list-style-type: none"> 感知范围较小； 感知精度较低； 视觉盲点较大；
	<ul style="list-style-type: none"> 对复杂刺激，感知速度较慢、针对性较弱，不能很好识别更重点刺激； 对模糊标志标线的识别力较差； 	<ul style="list-style-type: none"> 对复杂刺激，感知速度较快、针对性较强，能很好识别更重点刺激； 对模糊标志标线的识别力较好；
	<ul style="list-style-type: none"> 对其它车辆的速度、方向、间距感知较准确； 	<ul style="list-style-type: none"> 对其它车辆的速度、方向、间距判断较粗糙；
	<ul style="list-style-type: none"> 视觉盲点较小； 对声音的识别力较弱、感知力较差； 	<ul style="list-style-type: none"> 视觉盲点较大； 对声音的识别力较强、感知力较好；
本身车辆	<ul style="list-style-type: none"> 对自身速度、位姿等感知及时较精确； 	<ul style="list-style-type: none"> 对自身速度、位姿等感知延迟较粗糙；

无人驾驶车辆各传感设备的优先权，应与交通环境中单个刺激的复杂度成正比关系，即某刺激的复杂度越高，重要性越大，所需重视程度越高，应给予更高的优先权，从而优先传输给判断决策阶段，优先输出复杂度更高的相应刺激解释。由于车辆在行驶中，所处的交通环境不断变化，使得各传感设备所接收的刺激元随之变化，因此每个传感设备的优先权 P_i 是变量。

设车载传感设备分别为 S_1 、 S_2 、 S_3 、 \dots ，所对应的优先权为 P_1 、 P_2 、 P_3 、 \dots ，则刺激元相应的复杂度为 C_1 、 C_2 、 C_3 、 \dots ，因此

$$P_i \propto C_i \quad (3.17)$$

通过计算每一帧的 C_i 值，由大到小排序，使得最大优先权 P_i 所对应的传感器 S_i 所识别出的刺激组合优先被传输，进行判断决策，完成输出解释，如此反复，有效克服无人驾驶车辆的感知弱点，实现了有针对性地感知交通环境刺激的智能行为。

3.5 无人驾驶车辆多复杂度测试环境设计

无人驾驶车辆智能水平在逐步提高，对无人驾驶车辆智能行为的测试内容也应从基本到高级、从局部到整体。利用上述复杂度模型和刺激感知模型，根据测试内容层次性要求，设计多复杂度测试环境，通过简单测试环境考核无人驾驶车辆的基本能力；通过不同类型的刺激组合构成复杂测试环境考核无人驾驶车辆高级的、综合的智能驾驶能力。

多复杂度测试环境体现在各赛段测试环境的复杂度不同，不同赛段设计不同复杂度的测试环境，将高、低复杂度测试环境有机结合，体现测试环境的多复杂度层次关系。图 3.11 为测试环境复杂度分布图。

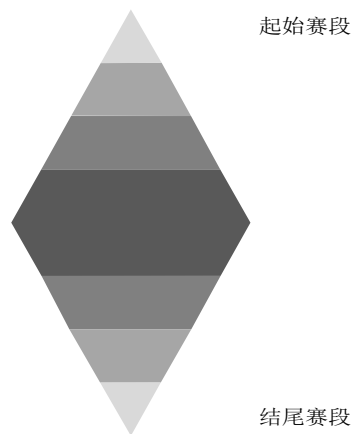


图 3.11 无人驾驶车辆测试环境的复杂度分布图

随赛程由始至终测试环境的复杂度呈梭形分布，起始赛段和结尾赛段的测试环境应相对简单，设置无人驾驶车辆简单行为的测试环境，如车道保持等；中间赛段测试环境的复杂度应先逐渐增大到峰值，再逐渐减小，设置高级行为的测试环境，如含有动态交互的情况等。

图 3.12 为后半段赛程的无人驾驶智能行为多复杂度测评环境设计。

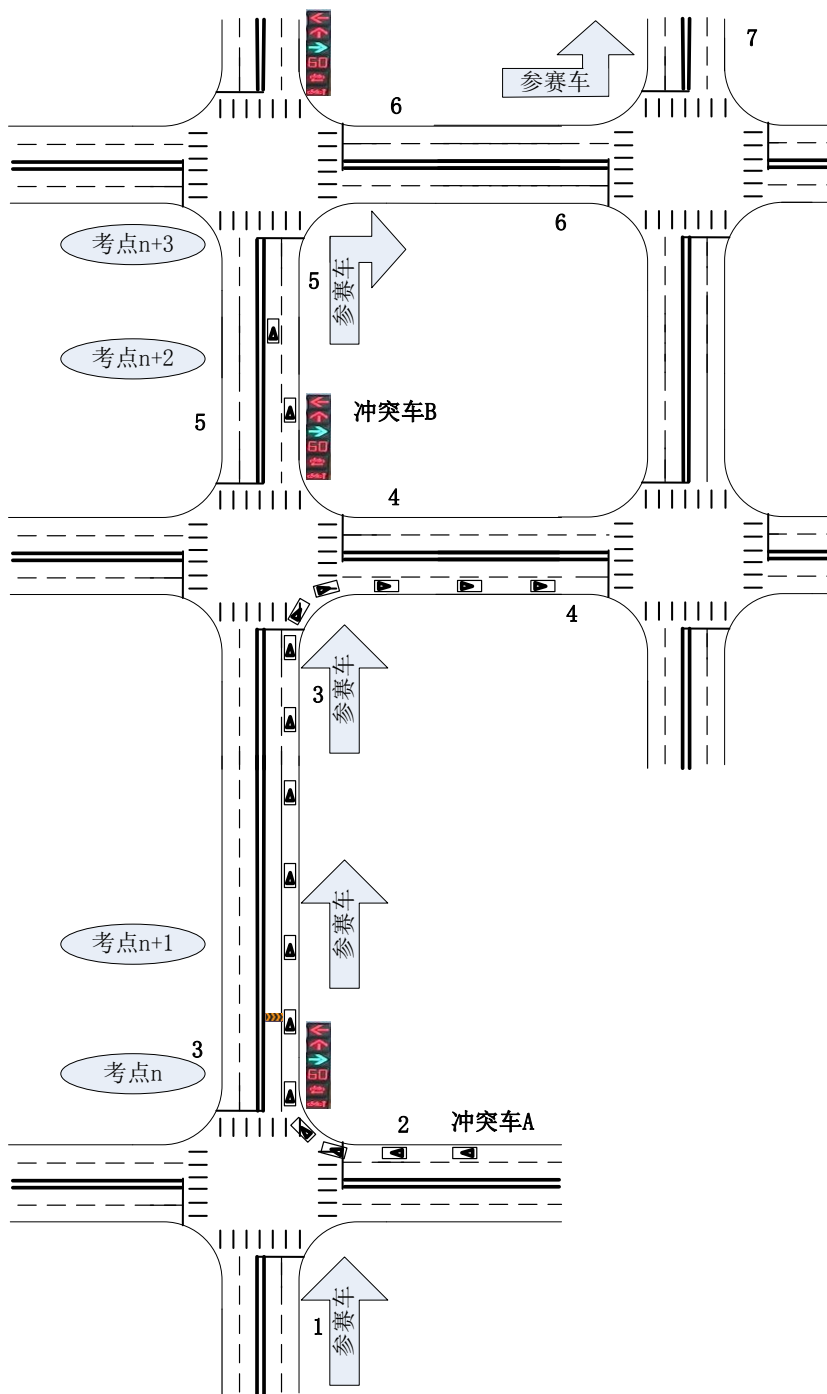


图 3.12 无人驾驶智能行为多复杂度测评环境设计

着重研究通过交叉口、直线跟驰、和避障行为，因此测试环境的设计也围绕这三种驾驶行为，将其穿插在某赛段中，连续考核无人驾驶车辆智能行为能力。简单行为是指无人驾驶车辆自身的驾驶技能，没有其他车辆对其进行动态干扰或交互，如直线行驶、右转弯等；高级行为是指存在动态干扰或交互，如超车、合流等。

该赛段设计了 4 个考点，由考点 n 到考点 $n+3$ ，环境复杂度逐渐降低。参赛车经过路段 1 直行通过交叉口，遇红灯应停车，变绿灯时起步，此时冲突车 A 右转弯汇入参赛车所在的车流，此为考点 n ；参赛车进入路段 3 行驶，左侧车道设置施工安全标志牌，需要车辆在右侧车道行驶，故参赛车应跟随冲突车 A 直线行驶，设置冲突车 A 的速度逐渐增大再逐渐减小，考点 $n+1$ 主要考察无人驾驶车辆的直线跟驰行为；冲突车 A 从路段 3 右转弯驶入路段 4，从而退出赛道，参赛车需根据交通信号灯指示直行通过交叉口驶入路段 5，路段 5 的两个车道分别设置一辆静止车，即冲突车 B，主要考察无人驾驶车辆的避障行为，此为考点 $n+2$ ；考点 $n+3$ 主要考察简单行为，即无人驾驶车辆根据信号灯指示从路段 5 先右转弯驶入路段 6，再左转弯驶入路段 7，完成后续比赛。4 个考点的测试环境刺激元如表 3.5 所示。

表 3.5 无人驾驶智能行为多复杂度测试环境刺激元分布

	环境复杂度	驾驶行为	环境刺激元
考点 n	高	通过交叉口 高级行为	平面十字交叉口、双向四车道、禁停标志、 限速标志、导向箭头、双黄线
考点 $n+1$	高	直线跟驰	施工安全标志-向右行驶
考点 $n+2$	中	避障	静止车
考点 $n+3$	低	通过交叉口 简单行为	交通信号灯

比赛赛程从考点 1 到考点 m 的赛程复杂度 C_m ，应该是 m 个考点复杂度的累加，考点复杂度由考点环境而决定，考点环境是刺激库中 12 类环境之一，根据静态动态刺激元构成，及城市交通环境复杂度计算模型，即赛程复杂度

$$C_m = \sum_{j=1}^m C_j \quad (3.18)$$

针对简单行为设计简单测试环境，针对高级行为设计不同类型刺激组合的多复杂度的测试环境，以满足无人驾驶车辆高级、复杂的认知能力测试。基于环境复杂

度的计算,根据各考点复杂度的不同,提出了无人驾驶车辆多复杂度测试环境设计,为无人驾驶车辆“未来挑战”比赛提供多复杂度测试环境,通过计算各届比赛赛程复杂度,可从浅入深地对未来比赛的赛程复杂度进行预测。

3.6 本章小结

首先,从静态和动态两个方面对城市交通环境进行归类,静态环境包含 4 个刺激类及若干刺激元,动态环境包括 5 个刺激类及若干刺激元;其次,基于一阶图形熵理论建立了城市交通环境复杂度的计算模型,可以直观地反映待求静态交通环境的复杂程度,从而反映所需驾驶负荷的强弱,通过算例求证了该模型具有实用性和准确性;第三,通过试验数据对驾驶人脑力负荷与城市交通环境复杂度进行了影响分析,城市交通环境复杂度越大,对驾驶人的刺激强度越大,其脑力负荷就越大,并建立了有人驾驶行为刺激感知模型,以城市交通环境复杂度为自变量对驾驶人感知强度进行了定量研究;第四,为克服无人驾驶车辆的感知弱点,提出了无人驾驶智能行为感知强度的界定方法,并根据环境复杂度的实时变化,提出了无人驾驶车辆传感设备配置方案;最后,结合通过交叉口行为、直线跟驰行为和避障三种典型工况设计了无人驾驶车辆的多复杂度测试环境,为无人驾驶车辆“未来挑战”比赛提供了测试环境。

第4章 有人驾驶行为与无人驾驶智能行为判断决策研究

思想的深度决定行动的高度，驾驶车辆也同样遵循这个道理。判断决策是驾驶行为产生过程中最核心的阶段，交通环境刺激信息被感知后，需要与驾驶人记忆中的各种决策知识与经验相匹配，这些信息来源于以长时记忆的形式储存在大脑中的知识库。本章首先围绕有人驾驶行为展开研究，重点建立通过交叉口、直线跟驰、和避障三种典型工况中的有人驾驶行为判断决策模型，进而提出无人驾驶智能行为判断决策机制，为无人驾驶智能行为建模提供有力依据。

4.1 驾驶行为知识库表示方法及获取

知识库是专家系统中的重要组成部分。在驾驶行为中，知识库同样具有举足轻重的地位。驾驶人的驾驶行为主要依赖于所掌握的驾驶规则、驾驶法规和相关经验等。不同的驾驶知识和经验会产生不同的驾驶行为，不同的驾驶行为又会制约行车效率、道路的通行能力、事故责任严重性以及道路交通安全性。为探索驾驶行为知识库表示方法及获取方法，我们先来讨论知识的表示方法。

知识表示是将理论和实践中所积累的常识和经验形式化、符号化的过程。知识表示也就是把人类的知识逻辑地表示出来，进行存储，最终达到运用知识的目的，选择合适的形式表示知识，就是寻找知识与表示之间的映射。

知识表示的方法有框架式和产生式两种。框架式知识表示既可以描述客观事物所具有的属性、所处的状态或与其它事物的关系，又可以反映各种客观事物之间动态的转换、继承、变异或因果关系等，主要由框架名、槽和值（约束条件）三部分组成，将知识表示成层状结构，将总体的所有信息分层，再由槽和侧面组成^[106]。产生式知识表示是产生式表示法中的核心，在语义上它表达了一种因果关系，可以明确地表示事物之间的联系。

由于城市交通环境中有人驾驶行为知识种类复杂繁多，单一采用框架式或产生式的方法都不能很好实现知识的表达，所以采用混合的框架-产生式表示方法，这种方法方便地实现了有人驾驶行为的知识表示，综合了产生式和框架式两种方法的优点，从而方便地实现了有人驾驶行为的知识表示。

通过对交通法规及标准的分析，将种类复杂繁多的驾驶行为知识分成两大类：

一类是常识类知识，另一类是经验类知识。依据图 2.8 所示的驾驶行为分类，采用框架-产生式建立如图 4.1 所示的有人驾驶行为知识库的框架，用十二个槽描述 12 类有人驾驶行为，并将其细分成更小的行为，不同的槽又可分若干侧面，每个侧面又具有不同的值。有人驾驶行为知识库框架结构如下：

<框架名>驾驶行为知识库

.....

<槽 06>通过交叉口、<侧面 061>交叉口类型、<值 0611>十字型、<值 0612>丁字型、<值 0613>环形、<值 0614>复合型、...<侧面 nm>、<值 nm1>...;

.....

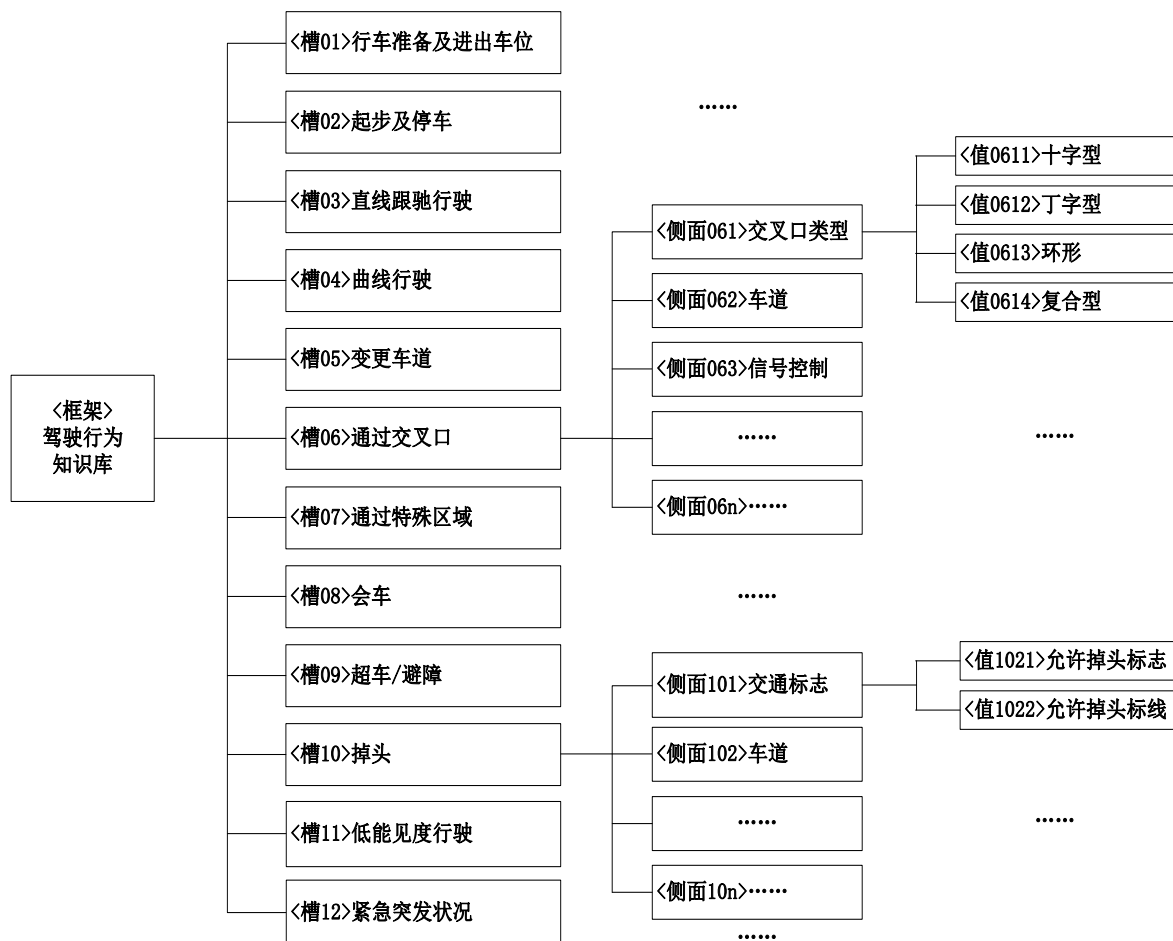


图 4.1 驾驶行为知识库结构

产生式规则，是以“如果这些条件满足，就采取这些行动”的形式所表示，即“IF-THEN”的格式。IF 部分为前提(条件)部分，如状态、原因等，THEN 部分为结论(行动)部分，如动作、后果等，前提和结论都可以由若干条构成。一条产生式

规则可用如下形式表示：

$$P_1, P_2, P_3, \dots, P_i \rightarrow Q_1, Q_2, Q_3, \dots, Q_j$$

$P_1, P_2, P_3, \dots, P_i$ 表示前提或状态， $Q_1, Q_2, Q_3, \dots, Q_j$ 表示结论或动作，即“如果满足前提 $P_1, P_2, P_3, \dots, P_i$ 或发生状态 $P_1, P_2, P_3, \dots, P_i$ ，则可以得出结论 $Q_1, Q_2, Q_3, \dots, Q_j$ 或执行行为 $Q_1, Q_2, Q_3, \dots, Q_j$ ”。所有的规则都以“IF 条件项-THEN 结论项”的格式存放在规则表中，每一条规则定义若干条件项和若干结论项。IF 中的条件项可采用包含与或非的逻辑组合项。

采用框架-产生式来表示驾驶行为，不仅适合带有一系列的固定事件和状况的驾驶知识，又适合驾驶知识散乱、处理过程独立、易于从使用的方式中分离出来的特点。

如前所述，将驾驶行为知识分为常识类知识和经验类知识两部分，这两部分知识通常是从理论和实践中获取，首先经过筛选，进一步加工和分类，再通过排除冗余和补全残缺，最后纳入驾驶行为知识库，如图 4.2 所示。

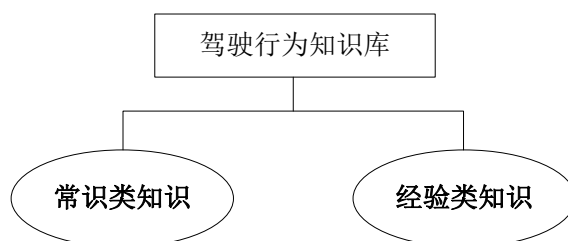


图 4.2 有人驾驶行为知识获取

常识类知识，用于指导驾驶人的驾驶技能，是正常驾驶时必须遵守的基本行为准则，主要依据驾驶相关条例、法规、知识等，如《中华人民共和国道路交通安全法实施条例》、《中华人民共和国公安部令（91 号）》等。这些条例和法规中的驾驶知识过于分散和笼统，因此需要具体情况具体分析，把各种类型的知识收集在一起，分析、比较，最后总结整理出有人驾驶行为的常识类知识体系。

经验类知识，主要依赖于交通领域的专家对相关条例和法规的理解和研究，以及优秀驾驶人在实践中所积累的驾驶经验。交通环境实时变化，所涉及的影响因素琐碎繁多、无法预料，条例和法规又不能够全面具体地针对每一种细节情况加以说明，这就需要该领域的专家进行解读，为车辆在行驶和避障中提供可行方案；此外，优秀驾驶人凭借长期的驾车经验和记忆，对实践中常见的交通状况具有较准确的判

断，并掌握较实用的解决技巧，将其加以归类 and 整理，作为经验类知识的一部分。

本文重点研究驾驶行为知识库 12 类中的 3 类，即通过交叉口、直线跟驰、避障行为。对于通过交叉口行为，主要研究交叉口处试验车遇横向右转冲突车的驾驶行为；对于直线跟驰行为，主要研究在前导车匀速、加速、减速和停车时试验车的驾驶行为；对于避障行为，主要研究试验车避让停止在所行车道上静止车的驾驶行为。这些驾驶行为均与神经元机制的判断决策有关。

4.2 基于神经元动力学的有人驾驶行为判断决策微观模型

人脑的判断决策功能与神经元机制有关，被感受器感知的信息经神经元传输起作用，人们建立了相关的神经元动力学理论及模式识别理论。这里以神经元动力学为基础建立有人驾驶行为判断决策微观模型。

设已知试验模式矢量 v_k （即已被感受器感知的信息序列），由此建立有人驾驶行为的大脑动力学过程， v_{k0} 是存贮于记忆中的原型模式矢量，同时引入伴随矢量 v_k^+

$$v_k^+ = \sum_{k'=1}^M A_{kk'} \bar{v}_{k'} \quad (4.1)$$

式中， $\bar{v}_{k'}$ 是 $v_{k'}$ 的转置矢量，系数 $A_{kk'}$ 由正交性确定，模式识别的动力学方程为

$$\dot{q} = \sum_{k=1}^M \lambda_k (v_k^+ q) v_k - B \sum_{k,k'=1}^M (v_k^+ q) (v_{k'}^+ q) v_k - C(q^+ q) q \quad (4.2)$$

式中，等号右侧第一项含有注意参量 λ_k ；第二项中将矢量 v_k^+ 、 v_k 分别分解为分量 v_{kj}^+ 、 v_{kj} ，把项 $(v_k^+ q) v_k$ 写成分量 j 的形式 $\sum v_{kj} v_{kj}^+ q_{j'}$ ， $v_{kj} v_{kj}^+$ 是模式 k 的学习矩阵；第三项用来区分模式和末项极限之间的象元灰度值增长。动力学方程解释为，描述各个神经元组成的整个网络的活动，通过模型可知各个神经元的活动与序参量起源之间的关系，从微观神经元层次转到序参量层次，分解模骨架得到

$$q(t) = \sum_{k=1}^M \xi_k(t) v_k + w(t) \quad (4.3)$$

式中， ξ_k 是模式 v_k 的序参量； w 为剩余项，当 q 随时间发展时等于零。因此，序参量 ξ_k 决定着识别模式的演化。由于正交关系，得到

$$\dot{\xi}_k = \lambda_k \xi_k - B \sum_{k' \neq k}^M (\xi_{k'}^2 \xi_k) - C \sum_{k'=1}^M (\xi_{k'}^2 \xi_k) \quad (4.4)$$

上式建立了模拟神经元活动的微观空间模式和序参量层次之间的关系，每个模式 k 都由其序参量 ξ_k 支配，第一层包括各感觉神经元 j 及其活动 q_j ，如图 4.3 所示。

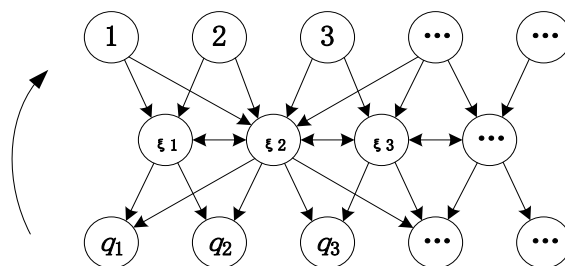


图 4.3 各模拟神经元活动和序参量动力学的关系

$t=0$ 时的初始活动，投射到第二层的序参量，并使序参量之间的动力学启动，支配运动动作，决定第三层运动神经元的活动模式，即运动的输出，各神经元和序参量相互关系的这种直观表示引用了模式形成和模式识别之间的类似性。

为了进一步标定和研究通过交叉口、直线跟驰、避障三种典型工况中的有人驾驶行为判断决策模型，先设计有人驾驶行为虚拟视景仿真试验及道路试验。

4.3 有人驾驶行为虚拟视景仿真试验及道路试验

4.3.1 虚拟视景仿真试验

利用 3.3 节所述的虚拟视景仿真系统进行虚拟视景仿真试验，通过各种传感器采集驾驶人转向、制动和驱动等参数。试验中设计的场景分别为通过交叉口、直线跟驰、避障三种典型工况，选取 20 位资深驾驶人进行虚拟驾驶试验，并对其踏板行程、速度、车辆偏距等驾驶行为进行研究。通过交叉口、直线跟驰、避障三种典型工况的虚拟试验任务如下。

通过交叉口：在双向四车道的长直路上，设置信号控制的平面十字型交叉口，信号灯为绿时，冲突车横向右转并汇入试验车前方，受试驾驶人需直行驾驶通过交叉口，同时采集受试驾驶人在这动、静态交通环境实时变化中的数据，用以研究驾驶人通过交叉口的行为特性，如表 4.1 所示。

直线跟驰：在双向四车道的长直路上有约 320 米的直线路段，受试驾驶人应保持车距保证安全跟随前导车行驶，前导车是指与试验车相同车道且同方向行驶的车辆，在试验中先匀速行驶、再加速、减速，最后停车，为了研究直线跟驰行为，试验中要求试验车不允许超车，如表 4.1 所示。

避障：在直线路段某车道上设置静止车辆，用来研究试验车的超车行为，如表

4.1 所示。

表 4.1 有人驾驶行为虚拟试验任务

虚拟试验场景	
场景 1: 通过交叉口行为	交叉口信号灯绿灯亮; 试验车通过交叉口过程中, 冲突车横向右转, 并汇入试验车前方。
场景 2: 直线跟驰行为	前导车匀速行驶、加速、减速、最后停车。
场景 3: 避障行为	静止车停放在试验车所行驶的车道上。

针对这三种驾驶场景进行虚拟仿真试验, 并由此进行这三种行为的有人驾驶行为特性的研究。选取具有一定经验、技术熟练并遵守交通规则谨慎型驾驶人进行虚拟视景仿真试验, 试验车为全顺牌轻型客车, 双向四车道城市交通环境的虚拟视景, 并将这类驾驶人在驾驶过程中体现的规律进行分析。

4.3.2 道路试验

除虚拟视景试验中所用到的试验车、制动踏板位移测量传感器、方向盘转角传感器、节气门开度传感器外, 道路驾驶试验还用到激光雷达和 GPS。激光雷达采用德国 SICK 室外型非接触式激光扫描仪 LD-LRS3100, 具有滤波功能, 试验中, 采用 190° 扫描范围、10Hz 扫描频及 0.25° 角分辨率; GPS 采用 DEWETRON VGPS-200C, 定位精度为 1~3m 无差分模式, 试验中, 采用 RS-232 通信端口、更新频率为 10Hz; 用来采集地面速率、地面航向及行驶时间等, 如图 4.4 所示。



图 4.4 激光雷达及 GPS

其他试验设备: 驾驶人面部表情摄像机、手持摄像机、车厢内部环境摄像机分别从不同角度记录试验的全过程; 秒表, 用来记录试验开始及结束时间、本车开始加速、减速、制动的的时间, 以及前导车开始制动的的时间。

道路试验方案同样设计了三种场景分别采集通过交叉口、直线跟驰和避障三种典型工况中的驾驶参数, 这三种场景与虚拟视景仿真试验的场景基本保持一致。受

试驾驶人在三种场景中的试验任务如下。

通过交叉口：针对信号控制的平面十字型交叉口，冲突车为横向右转，研究这一过程的驾驶行为变化及操作特点。受试驾驶人驾车，按指定路线从起点 A 出发，并在终点 B 结束，途中按照交通规则，直行通过所遇到的交叉口，并处理干扰。

直线跟驰：在长直路上研究前导车的速度变化对后车驾驶行为的影响。受试驾驶人驾车，在指定的直线车道上从起点 C 出发，并在终点 D 结束，途中除前导车外没有其他车辆干扰，并且不得采取超车，仅跟随前导车安全行驶至终点。

避障：直线路段上，在试验车所行车道上设置静止车辆，研究试验车的避障特性。

为获得准确有效的试验数据，道路驾驶试验应在有利于试验目的的条件下进行。

（1）道路驾驶试验时段和场地的选择

试验时段选择在光线较好的晴好天气的上午，试验场地选择在交通流量较小的双向四车道，试验车全顺型轻型客车，从 A 点出发，B 点结束，路线 AB 上有若干个信号控制的平面十字型交叉口，三相位或四相位，选择没有倒计时的交通信号灯。

（2）道路驾驶试验驾驶人的选择

选择 10 位具有一定经验、技术熟练并遵守交通规则的谨慎型驾驶人进行道路驾驶试验。

（3）道路驾驶试验其他运动状态的确定

通过交叉口行为：在信号控制的平面十字型交叉口，有横向右转冲突车汇入。

直线跟驰行为：前导车运动状态为匀速、加速、减速、停车。

避障行为：静止车设置于试验车所在车道上。

（4）试验中的注意事项

试验开始之前应该校对所有设备及仪器的时间，使其在试验开始时的起点时间相同，保持各种仪器采集同步进行；由于本次试验的宗旨是研究无人驾驶车辆的智能行为，为无人驾驶车辆的智能行为提供准确的标准，因此试验时的交通环境不能过于复杂与多变，应选择车流量不是很大的结构化十字型交叉口。

4.4 有人驾驶行为判断决策效应解析

对 4.3 节虚拟视景仿真试验所采集的数据进行处理，分别针对加速踏板行程、制动踏板行程、车速和偏距的变化分析驾驶人的判断决策，并将相应的刺激解释规

律函数化，从而研究通过交叉口、直线跟驰及避障三种典型工况中的有人驾驶行为特性，作为无人驾驶车辆智能行为的评价依据，为其控制策略提供基础。

4.4.1 通过交叉口有人驾驶行为判断决策效应分析

有人驾驶实际上就是驾驶人对车辆行驶速度与方向的控制，即根据当前时刻的交通环境判断下一时刻的加速、减速、制动、转向等操作，体现在对车辆加速踏板、制动踏板和转向盘的控制上，从而完成更复杂的驾驶任务。

城市道路交叉口的各种环境刺激元是影响驾驶人交叉口行为的主要因素，静态环境刺激驾驶人认知到交叉口的宏观构成，而动态环境又强烈制约着驾驶人的通过决策，加之动态环境时刻变化，就使得通过交叉口行为表现出不同特性。通过交叉口有人驾驶行为，是指城市道路中较为常见的信号控制平面十字型交叉口，试验车欲直行通过交叉口，并有冲突车横向右转汇入的情况，根据车头间距不同，试验车驾驶人会对是否让行作出判断，对如何让行作出决策，如图 4.5 所示。

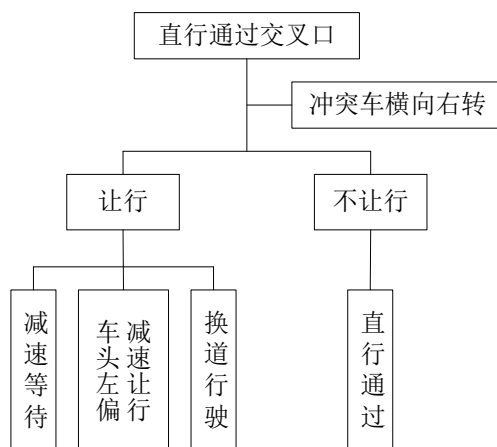


图 4.5 直行通过交叉口判断决策图

驾驶人判断需让行时，根据具体情况通常会采取三种决策，即减速等待、车头左偏减速让行、和换道行驶；不需让行时，则会稳速或加速直行通过冲突点。由于车头左偏减速让行的避让方式具有代表性和复杂性，因此对此进行探索性研究。试验中将个性相同的谨慎型驾驶人的行为规律作为研究对象，将这类驾驶人在驾驶过程中普遍存在的规律做主要分析，为无人驾驶车辆提供标准。

图 4.6 为绿灯时冲突车横向右转的通过交叉口时加速踏板行程与制动踏板行程随路程变化的曲线，采用全顺试验车在双向四车道上行驶，纵坐标表示踏板行程，即踏下加速踏板或制动踏板的程度，0%代表没有踩下踏板，100%代表将踏板踩到

底；横坐标表示试验车所在的直线路段；文献中，交叉口区域的研究是以交叉口为中心前后 100 米的范围，本文为了研究遇横向右转车的通过交叉口行为，清晰地绘制曲线，只针对交叉口进口停止线前后 50 米的范围展开研究，图中横坐标的 0 点是交叉口进口停止线位置，两条黑色粗实线间的区域是双向四车道的交叉口，即交叉口进出口停止线间的部分，根据实际情况横向右转车辆在 15 米处右转汇入。

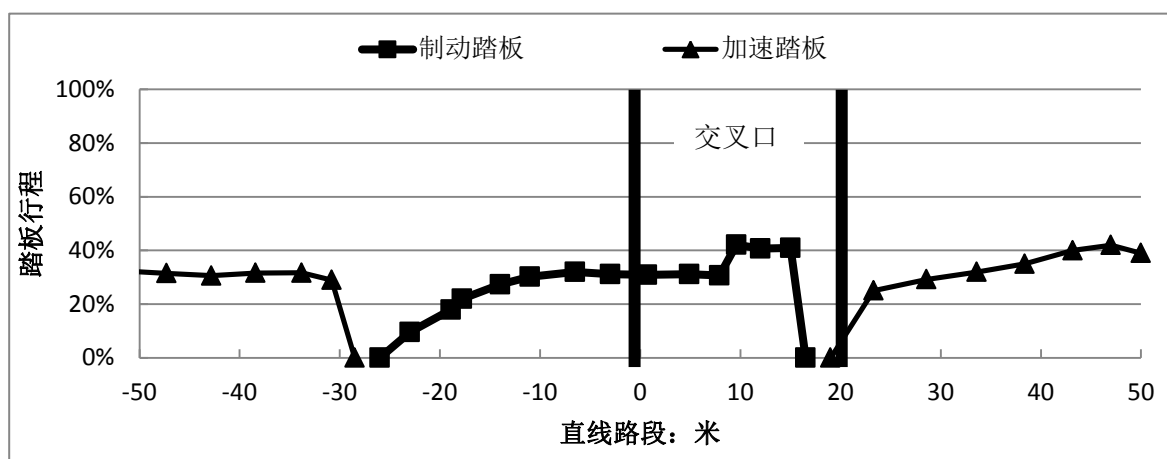


图 4.6 通过交叉口行为试验车加速踏板和制动踏板行程随路程变化的曲线图

制动踏板被踏下 1 次，踏下前后包含两段踏板行程为 0 的部分，即换脚过程，分别是临近交叉口时从加速踏板换脚到制动踏板，和通过交叉口时从制动踏板换脚到加速踏板，试验数据显示，前者的换脚时间分布比较集中，从加速踏板到制动踏板的换脚时间约为 0.362 秒；后者的换脚时间分布不集中，由于驾驶人会人为干预换脚时间，在保证行驶安全的前提下，采用既不踩制动踏板又不换脚到加速踏板的方式降低车速，若排除这种因素，从制动踏板到加速踏板的换脚时间约 0.411 秒。

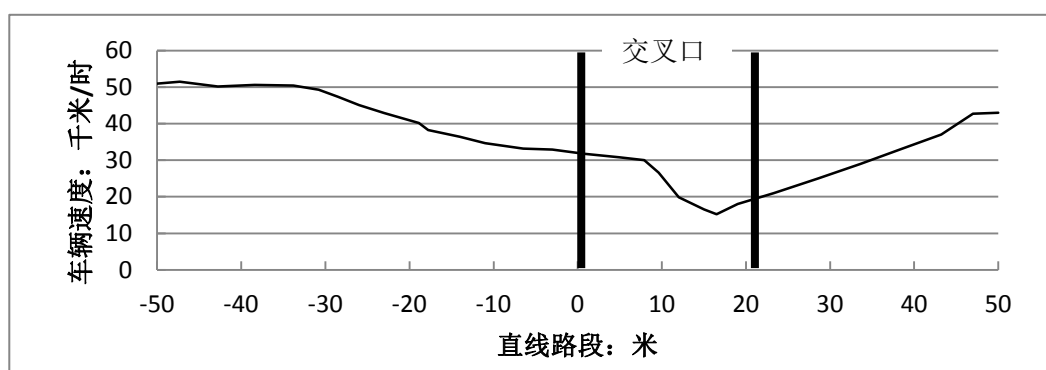
冲突车横向右转时通过交叉口行为中，驾驶人以 30%左右的加速踏板行程向交叉口行驶；距交叉口进口停止线约 30 米处，松开加速踏板，踏向制动踏板的行程约为 32%，逐渐减速，交叉口处，由于出现横向右转的冲突车，制动踏板行程迅速增大至 40%，减速让行，同时使车头左偏至避开冲突车车头；横向右转车辆汇入后，试验车方向回正，制动踏板行程骤减为 0，换脚到加速踏板，加速踏板行程缓慢增加到 30%左右，恢复正常车速行驶。

由于踏下制动踏板，加速踏板行程分为两段，通过交叉口时遇横向右转车汇入情况下，踏板行程的函数关系对多项式的相关性最大，因此

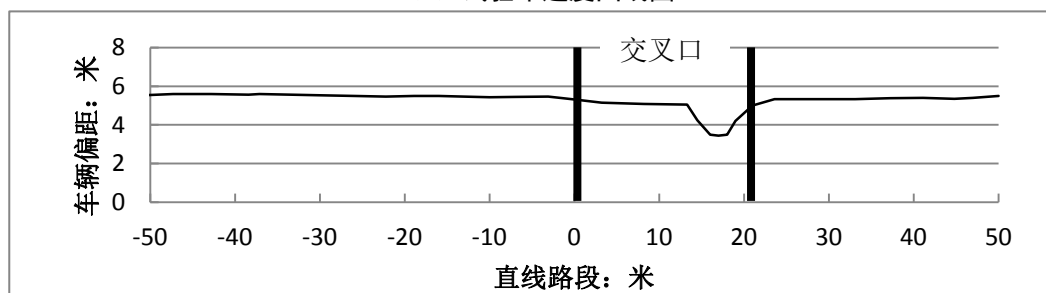
$$p = \begin{cases} -1.703 - 0.095x - 0.01x^2, & -50 \leq x < -30 \\ 0.315 - 0.001x - 0.001x^2, & -27 \leq x < 10 \\ -0.264 + 0.16x^2 - 0.001x^3, & 10 \leq x < 16 \\ 0.652 - \frac{11.135}{x}, & 20 \leq x < 50 \end{cases} \quad (4.5)$$

式中, x 为试验车距交叉口进口停止线的距离, 当距交叉口进口停止线距离在 30~50 米时, 踏下加速踏板, 符合第 1 个函数, 制动踏板行程为 0; 当距交叉口进口停止线距离在 27 米至越过进口停止线 10 米, 踏下制动踏板, 符合第 2 个函数, 加速踏板行程为 0; 当越过交叉口进口停止线距离在 10~16 米时, 踏下制动踏板, 符合第 3 个函数, 加速踏板行程为 0; 当越过交叉口进口停止线距离在 20~50 米时, 踏下加速踏板, 符合第 4 个函数, 制动踏板行程为 0。

踏板的变化同时导致了试验车速度和偏距(试验车的中心到道路中心线的距离)的变化, 根据试验数据绘制曲线图, 如图 4.7 所示。



(a) 试验车速度曲线图



(b) 试验车偏距曲线图

图 4.7 通过交叉口行为试验车速度和偏距曲线图

两条黑色粗实线间仍为交叉口, 可见试验车起初以 50km/h 的速度直线行驶, 行至距交叉口进口停止线约 30 米处开始减速; 临近交叉口时车速减为 30km/h, 遇横向右转车辆, 速度骤减, 约为 15 km/h; 让行后低速通过交叉口, 此后速度逐渐

增加，如图 4.7 (a) 所示。

纵坐标表示试验车的偏距，即试验车中心线到双向四车道中心线的距离，交叉口前试验车靠右侧车道行驶，偏距约为 5.5 米，交叉口处，由于遇到横向右转冲突车的汇入，试验车偏向车道左侧并避让，此时偏距约为 3.5 米，通过交叉口后逐渐恢复原车道中心行驶，如图 4.7 (b) 所示。

冲突车横向右转时通过交叉口行为中，距交叉口进口停止线前后 50 米的范围内，拟合后的速度曲线函数表达式为：

$$v = \begin{cases} 50, & -50 \leq x < -30 \\ 31.32e^{-0.014x}, & -30 \leq x < 10 \\ e^{4.033-0.081x}, & 10 \leq x < 15 \\ -63.545 + 26.906 \ln x, & 15 \leq x < 50 \end{cases} \quad (4.6)$$

冲突车横向右转时通过交叉口行为中，拟合后的偏距曲线函数表达式为：

$$d = 34.178 - 3.591x + 0.105x^2, \quad 13 \leq x \leq 21 \quad (4.7)$$

根据式 (3.11)、式 (3.12)、式 (4.6) 建立遇横向右转冲突车时试验车车速与距冲突车的距离、交通环境复杂度的函数关系 $v = f(x-15, C)$ ，即

$$v = \begin{cases} \frac{k}{C} \times 31.328e^{-0.014(x-15)}, & -45 \leq x-15 < -5 \\ \frac{k}{C} \times e^{4.033-0.081(x-15)}, & -5 \leq x-15 < 0 \end{cases} \quad (4.8)$$

式中， C 为交通环境复杂度，与车速成反比例关系， k 为常数。当距冲突车距离为 5~45 米时，试验车速应符合 (4.6) 一式的函数，当距冲突车距离为 0~5 米时，试验车速应符合 (4.6) 二式的函数。

4.4.2 直线跟驰有人驾驶行为判断决策效应分析

本文所研究的直线跟驰行为是指试验车跟随前导车行驶中的驾驶行为特性和规律，前导车即与试验车同车道且位于其前方的车辆，跟驰路段为 320 米长的直线路段，先匀速，再加速，后缓慢减速，直至停止。为了研究直线跟驰行为，试验中要求试验车不许换道，试验车在跟随过程中体现了制约性、延迟性。

试验车与前导车保持充分车距的情况下，试验车车速随前导车车速变化而变化，两粗实线间的区域表示前导车运动状态的变化部分，如图 4.8 所示。

前导车匀速行驶时，试验车加速踏板行程维持在 10% 附近，速度基本恒定。

前导车加速行驶时，试验车加速踏板逐渐增加至 30%，前导车加速结束后，试验车的加速踏板行程回落在 20% 附近，跟随前导车匀速行驶。

前导车减速行驶时，试验车加速踏板行程降为 0，制动踏板行程增加至 30%，前导车减速结束后，试验车的加速踏板行程逐渐增加至 10%，跟随前导车匀速行驶。

前导车停车时，试验车的制动踏板行程立即增加到峰值，随后停车。

$$p = -272 + 0.512x - 2.681 \times 10^{-7} x^3 \quad (4.9)$$

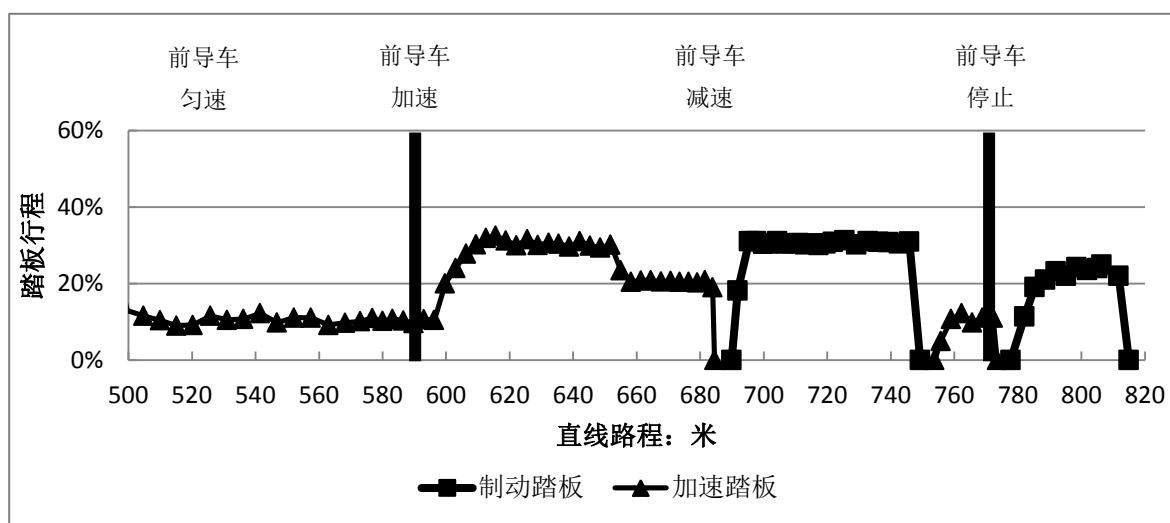


图 4.8 直线跟驰行为试验车加速踏板和制动踏板行程随路程变化的曲线图

为了防止追尾，在前导车突然减速时，试验车驾驶人多半采取立即踏下制动踏板是速度降到最低，因此，试验车的速度开始趋于匀速，而后骤降，对于偏距，在直线跟驰中，没有明显规律。前导车匀速-加速-减速-停车时直线跟驰行为中的速度曲线如图 4.9 所示。

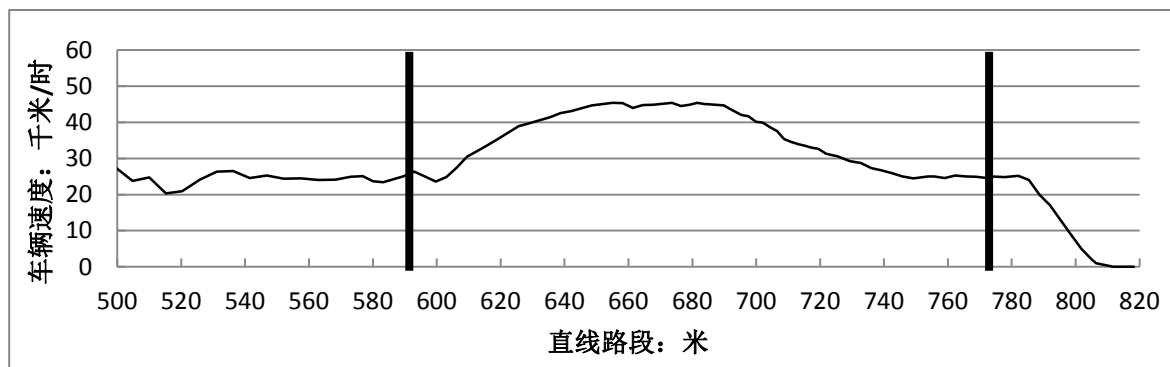


图 4.9 直线跟驰行为试验车速度曲线图

试验车行驶至直线路段 600~650 米处，加速过程的速度拟合曲线函数表达式为：

$$v = 0.001 \times (1.017^x) \quad (4.10)$$

试验车行驶至直线路段 680~760 米，减速过程的速度拟合曲线函数表达式为：

$$v = 961.003 - 141.631 \ln x \quad (4.11)$$

试验车行驶至直线路段 780~810 米，停车过程的速度拟合曲线函数表达式为：

$$v = 400.73 - 0.001x^2 \quad (4.12)$$

根据上文交通环境复杂度的计算模型，建立前导车匀速-加速-减速-停车时的直线跟驰行为试验车车速 v 与前导车加速度 a_0 、交通环境复杂度 C 的函数关系 $v = f(a_0, C)$ ，即

$$v = \begin{cases} \frac{ka_0}{C} \times 0.001 \times 1.017^x, & a_0 \geq 0 \\ \frac{ka_0}{C} \times (961.003 - 141.631 \ln x), & a_0 < 0 \end{cases} \quad (4.13)$$

前导车匀速-加速-减速-停车时的避障行为中，试验车车速与前导车加速度成正比关系，与交通环境复杂度成反比关系。

4.4.3 避障有人驾驶行为判断决策效应分析

本文研究的避障行为是指试验车行驶中避让同车道上的静止车，其加速踏板行程随时间变化的曲线如图 4.10，避障过程中，驾驶人通过视觉预先发现静止在车道上的车辆，因此无需制动，而是转向避让。

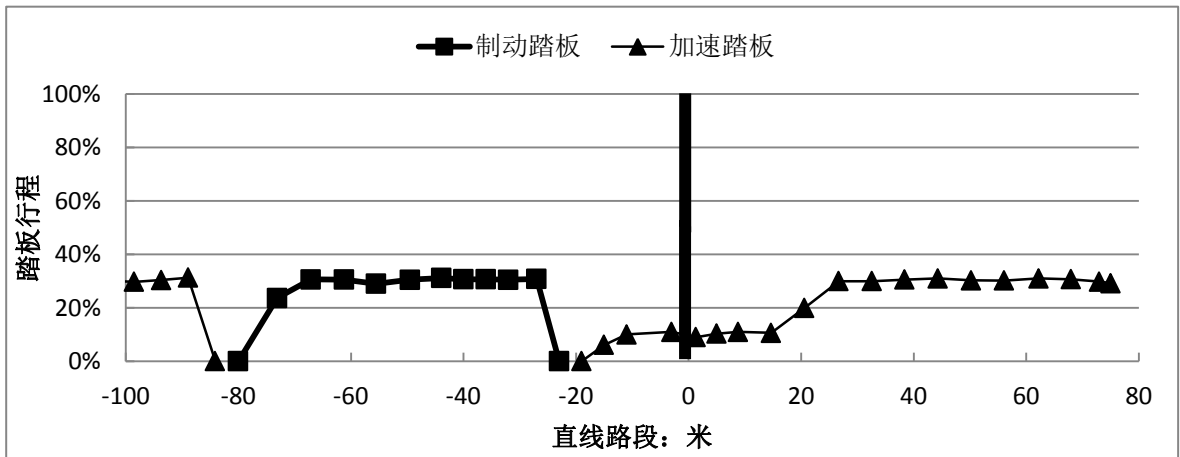
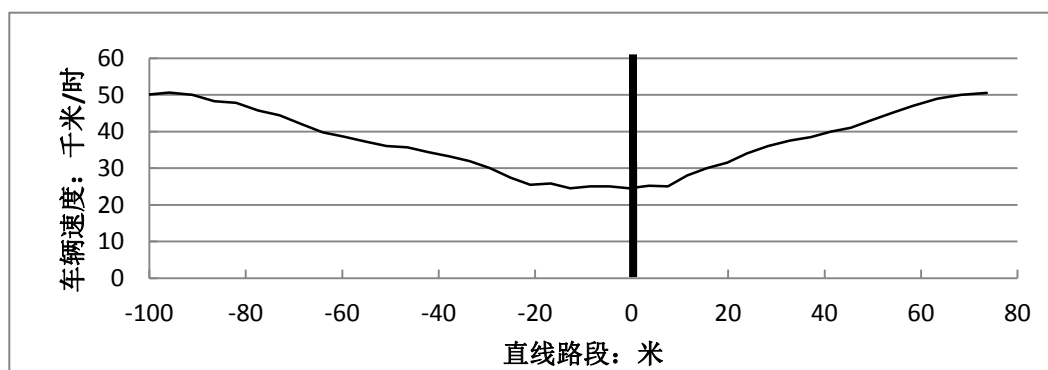


图 4.10 避障行为试验车加速踏板行程随路程变化的曲线图

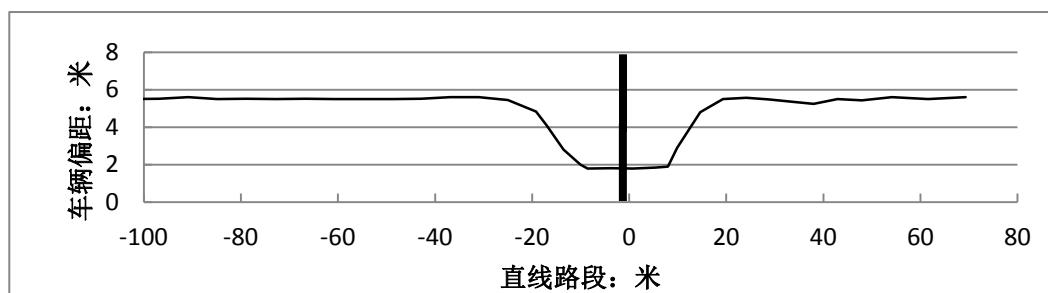
静止车静止在直线路段 0 米处，即图中黑色粗实线位置，试验车距静止车约 86 米时，松开加速踏板，换脚到制动踏板，逐渐减速，距静止车 26 米时，以 10% 的

加速踏板行程低速超越，当超过静止车约 20 米时，加速踏板行程缓慢增加至 30%。

试验车在超车前的速度约为 50km/h，距离静止车辆 86 米左右开始减速，在超越静止车辆过程中以 25km/h 左右的速度绕行，随后逐渐加速，如图 4.11 (a) 所示。



(a) 试验车速度曲线图



(b) 试验车偏距曲线图

图 4.11 避障行为试验车速度和偏距曲线图

试验车距静止车约 26 米处，低速换道，以较大转向盘转角进入左侧车道，换道距离约 16 米，偏距逐渐减小；试验车在左侧车道直线行驶的距离约 18 米，偏距处于 2 米处，横向安全距离为 0.6 米；在左侧车道直行超过静止车约 8 米后，试验车返回原车道，换道距离约为 12 米；超车结束，车辆速度和偏距恢复正常。由此试验车距静止车约 26 米处开始超车，超越静止车约 20 米后进入原车道，超车前换道距离为 16 米，超车后换道距离为 12 米，超车路段总长约 46 米，如图 4.11 (b) 所示。

根据车辆速度的拟合曲线，在路段明显呈三次曲线关系，得到静止车于同车道上避障行为的函数关系为：

$$y = 27.824 - 0.003x + 0.04x^2 + 1.275 \times 10^{-5}x^3 \quad (4.14)$$

根据车辆偏距的拟合曲线呈典型的二次曲线关系，静止车于同车道上避障行为中，车辆偏距函数表达式如下：

$$y = 1.695 + 0.037x + 0.009x^2 \quad (4.15)$$

根据式 (3.11)、式 (3.12)、式 (4.14) 建立静止车于同车道时的避障行为试验车车速与距静止车距离 x ，交通环境复杂度 C 的函数，即

$$y = \frac{k}{C} \times (27.824 - 0.003x + 0.04x^2 + 1.275 \times 10^{-5} x^3) \quad (4.16)$$

静止车于同车道上避障行为中，试验车车速与交通环境复杂度成反比关系。

4.5 基于熵值和决策树的有人驾驶行为判断决策宏观模型

4.5.1 通过交叉口有人驾驶行为判断决策宏观模型

设 $U \neq \emptyset$ 是遇横向右转冲突车时的通过交叉口有人驾驶行为的有限集合，即论域。 $\forall X \subseteq U$ ，称为 U 中的一个概念， $F = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ 是 U 中的一个概念族，其中 $X_i \subseteq U$ ， $X_i \neq \emptyset$ ， $X_i \cap X_j = \emptyset$ ， $i \neq j$ ，且 $i, j = 1, 2, \dots, n$ ， $\bigcup_i X_i = U$ 。

设 R 是 U 上的一个等价关系 (Equivalence Relation)，表示 R 产生的分类，称为关于 U 的一个知识。设 W 是 U 上的等价关系族，组成了 U 上的一组划分，即关于 U 的知识库 $K = (U, W)$ 。

冲突车横向右转时通过交叉口有人驾驶行为定义为四元组： $S = (U, A, V, f)$ ，其中 S 为知识表达系统； $U = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 为论域； $A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$ 为属性的非空有限集合； U 为属性值域， $V = \bigcup V_a$ ； $f : U \times A \rightarrow V$ 为一信息函数，表示对每一个 $a \in A$ ， $x \in U$ ， $f(x, a) \in V_a$ 。冲突车横向右转时通过交叉口有人驾驶行为决策系统中， $A = C \cup D$ ， C 为条件属性， D 为决策属性。

4.5.1.1 基于灰关联熵的条件属性影响分析

灰关联熵方法是在灰关联理论^[107]基础上发展起来的，由于灰关联采用逐点计算关联测度值平均值的方法来求关联度，则存在局部关联倾向和个性信息损失等缺点^[108]，而灰关联熵方法恰好弥补了这种不足，采用信息熵定量描述各比较列和参考列的相似程度，将指标量化进而完成影响因素的排序^[109]。

试验车在绿灯时直行通过交叉口，在交叉口处遇冲突车右转弯汇入试验车所在的车流。起初试验车在车道 L_{14} 上行驶，发现冲突车右转于 L_{24} 上行驶，两车在时间和空间上发生冲突关系，空间上在冲突点 P 会引发侧面碰撞，如图 4.12 所示。

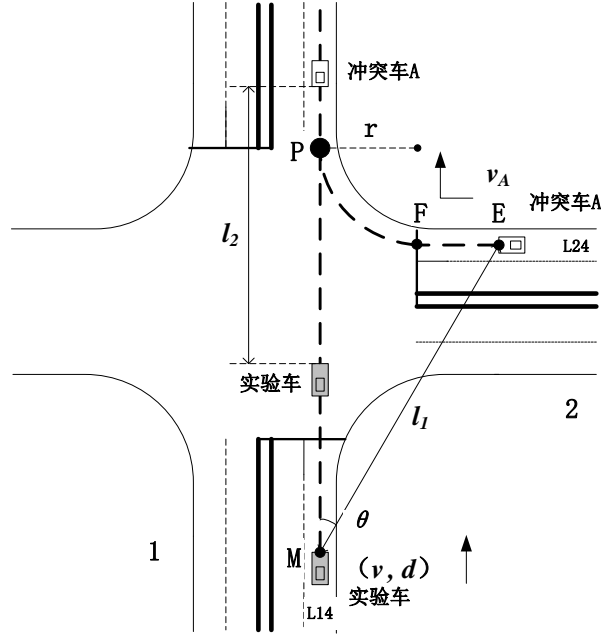


图 4.12 通过交叉口有人驾驶行为图解

计算中，认为冲突车以等速率 v_c 完成右转弯行驶，并且与所在车道停止线处开始转弯，在目标方向停止线位置结束右转弯，转弯轨迹近似为圆弧。

试验车以速率 v 到达冲突点 P 的时间为：

$$t = \frac{MP}{\bar{v}} = \frac{l_1 \cos \theta + r}{\bar{v}} \quad (4.17)$$

冲突车以速率 v_A 到达冲突点 P 的时间为：

$$t_A = \frac{EF}{v_A} + \frac{\overline{FP}}{v_A} = \frac{l_1 \sin \theta - r}{v_A} + \frac{\pi r}{2v_A} \quad (4.18)$$

当冲突车以速率 v_A 经过冲突点 P 后，试验车与其冲突行驶转变为近距离跟驰行驶，跟驰过程中，随着与前导车距离的变化，两车可能发生碰撞，即追尾，因此可以将此时的跟驰行驶理解为广义的冲突行驶，则两车的预计碰撞时间为：

$$t_B = \frac{l_2}{\bar{v} - v_A} \quad (4.19)$$

冲突时差 ΔT ，即试验车和冲突车发生冲突（碰撞）的时间差，若 ΔT 值为负，则试验车与冲突车之间没有明显冲突；若 ΔT 值为正，则试验车与冲突车之间有潜在冲突；若 ΔT 值为零，则试验车与冲突车之间发生碰撞，则

$$\Delta T = \begin{cases} t - t_A = \frac{l_1 \cos \theta + r}{\bar{v}} - \frac{l_1 \sin \theta - r}{v_A} - \frac{\pi r}{2v_A}, & \text{冲突车到达冲突点P前} \\ t_B = \frac{l_2}{\bar{v} - v_A}, & \text{冲突车到达冲突点P后} \end{cases} \quad (4.20)$$

冲突车横向右转时通过交叉口的有人驾驶行为决策是由诸多影响因素制约的，合适地选择属性值，即影响因素，可有针对性地建立通过交叉口行为决策模型，将试验车车速、加速度、距交叉口进口停止线的距离、偏距（距双黄实线中心线的距离）、距冲突车的距离、冲突时差、冲突车速作为条件属性。

决策属性则是由加速（简称 A ）、减速（简称 D ）、制动（简称 B ）和转向（简称 S ）构成的决策，在研究冲突车横向右转时，将决策属性分为如下六种：加速并保持当前车道内，记为 $A \cap S_0$ ；减速并保持当前车道内，记为 $D \cap S_0$ ；制动并保持当前车道内，记为 $B \cap S_0$ ；减速并左转，记为 $D \cap S_{+1}$ ；保持当前车道内怠速行驶（制动踏板与加速踏板均未踏下），记为 S_0 ，减速并右转，记为 $D \cap S_{-1}$ ，由试验分析可知，保持车道内行驶的转向盘转角在 $\pm 8^\circ$ 范围内，左转时的转向盘转角大于 $+8^\circ$ ，右转时的转向盘转角小于 -8° ，各属性值的选取及部分试验数据如表 4.2 所示。

表 4.2 通过交叉口有人驾驶行为属性值选取及部分试验数据

序号	条件属性								决策属性
	试验车							冲突车	
	车速	加速度	距交叉口进口停止线距离	偏距（距双黄实线中心线的距离）	冲突时差	距冲突车 X 向距离	距冲突车 Y 向距离	冲突车速度	
	m/s	m/s ²	m	m	s	m	m	m/s	
	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	d
1	12.528	0.5199	62.60	6.17	3.718	32.29	79.60	11.639	$D \cap S_0$
2	12.722	0.5199	58.10	6.17	3.29	31.30	75.10	11.413	$D \cap S_0$
3	12.917	0.5199	53.70	6.17	2.883	30.30	70.70	11.186	$D \cap S_0$
4	12.278	-1.708	49.30	6.17	2.858	29.31	66.30	10.959	$D \cap S_0$
5	11.917	-0.966	44.90	6.17	2.695	28.32	61.90	10.732	$D \cap S_0$
...
16	8.389	-2.8	-3.30	5.63	0.614	8.67	14.18	6.972	S_0
17	7.194	-3.103	-7.30	5.30	0.723	5.90	10.16	6.444	$A \cap S_0$
18	6.000	-3.365	-10.90	5.16	0.864	3.14	6.55	5.833	$A \cap S_0$
19	5.222	-2.031	-14.20	5.13	0.833	0.87	3.36	5.108	$A \cap S_0$
20	4.397	-0.401	-19.90	5.57	-1.68	0.43	6.94	8.528	$A \cap S_0$

设参考列 $X_0^* = [X_0^*(1), \dots, X_0^*(n)]$ ，比较列 $X_j^* = [X_j^*(1), \dots, X_j^*(n)]$ ，其中 $j = 1, \dots, m$ ，

表示通过交叉口的有人驾驶行为决策时间序列，即决策属性，及试验车、冲突车等决策影响因子的时间序列，即决策属性对应的条件属性，由于各条件属性的量化不同，按式（4.18）对原始数据列作初值化数据预处理，

$$X_i(k) = \frac{X_i^*(k)}{\bar{X}_i^*}, \quad k = 1, \dots, n \quad i = 0, \dots, m \quad (4.21)$$

式中， \bar{X}_i^* 为 $X_i^*(k)$ 的均值，得到无量纲的参考列 $X_0 = [X_0(1), \dots, X_0(n)]$ ，和比较列 $X_j = [X_j(1), \dots, X_j(n)]$ 。

设 ξ_{jk} 为各比较列与参考列的灰关联系数，表示各时间段比较列与参考列的相关程度，

$$\xi_{jk} = \frac{\Delta_{\min} + \rho \Delta_{\max}}{|X_0(k) - X_j(k)| + \rho \Delta_{\max}} \quad (4.22)$$

式中，

$$\Delta_{\min} = \min_j \min_k |X_0(k) - X_j(k)|$$

$$\Delta_{\max} = \max_j \max_k |X_0(k) - X_j(k)|, \quad k = 1, \dots, n, \quad j = 1, \dots, m$$

$\rho \in (0, 1)$ ，为分辨系数。

为取得较好的分辨能力，根据文献[110]，对 ρ 进行试算，得到下面的取值规律：

$$\begin{cases} \varepsilon \leq \rho < 1.5\varepsilon, & \Delta_{\max} \geq 3\Delta \\ 1.5\varepsilon \leq \rho \leq 2\varepsilon, & \Delta_{\max} < 3\Delta \end{cases} \quad (4.23)$$

式中， $\Delta = \frac{\left[\sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n |X_0(k) - X_j(k)| \right]}{m \times n}$ ， Δ 为所有差值绝对值的均值； $\varepsilon = \frac{\Delta}{\Delta_{\max}}$ ， ε 是均值与最大差值的比值。

以 P_{jk} 为条件属性的灰关联熵为：

$$H_j = - \sum_{k=1}^n P_{jk} \log_2 P_{jk} \quad (4.24)$$

式中， $P_{jk} = \frac{\xi_{jk}}{\sum_{k=1}^n \xi_{jk}}$ ； P_{jk} 是灰关联系数分布映射， $P_{jk} \geq 0$ 且 $\sum P_{jk} = 1$ 。

各比较列的灰熵关联度定义为：

$$E_{jk} = \frac{H_{jk}}{H_m} \quad (4.25)$$

式中， $H_m = \log_2 n$ ， n 为条件属性的个数^[111]。

灰关联序列的排序：比较列的灰关联熵和灰熵关联度越大，表明该比较列与参考列的相关程度越高，关联性越强，该比较列对参考列的影响程度越大，所对应的条件属性排名越靠前。

根据式（4.18）将表 4.2 的试验数据进行初始化、差值等计算，取 $\rho = 0.3$ ，得到相应的灰关联系数，如表 4.3 所示。

表 4.3 通过交叉口有人驾驶行为灰关联系数

序号	$\xi(a_1)$	$\xi(a_2)$	$\xi(a_3)$	$\xi(a_4)$	$\xi(a_5)$	$\xi(a_6)$	$\xi(a_7)$	$\xi(a_8)$
1	0.965	0.589	0.866	0.898	0.636	0.547	0.595	0.849
2	0.961	0.597	0.953	0.898	0.629	0.564	0.638	0.839
3	0.958	0.527	0.955	0.897	0.625	0.583	0.687	0.841
4	0.944	0.523	0.869	0.897	0.625	0.625	0.744	0.840
5	0.935	0.503	0.795	0.896	0.624	0.663	0.814	0.849
.....
16	0.946	0.682	0.710	0.788	0.913	0.849	0.987	0.737
17	0.798	0.738	0.861	0.961	0.733	0.671	0.786	0.990
18	0.787	0.948	0.813	0.959	0.702	0.671	0.797	0.901
19	0.842	0.710	0.774	0.959	0.759	0.672	0.815	0.963
20	0.944	0.658	0.694	0.959	0.765	0.672	0.813	0.848

根据式（4.24）和式（4.25），计算各条件属性值得灰关联熵和灰熵关联度，如表 4.4 和表 4.5 所示。

表 4.4 通过交叉口有人驾驶行为灰关联熵

$H(a_1)$	$H(a_2)$	$H(a_3)$	$H(a_4)$	$H(a_5)$	$H(a_6)$	$H(a_7)$	$H(a_8)$
4.59136	4.53277	4.60677	4.53682	4.60542	4.54452	4.54119	4.59064

表 4.5 通过交叉口有人驾驶行为灰熵关联度

$E(a_1)$	$E(a_2)$	$E(a_3)$	$E(a_4)$	$E(a_5)$	$E(a_6)$	$E(a_7)$	$E(a_8)$
1.53045	1.51092	1.53559	1.51227	1.53514	1.51484	1.51373	1.53021

因此，根据灰关联熵和灰熵关联度可得，当冲突车横向右转时，通过交叉口的有人驾驶行为条件属性值的排序为： $a_3 > a_5 > a_1 > a_8 > a_6 > a_7 > a_4 > a_2$ ，即距交叉口进口停止线的距离>冲突时差>试验车车速>冲突车车速>距冲突车 X 向距离>距冲突

车 Y 向距离 > 偏距 (距双黄实线中心线的距离) > 加速度。

4.5.1.2 基于粗糙熵的属性约简

粗糙集模拟人类的抽象逻辑思维^[112], 将推理出的逻辑规则作为知识表达系统的数学模型; 采用粗糙集方法对数据进行深入处理, 作为前置系统, 将具有连续属性的数值进行离散变化, 并约简条件属性, 再将约简得到的最小条件属性集及相应的数据作为下一步建模的输入数据, 不仅减少了输入的数据及特征数量, 去掉冗余数据, 使训练样本集简化, 而且缩短了特征值的计算时间, 具有良好的容错及抗干扰能力。

(1) 数据离散化

如表 4.3 所示, 给出了当试验车直行、冲突车横向往右转时的通过交叉口的有人驾驶行为数据决策表的条件属性值和决策属性值。

条件属性: 试验车——车速、加速度、距交叉口进口停止线距离、偏距 (距双黄实线中心线的距离)、距冲突车 X 向 Y 向距离、冲突时差;

冲突车——车速。

决策属性: 加速并保持当前车道内 ($A \cap S_0$)、减速并保持当前车道内 ($D \cap S_0$)、制动并保持当前车道内 ($B \cap S_0$)、减速并左转 ($D \cap S_{+1}$)、保持当前车道内怠速行驶 (S_0)、减速并右转 ($D \cap S_{-1}$)。

依据交叉口处的试验情景及图 3.8 城市动态交通环境刺激元构成, 将试验车的直行方向定义为纵向, 其条件属性是在直行通过信号控制的十字交叉口情况下的环境状态因素; 冲突车的初始行驶方向与试验车直行方向垂直, 定义为横向, 其条件属性是横向往右转前后的车辆运动状态的变化。基于这些条件属性, 来判断决策试验车在横向往右转冲突车干扰下的通过交叉口行为。

将属性值离散化, 决策属性值按上述顺序命名为 F_1 、 F_2 、 F_3 、 F_4 、 F_5 、 F_6 , 冲突车横向往右转时通过交叉口行为中只涉及到 F_1 、 F_2 、 F_3 、 F_4 , 条件属性值离散化为 0、1、2、3 四个值, 所分区间如表 4.6 所示。

表 4.6 通过交叉口有人驾驶行为数据离散化

条件属性值			离散值			
			0	1	2	3
试验车	车速 m/s	a_1	$(-\infty, 4.2)$	$[4.2, 9.8)$	$[9.8, 13.9)$	$[13.9, +\infty)$
	加速度 m/s^2	a_2	$(-\infty, 0)$	$[0, +\infty)$		
	距交叉口进口停止线 距离 m	a_3	$(-\infty, -21)$	$[-21, 0)$	$[0, 10)$	$[10, 50)$
	偏距（距双黄实线中 心线的距离）m	a_4	$(-\infty, 5.5)$	$[5.5, 6)$	$[6, +\infty)$	
	冲突时差 s	a_5	$(0, 1)$	$[1, 3)$	其他	
	距冲突车 X 向距离 m	a_6	$(0, 3)$	$[3, 10)$	$[10, 20)$	$[20, +\infty)$
	距冲突车 Y 向距离 m	a_7	$(0, 3)$	$[3, 20)$	$[20, 50)$	$[50, +\infty)$
冲突车	冲突车速度 m/s	a_8	$(-\infty, 4.2)$	$[4.2, 9.8)$	$[9.8, 13.9)$	$[13.9, +\infty)$

(2) 属性约简

通过交叉口有人驾驶行为的四元组： $S=(U,A,V,f)$ 中， A 为 U 上的一个等价关系， A 在 U 上导出的划分为 $U/A=\{X_1,X_2,\cdots,X_n\}$ ，则粗糙熵 $E(A)$ 定义为：

$$E(A)=\sum_{i=1}^m \frac{|X_i|}{|U|} \log_2 |X_i| \quad (4.26)$$

式中， $|X_i|$ 表示集合 X 的基数， $\frac{|X_i|}{|U|}$ 表示 X_i 在论域 U 中的概率。

论域 U 中， P 和 Q 是 U 上的两个等价关系集合，且对任意的 $a \in P$ ， $b \in Q$ ， a 和 b 是不可省略的，如果 $P \subset Q$ ，则 $E(P) > E(Q)$ ；如果 $P \supset Q$ ，则 $E(P) < E(Q)$ ；如果 $P \equiv Q$ ，则 $E(P) = E(Q)$ 。

粗糙熵 E 是随着划分的粗糙而单调递增的， (U,R) 的分类过程则是粗糙熵不断降低的过程。

$S=(U,A,V,f)$ 中，任意属性 $a \in A$ 在属性集 A 中的绝对重要性 $SGF(a,A)$ ，为 A 中去掉 a 后引起的粗糙熵的变化，即：

$$SGF(a,A)=E(A-\{a\})-E(A) \quad (4.27)$$

当 $R = \{a\}$ 时, $SGF(a) = SGF(a, \{a\}) = E(\Phi) - E(A) = \log_2 |U| - E(\{a\})$ 。由上述定义可知: $0 \leq SGF(a, A) \leq 1$; 当且仅当 $SGF(a, A) > 0$ 时, 属性 $a \in A$ 在整个属性集 A 中是必要的; 核 $CORE(A) = \{a \in A | SGF(a, A) > 0\}$ 。

$S = (U, A, V, f)$ 中, $P \subseteq A$, $E(P) = E(A)$ 且对任意属性 $a \in P$, 有 $SGF(a, P) > 0$, 则 P 为 A 的一个相对约简。

任意属性 $a \in A - P$ 关于属性集 P 的重要性 $SGF(a, P)$, 定义为 P 中添加 a 后引起的粗糙熵的变化, 即:

$$SGF(a, P) = E(P) - E(P \cup \{a\}) \quad (4.28)$$

这说明, 属性 $a \in A - P$ 关于属性 P 的重要性 $SGF(a, P)$ 的值越大, 属性 $a \in A - P$ 关于属性 P 就越重要, 因此, 为了缩小搜索空间, 把 $SGF(a, P)$ 作为寻找最小或次优约简的启发式信息。

把属性绝对重要性最大的属性值作为属性约简的依据, 即:

$$SGF(a, P) = \max \{SGF(b, P) | b \in A - P\} \quad (4.29)$$

因此, 对于通过交叉口有人驾驶行为四元组中, 首先要计算 S 的粗糙熵 $E(C)$ 及每个属性值 $a \in C$ 在 C 中的绝对属性重要性 $SGF(a, C)$; 第二, 求得属性集 C 的核属性 $L = CORE(a)$; 第三, 计算核属性的粗糙熵 $E(L)$, 直到 $E(L) = E(C)$ 时, 则 L 为最小属性约简。

对通过交叉口的有人驾驶行为决策表进行属性约简。属性离散化后的决策系统中每一个属性相当于一个等价关系, 一个决策系统可以看作是定义的一族等价关系,

根据式 (4.22), 得到粗糙熵 $E(A) = \sum_{i=1}^m \frac{|x_i|}{|U|} \log_2 |x_i| = 0.8338 = E(C)$ 。

计算绝对属性重要性值: $SGF(a_1, C) = E(A - a_1) - E(C) = 0.1545$

同理, 得

$$SGF(a_2, C) = SGF(a_4, C) = SGF(a_5, C) = SGF(a_8, C) = 0$$

$$SGF(a_3, C) = 0.131$$

$$SGF(a_6, C) = 0.1915$$

$$SGF(a_7, C) = 0.1545$$

核属性 $L = CORE(A) = \{a_1, a_3, a_6, a_7\}$, 粗糙熵

$$E(L) = E(a_1, a_3, a_6, a_7) = 0.9650 \neq E(C)$$

所以, 每一个 $a \in C - L = \{a_2, a_4, a_5, a_8\}$, 计算其 SGF 值, 得

$$SGF(a_2, L) = SGF(a_4, L) = 0$$

$$SGF(a_5, L) = SGF(a_8, L) = 0.1312$$

$$H = \{a \in C - L | \max\{SGF(a, L)\}\} = \{a_5, a_8\}$$

因此, $L \cup H = \{a_1, a_3, a_5, a_6, a_7, a_8\}$, 粗糙熵 $E(L \cup H) = 0.8338 = E(C)$, 则 $\{a_1, a_3, a_5, a_6, a_7, a_8\}$ 为冲突车横向右转时的通过交叉口行为四元组的最小属性约简, 下文将以这六个属性作为驾驶行为判断决策宏观模型的输入量。

4.5.1.3 基于改进的 ID3 决策树的驾驶行为决策机制

传统的 ID3 算法通过每个属性的信息熵来判断数据集中的分类属性, 改进的 ID3 决策树方法结合了有效度的概念, 求出每个属性的关联程度, 以信息增益因子最大作为增益标准, 使生成的决策树更紧凑, 避免了传统的 ID3 算法依赖于选择属性值数目较多的属性作为节点。

对两个项集 A 、 B 进行独立性分析, 相关性的计算为:

$$Corr_{(A,B)} = \frac{P(A \cup B)}{P(A)P(B)} \quad (4.30)$$

若式 (4.27) 的值小于 1, 则 A 与 B 负相关; 若结果值大于 1, 则 A 与 B 正相关; 若结果值等于 1, 则 A 与 B 是相互独立的, 无相关性。

定义划分距离 $D = \log_k \frac{k}{l}$, k 为总记录数, l 为某属性的取值个数。

有效度是衡量决策树的每一个分类属性和类标号之间变化的相关程度, 从数据中提取分类属性 a 及其对应的类标号 η , 得到二维样本 $(a_1, \eta_1) \cdots (a_n, \eta_n)$, 其中分类属性 a_i 有 v 个不同的值, 类标号 η_i 有 p 个不同的值, 则有效度为:

$$ED(a_i) = \log_n \left(\frac{n}{v} \right) \left(\sum_{i=1}^v \sum_{j=1}^p \left| \frac{P(a_i \cup \eta_j)}{P(a_i) \times P(\eta_j)} - 1 \right| \right) \quad (4.31)$$

为了衡量每个属性对数据集的不确定程度, 为每个属性 a_i 的信息熵引入权重 v ,

根据上述公式和定义, 设函数 $Z(a_i)$ 为信息增益因子, 有

式中, $H(B_i)$ 为属性 a_i 对应属性值为 B_i 的信息熵, $H(B_i) = p_i \log_2 p_i$, 根据最大信息增益因子 $Z(a_i)$ 选择根节点, 即将该属性的有效度最高、熵值最小的节点。

图 4.13 为遇横向右转冲突车时的通过交叉口有人驾驶行为决策树, 对应的决策规则表如表 4.7 所示。

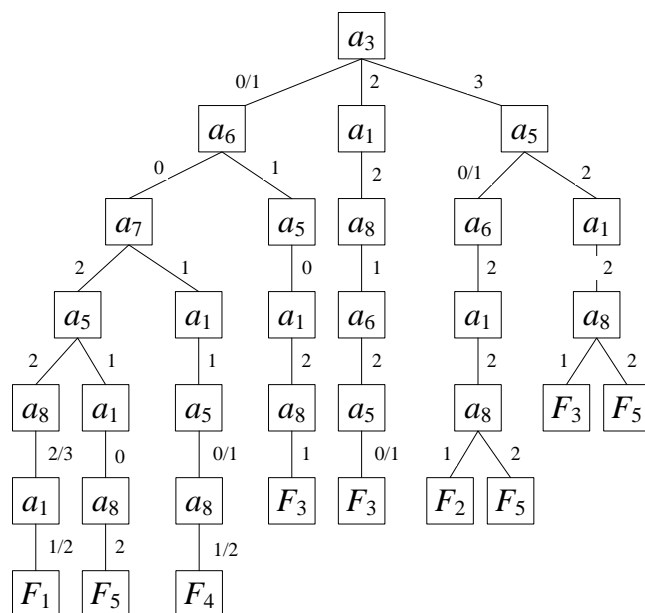


图 4.13 冲突车横向右转时的通过交叉口有人驾驶行为决策树

表 4.7 冲突车横向往右转时的通过交叉口有人驾驶行为决策规则表

序号	IF	THEN
1	$a_3=4$ AND $a_1=3$	$d=F_2$
2	$a_3=3$ AND $a_5=2/1$ AND $a_1=2$ AND $a_8=2$	$d=F_5$
3	$a_3=3$ AND $a_5=0$ AND $a_1=2$ AND $a_8=1$ AND $a_6=2$	$d=F_2$
4	$a_3=3$ AND $a_5=0$ AND $a_1=2$ AND $a_8=2$ AND $a_6=2$	$d=F_5$
5	$a_3=2$ AND $a_5=1$ AND $a_1=2$ AND $a_8=1$ AND $a_6=2$	$d=F_3$
6	$a_3=2$ AND $a_5=0$ AND $a_1=2$ AND $a_8=1$ AND $a_6=2$	$d=F_3$
7	$a_3=1$ AND $a_5=0$ AND $a_1=2$ AND $a_8=1$ AND $a_6=1$	$d=F_3$
8	$a_3=1$ AND $a_5=0$ AND $a_1=1$ AND $a_8=1$ AND $a_6=0$ AND $a_7=1$	$d=F_4$
9	$a_3=1$ AND $a_5=1$ AND $a_1=1$ AND $a_8=2$ AND $a_6=0$ AND $a_7=1$	$d=F_4$
10	$a_3=0$ AND $a_5=1$ AND $a_1=0$ AND $a_8=2$ AND $a_6=0$ AND $a_7=2$	$d=F_5$
11	$a_3=0$ AND $a_5=2$ AND $a_1=1$ AND $a_8=2$ AND $a_6=0$ AND $a_7=2$	$d=F_1$
12	$a_3=0$ AND $a_5=2$ AND $a_1=2$ AND $a_8=3$ AND $a_6=0$ AND $a_7=2$	$d=F_1$

表 4.7 生成的冲突车横向往右转时的通过交叉口有人驾驶行为决策规则表，可作为相同情况下无人驾驶智能行为测试标准，为无人驾驶车辆的测评提供依据。

4.5.2 直线跟驰有人驾驶行为判断决策宏观模型

试验车在直线路段上跟随前导车行驶，并根据前导车的运动状态判断和决策自身运动方式。由于试验车驾驶人不愿落后的心态，导致了紧随前导车行驶的特点，同时满足：一车速要求，即试验车车速不能够长时间大于前导车车速，只能在前导车车速附近摆动；二距离要求，即与前导车保持足够的距离，从而获得足够的时间使试验车驾驶人作出反应^[113]。根据有人驾驶行为信息加工系统，前导车运动状态作为动态刺激元成为主要刺激被试验车驾驶人感知，此后驾驶人根据其知识和经验作出相应的判断和决策，以至将决策落实到手脚来操作车辆，这一系列过程所经历的时间就是驾驶人的反应时间，当交通环境刺激因素较简单时，驾驶人的反应时间约为 0.67s。

直线跟驰中，试验车的运动受到前导车运动的强烈制约，驾驶人随距离差和速度差的变化采取相应的驾驶决策，如图 4.14 所示，根据车辆跟驰理论，试验车在 t_{n+1}

时刻的车头时距为:

$$h_{n+1} = \frac{l_{n+1}}{v_{n+1}} \quad (4.34)$$

式中, h_{n+1} ——试验车在 t_{n+1} 时刻的车头时距;

l_{n+1} ——试验车与前导车 B 在 t_{n+1} 时刻的车头间距;

v_{n+1} ——试验车的行驶速度。

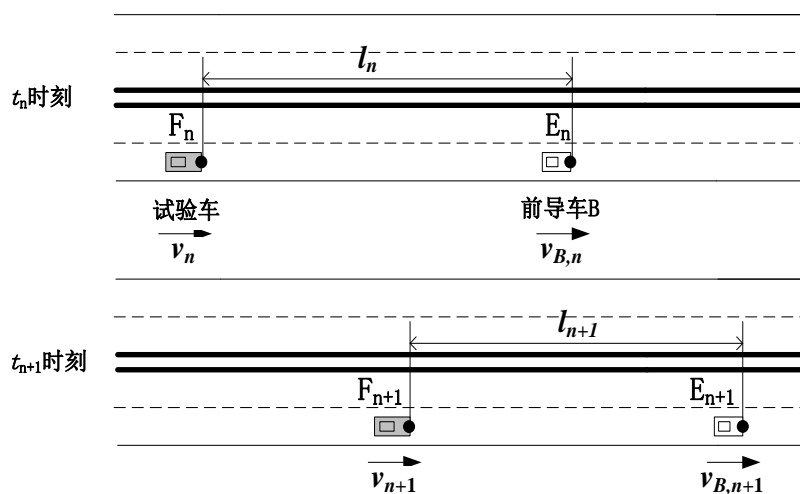


图 4.14 直线跟驰有人驾驶行为图解

车头时距用时间特性描述了试验车与前导车的空间特性, 应大于驾驶人的反应时间, 以便驾驶人有充分的时间对前导车运动状态的变化做出反应, 参照文献[114]和文献[115], 在车辆跟驰中, 车头时距小于 5s。

对于无人驾驶车辆来说, 车辆上安装了辅助设备, 通过传感器和自动驾驶系统缩短了反应时间, 因此相同跟驰环境刺激下, 无人驾驶车辆所需的最小车头时距要略小于驾驶人驾驶车辆的情况。

直线跟驰试验中, 前导车先是匀速行驶, 然后加速, 在减速, 最后停止, 对于这种前导车运动状态的变化, 试验车驾驶人需要及时作出判断并决策加减速, 表 4.8 为直线跟驰试验中的部分数据。将决策属性值各自对应的记录条数占总记录条数的比例作为量化依据, 得到参考列量值, 对条件属性值的原始数据列进行初始化、差值等计算。

表 4.8 直线跟驰有人驾驶行为属性值选取及部分试验数据

序号	条件属性							决策属性
	试验车					前导车		
	车速	车辆位置坐标	车头间距	速度差	车头时距	车速	加速度	
	m/s	m	m	m/s	s	m/s	m/s ²	
	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	d
1	17.444	474.5	50.7	0.61	2.906	16.83	2.588	$A \cap S_0$
2	16.917	479.2	50.9	-0.67	3.009	17.58	2.788	$A \cap S_0$
3	17.389	483.9	51.1	-0.08	2.939	17.47	0.407	$A \cap S_0$
4	16.833	488.8	51.1	-0.61	3.037	17.44	0.097	$A \cap S_0$
5	17.806	493.9	50.9	0.19	2.869	17.61	0.557	$A \cap S_0$
...
116	15.278	734.9	57.7	0.39	3.777	14.89	0.893	$A \cap S_0$
117	15.25	738.5	58.2	0.22	3.816	15.03	0.493	$A \cap S_0$
118	15.222	742.1	57.8	0.44	3.788	14.78	0.893	$A \cap S_0$
119	15.306	745.8	56.3	-0.08	3.678	15.39	2.19	$A \cap S_0$
120	15.25	749.5	57.8	0.31	3.79	14.94	1.582	$A \cap S_0$

取 $\rho = 0.06$ ，得到相应的灰关联系数，如表 4.9 所示。

表 4.9 直线跟驰有人驾驶行为灰关联系数

序号	$\xi(a_1)$	$\xi(a_2)$	$\xi(a_3)$	$\xi(a_4)$	$\xi(a_5)$	$\xi(a_6)$	$\xi(a_7)$
1	0.838	0.569	0.498	0.472	0.795	0.727	0.505
2	0.872	0.567	0.486	0.731	0.780	0.456	0.487
3	0.841	0.564	0.494	0.581	0.791	0.546	0.685
4	0.877	0.562	0.483	0.706	0.777	0.469	0.750
5	0.817	0.559	0.504	0.525	0.804	0.602	0.979
.....
116	0.995	0.460	0.423	0.416	0.720	0.927	0.551
117	0.998	0.459	0.421	0.433	0.718	0.976	0.865
118	1.000	0.458	0.422	0.408	0.719	0.882	0.550
119	0.993	0.457	0.430	0.467	0.726	0.815	0.599
120	0.998	0.455	0.422	0.421	0.720	0.954	0.466

根据式 (4.24) 和式 (4.25), 计算各条件属性值得灰关联熵和灰熵关联度, 如表 4.10 和表 4.11 所示。

表 4.10 直线跟驰有人驾驶行为灰关联熵

$H(a_1)$	$H(a_2)$	$H(a_3)$	$H(a_4)$	$H(a_5)$	$H(a_6)$	$H(a_7)$
6.3591	6.2798	6.3006	6.3217	6.2836	6.2879	6.3303

表 4.11 直线跟驰有人驾驶行为灰熵关联度

$E(a_1)$	$E(a_2)$	$E(a_3)$	$E(a_4)$	$E(a_5)$	$E(a_6)$	$E(a_7)$
2.2652	2.2369	2.2443	2.2518	2.2383	2.2398	2.2549

因此, 根据灰关联熵和灰熵关联度可得, 前导车匀速-加速-减速-停车时的直线跟驰行为条件属性中, $a_3 > a_7 > a_4 > a_5 > a_6 > a_1 > a_2$, 即车头间距>前导车加速度>速度差>车头时距>前导车车速>试验车车速>试验车位置坐标。

根据直线跟驰试验场景及图 3.3 城市动态交通环境的刺激元构成, 试验车与前导车均沿直线路段行驶, 其直行方向定义为纵向, 在约 320 米的直线行驶中, 前导车以 25km/h 左右的速度行驶后加速至 45km/h 左右, 行驶一段路程后又开始减速到 25km/h, 最后停车, 在这一运动状态的变化中, 研究试验车的直线跟驰行为。表 4.12 为条件属性值离散化, 决策属性值与 4.5.1 节相同, 前导车匀速-加速-减速-停车时的直线跟驰行为中只涉及 F_1 、 F_2 、 F_3 。

表 4.12 直线跟驰有人驾驶行为数据离散化

条件属性值			离散值		
			0	1	2
试验车	车速 m/s	a_1	(5.6, 8.3)	[8.3, 13.9)	[13.9, +∞)
	车辆位置坐标 m	a_2	(470, 570)	[570, 680)	[680, 750)
	车头间距 m	a_3	变小	变大	
	速度差 m/s	a_4	(-∞, 0)	[0, +∞)	
	车头时距 s	a_5	[1.5, 3)	[3, 5)	
前导车	车速 m/s	a_6	(5.6, 8.3)	[8.3, 13.9)	[13.9, +∞)
	加速度 m/s ²	a_7	(-∞, 0)	[0, +∞)	

直线跟驰的有人驾驶行为四元组 $S = (U, A, V, f)$, 经过粗糙熵 $E(C)$ 、属性绝对重要性 $SGF(a, C)$ 、属性 $L = CORE(a)$ 的计算, 求得前导车匀速-加速-减速-停车时的直行跟驰行为四元组的最小属性约简为 $\{a_3, a_4, a_7\}$, 符合灰关联熵算法得出的条件属性重要性。

应用改进的 ID3 算法建立前导车匀速-加速-减速-停车时的直线跟驰行为决策树

模型，取最大信息增益因子 $Z(a_i)$ 最大的属性为根节点，即将该属性的有效度最高、熵值最小的节点，如图 4.15 所示，相应的规则表如表 4.13。

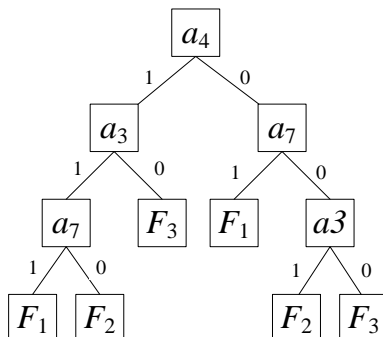


图 4.15 前导车匀速-加速-减速-停车时的直线跟驰有人驾驶行为决策树

表 4.13 前导车匀速-加速-减速-停车时的直线跟驰有人驾驶行为决策规则表

序号	IF	THEN
1	$a_4=0$ AND $a_7=0$ AND $a_3=0$	$d=F_3$
2	$a_4=0$ AND $a_7=0$ AND $a_3=1$	$d=F_2$
3	$a_4=0$ AND $a_7=1$	$d=F_1$
4	$a_4=1$ AND $a_3=0$	$d=F_3$
5	$a_4=1$ AND $a_3=1$ AND $a_7=0$	$d=F_2$
6	$a_4=1$ AND $a_3=1$ AND $a_7=1$	$d=F_1$

根据表 4.13 的决策规则表，得到如图 4.16 所示的直线跟驰有人驾驶行为决策机制，前导车的运动状态依次为匀速、加速、减速、和停车。

图 4.16 (a) 中，前导车以速度 25km/h 近匀速行驶，试验车与前导车的车头间距约 25m；当前导车行至路段坐标 625m 处时开始加速，试验车驾驶人感知到车头间距的增加，在约 2s 的反应时间内行驶 15m 后开始下踏加速踏板进行加速，以削弱车头间距的增大趋势，车头间距随两车速度的增加而逐渐增大后并维持恒定；前导车加速行驶于路段坐标 685m 处时，速度约 45km/h 并结束加速，试验车驾驶人感知到车头间距的减小趋势，在约 2.2s 的反应时间内行驶 25m 后开始上抬加速踏板，轻微减速，以保持车头间距。

图 4.16 (b) 中，该路段上前导车以速度 45km/h 近匀速行驶，试验车与前导车的车头间距约 45m；当前导车行至路段坐标 725m 处时开始减速，试验车驾驶人感知到车头间距的减小，在约 2.3s 的反应时间内行驶 25m 后开始上抬加速踏板并下踏制动踏板进行减速，以削弱车头间距的减小趋势，车头间距随

两车速度的降低而逐渐减小后并维持恒定；前导车加速行驶于路段坐标 775m 处时，速度约 25km/h 并结束减速，试验车驾驶人感知到车头间距的增加趋势，在约 2s 的反应时间内行驶 15m 后开始上抬制动踏板并下踏加速踏板，轻微加速，以保持车头间距。

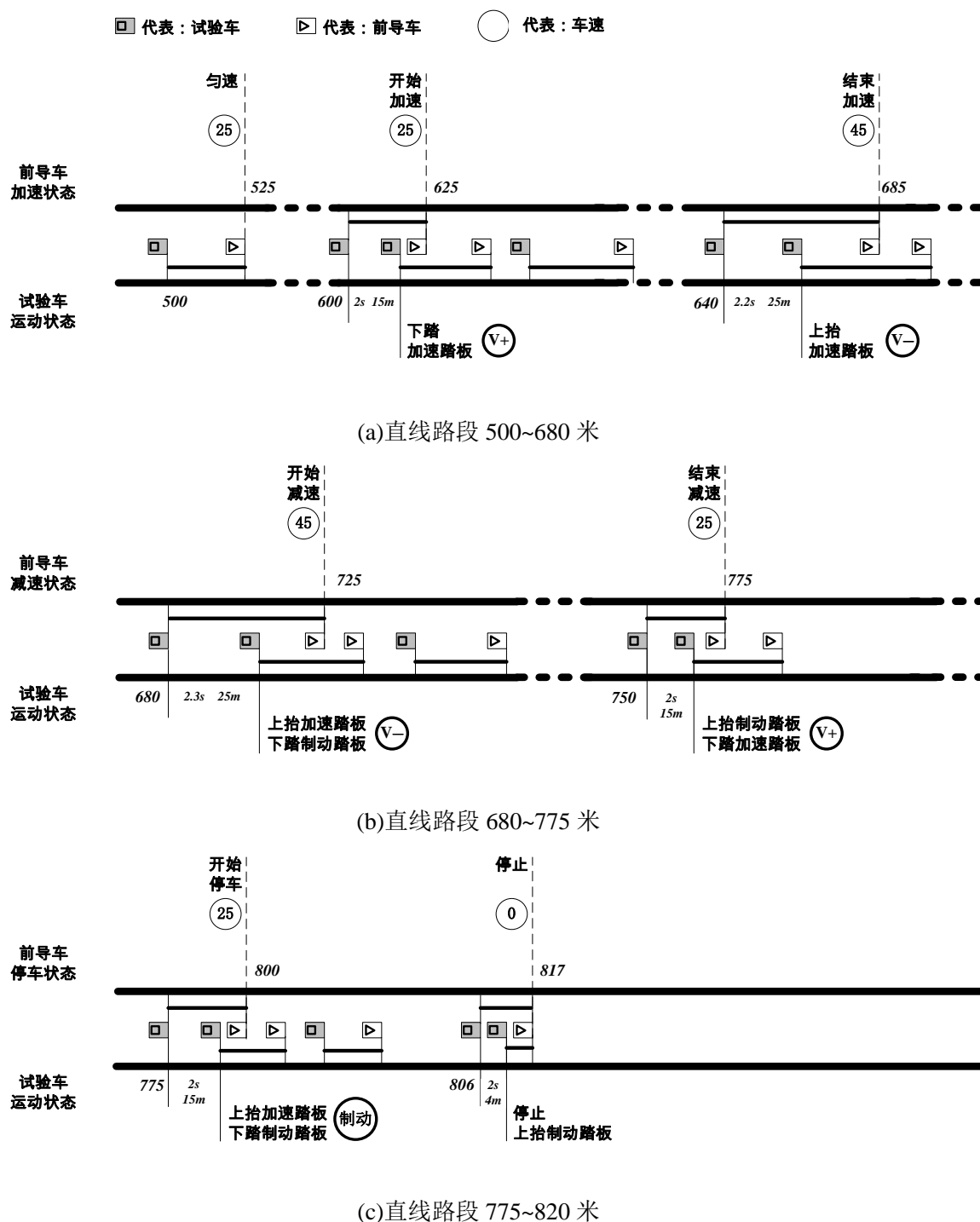


图 4.16 前导车匀速-加速-减速-停车时的直线跟驰有人驾驶行为决策机制

图 4.16 (c) 中, 该路段上前导车以速度 25km/h 近匀速行驶, 试验车与前导车的车头间距约 25m; 当前导车行至路段坐标 800m 处时开始减速, 制动灯亮起, 试验车驾驶人感知到制动灯亮并且车头间距的减小, 在约 2s 的反应时间内行驶 15m 后迅速下踏制动踏板进行减速, 以削弱车头间距的减小趋势, 车头间距随两车速度的减小而逐渐减小; 当前导车停止于路段坐标 817m 处时, 试验车驾驶人在约 2s、25m 后停止, 并上抬制动踏板。

表 4.7 及图 4.16 生成的前导车匀速-加速-减速-停车时的直线跟驰有人驾驶行为决策规则表和决策机制, 可作为相同情况下无人驾驶智能行为测试标准, 为无人驾驶车辆的测评提供依据。

4.5.3 避障有人驾驶行为判断决策宏观模型

静止车停止在试验车所行车道上, 试验车避障前, 上抬加速踏板, 做好停车等应急准备, 防止静止车突然开启车门、突然起步等, 同时开启左转向灯、变换使用远、近光灯或鸣笛, 确认安全后, 判断超越静止车; 超车中, 试验车应减速向静止车的左侧靠近, 缩短与其距离, 超越时与其保持一定横向距离, 完成换道后加速以减少超车的距离和时间, 使超车快速完成; 超越后, 不能过早地驶入原车道, 应继续沿超车道行驶, 在超越静止车 20~30 米后, 开启右转向灯, 返回原车道。

避障过程中, 试验车根据自身车速、与静止车的纵向距离、距车道中心线的横向距离等判断超车的开始时间和位置, 以及是否会遇到冲突点, 静止车 C 所在位置为冲突点 N 。将试验车避障过程分为避障前(冲突点 N 前)和避障后(冲突点 N 后)两个子过程, 每个子过程又包含换道行驶和超车道行驶, S_1 为避障前换道距离, S_2 为避障前分离距离, S_3 为避障后分离距离, S_4 为避障后换道距离, 由效应分析可知, S_1 近似于 3 倍的 S_2 , S_4 近似于 3 倍的 S_3 , 如图 4.17 所示。

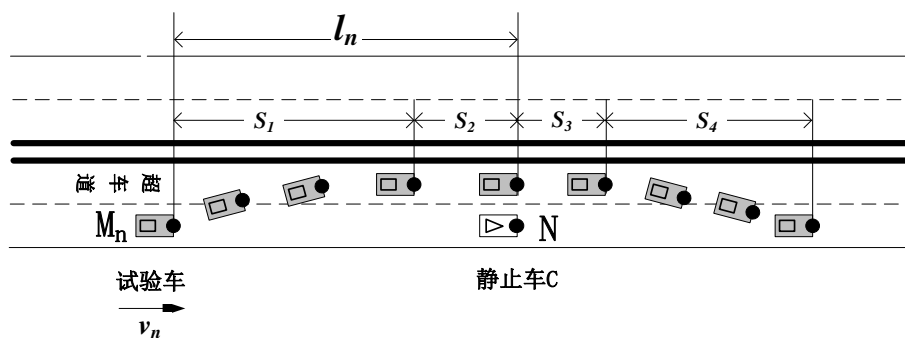


图 4.17 避障有人驾驶行为图解

因此,静止车于同车道上的避障的冲突时间为试验车在纵向上到达冲突点 N 前及到达冲突点 N 后的时间,即:

$$\Delta T = \begin{cases} t_1 + t_2 = t_1 + \frac{l_n - t_1 v_n}{v_n} & \text{实验车到达冲突点N前} \\ t_3 + t_4 = \frac{l_n}{v_n} + t_4 & \text{实验车到达冲突点N后} \end{cases} \quad (4.35)$$

式中, t_1 ——试验车在到达冲突点 N 前换道行驶阶段所对应的时间;

t_2 ——试验车在到达冲突点 N 前超车道行驶阶段所对应的时间;

t_3 ——试验车在到达冲突点 N 后换道行驶阶段所对应的时间;

t_4 ——试验车在到达冲突点 N 后超车道行驶阶段所对应的时间;

l_n ——试验车在第 n 时刻与静止车 C 的纵向距离;

v_n ——试验车在第 n 时刻的行驶速度。

车道宽度为 3.5m 时,试验车平均横向车速为 0.64m/s 时,换道时间约为 $2s^{[116]}$,超车的全部时间至多是 $10s^{[117]}$ 。属性值选取及部分试验数据如表 4.14 所示。

表 4.14 避障有人驾驶行为属性值选取及部分试验数据

序号	条件属性 (试验车)					决策属性
	车速	车辆位置坐标	距双黄实线中心线的横向距离	距静止车纵向距离	避障冲突时间	
	m/s	m	m	m	s	
	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	d
1	15.417	142	6.29	86.319	5.599	$D \cap S_{+1}$
2	16.917	147.8	6.22	80.535	4.761	$D \cap S_{+1}$
3	15.583	153.8	6.16	74.466	4.779	$D \cap S_{+1}$
4	16.139	159.7	6.08	68.558	4.248	$D \cap S_{+1}$
5	16.389	165.6	5.94	62.690	3.825	$D \cap S_{+1}$
...
116	13.944	284.4	5.17	-56.081	6.022	$D \cap S_{-1}$
117	12.222	289.4	5.31	-61.093	6.999	$A \cap S_0$
118	13.889	294.3	5.37	-65.956	6.749	$A \cap S_0$
119	12.611	299.6	5.37	-71.276	7.652	$A \cap S_0$
120	12.278	304.6	5.33	-76.302	8.215	$A \cap S_0$

将上述决策属性值各自对应的记录条数占总记录条数的比例作为量化依据,得到静止车于同车道上的避障行为参考列量值,对条件属性值的原始数据列进行初始化、差值等计算,取 $\rho = 0.1$,得到相应的灰关联系数,如表 4.15 所示。

表 4.15 避障有人驾驶行为灰关联系数

序号	$\xi(a_1)$	$\xi(a_2)$	$\xi(a_3)$	$\xi(a_4)$	$\xi(a_5)$
1	0.743	0.471	0.504	0.479	0.766
2	0.793	0.470	0.476	0.649	0.898
3	0.829	0.469	0.461	0.842	0.998
4	0.873	0.467	0.444	0.799	0.887
5	0.886	0.465	0.433	0.785	0.856
.....
116	0.943	0.464	0.419	0.548	0.769
117	0.995	0.463	0.415	0.449	0.718
118	0.961	0.462	0.431	0.400	0.727
119	0.995	0.460	0.423	0.416	0.720
120	0.998	0.459	0.421	0.433	0.718

根据式 (4.24) 和式 (4.25), 计算灰关联熵和灰熵关联度, 如表 4.16 和表 4.17 所示。静止车于同车道上的避障行为条件属性, $a_4 > a_5 > a_3 > a_1 > a_2$, 即距静止车纵向距离>超车冲突时间>距双黄实线中心线的横向距离>车速>车辆位置坐标。

表 4.16 避障有人驾驶行为灰关联熵

$H(a_1)$	$H(a_2)$	$H(a_3)$	$H(a_4)$	$H(a_5)$
4.6885	4.6803	4.7109	4.7365	4.7328

表 4.17 避障有人驾驶行为灰熵关联度

$E(a_1)$	$E(a_2)$	$E(a_3)$	$E(a_4)$	$E(a_5)$
2.0192	2.0157	2.0289	2.0399	2.0383

将属性值离散化, 条件属性值离散化为 0、1、2 三个值, 所分区间如表 4.18 所示, 静止车于同车道上的避障行为的决策属性值只涉及 F_1 (加速并保持当前车道内, 即 $A \cap S_0$)、 F_2 (减速并保持当前车道内, 即 $D \cap S_0$)、 F_4 (减速并左转, 即 $D \cap S_{+1}$)、 F_5 (保持当前车道内怠速行驶, 即 S_0)、 F_6 (减速并右转, 即 $D \cap S_{-1}$)。

表 4.18 避障有人驾驶行为数据离散化

条件属性值		0	1	2
车速 m/s	a_1	(10, 15)	[15, 18)	[18, +∞)
车辆位置坐标 m	a_2	(50, 226)	[226, 260)	[260, +∞)
距双黄实线中心线的 横向距离 m	a_3	[1.5, 3.5)	[3.5, 5)	[5, 8)
距静止车纵向距离 m	a_4	(-150, 0)	[0, 50)	[50, +∞)
避障冲突时间 s	a_5	[0, 3)	[3, 5)	[5, +∞)

避障的有人驾驶行为四元组 $S = (U, A, V, f)$ ，经过粗糙熵 $E(C)$ 、属性绝对重要性 $SGF(a, C)$ 、属性 $L = CORE(a)$ 的计算，求得直行跟驰行为四元组的最小属性约简为 $\{a_1, a_4, a_5\}$ ，与灰关联熵算法的结果相符。基于改进的 ID3 算法建立静止车于同车道上的避障行为决策树模型，取有效度最高、熵值最小的属性为根节点，如图 4.18 所示，规则表如表 4.19。

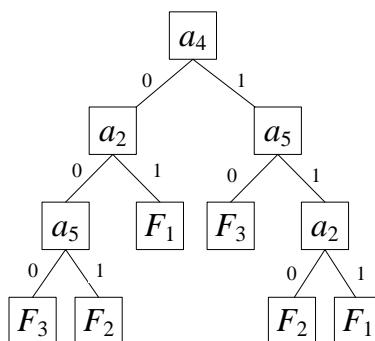


图 4.18 静止车于同车道上的避障有人驾驶行为决策树

表 4.19 静止车于同车道上的避障有人驾驶行为决策规则表

序号	IF	THEN
1	$a_4=0$ AND $a_2=0$ AND $a_5=0$	$d=F_3$
2	$a_4=0$ AND $a_2=0$ AND $a_5=1$	$d=F_2$
3	$a_4=0$ AND $a_2=1$	$d=F_1$
4	$a_4=1$ AND $a_5=0$	$d=F_3$
5	$a_4=1$ AND $a_5=1$ AND $a_2=0$	$d=F_2$
6	$a_4=1$ AND $a_5=1$ AND $a_2=1$	$d=F_1$

表 4.19 生成的静止车于同车道上的避障有人驾驶行为决策规则表，可作为相同情况下无人驾驶智能行为测试标准，为无人驾驶车辆的测评提供依据。

4.5.4 有人驾驶行为判断决策宏观模型的验证

分别针对冲突车横向右转、前导车匀速-加速-减速-停车、静止车于同车道上的有人驾驶行为，运用 4.5 节所建立的通过交叉口行为、直线跟驰行为、避障行为判断决策宏观模型，分别对道路试验中的另三组试验数据进行决策识别，并对比结果。表 4.20 为判断决策模型识别结果与试验数据的对比。

表 4.20 判断决策模型识别结果与实验数据对比

三种驾驶行为	正确识别结果数	错误识别结果数	正确率
通过交叉口行为	1567	152	90.3%
直线跟驰行为	1794	88	95.1%
避障行为	1875	135	92.8%

通过正确率来验证模型的有效性，通过交叉口、直线跟驰、避障三种典型工况中的驾驶行为判断决策模型识别的正确率较高，识别过程具有较高效率、清晰明确，验证该模型有效可行，可作为无人驾驶智能行为的测试标准，为无人驾驶车辆“未来挑战”比赛提供测评依据。

4.6 无人驾驶智能行为判断决策工作机制

将有人驾驶行为刺激解释产生的车辆参数作为输入，将其判断决策作为输出，建立通过交叉口、直线跟驰、和避障三种典型工况中有人驾驶行为判断决策模型，同理，将无人驾驶智能行为刺激解释产生的车辆参数作为输入，将其判断决策作为输出，由刺激解释推断判断决策，从而实现对无人驾驶智能行为判断决策结果及能力的界定。基于灰关联熵法和决策树实现无人驾驶智能行为判断决策机制，如图 4.19 所示。

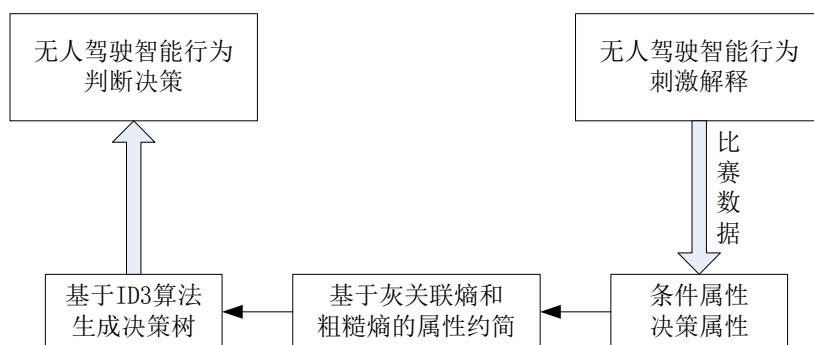


图 4.19 基于灰关联熵法和决策树的无人驾驶智能行为判断决策机制

设无人驾驶智能行为四元组： $S=(U,A,V,f)$ ，其中 S 为知识表达系统； $U=\{x_1,x_2,\dots,x_n\}$ 为论域； $A=\{a_1,a_2,\dots,a_m\}$ 为属性的非空有限集合； V 为属性值域， $V=\bigcup V_a$ ， $f:U\times A\rightarrow V$ 为一信息函数，表示对每一个 $a\in A$ ， $x\in U$ ， $f(x,a)\in V_a$ 。无人驾驶智能行为决策系统中， $A=C\cup D$ ， C 为条件属性， D 为决策属性。

无人驾驶智能行为的条件属性可以是参赛车速、加速度、车辆位置横纵坐标、

距其他车横纵向距离、其他车车速等。无人驾驶智能行为的决策属性可以由加速（简称 A ）、减速（简称 D ）、制动（简称 B ）和转向（简称 S ）构成的决策组合。

对无人驾驶智能行为四元组完成属性约简，根据式（4.20）和（4.21），分别计算各条件属性值的灰关联熵和灰熵关联度，将条件属性值排序，比较列的灰关联熵和灰熵关联度越大，表明该比较列与参考列的相关程度越高，关联性越强，该比较列对参考列的影响程度越大，所对应的条件属性排名越靠前；依次计算粗糙熵 $E(C)$ 及每个属性值在 C 中的绝对属性重要性 $SGF(a, C)$ 、核属性 $L = CORE(a)$ 、核属性的粗糙熵 $E(L)$ 、直到 $E(L) = E(C)$ 时，则 L 为最小属性约简。

传统的 ID3 算法通过每个属性的信息熵来判断数据集中的分类属性，改进的 ID3 决策树方法结合了有效度的概念，求出每个属性的关联程度，以信息增益因子最大作为增益标准，使生成的决策树更紧凑，避免了传统的 ID3 算法依赖于选择属性值数目较多的属性作为节点。

城市交通中无人驾驶智能行为判断决策工作机制，可有效根据无人驾驶车辆的行驶参数回推其判断决策能力，从而作为评价其智能行为的有力依据，有利于无人驾驶智能行为测评体系的构建。

4.7 本章小结

本章采用框架-产生式表示 12 种驾驶行为，有效克服驾驶知识散乱的缺点，并且易于提取；基于神经元动力学建立了有人驾驶行为判断决策模式识别模型，揭示了驾驶人在决策中的微观模式识别机制；第三，通过试验，对通过交叉口、直线跟驰、避障三种典型工况中的有人驾驶行为进行了效应解析，定性和定量地得出踏板行程、车速、行车偏距等参数特性；用熵值和决策树的方法，分别建立了通过交叉口行为、直线跟驰行为、避障行为的判断决策宏观模型，揭示了宏观判断决策原理，为无人驾驶智能行为提供了测试标准；以有人驾驶行为特性为依据，提出了无人驾驶智能行为判断决策机制，为无人驾驶车辆“未来挑战”比赛提供测评思想。

第 5 章 有人驾驶行为与无人驾驶智能行为刺激解释研究

针对通过交叉口、直线跟驰和避障三种典型工况中的驾驶行为，依据有人驾驶行为的判断决策解析结果，基于历届中国智能车“未来挑战赛”的数据，从车辆行驶轨迹和决策两方面对比剖析有人与无人、无人与无人驾驶行为刺激解释，并对无人驾驶智能行为进行多级模糊综合评判，结合评判结果对无人驾驶智能行为刺激解释进行单项评价。

5.1 通过交叉口行为刺激解释剖析

5.1.1 通过交叉口的有人与无人驾驶行为刺激解释对比

通过交叉口、直线跟驰、和避障三种典型工况中驾驶行为的对比分析中，有人驾驶行为的数据来自虚拟视景仿真试验，虚拟视景是按照 FC 比赛同等环境而生成，无人驾驶车辆的数据来自中国智能车“未来挑战赛”某考点比赛实况。虽然两者略有不同，但是低权重的静态环境简单，而且路边建筑和景观的细微不同对轨迹和决策的影响相对较小，高权重的动态环境基本一致，冲突车、前导车和静止车的运动状态相同，并且无人驾驶车辆或驾驶人没有受到其它额外因素影响，因此，截取相同情景、等长路段内的数据进行对比分析，以此展开研究是有价值和参考意义的。

图 5.1 为中国智能车“未来挑战赛”(FC' 2011)中某考点处的信号控制交叉口。

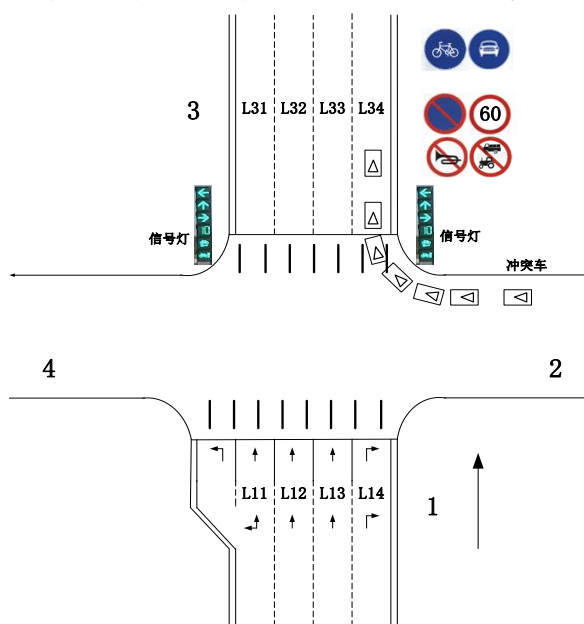


图 5.1 FC' 2011 中某考点处交叉口环境示意图

该考点任务是直行通过交叉口并合流，考察无人驾驶车辆通过交叉口的智能行为。此处交叉口主要由两条道路平面相交而成，按逆时针方向，定义四个路段分别为路段 1、路段 2、路段 3、和路段 4；路段 1 从左至右的四个车道分别为 L_{11} 、 L_{12} 、 L_{13} 、 L_{14} ，路段 3 从左至右的四个车道分别为 L_{31} 、 L_{32} 、 L_{33} 、 L_{34} 。

该考点的静态交通环境主要由道路、交通标线、标志、信号灯等，动态交通环境即从路段 2 右转弯进入路段 3 的冲突车，根据城市交通环境复杂度计算模型，该考点的道路交通环境复杂度， $C = \alpha C_1 + \beta C_2 = 67.864$ 。

无人驾驶的参赛车，应按照比赛规则和任务及时准确识别交通标志和交通信号灯，从路段 1 直行驶入交叉口、保持直线行驶通过交叉口、遇横向右转的冲突车汇入时及时准确避让，从而继续行驶完成后续任务。依据上文通过交叉口有人驾驶行为判断决策和效应分析，该考点需要参赛车辆完成如下通过交叉口行为策略：

过交叉口前：

- (1) 应按导向箭头更换车道，如需换道应开启转向灯，至少 3 秒后开始转向；
- (2) 保持车道线内直线行驶，不能骑轧车道边缘实线或车道中心实线；

临近交叉口：

- (3) 应减速慢行；
- (4) 按照交通标志、标线、和交通信号灯行驶；

过交叉口时：

- (5) 直行过交叉口应观察左、右方交通情况，正确判断交通情况；
- (6) 平稳控制车辆的行驶方向，合理控制转向时机和角度；
- (7) 行驶中应保持安全距离和安全车速；
- (8) 对可能出现危险的情形应采取减速、鸣喇叭等安全措施；
- (9) 按规定避让行人和优先通行的车辆；

过交叉口后：

- (10) 适当加速；
- (11) 保持车道线内直线行驶，不能骑轧车道边缘实线或车道中心实线^[118]。

下面以参赛车 A 为例，将其通过交叉口的智能行为进行分析。

参赛车 A 首先在路段 1 的 L_{13} 车道上直行，但没有保持车道内直线行驶，制动灯亮，减速后，左转绕行返回原车道直线行驶；行至交叉口入口，根据原型模式识别模型，首先对交通信号灯、交通标志进行特征提取，并传入 ECU，ECU 调用记忆

知识库进行匹配和决策，如果得到最佳匹配，经过对匹配结果分类，命名最后进入知识库存储，若不成功，则需重新进行特征提取，再匹配；若出现特征丢失，则将反应倾向进行分类后返回，重新获取特征，以致最终进入知识库，成功匹配决策后输出，并直行通过交叉口区域；在发现有冲突车右转弯汇入的刺激时，同样依据模型，通过特征提取、分类、命名，在知识库中寻求最佳匹配，从而输出刺激解释，即参赛车 A 制动灯亮，停车、启动，为保持安全距离行驶，反复进行停车、启动操作，最后逐渐加速进入 L_{33} 车道，行驶轨迹如图 5.2 所示。其行车轨迹显示，在交叉口入口前，除了左转绕行外，在交叉口区域及交叉口出口处，轨迹均呈直线。无人驾驶车辆在完成该考点时，不断地对环境中的刺激元进行着模式识别和匹配，最终依据判断和决策结果，作出相应的刺激解释，从而体现出其智能行为特性。

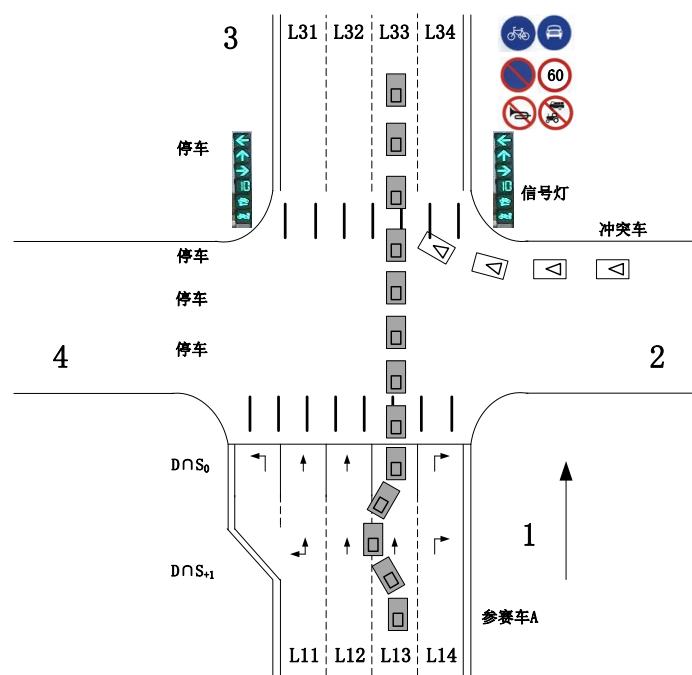


图 5.2 参赛车 A 在某考点通过交叉口的行驶轨迹示意图

从轨迹指标和决策指标两方面进行通过交叉口的无人驾驶智能行为刺激解释对比分析。轨迹指标是指无人驾驶车辆完成某一驾驶任务时的行驶轨迹是否合乎实情，是否与有人驾驶的行驶轨迹接近；决策指标：是指由无人驾驶车辆智能行为的刺激解释反应出的决策方案，是否适用于当前的交通环境，是否与有人驾驶行为的判断决策一致。

通过交叉口的有人与无人驾驶行为刺激解释对比如图 5.3 所示，纵坐标 100-121 部分为交叉口，黑色粗实线和粗虚线表示无人驾驶车辆行驶方向上的车道分界线。

图 5.3 (a) 为有人驾驶车辆的行驶轨迹图，有人驾驶车辆驶入交叉口前，轨迹近似直线处于本车道中心位置，并开始减速，驶入交叉口区域后，发现冲突车右转汇入，因此，车辆继续减速并有短暂的左转操作以避让冲突车，回正后继续前进，驶出交叉口后逐渐加速；图 5.3 (b) 为无人驾驶车辆参赛车 A 的行驶轨迹图，与 5.3 (a) 中的行驶轨迹对比可知，驶入交叉口前，参赛车 A 开始减速，但是由于判断错误，有左转绕行行为，压白实线，回正后继续延原车道行驶，发现冲突车时没有短暂的左转避让行为，并且反复停车和启动。

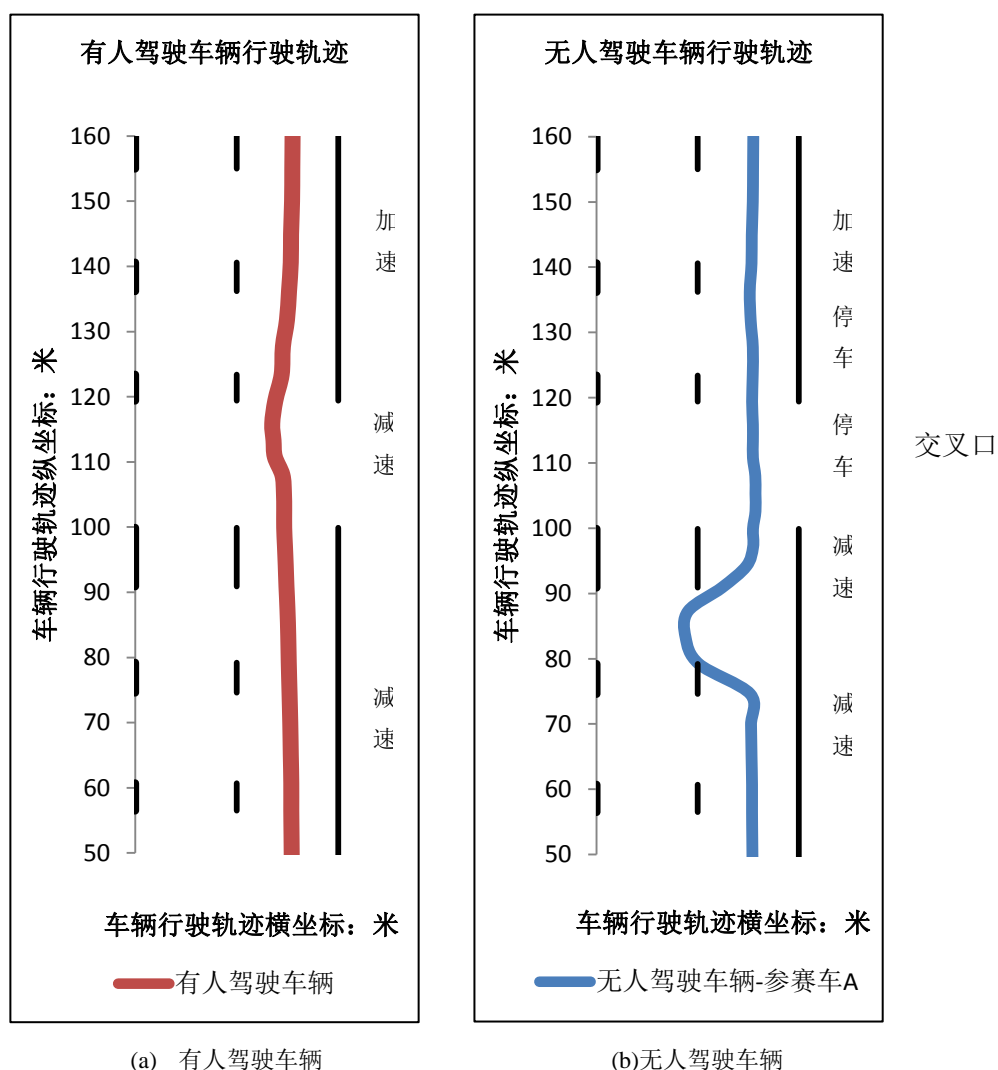


图 5.3 通过交叉口的有人与无人驾驶行为刺激解释对比

因此，参赛车 A 在该考点过交叉口时，虽然完成了任务，没有出现险情，但是完成质量还有待提高。

5.1.2 通过交叉口的无人车与无人驾驶智能行为刺激解释对比

将参赛车 A、参赛车 B、参赛车 C 在该考点处的通过交叉口智能行为进行对比，纵坐标 100-121 部分为交叉口区域，黑色粗实线和粗虚线表示无人驾驶车辆行驶方向上的车道分界线，如图 5.4 所示。

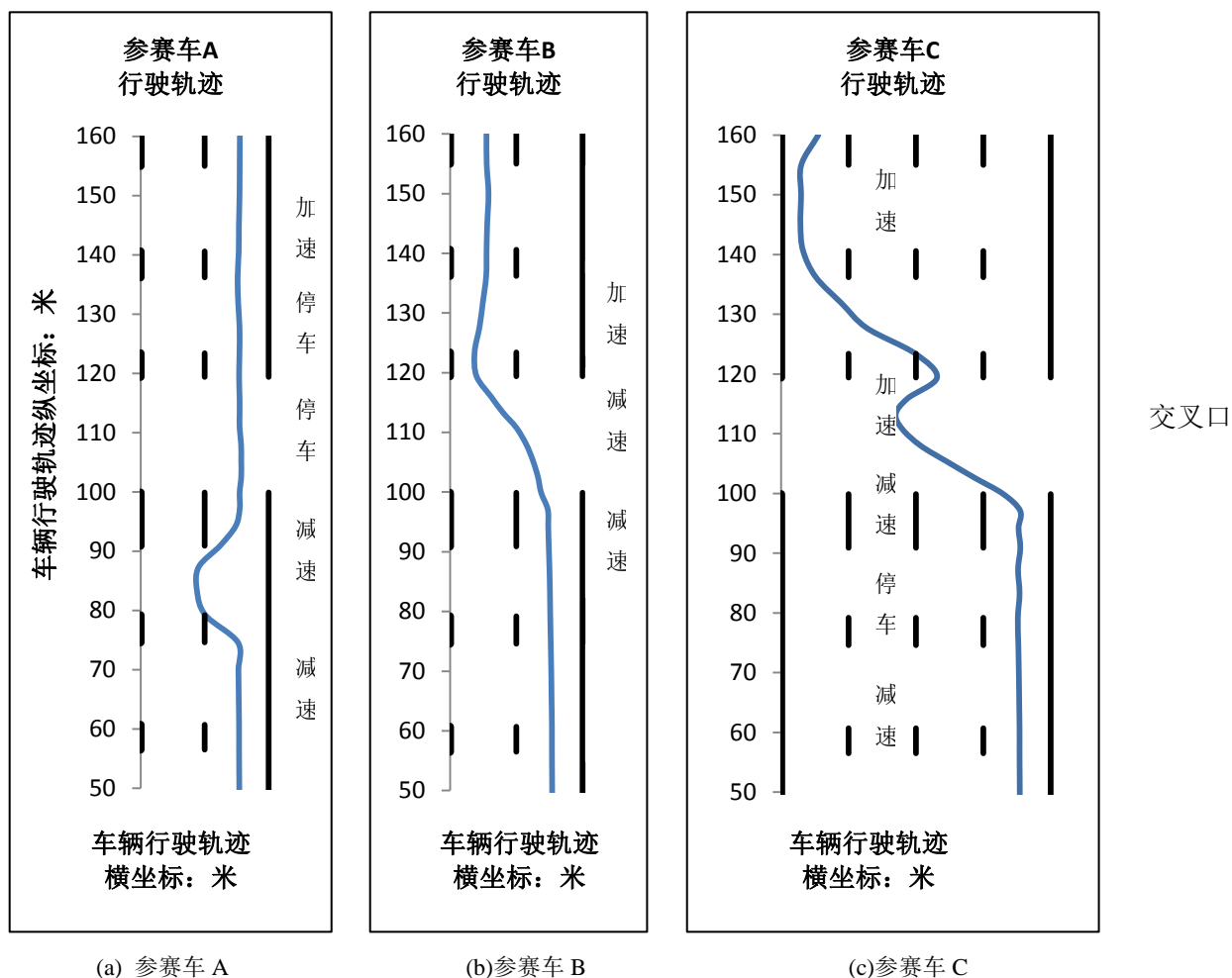


图 5.4 通过交叉口的无人车与无人驾驶智能行为刺激解释对比

参赛车 A 在路段 1 的 L_{14} 车道上保持车道内直线行驶，驶入交叉口前，参赛车 A 开始减速，但是由于判断错误，有左转绕行行为，压白实线，回正后继续延原车道行驶，行至交叉口入口，识别交通信号灯为绿色，直线行驶通过交叉口，在发现有冲突车右转弯汇入后，参赛车 A 没有短暂的左转避让行为，并且反复停车和启动以保持安全距离，如图 5.4 (a) 所示。

参赛车 B 在路段 1 的 L_{14} 车道上保持车道内直线行驶，行至交叉口入口，识别交通信号灯为绿色，制动灯亮，明显减速，在发现有冲突车右转弯汇入后，参赛车 B 减速左转向左侧车道 L_{33} 行驶，进入 L_{33} 车道后开始加速，如图 5.4 (b) 所示。

参赛车 C 在路段 1 的 L_{14} 车道上保持车道内直线行驶，临近交叉口入口时开始减速，并停车，重新启动后行至交叉口入口，识别交通信号灯为绿色，减速通过交叉口区域，发现冲突车右转弯汇入后，参赛车 C 减速左转并向左侧行驶，当冲突车右转结束汇入后，参赛车 C 加速回正，向左侧车道 L_{31} 行驶，进入 L_{31} 车道后又加速行驶，如图 5.4 (c) 所示。

5.2 直线跟驰行为刺激解释剖析

5.2.1 直线跟驰的有人与无人驾驶行为刺激解释对比

依据无人驾驶智能行为的信息加工系统原理，无人驾驶车辆在跟驰过程中，要经过刺激感知、判断决策、刺激解释三个阶段。首先，对来自外界的车头间距、车头时距、前导车的加速度、相对速度等环境刺激产生感觉信息，并不断地将这些刺激与存储设备中的跟驰知识与经验相匹配，并根据相关的交通法律法规、跟驰规则等作出判断和决策，最后控制车辆进行加速、减速、制动等操作。前导车起初匀速行驶在 L_{13} 车道上，如图 5.5 所示。

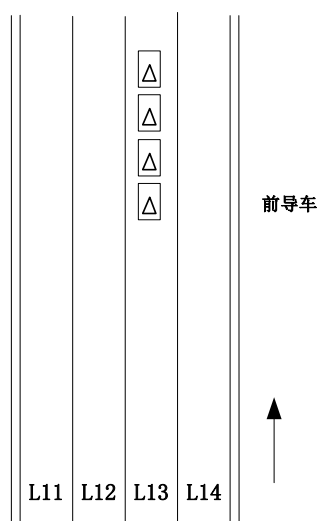


图 5.5 FC 比赛中某处直线跟驰行驶环境示意图

该考点的交通环境主要由道路、交通标线和运动的前导车，根据城市交通环境复杂度计算模型，该处交通环境复杂度 $C = \alpha C_1 + \beta C_2 = 32.387$ 。

无人驾驶的参赛车，在直线跟驰行驶中应按照交通规则，保持车距和车速跟随前导车直线行驶。依据上文直线跟驰有人驾驶行为判断决策和效应分析，无人驾驶车辆应完成如下直线跟驰行为策略：

- (1) 应保持车速，不能长时间大于前导车，为避免追尾需以前导车车速附近

的速度行驶；

- (2) 应与前导车保持安全距离，以免有足够的时间处理险情；
- (3) 保持车道线内直线行驶，不能骑轧车道边缘实线或车道中心实线；
- (4) 应正确观察、判断前导车的车速及车道变化；

选取中国智能车“未来挑战赛”中参赛车 C 与有人驾驶进行直线跟驰智能行为对比分析。参赛车 C 在行进中感知到所在车道前方不远处有前导车行驶，并与其距离减小（或不变），根据建构学说模型，首先将该刺激信息，形成假设 1，并传入 ECU，ECU 控制假设 1 与存储器中的模板进行匹配，匹配不成功则继续送回 ECU，并进行考验假设，再次获取刺激信息，形成假设 2，通过 ECU 再次与存储器中的模板匹配，匹配成功则验证假设 2，由控制器执行正确的解释，从而采取减速（或匀速）行为；根据原型模式识别模型，与前导车距离减小（或不变）的刺激信息经过传感器被感知后，首先要获取该信息的特征——前导车速度减小（或不变）、与前导车距减小（或不变），经过最佳匹配后，将其分类、命名并存入存储器中，成为新的模板，若匹配后特征丢失，则将反应倾向进行分类后返回，重新获取特征。

直线跟驰过程中，车辆的行驶轨迹基本呈直线，截取有人驾驶直线跟驰行驶中前导车匀速行驶的部分，将参赛车 C 的刺激解释与有人驾驶时进行对比，如图 5.6 所示，对比了直线跟驰的有人与无人驾驶行为刺激解释，前导车位于 L_{13} 车道，黑实线表示无人驾驶车辆行驶方向上的车道分界线。

在前导车匀速行驶时，有人驾驶车辆也保持匀速行驶，并且轨迹呈直线，如图 5.6（a）所示；图 5.6（b）中无人驾驶车辆的行驶轨迹也近似呈直线，与有人驾驶的行驶轨迹非常接近，当前导车匀速行驶时，参赛车 C 先加速，以缩短与前导车的纵向距离，然后连续两次减速，以增加与前导车的纵向距离，随后又一次的加速和减速。

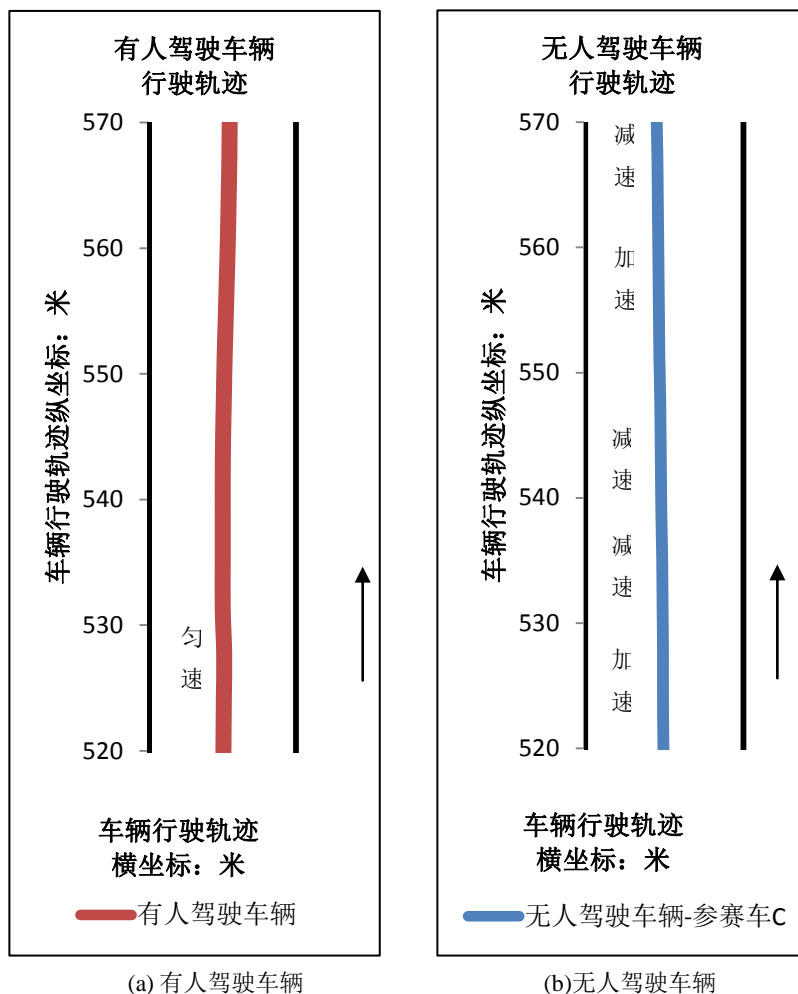


图 5.6 直线跟驰的有人与无人驾驶行为刺激解释对比

在这一过程中，参赛车 C 保持直线行驶的能力较高，但是不断地进行加速和减速说明对速度和距离的判断决策能力有待提高，同时从另一个侧面反映了参赛车 C 对与前导车纵向距离的判断是正确的。

5.2.2 直线跟驰的无人与无人驾驶智能行为刺激解释对比

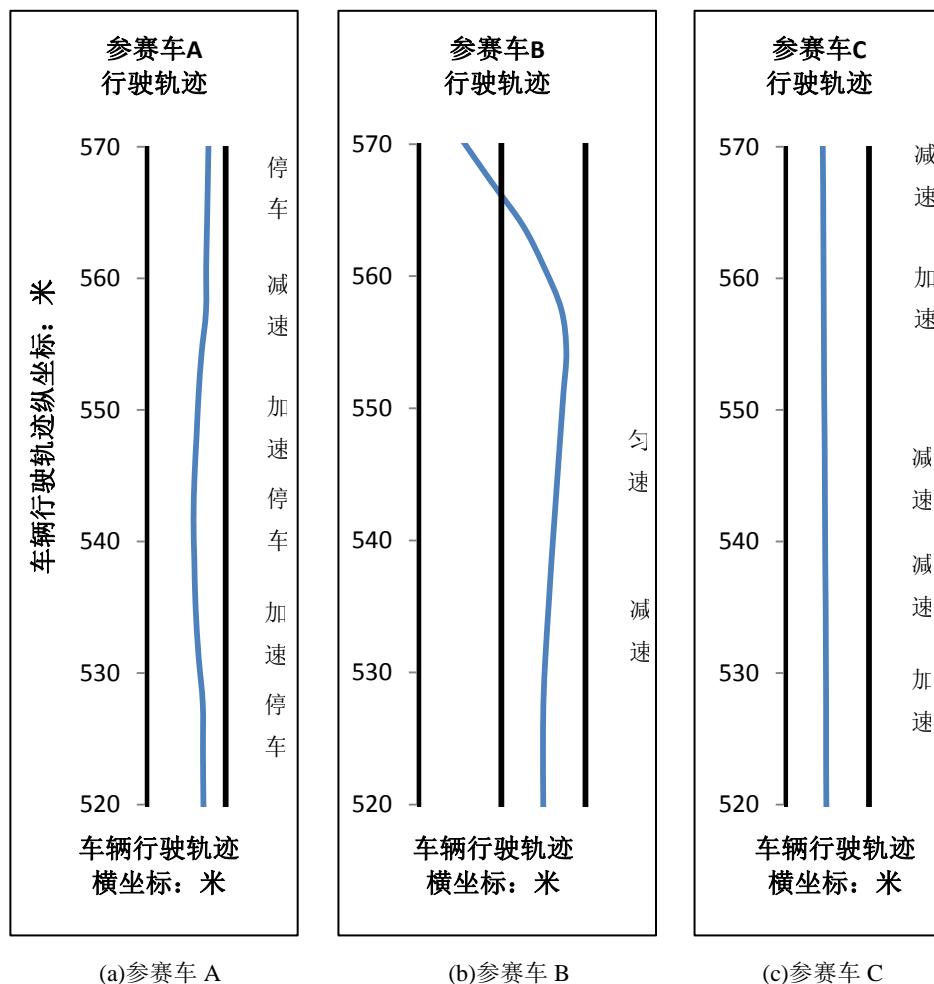
参赛车 A、参赛车 B、参赛车 C 直线跟驰智能行为的对比，前导车匀速行驶在 L_{13} 上，如图 5.4 所示。

参赛车 A 在车道内基本保持直线行驶，轨迹有短暂的偏离，在跟驰中对速度的决策能力较低，与前导车的纵向距离小，就采取紧急停车，随后又加速启动，反复两次后，无法很好的控制跟驰的距离和速度，减速并停车，图 5.7 (a) 所示。

从参赛车 B 的跟驰轨迹可知，参赛车 B 首先减速，并在前半段路上并保持车道内直线匀速行驶，轨迹呈直线，其后向左侧偏离行驶，速度不变，最终选择超车结

束跟驰行为，图 5.7 (b)。

参赛车 C 在 L_{13} 车道上保持车道内直线行驶，轨迹近似直线，但速度的决策能力有待提高，由其决策标志可知参赛车 C 不断地通过加速、减速来调整与前导车的纵向距离，图 5.7 (c)。



(a) 参赛车 A

(b) 参赛车 B

(c) 参赛车 C

图 5.7 直线跟驰的无人车与无人驾驶智能行为刺激解释对比

综上所述，参赛车 C 的行驶轨迹最好，但决策能力一般；参赛车 A 的行驶轨迹较好，对速度的决策能力差；参赛车 B 的行驶轨迹一般，虽然对速度的控制能力较好，但是方向决策出现问题。

5.3 避障行为刺激解释剖析

5.3.1 避障的有人与无人驾驶行为刺激解释对比

中国智能车“未来挑战赛”(FC'2011)某考点的任务是避让静止车，主要考察无人驾驶车辆行进中识别静止车、避让静止车的智能行为。该考点处的四车道环境，

从左到右依次命名为 L_{11} 、 L_{12} 、 L_{13} 、 L_{14} ，静止车停止在 L_{13} 车道，如图 5.8 所示。

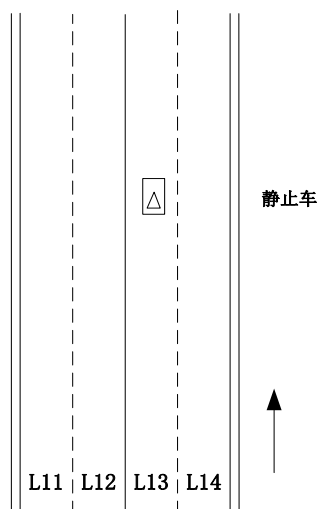


图 5.8 FC' 2011 中某考点处避障环境示意图

该处交通环境主要由道路、交通标线和静止车组成，根据城市交通环境复杂度计算模型，该处交通环境复杂度 $C = \alpha C_1 + \beta C_2 = 21.039$ 。

无人驾驶车辆，在该考点应按照比赛任务、交通规则，正确识别静止车并避让。依据避障有人驾驶行为判断决策和效应分析，该考点需要参赛的无人驾驶车辆，完成如下避障行为策略：

避障前：

- (1) 按照交通标志、标线、和交通信号灯行驶；
- (2) 应识别后方和左侧的交通情况，确保左侧没有阻止正常行驶的障碍物；
- (3) 应适当减速（或同时鸣笛）；
- (4) 开启左转向灯，至少 3 秒后开始变换车道；

避障时：

- (5) 应与静止车辆保持安全纵横向距离；
- (6) 应适当提高车速，以减少超车的距离和时间，使超车快速完成；

避障后：

- (7) 应在超过静止车必要的纵向安全距离（20~30 米）后，开启右转向灯；
- (8) 减速驶回原车道；
- (9) 保持车道线内直线行驶，不能骑轧车道边缘实线或车道中心实线；

在“未来挑战赛”中选取参赛车 B 进行智能避障行为分析。参赛车 B 在行进中感知到所在车道前方有障碍，并与其距离减小，根据建构学说模型，首先将该刺激

信息，形成假设 1，并传入 ECU，ECU 控制假设 1 与存储器中的模板进行匹配，匹配不成功则继续送回 ECU，并进行考验假设，再次获取刺激信息，形成假设 2，通过 ECU 再次与存储器中的模板匹配，匹配成功则验证假设 2，由控制器执行正确的解释，从而采取换车道、超车并返回原车道的行为；根据原型模式识别模型，与前导车距离减小的刺激信息经过传感器被感知后，首先要获取该信息的特征——前导车速度减小、与前导车距减小，经过最佳匹配后，将其分类、命名并存入存储器中，成为新的模板，若匹配后特征丢失，则将反应倾向进行分类后返回，重新获取特征。

图 5.9 为无人驾驶车辆智能避障行为行驶轨迹示意图。由行驶轨迹可知，参赛车 B 感知到车道前方的静止车后，开始减速并左转更换左侧相邻车道 L_{12} ，并在 L_{12} 车道上减速超越静止车，在远离静止车一定距离时，参赛车 B 返回原车道 L_{13} 并加速前进。

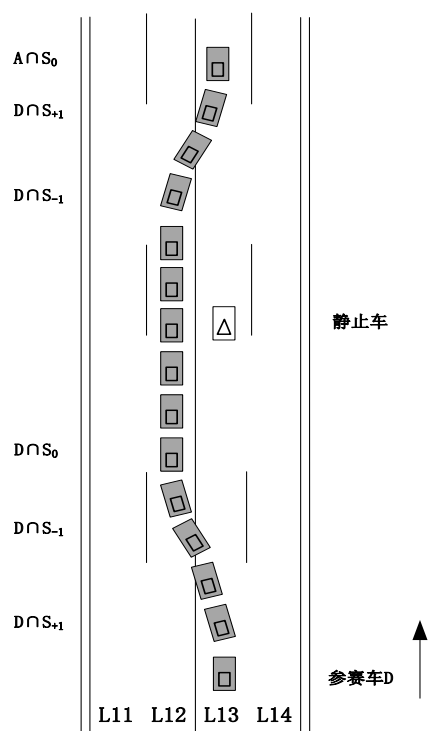
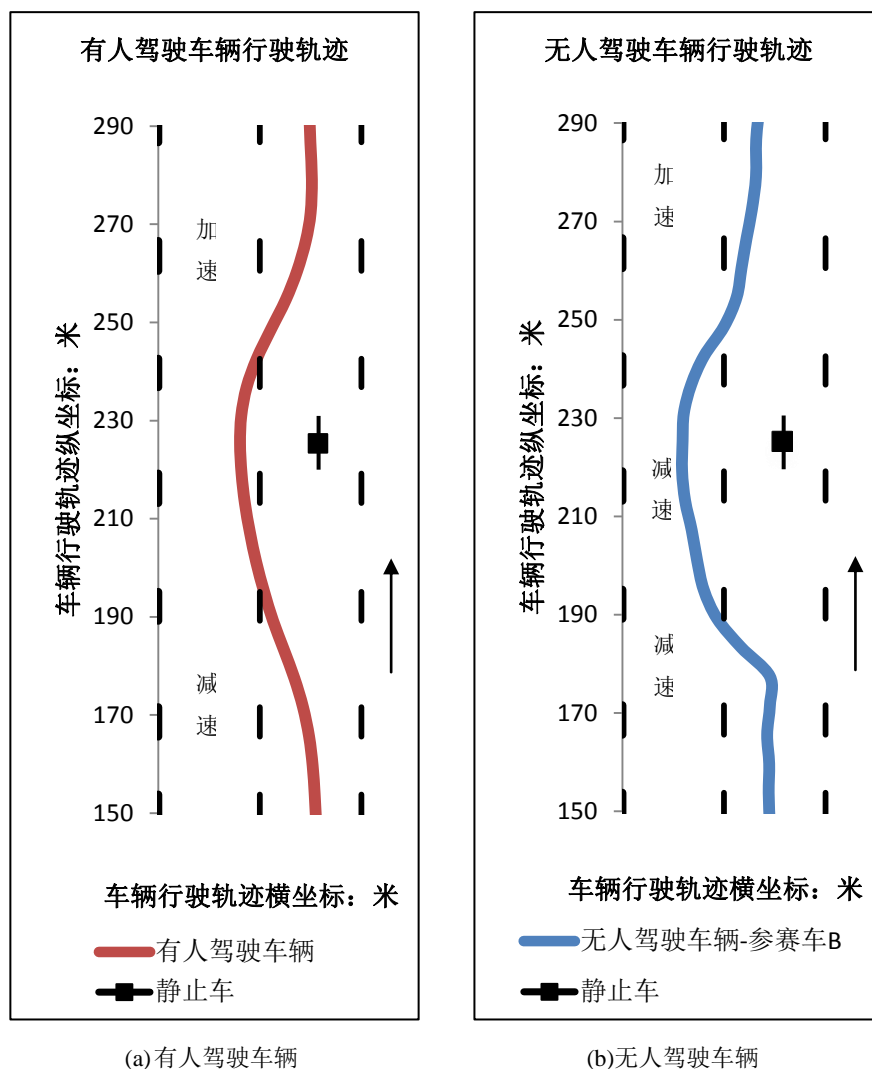


图 5.9 参赛车 B 在某考点避障时的行驶轨迹示意图

参赛车 B 的行驶轨迹如图 5.10 所示，对比了避障的有人与无人驾驶行为刺激解释，静止车静止在直线路段 225 米处，位于 L_{13} 车道，黑色粗实线表示无人驾驶车辆行驶方向上的车道分界线。

图 5.10 (a) 为有人驾驶车辆的行驶轨迹图，有人驾驶车辆距静止车的纵向距离约 55m 时开始减速换道，然后在 L_{12} 车道上超越静止车，此时最大横向距离约为 1.5m，

返回原车道后距静止车的纵向距离约为 40m，此后，加速继续前进；图 5.10 (b) 为无人驾驶车辆的行驶轨迹图，



(a) 有人驾驶车辆 (b) 无人驾驶车辆
图 5.10 避障的有人与无人驾驶行为刺激解释对比

图 5.10 (b) 为无人驾驶车辆的行驶轨迹，与图 5.10 (a) 中的行驶轨迹对比可知，参赛车 B 开始减速换道的位置是距静止车纵向 38m 处，在 L_{12} 车道上直线超越静止车时再进行减速，最大横向距离约 2m，返回原车道后距静止车的纵向距离约 28m，可见参赛车 B 避障的智能水平较高。

5.3.2 避障的无人与无人驾驶智能行为刺激解释对比

参赛车 A、参赛车 B、参赛车 C 智能避障行为的对比，如图 5.11 所示。

参赛车 A 在 L_{13} 车道上保持车道内直线行驶，距静止车纵向 52m 处开始加速并换道，在 L_{12} 车道上直线超越静止车时进行减速，最大横向距离约为 3m，并且没有

发生在超越期间，未返回原车道，如图 5.11 (a) 所示。

参赛车 B 在 L_{13} 车道上保持车道内直线行驶，距静止车纵向 38m 处开始减速换道，在 L_{12} 车道上直线超越静止车时再进行减速，最大横向距离约为 2m，返回原车道 L_{13} 后距静止车的纵向距离约为 28m，如图 5.11 (b) 所示。

参赛车 C 从 L_{13} 车道快速驶入 L_{14} 车道上，随即开始减速，此时距静止车纵向 48m，在 L_{14} 车道内呈倾斜轨迹减速行驶，最大横向距离达 4m，并且没有发生在超越期间，此后又呈斜线轨迹减速行驶，随后保持在该车道内直线行驶，如图 5.11 (c) 所示。

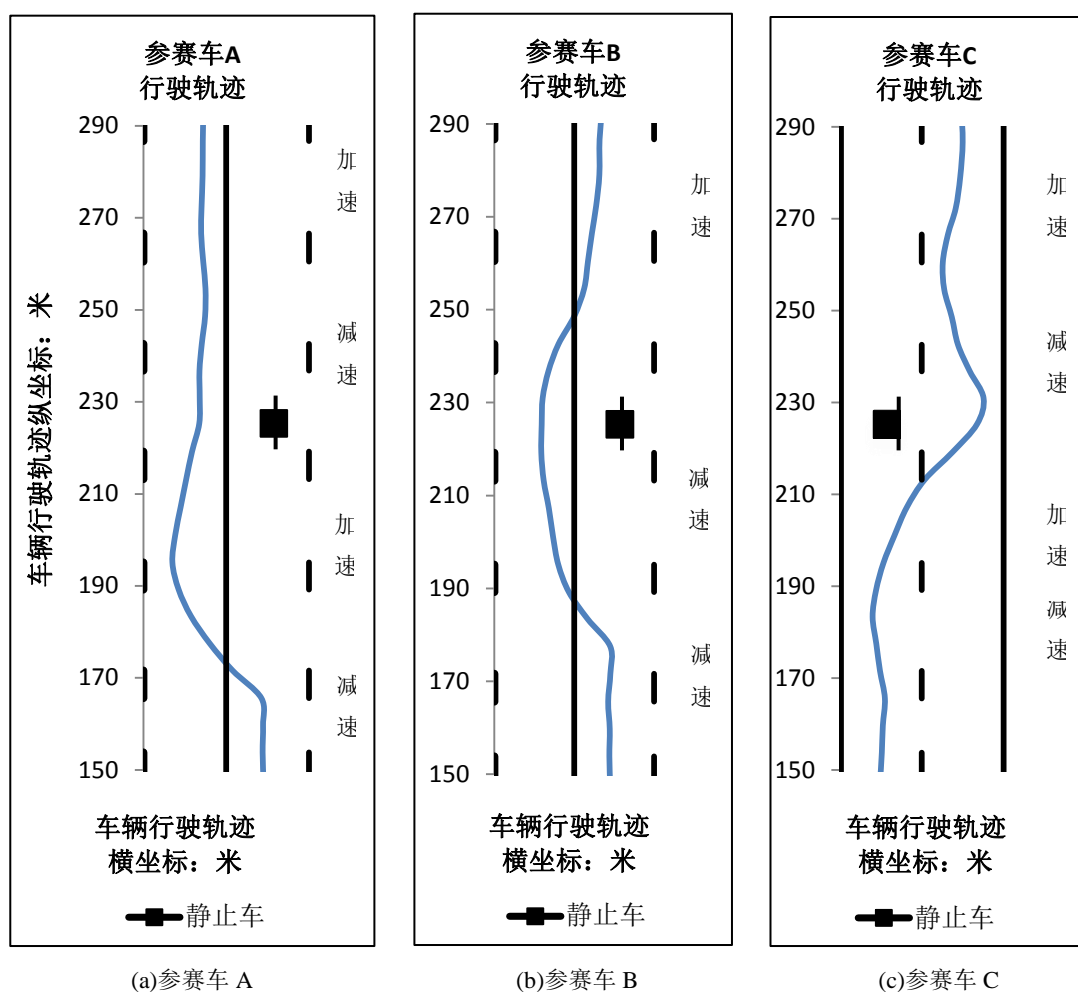


图 5.11 避障的无人车智能行为刺激解释对比

通过对无人驾驶车辆避障智能行为分析，大部分无人驾驶车辆已经具备自主超车能力，但是综合分析可知，只有极个别的无人驾驶车辆避障的智能水平较高。

5.4 无人驾驶智能行为刺激解释多级模糊综合评判

根据历届中国智能车“未来挑战”的比赛数据，选取参赛车 A、B、C，将其通过交叉口、直线跟驰和避障三种典型工况中驾驶行为的刺激解释进行多级模糊综合评判，从而将这三辆参赛车的智能行为划分为高、中、低三个等级，为中国智能车“未来挑战”比赛提供评价手段。

5.4.1 多级模糊综合评判基本理论

(1) 评价因子的确定

采用二级模糊综合评判模型进行评价，首先确定评判因素集 U 和评语集 V 。

$$U = (u_1, u_2, \dots, u_n)$$

$$V = (v_1, v_2, \dots, v_n)$$

(2) 隶属度的确定

确定 U 中各因素对评价集 V 中各因子的隶属度。对于每个单因素 u_i ，单独作出的评判履 $f(u_i)$ ，可看作是集合 U 到 V 的一个模糊影射 f ，而 f 可诱导一个模糊关系 R_f ， R_f 中的元素 r_{ij} 即为隶属度，描述因素集中各因子对评价集中各因子隶属程度^[119]， $r(u)$ 则为因素集中元素对评语集元素的隶属函数。

$$f: \begin{matrix} U \rightarrow F(V) \\ u \rightarrow f(u) = R_f = (r_{11}, \dots, r_{1j}, r_{21}, \dots, r_{2j}, \dots, r_{i1}, \dots, r_{ij}) \end{matrix} \quad (5.1)$$

(3) 权重的确定

根据因素集合 U 中各因子对某一实际问题中的重要程度，定义因素集 U 上的模糊子集 $A = [a_i]$ ，即权重矩阵，其中 $\sum_{i=1}^n a_i = 1$ ， a_i 为第 i 个因素所对应的权值。

(4) 模糊变换

采用模糊运算符 M (\wedge , \vee)，导出 U 到 V 的一个模糊线性变换为：

$$T_R(A) = A \circ R_f = B = [b_j] \quad (5.2)$$

式中： B 是评语集 V 的一个模糊子集。

(5) 综合评判

根据综合评判结果 B 进行综合评判，评判原则按最大隶属度原则进行评价。

5.4.2 基于三角模糊数的无人驾驶智能行为刺激解释多级模糊综合评判

国内各界智能车比赛中，无人驾驶车辆的智能水平参差不齐，所体现的智能行为特性也不同，而且同一辆无人驾驶车辆完成不同的驾驶任务所体现的智能行为也不尽相同，因此，采用一级、二级共 15 个指标对参赛车的无人驾驶车辆进行智能行为模糊综合评判，评判指标如图 5.12 所示。

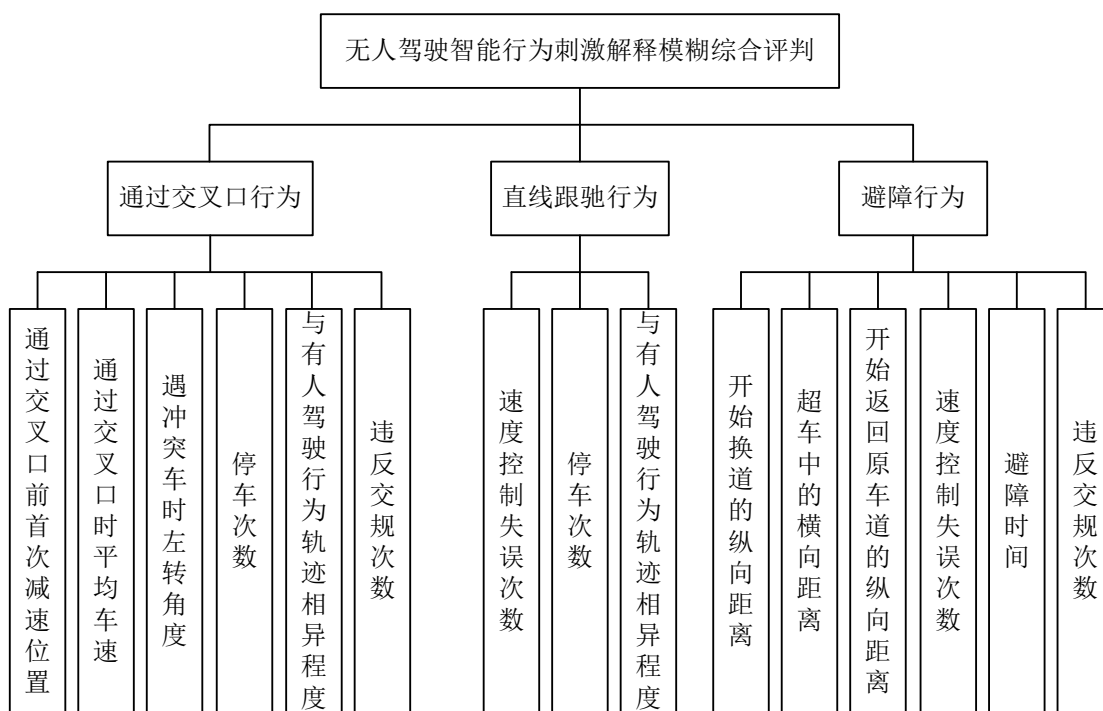


图 5.12 无人驾驶智能行为刺激解释多级模糊综合评判指标

根据智能车“未来挑战赛”内容，采用二级模糊综合评价数学模型作为无人驾驶车辆智能行为综合评价模型，则：

一级因素集为：

$$U=\{U_1 \text{ (通过交叉口行为)}, U_2 \text{ (直线跟驰行为)}, U_3 \text{ (避障行为)}\}$$

二级因素集为：

$$U_1=\{U_1^1 \text{ (通过交叉口前首次减速位置)}, U_1^2 \text{ (通过交叉口时平均车速)}, U_1^3 \text{ (遇冲突车时左转角度)}, U_1^4 \text{ (停车次数)}, U_1^5 \text{ (与有人驾驶行为轨迹相异程度)}, U_1^6 \text{ (违反交通规则次数)}\}$$

$$U_2=\{U_2^1 \text{ (速度控制失误次数)}, U_2^2 \text{ (停车次数)}, U_2^3 \text{ (与有人驾驶行为轨迹相异程度)}\}$$

$U_3=\{U_3^1$ (开始换道的纵向距离), U_3^2 (超车中的横向距离), U_3^3 (开始返回原车道的纵向距离), U_3^4 (速度控制失误次数), U_3^5 (避障时间), U_3^6 (违反交规次数) }

评价集为:

$V=\{V_1$ (高), V_2 (中), V_3 (低) }

隶属函数的线性分布形式有梯形分布、三角形分布等, 非线性分布形式有正态分布、领型分布等, 本文选择三角形模糊数计算隶属度。

三角形分布隶属函数表达式为

$$r_{high}(u) = \begin{cases} 1 & u \leq \mu_{\min} \\ -\frac{u - \mu_0}{\mu_0 - \mu_{\min}} & \mu_{\min} < u \leq \mu_0 \\ 0 & u > \mu_0 \end{cases}$$

$$r_{mid}(u) = \begin{cases} 0 & u < \mu_{\min} \\ \frac{u - \mu_{\min}}{\mu_0 - \mu_{\min}} & \mu_{\min} \leq u < \mu_0 \\ -\frac{u - \mu_{\max}}{\mu_{\max} - \mu_0} & \mu_0 < u \leq \mu_{\max} \\ 0 & u > \mu_{\max} \end{cases}$$

$$r_{low}(u) = \begin{cases} 0 & u < \mu_0 \\ \frac{u - \mu_0}{\mu_{\max} - \mu_0} & \mu_0 < u \leq \mu_{\max} \\ 1 & u \geq \mu_{\max} \end{cases}$$

对于高、中、低三类评语各参量的隶属度计算模型, 如图 5.13 所示。

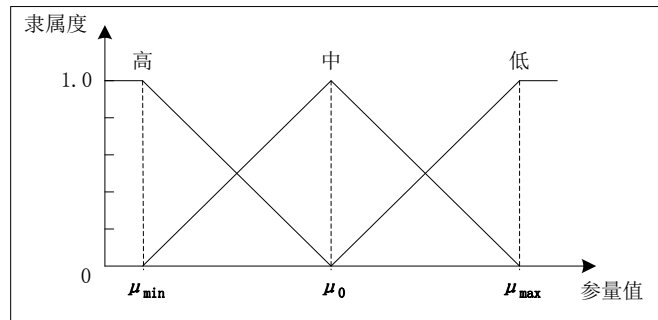


图 5.13 三角形模糊数隶属函数图

根据第 4 章对通过交叉口、直线跟驰和避障三种典型工况中的有人驾驶行为的

研究，确定各指标的标准取值范围，结合比赛中参赛车 A、B、C 的表现情况，其评判因素集数据为

$$U_{A1} = [46 \quad 2.7 \quad 0 \quad 7 \quad 0.2 \quad 1]$$

$$U_{A2} = [0 \quad 3 \quad 0.2]$$

$$U_{A3} = [48 \quad 3.7 \quad \infty \quad 0 \quad 20 \quad 1]$$

基于三角形分布的评判矩阵为

$$R_{A1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0.6 & 0.73 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0.4 & 0.27 & 1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$$

$$R_{A2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}^T$$

$$R_{A3} = \begin{bmatrix} 0.45 & 0.82 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0.55 & 0.18 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$$

对无人驾驶车辆智能行为刺激解释的评价是二级模糊综合评判，根据二级权重矩阵 A_i ，建立参赛车 A 的模糊综合评判模型为

$$B_{Ai} = A_i \circ R_{Ai} \quad (5.3)$$

$$B_A = A \circ R_A \quad (5.4)$$

式中， A_i 为二级指标的权重矩阵， R_{Ai} 为第 i 个因素的评判矩阵， A 为一级指标的权重矩阵， $R_A = \begin{bmatrix} B_{A1} \\ B_{A2} \\ B_{A3} \end{bmatrix}$ 。

参赛车 A 的智能行为刺激解释多级模糊综合评判框图如图 5.14 所示。

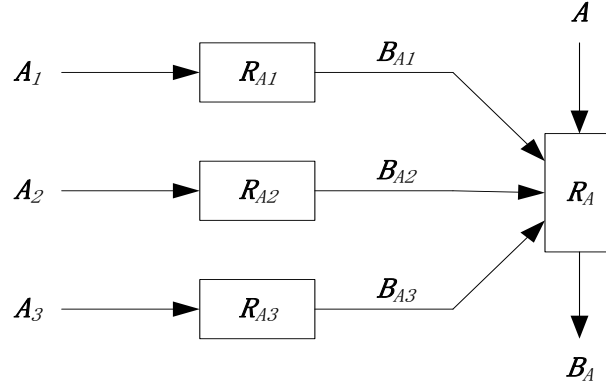


图 5.14 多级模糊综合评判模型

因此，参赛车 A 智能行为刺激解释的综合评判矩阵计算如下：

$$\begin{aligned}
 B_{A1} &= A_1 \circ R_{A1} \\
 &= [0.1818 \quad 0.1546 \quad 0.1808 \quad 0.1736 \quad 0.1568 \quad 0.1524] \circ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0.6 & 0.73 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0.4 & 0.27 & 1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \\
 &= [0.1568 \quad 0.1818 \quad 0.1818]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 B_{A2} &= A_2 \circ R_{A2} \\
 &= [0.3416 \quad 0.3718 \quad 0.2866] \circ \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}^T \\
 &= [0.3416 \quad 0 \quad 0.2866]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 B_{A3} &= A_3 \circ R_{A3} \\
 &= [0.1926 \quad 0.1868 \quad 0.1364 \quad 0.1728 \quad 0.1112 \quad 0.2002] \circ \begin{bmatrix} 0.45 & 0.82 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0.55 & 0.18 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \\
 &= [0.1926 \quad 0.2002 \quad 0.1364]
 \end{aligned}$$

$$B_A = A \circ R_A$$

$$\begin{aligned}
&= [0.4832 \quad 0.2992 \quad 0.2176] \circ \begin{bmatrix} 0.1568 & 0.1818 & 0.1818 \\ 0.3416 & 0 & 0.2866 \\ 0.1926 & 0.2002 & 0.1364 \end{bmatrix} \\
&= [0.2992 \quad 0.2002 \quad 0.2866]
\end{aligned}$$

同理，根据参赛车 B 和参赛车 C 的比赛表现因素集，得到模糊综合评判矩阵为

$$B_B = A \circ R_B = [0.4832 \quad 0.1112 \quad 0.2866]$$

$$B_C = A \circ R_C = [0.2992 \quad 0.3718 \quad 0.1823]$$

因此，参赛车 A 智能行为刺激解释水平为低级，参赛车 B 智能行为刺激解释水平为高级，参赛车 C 智能行为刺激解释水平为中级。

5.4.3 基于正三角形法的无人驾驶车辆智能行为刺激解释评判分析

基于三角模糊数对参赛车 A、B、C 进行了智能行为刺激解释的模糊综合评判，综合通过交叉口、直线跟驰和避障三种典型工况中驾驶行为评判结果，为进一步说明参赛车 A、B、C 具体的智能行为强弱，还需分析单项智能行为，如图 5.15 所示。

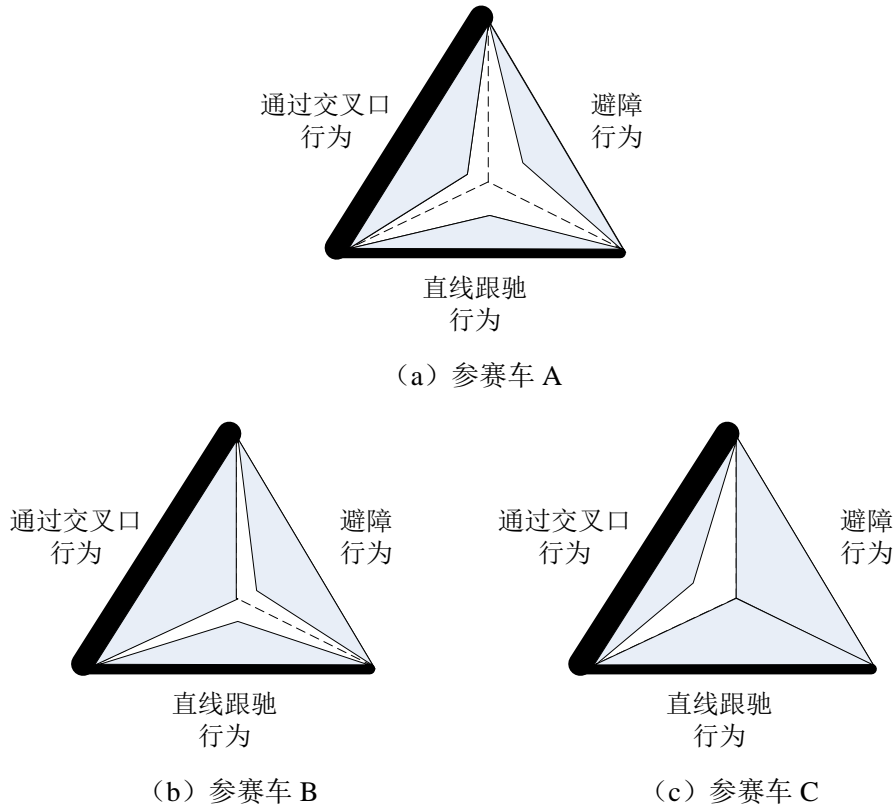


图 5.15 基于正三角形法的参赛车通过交叉口、直线跟驰和避障行为刺激解释评价

采用正三角形法分析参赛车 A、B、C 三种智能行为的刺激解释水平，正三角形的三条边分别代表通过交叉口行为、直线跟驰行为和避障行为；根据第 3 章交通环境复杂度的计算得知，完成这三种行为的交通环境复杂度由高到低依次为：通过交叉口、直线跟驰、避障，在图 5.15 中以正三角形边的粗细来描述复杂度的高低；阴影部分面积的大小表示参赛车该种智能行为能力的强弱。

由此可知，对于通过交叉口行为，参赛车 B 的能力最强，参赛车 A 其次，参赛车 C 的能力最弱；对于直线跟驰行为，参赛车 C 的能力最强，参赛车 B 其次，参赛车 A 的能力最弱；对于避障行为，参赛车 C 的能力最强，参赛车 B 其次，参赛车 A 的能力最弱。对于每个参赛车来说，参赛车 A 通过交叉口的能力一般，直线跟驰和避障的能力较弱，有待提高；参赛车 B 通过交叉口的能力很强，直线跟驰和避障的能力一般，需要加强；参赛车 C 直线跟驰和避障的能力很强，但是通过交叉口的能力一般，需要加强。

对于通过交叉口、直线跟驰和避障三种驾驶行为对无人驾驶智能行为进行了评价，着眼于单个参赛车，将其三种智能行为通过正三角形法体现，清晰表明了每辆参赛车对单项驾驶行为的智能性强弱，从而有针对性地对无人驾驶车辆研发技术进行改进和提高。此方法同样适用于评价多种驾驶行为的智能性，利用正多边形表示，正多边形的每条边代表一种驾驶行为，边的粗细来描述复杂度的高低，参赛车该种智能行为能力的强弱由每条边所对应的面积大小表示，如采用正十二边形表示参赛车 12 种行为的智能性，或 12 个考点的完成情况。

5.5 本章小结

根据比赛数据，依次对通过交叉口、直线跟驰、和避障三种行为，对比剖析了有人与无人、无人与无人驾驶行为刺激解释的行驶轨迹特征，应用了多级模糊综合评判方法，采用一级、二级共 15 个指标，通过三角模糊数确定各指标的隶属函数，对无人驾驶参赛车 A、B、C 进行智能行为模糊综合评判，将各车辆的综合智能行为水平评判为高级、中级、低级，同时，基于正三角形法研究各参赛车辆在通过交叉口、直线跟驰、和避障行为表现中的单项智能行为水平，为中国智能车“未来挑战”比赛提供测评思想与测评方法。

第 6 章 无人驾驶车辆智能行为测评研究

在驾驶行为信息加工系统研究的基础上，结合有人驾驶行为刺激感知、判断决策、刺激解释的原理和模型，通过对各阶段参量的改进、整合、补充和完善，提出相对完备的无人驾驶车辆智能行为测评指标和测评体系，为中国智能车“未来挑战”比赛的测评提供有力依据。

6.1 基于信息加工的无人驾驶车辆智能行为测评指标体系

根据有人驾驶行为刺激感知、判断决策、刺激解释的信息加工原理，分别针对这三个阶段提炼测评指标，并通过交通环境复杂度反映驾驶任务难易程度，从信息加工系统和驾驶任务难易两方面对多测评指标进行分析、量化、计算和综合，图 6.1 为无人驾驶智能行为测评指标的信息加工体系。

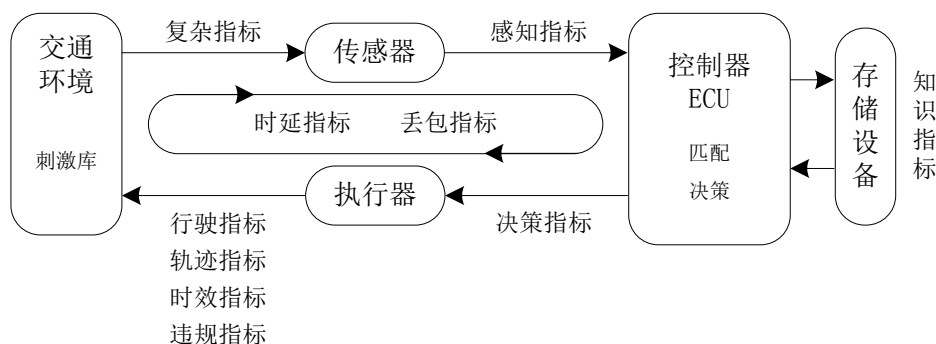


图 6.1 无人驾驶智能行为信息加工系统测评指标

依据无人驾驶智能行为信息加工系统，无人驾驶车辆在刺激感知阶段依靠传感设备感知交通环境刺激，这种感知刺激的强弱程度就用感知指标来衡量，复杂指标用来反应交通环境的复杂程度；判断决策阶段中，根据存储设备中的驾驶知识和经验对感知到的刺激进行判断并作出决策，知识指标用来衡量无人驾驶车辆对驾驶知识和经验的存储量大小，决策指标用来衡量其作出的驾驶决策是否合理有效；刺激解释阶段要输出所作出的决策，分别由行驶指标、轨迹指标、时效指标和违规指标来衡量，此外，时延指标和丢包指标用来衡量刺激信息在信息加工三阶段传输中有效损耗量的大小。由上述 10 个指标就构成了无人驾驶车辆智能行为测评指标体系，如图 6.2 所示。

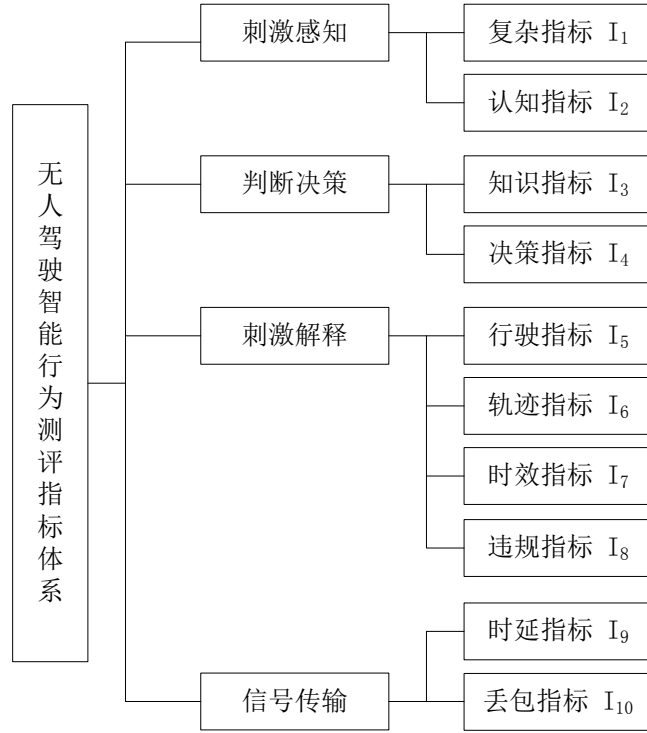


图 6.2 基于信息加工的无人驾驶车辆智能行为测评指标体系

无人驾驶车辆智能行为测评指标体系由刺激感知、判断决策、刺激解释和信号传输 4 个一级指标以及 10 个二级指标构成，以此来评价无人驾驶车辆的智能行为。

6.1.1 无人驾驶车辆智能行为刺激感知指标

刺激感知是无人驾驶智能行为中最重要的阶段，只有对环境刺激进行了正确感知才能保证后续阶段的顺利进行，一方面不同复杂程度的交通环境可产生不同的驾驶行为，另一方面车辆对当前交通环境的感知程度也制约了驾驶决策和行为输出，因此，采用复杂指标和感知指标作为检验和评价刺激感知的参数具有一定可靠性。

(1) 复杂指标 I_1

复杂指标用来衡量当前交通环境的复杂程度，并且从一定程度上也反映了驾驶任务的难易程度，利用基于图形熵的城市交通环境复杂度计算模型来定量复杂指标，即

$$I_1 = \left(- \sum_{i=1}^h p_i \log_2 p_i \right) \times \alpha \sum [\alpha_i (\sum X_i)] + \left(- \sum_{i=1}^k p_i \log_2 p_i \right) \times \beta \sum [\beta_i (\sum Y_i)] \quad (6.1)$$

式中变量参照式 (3.7) 和式 (3.12)。

(2) 感知指标 I_2

感知指标用来衡量无人驾驶车辆对当前交通环境的感知强度，依据无人驾驶智

能行为感知强度的界定，确定感知指标的计算。

$$I_2 = \lambda \times 0.565 \times (\omega - \omega_0)^{3.654} \quad (6.2)$$

式中， λ 为无人驾驶车辆感知修正系数， ω 为无人驾驶车辆实际感应的视觉刺激量； ω_0 为所处环境的标准刺激信息量；由于无人驾驶车辆更多地依靠视觉传感器或雷达来识别环境刺激元，刺激量的大小可由信息熵来度量。

6.1.2 无人驾驶车辆智能行为判断决策指标

驾驶知识储备是驾驶车辆判断决策的依据和准则，体现在驾驶人的长时记忆中，及无人驾驶车辆的存储设备中，驾驶知识的储备量又决定了驾驶行为的正确性、有效性和安全性。

将驾驶知识储备量作为驾驶行为的知识指标，将速度、方向的控制策略作为决策指标，但是无人驾驶行为不仅是刺激感知——判断决策——刺激解释三个阶段串联式的往复循环，而且也是三者综合作用的结果，在智能行为测评中，知识指标 I_3 和决策指标 I_4 很难通过无人驾驶车辆的内部控制参数直接获得，因此需要通过车辆输出的刺激解释间接获得。

6.1.3 无人驾驶车辆智能行为刺激解释指标

无人驾驶车辆输出的刺激解释是进行测评的直接来源，这些指标可视、可量、可算，采用行驶指标 I_5 、轨迹指标 I_6 、时效指标 I_7 、违规指标 I_8 。

行驶指标 I_5 用来反应无人驾驶车辆的行驶质量，体现在速度 v 、方向 d 和间距 s 上，根据不同驾驶任务，对速度、方向和间距有不同的要求，可以表示为：

$$I_5 = f(v, d, s) \quad (6.3)$$

轨迹指标 I_6 从另一角度反应无人驾驶车辆的智能行为，主要以相同驾驶任务中有人驾驶的轨迹为标准，用相异程度来衡量，但是鉴于完成相同驾驶任务可采取不同的驾驶决策和行为，因此也不拘泥于此。

时效指标 I_7 指无人驾驶车辆完成任务所需的时间，用于衡量是否有时间损耗。

违规指标 I_8 指无人驾驶车辆在驾驶任务中违反交通规则、违反交通标志、标线等的次数，用于衡量对交通规则的遵守情况。

6.1.4 无人驾驶车辆智能行为信号传输指标

无人驾驶车辆在完成某个驾驶任务时，由于动作不连续导致时延及刺激元从传感器到控制器、从控制器到执行器的传输过程中发生丢失，严重影响了无人驾驶车辆的智能性，因此有必要对这一传输过程中的时延和丢包现象深入分析，并将其作为传输指标 I_9 来评价无人驾驶车辆的智能行为。

(1) 时延指标 I_9

刺激元在传输过程中，由于无人驾驶车辆上的传感设备、采集设备等存在数据碰撞、节点竞争失败、连接中断、数据拥塞等现象，导致刺激信息在交换时有时间延迟，即时延，既包括传感器到控制器、控制器的计算时延、和控制器到执行器之间的时延等，时延不仅降低了无人驾驶车辆的性能，使其鲁棒性较差，甚至失稳。

无人驾驶智能行为信息加工系统中，传感器是具有模/数（A/D）转换、检测、数据封装和发送等功能的智能测量设备，执行器具有数/模（D/A）转换功能的智能驱动设备，控制器大多采用具有大容量、速度快的高速计算机^[120]。存在传感器到控制器的时延 τ_{sc} ，和控制器到执行器的时延 τ_{ca} ，控制信号的计算时间与 τ_{sc} 和 τ_{ca} 相比很小，可忽略不计，如图 6.3 所示。

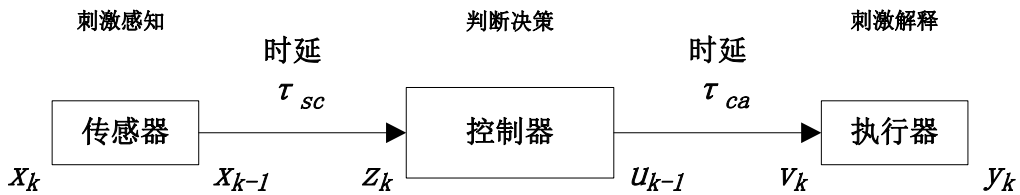


图 6.3 无人驾驶智能行为的信息加工系统时延表示

本文考虑的传感器、控制器和执行器均为时钟驱动，由于时延的影响，传感器数据在到达控制器节点后，才能被控制器计算，无人驾驶智能行为信息加工系统中，交通环境刺激元从传感器到执行器的时延为：

$$I_9 = \tau_{sc} + \tau_{ca} \quad (6.4)$$

(2) 丢包指标 I_{10}

对于无人驾驶智能行为信息加工系统中的交通环境刺激元丢失现象，即交通环境中刺激元并不能完全传入传感器、控制器、和执行器，而存在部分刺激信息丢失，丢包率同样存在于传感器到控制器、控制器到执行器两个阶段，如图 6.4 所示。

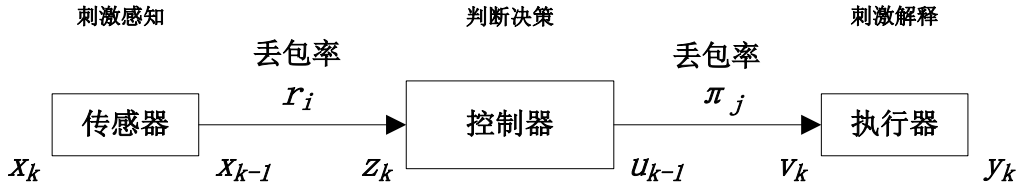


图 6.4 无人驾驶智能行为的信息加工系统丢包率表示

无人驾驶智能行为信息加工系统的丢包率可以描述成公式 (5.3) 的离散线性时不变模型：

$$\begin{cases} x(k+1) = \Phi x(k) + \Gamma u_{k-1} \\ y_k = Cx_k \end{cases} \quad (6.5)$$

式中， $x(k)$ 为第 k 个采样周期交通环境刺激元的状态， y_k 为第 k 个采样周期刺激元的输出， $\Phi = e^{AT}$ ， $\Gamma = \int_0^T e^{As} ds B$ 。

从传感器到控制器、控制器到执行器的丢包率是随机的，两个跳变参数 r_i 和 π_i ， $r_i = r_0$ 表示传感器到控制器没有刺激信号丢失发生， $r_i = r_1$ 表示传感器到控制器有刺激信号丢失发生， $\pi_j = \pi_0$ 表示控制器到执行器没有刺激信号丢失发生， $\pi_j = \pi_1$ 表示控制器到执行器有刺激信号丢失发生。

用随机过程 $x_v = \{x_v(l)\}$ 表示刺激元在信息加工系统 $e(v)$ 上的丢失情况，其中 l 表示刺激元的标号。若第 l 个刺激元在 $e(v)$ 上被丢失，则 $x_v(l)$ 取值为 0，否则取值为 1。存在以下两个基本假设：(1) 对于任意 $v, \omega \in V$ ，如果 $v \neq \omega$ ，那么 $x_v(l)$ 和 $x_\omega(l)$ 是相互独立的；(2) x_v 平稳且各态历经。采用 k 阶 Markov 模型 (k -MC) 对丢包进行建模，某一刺激元被丢失的概率与该刺激元之前的 k 个刺激元有关，而当两个刺激元间的间隔大于 $k+1$ 时相互独立。

二进制向量 $x^k(l) = [x(l), x(l+1), \dots, x(l+k-1)]$ 表示从第 l 个刺激元开始连续 k 个刺激元的丢失，其状态转移概率表示在已知某一刺激元前面 k 个刺激元丢失或成功传输的条件下，该刺激元丢失或成功传输的概率。根据条件概率的定义， k -MC 丢包模型的状态转移概率为：

$$r_i = P[x(l)|x^k(l-k)] = \frac{P[z^{k+1}(l-k)]}{P[x^k(l-k)]} \quad (6.6)$$

$$\pi_j = P[x(l)|x^k(1-k)] = \frac{P[v^{k+1}(l-k)]}{P[u^k(l-k)]} \quad (6.7)$$

式中， $P[x^{k+1}(l-k)]$ 和 $P[x^k(l-k)]$ 表示连续多个刺激元丢失或成功传输状态的联合概率。 k -MC 考虑了刺激元间的时域相关性，通过转移概率，比 Bernoulli 和 Gilbert 模型更好地描述丢包过程^[121]。

丢包过程被描述为两个状态的 Markov 跳变参数，如图 6.5 所示。

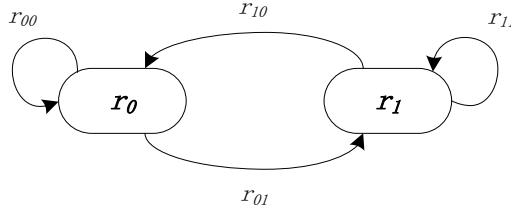


图 6.5 Markov 跳变模型

传感器被模拟为：

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu_{k-1} \quad (6.8)$$

控制器被模拟为：

$$v_{ij}(k) = -K_{ij}x(k) \quad (6.9)$$

式中， K ——控制器增益矩阵， A 、 B 具有相应维数。

传感器到控制器、控制器到执行器中的刺激信号丢包转移概率矩阵为：

$$P_r = \begin{bmatrix} r_{00} & r_{01} \\ r_{10} & r_{11} \end{bmatrix} \quad P_\pi = \begin{bmatrix} \pi_{00} & \pi_{01} \\ \pi_{10} & \pi_{11} \end{bmatrix} \quad (6.10)$$

跳变参数 θ ，共有三个状态，并且与 r_i 、 π_j 密切相关， θ 的转换概率矩阵为：

$$P_\theta = \begin{bmatrix} r_{00}\pi_{00} & \rho(1,2) & r_{01}\pi_{01} \\ r_{10}\pi_{00} & \rho(2,2) & r_{11}\pi_{01} \\ r_{10}\pi_{10} & \rho(3,2) & r_{11}\pi_{11} \end{bmatrix} \quad (6.11)$$

式中， $\rho(1,2) = r_{00}\pi_{01} + r_{01}\pi_{00}$ ， $\rho(2,2) = r_{10}\pi_{01} + r_{11}\pi_{00}$ ， $\rho(3,2) = r_{10}\pi_{11} + r_{11}\pi_{10}$ 。

贯穿无人驾驶智能行为信息加工系统三个阶段的刺激感知指标、判断决策指标、刺激解释指标和信号传输指标，及相应的 10 个二级指标，可有效评价各参赛车辆在比赛中的智能行为表现，基于信息加工的无人驾驶车辆智能行为测评指标体系，从

根本上分阶段分指标地为比赛提供了相对完备的测评指标，有利于中国智能车“未来挑战”比赛测评工作的开展。

6.2 基于信息加工的无人驾驶车辆智能行为评分体系

6.2.1 无人驾驶车辆智能行为评分体系建立原则及层次结构

无人驾驶车辆智能行为测评体系的建立过程也是分析问题的过程，由于智能行为体现在方方面面，因此评价智能行为的单项指标很多，选取不同的指标对评价结果有一定影响。评价指标应该遵循一定的规则和方法，较全面地对无人驾驶车辆智能行为作出判断，既要简洁明了、易于理解，又要便于比较和评价，具有科学性、系统性、综合性、协调性和实用性。

无人驾驶车辆智能行为测评指标依照信息加工机理，由三个层次构成，最高层为测评体系的总目标“无人驾驶车辆智能行为”，第二层为基于信息加工机理的刺激感知、判断决策、刺激解释和信号传输，第三层细化了相应的单项指标。

6.2.2 基于 AHP 熵权法的无人驾驶车辆智能行为测评指标权重计算

采用 AHP 熵权法对无人驾驶车辆智能行为各级测评指标的权重进行组合赋权，从而通过比赛中裁判对各指标的打分情况，综合计算各参赛车辆的最后得分。

主观赋权法通过专家的知识及经验，给出偏好信息或直接赋权，由此得到的权重具有一定的合理性，但主观随意性较大，结果较差；客观赋权法通过评价矩阵来定量权值，结果客观，但不能反应专家的意见。因此，本文选用将层次分析法与熵权法相结合的方法，确定无人驾驶智能行为各指标的权重，既具有主观合理性，又不乏准确性。

首先，利用 AHP 法确定初始权值，由专家对 10 个无人驾驶智能行为评价指标根据 1-9 标度法进行定量赋值，再对所有指标进行两两比较，得判断矩阵 $B = (b_{ij})_{m \times n}$ ，其中 b_{ij} 为评价指标 Y_i 与 Y_j 比较而得^[122]；其次，利用熵权法以数据的差异性大小确定各评价指标权重；最后，将两种方法得到的权重进行组合赋权，以相互弥补缺陷，提高权重的准确性。

信息熵是系统紊乱程度的测度，表示事物或问题的不确定性，通过信息熵来度量信息的无序化程度，熵越大则无序化程度越高，相对应的信息所占有的效用也就越低，即信息量越大，熵值越小，熵权越大；信息量越小，熵值越大，熵权越小^[123]。

将信息熵引入到无人驾驶智能行为评价指标的确定中，形成数据序列，并计算该数据序列的信息熵，若该数据序列的差异程度越大，则该指标对评价结果的影响就越大，权重越大。基于熵权法的无人驾驶智能行为评价指标权重的确定过程如下：

(1) 数据标准化

设由10个无人驾驶智能行为评价指标构成一个评价指标体系对 n 个无人驾驶车辆进行评价排序，第 j 个无人驾驶车辆的第 i 个指标的特征值为 x_{ij} ，由此得到各无人驾驶车辆的特征值矩阵为

$$X_{ij} = (x_{ij})_{m \times n} \quad (6.12)$$

通过对特征值矩阵 X 标准化来消除不同指标间量纲不同带来的问题，得到标准化特征值矩阵 Y

$$y_{ij} = \frac{\max x_{ij} - x_{ij}}{\max x_{ij} - \min x_{ij}} \quad j \in [1, n], \quad i \in I_1 \quad (6.13)$$

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - \max x_{ij}}{\max x_{ij} - \min x_{ij}} \quad j \in [1, n], \quad i \in I_2 \quad (6.14)$$

式中， I_1 ——成本性指标，即指标值越小越好；

I_2 ——收益性指标，即指标值越大越好；

y_{ij} ——标准化特征值， $y_{ij} \in (0,1)$ 。

(2) 熵值及熵权的计算

设第 i 项指标的熵值为

$$H_i = -k \sum_{j=1}^n f_{ij} \ln f_{ij} \quad (6.15)$$

式中： $f_{ij} = \frac{y_{ij}}{\sum_{j=1}^n y_{ij}}$ ； $k = \frac{1}{\ln n}$ 。

设第 i 项指标的熵权为

$$w_i = \frac{1 - H_i}{m - \sum_{i=1}^m H_i}, 0 \leq w_i \leq 1, \sum_{i=1}^m w_i = 1 \quad (6.16)$$

定义当 $f_{ij} = 0$ 时, $f_{ij} \ln f_{ij} = 0$ 。

当 $y_{i1} = y_{i2} = \dots = y_{im}$, 即 n 个无人驾驶车辆第 i 项指标的特征值相等时, 熵值 $H_i = 1$, 达到最大值, 熵权 $w_i = 0$, 即第 i 项指标没有提供有效消息, 可删除; 反之, 当其在某指标上值相差较大时, 熵值反而越小, 熵权越大, 这说明该指标提供了有效信息。因此, 利用熵权法对各项指标赋予权重是符合客观事实的。

将层次分析法确定的权重与熵权法确定的权重进行组合赋权, 具体公式如下:

$$\eta_i = \frac{W_i w_i}{\sum_{i=1}^m W_i w_i}, \quad 0 \leq \eta_i \leq 1, \quad \sum_{i=1}^m \theta_i = 1 \quad (6.17)$$

式中, W_i 是层析分析法确定的指标权重, w_i 是用熵值法确定的指标权重。无人驾驶车辆智能行为测评指标及权重分配, 如表 6.1 到表 6.4 所示。

表 6.1 无人驾驶车辆智能行为刺激感知权重分配

一级指标	权重	二级指标	权重
刺激感知	0.3012	复杂指标 I_1	0.4612
		感知指标 I_2	0.5388

表 6.2 无人驾驶车辆智能行为判断决策权重分配

一级指标	权重	二级指标	权重
判断决策	0.2331	知识指标 I_3	0.5927
		决策指标 I_4	0.4073

表 6.3 无人驾驶车辆智能行为刺激解释权重分配

一级指标	权重	二级指标	权重
刺激解释	0.2074	行驶指标 I_5	0.3217
		轨迹指标 I_6	0.2752
		时效指标 I_7	0.1492
		违规指标 I_8	0.2539

表 6.4 无人驾驶车辆智能行为信号传输权重分配

一级指标	权重	二级指标	权重
信号传输	0.2583	时延指标 I_9	0.3961
		丢包指标 I_{10}	0.6039

由表 6.1 到表 6.4 可知，利用 AHP 熵权法可以确定各层指标的影响权重大小。刺激感知中的感知指标对无人驾驶车辆智能行为的影响最强，信号传输中的丢包指标、刺激感知中的复杂指标和判断决策中的知识指标对无人驾驶车辆智能行为的影响其次，信号传输中的时延指标和判断决策中的决策指标对无人驾驶车辆智能行为的影响较小，刺激解释中的四个指标对无人驾驶车辆智能行为的影响最弱。

6.2.3 无人驾驶车辆智能行为评分方案

中国智能车“未来挑战赛”是为了推动和促进视听觉信息认知计算模型、关键技术与验证平台研究的创新与发展，为了推进与提升我国在视听觉信息处理领域的整体研究实力，为国民经济和社会发展做出贡献。比赛的目的是综合考察无人驾驶车辆的智能行为等能力，因此，比赛得分不能仅以完成每个考点为主，更重要的是权衡无人驾驶车辆在完成或未完成考点过程中所表现出的智能行为。

遵循中国智能车“未来挑战赛”历届比赛精神和形式，基于无人驾驶智能行为信息加工系统，提出更完备具体的评分方案，规范比赛评分体系，比赛中对无人驾驶车辆智能行为的综合考核，体现在一段包含了众多考点的赛程中，每个考点考核一种驾驶任务，所对应的交通环境复杂度就不同。某参赛无人驾驶车辆的总得分，应该为所有考点的得分之和，每个考点的得分应该由上文所提到的测评指标综合确定，如表 6.5 所示。

表 6.5 基于信息加工的无人驾驶车辆单个考点分值计算表

单个考点分值计算	一级指标分值计算	权重	二级指标分值	权重
$S_i = \sum_{j=1}^n (\sum_{k=1}^m Z_{jk} \eta_{jk}) \eta_j$	刺激感知得分	η_1	复杂指标 I_1 得分 Z_{11}	η_{11}
	$Z_1 = \sum_{k=1}^2 Z_{1k} \eta_{1k}$		感知指标 I_2 得分 Z_{12}	η_{12}
	判断决策得分	η_2	知识指标 I_3 得分 Z_{21}	η_{21}
	$Z_2 = \sum_{k=1}^2 Z_{2k} \eta_{2k}$		决策指标 I_4 得分 Z_{22}	η_{22}
	判断决策得分	η_3	行驶指标 I_5 得分 Z_{31}	η_{31}
			轨迹指标 I_6 得分 Z_{32}	η_{32}
			时效指标 I_7 得分 Z_{33}	η_{33}
			违规指标 I_8 得分 Z_{34}	η_{34}
	信号传输得分	η_4	时延指标 I_9 得分 Z_{41}	η_{41}
	$Z_4 = \sum_{k=1}^2 Z_{4k} \eta_{4k}$		丢包指标 I_{10} 得分 Z_{42}	η_{42}

设比赛赛程由 n 个考点组成，无人驾驶车辆智能行为总得分 S ，为单个考点得分 S_i 与相应的复杂度 C_i 乘积的总和，

$$S = \sum_{i=1}^n S_i C_i \quad (6.18)$$

首先应针对单个考点，依据信息加工的 10 个二级指标，按照参赛车辆的表现及式 (6.1) - 式 (6.5) 给予评分，再根据表 6.1 所列的指标权重系数，计算一级指标得分；其次根据一级指标权重系数及表 6.5 计算该参赛车在该考点的分值；最后通过单个考点复杂度及式 (6.18) 求得参赛车在整个赛程中的总得分，从而进行名次排序，如图 6.6 所示。

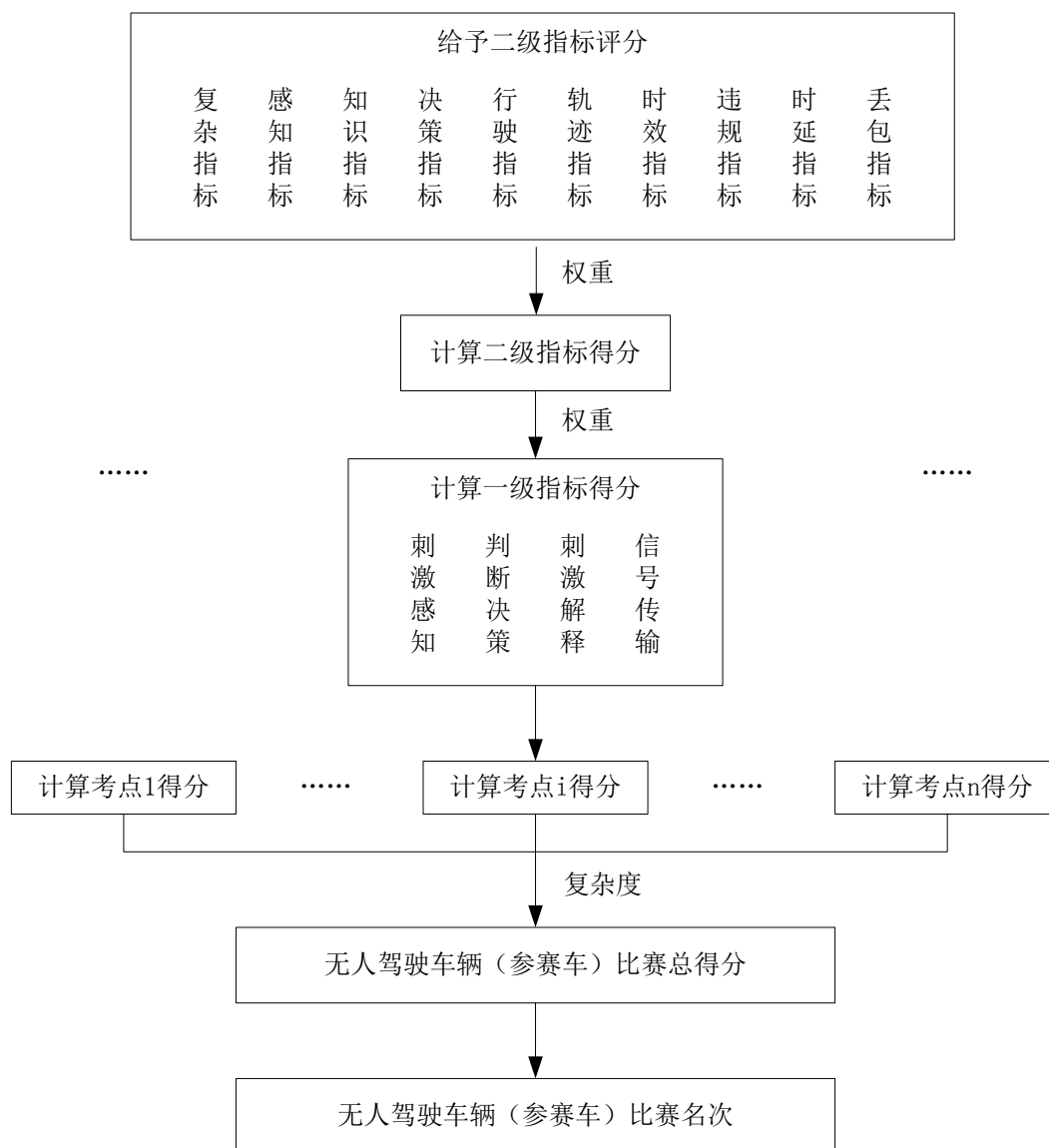


图 6.6 基于信息加工的无人驾驶车辆（参赛车）比赛评分体系

根据无人驾驶智能行为信息加工系统及测评指标体系，分阶段分考点地对参赛车进行打分，使测评过程更清晰，使参赛车各指标各考点得分更直观，为中国智能车“未来挑战”比赛测评提供评分体系，有利于参赛车辆有针对性地提高智能行为。

6.3 本章小结

基于无人驾驶智能行为信息加工系统，建立了无人驾驶车辆智能行为测评指标体系，确定了刺激感知、判断决策、刺激解释、信号传输 4 个一级指标，10 个二级指标，采用 AHP 熵权法确定各指标权重，从而提出了基于考点复杂度的无人驾驶车辆智能行为评分体系，为中国智能车“未来挑战”的测评奠定了坚实基础。

结论与展望

结论

本文以信息加工理论为依据研究了无人驾驶智能行为，并根据刺激感知——判断决策——刺激解释的信息加工机理逐阶段展开，将有人驾驶与无人驾驶相结合，分别解析驾驶行为成因，结合通过交叉口、直线跟驰、和避障三种典型工况中的驾驶行为，以有人驾驶行为特性为测试标准，对比研究了无人驾驶智能行为特征，从而有针对性地设计了无人驾驶车辆的测试环境和测评方法。通过系统研究，得出了以下六个结论：

(1) 基于认知心理学的信息加工理论，分别构建了有人驾驶行为与无人驾驶智能行为的信息加工系统，利用知觉的建构学说和原型模式识别原理，补充论述了无人驾驶智能行为的信息加工机理，得出了驾驶行为的产生由刺激感知——判断决策——刺激解释三个阶段构成，并结合已有知识和经验完成了对未知信息的识别，有效地为无人驾驶车辆研发提供了新思想，为无人驾驶智能行为测评奠定了基础。

(2) 根据常见城市交通环境刺激库构成并基于图形熵理论，计算城市交通环境动、静态刺激类构成图的图形一阶熵，建立了城市交通环境复杂度计算模型，从而确定了当前城市交通环境复杂度，该模型可将不同刺激组合的城市交通环境的复杂程度数值化，有效计算了城市交通环境复杂度，为无人驾驶车辆未知环境设计和测评提供了有力依据。

(3) 基于城市交通环境复杂度计算模型，通过实时计算的城市交通环境复杂度，确定无人驾驶车辆各传感设备的优先权，提出了无人驾驶车辆传感设备应用配置，可有效解决无人驾驶车辆面对复杂城市交通环境时传感设备无针对性的问题；并根据赛程考点复杂度分布原则，将不同复杂度的城市交通环境作为不同考点，设计了无人驾驶车辆比赛的多复杂度测试环境，可有效考核无人驾驶车辆在不同复杂度考点的智能行为。

(4) 针对冲突车横向右转时的通过交叉口行为、前导车匀速-加速-减速-停车时的直线跟驰行为、静止车于同车道上的避障行为，根据相应的试验数据，依次定量解析这三种有人驾驶行为的效应特征，揭示了踏板行程、车速、车辆偏距的变化

规律，建立了车速与交通环境复杂度的函数关系，利用灰关联熵和粗糙熵理论，采用改进的 ID3 决策树算法，生成了这三种有人驾驶行为的判断决策规则表，可有效作为无人驾驶智能行为测评准则。

(5) 针对通过交叉口、直线跟驰、避障三种典型工况的驾驶行为，通过有人与无人、无人与无人的驾驶行为刺激解释特性的对比剖析，利用基于三角模糊数的多级模糊综合评判理论和正三角形法，对“未来挑战”比赛中的 3 辆参赛车进行了智能行为刺激解释综合评判，有效确定了各参赛车的刺激解释能力等级，及各参赛车的单项智能行为强弱。

(6) 利用信息加工机理及城市交通环境复杂度计算模型，构建了无人驾驶智能行为测评指标体系，确定了贯穿信息加工三阶段的 4 个一级指标：刺激感知指标、判断决策指标、刺激解释指标和信号传输指标，基于 AHP 熵权法，提出了无人驾驶车辆智能行为评分体系，可有效地分阶段分指标对参赛车进行总评分和排名。

创新点

本文的创新点有：

(1) 构建了无人驾驶智能行为信息加工系统框架

依据有人驾驶行为信息加工系统构建了无人驾驶智能行为的信息加工系统，将无人驾驶智能行为同样分为刺激感知——判断决策——刺激解释三个阶段，以有人驾驶行为规律推导和解析了无人驾驶智能行为，并根据历届中国智能车“未来挑战”比赛数据并结合多级模糊综合评判方法和正三角形法，有效评价了三种典型工况的无人驾驶智能行为，为无人驾驶车辆测评和研发奠定了基础。

(2) 建立了基于图形熵的城市交通环境复杂度计算模型

根据常见城市交通环境刺激库构成并通过计算不同刺激组合的城市动、静态交通环境构成图的一阶熵，建立了城市交通环境复杂度计算模型，该模型直观体现了当前城市交通环境复杂程度，克服了城市交通环境刺激元复杂繁多、不易计算的缺点，有效计算了无人驾驶车辆测试环境中考点的复杂度，结合复杂度，定量评价了各参赛车的智能行为，设计了无人驾驶车辆多复杂度测试环境，为中国智能车“未来挑战赛”的测评提供了有力依据。

(3) 构建了基于信息加工的无人驾驶智能行为测评指标体系和评分体系

利用信息加工机理及城市交通环境复杂度计算模型，构建了无人驾驶智能行为

测评指标体系，确定了贯穿信息加工三阶段的刺激感知、判断决策、刺激解释和信号传输 4 个一级指标及相应的 10 个二级指标，进一步采用 AHP 熵权法构建了无人驾驶车辆智能行为评分体系，该体系可分阶段分指标地全面测评无人驾驶车辆的智能行为，可快捷清晰地计算各参赛车的单项得分和总得分，为中国智能车“未来挑战”比赛的测评提供了有效方法，为无人驾驶车辆的研发提出了新思路。

展望

近年来，无人驾驶车辆在各发展迅速，但是如何评价其智能行为能力已成为时下急需解决的问题，相关研究还处于起步阶段，因此研究中会受到一定的制约。虽然在有人驾驶行为和无人驾驶智能行为方面开展了大量的工作，但是研究结果可能与实际还有一定的差距，并且存在不足和需要改进之处，这些都需要在今后更深入的试验、分析和研究中得到改善和落实，需要进一步开展如下研究：

(1) 增加虚拟视景仿真试验和道路试验的受试人群、扩展更多的驾驶场景。通过全部 12 类的大量试验采集更多的驾驶参数，采用更精确的数学方法，进行深入的分析 and 对比，分别建立更符合客观情况的谨慎型、鲁莽型的驾驶行为模型，从而辅助于无人驾驶智能行为测评研究。

(2) 进行城市交通环境复杂度计算模型的修正。进一步扩充交通环境刺激库，考虑更多的动静态刺激元，同时，由于各刺激元之间存在关联，下一步要引入修正系数，减小由于关联产生的误差，列出典型的刺激组合，并计算相应的复杂度，可直接为无人驾驶车辆比赛测评服务。

(3) 完善三种判断决策模型并建立除此之外的 9 类驾驶行为判断决策模型。考虑更多条件属性和实际因素，结合大脑决策和信息加工机理，更细致地建立判断决策模型。通过交叉口行为中要针对更多的让行方式和冲突类型建模，直线跟驰行为中要考虑前导车更多的运动状态变化，避障行为中要涉及动态障碍物。

(4) 围绕中国智能车“未来挑战”比赛要求和目标，结合城市交通环境复杂度计算模型，分别计算对应 12 种驾驶行为的环境复杂度，将每一种驾驶行为的测试作为一个考点内容，从而设计不同考点组合的比赛测试环境，确定历届比赛中赛程复杂度，制定未来比赛的赛程复杂度走势，从而有针对性的设计测试环境。

参考文献

- [1]国家自然科学基金委员会重大研究计划“视听觉信息的认知计算”官方网站[EB/OL].
<http://ccvai.xjtu.edu.cn/mes.do?method=list>.
- [2]Fuller Rasmussen. A conceptualisation of driving behaviour as threat avoidance[J]. *Ergonomics*, 1984, 27:1139-1135.
- [3]Michon,J.A. A critical view of driver behavior models: What do we know, what should we do? [A]. In: Evans, L., and Schwing, R.eds. *Human Behavior and Traffic Safety*[C], New York, Plenum Press, 1985, 485-520.
- [4]M.Hatakka, E.Keskinen, N.P.Gregersen, A.Glad, K.Hernetkoski. From control of the vehicle to personal self-control; broadening the perspectives to driver education[J]. *Transportation Research Part F*, 2002, 5:201-215.
- [5]Jong-Hae Kim, Shigeru Okuma, Young-Woo Kim. Modeling of Human Driving Behavior Based on Piecewise Linear[J]. *Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics 2005*, 25-30.
- [6]Shogo Sekizawa, Shinkichi Inagaki, Tatsuya Suzuki. Modeling and Recognition of Driving Behavior Based on Stochastic Switched ARX Model[J].*Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2007, 8(4): 593-606.
- [7]郭孔辉, 潘峰, 马凤军. 预瞄优化神经网络驾驶员模型[J]. *机械工程学报*. 2003, 39(1):26-28.
- [8]娄燕, 何汉武, 卢桂萍等. 虚拟自主汽车智能驾驶行为模型的研究及实现[J]. *系统仿真学报*, 2005, 17(12): 2935-2938.
- [9]娄燕, 卢永明, 何汉武等. 具有个性化钩虚拟自主汽车视觉行为模型研究[J]. *计算机工程与应用*, 2006, 17: 184-187.
- [10]娄燕, 何汉武, 卢永明. 虚拟驾驶员的注意力行为建模[J]. *微计算机信息*, 2008, 24(2-3): 274-276.
- [11]陈雪梅. 多因素刺激下驾驶员综合行为模型及职业驾驶员遴选评价[D]. 北京: 北京理工大学, 2006.
- [12]Toshinori Hayashi, Keiichi Yamada. Predicting Unusual Right-turn Driving Behavior at

Intersection [C]. 2009 IEEE. Xi'an, 869-874.

[13]Kosaka H., Higashikawa N., Nishitani H.. Effect of safe-driving instructions on driver behavior at non-signalized intersection [C]. 2007 SICE, Takamatsu, Japan, 1128-1131.

[14]Georges S. Aoude, Vishnu R. Desaraju, Lauren H. Stephens, et al. Behavior Classification Algorithms at Intersections and Validation using Naturalistic Data [C]. 2011 IEEE Intelligent Vehicles Symposium. Baden-Baden, Germany, 601-606.

[15]J.K. Caird, S.L. Chishlim, C.J. Edwards, et al. The effective of yellow light onset time on older and younger drivers' perception response time (PRT) and intersection behavior [J]. Transportation Research Part F, Elsevier, 2007, 10: 383-396.

[16]Barbrara Preston. The Behavior and Safety of Pedestrians at Pelican Crossings in Greater Manchester [J]. Traffic Engineering Control, 1989: 5-58.

[17]Paula D.Raymond, Richard L. Knobluach. The Eeffect of Crosswalk Markings on Vehicle Speeds [J]. TRB. Washington. D. C, 2000: 112-117.

[18]Marsha S. Nitzburg. Pedestrian Crosswalk Case Studies[J]. TRB, Washington. D. C, 2000: 123-129.

[19]李志鹏. 混合交通流下信号交叉口机动车微观行为研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2004.

[20]常书金. 城市道路交叉口驾驶员行为控制特点研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2010.

[21]吴文静, 隗志才, 贾洪飞. 倒计时信号交叉口处的驾驶员行为决策[J]. 系统工程理论与实践, 2009, 29(7): 160-165.

[22]葛兴, 项乔君, 陆键. 基于冲突的公路平面交叉口驾驶行为研究[J]. 交通运输工程与信息学报, 2009(3): 39-43.

[23]Fan Xiaoqiu, Ji Jinzhang, Zhang Guoqiang. Impact of Driving Behavior on the traffic safety of Highway Intersection [C]. 2011 Third International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation. 2011: 370-373.

[24]徐良杰, 王炜, 俞斌. 信号交叉口非机动车及行人交通控制研究[J]. 交通运输工程与信息学报, 2004 (6).

[25]Chandler, Herman, Montroll. Traffic Dynamics: Studies in Car Following[J]. Operations Research, 1958, 6: 165-184.

- [26]Kometani Sasaki. Dynamic Behavior of Traffic with a Nonlinear Spacing-speed Relationship[J]. Proceedings of the Symposium on Theory of Traffic Flow, Research Laboratories, General Motors, 1959: 105-119.
- [27]Helly. Simulation of Bottlenecks in Single Lane Traffic Flow[J]. Proceedings of the Symposium on Theory of Traffic Flow. Research Laboratories, General motors, 1959: 207-238.
- [28]Michaels. Perceptual Factors in Car Following[J]. Proceedings of the Second International Symposium on the Theory of Road and Traffic Flow. OECD, 1963: 44-59.
- [29]Peter Hides. A Car-following Model for Urban Traffic Simulation[J]. Traffic Engineering and Control, 1998, 39(5): 200-305
- [30]Gibon J. J. The Ecological Approach to Visual Perception[J]. Boston: Houghton Mifflin Company, 1966.
- [31]Heino A. Risk Taking in Car Driving: Perceptions, Individual Differences and Effects of Safety Incentives[D]. University of Groningen, 1996.
- [31]Evans L, Wasielewski P. Risky Driving Related to Driver and Vehicle Characteristics[J]. Accident Analysis and Prevention, 1983, 15: 121-136.
- [32]Wim van Winsum. The Human Element in Car Following Models[J]. Transportation Research Part F, 1999, 2: 207-211.
- [33]Raymond Hoogendoorn, Serge P Hoogendoorn, Karel Brookhuis. Mental Workload, Longitudinal Driving Behavior, and Adequacy of Car-following Models for Incidents in Other Driving Lane[J]. Transportation Research Record, 2010, 2188: 64-73.
- [34]Heino A. Risk Taking in Car Driving: Perceptions, Individual Differences and Effects of Safety Incentives[J]. University of Groningen, 1996.
- [35]韩直. 交通异常自动检测系统[D]. 上海: 同济大学, 1994.
- [36]荣建. 高速公路基本路段通行能力研究[D]. 北京: 北京工业大学, 1999.
- [37]许轮辉, 徐建闽, 周其节. 车辆跟驰问题的建模及其求解[J]. 华南理工大学学报, 1998, 26: 38-43.
- [38]T. M. Matson, T.W. Forbes. Overtaking and Passing Requirements as Determined from a Moving Vehicle[J]. Highway Research Board Proceeding, 1938, 18: 100-112.

- [39]J. M. Jenkins, L.R. Rilett. Classifying Passing Maneuver: A behavioral Approach[J]. Transportation Research Board 84th Annual Meeting, National Research Council, Washington, 2005.
- [40]Eleni Vlahogianni, John Golias. Bayesian Modeling of the Microscopic Traffic Characteristics of Overtaking in Two-lane Highways[J]. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behavior, 2012, 15(3): 348-357.
- [41]Enrique Onieva, Luigi Cardamone, Daniele Loiacono. Overtaking Opponents with Blocking Strategies using Fuzzy Logic[J]. Proceedings of 2010IEEE Conference on Computational Intelligence and Games, 2010, 123-130.
- [42]Simone Fuchs, Stefan Rass, Kyandoghere Kyamakya. A Constraint-based and Context-aware Overtaking Assistant with Fuzzy-probabilistic Risk Classification[J]. IADIS Multi-Conference on Computer Science and Information Systems, 2008: 93-100.
- [43]沈建武, 严宝杰. 双车道公路上的超车问题[J]. 武汉城市建设学院学报, 1995.
- [44]王元庆, 朱海滨, 李继锐等. 双向双车道公路仿真研究中车辆行为设计[J]. 西安公路交通大学学报, 2001.
- [45]张袅雄, 隗志才, 贾洪飞. 不同流量条件下车道利用率的仿真研究[J]. 公路交通科技, 2005.
- [46]刘江, 邵长桥, 任福田. 基于超车行为的双车道公路通行能力分析[J]. 中国公路学报, 2007.
- [47]刘江, 周建. 基于超车率的双车道公路服务水平量化研究[J]. 北京工业大学学报, 2007.
- [48]邵长桥, 刘世杰. 双车道公路上驾驶员超车行为研究[J]. 北京工业大学学报, 2007.
- [49]荣建, 刘世杰. 超车模型在双车道公路仿真系统中的应用研究[J]. 公路交通科技, 2007.
- [50]单晓峰, 夏东, 王昊. 双车道公路超车两难区域研究[J]. 公路交通科技, 2007.
- [51]杨明. 无人驾驶车辆研究综述与展望[J], 哈尔滨工业大学学报, 2006, 8, 1259-1262.
- [52]欧盟 Cyberrcars2 项目官方网站[EB], www.cyberrcars2.org.
- [53]Bouraoui L, Petti S, Laouiti A, et al. Cybercar cooperation for safe intersections. 2006 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference [C], Canada, 2006, 456-461.
- [54]Danwei Wang, Minh Tuan Pham. A high-Fidelity Co-Simulation Platform For Motion and Control Research for Vehicle Platforming Int. J. Vehicle Autonomous Systems, 1(5): 1-5.
- [55]加州大学. PATH 计划官方网站[DB/OL]: www.path.com.
- [56]Yang M, Parent M. Cybernetic Technologies for Cars in Chinese Cities. In: Proceedings of City

Trans China [C], 2004.

[57]孔繁森, 邹青, 杜春梅. 驾驶员行为的 Kuipers 定性仿真算法[J]. 系统仿真学, 2004, 16(1): 118-121.

[58]秦双. 虚拟人智能驾驶行为的研究和实现[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2003.

[59]李斌, 杨立功, 郭齐胜. 人工神经网络在 CGF 智能行为模型中的应用研究[J]. 计算机仿真, 2001, 18(3): 4-6.

[60]孔繁森, 邹青, 杜春梅. 驾驶员行为的 Kuipers 定性仿真算法[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(1): 118-121.

[61]Guangming Xiong, Peiyun Zhou, Shengyan Zhou et al. Autonomous Driving of Intelligent vehicle BIT in 2009 Future Challenge of China[J]. 2010 IEEE Intelligent Vehicles Symposium, 2010.

[62]Gage. D. W. Current Thrusts in Ground Robotics: Programs, Systems, Technologies, Issues[C]. 4th Int'l Sym. On Technology and Mine Problem, 2000.

[63]Joint Robotics Program Master Plan, FY 2005, Office of the Secretary of Defense, USA, URL: <http://www.jointrobotics.com/>, 2005.

[64] Grandchallenge, URL: http://en.wikipedia.org/wiki/DARPA_Grand_Challenge.

[65]Thrun. S. Stanley: The Robot That Won The DARPA Grand Challenge [J]. Journal of Field Robotics, 2006.

[66]David A. Patterson. Robots in the desert: a research parable for our times [J]. Communications of the ACM, 2005, 48(12):31-33.

[67]SAPRO, URL: <http://www.sapro.com.au/smartdemo2005.htm/>, 2005.

[68]GCDC, URL: <http://www.gcdc.net/>, 2010.

[69]ELROB, URL: <http://www.elrob.org/>, 2010.

[70]Prof.Ing.Gino Ferretti. URL: <http://viac.vislab.it/>, 2010.

[71]URL: <http://it.sohu.com/20101011/n275530971.shtml>, 2010.

[72]Huang H M. Autonomy levels for unmanned systems framework: Safety and application issues [C]. Proceeding of Performance Metrics for Intelligent Systems Workshop. 2007.

[73]Williams G, Brown M A, Lamm R D, et al. Evaluation of autonomy in recent ground vehicles using the autonomy levels for unmanned systems framework: Safety and application issues [C].

Proceeding of Performance Metrics for Intelligent Systems Workshop.2007.

[74]Anderson M L. A flexible approach to quantifying various dimensions of environmental complexity [C]. Proceeding of Performance Metrics for Intelligent Systems Workshop.2004.

[75]Evans J M. Definitions and measures of intelligence in deep blue and army XUV [C]. Proceeding of Performance Metrics for Intelligent Systems Workshop.2007.

[76]Kyung-Jung Lee, Jae-Oh Kim, Jae-Han Park. Development of a PC-Based Network Performance Evaluation System for Intelligent Robots[J]. Lecture Notes in Computer Science, Convergence and Hybrid Information Technology, 2011, 6935:512-519.

[77]中国智能车未来挑战. URL: <http://ccvai.xjtu.edu.cn/>.2011.

[78]Guangming Xiong, Xijun Zhao, Haiou Liu. Research on the quantitative evaluation system for unmanned ground vehicles[J]. Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2010, 523-527.

[79]王本贤. 试析认知信息加工理论[J]. 教育探索, 2009, 215(5): 7-8.

[80]刘勋, 吴艳红, 李兴珊等等. 认知心理学: 理解脑、心智和行为的基石[J]. 中国科学院, 2011, 26(6): 620-629.

[81]黄强, 水超, 孙智信等. 科学计量视角下认知科学发展研究[J]. 现代情报, 2011, 31(7).

[82]Dewar R E, Olson P L. Human Factor in Traffic Safety[M]. Tucson: Lawyers and Judges Publishing Company, Inc., 2001.

[83]Bruner J, Haste H. Making sense: The child's construction of the world[J]. New York: Methuen, 1987.

[84]Gordon I E. Theories of visual perception[M]. New York: Wiley. 1989.

[85]史忠植. 认知科学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2008.

[86]许勇, 刘伟. 认知心理学有关模式识别的研究[J]. 天津外国语学院学报, 1997, 43-45.

[87]袁伟, 付锐, 郭应时等. 汽车驾驶人感知-决策-校正行为模式[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2007, 27(3): 80-83.

[88]Parent M, Yang M. Road Map towards Full Driving Automation. Proceedings of 8th International Conference on Application of Advanced Technologies in Transportation Engineering [C]. Reston, VA:ASCE and T&DI, 2004, 663-668.

[89]娄海冬. 环境法律的捍卫[J]. 江苏警官学院学报, 2010, 25(1): 75-80.

- [90]张登兵, 刘思峰. 熵与系统有序性研究综述[J]. 数学的实践与认识, 2008, 38(24) .
- [91]Kimberly A. Cote*. Probing awareness during sleep with the auditory odd-ball paradigm[J]. International Journal of Psychophysiology, 2002(46):227-241.
- [92]何毅. 空中交通复杂度参数模型的研究[D].上海: 同济大学, 2007.
- [93]刘峰涛, 贺国光. 基于近似熵和统计复杂度的交通流复杂性测度[J]. 中国公路学报, 2007, 20(4): 108-112.
- [94]张勇, 关伟. 基于联合熵和 CO 复杂度的交通流复杂性测度[J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(15):22-24,33.
- [95]吴殿洪, 郭立文, 贾诚等. 脑物理学[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1995: 197-199.
- [96]Mark S S, Ernest J M. Human Factors in Engineering and Design[J]. USA: McGraw-Hill Companies, Inc., 2002.
- [97]Wickens C D. Information processing, decision making, and cognition[J]. In G. Salvendy (Ed.), Cognitive engineering in the design of human-computer interaction and expert systems. Amsterdam: Elsevier, 1987.
- [98]Wickens C D, Holland J G. Engineering Psychology and Human Performance[J]. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall Inc., 2000.
- [99]Har S G, Staveland L E. Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of empirical and theoretical research[J]. In P.A. Hancock & N. Meshkati (Eds.), Human mental workload, 1988, 139-183.
- [100]Rodger Mueller. Optimizing the Performance of the Pilot Control Loaders at NASA Vertical Motion Simulator[J]. Journal of Aircraft, 2010, V47(2): 682-693.
- [101]郭波, 张晓冬, 段爽月. 应用脑力负荷测量的设计能力评价方法[J]. 重庆大学学报, 2009(3): 288-293.
- [102]Stevenson S S. The surprising simplicity of sensory metrics [J]. American Psychol, 1962, 27:29-39.
- [103]GB7665-87, 传感器通用术语[S].北京: 中国标准出版社, 1987.
- [104]刘亚洲. 智能车辆的结构与设计[D]. 上海: 上海交通大学, 2006.
- [105]杨波, 王跃钢, 彭辉煌. 基于捷联惯导/里程计的车载高精度定位定向方法研究[J]. 计算机

测量与控制, 2011,19(10): 2501-2506.

[106]欧阳志峰. 基于 GIS 的铁路绿色选线决策支持系统 (GRASDSS) 的知识库研究[D]. 长沙: 中南大学, 2008.

[107]李奎. 基于灰色系统的交通流预测算法研究和应用[D]. 镇江: 江苏大学, 2011.

[108]韩文涛, 张倩, 贾安民. 基于灰色系统的道路交通事故预测模型研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2005, 37(3).

[109]陈彦江, 付玉辉, 孙航. 灰色理论在钢管混凝土拱桥施工控制中的应用[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39(4).

[110]吕锋. 灰色系统关联之分辨系数的研究[J]. 系统工程理论与实践, 1997, 17(6): 49-54.

[111]王鹏飞. 基于灰熵的不确定多属性决策问题研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009.

[112]杨习贝. 不完备信息系统中粗糙集理论研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2010.

[113]王雷. 基于多源信息融合的驾驶员跟车行为研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2007.

[114]Special Report 209: High Capacity Manual. 3rd Edition[R]. Washington DC: TRB, National Research Council, 1994.

[115]Paker M T. The Effect of Heavy Goods Vehicles and Following Behavior on Capacity at Motorway Roadwork Sites[J]. Traffic Engineering Control, 1996, 37(9): 524-531.

[116]吕岸, 胡振程, 陈慧. 基于高斯混合隐马尔科夫模型的高速公路超车行为辨识与分析[J]. 汽车工程, 2010(7): 630-634.

[117]喻丹. 机动车驾驶人行为建模及可靠性分析[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2011.

[118]林决明. 驾驶员安全行车保健手册[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2005.

[119]马春晖, 史艳维. 模糊数学中的非标准扩大模型[J]. 杭州: 浙江大学学报(理学版), 2011, 38(6).

[120]张文亮. 网络控制系统的稳定条件分析和控制器设计[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2009.

[121]Yajnic M, Sue M, Kurose J. Measurement and modeling of the temporal dependence in packet loss[C]. IEEE INFOCOM, New York, 1999:345-352.

[122]薛会琴. 多属性决策中指标权重确定方法的研究[D]. 兰州: 西北师范大学, 2008.

[123]周薇, 李小菁. 基于信息熵的综合评价方法[J]. 科技技术与工程, 2010,10(23): 9-10.

附录 A 部分城市交通静态环境刺激元量值

编号	名称	图例	难易 分值	编码	名称	图例	难易 分值	编码	名称	图例	难易 分值
2.1.1.1	急转弯 标志		45	2.1.1.2	注意行人 标志		47.5	2.1.1.3	双向交通 标志		30
2.1.1.4	注意信 号灯标 志		15	2.1.1.6	注意儿童 标志		47.5	2.1.1.8	横滑标志		45
2.1.1.9	注意非 机动车		35	2.1.1.14	慢性标志		45	2.1.1.12	建议速度 标志		30
2.1.1.13	窄桥标 志弯窄 标志		35	2.1.1.15	交叉路口 标志						30
2.1.2.1	减速让 行标志		50	2.1.2.2	停车让行 标志		45	2.1.2.3	禁止掉头 标志		35
2.1.2.4	会车让 行标志		52.5	2.1.2.5	禁止超车 标志		45	2.1.2.6	禁止行人 进入标志		10
2.1.2.7	禁止通 行标志、 禁止驶 入标志		25	2.1.2.8	禁止停车 标志、禁 止长时停 车标志		25	2.1.2.9	禁止向左 向右转弯 标志、禁 止直行和 向左标志		30
2.1.2.10	解除禁 止超车 标志		20	2.1.2.11	禁止鸣喇 叭标志		15	2.1.2.12	停车检查 标志;		30
2.1.2.13	限制质 量标志		15	2.1.2.14	限制速度 标志		35	2.1.2.15	解除限制 速度标志		35

附录 B 城市交通静态环境刺激类权值

交通环境大类	交通环境刺激一级类	难易权值	交通环境刺激二级类	难易权值	交通环境刺激三级类	难易权值	交通环境刺激元	难易权值
城市交通环境静态	1 道路	0.3	1.1 路段	0.21	1.1.1 直路段	0.278		
					1.1.2 弯路段	0.452		
					1.1.3 车道	0.27	1.1.3.1 双向二车道	0.374
							1.1.3.2 双向四车道	0.186
							1.1.3.3 双向八车道	0.178
							1.1.3.4 双向十车道	0.17
							1.1.3.5 更多	0.102
			1.2 交叉口	0.376	1.2.1 平面	0.562	1.2.1.1 十字型	0.274
							1.2.1.2 丁字型	0.198
							1.2.1.3 环型	0.186
							1.2.1.4 复合型	0.342
					1.2.2 立体	0.438		
			1.3 匝道	0.232				
			1.4 桥涵	0.182				
	2 交通设施	0.32	2.1 道路交通标志	0.376	2.1.1 警告标志	0.186		
					2.1.2 禁令标志	0.214		
					2.1.3 指示标志	0.238		
					2.1.4 指路标志	0.186		
					2.1.5 旅游标志	0.186		
			2.2 道路交通标线	0.416	2.2.1 指示标线	0.316		
					2.2.2 禁止标线	0.33		
					2.2.3 警告标线	0.354		
			2.3 交通信号灯	0.208				
	3 周围景观	0.12	3.1 建筑物	0.598				
			3.2 花草树木	0.402				
	4 天时	0.26	4.1 白天	0.2				
			4.2 黑夜	0.342				
			4.3 晴	0.116				
			4.4 雨雪雾	0.342				

附录 C 部分城市交通动态环境刺激元量值

参与对象	数量	初始位置		行驶方向	相对位移	难易分值
机动车	1	交叉口	对向车道	左转	渐变小	80
					突变小	95
			横向车道	右转	渐变小	70
					突变小	90
				直行（滞留）	渐变小	55
					突变小	95
		路段	相同车道	直行	不变	15
					渐变小	75
					突变小	95
					渐变大	35
			相邻车道	静止	渐变小	50
					突变小	70
					不变	10
					渐变小	30
					突变小	50

攻读学位期间发表论文及研究成果清单

- [1] Xin Gao, Li Gao, Gang Dong. Research on Intelligent Driving Behavior Based on Cognitive Science and Scene Simulation. The 2011 International Conference on Intelligent Science and Information Engineering. (Accession number: 20113914360867, EI、ISTP 检索)
- [2] Xin Gao, Li Gao, Gang Dong, Wei Zhou, Chen Li. Evaluation on Intelligent Driving Behaviors of U-Turn and Overtaking in “Future Challenge”. 2011 International Conference on Energy Systems and Electrical Power. (Accession number: 20121814986266 , EI、ISTP 检索)
- [3] Xin Gao, Gang Dong, Li Gao. Establishment and Analysis of Information Processing Models on Intelligent Overtaking Behavior. Advances in Artificial Intelligence and Computational Intelligence. (Accession number: 20114114417518, EI、ISTP 检索)
- [4] Xin Gao, Gang Dong, Li Gao. Comparison on Driving Behavior between Manned and Unmanned Ground Vehicles. The 2nd International Conference on Intelligent Control and Information Processing. (Accession number: 20113914381512, EI、ISTP 检索)
- [5] Xin Gao, Gang Dong, Li Gao. Study on Intelligent U-Turn Behavior for Unmanned Ground Vehicle Based on Construction Perception. The 7th International Conference on Natural Computation. (Accession number: 2011401440441, EI、ISTP 检索)
- [6] Xin Gao, Gang Dong, Li Gao. Fuzzy Synthetic Evaluation of Driving Abilities for Intelligent Vehicles. The 2nd IEEE International Conference on Software Engineering and Service Sciences. (Accession number: 20113714318113, EI、ISTP 检索)
- [7] 高利, 高薪, 陈雪梅, 董纲, 李霞. 有人驾驶与无人驾驶车辆避障行为的对照模型. 专利申请号: 201110195137.7.

攻读学位期间主要参加的研究项目：

1. 国家自然科学基金重大研究计划“视听觉信息的认知计算”重点支持项目“无人驾驶车辆智能行为综合测试环境设计与测试体系研究”和培育项目“无人驾驶车辆认知能力测试及验证环境设计与实现”中承担主要科研工作；
2. 国家科技支撑计划项目“重特大道路交通事故综合预防与处置集成技术开发与示范应用”课题四-专题 16“营运车辆驾驶员综合评价数据库及信息化管理系统”中完成有关驾驶人综合评价部分的研究；
3. 国家高技术研究发展计划(863)“驾驶员安全状态监测及预警技术”中采集试验数据等。

致谢

五番暑往寒来的轮回使我收获颇丰，特别是博士学位论文的撰写，与其说是研究项目、完成论文、获取学位的过程，倒不如说是克服困难、排解压力、战胜自我的过程。幸运的是，在这长达五年的人生旅程中我并不孤单，因为得到了众多老师和同学的无私帮助及家人的鼎力支持。

特别感谢导师高利教授。导师渊博的学识，尽职尽责的教学风范，严谨求实的治学态度，开拓进取的科学精神，都是我学习和工作的动力。导师的学者胸怀醇厚宽广、科研态度认真严谨，都给我留下了深刻的印象，使我受益匪浅。整个博士论文的写作更是倾注了导师大量的心血。开题之初，导师阐述了很多有关本论文的独到见解，在拓宽我的视野，激发我兴趣的同时，也坚定了我完成论文的信念；撰写过程中，导师就论文的写作提出了具体的要求；论文初稿交付后，导师在繁忙工作之余对论文的修改提出了宝贵意见。本论文能顺利完成，得益于导师无微不至的关心和不厌其烦的教导。导师不仅是我学业上的导师，更是我做人的榜样。在此，谨向恩师致以崇高的敬意与衷心的感谢！

感谢北京理工大学运输与物流所的全体老师和同学，在我学习过程中给我指导和帮助，特别感谢赵亚男副教授、吴绍斌副教授、陈雪梅老师、孙洪武老师，论文能够顺利完成与老师们的指导和鼓励是分不开的，在此向他们表示深深的感谢。同样特别感谢李霞博士后和练岚香博士在我的论文构思和写作期间提供的帮助和关心，给了我许多启发和建议。

难忘与王东、李明明、纪文博、王曦、王学伟、杨颖钰、张振华、韦崇明、刘蕾蕾、赵敏、刘守霞、王军、邹鹏飞、丁熹、董帅、黄京等同门师兄妹相伴的分分秒秒，你们的存在使得我在差旅中不再寂寞，工作中充满欢声笑语；你们的才思敏捷和开朗热情时刻感染着我，使我的学习生活丰富多彩。

感谢我的父母和家人，无怨无悔地默默支持我，是他们的理解、信任和不计回报的心，让我更有信心和勇气专注学业，继续前进。

谨以此文献给关心、支持、鼓励和帮助过我的所有人！