



面向智能网联汽车的 成熟驾驶模型

白皮书

全国汽车标准化技术委员会
智能网联汽车分技术委员会

先进驾驶辅助系统（ADAS）标准工作组

2023年11月

前言

近年来，自动驾驶技术在人工智能、物联网及 5G 移动通信等新一代技术革命的支持下，自动驾驶能够高效规划出行路线与时间，从而大幅度提高出行效率，并可直接减少行驶能耗。同时还能避免驾驶员因注意力分散、酒驾及身体疲劳等造成的安全隐患，因此自动驾驶汽车已成为全球各企业研发的重中之重。当前具备先进驾驶辅助系统、自动驾驶系统的汽车渗透率已达 50% 以上，预计到 2030 年具备 L2 级先进驾驶辅助系统的汽车渗透率将达 90%，其中自动驾驶汽车将超过 50% 以上。

我国汽车强国建设进入关键时期，面对智能汽车激烈的国际竞争和我国汽车产业转型升级突破的强烈诉求，快速抓住汽车智能化、网联化及共享化发展的新机遇，使我国汽车生态快速转型升级，并成为新业态引领者，对不断满足人民日益增长的智能出行需求与美好生活需要具有十分重要的意义。

因此，为了有助于设计更能被用户接受的智能驾驶系统，达到减少交通事故，提升驾乘体验，提高交通效率的目的，中国汽车技术研究中心有限公司联合中国第一汽车股份有限公司、华为技术有限公司、清华大学等 23 家单位，共 24 家单位共同编写完成《面向智能网联汽车的成熟驾驶模型白皮书》。

本书结合成熟驾驶模型发展现状、自动驾驶发展现状及成熟驾驶模型标准化的发展现状，综合提出符合中国驾驶员的成熟驾驶模型，包含紧急制动模型与紧急转向模型，在世界范围内首次通过实车标定与仿真标定相结合方式开展模型参数标定，确定了驾驶员反应时间、制动特性曲线及转

向特征曲线等多项关键技术参数，并用仿真工具进行参数泛化，首次构建了基于实车及仿真二者相结合的成熟驾驶模型关键参数，最终得出了可避免碰撞的场景参数范围边界，为自动驾驶汽车与人类驾驶能力类比、预期功能安全研究、设计运行域设计及自动驾驶准入管理等提供重要依据，研究成果可全面支撑自动驾驶汽车产品及技术发展，为我国自动驾驶汽车高质量发展深度赋能。

汽标委智能网联汽车分会文件

编写单位

中国第一汽车股份有限公司
中国汽车技术研究中心有限公司
华为技术有限公司
清华大学
吉利汽车研究院（宁波）有限公司
深圳元戎启行科技有限公司
上海集度汽车
上海商汤临港智能科技有限公司
上海机动车检测认证技术研究中心有限公司
北京地平线信息技术有限公司
中国汽车工程研究院股份有限公司
江苏大学汽车工程研究院
北京百度智行科技有限公司
上汽通用五菱汽车股份有限公司
路特斯科技有限公司
襄阳达安汽车检测中心有限公司
北京汽车研究总院有限公司
江铃汽车股份有限公司
东风柳州汽车有限公司
广州汽车集团股份有限公司汽车工程研究院
一汽解放汽车有限公司
东风商用车有限公司
智己汽车科技有限公司
厦门金龙旅行车有限公司

编写人员

郑建明、张宇飞、孙航、高鲁涛、华一丁、王红、陈龙、兰祥琪、郭钦城、田磊、李佳稭、章棵、沈金华、宋雪松、韩卓伟、李雪轲、曹建永、黄俊富、江浩斌、程周、覃斌、刘开勇、张巍、高海龙、孙加兴、邱志鹏、潘涛、郑英东、付源翼、夏创新、史志辉、张丽平、刘瑞强、曲歌、张儒征、牟柯、李傲雪、廖尉华、宋永康、杜强飞、陈音、胡德华、石胜文、李阳、郑磊、聂盛明、兰振东、彭东庆、付俊闻、甘国栋、付瀚龙、张文超、邱娟

汽标委智能网联汽车分委会文件

目录

第一章 成熟驾驶模型技术发展现状.....	1
1.1 成熟驾驶模型发展现状.....	1
1.2 关键跟驰模型发展现状.....	2
1.3 关键换道模型发展现状.....	9
1.4 分析总结.....	16
第二章 自动驾驶技术发展现状.....	17
2.1 技术发展现状.....	17
2.2 产品发展现状.....	27
第三章 成熟驾驶模型标准化发展现状.....	34
3.1 国外标准发展现状.....	34
3.2 国内标准发展现状.....	37
3.3 分析总结.....	40
第四章 关键成熟驾驶模型构建方法.....	42
4.1 模型概述.....	42
4.2 模型构建.....	42
4.3 紧急模型场景提取.....	49
4.4 验证分析.....	60
4.5 分析总结.....	62
第五章 成熟驾驶模型标准化展望与建议.....	64
5.1 体系标准化建议.....	64
5.2 标准化模型建议.....	66
5.3 总结展望.....	67
附录 A 成熟驾驶模型可避免碰撞的场景参数取值.....	69
参考文献.....	80

第一章 成熟驾驶模型技术发展现状

1.1 成熟驾驶模型发展现状

成熟驾驶模型是指模仿成熟人类驾驶员控制车辆行为的数学模型或计算机模型，这些模型在汽车设计、自动驾驶算法开发、驾驶模拟器以及交通规划和管理领域有着广泛的应用。

一般来说，成熟驾驶模型建模思路是，对驾驶活动进行具体观察，如驾驶员的决策过程，驾驶员的注意力控制及车辆的速度、加速度等车辆表现，在此基础上，构建一个层级结构，如策略、操纵和控制三层，然后将层级结构与驾驶任务动态联系起来，在不同层级上对驾驶人进行行为分析。

成熟驾驶模型技术在当今世界呈现出丰富多彩的发展态势，经历了数十年的持续探索与技术积淀，其发展脉络浸润了认知心理学、交通工程、控制理论等领域的智慧精华。

依据模型建模方法大致可分为基于理论的模型和基于数据的模型。基于理论的模型常基于人类心理学、生理学、控制理论等领域的研究成果进行建模，近年来这些模型更加细化，对人类行为的模拟精度越来越高；基于数据的模型常基于大数据和机器学习技术，大幅提高了驾驶模型的准确性和预测能力。通过分析大规模的实际驾驶数据，模型能够自我优化，提高对驾驶行为模式的预测能力。

按照模型的细节程度可分为微观模型和宏观模型，微观模型重点关注单一驾驶员决策过程和操作细节；宏观模型重点关注整体交通流的宏观特性。

按照模型的功能可分为行为模型、决策模型和性能模型，行为模型专注于驾驶员的操作行为，如转向、加速、制动等；决策模型模拟驾驶员的策略选择和决策过程，如应对突发事件的反应、最小风险策略选择等。性能模型用于评估驾驶员的驾驶能力，通常用于驾驶员培训和评价。

按照应用领域可分为交通工程应用模型、车辆设计应用模型和驾驶培训评估模型等，交通工程应用模型用于路网设计、交通流量控制、事故重建等领域；车辆设计应用模型用于车辆人机交互设计、辅助驾驶系统开发、驾驶员辅助功能的评价和优化等；驾驶培训评估模型应用于模拟具体的驾驶任务和环境，以训练和评估驾驶员。

成熟驾驶模型的研究方向众多，但在自动驾驶技术领域，跟驰与换道模型的研究深度和应用范围相对较为广泛。在实际行车过程中，由于驾驶人 90%的时间与 95%的里程都在进行直线行驶，进一步体现了纵向(沿道路方向操纵车辆)驾驶行为的重要性，且有研究表明，近一半的交通事故是由于驾驶人跟车距离过近导致的。车辆跟驰理论不仅是微观交通流理论最基本的仿真模型，还是理解宏观交通流形成的理论基石。此外，它还具有指导交通组织管理、缓解交通拥堵的现实意义。横向驾驶行为是指驾驶人在与道路垂直的方向上对车辆进行操控，是驾驶行为的重要组成部分。换道模型与跟驰模型构成了交通流中两个最主要的驾驶任务，也是驾驶行为理论的关键核心内容。

1.2 关键跟驰模型发展现状

车辆跟驰模型主要用于描述车辆在跟驰行为过程中的行驶状态变化。对该模型的研究可以追溯到 20 世纪 50 年代初，经过 60 多年的发展，已经

取得了一系列重要的研究成果。

根据建模方法的不同，已有模型划分为理论驱动车辆跟驰模型 (Theory-Driven Car-Following Model) 和数据驱动车辆跟驰模型 (Data-Driven Car-Following Model) 两大类，见图 1。

理论驱动车辆跟驰模型侧重于对驾驶行为影响因素的描述，模型的设计者通常是在观察车辆跟驰行为的基础上，提出符合驾驶经验的理论假设，并基于该理论假设建立车辆跟驰模型。

数据驱动跟驰模型，是以真实的车辆行驶数据为基础，利用数据科学与机器学习等理论和方法，通过样本数据的训练、学习、迭代、进化，挖掘车辆跟驰行为的内在规律。



图 1 跟驰模型分类

1.2.1 理论驱动类跟驰模型

刺激-反应框架是跟驰行为建模中最经典的思想，它深刻揭示了跟驰行为中的核心特性。随着时间的推移，经过 Pipes、GM、Newell 和 IDM 等模型^[1-4]的演进，车辆跟驰的概念逐渐成熟并得以广泛应用。

安全距离模型基本假设为，驾驶人期望与前导车保持安全车头间距，当前导车突然制动时，驾驶人能够有时间做出反应并减速停车，以避免发生碰撞^[5]。这类模型主要是基于牛顿运动学公式建立的，由于其形式简单并且能够避免车辆碰撞，因此在交通仿真软件中得到了广泛应用。

随着认知心理学的发展，许多学者试图在跟驰行为建模中引入更多“人的因素”，心理-生理模型^[6]即是以驾驶员的感知与反应特性为基础来建立模型。心理-生理跟驰模型在许多仿真软件中得到了广泛应用，例如德国 PTV 公司开发的 VisSim 软件。该软件已经在全球 2500 多个城市中得到了应用，并且已经成为许多国家交通仿真领域的标准。

元胞自动机实质上是一个定义在由具有离散、有限状态的元胞组成的元胞空间中的动力学系统，它按照一定的局部规则在时间维度进行演化。由于交通元素本质上具有离散性，使用元胞自动机理论来对跟驰行为进行建模具有其独特的优越性。因此，元胞自动机是一种有效的建模工具，可以用来描述交通流中的跟驰行为。

近年来，随着理论驱动类模型研究的深入，研究方向逐渐分为考虑人类因素、基础设施因素、交通信息因素、异质交通流等微观驾驶行为的因素，见图 2。人类因素包括感知阈值、驾驶人视觉角度、风险感知、分心及失误的跟驰模型。基础设施因素主要包括道路基础设施对跟驰行为的影响，如路面条件、行驶阻力与道路几何条件等。交通信息因素包含驾驶人对交通信息的记忆效应、预测效应等，异质交通流因素不仅包括机动车、非机动车和行人各种交通流的混行，随着驾驶辅助系统、车联网、自动驾驶技术的发展，必将出现人工及自动驾驶混合的异质交通流。

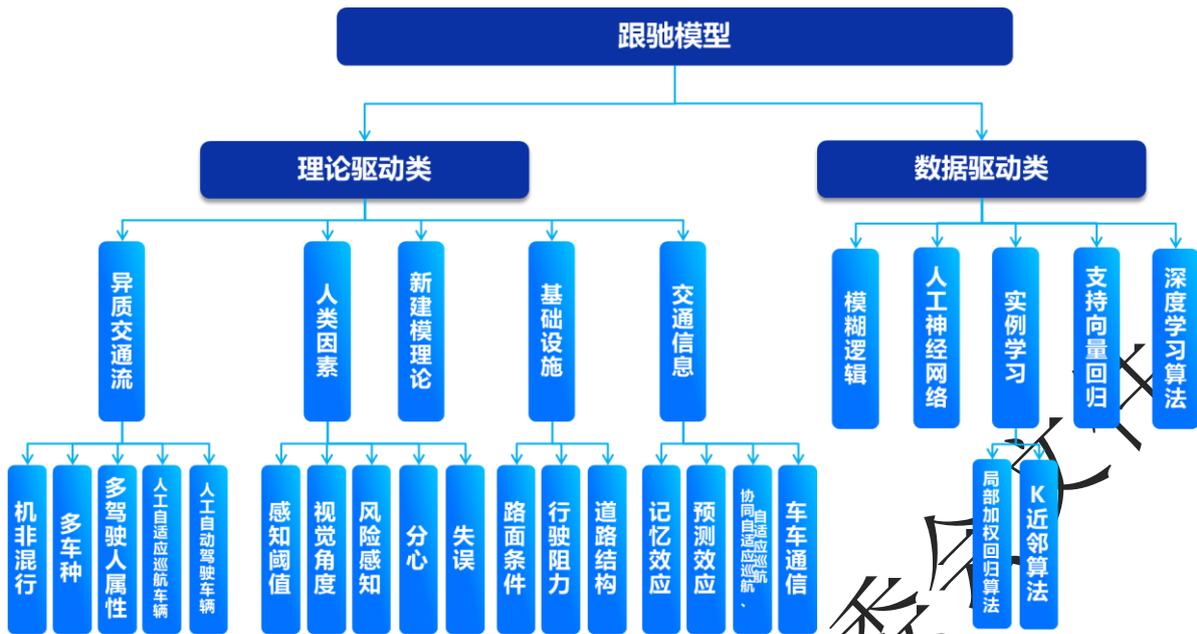


图2 跟驰模型研究方向

1.2.2 数据驱动类跟驰模型

数据驱动的跟驰模型以真实的车辆行驶数据为基础，利用数据科学和机器学习等理论和方法，通过样本数据的训练、学习和迭代进化，挖掘车辆跟驰行为的内在规律。这类模型不局限于各种理论假设，不追求严格意义上的数学推导，而是采用非参数方法挖掘轨迹数据的内在信息，旨在建立具有高预测精度的跟驰模型。根据使用算法的不同，这类模型可分为模糊逻辑类、人工神经网络类、实例学习类、支持向量回归类以及深度学习算法类。

模糊逻辑类是应用模糊集合及模糊规则对定性问题进行描述，从而实现未知模型和系统的综合判断。模糊逻辑在车辆跟驰模型中的应用，使得跟驰模型能够更切合实际地描述驾驶人的驾驶行为特性^[7]。

人工神经网络方法是通过样本数据的学习建立起一般性的描述，具有较高的预测精度，因此，使用人工神经网络建模车辆跟驰行为也一直是

当前的研究热点，BP 神经网络、径向基神经网络、模糊神经网络等方法不断应用到跟驰行为建模中。目前随着神经网络技术的进步，隐含层数目更多的深度神经网络受到了更多关注。

深度学习是机器学习的分支，其核心来源于人工神经网络^[8]。深度学习通过构建多层隐含层模型，分析大量训练数据，提高分类和预测的准确性^[9]。

1.2.3 分析总结

数据驱动类模型参数结构复杂，同时需要大量的有效数据对模型进行参数标定，同时由于神经网络处理过程的黑盒，机理不可解释性，相关模型普遍尚在研究中，成熟落地的商业化应用产品较少，因此标准化难度较高。

理论驱动类跟驰模型相对成熟度更高，在工程中获得了更多的应用，各类模型发展历程如图 3 所示，关键维度对比见表 1。



图 3 跟驰模型发展历程

表 1 跟驰模型对比表

跟驰模型对比表								
模型类别	模型名称	基本假设	参数个数	参数名称	模型输出	参数标定方法	应用	局限性
刺激-反应	GM 模型	期望与前导车保持一个规定的安全跟驰距离，驾驶人加速度与两车之间速度差成正比，与两车车头间距成反比，同时与自身速度也存在直接关系	5	目标车辆位移、目标车辆速度、敏感系数、反应时间、待标定系数	本车加速度	测量、实测数据拟合	通用公司	反应时间不能反映驾驶人之间的差异，模型参数估计没有考虑加速、减速的行为差异
安全距离	Gipps	驾驶人期望与前车保持安全距离，前车突然制动时，驾驶人有时间能避免碰撞	6	期望加速度、期望减速度、车长、目标车减速度、期望车速、驾驶人反应时间	本车速度	测量、实测数据拟合	仿真软件 CORSIM、 SimTraffic 、Paramics	形式简单，不适用于车头间距过大的情况
	RSS		7	本车的初始速度、前车初始速度、本车的反应时间、本车在反应时间内的最大加速度、本车最小制动减速度、前车最大制动减速度	本车与前车应该保持的安全距离	测量、实测数据拟合	百度 Apollo 和 法雷奥都宣布将引入 RSS 模型	参数标定方法不统一，描述场景偏向安全方面
智能驾驶	IDM	加速度为递减函数，加速度是车距的增函数，车辆不会倒退	10	本车速度、前车速度差、期望速度、前车间距、期望间距、静止安全距离、安全车头时距、起步加速度、舒适减速度、加速度指数	本车加速度	测量、实测数据拟合	辅助驾驶系统中，它可以被用来控制车辆的速度和加速度 仿真软件 SUMO	描述精准，但仅适用于自动驾驶

表 1 跟驰模型对比表 (续)

跟驰模型对比表								
模型类别	模型名称	基本假设	参数个数	参数名称	模型输出	参数标定方法	应用	局限性
心理-生理	Wiedemann 心理-生理	一旦跟驰车驾驶人认为其与前车之间的距离小于心理安全距离, 跟驰车驾驶员就开始减速; 由于跟驰车驾驶员无法准确判断前车的车速, 直到两车之间的距离达到另一个心理安全距离时, 跟驰车驾驶员就开始缓慢加速	6	AX: 静止状态下前后车期望距离 ABX: 较小速度差下的期望跟车距离 SDV: 距离较大时速度差的感知阈值 CLDV: 短距离时意识到很小的速度差并且距离减小的界限值 OPDV: 短距离时意识到很小的速度差并且距离增大的界限值 SDX: 跟驰过程中意识到距离变化的感知值	本车加速度	测量、实测数据拟合	仿真软件 Vissim、 MITSim、 TransModeler	人因阈值确定十分困难, 可移植性差

1.3 关键换道模型发展现状

换道模型是指在汽车自动驾驶系统中，用于判断何时以及如何进行车辆的换道操作的算法模型。换道模型旨在实现安全、高效和自适应的车辆换道动作。应用于微观交通环境模拟的换道模型分类如图 4 所示，主要分为两类：换道决策模型、换道执行模型。其中，换道决策模型描述了驾驶员做出换道决策的逻辑规则和过程，用于模拟驾驶员的微观驾驶特性。换道执行模型则主要分析了换道车辆与周边车辆的交互关系，以处理换道车辆与周围交通流的相互影响。



图 4 换道模型

1.3.1 换道决策模型

换道决策模型从驾驶员换道决策的角度对换道行为进行建模，侧重于微观换道过程的表达，以及物理参数的标定，主要包括规则模型、离散选择模型、人工智能模型、马尔可夫模型、生理-心理模型、生存模型等。

规则模型是最基本的换道行为建模框架，模型的解释变量与因变量之间有着清晰的因果关系，基于规则的自动驾驶换道决策模型以 Gipps 的换

道模型为代表，是指车辆针对不同换道环境，制定出不同的换道规则，比如最小安全距离规则、换道避障规则等，换道车辆基于这些规则判断当前的交通环境是否满足换道的条件，进而决策是否进行换道。例如，在Gipps模型的基础上引入换道概率来描述驾驶员换道行为的随机性、将换道模型分为用于高速公路的FRESIM模型和用于城市道路的NETSIM模型、以及将车辆换道时的相互作用分为自由换道、协作换道和强迫换道3种类型。

对于离散选择模型，由于因变量不是一个连续的变量，是一个离散变量，使用离散选择模型可以提供一个有效的建模途径，比如在研究各类因素（如道路坡度、弯道曲率等、车龄、光照、天气条件等）对事故严重程度的影响的时候，因变量事故严重程度就可以认为是一个离散变量，比如使用轻、中、严重三个程度来表示。Ahmed等人在其开发的离散选择模型中考虑了驾驶员的差异性与状态的依赖性（当前的选择依赖于以往的驾驶经验与换道的决策过程），并进一步考虑了高密度交通流中强制换道频发的现象。

使用神经网络的模型，可以从大量数据中挖掘特征，通过调整内部节点连接的权重和阈值，对网络输出造成不同程度的影响，以达到系统控制的目的。由于不需要使用周围交通精确感知数据进行建模，因此具备较好地模拟驾驶员不确定性特性的优势。

马尔可夫模型是基于马尔科夫链的一种统计模型，他的核心思想是，随时间序列变化的一系列状态，每个当前的状态只和之前的几个有限的状态有关。Toledo等人将离散选择模型和隐马尔可夫模型相结合，建立了换

道决策模型。实验结果表明基于隐马尔可夫的换道决策模型具有更好的精度。

概率选择模型描述个体驾驶员的行为由其自身特征和其他驾驶员的行为组成的环境决定，反之亦然。从条件概率的角度来看，其他驾驶员的行为对某驾驶员的影响，可以被解释为，当某驾驶员感知到周围其他车辆的状态后，他采取某种特定动作的概率。

1.3.2 换道执行模型

为了深入探究微观换道过程与周围车辆的交互关系，以及这种关系与各种交通现象之间的联系，研究者们将换道模型与运动波理论相结合，创建了运动波混合模型。

元胞自动机 (Cellular Automata, CA) 是一种时空离散的局部动力学模型，是研究复杂系统的一种典型方法，特别适合用于空间复杂系统的时空动态模拟研究。元胞自动机模型被广泛地应用于换道模型构建中，如单元胞模型、多元胞模型、确定性模型、慢速启动模型等。Nagel、Rickert 等提出双车道交通的元胞自动机模型。

力相关的模型^[10, 11]是指，通过参考相关力学模型建立换道行为与周边车辆行驶状态改变的相互作用的模型。

1.3.3 分析总结

早期的换道模型多为基于规则的建模方法，近年来逐渐向人工智能模型转变，本节从基本假设、模型参数、应用情况等几个方面，对各类换道模型进行总结分析，关键维度的对比结果见表 2，发展历程如图 5 所示。



图 5 换道模型发展历程

汽标委智能网联汽车分

表 2 换道模型对比表

换道模型对比表							
模型类别	模型名称	基本假设 (建模方法+换道类型)	关键参数	其他参数	应用道路	应用	优缺点
规则模型	Gipps	基于逻辑结构+数学表达, 对换道类型未做区分	最大安全速度	距换道点距离/紧急性/特殊用途车道/重型车辆/前车影响	城市道路	仿真软件 MITSIM	规则模型具有建模简单/应用场景广泛/变量少/仿真平台易用的优点, 但是具有参数校准难/只使用初级变量/依赖简化假设/环境适应性差的缺点
	Hidas	与 Gipps 模型相同, 但是将换道类型分为自由、被迫、协同	最小可接受空间间距	车道减少/距换道点距离/排队优势/速度优势	高速公路/ 城市道路	仿真软件 ARTEMiS	
	Y. Pei	基于博弈论+纳什均衡理论建模, 换道类型只考虑被迫换道	延迟与求解时间/空间角度	速度/密度/高斯分布	城市道路	—	
	Toledo	基于短期目标/短期规划+数学表达的方式建模, 换道类型分为强制/任意两种	可接受间距/ 加速度	因果关系/驾驶员特性/状态依赖	高速公路	仿真软件 MITSIM	
	Fellendorf	与 Gipps、Hidas 模型相同, 换道类型分为强制/任意两种	可接受间距	距换道点距离/与紧急停车点距离	高速公路/ 城市道路	仿真软件 VISSIM	
	Erdmann	与 Fellendorf 相同	速度/距离	换道僵持点	城市道路	仿真软件 SUMO	
	X. Wan	以序列决策制定模型为建模基础理论, 换道类型只考虑强制换道	车间距/与轴道尽头距离/碰撞最小距离	间距位置/间距趋势/速度差/车型路径规划/驾驶员特性随机项	高速公路	—	
	D. Wang	基于换道可行性准则+模型预测优化控制理论 MPC 建立模型, 不区分换道类型	位置/速度/纵向加速度	—	—	—	
Y. Yu	基于动态多人博弈理论建立模型, 不区分换道类型	位置/速度/加速度/进攻性	—	高速公路	—		
离散选择模型	Ahmed	基于决策树+概率换道模型的建模理论, 将换道类型分为强制和任意	可接受间距	跨越车道数/距换道点距离/完成合流的延迟/车辆类型	高速公路	仿真软件 MITSIM	优点: 考虑多元因素, 缺点: 需要概率函数/应用道路单一/忽略协同竞争
	Eleftheriadou	基于焦点小组+问卷量表进行建模, 将换道类型分为强制和任意	驾驶员特性/ 换道概率	车辆类型/合流车辆/跟驰或被跟驰/排队优势/路面状态/异常行为	城市道路	仿真软件 CORSIM	

表 2 换道模型对比表 (续)

换道模型对比表									
模型类别	模型名称	基本假设 (建模方法+换道类型)	关键参数	其他参数	应用道路	应用	优缺点		
离散选择模型	Y. Du	基于混合逻辑动态系统 MLD 理论建模, 未区分换道类型进行	—	行程时间/安全/行为约束纵向位置/速度/所在车道	高速公路	—	优点: 考虑多元因素, 缺点: 需要概率函数/应用道路单一/忽略协同竞争		
人工智能模型	Schlecht triemen	基于随机森林+高斯混合回归的方法建模, 将换道类型分为向左换道/向右换道	与车道线距离/横向速度	—	—	高速公路	优点: 考虑不确定性/方法众多/易于校准/适应性强, 缺点: 未知因素较多/数据要求高/可解释性差		
	J. Nie	基于支持向量机建模, 换道类型为任意	相对纵向速度/车辆间距	—	—	高速公路			
	D. Xie	基于深度信任网络 DBN+受限玻尔兹曼机 RBMs 建模, 未区分换道类型	速度/相对速度/车头间距	—	—	高速公路			
	Schubert	基于贝叶斯网络 BN 建模, 未区分换道类型	—	车辆的位置和方向/周围移动目标/车道标线/速度/偏航率/车道曲率、宽度、变形	—	公路		人机界面 HMI	
	Ulbrich	基于信号处理网络+部分可观测马尔科夫决策过程 POMDP 建模, 未区分换道类型	—	—	目标车辆与周围对象的相对距离/相对速度/碰撞事件	—		城市道路	
	Tehrani	基于离散网格的多类别驾驶场景分类法+机器学习, 未区分换道类型	—	—	周围车辆特征 (网格占用状态/相对速度/横向和纵向距离)/道路曲率/时间和距离约束	—		公路	仿真软件 PreScan
	Y. Zhang	基于卷积神经网络 CNN+全连接神经网络 FCN 建立驾驶风格感知换道决策模型 DSA-DLC, 未区分换道类型	—	—	—	—		公路	

表 2 换道模型对比表 (续)

换道模型对比表							
模型类别	模型名称	基本假设 (建模方法+换道类型)	关键参数	其他参数	应用道路	应用	优缺点
马尔科夫模型	X. Wang	基于隐式马尔科夫模型建模, 换道类型只针对强制换道	可用间距/临界间距	与离开点的距离/与排队的距离/与目标车道的距离	高速公路	—	仅能模拟换道频率, 无法阐述换道决策过程
生理心理模型	Schakel	基于松弛和同步的换道模型 LMRS, 换道类型包括自由/协同/同步	路径/速度/车道偏好	可接受车头时距/减速度	高速公路	—	优点: 参数少/结构灵活, 缺点: 依赖简化假设/应用道路单一/推广难度大
	Wiedemann	基于快慢车道转换状态的变化, 建立了通用换道决策模型	车速/道路种类	可接受减速度/最大减速度/距离相关的变化率	高速公路	仿真软件 VISSIM	

1.4 分析总结

关键驾驶模型中的跟驰模型和换道模型是决策模块中的两个重要组成部分，它们分别负责车辆在跟车和换道过程中的智能决策和控制。

跟驰模型的主要任务是根据周围车辆的位置、速度和行为，预测并决策如何与前车保持安全距离并实现平稳的跟车行驶。在实现跟驰行为时，跟驰模型需要考虑诸如车速、加速度、最小安全距离等因素，并实时调整车辆速度和加速度，以确保安全、舒适的跟车体验。换道模型负责根据感知信息和决策规划，判断何时、何地以及如何进行车道变换，以实现安全、高效的换道行为。换道模型需要综合考虑多个因素，如前方交通状态、周围车辆行为、车道宽度、加速度和转向角等，确定最佳的换道时机和策略。

虽然对驾驶行为分析建模以及仿真的研究取得一定进展，但目前还没有一个公认的模型能够完成驾驶全过程的覆盖和表征驾驶人的全部行为，在紧急情况下识别驾驶人的危险特征仍存在一定缺陷，同时，人因异质化生理心理指标、行为阈值的界定也是研究的难点所在。

第二章 自动驾驶技术发展现状

2.1 技术发展现状

我们将自动驾驶技术拆分为产品开发技术与产品测试技术，二者的有效整合，确保了自动驾驶汽车能在不断进化的同时，满足日益严格的安全和性能标准，逐步走向成熟。

2.1.1 产品开发技术发展现状

产品开发技术从流程上分为 3 个核心流程，分别是环境感知定位、决策规划、执行控制。

环境感知定位技术是自动驾驶汽车的核心技术之一，它使得车辆能够理解周围的环境。这一技术领域正在快速发展。环境感知定位通常依赖于多种传感器，包括激光雷达（LiDAR）、雷达、摄像头和超声波传感器等，通过不同传感器的数据融合提高系统的准确性和鲁棒性，见图 6。

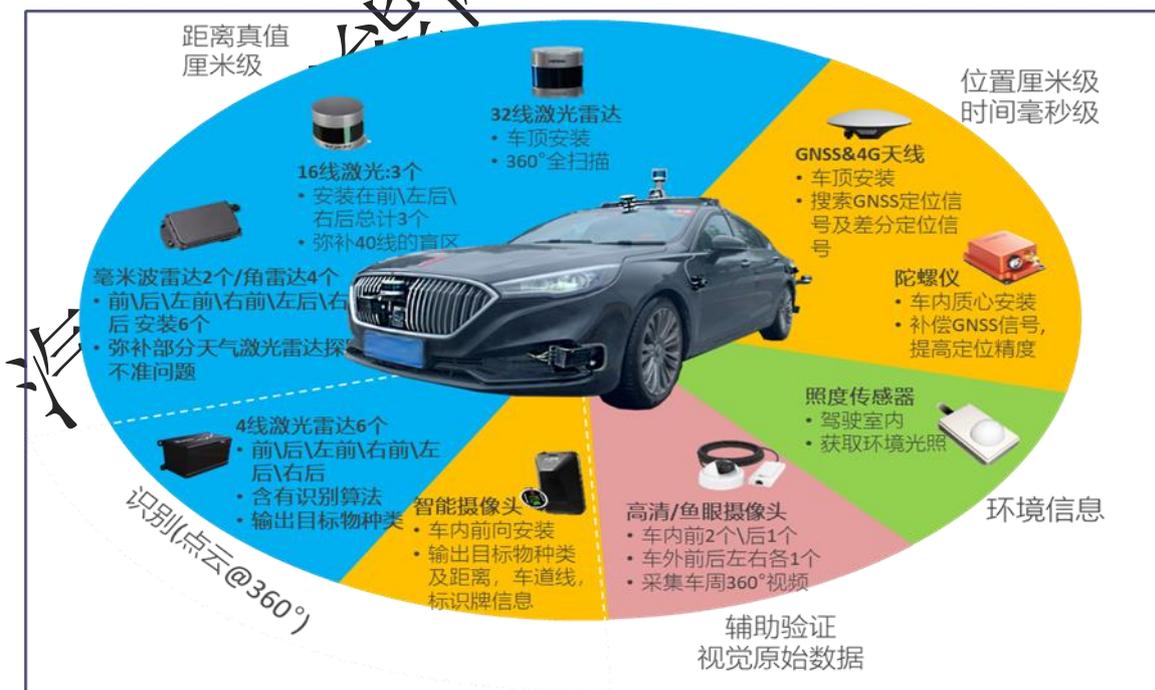


图 6 多传感器融合

传统激光雷达以其高成本和外形尺寸较大而闻名。近年来，固态激光雷达和 MEMS 激光雷达的发展提高了成本效益，尺寸更小，适用性更强，见图 7，进一步推动了自动驾驶汽车的商业化。



图 7 机械激光雷达与固态激光雷达

高分辨率摄像头和先进的计算机视觉算法组合，能够实现对交通标志、行人、车辆和其他障碍物的准确识别，见图 8。



图 8 视觉感知识别

雷达技术的改进使得车辆能够在恶劣天气条件下，如雾和雨中，更好地检测到其他车辆和物体。

高精度 GPS 和惯性导航系统结合使用，可以提供车辆的精确位置，见图 9。同时，高精度地图为自动驾驶提供了必要的详细道路信息。



图 9 高精度 GPS 和惯性导航系统

随着深度学习和其他人工智能技术的进步，环境感知软件算法变得越来越强大，能够更好地理解和预测交通动态和行为。

5G 技术和车联网让车辆之间以及车辆与基础设施之间进行实时通讯成为可能，这为环境感知定位带来了额外的数据源，提高了总体的感知能力，见图 10。



图 10 C-V2X 技术

随着传感器技术的发展，现代车辆上的摄像头、雷达、激光雷达

(LIDAR) 和其他感应器可以提供关于车辆状态和环境的大量数据, 驾驶模型技术正在更有效地融合这些传感器数据, 能够更准确地理解和预测驾驶员行为。

近年来, 来自不同领域的诸多学者开展行为决策方法相关研究, 从不同的行为决策方法上, 大体可以分为基于规则的行为决策方法和基于机器学习的行为决策方法。

经过研究学者们的研究与改进, 至今已有多种规划控制算法, 而每种算法都有各自的适用场景及优缺点, 见表 3。

表 3 规划算法比对分析

轨迹规划算法分类	内容	适用范围	优点	缺点
基于图搜索的算法 (二十世纪中叶)	Dijkstra、A*、D*	全局路径规划	成功率高	大型图搜索效率较低
基于曲线拟合的算法	圆弧与直线	局部路径规划	易于计算, 且为最短路径	路径的曲率不保证连续
	多项式		易于计算, 曲线形态灵活多变	曲率连续性不保证 (多个路径衔接, 如泊车)
	曲线样条曲线		计算成本低, 曲率连续易于保证, 控制点容易控制曲线形状	难以平衡曲线形状和连续性需求
	贝塞尔曲线		计算成本低, 控制点可产生期望的曲线, 曲线间可相互连接	高阶曲线难以调节, 全局路径点影响整条曲线, 控制点较难设置
基于数值优化的算法	利用目标函数和约束对规划问题进行描述和求解	局部路径规划	可添加车辆动力学、道路边界, 驾驶风格等约束条件	陷入局部最优解
基于人工势场的算法 (1986)	人工势场法	全局路径规划	较成熟、效率高	未考虑车辆动力学等约束 陷入局部最优解
基于采样的算法 (1998)	RRT	全局路径规划	效率相对较高	陷入局部最优解; 路径质量差; 难以在狭窄通道找到路径

表 3 规划算法比对分析（续）

轨迹规划算法分类	内容	适用范围	优点	缺点
基于智能法的算法 (二十世纪中叶)	模糊逻辑、神经网络、遗传算法	全局路径规划	系统鲁棒性、场景适用度较高，以安全性舒适性等为边界条件，能够生成易于跟踪控制的最优行驶轨迹	可解释性较差 计算量大，对硬件要求较高

在国内外，驾驶员行为模型已广泛应用于自动驾驶技术开发过程中，并在多个厂家及自动驾驶供应商中得到应用，见表 4。

表 4 国内外厂家自动驾驶技术与驾驶模型应用

时间	单位	模型及技术	驾驶模型的应用特点
2007	AnnieWay 团队	有限状态机的并联设计	保持安全距离
2017	Mobileye	责任敏感安全模型	谨慎驾驶
2018	Waymo	神经网络和机器学习的引入	降低出错率
2019	特斯拉	驾驶过程的场景化与训练，协助车辆预测道路上的未来活动	行为预测
2022	蔚来汽车	NAD 智驾技术	丰富驾驶行为
2023	Wayve	生成式 AI 模型 GALA-1	理解并重现规则和行为
2023	大陆	Imagery 平台集成于其自动驾驶平台	拟人驾驶并决策
2023	特斯拉	FSD Beta v11.4 推出	恶劣环境下能更快做出决策
2023	理想汽车	AD MAX 3.0 智驾技术	行为预测
2023	一汽解放	驾驶行为的检测与评估，量化评估实现信息化管理	降低油耗和安全高效

2.1.2 产品测试技术发展现状

2018 年联合国整合原 ITS/AD 非正式工作组相关业务，成立新的自动驾驶车辆工作组（GRVA），并在 GRVA 下建立了自动驾驶评价与管理办法非正式工作组（VMAD）。在自动驾驶测试面临的新问题和新挑战背景下，提出“多支柱法”自动驾驶测试准则，即通过仿真测试、场地测试和实际道路测试等多种途径与方式，主张利用仿真测试覆盖全场景测试，利用场地测试覆盖典型场景和危险场景，利用实际道路测试覆盖典型场景，综合测试自动驾驶系统在真实交通情况下的可用性及安全性，如图 11 所示。

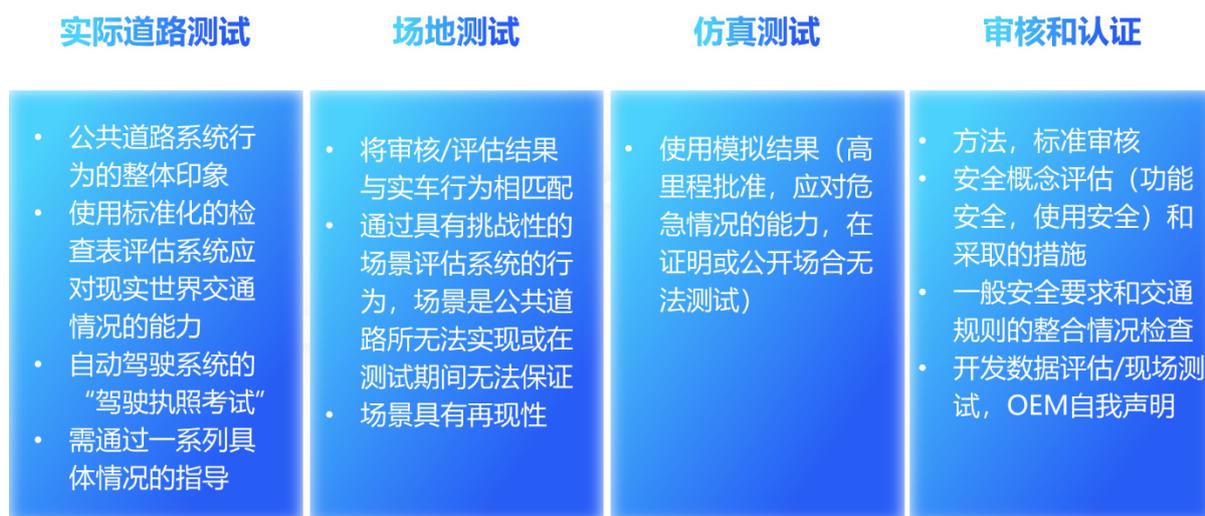


图 11 “多支柱法”自动驾驶测试准则

虚拟仿真测试：

当下，模拟仿真技术已经成为智能网联汽车测试验证的重要手段之一，可以有效地验证自动驾驶算法的功能和效果。根据被测对象的不同，可以使用不同的 XiL (MiL、SiL、HiL、PiL、ViL) 测试方法，但这些方法均对智能网联汽车仿真测试的场景提出了很高的要求。

测试方法首先需要在模拟仿真中建立一个成熟驾驶模型，目前有很多商业化仿真软件（VTD、Prescan、Carmaker 等）中有可以使用的驾驶模型，但均为比较简单的驾驶模型，见表 5。

表 5 不同仿真软件中的驾驶模型

软件	驾驶模型	交通流仿真	特点
Prescan	可配置参数较少	暂不支持	支持道路预瞄
VTD	可配置参数丰富	支持	支持激进、稳妥、谨慎等不同风格的驾驶员参数化配置
Carmaker	驾驶模型模拟准确性较好	支持	支持自适应学习；支持赛车驾驶模型；支持拟人化驾驶模型

Prescan^[12]：包含驾驶模型，支持参数化配置，仅支持驾驶员在环和简易驾驶模型，支持道路预瞄，暂时不支持交通流仿真，如图 12 所示。

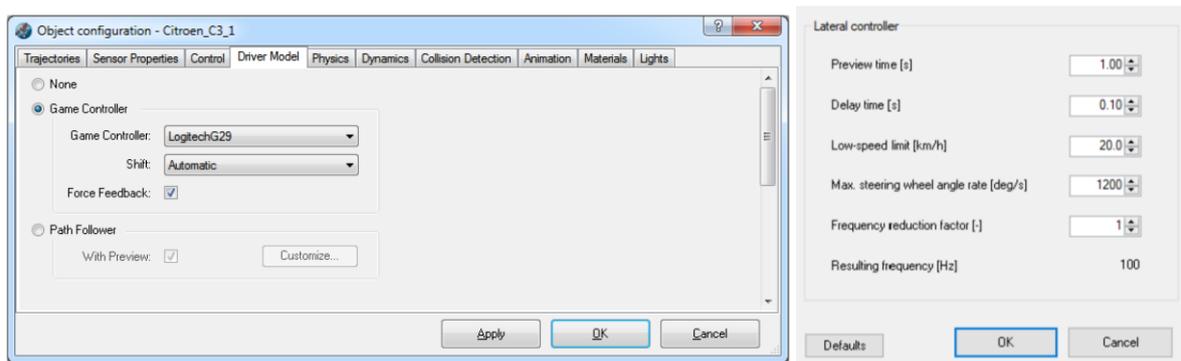


图 12 Prescan 操作界面

VTD^[13]: 驾驶模型丰富, 驾驶员类型较多, 支持交通流仿真, 如图 13 所示。

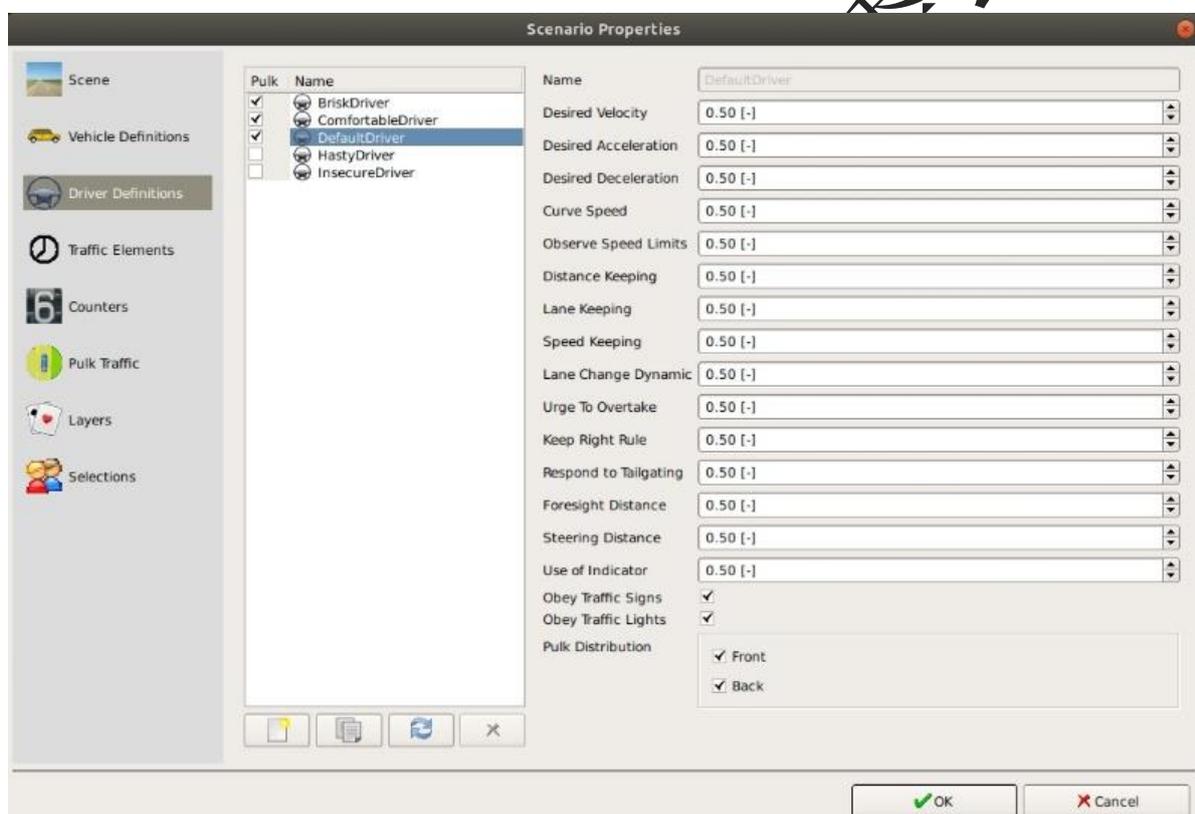


图 13 VTD 操作界面

Carmaker^[14]: IPGDriver 支持转向、刹车、油门、挡位、离合等驾驶员输入, 模型具备自适应学习驾驶员行为特征的能力, 驾驶模型模拟的准确性较好, 支持道路预瞄, 支持配置赛车驾驶模型, 支持交通流仿真, 如

图 14 所示。

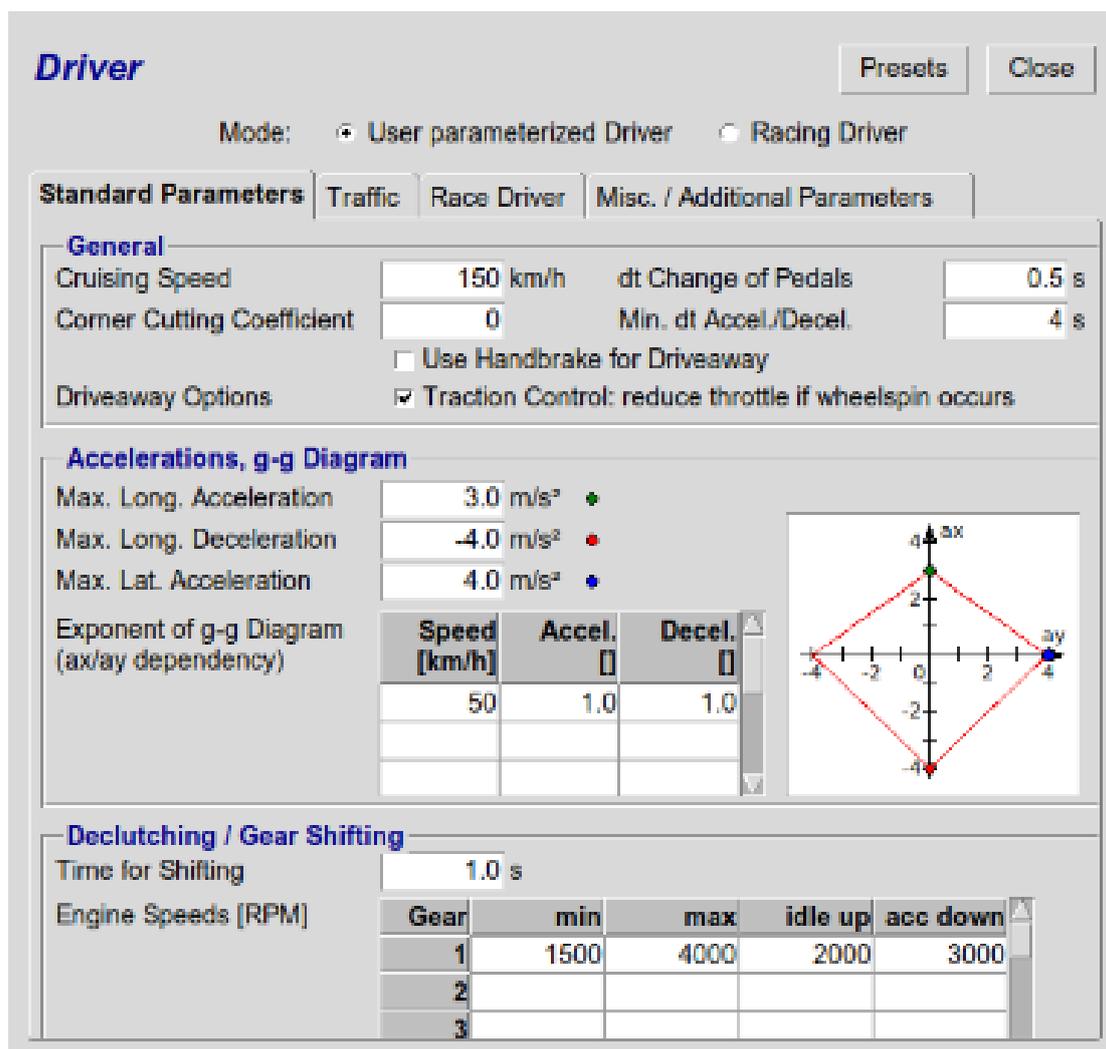


图 14 Carmaker 操作界面

实车测试

近年来国内外关于智能网联汽车开放道路测试的相关标准、法规及政

策见表 6。

表 6 国内外开放道路相关标准、法规及政策

国家	标准、法规及政策名称	标准号	时间
中国	智能网联汽车道路测试与示范应用管理规范（试行）	工信部联通装（2021）97 号	2021.07
	自动驾驶车辆测试安全管理规范	T/CMAA 120-2019	2019.10
	广州市关于智能网联汽车道路测试有关工作的指导意见	穗交规字（2018）19 号	2018.12
德国	自动驾驶法	BGB1. I 2021 S. 3108	2017.05
瑞典	自动驾驶汽车公共道路测试规范	—	2017.05

表 6 国内外开放道路相关标准、法规及政策（续）

国家	标准、法规及政策名称	标准号	时间
美国	联邦自动驾驶汽车政策指南	—	2016.09
日本	自动驾驶道路测试指南	H28.5 警察厅公表	2016.05

在开放道路测试中，通过驾驶员建模，可以对驾驶员的行为和决策进行更深入的理解，从而提高自动驾驶系统的性能和安全性。同时驾驶模型可以帮助自动驾驶系统更好地适应不同的驾驶环境和驾驶风格。例如，在城市道路和高速公路上，驾驶员的驾驶风格会有所不同，驾驶模型可以帮助自动驾驶系统理解这些差异并做出相应的驾驶决策，驾驶模型在测试方面有多方面应用。

1. 驾驶行为预测：成熟驾驶模型通过分析驾驶数据，可以对驾驶行为进行预测。这种预测能力可以帮助自动驾驶车辆更准确地理解和预测其他驾驶员的行为，从而做出更安全、更有效的驾驶决策。

2. 交通场景适应性：实车测试中，成熟驾驶模型可以模拟各种交通场景，如城市道路、高速公路、乡村道路等，并评估自动驾驶车辆在这些场景中的表现。通过这种方式，可以评估自动驾驶车辆的适应性和安全性。

3. 驾驶风格评估：成熟驾驶模型可以分析驾驶数据，评估驾驶员的驾驶风格。这种评估可以帮助自动驾驶车辆更好地理解不同的驾驶风格，从而更好地适应不同的驾驶环境。

4. 安全性能评估：实车测试中，成熟驾驶模型可以评估自动驾驶车辆的安全性能。这种评估可以通过模拟各种危险情况（如碰撞、突然刹车、换道等）来实现，从而帮助自动驾驶车辆更好地应对危险情况。

在 ECE 157 ALKS 的测试中给出了两类成熟驾驶模型在实际场地测试过程中的应用。

在第一类模型中，仅评估通过制动来避免碰撞的能力，首先建立注意力集中的驾驶员在面对紧急情况下的制动性能模型，并将其用作 ALKS 的制动性能模型。该类模型假设驾驶员是可以预测到碰撞风险并施加一定比例的制动力，在这种前提下，第二类性能模型主要包括横向安全检查、纵向安全检查和执行。

第二类性能模型首先进行横向安全检查，如果不存在风险，则无动作；如果存在风险，再进行纵向安全检查，如果不存在风险，则无动作；如果存在风险，则执行相应动作，整个工作流程如图 15 所示。

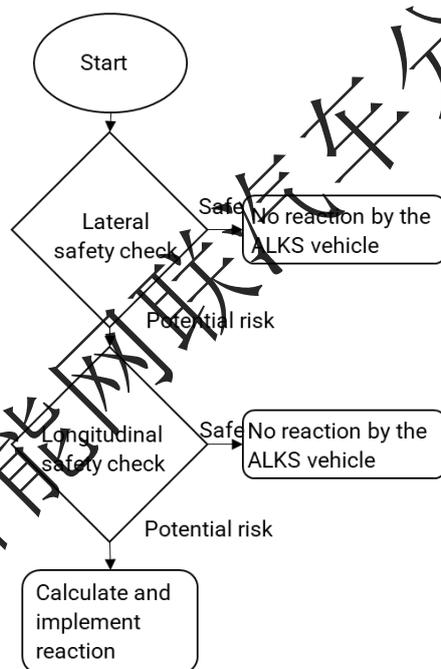


图 15 第二类性能模型工作流程

对于 Cut-in 场景，以下条件满足时，认为横向具有安全风险。

- (1) 在自车前进路线上，其他车辆的尾部位于自车车头的前方；
- (2) 其他车辆正在向 ALKS 车辆靠近；
- (3) ALKS 车辆的纵向行驶速度大于其他车辆的纵向行驶速度。

对于 Cut-in 场景，采用模糊安全替代评价法对纵向安全风险进行评估，

包括主动模糊安全替代评价指标（Proactive Fuzzy Surrogate safety metric, PFS）和临界模糊安全替代评价指标（Critical Fuzzy Surrogate safety metric, CFS），任何一个指标大于 0，则表示纵向存在安全风险。采用上述步骤和方法识别出风险，如果驾驶员此时通过制动能避免碰撞，则被认为也是 ALKS 可以避免碰撞的场景。

2.1.3 分析总结

综上，成熟驾驶模型在产品开发与测试过程各个环节均广泛应用。目前规划控制技术相对成熟，在自动驾驶技术发展过程中旨在模仿人类驾驶员，做出正确的决策，控制车辆，安全、舒适、高效的完成驾驶任务，在环境感知技术越发成熟的条件下，进一步促进驾驶模型在自动驾驶技术中的应用，国内外众多科研机构及主机厂也对驾驶模型研究较为深入，取得了较为广泛的应用，但在产业的快速发展下，智能网联汽车仍然存在诸多安全问题，距离达到 L3 级自动驾驶仍然有一定距离，当前关于驾驶模型在自动驾驶技术中的应用多局限于跟驰与换道行为的拟合刻画，而缺少涵盖自动驾驶安全、舒适、效率的体系化、标准化的研究。

同时，在产品测试过程中，为了有助于对产品进行全面评价，暴露问题，达到减少交通事故，提升驾乘体验，提高交通效率的目的，迫切需要制定一份科学、规范的智能网联汽车成熟驾驶模型标准体系，支撑和配合准入制度的建立和实施，促进智能网联汽车行业发展。

2.2 产品发展现状

在国内外不断演进的产业趋势下，无论是车企还是新兴智能驾驶系统供应商随着智能驾驶方案从 L2+向 L4/L5 的进一步研究。目前，市面上的

智能驾驶功能的汽车仍是以 L1/L2 辅助驾驶功能为主，渗透率 50%以上。预计到 2030 年 L2+级别将扩展到 90%以上，其中 L3 级别以上占到 50%市场份额，截至 2020 年，我国主流车企部分新车已陆续搭载 ICA（智能巡航辅助）、TJA（交通拥堵辅助）、IPA（智能泊车辅助）等 L2 级功能，为下一步高等级自动驾驶功能的实施打下基础。

2.2.1 国内自动驾驶产品发展现状

我国的造车企业从 2020 年底起，陆续推出在高速场景下 L2+点到点的智能领航辅助驾驶功能产品，比如蔚来的 NOP、小鹏的 NGP 以及理想的 NOA。而到了 2021 年底，长城汽车、广汽埃安和领克也推出了高速 NOH、NDA 和 HWC 等高速 NOA 功能，更多车企加入到高速 NOA 的竞速赛之中。虽然车企们推出的高速 NOA 各有名称，但在功能的表现上，趋于同质化。随着近些年高速导航辅助驾驶功能成为主流车企的标配功能后，城市导航辅助驾驶功能逐渐成为研究热点，如图 16 所示。

主机厂	时间	描述
小鹏	2021年1月26日	正式推送高速NGP
	2022年9月27日	广州首发城市NGP (有高精度地图)
	2023年3月31日	G9和P7i Max版车型上城市NGP新增开放广州、深圳、上海三地; 无图城市能够带来红绿灯识别、启停, 以及无车道线的绕行等场景
	2023年	大部分的无图城市都能够有接近城市NGP的能力
	2024	实现全场景 (高速+城区+泊车) 的领航辅助驾驶
蔚来	2020年10月	推送高速领航辅助驾驶NOP
	2023年1月	推送NOP + Beta, 高速领航辅助驾驶体验升级
理想	2021	标配高速NOA
	2022	AD Max 2.0视觉融合Lidar, AD Pro 2.0纯视觉高速NOA
	2023Q2	城市NOA (脱高精度) 内测
	2023年底	城市NOA (脱高精度) 覆盖100城
问界M5智驾版	2023Q2	华为城区NCA落地5城 (有高精度地图)
	2023Q3	华为城区NCA落地15城 (无高精度地图)
	2023Q4	华为城区NCA落地45城 (无高精度地图)
极狐阿尔法S	2022年9月	在深圳开通城市NCA功能
	2023年3月21日	在深圳、上海、广州三城开通城市NCA功能
上汽智己	2023年4月	1.7推送5个城市高速NOA, 年内推广至全国
	2023年内	智己城市NOA领航辅助以及替代高精地图的数据驱动道路环境感知模型公测

图 16 2023 年多家主机厂预计推出城市领航辅助驾驶

此外, 还有许多智能驾驶科技公司发布应用了驾驶模型特点的产品, 具体如下。

元戎启行在 2023 年推出了 DeepRoute-Driver3.0 智能驾驶解决方案, 解绑了对高精度地图的依赖的同时, 仍能保持在复杂路段中拥有老司机般的优异表现。智能车辆在能耗方面相较于人类驾驶的汽车降低了 6.9%, 同时还能提供像成熟驾驶员一样的安全、舒适的驾驶体验。

2022 年, 业内首个搭载领航辅助驾驶功能的燃油车-荣威 RX5 上市, 搭载的驾驶模型用于采集边缘场景下人类驾驶员数据, 保证驾驶数据的逼真度, 还原了人类老司机的驾驶风格, 例如对进出匝道的预处理和自然的交互反馈。换道策略灵活, 成功率高。

华为 ADS 2.0 系统于 2023 年 4 月推出后, 在人工智能训练数据集上不断收集实地驾驶数据, 每天深度学习里程超过 1000 万公里, 能够持续优

化智能驾驶算法和场景应对策略。截至 2023 年 9 月的数据显示，长途 NCA 技术无需人工干预驾驶里程平均达 200 公里，城市高架路段进入和退出成功率高达 99%以上，可靠程度可媲美老司机。

此外，L4 级自动驾驶乘用车 Robotaxi 已经进入了泛化运营阶段，头部企业成功获得了全国不同城市的自动驾驶运营牌照，并在部分城市开始了泛化运营。此外，还可以在有限的城市内体验主驾无安全员的自动驾驶产品服务。各品牌自动驾驶产品见表 7。

表 7 各品牌自动驾驶产品

时间	单位	方案与产品	驾驶模型的应用特点
2019	元戎启行	L4 级别 Robotaxi	通用性
2020	比亚迪	DiTrainer	根据驾驶员水平不同有不同的驾驶体验
2022	地平线	征程 3 的 Pilot3.0 高速 NOA 方案	换道决策
2022	飞凡	RISING PILOT 飞凡全融合高阶智驾	快速反应和安全性
2023	赢彻卡车	卡车自动驾驶的通用智能大模型 TruckGPT	优化驾驶行为
2023	华为问界	AQS 2.0 高阶智驾	可靠性
2023	元戎启行	DeepRoute-Driver3.0 智驾解决方案	提升通行效率及降低能耗
2023	百度	L4 级别 Robotaxi	通用性

2.2.2 国外自动驾驶产品发展现状

国外智能驾驶发展时间较国内更早，以美国为代表，Waymo 刚开始是 Google 于 2009 年开启的一项自动驾驶汽车计划，之后于 2016 年 12 月才从 Google 独立出来，成为 Alphabet 公司旗下的子公司。2017 年 11 月，Waymo 宣布该公司开始在驾驶座上不配置安全驾驶员的情况下测试自动驾驶汽车。2022 年 11 月 11 日消息，自动驾驶公司 Waymo 宣布，将在美国凤凰城市中心向公众开放自动驾驶网约车服务。截止至 2023 年，旧金山十分

之一的汽车是无人驾驶车，Waymo 即将获得全天供车权限。

通用旗下自动驾驶公司 Cruise 于 2022 年宣布，在美国加州部分城市正式开启无人驾驶出租车收费业务。其无人驾驶出租车没有安全员，属于真正意义上的无人驾驶。车辆的传感器采用 360° 视角，对车辆附近行人、建筑、自行车、其他汽车、道路状况等所有信息都具有感知能力，且距离能达到数百米以外。截至 2021 年，Cruise 在旧金山的测试总里程已经超过了 300 万英里（483 万公里）。同时，Cruise 在疫情期间一直在测试食品配送服务，为食品银行提供了超过 100 万份食物。

Tesla 自 2014 年初，其自动驾驶产品自问世以来，一直不断更新迭代，在包括仿真、感知、规划和数据在内的多个领域均取得显著自研成果，构筑特斯拉自动驾驶解决方案的护城河。特斯拉对海量人类驾驶数据进行收集与分析，不断改进其自动驾驶系统的性能。这种基于数据驱动的方法使得特斯拉的自动驾驶系统能够不断学习和优化，提升安全性和性能。因此，马斯克预言未来自动驾驶将比人类驾驶更加安全，甚至安全性提升约为人类驾驶的十倍。

2021 年 12 月 2 日，德国联邦汽车运输管理局（KBA）基于联合国法规 UN-R157 批准梅赛德斯-奔驰 ALKS 认证，在条件适宜、车流密集的高速路段，奔驰智能领航系统可以接管驾驶任务，并以最高 60km/h 的速度行驶；2021 年 3 月，本田 Legend 车型 L3 级自动驾驶功能 TJP 系统获得日本国土交通省的认证，且日本警察厅正在研制 L4 级自动驾驶运营服务许可制度，研究开放第一条 L4 级别自动驾驶应用道路，在人口较少的地区，开展无人驾驶客车巡回运营，各品牌 L4 级自动驾驶方案与产品见表 8。

表 8 各品牌 L4 级自动驾驶方案与产品

时间	单位	方案与产品	驾驶模型的应用特点
2009	Waymo	L4 级别 Robotaxi	通用性
2020	Cruise	L4 级别 Robotaxi	通用性
2021	梅赛德斯-奔驰	推出 L3 级别智驾产品	产品融入驾驶模型相关技术
2021	本田	推出 L3 级别智驾产品	产品融入驾驶模型相关技术
2023	特斯拉	提升 FSD 神经网络学习	持续学习和优化, 提升安全性
2023	宝马	推出 L3 级别智驾产品	产品融入驾驶模型相关技术

2.2.3 分析总结

随着技术的不断进步和完善, 智能驾驶产品的功能也越来越丰富, 目前的智能驾驶产品不仅可以进行基本的路径规划、避障和控制等操作, 还具有包括自适应巡航、自动泊车、自动换道等辅助驾驶功能。同时, 规划、控制、识别和决策等方面也有了较大的提升, 大大增加了智能驾驶产品的稳定性和可靠性。

智能驾驶产业经历了从 2009 年的初步尝试, 到创新起步、高速发展、逐步泛化的各个阶段, 目前已经进入泛化阶段。如图 17 所示。

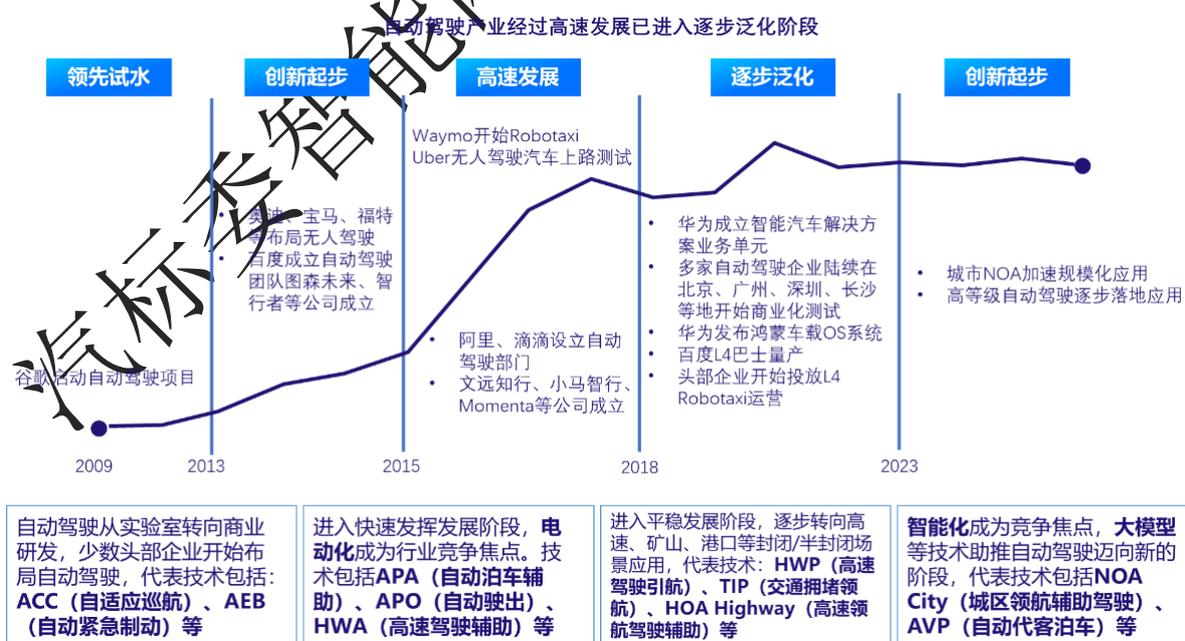


图 17 自动驾驶产业高速发展阶段图

虽然市面上这些已有功能能够很好的做到居中、跟车等能力，但是智能网联汽车仍然存在诸多安全问题，国内已发生多起自动驾驶汽车碰撞事故，如 2021 年 8 月，某电动车厂商于沈海高速追尾前方同车道正在施工作业的轻型货车，造成驾驶人死亡。据美国国家公路交通安全管理局发布数据，截至 2022 年 5 月 15 日，共发生 392 起 L2 级 ADAS 撞车事故，有 6 起死亡事故和 5 起重伤事故。据《自动驾驶汽车交通安全白皮书 2022 版》统计，自动驾驶汽车因自身问题主动碰撞其他道路交通参与者的事故占比为 18.8%，事故主要原因之一为前车突然急减速或在未使用相应指示灯情况下，强制加塞至自动驾驶汽车行驶道路时，自动驾驶汽车难以对目标物种类及不良驾驶行为进行有效分类和识别，从而发生刮蹭事故。

因此，自从自动驾驶汽车产品开始普及，交通事故问题一直伴随人类至今，随着自动驾驶技术的发展，安全类的驾驶行为模型逐步受到关注，因此，如何打造一款用户可以在自动驾驶功能激活后充分信任其能力，接受其能力缺陷，并在自动驾驶系统发出合理接管请求时，无怨言的履行接管义务的产品，我们迫切需要一份安全评价模型，来探寻自动驾驶汽车产品的安全边界，为用户兜底。

第三章 成熟驾驶模型标准化发展现状

3.1 国外标准发展现状

随着自动驾驶技术与产品的发展和應用，安全类成熟驾驶模型的标准也逐渐成为关注的焦点。当前，国外成熟驾驶模型标准化工作主要由国际标准化组织（ISO）和一些国外国家标准化机构制定实施。ISO 及欧盟制定了一系列与自动驾驶技术相关的成熟驾驶模型标准和法规，涵盖了驾驶模型类别、能力要求、适用场景等方面的规范。经过调研，国外涉及到的驾驶模型的标准包括跟驰模型 3 项、换道模型 3 项。

3.1.1 跟驰模型相关标准

在跟驰模型方面，当前国际标准的重点在于系统的自适应巡航功能的要求，包括跟随控制和速度控制等。ISO 15622:2018《智能交通系统自适应巡航控制系统 性能要求和测试程序》标准^[15]中给出的跟随控制部分内容可以提炼出对自动驾驶系统的驾驶模型的设计要求。该标准未涉及具体的跟驰模型，但对跟驰模型的实现和应用提出了一些具体要求和指标，如车速、时距、跟驰要求、横向加速度等。

欧洲经济委员会颁布的 UN-R157（UN Regulation No. 157 Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to Automated Lane Keeping Systems）法规^[16]旨在就关于自动车道保持系统的车辆批准。这些规定涉及跟驰控制算法、车辆间通信、传感器和安全等方面。该标准所采用的评价标准是自动驾驶系统在其运行过程中不能够带来“可避免”的风险（事故），并且满足属地国的交通法规（除需要违规

才可避免发生事故的情况)。上述“可避免”的风险边界需要依据紧急场景下的人类驾驶模型来确认。该法规在附录中定义了熟练且谨慎的人类驾驶员的紧急制动模型，如图 18 所示。

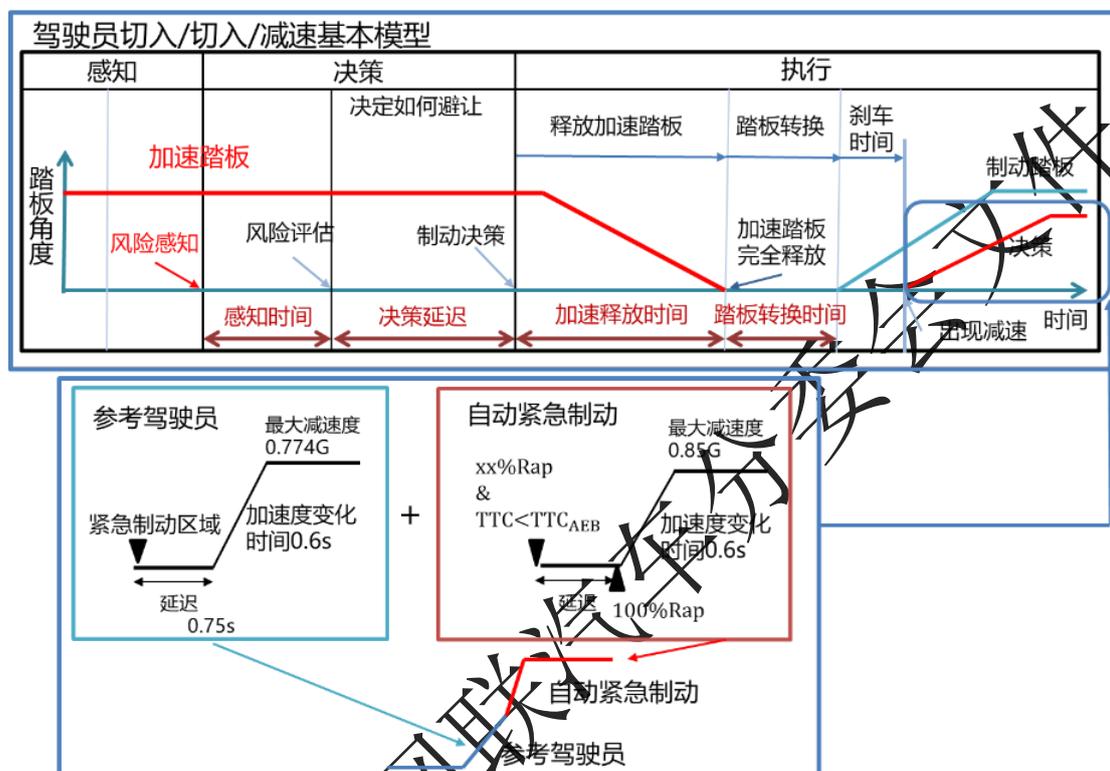


图 18 紧急制动模型

UN-R157 法规附录除了定义了上述紧急制动模型外，还以日本熟练且谨慎的人类驾驶员能力定义了模型的相关参数取值，包括不同场景下的风险出现点（切入场景为切入车辆偏移车道中心线 0.375m，前车制动场景为前车减速度超过 5m/s^2 ），风险评估时间（0.4s），评估完成至开始制动时间（0.75s），制动至最大减速度时间（0.6s）及最大减速度取值（0.774G），见表 9。

表 9 UN-R157 熟练且谨慎驾驶员紧急制动模型参数表

参数		因素
风险感知点	换道（切入、切入）	车辆中心与行车道中心的偏差超过 0.375m
	减速	前车减速比与本车跟车距离
风险评估时间		0.4s

表 9 UN-R157 熟练且谨慎驾驶员紧急制动模型参数表（续）

参数	因素
从完成感知到开始制动的持续时间	0.75s
完全制动的的时间（道路摩擦 1.0）	0.6s 至 0.774G
完全制动的的时间（在自我车辆和切入车辆完全重合后，道路摩擦 1.0）	0.6s 至 0.85G

根据熟练且谨慎驾驶员紧急制动模型，可以确定其在遇到紧急场景时可以避免碰撞的能力边界，并以此作为自动驾驶车辆的能力要求，即自动驾驶车辆应能够避免熟练且谨慎驾驶员能避免的所有碰撞。

此外，BAST 组织专家向欧洲经济委员会提交了 FRAV-89-07 《为避免事故推导可验证性能要求的方法》草案^[17]，提出了三种避免事故的性能要求模型：最迟转向模型、安全区模型及一般驾驶模型，草案中的模型的构建是基于数学模型，缺少实际数据。

3.1.2 换道模型相关标准

在换道模型方面，国际标准关注的重点方向包括警告驾驶员因车道变更操作带来的潜在风险，ISO 17387:2008 《智能交通系统 车道改变辅助决策系统性能要求和试验程序》标准^[18]虽列举了众多场景，同时指定了车速、间距等指标的选取范围，但主要目的是用于对警告发出与否进行测试，暂未明确提出与换道模型相关的测试要求。IEEE 2846-2022 《自动驾驶系统安全相关模型假设标准》^[19]是基于 Mobileye 责任敏感安全模型（RSS）制定的安全标准，RSS 模型规定了人类和自动驾驶汽车在风险和实用性之间寻求平衡而需要做出的各种合理的、可预见的假设。该标准规定了能否换道的纵向和横向条件，缺少换道过程的相关模型。

《UN Regulation No. 79》^[20]旨在规定自动驾驶转向 L3 级以下的功能要求，并对自动驾驶转向的各个方面都做出详细规定。R79 中的功能定义

包含转向纠偏 (Corrective Steering Functions, CSF)、紧急转向 (Emergency Steering Functions, ESF)、A-E 类 ACSF, R79 主要对 A-C 类的 ACSF 功能进行规定和要求, 目前对 D 和 E 类的 ACSF 功能未给出明确要求。

该法规中 A 型 ACSF 主要用于低速或泊车使用, B1 和 B2 型号主要用于车道保持, 而 C 型 ACSF 自动控制转向换道功能明确的描述了换道系统仅允许在无行人和自行车通行, 与对向车道有物理隔离的单向多车道内的情况下开启。系统应仅可在单车道行驶控制处于激活状态时触发换道过程, 在换道过程完成后车辆应自动恢复单车道行驶控制。除了在系统规定的危险场景以外, 还规定了换道过程场景, 具体参数见表 10。

表 10 UN-R79 系统规定的换道过程模型参数表

危险场景判定方法	用换道横向移动开始时刻目标车的距离判定情景是否属于危险情景, 危险情景的距离定义为 $S_{critical}$ v_{rear} 指后方接近车辆的速度或 130km/h (取其中小值) v_{ACSF} 指搭载 ACSF 的主车的真实速度 $a = 3m/s^2$: 后方车辆的减速度 $t_B = 0.4s$: 在本次换道动作开始后, 后方接近车辆的制动反应时间 $t_G = 1s$: 减速后需达到的跟车时距 (THW)	
使用条件	最小探测距离 最小运行速度 v_{simn} (m/s)	使用条件 S_{rear} 是车企声明的最小探测距离 (m) $a = 3m/s^2$: 后方车辆的减速度 $t_B = 0.4s$: 后方接近车辆的制动反应时间 $t_G = 1s$: 减速后需达到的跟车时距 (THW) $v_{app} = 36.1m/s$: 后方车辆以 130km/h 接近时的速度; 若车辆使用国家的最大限速小于 130km/h, 则可以采用该国的最大速度限制作为 v_{app} 。但车辆需搭载可以识别使用地区的装置, 并且有这个国家的速度限制信息。

3.2 国内标准发展现状

3.2.1 跟驰模型相关标准

随着自动驾驶技术的发展和应用, 成熟驾驶模型标准化在中国也日益受到重视。中国标准化机构积极参与国际标准化组织 (ISO) 相关工作

组，并推动制定与成熟驾驶模型相关的国际标准，在成熟驾驶模型标准化方面起到了重要的推动和引领作用。同时，我国还独立制定了适用于中国国内的成熟驾驶模型标准及功能测试要求系列标准，包括跟驰模型 2 项、换道模型 2 项，以此适应国内交通环境和驾驶习惯。我国政府对成熟驾驶模型标准化也给予了重视和支持，政府部门积极组织和推动相关标准的制定和实施，为成熟驾驶模型的发展提供政策支持和指导。

国内车辆跟驰模型标准尚未形成统一的体系，但相关领域的学者和专家对自动驾驶系统跟驰模型提出了一些规范及要求。目前，国内已经根据这些要求建立起了智能网联汽车自适应巡航控制系统的标准体系以及试验要求，即 GB/T 20608-2006《智能运输系统 自适应巡航控制系统 性能要求与检测方法》^[21]与 GB/T 41798-2022《智能网联汽车自动驾驶功能场地试验方法及要求》^[22]。

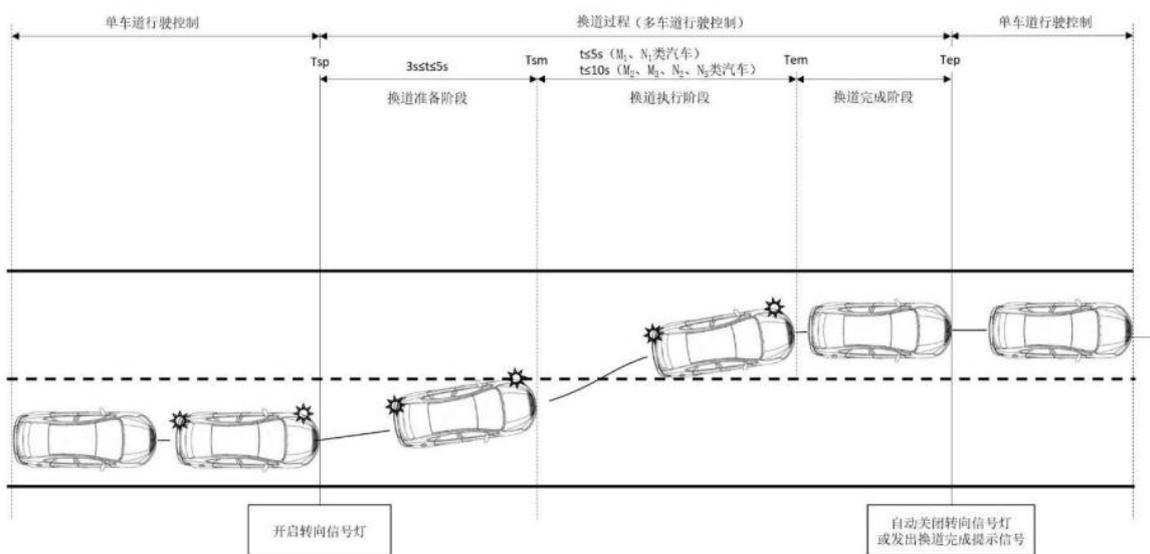
3.2.2 换道模型相关标准

换道模型方面，国内相关领域学者和专家已经开展了一系列的理论研究和实证分析，主要涵盖了城市道路、高速公路和智能交通系统等不同的应用场景。目前，国内已经建立了智能网联汽车换道辅助系统的标准，即 GB/T 37471-2019《智能运输系统 换道决策辅助系统 性能要求与检测方法》^[23]，该标准在制定时参考了 ISO 17387-2008 以及和《智能网联汽车组合驾驶辅助系统技术要求及试验方法 第 2 部分：多车道行驶控制》。

《智能网联汽车组合驾驶辅助系统技术要求及试验方法第 2 部分：多车道行驶控制》中描述了车辆换道系统应该满足的标准。这些规定包含了车道行驶控制系统的一般要求、性能要求和试验方法、车辆的探测响应能

力、不可进行换道的条件等方面内容。该标准所采用的评价标准是避免碰撞风险。除为避免碰撞风险等特殊情况下所采取的安全响应策略外，系统在换道准备阶段和换道执行阶段的横向移动应保持连续。

该法规描述了车辆完成整个换道操作需满足一定的换道时间要求，如图 19 所示。



说明：
 T_{sp} ——触发换道过程时刻；
 T_{sm} ——开始换道执行阶段时刻；
 T_{em} ——结束换道执行阶段时刻；
 T_{ep} ——完成换道过程时刻。

图 19 换道操作要求

该法规除规定了整个换道过程的时间以外，还定义了换道过程触发时刻，试验车辆后向距离相关模型的相关计算方法，在横向和纵向运动的参数见表 11。

表 11 具体场景参数

纵向运动	换道过程触发时刻	<ol style="list-style-type: none"> 1. 后向接近目标车辆的减速度 $3.5m/s^2$; 2. 从试验车辆开始换道准备阶段，到后向接近目标车辆开始减速的时间，$t_1 = 1s$; 3. 后向接近目标车辆减速至与试验车辆相同车速后，两车之间保留的安全距离$[6,12]m$; 4. $V_{VUT}=[10,120]km/h$
------	----------	---

表 11 具体场景参数（续）

纵向运动	在换道过程触发后	<ol style="list-style-type: none"> 1. 在换道过程触发后至换道完成前试验车辆后向距离 [5,12]m; 2. 在换道过程触发后至换道完成前试验车辆和目标车辆应保持的时间间距, $t_R = 1s$; 3. 后向接近目标车辆的减速度, $a_2=3m/s^2$; 4. 从试验车辆开始换道执行阶段, 到后向接近目标车辆开始减速的时间, $t_B = 0.4s$; 5. 后向接近目标车辆减速至与试验车辆相同车速后, 两车之间应保持的时间间距, $t_G = 1s$。
横向运动	直线上的换道执行阶段	车辆的横向加速度应不大于 $1 m/s^2$
	M1 以及 N1 类	最大横向加速度应不大于 $3 m/s^2$, 且横向加速度变化率在任意的 $0.5 s$ 内的平均值应不大于 $5 m/s^3$ 。
	M2、M3、N2 以及 N3 类	换道执行阶段试验车辆的最大横向加速度应不大于 $2.5m/s^2$, 且横向加速度变化率在任意的 $0.5 s$ 内的平均值应不大于 $5m/s^3$ 。

根据该法规的描述, 可以确定在换道过程中的换道时间以及换道过程中与后向车辆之间的安全距离, 并以此作为自动驾驶车辆的距离要求, 即自动驾驶车辆系统后向安全距离内存在其他目标车辆情况下, 系统应采取以避撞为目的的安全响应策略。

3.3 分析总结

在成熟驾驶模型研究方面, 国外标准起步较早, 相对完善, 国内标准虽尚未形成统一体系, 但也有一定成果。

国内标准聚焦于系统的性能和试验方法等方面的研究, 包括跟驰加速度、碰撞预警、速度差等与构建成熟驾驶模型相关的参数要求研究, 对于提高道路安全性, 提升交通安全管理水平具有重要意义, 为开展成熟驾驶模型标准化研究奠定良好的基础, 国内外驾驶模型相关标准见表 12。

表 12 国内外驾驶模型相关标准现状

负责/归口	标准编号	标准名称	阶段	相关模型
ISO/TC 204	ISO 15622	智能交通系统 自适应巡航控制系统性能要求和测试程序	发布	跟驰模型
UNECE	UN-R157	关于自动车道保持系统 (ALKS) 车辆认证的统一规定	发布	跟驰模型 换道模型
UNECE	FRAV-39-07	为避免事故推导可验证性能要求的方法	发布	跟驰模型

表 12 国内外驾驶模型相关标准现状（续）

负责/归口	标准编号	标准名称	阶段	相关模型
ISO/TC 204	ISO 17387	智能交通系统 车道变更决策辅助系统 (LCDAS) 性能要求和测试步骤	发布	换道模型
UNECE	R79	车辆转向设备审批的统一规定	发布	换道模型
IEEE	IEEE 2846	自动驾驶系统安全相关模型假设标准	发布	换道模型
TC268	GB/T 20608-2006	智能运输系统 自适应巡航控制系统 性能要求与检测方法	发布	跟驰模型
TC268	GB/T 37471-2019	智能运输系统 换道决策辅助系统 性能要求与检测方法	发布	换道模型
TC114	GB/T 41798-2022	智能运输系统 自适应巡航控制系统 性能要求与检测方法	发布	跟驰模型
TC114	暂无	智能网联汽车 组合驾驶辅助系统技术要求及试验方法 第 2 部分：多车道行驶控制	正在批准	换道模型

随着自动驾驶技术的发展，对其测试验证的维度主要包括安全性、效率性和舒适性等。其中，安全性是自动驾驶的基石，也是自动驾驶测试验证的重中之重。联合国世界车辆法规协调论坛（WP.29）发布《自动驾驶汽车框架文件》，旨在确立 L3 及更高级别的自动驾驶汽车的安全性和相关原则。其定义的安全原则为自动驾驶汽车在其设计运行范围（ODD）内，不得造成任何合理可预见且可避免的交通伤亡事故。其中“可避免”指的是注意力集中的成熟驾驶员可以避免的碰撞。如果自动驾驶汽车能够在其 ODD 内的合理可预见的场景下，达到注意力集中的成熟驾驶员的避免碰撞的水平，则可判定其满足 WP.29 所定义的安全原则。因此我们需要根据中国注意力集中的成熟驾驶员建立紧急反应模型及数据库，可定义自动驾驶汽车的行为安全能力边界，支撑准入相关标准的制定。

第四章 关键成熟驾驶模型构建方法

4.1 模型概述

目前，成熟驾驶模型研究方向众多，各方学者多年来已有较为深入的研究，在产品开发阶段，驾驶模型参数融合于自动驾驶车辆决策规划控制算法中，目的在于使车辆行为更加类人，保证驾驶安全，被广大用户接受，在产品测试阶段，测试方法与标准中多次出现紧急安全相关的驾驶模型及相关参数，进行产品安全性验证，但是在产品与标准的发展过程中，安全类模型备受关注，标准化可行性最高，应用范围最广，所以构建中国特色的成熟驾驶模型，以及设定符合中国驾驶员习惯及安全性要求的模型参数，成为智能网联汽车进一步发展的必要条件。在此基础上，可以对智能驾驶系统的合规性、安全性、舒适性进行评估，从而构建智能驾驶系统工程落地统一标准。

4.2 模型构建

4.2.1 紧急制动模型

紧急制动模型分为三个区：自由行驶区、匀速区、制动生效区，如图 20 所示。在自由行驶区，驾驶员按照驾驶需求进行驾驶；在风险出现时间点前，进入匀速行驶区，驾驶员进行风险评估、决策反应、脚部迁移、开始踩踏板；在制动生效区，车辆产生明显的制动效果，通过制动效能快速提升后，达到最大。

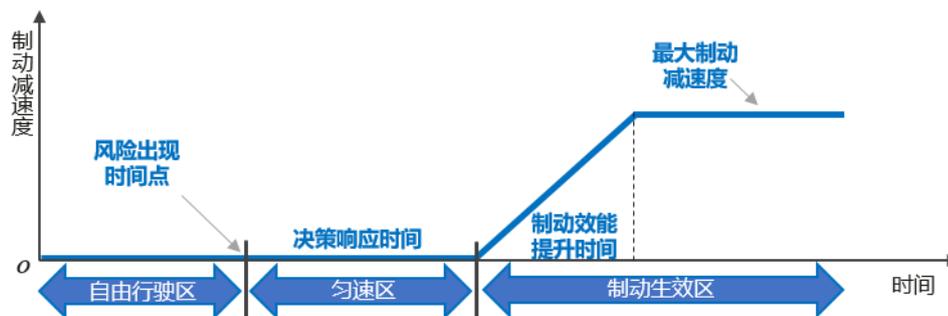


图 20 紧急制动模型

参数定义如下。

最大制动减速度：首先对自车的制动减速度进行平滑及过滤，剔除少数由于碰撞、系统偏移导致的奇异数据点。随后选取最大减速度前、后分别首次大于 -0.1m/s^2 的时间点之间的数据作为有价值的切片数据分析，由于在实车标定过程中，本车制动减速度可能受到噪声干扰，以及在触发 ABS 后，容易出现最大制动减速度降低 $1\sim 2\text{m/s}^2$ 的情况，按如下步骤确定最大制动减速度。

1) 对切片数据中本车制动减速度使用阶数为 6，截止频率为 10Hz 的巴特沃斯滤波器滤波，滤除传感器信号干扰，如图 21 所示。

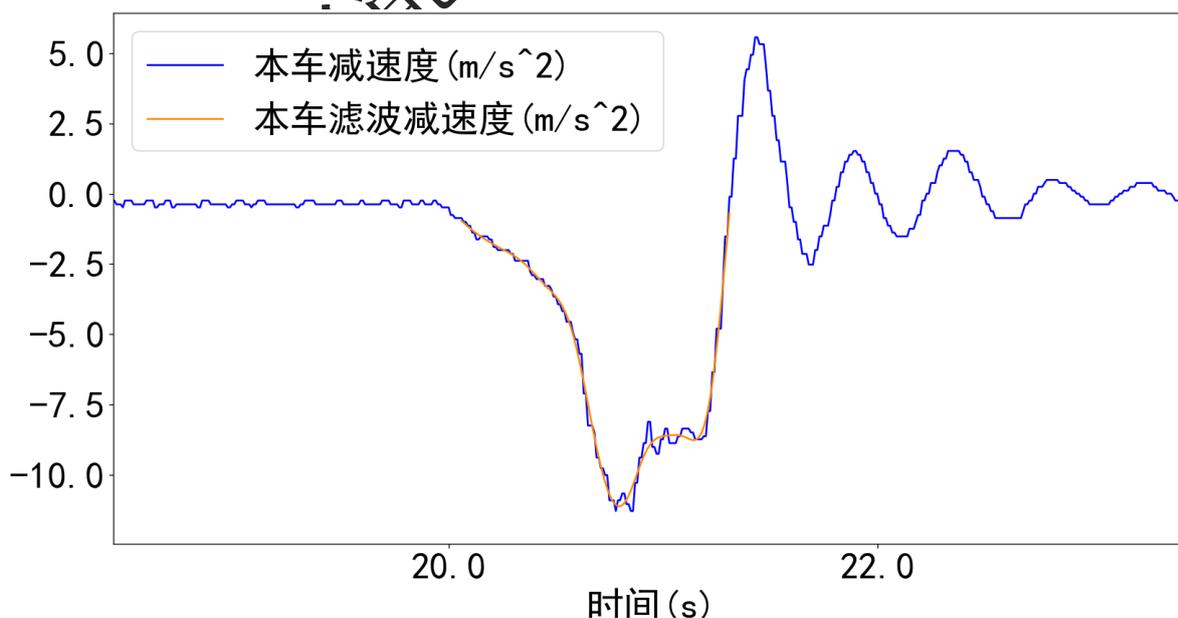


图 21 对本车减速度进行滤波

2) 对所有本车减速度信号切片数据求解微分, 得到所有样本的减速度梯度数列, 对其进行 K-S 检验, 判定是否满足正态分布, 得到结果见表 13。

表 13 K-S 正态分布检验结果

正态性检验分析结果									
名称	样本量	平均值	标准差	偏度	峰度	Kolmogorov-Smirnov 检验		Shapiro-Wilk 检验	
						统计量 D 值	p	统计量 W 值	p
梯度	45803	-0.135	38.782	0.070	3.925	0.208	*	0.826	*
* $p < 0.05$ ** $p < 0.01$									

针对梯度进行正态性检验, 从上表可以看出, 研究数据的样本量大于 50, 因而使用 K-S 检验。具体来看, 梯度全部呈现出显著性 ($p < 0.05$), 但正态性检验通常具有严格的要求, 并且可能无法满足。峰度绝对值小于 10 并且偏度绝对值小于 3, 则说明数据虽然不是绝对正态, 但基本可接受为正态分布, 因此, 使用 Scott 方法确定频次分布直方图的组数, 见图 22, 可得出本车减速度在切片数据内, 存在某一个稳定区间, 减速度达到最大值, 趋于稳定, 直方图组数确定如式 4-1。

$$bin = \frac{\max(values) - \min(values)}{3.5 * \frac{stdev(values)}{\sqrt[3]{n}}} \quad (4-1)$$

其中

values——所有减速度梯度值;

n——样本数量;

最终, 得到组数为 80 的频次分布直方图如图 22 所示。

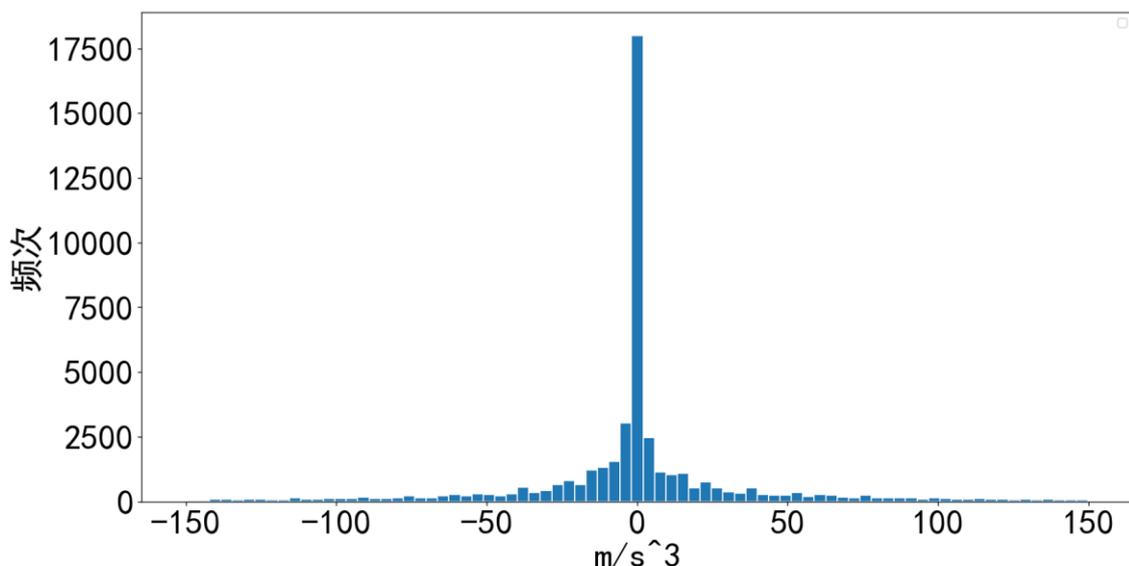
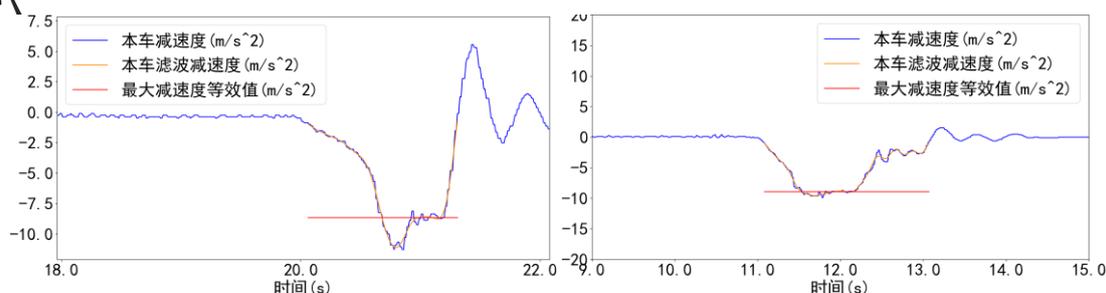


图 22 减速度梯度频次分布直方图

求取该组样本对应的 20%，80%分位数，得到该稳定区间为 $[-19, 10]m/s^3$ 。

3) 设定一个上下限为 $[-19, 10]m/s^3$ 的公差带，从本车制动减速度最大值开始，以 $0.1m/s^3$ 为步长，向上移动，直至此公差带与本车制动减速度无重合，记录每次移动时，落在公差带内的样本点数，求得样本点数最多时的平均值，作为最大制动减速度待取值。

4) 判定此时位于公差带内样本点数量是否超过切片数据的 $1/3$ ，若超过，则以当前值作为最大制动减速度取值，若不足，则选取当前样本点，及小于当前平均值的所有点，再次求平均值，作为最大制动减速度取值。典型结果如图 23 所示。



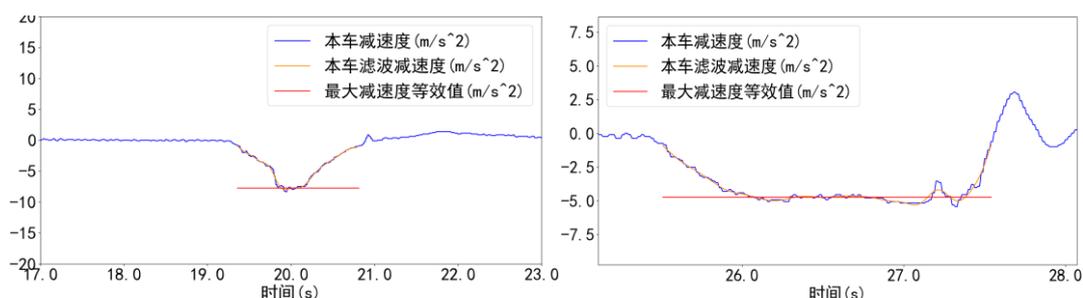


图 23 典型最大制动减速度

制动效能提升时间：选取有价值的切片数据，由于在实际行驶中制动踏板时常会产生轻微扰动，因此在统计中，无法直接寻找第一帧制动减速度不为零的时刻，否则会由于扰动而失准。为解决该问题，本实验通过近似法，假设在制动开始与即将饱和时制动效能提升速率相同，使用较高制动减速度时的时刻反推，以实现鲁棒抗干扰的制动效能提升时间计算，具体如下。找到第一帧制动减速度到达最大制动减速度 10% 的时刻记为 T_{10} ，第一帧制动减速度到达最大制动减速度 15% 的时刻记为 T_{15} ，则近似的制动开始的时刻 T_0 可以计算如式 4-2。

$$T_0 = T_{10} - 2 \times (T_{15} - T_{10}) \quad (4-2)$$

类似地，找到第一帧制动减速度到达最大制动减速度 90% 的时刻记为 T_{90} ，找到第一帧制动减速度到达最大制动减速度 85% 的时刻记为 T_{85} ，则可得到近似的制动饱和时刻 T_{100} 如式 4-3。

$$T_{100} = T_{90} + 2 \times (T_{90} - T_{85}) \quad (4-3)$$

最后，将 T_{100} 减去 T_0 ，得到制动效能提升时间。变化曲线如图 24 所示。

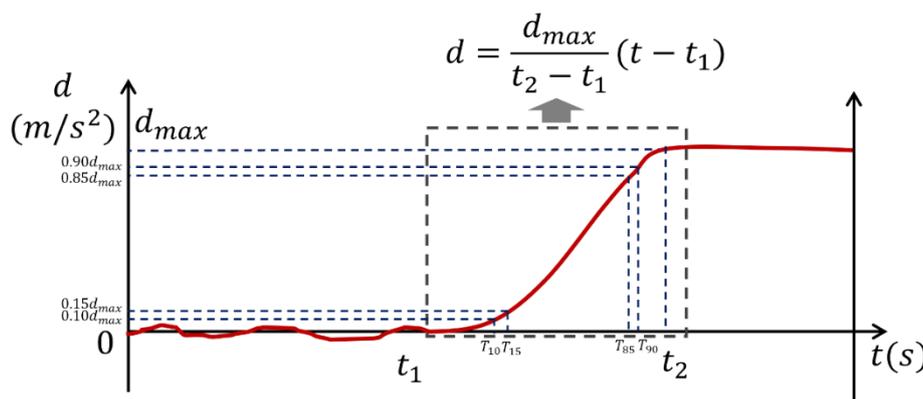


图 24 变化曲线

决策响应时间：风险点出现时间至制动效能提升时间的时间差。

在对每个驾驶员进行相同分析后，对于决策响应时间，选取所有驾驶员数据作为有效数据，应当对每个人数据结果求平均后，再求取所有驾驶员结果的平均值。对于制动效能提升时间与最大制动减速度，剔除发生碰撞的样本后再按上述方法求平均。

4.2.2 紧急转向模型

人类驾驶员在遇到紧急场景时，除了采取制动行为避免碰撞外，还有可能采取转向动作避险。紧急转向模型包括自由行驶区、直线行驶区和正弦转向区，如图 25 所示。在自由行驶区，驾驶员按照驾驶需求进行驾驶，在风险出现时间点后，仍处于直线行驶状态，驾驶员进行风险评估、决策反应、手都开始握紧并转动方向盘，在正弦转向区，方向盘以正弦方式进行转动。

一帧转向角到达最大转向角 20%的时刻记为 t_{20} ，第一帧转向角到达最大转向角 15%的时刻记为 t_{15} ，则近似的转向开始的时刻 t_1 可以计算如式 4-5。

$$t_1 = t_{15} - 2 \times (t_{20} - t_{15}) \quad (4-5)$$

类似地，依据式 4-6 找到第一次方向盘回正的时刻为 t_2 。最后，将 t_2 减去 t_1 得到方向盘回正时间。

$$t_2 = t_{20} + (t_{15} - t_{20}) \quad (4-6)$$

决策响应时间：选取标定的风险开始帧所对应的时间作为风险发生时刻，其标定方法与紧急制动场景相同，定义为 t_0 ，开始转向的时刻与方向盘回正时间中定义相同，最后将 t_1 减去 t_0 得到转向决策响应时间。

在对每个驾驶员进行相同分析后，对于决策响应时间，选取所有驾驶员数据作为有效数据，应当对每个人数据结果求平均后，再求取所有驾驶员结果的平均值。对于方向盘最大转向角与方向盘回正时间，剔除发生碰撞的样本后再按上述方法求平均。

4.3 紧急模型场景提取

关键紧急场景的确定原则可依照 ISO 34502 标准，分析 ODD/ODC 内相关场景空间以识别风险因素，并基于识别出的风险因素确定关键场景。例如，UN R167 中定义的 ODD/ODC，主车设计运行速度为 0-60km/h，道路环境为封闭道路（高速路或城市快速路主路），功能特性为自动车道保持且不涉及主动换道（不涉及匝道汇入或汇出）。

关键紧急场景的确定需要考虑多种维度的场景参数，包括道路环境、交通设施、目标行为、天气条件等。由于不涉及感知系统产生的风险，故只需将场景参数聚焦到目标行为。目标可包括车辆、行人等。若目标为车

辆，则目标行为参数包括主车行为和环境车辆行为。上述 ODD/ODC 下主车行为只包括车道保持。环境车辆的行为包括横向的转向行为和纵向的速度行为，横向的转向行为包括车道保持、切入、切出等，纵向的速度行为包括静止、恒速、加速、减速等。另外，在相同的环境车辆行为条件下，由于其处于主车不同的位置处，是否会产生风险及产生的风险类别都是不同的，故风险场景的确定还需考虑环境车辆与主车的位置关系。环境车辆的位置如图 26 所示，数字“1”-“8”标号位置是主车周围的环境车辆和主车所有可能的位置关系，“+1”、“+2”、“+3”标号位置是“1”、“2”、“3”处环境车辆前方存在的另外环境车辆。如图 26 所示，前车切出、前车制动与邻车切入均会产生风险。

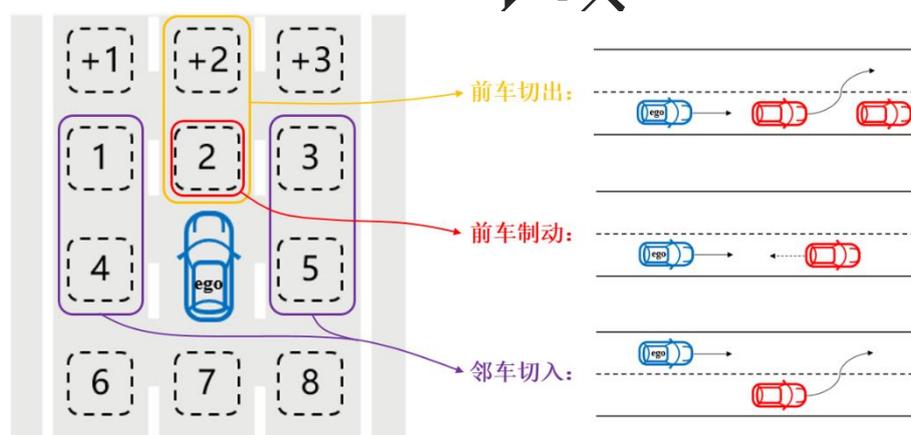


图 26 环境车辆的位置

通过遍历主车行为、环境车辆行为和环境车辆位置可以确定出紧急场景，如表 14 所示。取风险程度最高或最典型的风险场景作为关键风险场景。例如切入场景中以低速恒速切入风险程度最高最典型。最终确定的关键风险场景包括邻车低速切入、前方车辆切出后存在静止车辆、前方车辆紧急制动。这些也是现实交通中高频发生且高频事故的场景。

表 14 环境车辆位置与行为风险因素表

	环境车辆行为												
	转向行为	车道保持				切入				切出			
	速度行为	静止	恒速	加速	减速	静止	恒速	加速	减速	前车恒速（典型）			
										前前静止	前前恒速	前前加速	前前减速
环境车辆位置	1	-	-	-	-	-	●	○	○	-	-	-	-
	2	○	○	○	●	-	-	-	-	●	○	○	○
	3	-	-	-	-	-	●	○	○	-	-	-	-
	4	-	-	-	-	-	●	○	○	-	-	-	-
	5	-	-	-	-	-	●	○	○	-	-	-	-
	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

(○代表风险场景，●代表关键风险场景)

据此，确定紧急制动模型及紧急转向模型的实车参数标定工况如下。

紧急制动工况：在直道内 VUT 跟随 GVT 匀速行驶，GVT 急减速至停车，试验场景如图 27，工况见表 15。

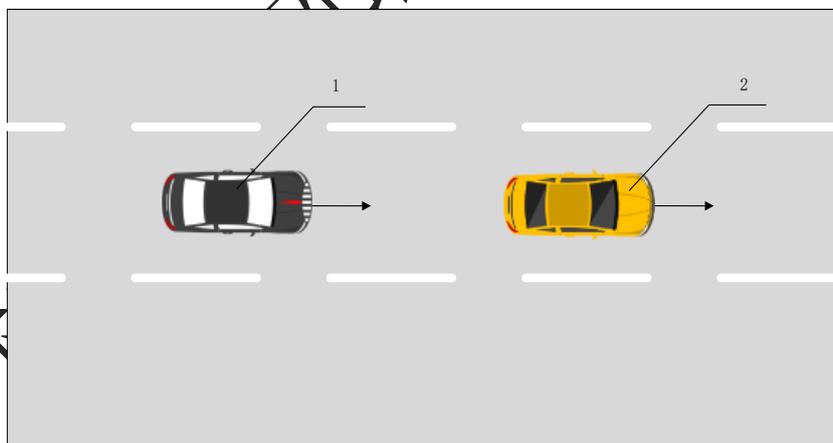


图 27 试验场景

标引序号说明：

- 1——VUT；
- 2——GVT。

通过对一汽集团 100000 千米自然驾驶场景抽取的跟车场景测试用例中，

本车跟随车速包括 10、20、30、40、60、95、120km/h，因受现有技术及场地限制及目前智能网联汽车 AEB 最大速度降，并考虑选取相对紧急的工况，因此，选取 40、50、60km/h 三个车速进行标定。

表 15 紧急制动测试用例表

序号	VUT 初始车速 km/h	GVT 初始车速 km/h	GVT 开始制动时，后保中心与 VUT 前保中心的纵向距离 m	GVT 最大制动减速度 m/s^2	工况来源
1	40	40	22.2	-6	ADAS 紧急工况
2	50	50	12	-6	CNCAP-CCRB
3	60	60	33.3	-6	ADAS 紧急工况

该工况风险出现时间为前车制动减速度首次达到 $-5m/s^2$ 对应时间点。

典型提取结果如图 28、图 29 所示。

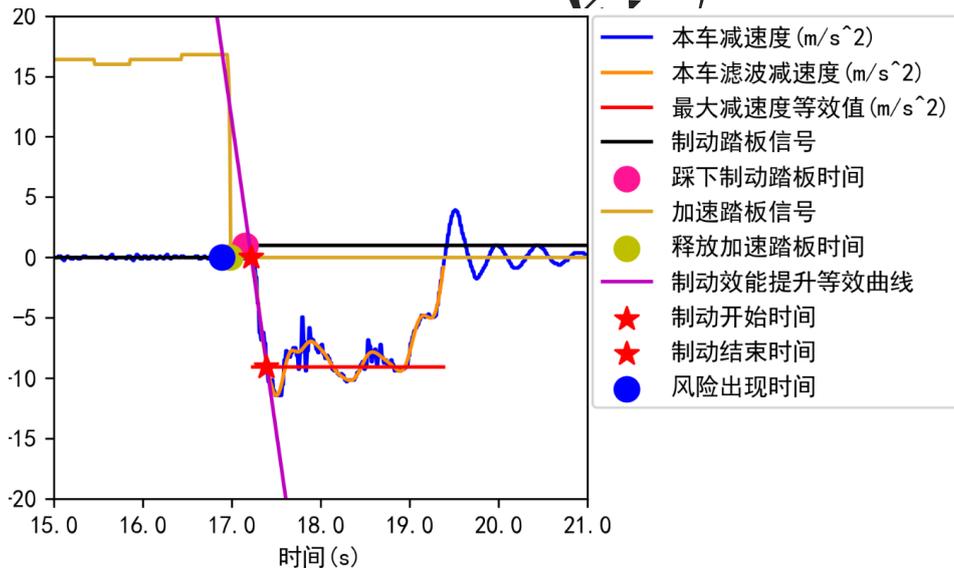


图 28 制动模型典型制动工况提取结果

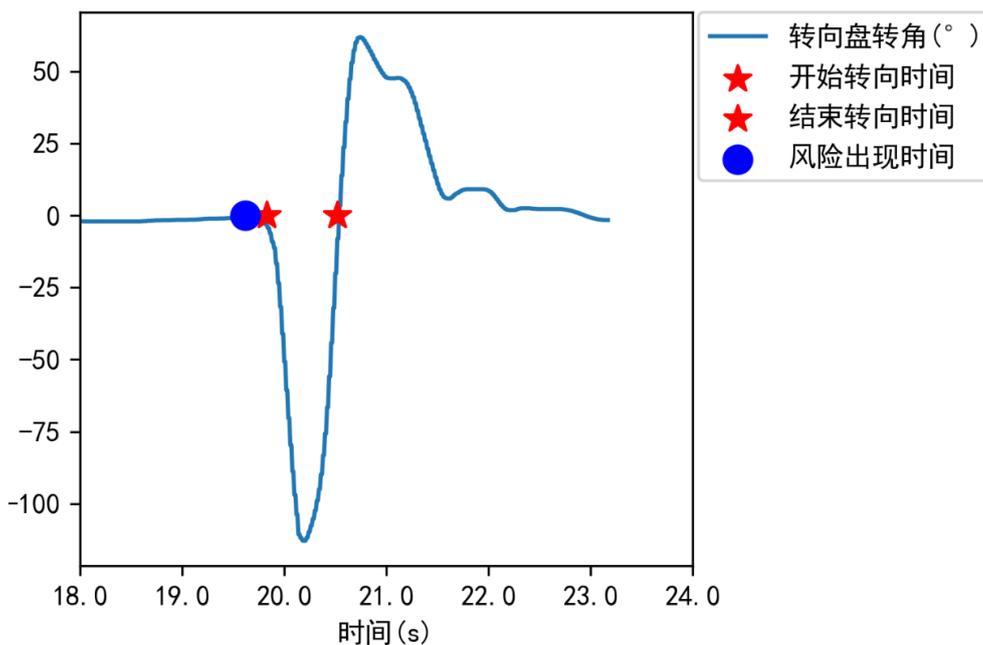


图 29 转向模型典型制动工况提取结果

紧急切入工况：在直道内 VUT 跟随匀速行驶，相邻车道 GVT 并入到 VUT 前方行驶，试验场景如图 30 所示，试验工况见表 16。

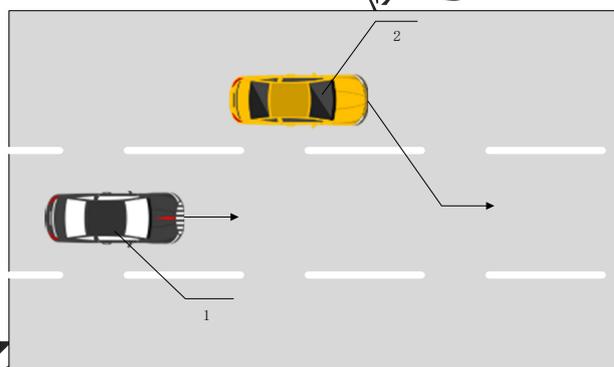


图 30 试验场景

标识序号说明：

1——VUT；

2——GVT；

通过对一汽集团 100000 千米自然驾驶场景抽取的切入场景测试用例中，本车车速包括 15、25、30、40、45、50、70、85、90、100、110、120km/h，因受现有技术及场地限制及目前智能网联汽车 AEB 最大速度降，

并考虑选取相对紧急的工况，因此，选取 30、40、50、70km/h 四个车速进行标定。

表 16 紧急切入测试用例表

VUT 车速 km/h	GVT 行驶速度 km/h	GVT 在相邻车道内的位置	GVT 开始换道时与 VUT 纵向距离 m	GVT 开始切入时，车辆最左侧边缘与 VUT 最右侧边缘横向距离 M	GVT 换道方向	GVT 横向速度 m/s	场景来源
30	15	右侧	0~9	1.6	向右	0.7	ADAS 紧急工况
40	5		0~25			0.7	ADAS 紧急工况
50	30		0~25			0.9	AEB CCR1cg
70	45		0~16			1	ADAS 紧急工况

由于驾驶员在看到切入车辆车头开始切入时，就会产生制动反应，因此，该工况对应风险出现时间点为目标车右前车轮首次横向偏移行驶轨迹 0.380m 时对应的时刻。典型提取结果如图 31、图 32 所示。

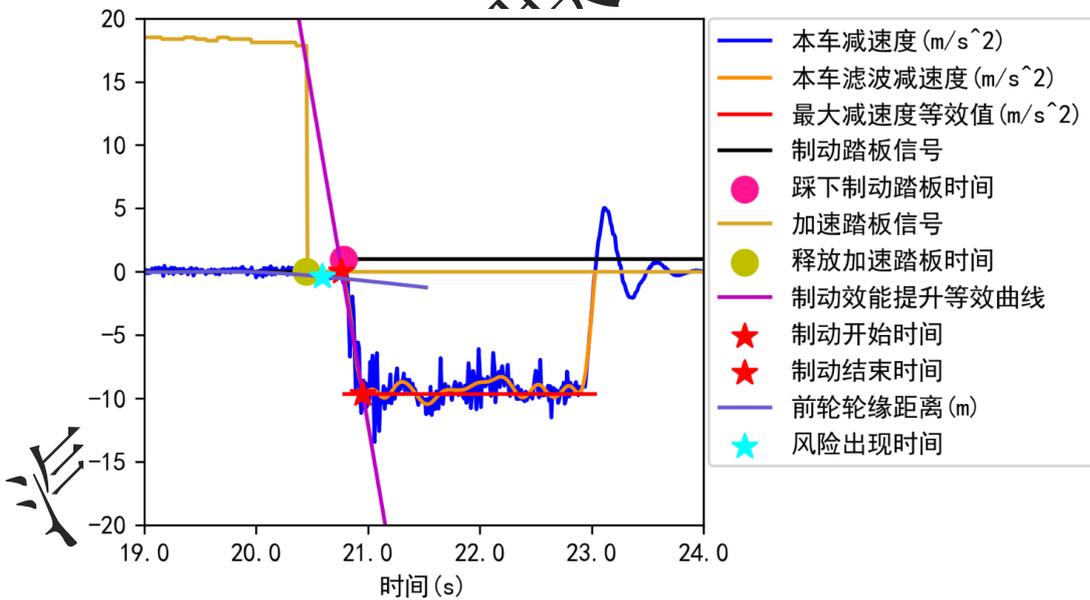


图 31 制动模型典型切入工况提取结果

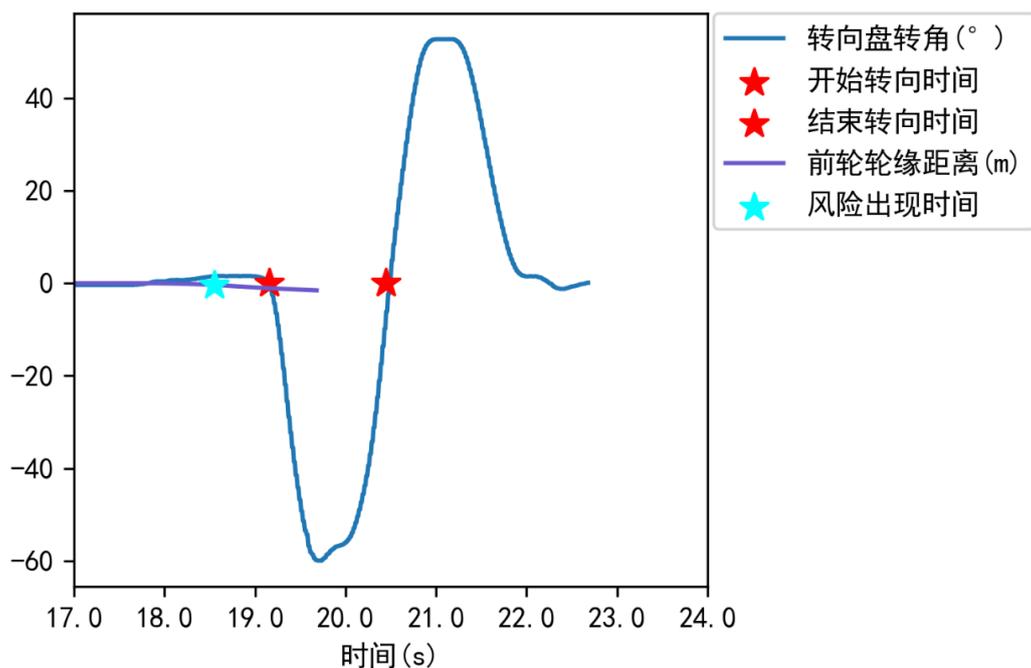


图 32 转向模型典型切入工况提取结果

切出后遇静止前车工况：在直道内 VUT 跟随 GVT₁ 行驶，所在车道前方有静止 GVT₂，GVT₁ 驶离本车道，试验场景如图 33 所示，试验工况见表 17。

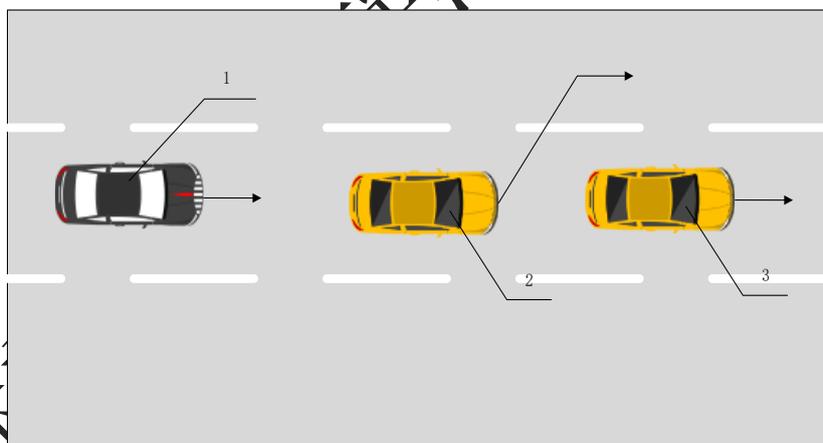


图 33 试验场景

标引序号说明：

1——VUT；

2——GVT₁；

3——GVT₂。

通过对一汽集团 100000 千米自然驾驶场景抽取的切出后遇到静止车场

景测试用例中，本车车速包括 15、25、30、40、50、60km/h，考虑选取符合目前市面智能网联汽车最低激活车速工况，因此，选取 30、40、50、60km/h 四个车速进行标定。

表 17 GVT 驶离试验工况

VUT 跟随 GVT ₁ 距离 m	GVT ₁ 行驶速度 km/h	GVT ₁ 开始换道时与 GVT ₂ 纵向距离 m	GVT ₁ 换道方向	GVT ₁ 横向速度 m/s	GVT ₁ 速度稳定时与 GVT ₂ 距离 m	场景来源
16.6	30	≤6	向右	0.9	>30	AEB CCR1cs
22.2	40	≤6	向右	0.9	>50	ADAS 紧急场景
27.7	50	≤6	向右	0.8	>80	ADAS 紧急场景
33.3	60	≤6	向右	0.8	>20	AEB CCR1cs

尽管理论上风险车辆（即前前车）在暴露一条边时就可以被直接观测，然而考虑到驾驶员对于物体的感知能力是有限的，过于小的物体并无法激活足够的认知活性，因此需要将风险产生的时间点延后。因此，为了便于计算，该工况的风险出现时间点为当前车车辆后保边缘横向位移超过前前车车宽的 1/4 时对应时刻。典型提取结果如图 34、图 35 所示。

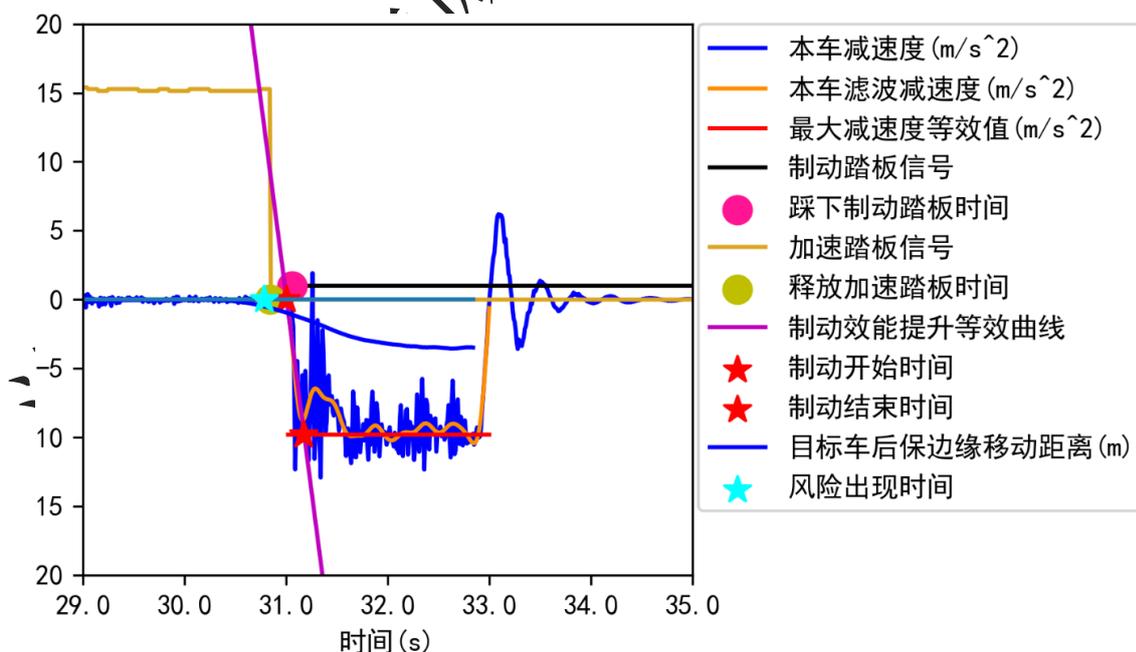


图 34 制动模型典型提取结果

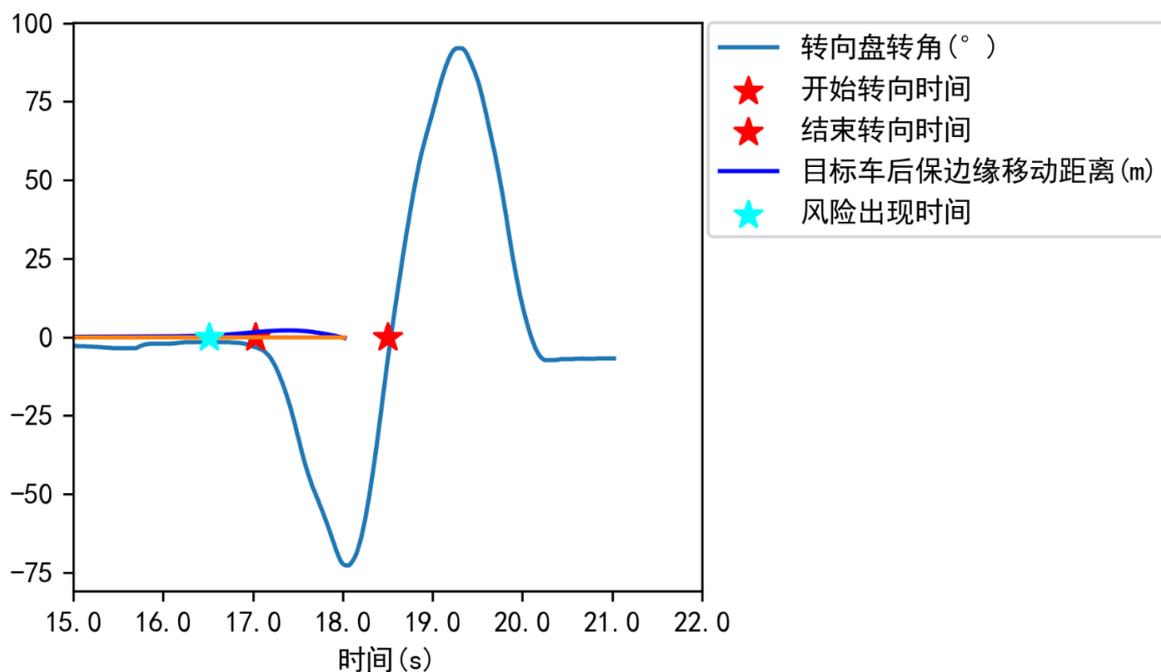


图 35 转向模型典型提取结果

由于实车场地标定工况的单一性，考虑驾驶员会对目标车辆产生预警心理，导致决策响应时间不准确，因此对于虚拟仿真参数标定工况，增加交通流测试工况，对于风险出现时间点的定义相同。

紧急制动工况：自车在中间车道行驶，初始位置与前车距离 60 米。左侧车道存在连续车流，车流速度设定为 60km/h。自车与前车车速维持在约 60km/h。自车稳定跟随前车行驶一段时间。当前车到达预设地点时，前车以最大制动压力制动至静止，如图 37 所示。典型提取结果如图 36 所示。

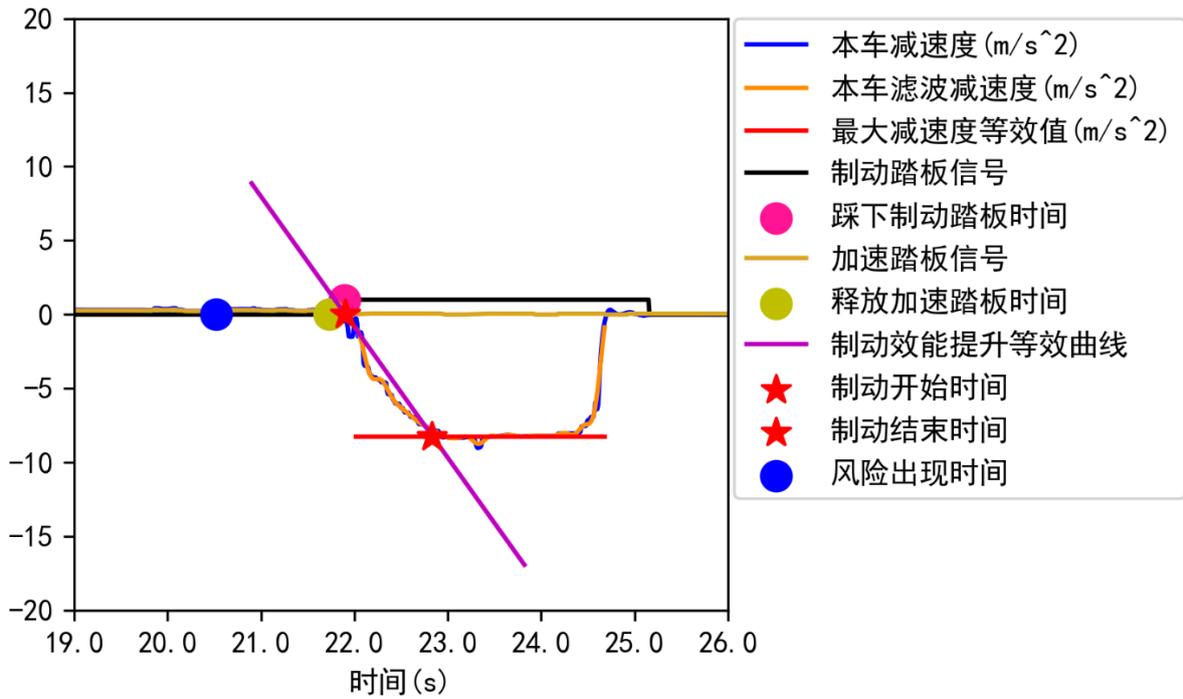


图 36 制动模型典型提取结果

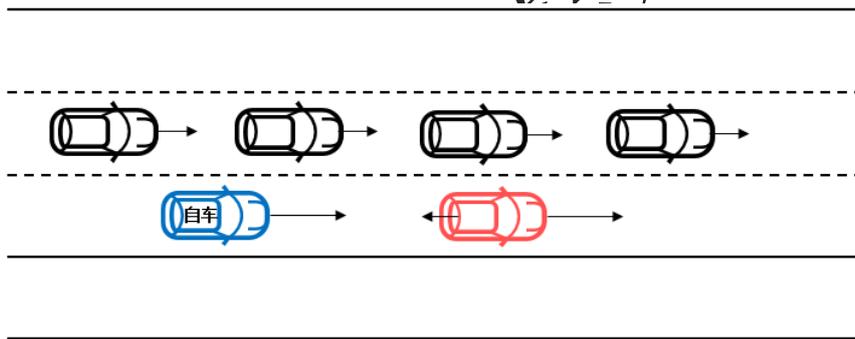


图 37 前车紧急制动场景示意图

紧急切入工况：自车在中间车道行驶，初始位置与前车距离 60 米。左侧车道存在连续车流，车流速度设定为 40km/h。自车与前车车速维持在约 60km/h，自车从车流末尾开始逐渐超越左侧车辆，稳定跟随前车行驶。当自车与车流中切入车辆的纵向 TTC 达到预设值时，切入车辆紧急切入自车车道，换道时长 1 秒，如图 39 所示，典型提取结果如图 38 所示。

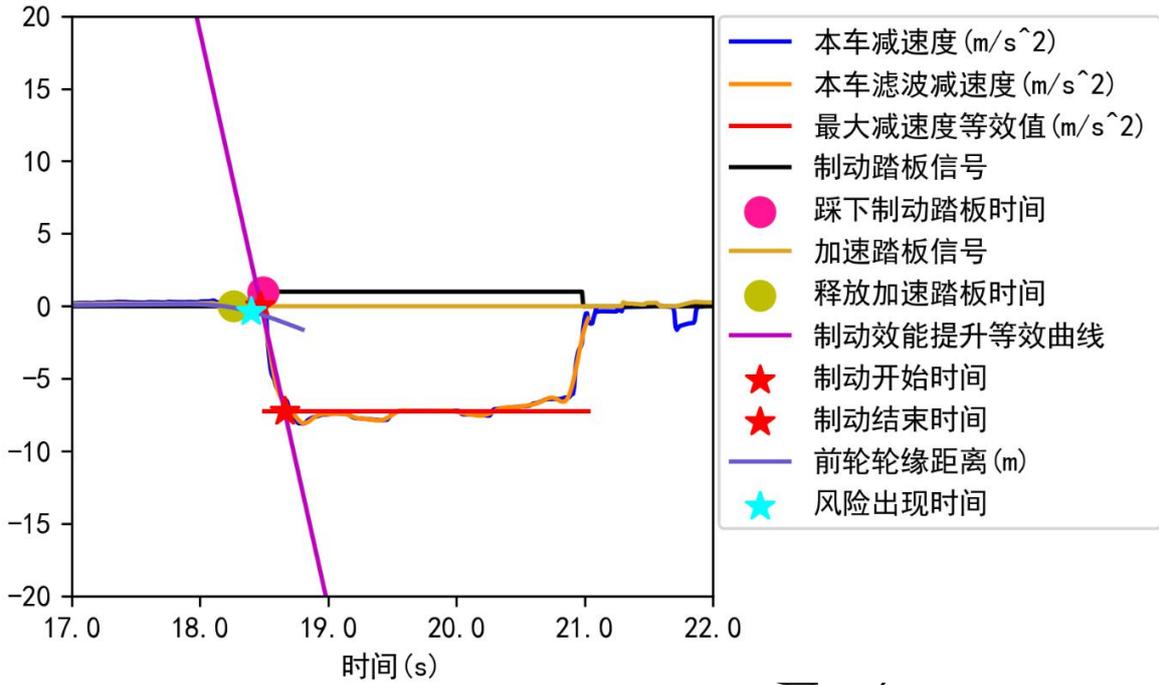


图 38 制动模型典型提取结果

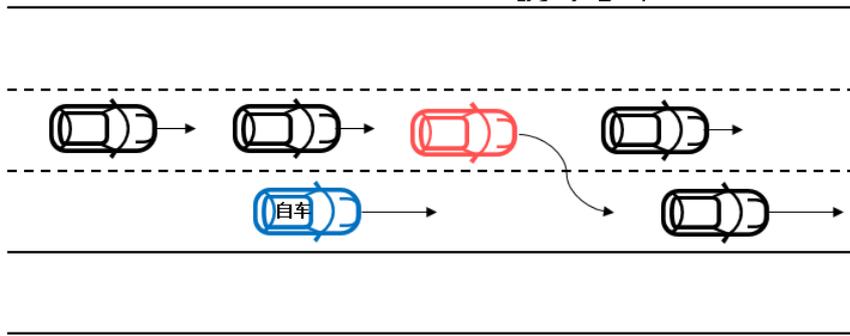


图 39 邻车低速紧急切入场景示意图

切出后遇静止前车工况：自车在中间车道行驶，初始位置与前车距离 60 米。左侧车道存在连续车流，车流速度设定为 40km/h。自车与前车车速维持在约 60km/h。自车的前前车为停止在中间车道的静态障碍车辆。自车逐渐超越左侧车流，稳定跟随前车行驶。当前车与前前车之间的距离达到预设值时，前车切出至右侧应急车道，切出时长 1 秒，如图 41 所示。典型提取结果如图 40 所示。

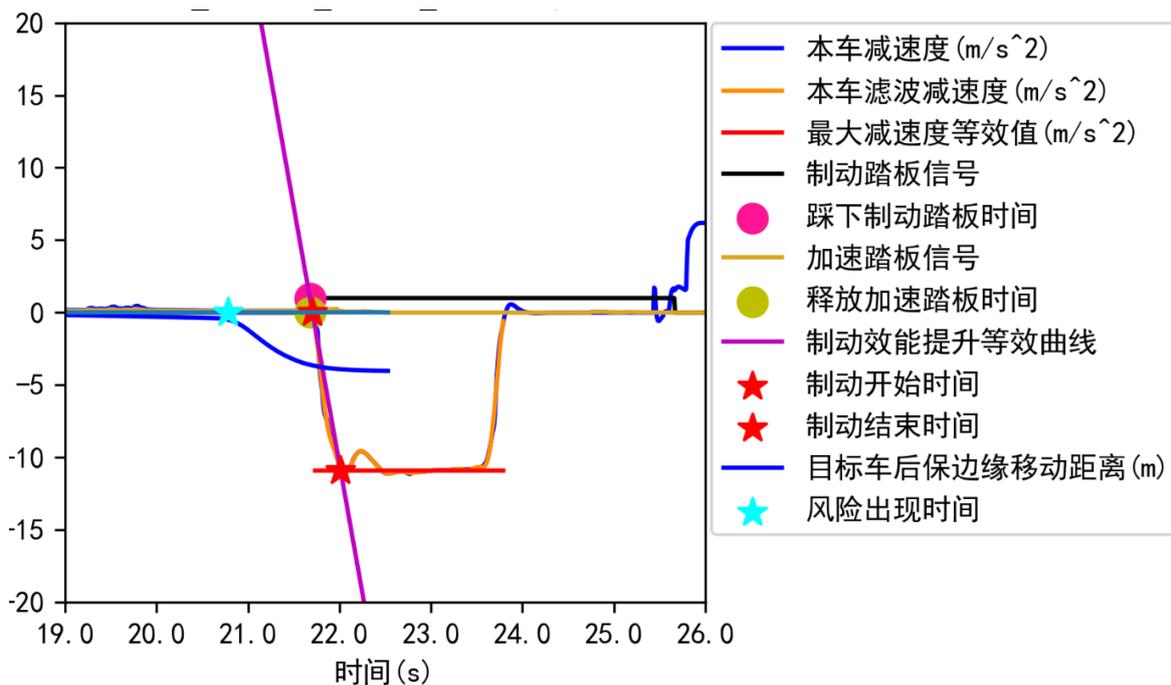


图 40 典型提取结果

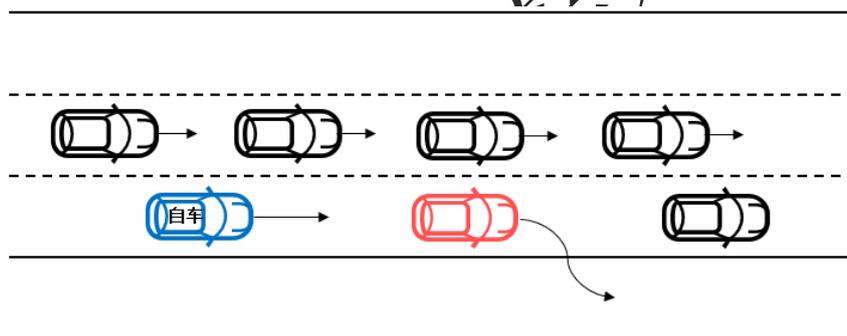


图 41 前车紧急切出后遇静止车场景示意图

受试人员应至少 15-20 人，均为驾龄 10 年以上，驾驶里程超过 30000km，年龄、职业、婚否，驾驶风格为包含激进、一般和柔和三种类型，判断为、反应力较佳的成熟驾驶员。

4.4 验证分析

本轮制动模型标定共采集 53 位驾驶员，342 个测试用例结果，其中，仿真标定测试用例结果 68 个，实车标定测试用例结果 274 个，见表 18。

表 18 制动模型标定工况

标定方式	场景类别	测试用例结果	汇总
仿真	切出后遇静止前车工况	21	68
	紧急切入工况	24	
	紧急制动工况	23	
实车	切出后遇静止前车工况	63	274
	紧急切入工况	119	
	紧急制动工况	92	

制动模型标定结果计算结果见表 19。

表 19 制动模型标定结果

标定方式	场景类别	反应时间 (s)	制动效能提升时间 (s)	最大制动减速度 (m/s^2)
仿真	切出后遇静止前车工况	1.29	0.54	-9.00
	紧急切入工况	1.06	0.56	-8.45
	紧急制动工况	1.30	0.79	-7.50
汇总平均值		1.22	0.64	-8.32
实车	切出后遇静止前车工况	0.13	0.51	-7.93
	紧急切入工况	0.11	0.47	-7.80
	紧急制动工况	0.26	0.45	-8.52
汇总平均值		0.17	0.48	-8.08
UN-R157 结果		1.15	0.6	-7.59

由于场地当中进行的紧急制动工况驾驶员对其有一定的预判，因此导致决策响应时间偏短，与仿真标定以及公开数据集分析统计结果存在差异，并且仿真标定过程中，车辆参数取值多样性较差，对环境模拟存在一定偏差，因此，最大制动减速度与制动效能提升时间实车标定结果可信度较高。

本轮转向模型标定共采集 53 位驾驶员，129 个测试用例结果，其中，仿真标定测试用例结果 67 个，实车标定测试用例结果 62 个，见表 20。

表 20 转向模型标定工况

标定方式	场景类别	测试用例结果	汇总
仿真	切出后遇静止前车工况	27	67
	紧急切入工况	20	
	紧急制动工况	20	
实车	切出后遇静止前车工况	22	62
	紧急切入工况	23	
	紧急制动工况	17	

右转向避撞标定结果见表 21。

表 21 右转向避撞标定结果

标定方式	场景类别	决策响应时间 (s)	转向盘回正时间 (s)	转向盘最大转角 (°)
仿真	切出后遇静止前车工况	0.99	1.60	-35
	紧急切入工况	0.56	1.61	-57
	紧急制动工况	1.18	2.37	-45
汇总平均值		0.91	1.86	-46
实车	切出后遇静止前车工况	0.51	1.58	-54
	紧急切入工况	0.50	1.17	-94
	紧急制动工况	0.10	0.71	-140
汇总平均值		0.37	1.15	-96

4.5 分析总结

综上，具有中国特色的成熟驾驶员紧急制动模型中，由于实车场地测试时，采用假车进行试验，因此，导致驾驶员提前预警，使得决策响应时间较仿真标定结果短 1.05s，同时由于实车标定过程中缺少交通流干扰，会对驾驶员注意力控制，肌肉控制产生影响，而仿真标定中车辆参数、静态环境参数偏理论化，与实际情况存在差异，进而影响最终的制动效能提升时间与最大制动减速度，导致二者结果产生差异。实车标定中，制动效能提升时间与最大制动减速度较仿真结果更为真实可信，同时交通流干扰的缺失，可理解为驾驶员注意力更加集中，因此可应用于表征人类驾驶员的安全边界。

紧急转向模型中，驾驶员决策响应时间与紧急制动模型工况影响因素类似，采用仿真标定结果，同样的由于实车特性，转向盘最大转角以及转向盘回正时间较仿真结果更为可信。

最终确定的紧急制动模型与紧急转向模型结果见表 22、表 23，同时，把主车车速选定，采用二维图表征前车切出后遇静止车辆、邻车切入、前车制动工况的场景参数全集和筛选出的合理可预见参数集合，见附录 A。

表 22 中国成熟驾驶员紧急制动模型参数标定结果

场景类别	成熟驾驶员紧急制动模型参数		
	决策响应时间 (s)	制动效能提升时间 (s)	最大制动减速度 (m/s^2)
前车切出后遇静止车辆	1.29	0.51	-7.93
邻车切入	1.06	0.47	-7.80
前车制动	1.30	0.45	-8.52

表 23 中国成熟驾驶员紧急转向模型参数标定结果

场景类别	成熟驾驶员紧急转向模型参数		
	右转避撞		
场景类别	决策响应时间 (s)	方向盘回正时间 (s)	方向盘最大转角 ($^{\circ}$)
前车切出后遇静止车辆	0.99	1.58	-54
邻车切入	0.56	1.17	-94
前车制动	1.18	0.71	-140

汽标委智能网联汽车分会

第五章 成熟驾驶模型标准化展望与建议

5.1 体系标准化建议

本书重点研究了成熟驾驶模型中的紧急制动模型与紧急转向模型，以探寻中国成熟驾驶员紧急工况下的安全边界，用以评价自动驾驶汽车安全性，但是随着自动驾驶技术的发展，自动驾驶已到商业化前夕，用户不会为了安全的单一要素买单，必须同时做到舒适及效率，因此本书根据前四章研究结果，提出一套以安全性为基础，兼顾舒适、效率的成熟驾驶模型的标准化框架，见图 42。

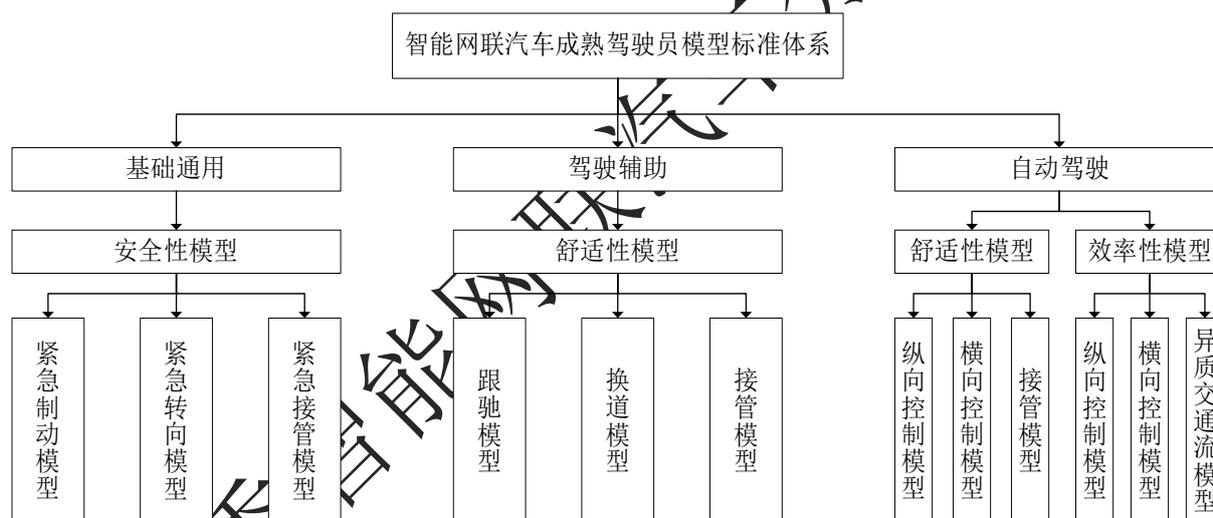


图 42 智能网联汽车的成熟驾驶模型标准化框架

在该框架下，以安全性驾驶模型为通用基础模型，并依据中华人民共和国工业和信息化部提出的汽车驾驶自动化分级，在 L2 及以下的驾驶辅助级别，增加舒适性驾驶模型要求，在 L3 及以上辅助级别，应依据产品 ODD/ODC，逐步扩展跟驰模型到纵向控制驾驶模型，换道模型到横向控制驾驶模型，并同时兼顾交通效率，考虑异质交通流模型。

标准制定路线图是基于基础通用先行、产业需求先行、法律法规支撑

的原则，部分标准可以根据指定实际情况进行拆分和合并，同时参考技术实际发展状态，实时优化标准体系。

第一阶段，开展基础通用，安全性驾驶模型标准化工作，包括紧急制动模型，紧急转向模型与紧急接管模型标准化；

第二阶段，开展舒适性驾驶模型标准化工作，包括跟驰、换道、接管模型；

第三阶段，根据自动驾驶技术演进和产品发展情况，适时开展横纵向控制类驾驶模型与异质交通流模型研究。

通过实践成熟驾驶模型及参数的确定过程，建议智能网联汽车的成熟驾驶模型标准化范围应包括模型定义、测试场景及测试方法等方面。其中，模型定义方面需要标准化成熟驾驶员的定义、成熟驾驶模型的定义及模型参数的定义等。测试场景方面需要标准化场景的类型及参数，测试方法方面需要标准化测试设备、测试流程、数据记录及数据处理算法等，如图 43 所示。

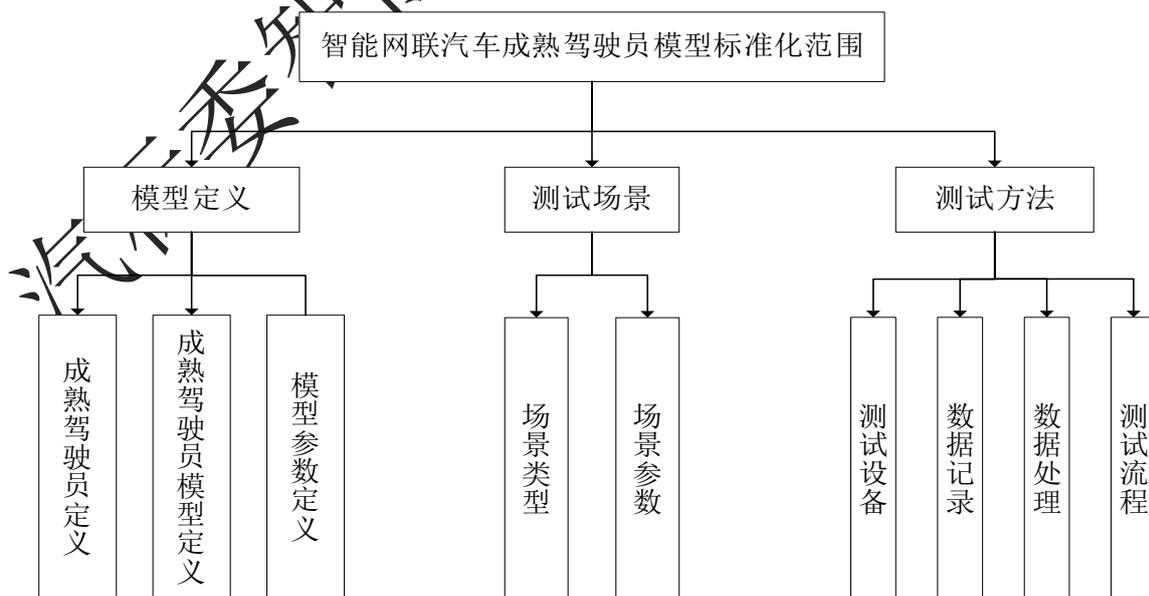


图 43 智能网联汽车的成熟驾驶模型标准化范围

5.2 标准化模型建议

根据前四章的研究成果与 5.1 节提出的成熟驾驶模型的标准化框架，成熟驾驶模型将是确定自动驾驶汽车的行为安全是否优于人类驾驶员的必要条件，即以成熟驾驶员的紧急场景应对能力作为自动驾驶能力的安全基线，在成熟驾驶员能够避免碰撞的紧急场景的参数取值范围条件下，要求自动驾驶汽车也应能够避免碰撞，因此，必须加速标准化中国成熟驾驶员紧急反应模型，定义自动驾驶汽车的行为安全能力边界，以保证自动驾驶汽车的安全运行，本书完成了紧急制动模型与紧急转向模型的基础研究，并针对标准化模型提出以下建议。

首先，对联合国法规 UN-R157 中定义的紧急制动模型参数进一步进行优化，风险评估时间与评估完成时刻不易统计，且两个时间段内车辆行为未发生变化，可将两段时间合并。其次，人类驾驶员遇到紧急场景时为避免碰撞，采取的行为除紧急制动外，还包括紧急转向，仅用紧急制动模型代表人类驾驶员的碰撞避免能力是不够的，需要建模注意力集中的成熟驾驶员的紧急转向模型。

通过对成熟驾驶模型现状分析与标定实践，建议智能网联汽车的基础通用成熟驾驶模型以紧急制动模型及紧急转向模型为主。其中，紧急制动模型参数包括风险出现时间点、决策响应时间、制动效能提升时间及最大制动减速度，如图 20 所示，参数标定结果见表 22。紧急转向模型参数包括风险出现时间点、决策响应时间、方向盘回正时间及方向盘最大转角，如图 25 所示，参数标定结果见表 23。建议涉及紧急驾驶模型的试验或应用按照表 22、表 23 中的参数结果开展。

5.3 总结展望

随着我国汽车工业和智能化水平的快速发展，自动驾驶已成为当下汽车行业的重要发展方向，为了实现全面无人化驾驶，给自动驾驶的安全性、舒适性、效率性认证提出了更迫切的需求。本书第一章对成熟驾驶模型技术发展现状进行介绍，并详细对比分析了关键驾驶模型的技术优劣。

第二章聚焦自动驾驶技术与成熟驾驶模型的关系，详细阐述了目前成熟驾驶模型广泛应用于自动驾驶产品开发技术与测试技术中，并广泛搭载于国内外的上市产品的现状。

第三章围绕当前标准发展现状，阐明国内外成熟驾驶模型相关的标准现状，国外标准起步较早，相对完善，国外标准聚焦于系统的性能和试验方法等方面的研究，对于提高道路安全性，提升交通安全管理水平具有重要意义，为开展成熟驾驶模型标准化研究奠定良好的基础。国内外相关标准多以安全性测试为基石，结合其他性能要求和测试方法，形成完善的标准体系。

第四章则围绕安全性测试，提出了紧急制动模型与紧急转向模型，并采用实车与仿真联合标定的方法，确定了中国成熟驾驶员的模型参数，并基于实践，给出了智能网联汽车的“安全性边界”。

第五章对智能网联汽车成熟驾驶模型标准化的重要意义进行了探讨和研究，对成熟驾驶模型标准化方向及框架给出建议，也对成熟驾驶模型的标准化范围给出了建议。

本项目的输出将有十分广泛的应用。可支撑多项国标制定，如支撑国标《智能网联汽车自动驾驶功能仿真试验方法及要求》中场景参数取值。

可支撑核心数据库建立，如中国成熟驾驶员的紧急制动及紧急转向行为数据库。可基于中国成熟驾驶员的能力水平，支撑制定相关测试规程或行业白皮书，如智能驾驶行为安全评价测试规程、及智能驾驶行为安全评价方法行业白皮书等。

本书中数据是在特定条件、设备、人员情况下获得的，结果仅供参考。

汽标委智能网联汽车分会文件

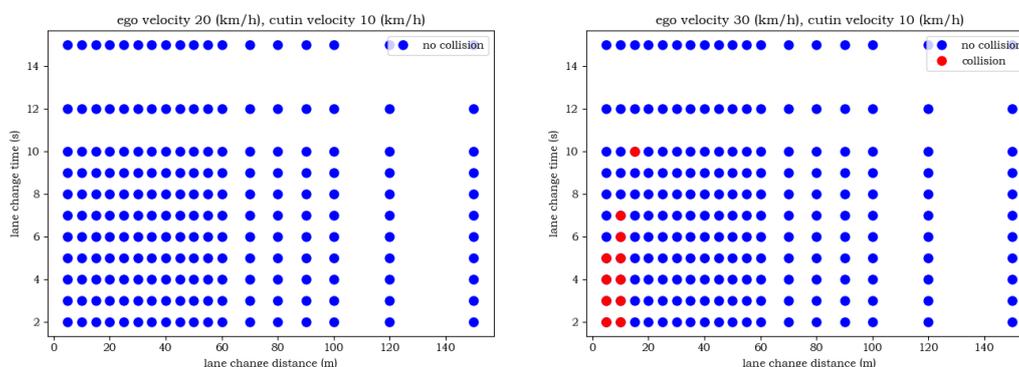
附录A 成熟驾驶模型可避免碰撞的场景参数取值

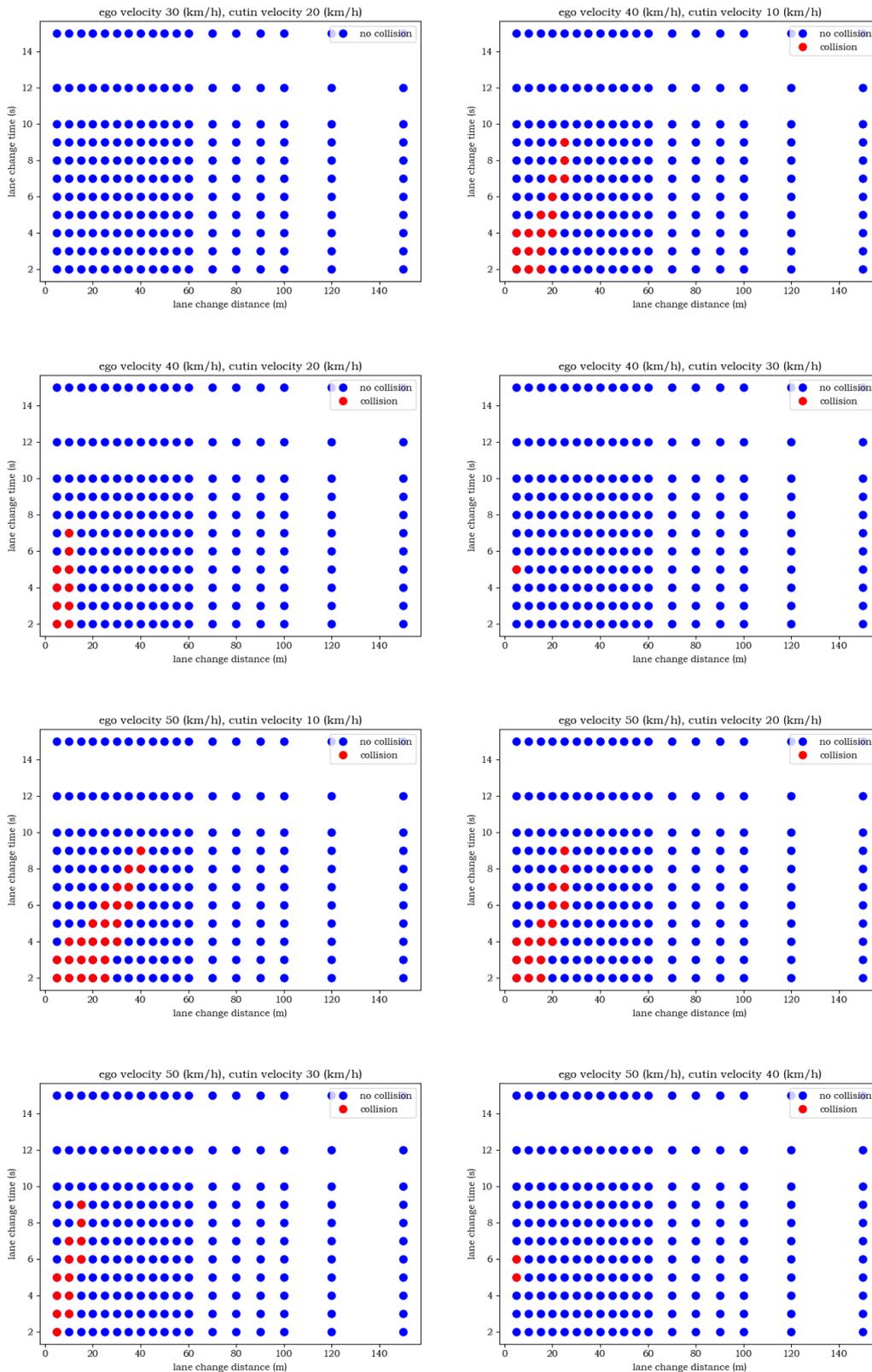
A.1 概述

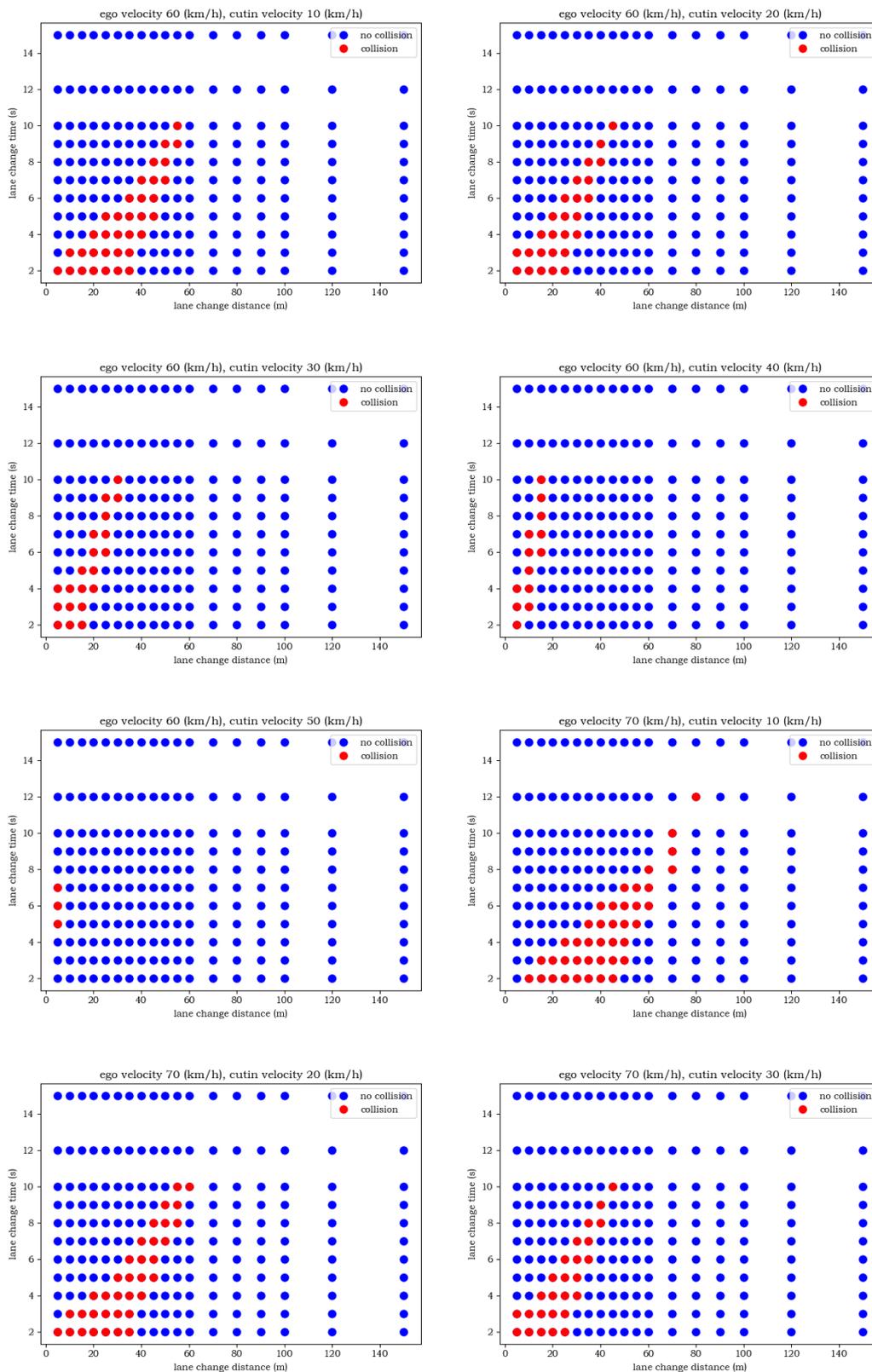
成熟驾驶员模型可应用于确定自动驾驶功能仿真试验方法中的场景参数取值，即仿真试验中的场景参数取值应在成熟驾驶员模型能够避免碰撞的参数取值范围之内。本附录以成熟驾驶员的紧急制动模型为例，通过对邻车切入场景、前车切出遇静止车场景及前车制动场景的关键参数进行全集泛化，并将上述场景与紧急制动模型实现至仿真平台中，最终得到成熟驾驶员的紧急制动模型在上述三个场景下的碰撞可避免的参数取值范围。

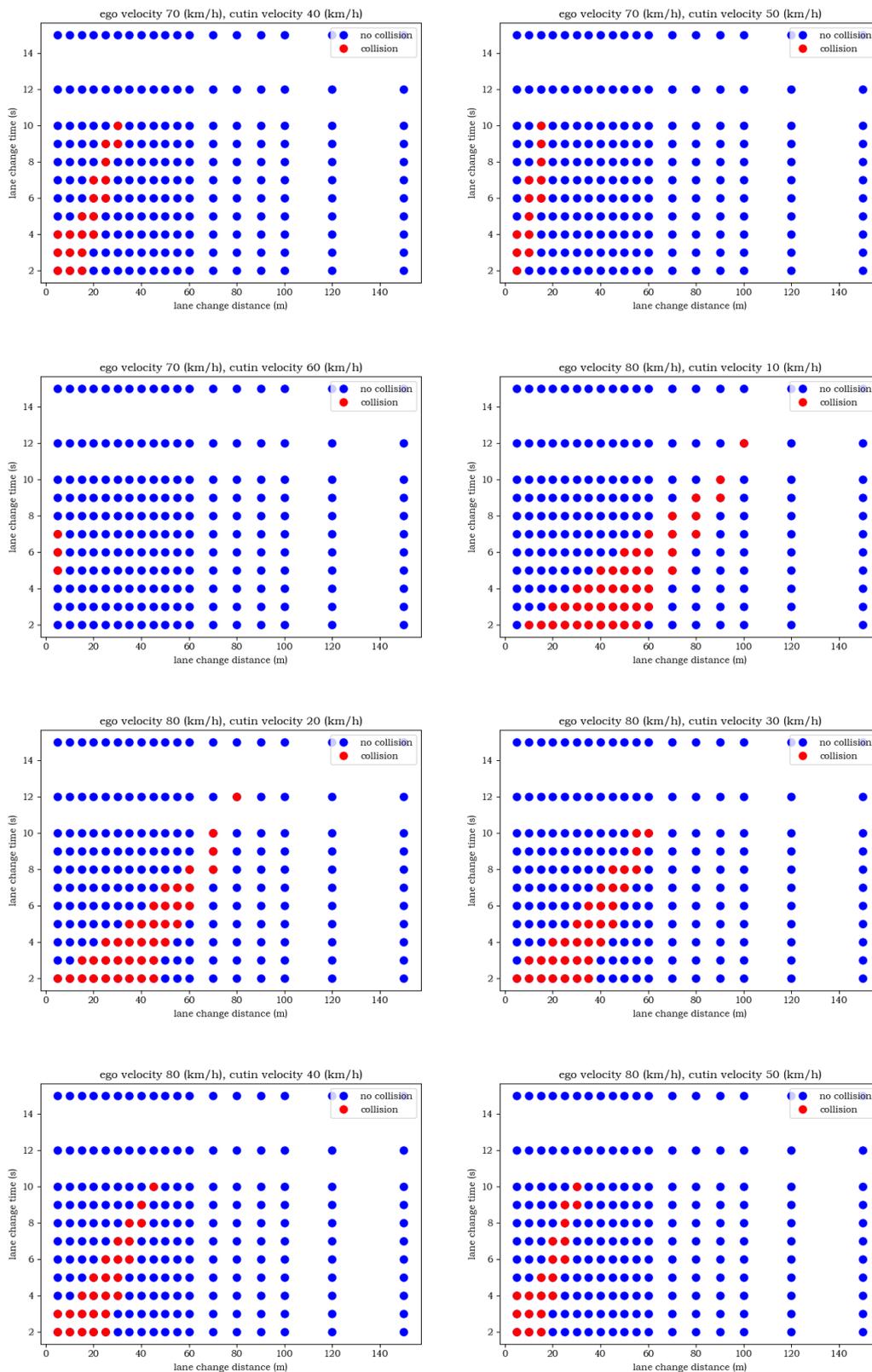
在上述三个场景下，如图 A.1 至图 A.3 所示，成熟驾驶员模型能够避免碰撞的参数取值范围如蓝点所示，无法避免碰撞的参数取值范围如红点所示，自动驾驶仿真试验中的场景参数取值应在蓝点中选取。其中，红点区域附近的蓝点对应参数取值为危险场景的参数取值。可用于支撑国标《智能网联汽车自动驾驶功能仿真试验方法及要求》中场景参数的合理性确认。

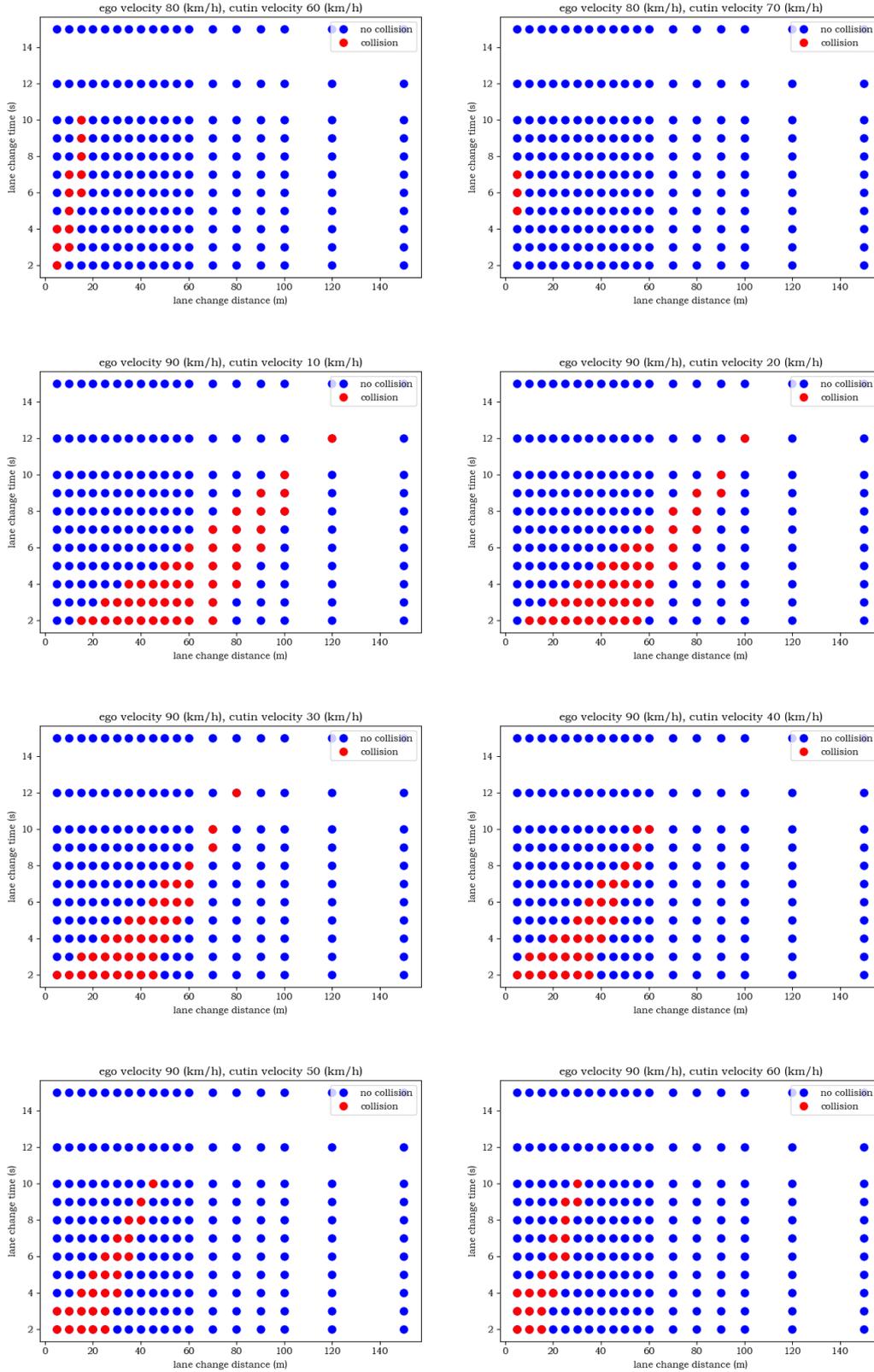
A.2 邻车切入场景下的可避免碰撞的参数取值范围

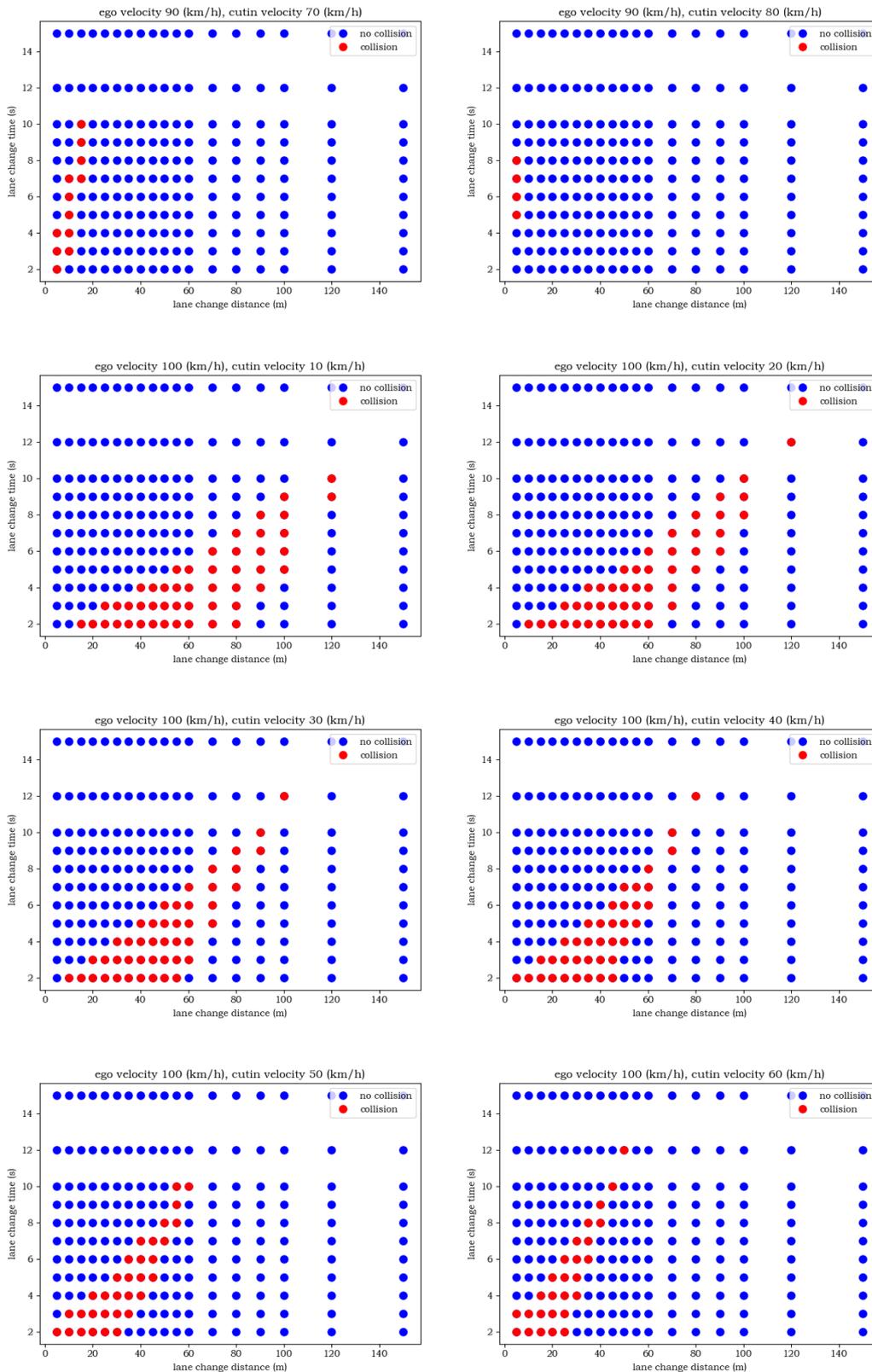


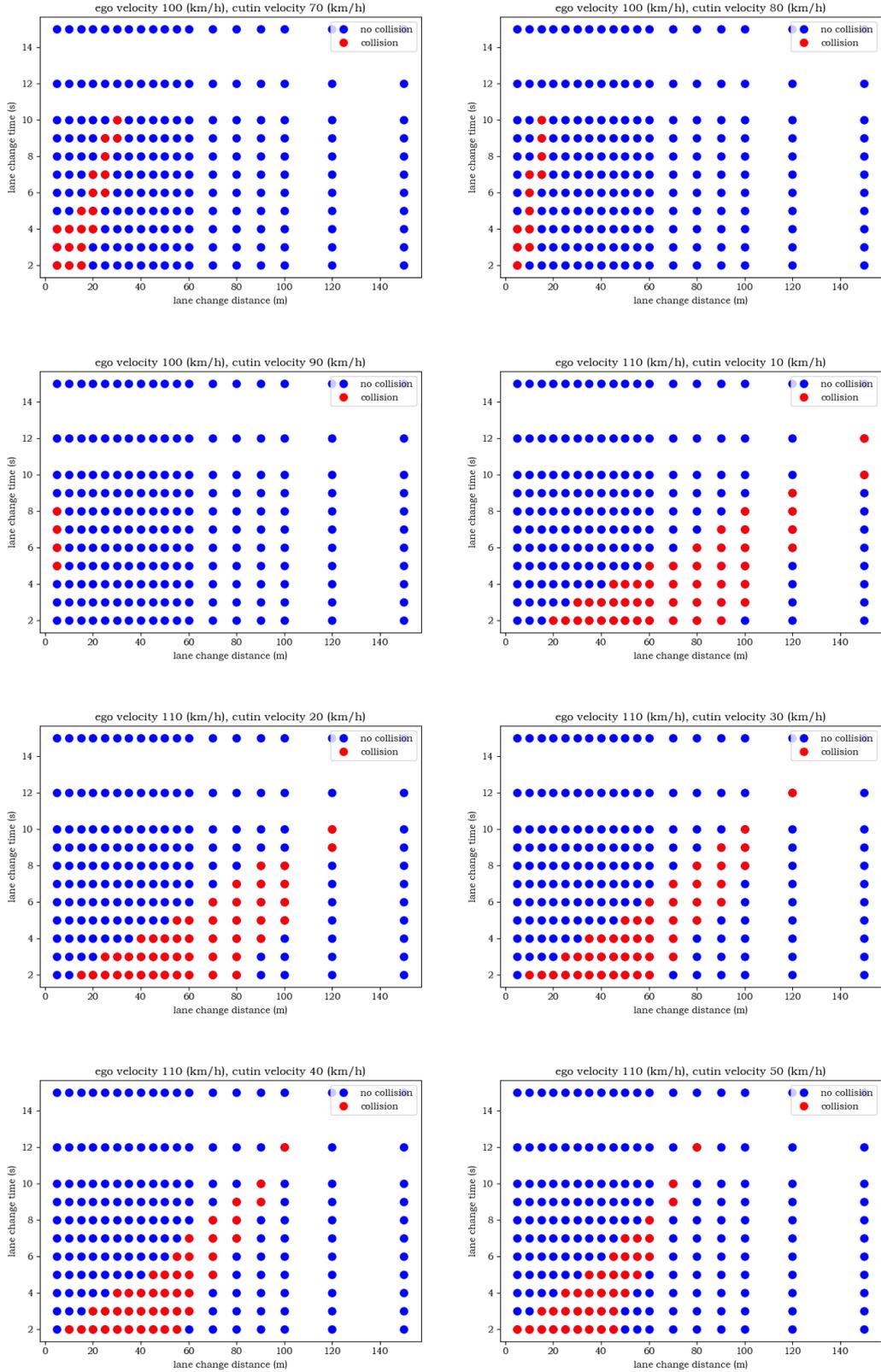


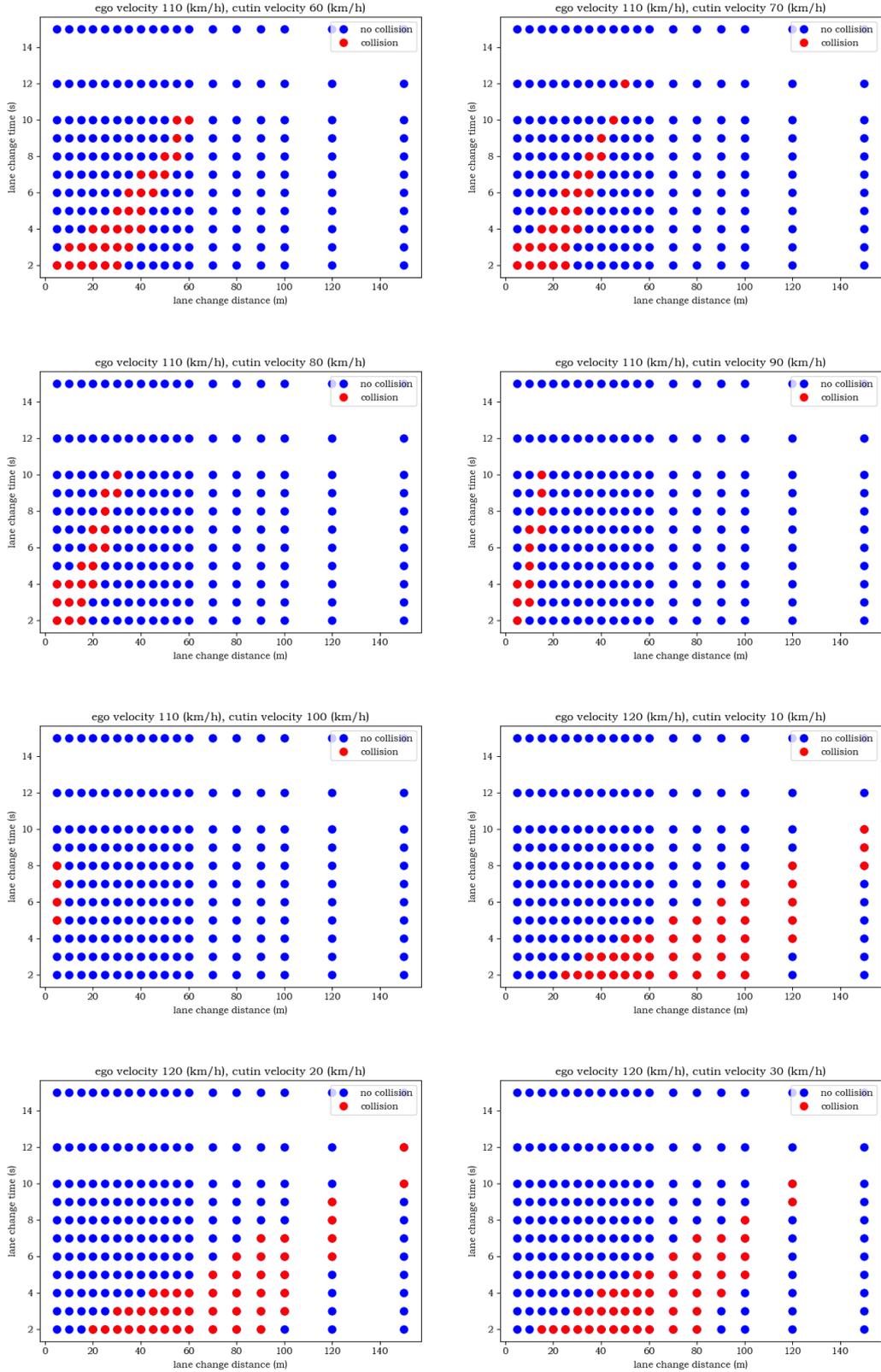












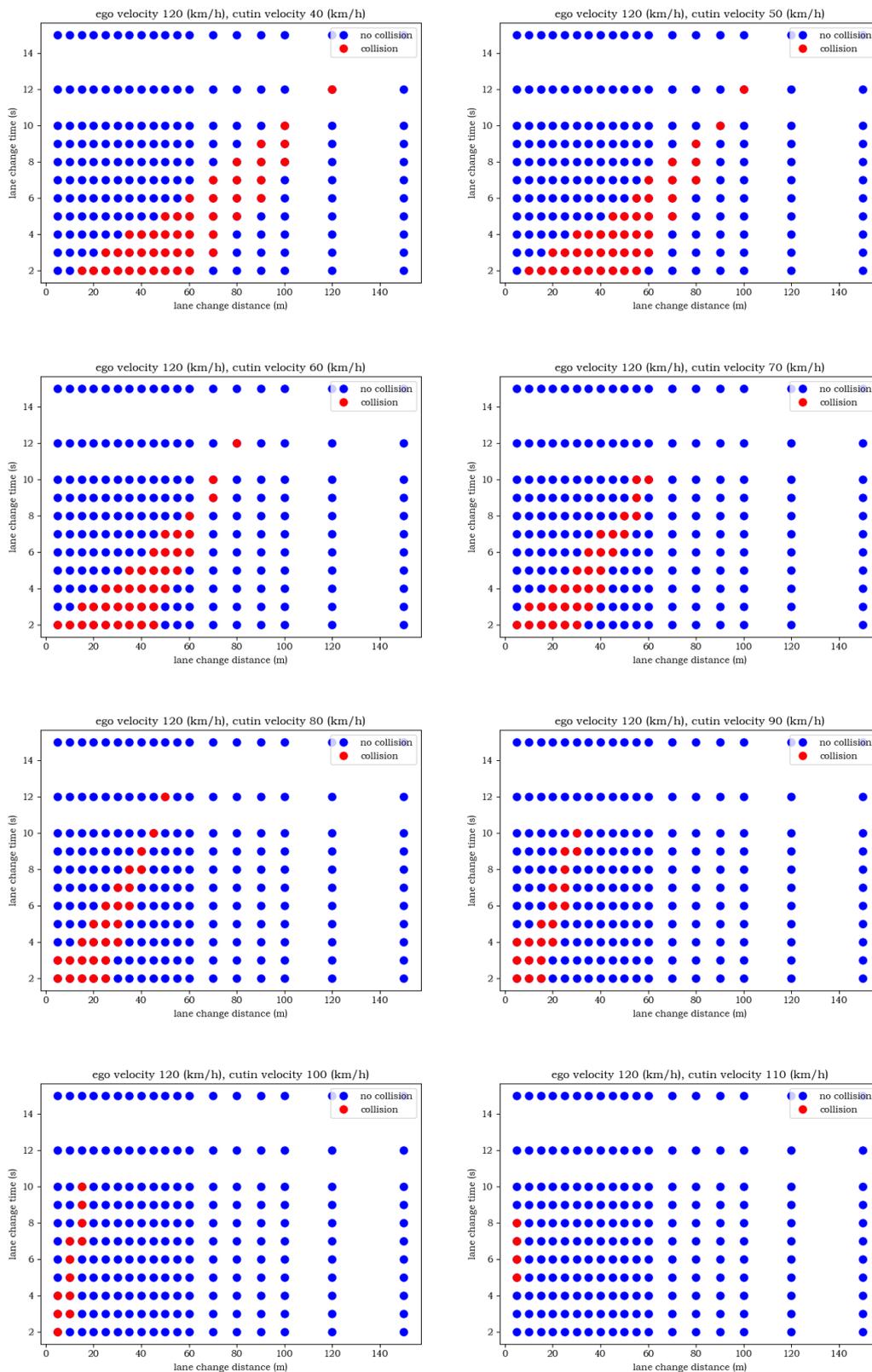
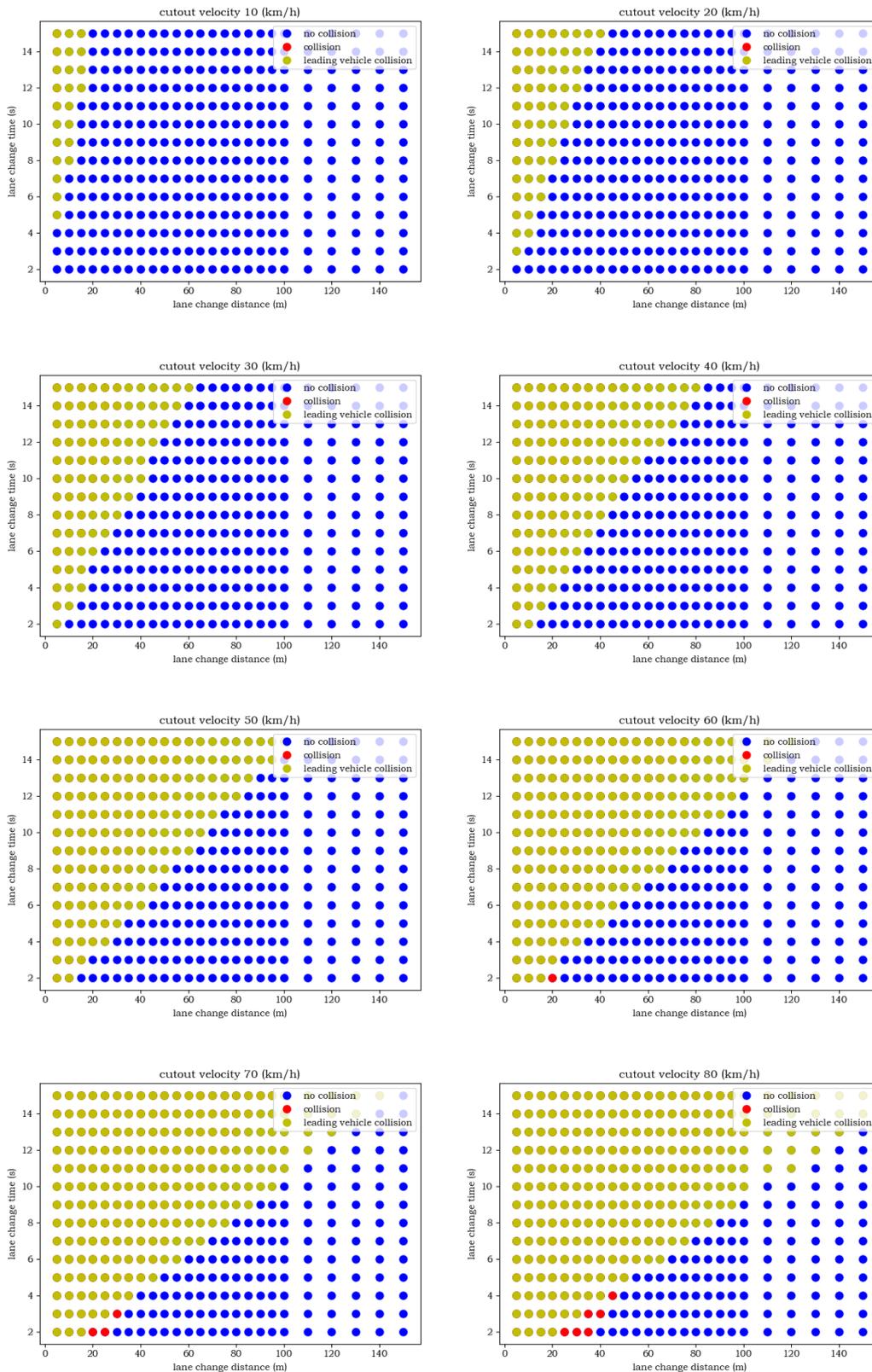


图 A.1 邻车切入场景下的可避免碰撞的参数取值范围

A.3 前车切出遇静止车场景下的可避免碰撞的参数取值范围



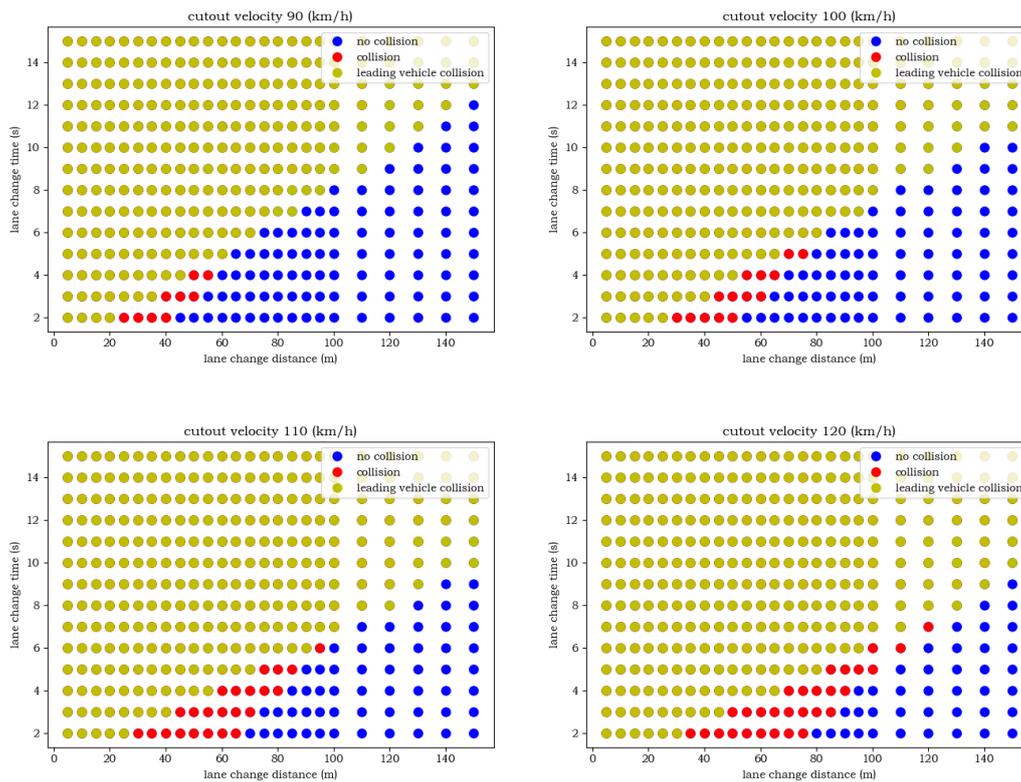


图 A.2 前车切出遇静止车场景下的可避免碰撞的参数取值范围

A.4 前车制动场景下的可避免碰撞的参数取值范围

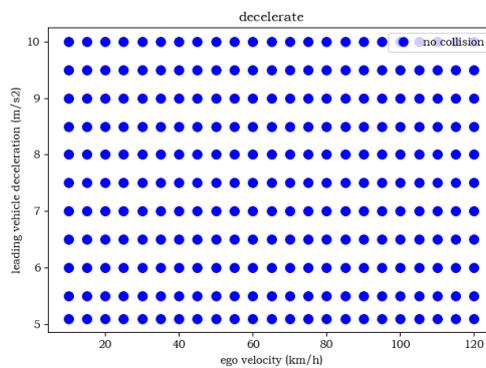


图 A.3 前车制动场景下的可避免碰撞的参数取值范围

参考文献

- [1]Reuschel A. Vehicle Movements in the Column Uniformly Accelerated or Delayed[J]. Oesterrich Ingr Arch, 1950,4:193-215.
- [2]PIPES L A. An Operational Analysis of Traffic Dynamics[J]. Journal of Applied Physics, 1953, 24(3):274-281.
- [3]NEWELL G F. Memoirs on High Traffic Flow Theory in the 1995s[J]. Operations Research, 2002, 50(1):173:178.
- [4]CHANDLER R E, HERMAN R, MONTROLL E W. Traffic Dynamics: Studies in Car Following[J]. Operations Research, 1958, 6(2):165-184.
- [5]S. Krauss. Microscopic Modeling of Traffic Flow: Investigation of Collision Free Vehicle Dynamics[J]. DLR - Forschungsberichte, 1998.
- [6]WIEDEMANN R. Simulation of Road Traffic in Traffic Flow[R]. Karlsruhe: University of Karlsruhe, 1974.
- [7]Kikuchi S , Chakroborty P . CAR-FOLLOWING MODEL BASED ON FUZZY INFERENCE SYSTEM[J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 1992, 1365(1365):82-91.
- [8]Lorente M P S, Lopez E M, Florez L A, et al. Explaining deep learning-based driver models[J]. Applied Sciences, 2021, 11(8): 3321.
- [9]Aksjonov A, Nedoma P, Vodovozov V, et al. A novel driver performance model based on machine learning[J]. IFAC-PapersOnLine, 2018, 51(9): 267-272.
- [10]Xie S, Chen S, Zheng N, et al. Modeling methodology of driver-vehicle-environment system dynamics in mixed driving situation[C]//2020 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). IEEE, 2020: 1984-1991.
- [11]Cui M, Wu H, Zhao X, et al. Safety-field based motion planning for proactive autonomous driving in dynamic environment[C]//2020 41st CAA International Conference on Vehicular Control and Intelligence (CVCI). IEEE, 2020: 231-236.
- [12]SIEMENS Simcenter Prescan, User manual, Driver model, 2020.03: 242-261
- [13]Hexagon, VTD User Manual, Scenario Editor-User Manual, 2020.12: 11-14
- [14]IPG, CarMaker Programmer's Guide, IPGDriver User Manual , 2020: 6-49
- [15]ISO, "Intelligent transport systems-Adaptive cruise control systems-Performance requirements and test procedures", ISO 15622 [S]. Geneva, Switzerland, 2018.
- [16]No U N R. 157 Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to Automated Lane Keeping Systems[J]. URL: c (accessed Sep. 01, 2022), 2022.

[17]BAST,"Approach to Derive Verifiable Performance Requirements for Accident avoidance",Document FRAV-39-07,39th FRAV session,26-28 April 2023.

[18]ISO. Intelligent transport systems—Lane change decision aid systems (LCDAS)—Performance requirements and test procedures[J]. 2008.

[19]IEEE Standard for Assumptions in Safety-Related Models for Automated Driving Systems, in IEEE Std 2846-2022, 2022, 1-59.

[20]Regulation No 79 of the Economic Commission for Europe of the United Nations (UN/ECE) — Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to steering equipment [2018/1947] (OJ L 318 14.12.2018, p. 1, ELI: <http://data.europa.eu/eli/reg/2018/1947/oj>)

[21]中国国家标准化管理委员会,智能运输系统 自适应巡航控制系统 性能要求与检测方法,GB/T 20608-2006[S]. 北京:中国标准出版社.2007.

[22]中国国家标准化管理委员会,智能网联汽车 自动驾驶功能场地 试验方法要求,GB/T41798-2022[S]. 北京:中国标准出版社.2022.

[23]中国国家标准化管理委员会,智能运输系统 换道决策辅助系统 性能要求与检测方法,GB/T 37471-2019[S]. 北京:中国标准出版社.2019.

汽标委智能网联汽车分委会文件