



自动驾驶安全模型研究



目录

第一章 自动驾驶安全模型概述.....	1
1.1 引言	1
1.2 自动驾驶安全模型的定义	2
第二章 自动驾驶安全模型应用.....	4
2.1 安全行为约束	4
2.2 安全行为验证	4
2.3 安全评估指标	5
第三章 自动驾驶安全模型介绍.....	6
3.1 Last Point to Steer	6
3.2 Safety Zone.....	7
3.3 RSS (Responsibility-Sensitive Safety)	8
3.4 SFF (Safety Force Field)	11
3.5 FSM (Fuzzy Safety Model)	12
3.6 STD (Safety Time Domain)	18
3.7 CC-driver (Careful and Competent Human Driver).....	23
3.8 中国成熟驾驶模型	26
第四章 自动驾驶安全模型展望.....	29
参考文献.....	30

第一章 自动驾驶安全模型概述

1.1 引言

在全球范围内，交通事故每年约造成 100 多万人伤亡^[1]。研究^[2]显示人为过失占有所有交通事故原因的 75%，这一数字在美国超过 90%。人类驾驶员在驾驶汽车时存在各种各样的安全问题。例如，跟车距离太近导致追尾，未考虑后方来车危险变道等。为了一定程度上提醒并纠正人类驾驶员的错误行为，当前越来越多的汽车上配备了先进驾驶辅助系统(Advanced Driving Assistance System, ADAS)。先进驾驶辅助系统根据车上传感器探测到的目标信息进行安全性评估。当安全性低于阈值时驾驶员依旧未注意到风险或未执行安全处置措施时，先进驾驶辅助系统会发出风险提醒，必要时会辅助制动或转向以避免碰撞。例如应急辅助系统中的前方碰撞预警(Forward Collision Warning, FCW)、变道碰撞预警(Lane Change Warning, LCW)及自动紧急制动(Autonomous Emergency Braking, AEB)等。

随着技术的发展，驾驶自动化等级也在不断提高。自动驾驶系统(Autonomous Driving System, ADS)在其设计运行条件(Operational Design Condition, ODC)内将代替人类驾驶员持续地执行全部动态驾驶任务。但也同样暴露出了不容忽视的安全问题。例如，当前部分自动驾驶系统对异形障碍物等目标的感知距离与识别能力不足，或者对邻车切入等危险场景的安全性评估和决策规划不够准确，这都容易导致交通事故的发生。安全永远是自动驾驶技术的必选项与首选项，是无论付出多少代价都需要满足的必要条件。如何保证自动驾驶汽车的安全性也成为监管机构、自动驾驶厂商、用户及社会民众最为关心的问题之一。

自动驾驶安全模型对自动驾驶系统的安全性保障具有十分积极的作用，在自动驾驶系统的安全评估及行为约束等方面都有着广泛的应用。越来越多的车企、研究机构及自动驾驶供应商等都在安全模型领域投入了大量研究。安全模型也开始出现在自动驾驶相关法规及标准中，并为自动驾驶事故或风险避免性能的衡量提供了参考。一个安全有效、科学合规的安全模型能够用于评估或约束自动驾驶系统驾驶行为的安全性及合规性。

1.2 自动驾驶安全模型的定义

1.2.1 FRAV 对自动驾驶安全模型的定义

联合国世界车辆法规协调论坛(UN/WP.29)自动驾驶与网联车辆工作组(GRVA)自动驾驶功能要求(FRAV)非正式工作组旨在提供自动驾驶系统安全性验证的技术要求及相应验证方法的指南^[5]。其中，定义了自动驾驶系统事故规避性能要求的推导方法。尽管自动驾驶系统可通过防御性驾驶以远离冲突与碰撞，但冲突与碰撞有可能是由于其他道路参与者的不合理行为导致的，在此情形下，自动驾驶系统也需要做出正确的规避动作以尽可能的减少伤害。

那么一个重要的问题是在何种情况下避免碰撞是可能的？为此，引入安全模型，用以区分必须避免的碰撞和仅需要缓解的碰撞。其目的并不是规定自动驾驶系统在任何给定的危急情况下的特定行为，而仅是在碰撞结果层面对自动驾驶系统提出要求。

FRAV 对安全模型的定义为对于任何给定的情况，都会有一个依赖于部分场景变量的函数，输出一个布尔值“true”或“false”，用来表示是否需要避免碰撞或冲突；反之亦然，表示缓解措施是否可接受。安全模型定义的具体公式如下：

$$\begin{aligned} \text{Avoidance}[0; 1] &= f_{\text{safety model}}(\text{scenario variable 1, scenario variable 2, ...}) \\ \text{Mitigation}[0; 1] \\ &= 1 - f_{\text{safety model}}(\text{scenario variable 1, scenario variable 2, ...}) \end{aligned}$$

例如，UN-R157 法规中规定了在一定的场景假设前提下，自动驾驶系统能够避免碰撞的邻车切入场景的参数范围。按照 FRAV 中对安全模型的定义，该要求可以被看成是一个安全模型。该安全模型定义了在这样的邻车切入场景下，自动驾驶系统需要避免碰撞。具体模型公式定义如下：

$$f_{\text{safety model}} = \begin{cases} 1 & \text{TTC}_{\text{LaneIntrusion}} > (v_{\text{rel}}/(2 \cdot 6\text{m/s}^2) + 0.35\text{s}) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

1.2.2 本文对自动驾驶安全模型的定义

FRAV 对安全模型的定义更多是从自动驾驶系统安全评估的角度，给出了安全模型的定义，当然这也是安全模型最重要的应用之一。实际上安全模型的应用

更加广泛，下面通过梳理自动驾驶的安全需求，给出安全模型的一个更加全面的定义。

自动驾驶汽车在执行动态驾驶任务时，与他车的行为交互是不安全因素的主要来源之一。在与他车的行为交互中想要保证安全，首先需要与他车保持一个安全合理的距离，若自动驾驶系统预测模块预测到将有碰撞发生时，预留的安全距离能让自动驾驶汽车有时间余量执行安全处置措施以避免碰撞的发生。其次，在车辆行为交互中，路权冲突也是影响行车安全与效率的重要因素。自动驾驶汽车需要充分理解路权优先级，并且解决路权冲突时的路权归属问题，在保证安全的前提下同时保证通行效率。另外，遵守交通规则是保证行车安全的有效手段，自动驾驶汽车需要遵守交通规则，如遵守交通信号灯及交通标志、合理运用转向指示灯等。最后，自动驾驶汽车在未来可能还需要有对潜在风险的评估能力。例如在前方公交车站有静止公交车开启左转灯时适当减速或者变道，避免与相邻车道大车长时间并排行驶等，这些对潜在风险的评估能力可以一定程度上减少发生碰撞的概率。

通过上述对自动驾驶安全需求的梳理，以下给出了自动驾驶安全模型的定义。自动驾驶安全模型，是一种定义明确的、指标定量的、规则可解释的数学模型，可用于模型化涉及自动驾驶汽车安全性相关的安全距离、路权归属、交通规则、风险评估等方面。

第二章 自动驾驶安全模型应用

自动驾驶安全模型可在自动驾驶系统设计阶段提供安全指导，作为安全行为约束；可在验证阶段作为安全指标，评估自动驾驶安全性；也可在运行阶段用于安全验证，时刻防护自动驾驶行为安全。下面将分别安全行为约束、安全行为验证及安全评估指标三个方面分别阐述其应用。

2.1 安全行为约束

传统的自动驾驶系统一般会包括感知、决策、规划、控制等模块。其中，规划可以看成是一个优化问题。一般地，一个优化问题的核心分为两部分：目标函数与约束条件。例如，有些传统规划优化问题的目标函数包括驾驶过程中的舒适性、节能性和可靠性等；约束条件包括碰撞规避、交通规则、车辆动力学限制及规划任务的始末运动状态等。规划优化问题的最终目的即为寻找一条最优的轨迹，在不违反约束条件的前提下，最小化目标函数。

安全模型可以作为约束条件之一，实时参与自动驾驶的规划，从而使得规划出的轨迹除了满足碰撞避免、交通规则和车辆动力学限制等条件，还满足安全模型定义的约束，如图 2.1 所示。其简化的公式表示如下：

$$\begin{aligned} & \text{minimize } f(x) \\ & \text{subject to } \textit{safety model} \end{aligned}$$

其中， f 为目标函数， x 为轨迹。

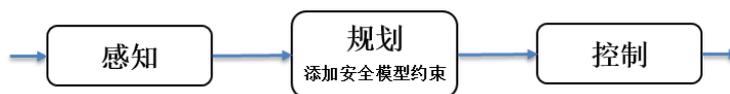


图 2.1. 带有安全模型约束的规划模块示意图

2.2 安全行为验证

安全模型还可以被单独设计为一个模块，独立于规划模块之外，对实时规划的输出结果进行安全性验证，如图 2.2 所示。例如，若不满足安全模型要求，则规划模块重新规划轨迹，或由安全模型模块直接输出符合安全模型的规划轨迹。另外，还可以由规划模块输出多个规划轨迹，由安全模型模块选择其中最为符合

安全模型的一个规划轨迹输出给控制模块。

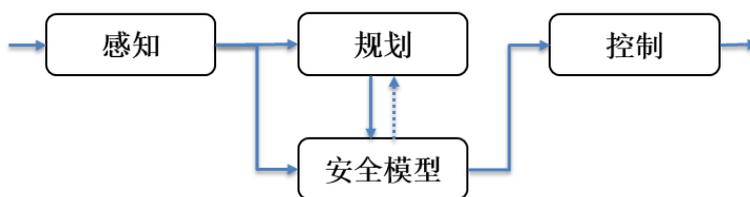


图 2.2. 用于安全行为验证的独立安全模型模块示意图

2.3 安全评估指标

安全模型最为广泛的应用是作为自动驾驶系统测试验证的安全性衡量指标。可对自动驾驶系统输出的轨迹、行为或碰撞结果等进行安全性验证，验证上述各种输出是否符合安全模型要求，如图 2.3 所示。

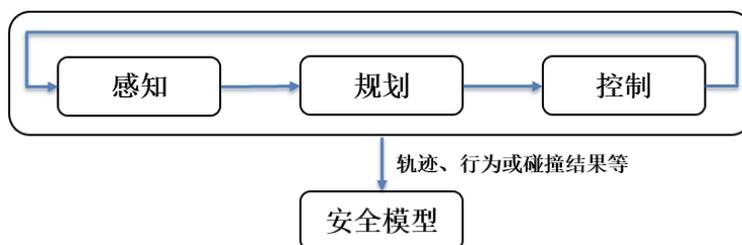


图 2.3. 作为安全评估指标的安全模型示意图

第三章 自动驾驶安全模型介绍

3.1 Last Point to Steer

Last Point to Steer 模型^[5]主要聚焦跟车场景。该模型通过假设特定的转向轨迹，可以计算出车辆能够通过转向避免与前车碰撞所需的最小距离。根据上述距离，可计算出若车辆无法通过转向避免碰撞时，即与前车的距离小于上述距离时，是否可以通过制动来避免碰撞。如果最终无法避免碰撞，则计算发生碰撞时的相对车速。

如图 3.1-1 所示，若自车按照图中红线所示轨迹转向，即在转向过程中保持横向加速度不变，那么自车在转向过程中的横向偏移计算公式如下：

$$y(t) = \iint \ddot{y}_{max} dt^2 = \left[\frac{1}{2} \ddot{y}_{max} t^2 \right]_{t=0}^{t=t_{required}}$$

其中， \ddot{y}_{max} 为自车最大横向加速度， $t_{required}$ 为自车转向使得自车右边缘与前车左边缘重合时所需时间，若自车横向偏移量为 Δy ，那么

$$t_{required} = \sqrt{\frac{2\Delta y}{\ddot{y}_{max}}}$$

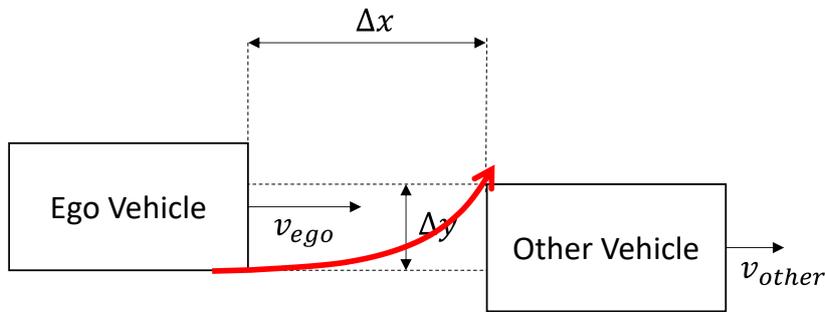


图 3.1-1. Last Point to Steer 模型假设转向轨迹类型一及参数图

除上述转向轨迹外，若自车按照图 3.1-2 中红线所示轨迹转向，该转向轨迹中当自车右边缘与前车左边缘重合时，自车速度方向与转向之前保持一致。此时自车转向使得自车右边缘与前车左边缘重合时所需时间的计算公式如下：

$$t_{required,same\ direction} = 2 \sqrt{\frac{\Delta y}{\ddot{y}_{max}}}$$

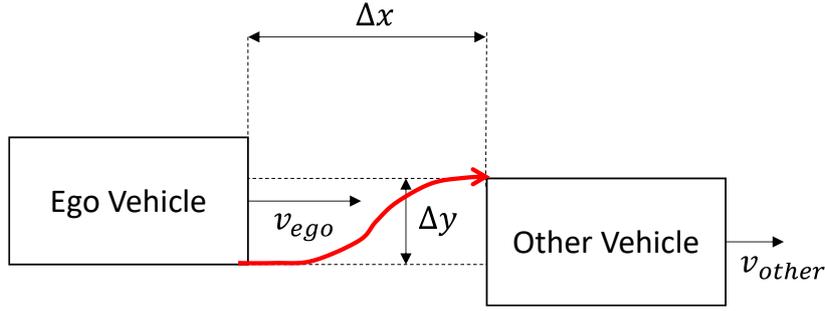


图 3.1-2. Last Point to Steer 模型假设转向轨迹类型二及参数图

以上述自车转向所需时间为基线，额外考虑自车制动时延，以此作为自车执行制动的触发时间，其计算公式如下：

$$TTC_{Brake,effective} = t_{required} + \frac{1}{2} \cdot t_{buildup}$$

其中， $t_{buildup}$ 为自车制动时延。

若自车执行制动的触发时间大于或等于自车减速至与前车同速的时间，则该场景能够避免碰撞，计算公式如下：

$$TTC_{Brake,effective} \geq \frac{v_{rel,0}}{2 \cdot (-\ddot{x}_{min})}$$

其中， $v_{rel,0}$ 为自车与前车的相对速度， \ddot{x}_{min} 为自车制动减速度，符号为负。

若自车执行制动的触发时间小于自车减速至与前车同速的时间，则该场景无法避免碰撞，碰撞时的相对速度计算公式如下：

$$v_{rel,impact} = \sqrt{v_{rel,0}^2 - 2 \cdot TTC_{Brake,effective} \cdot v_{rel,0} \cdot (-\ddot{x}_{min})}$$

3.2 Safety Zone

Safety Zone 模型^[5]主要聚焦弱势交通参与者横穿场景。该模型在自车左右边缘外部扩展一段空间距离作为安全空间，并计算弱势交通参与者进入安全空间的时间。当弱势交通参与者进入安全空间，即到达安全空间边界时，车辆将开始执行制动以避免或缓解碰撞。若最终无法避免碰撞，则可计算出车辆发生碰撞时的车速。

如图 3.2 所示，若自车与行人按照其各自初始速度行驶，会在碰撞点发生碰撞，那么此时预碰撞时间计算公式如下：

$$TTC = \frac{\Delta y}{v_{VRU}} \quad \text{and} \quad TTC = \frac{\Delta x}{v_{ego}}$$

其中， Δx 为自车与预碰撞点的距离， Δy 为行人与预碰撞点的距离， v_{ego} 为自车速度， v_{VRU} 为行人速度。

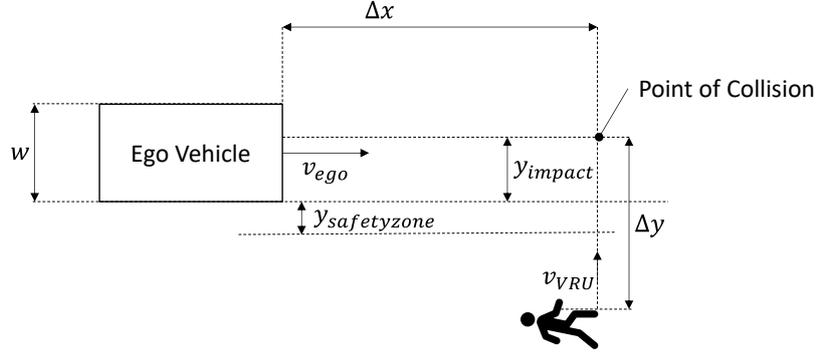


图 3.2. Safety Zone 模型适用场景及模型参数图

自车靠近行人方向的一侧会留有一定的安全空间，当行人行走至安全空间边缘时，自车会执行制动操作以避免碰撞，行人行走至安全空间边缘所需时间的计算公式如下：

$$TTC_{Entry,SafetyZone} = \frac{y_{impact}}{v_{VRU}} + \frac{y_{safetyzone}}{v_{VRU}}$$

其中， y_{impact} 为预碰撞点与行人横穿方向的自车边缘之间的距离， $y_{safetyzone}$ 为自车预留的安全空间的距离。

以上述行人行走至安全空间边缘所需时间为基线，额外考虑自车制动时延，以此作为自车执行制动的触发时间，其计算公式如下：

$$TTC_{Brake,effective} = TTC_{Entry,SafetyZone} + \frac{1}{2} \cdot t_{buildup}$$

其中， $t_{buildup}$ 为自车制动时延。

在上述时间内，自车制动后达到的最终车速的计算公式如下：

$$v_{impact} = \sqrt{v_{ego}^2 - 2 \cdot TTC_{Brake,effective} \cdot v_{ego} \cdot \mu \cdot g}$$

其中， μ 为道路附着系数， $g = 9.8m/s^2$ 。

3.3 RSS (Responsibility-Sensitive Safety)

RSS 模型^[7, 8]是一种旨在保证自动驾驶系统安全性的数学模型，模型的关注重点落在如何定义自动驾驶汽车与他车之间的横纵向安全距离，以及如何定义道路优先权的归属。

3.3.1 RSS 模型定义的纵向安全距离

RSS 模型的安全距离包括纵向安全距离和横向安全距离。纵向安全距离主要关注同向行驶场景下的纵向安全距离及对向行驶场景下的纵向安全距离。同向行驶场景下的纵向安全距离考虑了前方车辆以最大减速度减速，自车在系统反应时间内以最大加速度加速，然后以最小减速度减速，在此情况下保证两辆车不相撞的距离即为同向行驶场景下的纵向安全距离。计算公式如下：

$$d_{min} = \left[v_r \rho + \frac{1}{2} a_{max,accel} \rho^2 + \frac{(v_r + \rho a_{max,accel})^2}{2a_{max,brake}} - \frac{v_f^2}{2a_{min,brake}} \right]_+$$

其中， v_r 为自车速度， v_f 为前车速度， ρ 为自车反应时间， $a_{max,accel}$ 为自车最大前进加速度， $a_{min,brake}$ 为自车最小制动减速度， $a_{max,brake}$ 为前车最大制动减速度。上述公式计算出的 d_{min} 即为自车作为后车，需要与前车保持的最小纵向安全距离，如图 3.3-1 所示。

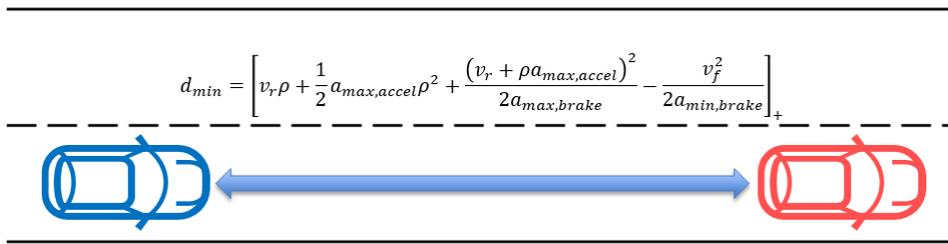


图 3.3-1. RSS 模型中同向行驶场景下的纵向安全距离示意图

对向行驶场景下的纵向安全距离考虑了前方车辆以最大减速度减速，自车在系统反应时间内以最大加速度加速，然后以最小减速度减速，在此情况下保证两辆车不相撞的距离即为同向行驶场景下的纵向安全距离。计算公式如下：

$$d_{min} = \frac{v_1 + v_{1,\rho}}{2} \rho + \frac{v_{1,\rho}^2}{2a_{min,brake}} + \frac{|v_2| + v_{2,\rho}}{2} \rho + \frac{v_{2,\rho}^2}{2a_{min,brake,correct}}$$

其中， v_1 为自车初始速度， $v_{1,\rho} = v_1 + \rho a_{max,accel}$ 为自车在反应时间 ρ 内，以最大前进加速度 $a_{max,accel}$ 加速后的速度， v_2 为对向来车初始速度，符号与 v_1 相反， $v_{2,\rho} = |v_2| + \rho a_{max,accel}$ ，为对向来车在反应时间 ρ 内，以最大前进加速度 $a_{max,accel}$ 加速后的速度， $a_{min,brake}$ 为自车最小制动减速度， $a_{min,brake,correct}$ 为对向来车最小合理制动减速度。上述公式计算出的 d_{min} 即为自车与对向来车保持的

最小纵向安全距离，如图 3.3-2 所示。在图 3.3-2 所示场景中，由于自车为借道超车方，对向来车行驶在其正确车道内，故对向来车的制动减速度 $a_{min,brake,correct}$ 一般小于自车制动减速度 $a_{min,brake}$ ，即自车需要采取更大的制动减速度以避免与对向来车产生安全风险。

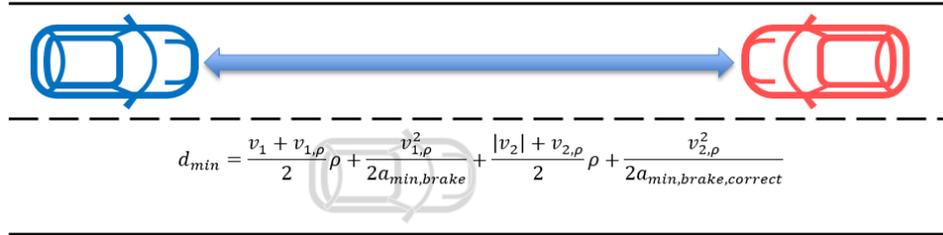


图 3.3-2. RSS 模型中对向行驶场景下的纵向安全距离示意图

3.3.2 RSS 模型定义的横向安全距离

横向安全距离主要关注两车相向靠近场景，考虑自车与相邻车辆在反应时间内均以最大加速度加速，然后以最小减速度减速，在此情况下保证两辆车不相撞的距离即为横向安全距离。计算公式如下：

$$d_{min} = \mu + \left[\frac{v_1 + v_{1,\rho}}{2} \rho + \frac{v_{1,\rho}^2}{2a_{min,brake}^{lat}} - \left(\frac{v_2 + v_{2,\rho}}{2} \rho - \frac{v_{2,\rho}^2}{2a_{min,brake}^{lat}} \right) \right]_+$$

其中， v_1 为自车初始横向速度， $v_{1,\rho} = v_1 + \rho a_{max,accel}^{lat}$ 为自车在反应时间 ρ 内，以最大横向加速度 $a_{max,accel}^{lat}$ 加速后的横向速度， v_2 为邻车初始横向速度，符号与 v_1 相反， $v_{2,\rho} = v_2 - \rho a_{max,accel}^{lat}$ ，为邻车在反应时间 ρ 内，以最大横向加速度 $a_{max,accel}^{lat}$ 加速后的横向速度， $a_{min,brake}^{lat}$ 为自车与邻车最小制动横向减速度。上述公式计算出的 d_{min} 即为自车与邻车保持的最小横向安全距离，如图 3.3-4 所示。

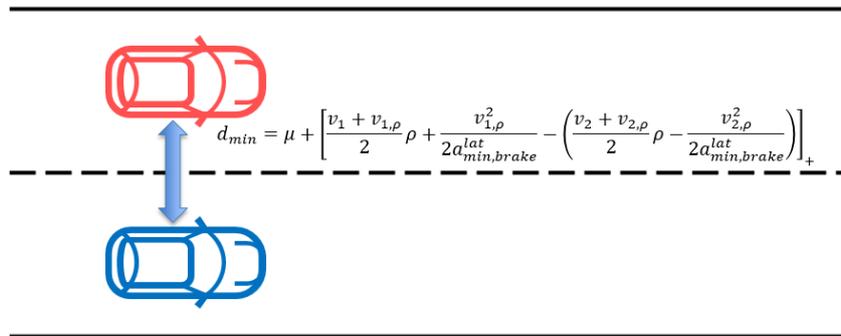


图 3.3-4. RSS 模型中横向安全距离示意图

3.4 SFF (Safety Force Field)

SFF 模型^[9]定义了自车与其他交通参与者在将来一段时间内所占用的时空轨迹，通过避免自车与其他交通参与者时空轨迹重叠，从而保证自车安全。上述时空轨迹也被其称为“安全力场”，重叠的“安全力场”意味着出现了潜在风险，通过对不同“安全力场”彼此之间排斥力的方向执行安全处置措施(如制动、转向等)，避免自车与其他交通参与者的碰撞。

3.4.1 SFF 模型定义的安全程序及声明集合

SFF 模型首先提出了车辆的安全程序(Safety Procedure)的概念，安全程序定义为车辆为了避免碰撞所采取的制动等安全处置措施。对应于安全程序的制动被称为安全制动，其制动减速度一般小于车辆的最大减速度。在安全程序的基础上，SFF 模型提出了声明集合(Claimed Sets)的概念，声明集合定义为车辆或其他交通参与者采取上述安全程序或最大安全处置能力(如以最大制动减速度制动)时占用的时空位置集合。如图 3.4-1 所示，若不考虑车辆的横向移动，只考虑车辆的纵向移动，浅绿色区域为车辆进行匀速直线运动时占用的时空位置集合，深绿色区域为车辆执行安全程序时占用的时空位置集合，黄色区域为车辆执行最大安全处置能力(如以最大制动减速度制动)时占用的时空位置集合，深绿色与黄色区域所占用的时空位置集合的并集即为车辆的声明集合。

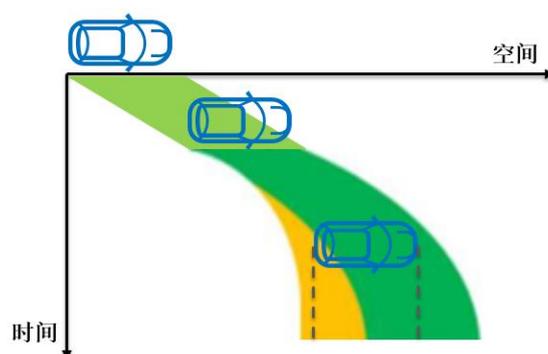


图 3.4-1. SFF 模型纵向声明集合示意图

贯穿 SFF 模型的核心概念为所有交通参与者都需要尽可能避免或最小化与其他交通参与者声明集合的交集。在交通参与者的声明集合相交之前或相交时，所有交通参与者都应采取其安全程序。如图 3.4-2 所示，对于两车相向行驶的场

景，两车的声明集合即将存在交集时，两车采取安全程序能恰好使得两车制动至静止时不发生碰撞。对于两车同向行驶的跟车场景，后车的声明集合不能与前车的声明集合重叠，这样一旦前车制动，后车正确执行安全程序，则后车不会与前车发生碰撞。

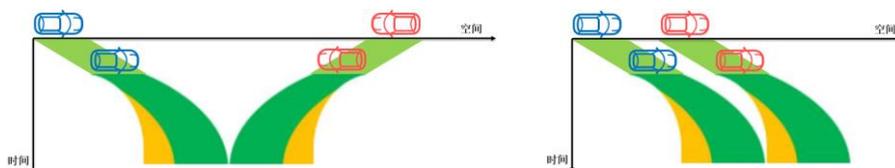


图 3.4-2. 对向及同向行驶场景下多个交通参与者的声明集合示意图

3.4.2 SFM 模型定义的安全力场

SFM 模型本质上不再区分横纵向安全距离，而是将横纵向统一以声明集合的形式综合考虑。不同车辆的声明集合应保持互不重叠。若有重叠，则被认为有碰撞风险。若有碰撞风险，则应使得声明集合相互远离，远离方向即为声明集合作为“安全力场”的“排斥力”方向。该排斥力的方向意味着车辆为了避免潜在碰撞所需要做的安全措施，如制动、转向等。如图 3.4-3 所示，邻车切入自车所在车道，两者声明集合存在重叠，存在碰撞风险，两车应以重叠区域处的排斥力方向做出安全处置措施，这样能最大程度的避免碰撞。

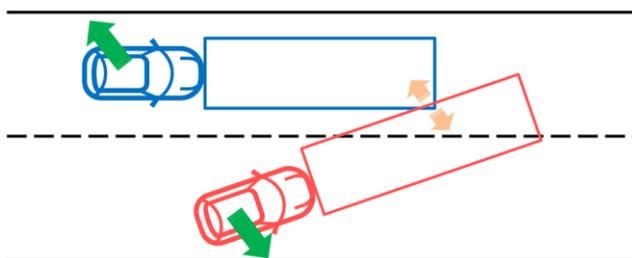


图 3.4-3. SFM 模型声明集合重叠区域排斥力二维投影示意图

3.5 FSM (Fuzzy Safety Model)

FSM 模型，又称 FSSM (Fuzzy Surrogate Safety Metrics)模型^[10, 11]。大多数的安全模型对车辆安全状态的评估仅有“安全状态”与“不安全状态”。如 RSS 模型，当两车距离大于或等于 RSS 模型定义的安全距离时为“安全状态”，小于 RSS 模型定义的安全距离时为“不安全状态”。而 FSM 模型认为“安全状态”与“不安全状态”之间不应该是跳变的，而是渐变的。因此 FSM 模型根据车辆的安全

程度划分为三种状态，分别为“安全状态”、“不安全状态”及位于两者之间的“Fuzzy 状态”。当车辆处于“安全状态”时，FSM 模型的输出为 0；当车辆处于“不安全状态”时，FSM 模型的输出为 1；当车辆处于“安全状态”与“不安全状态”之间的“Fuzzy 状态”时，FSM 模型以线性函数计算不安全的程度，输出 0-1 之间的值，如图 3.5-1 所示。

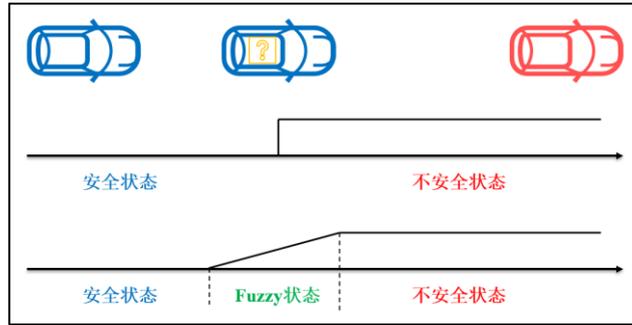


图 3.5-1. FSM 模型中“安全状态”、“不安全状态”及“Fuzzy 状态”示意图

FSM 模型将安全距离分解为纵向安全距离和横向安全距离。只有当纵向安全距离与横向安全距离均不满足安全要求，自车才会做出制动等安全措施。如图 3.5-2 所示，FSM 模型首先判断他车是否与自车同车道，若他车与自车同车道，则只需检查纵向是否安全；否则，先检查横向是否安全，再检查纵向是否安全。

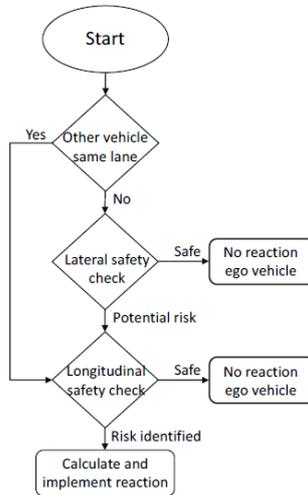


图 3.5-2. FSM 模型横向与纵向安全距离判定流程图

3.5.1 FSM 模型定义的横向安全距离

对于横向安全距离，当邻车横向侵入至自车行驶轨迹的时间小于自车在纵向超越邻车的时间时，FSM 模型认为此时是安全的，否则是不安全的，计算公式如

下。例如，在邻车低速切入场景下，若 FSM 模型计算出的横向侵入时间大于自车超越邻车的时间，即自车超越邻车后，邻车才完成切入，该情形被认为是安全的，否则是不安全的。

$$\left| \frac{dist_{lat}}{u_{other,lat}} \right| < \frac{dist_{lon} + length_{ego} + length_{other}}{u_{ego,lon} - u_{other,lon}} + 0.1$$

其中， $dist_{lat}$ 为两车横向距离， $dist_{lon}$ 为两车纵向距离， $length_{ego}$ 和 $length_{other}$ 分别为自车与他车的长度， $u_{ego,lon}$ 为自车纵向速度， $u_{other,lat}$ 与 $u_{other,lon}$ 分别为他车横向与纵向速度，0.1 为预留的时间余量。

3.5.2 FSM 模型定义的纵向安全距离

对于纵向安全距离，FSM 模型定义了纵向上的最大不安全距离及最小安全距离，如图 3.5-3 所示。当两车纵向距离大于最小安全距离时，定义两车为安全状态，模型输出值为 0，此时自车无需任何操作；当两车纵向距离小于最大不安全距离时，定义两车为不安全状态，模型输出 1，此时自车需要以最大能力减速；当两车纵向距离小于最小安全距离且大于最大不安全距离时，定义两车为 Fuzzy 状态，模型输出 0-1 的值，此时按比例值减速。

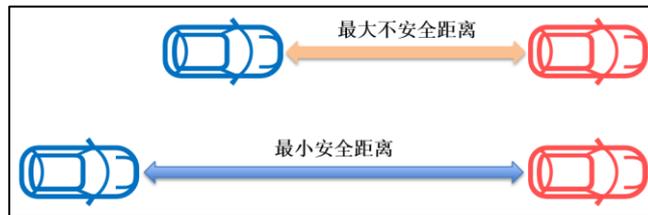


图 3.5-3. FSM 纵向最大不安全距离及最小安全距离示意图

在确定纵向最小安全距离时，FSM 模型同样有前车时时刻刻紧急制动的假设。与 RSS 模型不同的是，FSM 模型并没有假设自车在反应时间内做加速这种不合理且小概率的行为，而是假设保持匀速行驶。另外，FSM 模型根据场景的危险程度将纵向安全距离的衡量指标分为主动模糊替代安全度量(Proactive Fuzzy Surrogate Safety Metric, PFS)和临界模糊替代安全度量(Critical Fuzzy Surrogate Safety Metric, CFS)。

3.5.3 FSM 模型定义的 PFS 指标

PFS 的定义逻辑为假设前车突然制动，存在碰撞风险，后车为避免碰撞所预留的安全距离，如图 3.5-4 所示。在此基础上，PFS 最小安全距离定义为前车以

最大制动减速度制动时，后车以舒适减速度减速至停止，最终依然与前车保留一定安全距离余量。PFS 最大不安全距离定义为前车以最大制动减速度制动时，后车以最大减速度减速至停止，最终与前车没有发生碰撞。

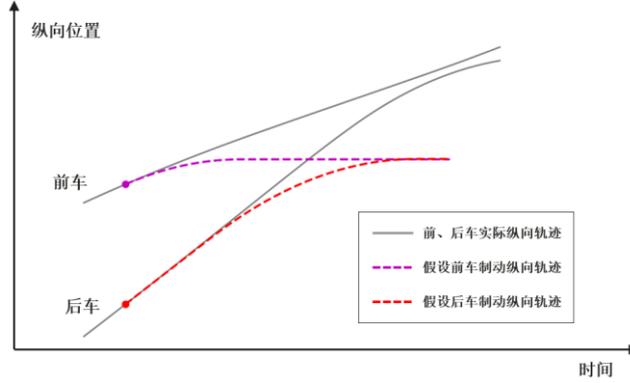


图 3.5-4. PFS 安全距离的定义逻辑示意图

PFS 的计算公式如下：

$$PFS(dist_{lon}) = \begin{cases} 1 & -d_1 < dist_{lon} - d_1 \leq d_{unsafe} \\ 0 & dist_{lon} - d_1 > d_{safe} \\ \frac{dist_{lon} - d_{safe}}{d_{unsafe} - d_{safe}} & d_{unsafe} < dist_{lon} - d_1 \leq d_{safe} \end{cases}$$

其中， $dist_{lon}$ 为两车之间的实际距离， d_1 为当两车均减速至静止后的安全距离余量，PFS 最小安全距离 d_{safe} 与 PFS 最大不安全距离 d_{unsafe} 计算公式如下：

$$d_{safe} = u_{ego,lon}\tau + \frac{u_{ego,lon}^2}{2b_{ego,comf}} - \frac{u_{other,lon}^2}{2b_{other,max}}$$

$$d_{unsafe} = u_{ego,lon}\tau + \frac{u_{ego,lon}^2}{2b_{ego,max}} - \frac{u_{other,lon}^2}{2b_{other,max}}$$

其中， τ 为自车的反应时间， $u_{ego,lon}$ 为自车纵向速度， $u_{other,lon}$ 为他车纵向速度， $b_{ego,comf}$ 为自车舒适减速度， $b_{ego,max}$ 为自车最大减速度， $b_{other,max}$ 为他车最大减速度。

3.5.4 FSM 模型定义的 CFS 指标

CFS 的定义逻辑为即使前车不制动，按照前车和后车此时的速度，存在碰撞风险，后车避免碰撞所预留的安全距离，如图 3.5-5 所示。在此基础上，CFS 最小安全距离定义为后车在反应时间内速度降至前车速度时两车距离变化量，或后车以舒适减速度减速至前车速度时两车距离变化量。CFS 最大不安全距离定义为

后车在反应时间内速度降至前车速度时两车距离变化量,或后车以最大减速度减速至前车速度时两车距离变化量。

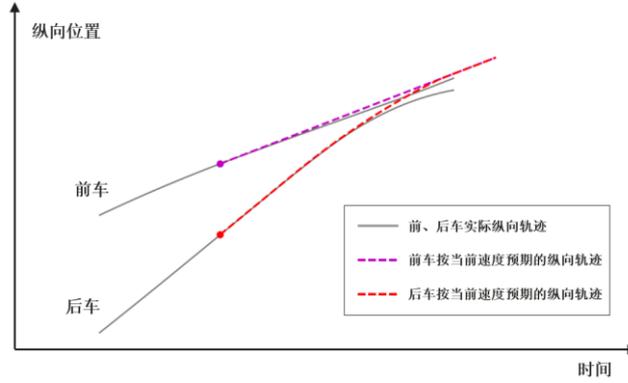


图 3.5-5. CFS 安全距离的定义逻辑示意图

CFS 的计算公式如下:

$$CFS(dist_{lon}) = \begin{cases} 1 & 0 < dist_{lon} \leq d_{unsafe} \\ 0 & dist_{lon} > d_{safe} \\ \frac{dist_{lon} - d_{safe}}{d_{unsafe} - d_{safe}} & d_{unsafe} < dist_{lon} \leq d_{safe} \end{cases}$$

其中, CFS 最小安全距离 d_{safe} 与 CFS 最大不安全距离 d_{unsafe} 计算公式如下:

$$d_{safe} = \begin{cases} \frac{(u_{ego,lon} - u_{other,lon})^2}{2a'_{ego}} & u_{ego,lon,NEXT} \leq u_{cut-in,lon} \\ d_{new} + \frac{(u_{ego,lon,NEXT} - u_{other,lon})^2}{2b_{ego,comf}} & u_{ego,lon,NEXT} > u_{cut-in,lon} \end{cases}$$

$$d_{unsafe} = \begin{cases} \frac{(u_{ego,lon} - u_{other,lon})^2}{2a'_{ego}} & u_{ego,lon,NEXT} \leq u_{cut-in,lon} \\ d_{new} + \frac{(u_{ego,lon,NEXT} - u_{other,lon})^2}{2b_{ego,max}} & u_{ego,lon,NEXT} > u_{cut-in,lon} \end{cases}$$

其中,

$$a'_{ego} = \max(a_{ego}, -b_{ego,comf})$$

$$u_{ego,lon,NEXT} = u_{ego,lon} + a'_{ego}\tau$$

$$d_{new} = \left(\frac{u_{ego,lon} + u_{ego,lon,NEXT}}{2} - u_{cut-in,lon} \right) \tau$$

其中, a_{ego} 为自车加速度; a'_{ego} 为修正后的自车加速度, 默认自车不会以大于 $b_{ego,comf}$ 的减速度制动; $u_{ego,lon,NEXT}$ 自车在反应时间内按照修正后的加速度加速后的期望速度; d_{new} 为自车与他车在反应时间后期望的距离变化量。

3.5.5 FSM 模型的 PFS 及 CFS 指标确定制动减速度

计算出 PFS 和 CFS 的值后,就可以按照 PFS 和 CFS 的值确定自车是否需要制动,以及需要制动时的制动力度。当场景危险程度低时,按照 PFS 计算的制动比例,并结合舒适的减速度制动;当场景危险程度高时,按照 CFS 计算的制动比例,并结合最大的减速度制动。计算公式如下:

$$b_{reaction} = \begin{cases} CFS \cdot (b_{ego,max} - b_{ego,comf}) & CFS > 0 \\ PFS \cdot b_{ego,comf} & CFS = 0 \end{cases}$$

当 CFS=0 时,证明当前时刻没有直接的碰撞风险,以 PFS 进行比例制动。当 PFS=0 时,后车无需制动;当 PFS=0-1 时,如 0.2,后车按照舒适减速度的 20%(例如 0.6 m/s²)制动;当 PFS=1 时,按照舒适减速度的值(例如 3 m/s²)制动。当 CFS=0-1 时,如 0.2,按照舒适减速度与最大减速度 20%位置处的减速度值(例如 3.6 m/s²)制动。当 CFS=1 时,按照最大减速度的值(例如 6 m/s²)制动。

通过前述 FSM 模型的安全与不安全判断逻辑,以及对应的控制策略,可以利用仿真测试确定 FSM 的避免碰撞能力,如图 3.5-6 所示。图中展示了自车速度为 90km/h,切入车辆为 40km/h 的场景下,FSM 模型在不同切入距离及切入横向速度下的避免碰撞能力。其中,黑色叉号标记(以×表示)为 FSM 模型无法避免碰撞的邻车切入场景参数,在其余场景参数下 FSM 可以避免碰撞。根据 FSM 模型中 PFS 及 CFS 的值,可以确定自动驾驶系统测试场景的难度。如绿色点处的 PFS ≤ 0.85,表示简单测试场景;黄色点处 PFS > 0.85 至 CFS < 0.9,表示中等测试场景;红色点处 CFS ≥ 0.9,表示困难测试场景。

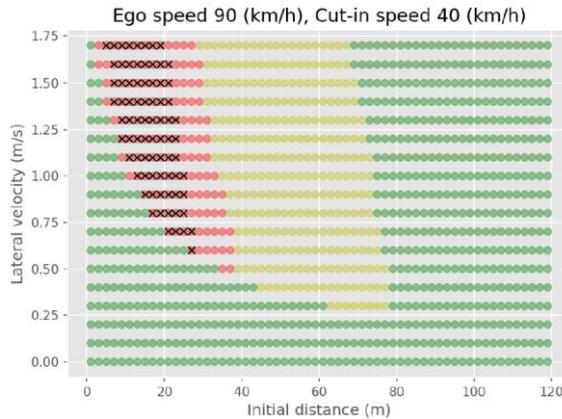


图 3.5-6. 邻车切入场景下 FSM 模型避免碰撞能力图

3.6 STD (Safety Time Domain)

STD 模型针对自动驾驶系统在时间域定义统一的安全模型，来模型化安全距离、路权归属、交通规则、风险评估、安全处置行为等安全相关概念。该模型利用多种基于时间差的衡量指标，用以指导和评估自动驾驶汽车的安全距离、路权归属、交通规则及风险评估等方面。安全时间域模型具有度量统一、评估简单等优点，更符合自动驾驶的机器逻辑与认知。

3.6.1 STD 模型中的安全模型

STD 模型中的安全模型根据自动驾驶汽车的规划轨迹及其对周围目标物的预测轨迹，计算两条轨迹在空间重叠区域处的时间差。自动驾驶汽车需要保证上述时间差的值不属于危险时差区间，以避免潜在的碰撞风险。自动驾驶汽车距离空间位置重叠区域的时间越短，时间差的绝对值越小，潜在的碰撞风险就越高。

自动驾驶汽车及目标的轨迹定义为空间位置间信息与其对应的时间信息的集合 $\Gamma: \{(t, \omega) | f(t) = \omega, \omega \in \Omega\}$ 。其中， f 为自动驾驶汽车及目标时间到空间位置的映射函数， Ω 为位置点集合。交叉区域定义为不同轨迹的相同空间位置点的集合 $\Omega_{overlap} = \Omega_1 \cap \Omega_2$ ，其中 Ω_1 和 Ω_2 分别为目标 O_1 和 O_2 的轨迹的空间位置集合。如果目标 O_1 和 O_2 的轨迹不存在交叉区域，即 $\Omega_{overlap} = \emptyset$ ，意味着目标 O_1 和 O_2 不会出现在相同的空间位置，目标 O_1 和 O_2 之间没有潜在碰撞风险。交叉区域的时间差集合即为交叉区域内相同空间位置点所对应的时间差值的集合，对于目标 O_1 来说，交叉区域的时间差集合如下：

$$\Lambda: \{\Delta t | \Delta t = t_1 - t_2, f_1(t_1) = \omega, f_2(t_2) = \omega, \omega \in \Omega_{overlap}\}$$

其中 f_1 和 f_2 分别为目标 O_1 和 O_2 的时间到空间位置的映射函数， $\Omega_{overlap}$ 为目标 O_1 和 O_2 的轨迹的交叉区域。

危险时差区间是衡量存在交叉区域的不同轨迹是否存在潜在碰撞风险的标尺。若交叉区域的时间差集合中的任一时间差均不属于危险时差区间，即 $\forall \Delta t \in \Lambda, \Delta t \notin \Phi$ ，其中 $\Phi = [T_1, T_2]$ 为危险时差区间，则轨迹虽然存在交叉区域，但是没有潜在碰撞的风险。若交叉区域的时间差集合中存在时间差属于危险时差区间，即 $\exists \Delta t \in \Lambda, \Delta t \in \Phi$ ，则轨迹存在潜在碰撞的风险。

假设预定义的危險时差区间为 $[-2, 2]$ 秒，自车与目标车的轨迹存在交叉区域，以红色虚线圆标识。如图 3.6-1 中左图所示，自车在交叉区域内的时间取值为 6 秒，目标车在交叉区域内的时间取值为 3 秒。站在自车的角度，交叉区域内的时间差为 $t = t_{obj} - t_{ego} = 3 - 6 = -3s \notin \Phi$ ，故自车没有潜在碰撞风险。如图 3.6-1 中右图所示， $\Delta t = t_{obj} - t_{ego} = 3 - 4 = -1s \in \Phi$ ，故自车存在潜在碰撞风险。

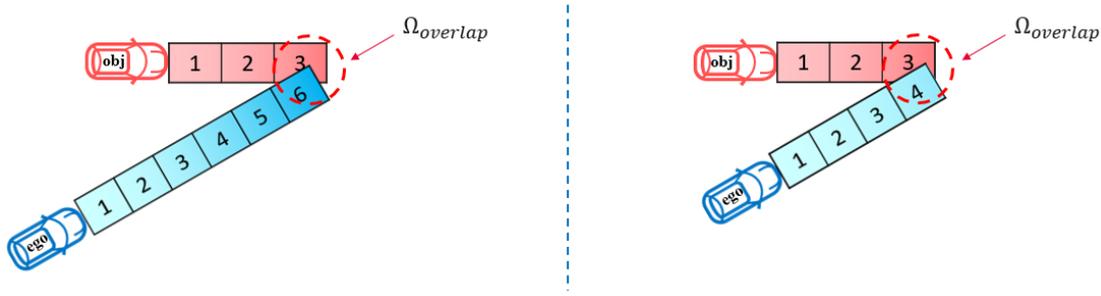


图 3.6-1. STD 模型中的安全模型示意图

3.6.2 STD 模型中的路权模型

通行优先级是指道路层面或车辆行为层面的法定让行顺序。例如，转弯车辆应让行直行车辆，均为直行时的让右原则等。道路通行权是指车辆层面的实际的通行权。例如，当没有车辆直行或直行车辆还有很久才到路口时，转弯车辆有道路通行权，可以先行通过路口。STD 模型中的路权模型结合了法规中的通行优先级和实际场景中的道路通行权。在到达时间先后的基础上，具有较高通行优先级的车辆，会有额外的时间差余量，真正地将遵守法规与保证通行效率结合起来。

假设目标 O_1 的通行优先级高于目标 O_2 。目标 O_1 和 O_2 的时间域轨迹在交叉路口处存在交叉区域 $\Omega_{crossing\ overlap}$ ，且交叉区域的时间差集合为 $\Lambda_{crossing}$ 。若 $\exists \Delta t \in \Lambda_{crossing}$ ， $\Delta t = t_1 - t_2 < T_{priority}$ ，则目标 O_1 具有道路通行权。否则目标 O_2 具有道路通行权。其中，其中 t_1 和 t_2 分别为目标 O_1 和 O_2 将要到达冲突区域的时间， $T_{priority} \geq 0$ 为预定义的优先级时差。一般地， $T_{priority}$ 取值以不影响路权优先级更高的车辆正常通行行为基准。

假设自车左转，目标车直行。直行车辆的通行优先级高于左转车辆。预定义的优先级时差 $T_{priority} = 3$ 。如图 3.6-2 中左图所示，在交叉区域处的通行优先级高的目标车与通行优先级低的自车的时间差如下：

$$\Delta t = t_{obj} - t_{ego} = 5 - 4 = 1s < T_{priority}$$

自车将仅比目标车辆早 1 秒到达冲突区域，容易造成目标车辆突然刹车。这会妨碍具有较高通行优先级的目标车辆的正常行驶，故此时依然为目标车有道路通行权。

如图 3.6-2 中右图所示，在交叉区域处的通行优先级高的目标车与通行优先级低的自车的时间差如下：

$$\Delta t = t_{obj} - t_{ego} = 8 - 4 = 4s > T_{priority}$$

自车将为目标车辆预留足够的时间余量，不会妨碍目标车辆的正常行驶。故此时通行优先级较低的自车有道路通行权，可以先行通过路口。

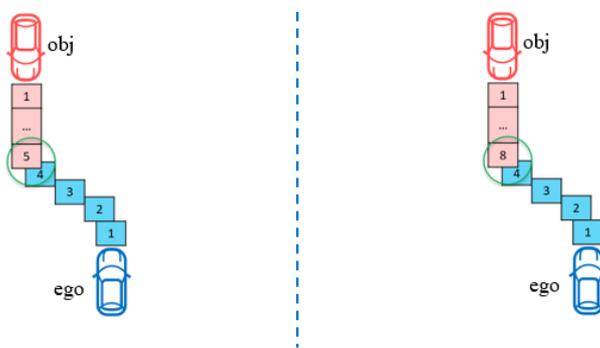


图 3.6-2. 不同道路通行权归属情形示意图

在自动驾驶汽车的安全评测中，自动驾驶汽车需要同时满足安全与路权的要求。基于上述安全模型和路权模型，可以给出在路权冲突场景下的安全与路权验证方法。如图 3.6-3 所示，自车与目标车的轨迹交叉区域处的时间差既要满足安全要求，做到安全让行，也要满足路权要求，做到合规先行。可以发现，合规先行的门限的绝对值要比安全让行的门限的绝对值更大。这是合理的，路权优先级更低的车辆想要先行要给优先级更高的车辆预留更多的时间余量，以不能妨碍优先级更高车辆的正常行驶。

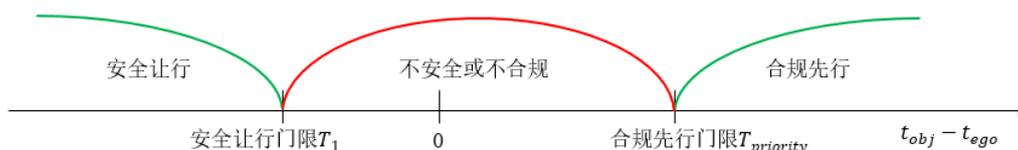


图 3.6-3. 安全让行与合规先行验证方法图

如图 3.6-4 所示，假设危险时差区间为 $\Phi = [T_1, T_2] = [-2, 2]$ ，假设目标车

车辆的通行优先级比自车更高，并且 $T_{priority} = 3$ 。如图 3.6-4 中的左图所示，自车与目标车在轨迹交叉区域处的时间差 $\Delta t = t_{obj} - t_{ego} = 1 - 4 = -3s < T_1$ ，故自车的让行是安全的。如图 3.6-4 中的右图所示，自车与目标车在轨迹交叉区域处的时间差 $\Delta t = t_{obj} - t_{ego} = 8 - 4 = 4s > T_{priority}$ ，故自车的先行是合规的。

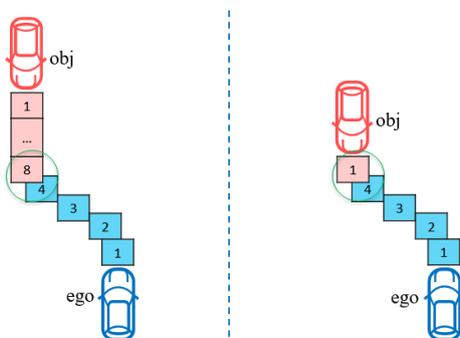


图 3.6-4. 安全让行与合规先行场景示意图

3.6.3 STD 模型中的风险评估模型

实际交通场景下，自车所处环境是否有风险性，不仅来源于自车和他车的风险评估，他车与他车之间的潜在风险同样会影响自车的行车安全。例如，前车与邻车的潜在碰撞会极大的增加后车的危险程度，一个谨慎且熟练的人类驾驶员会识别到类似的潜在风险，即防御性驾驶，通过降低车速尽量避免潜在的碰撞。STD 模型中的风险评估模型分别计算自车与他车，及他车与他车之间轨迹交叉点处的时间差和距离潜在碰撞区域的时间，分别评估他车直接对自车的风险影响，及他车与他车的交互行为间接对自车的风险影响，再将多个风险叠加，作为自车时间域中风险性的最终评估值。风险性指标函数受影响于时间差、距离潜在碰撞区域的时间及自车安全处置时间。时间差越接近 0，距离潜在碰撞区域的时间越小，风险程度越高，如图 3.6-5 所示。

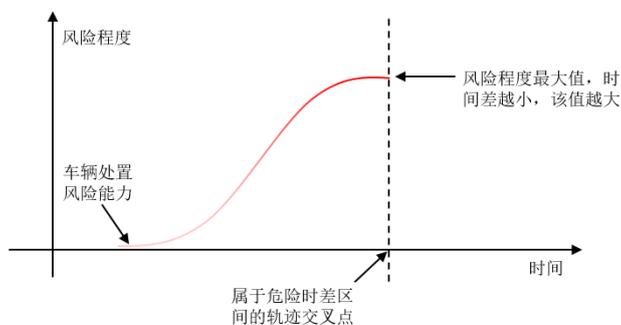


图 3.6-5. STD 风险评估模型示意图

若自车与他车存在属于危险时差区间的轨迹交叉点，则自车当前及未来时间上的风险程度计算方法如下：

$$re(t) = Ae^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}}, t \leq \mu$$

其中， $A(\Delta t) = \bar{\Phi} - \Delta t$ ，为风险程度最大值； $\bar{\Phi}$ 为危险时差阈值绝对值； Δt 为自车与他车轨迹交叉点处的时间差绝对值，即时间差越小，该值越大； μ 为自车当前位置距离风险点的时间； σ 与自车的安全处置时间有关，能力越强， σ 越小。

若他车与他车存在属于危险时差区间的轨迹交叉点。且该风险对自车会产生影响，则自车当前及未来时间上的风险程度计算方法如下：

$$ro(t) = \alpha Ae^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}}, t \leq \mu$$

其中， $A(\Delta t_1) = \bar{\Phi} - \Delta t_1$ ，为风险程度最大值； $\bar{\Phi}$ 为危险时差阈值绝对值； Δt_1 为他车与他车轨迹交叉点处的时间差绝对值，即时间差越小，该值越大； $\alpha(\Delta t_2) = \frac{\bar{\Phi} - \Delta t_2}{\bar{\Phi}}$ 为风险程度因子； Δt_2 为自车轨迹与他车造成的危险区域的时间差绝对值，即时间差越小，该值越大，他车造成的危险区域可以为危险所在车道及其两侧相邻车道对应的区域； μ 为自车当前距离风险点的时间； σ 与自车的安全处置时间有关，能力越强， σ 越小。

既有他车对自车的直接风险影响，又有他车和他车的风险对自车的间接风险影响，风险性指标可以相互叠加，如图 3.6-6 所示。

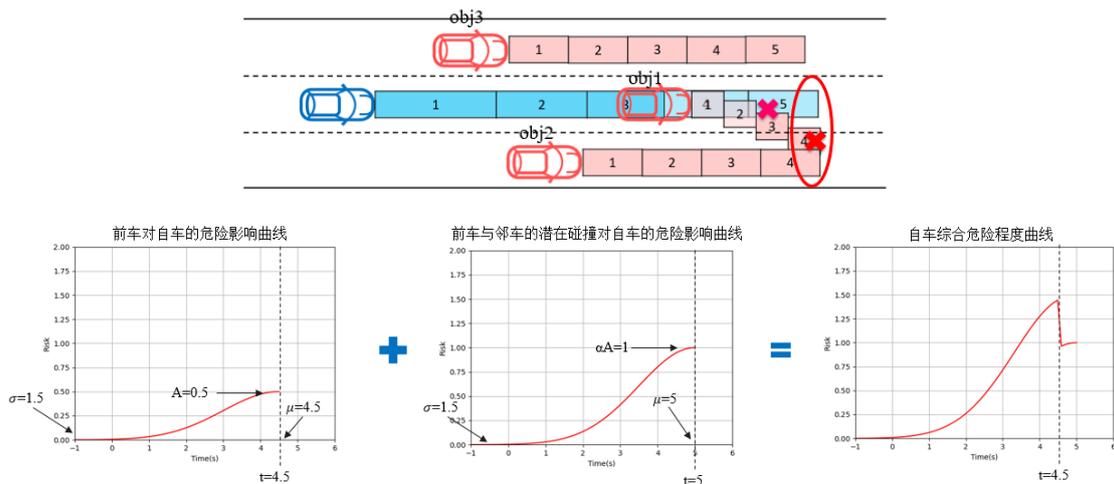


图 3.6-6. 复杂场景下直接风险与间接风险叠加示意图

3.7 CC-driver (Careful and Competent Human Driver)

CC-driver 模型^[5,6]定义了熟练且谨慎的人类驾驶员的紧急制动模型。该紧急制动模型刻画了人类驾驶员在遇到紧急场景，如邻车紧急切入，前车紧急切出遇静止车和前车紧急制动等场景时，为避免发生碰撞而采取的紧急制动行为。人类驾驶员在遇到紧急场景时的踩加速踏板与制动踏板的行为逻辑包括在风险点出现后人类驾驶员会对风险进行评估，并决定制动；决定制动后，驾驶员将脚从加速踏板移开，并转移到制动踏板上；随后驾驶员踩下制动踏板进行制动，如图 3.7-1 所示。

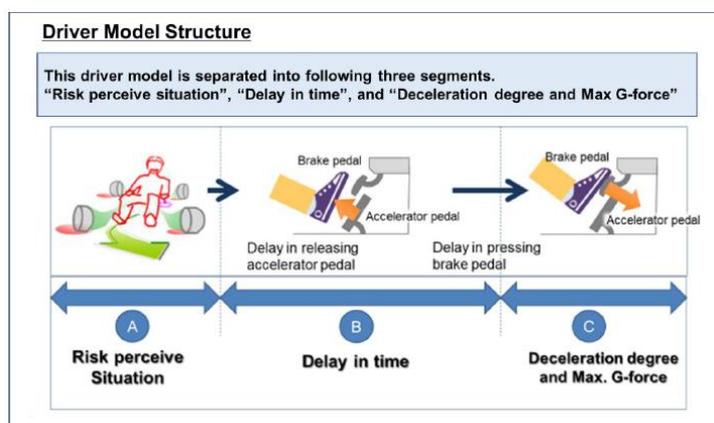


图 3.7-1. CC-driver 模型参考人类驾驶员的紧急制动行为逻辑示意图

3.7.1 CC-driver 模型参数及取值

CC-driver 模型参考人类驾驶员的紧急制动行为逻辑，分析人类驾驶员感知、决策、执行阶段加速踏板与制动踏板的开合状态，以及在每个状态下车辆的制动减速度变化，从而构建以车辆制动减速度为主要参数的模型。在风险点出现后人类驾驶员会对风险进行评估，并决定制动，在此过程中加速踏板开合角度保持不变，制动踏板开合角度为 0，制动减速度为 0；决定制动后，驾驶员将脚从加速踏板移开，并转移到制动踏板上，在此过程中加速踏板开合角度先减小至 0，随后有一小段时间空隙，这是驾驶员脚在踏板间转移导致的，制动踏板开合角度为 0，制动减速度为 0；随后驾驶员踩下制动踏板进行制动，在此过程中制动踏板角度先变大，再保持不变，制动减速度由 0 线性增大，再保持最大减速度不变。

通过上述分析，CC-driver 模型选取了五个关键参数，分别是风险出现时间

点、风险评估时间、评估完成至开始制动时间、制动至最大减速度时间及最大减速度，如图 3.7-2 所示。其中风险出现时间点为场景中风险开始出现的时刻；风险评估时间为风险开始出现至人类驾驶员风险评估完成的时间；评估完成至开始制动时间为人类驾驶员风险评估完成至车辆制动减速度开始出现的时间；制动至最大减速度时间为车辆制动减速度从 0 开始增加至最大减速度的时间；最大减速度为人类驾驶员或其结合车辆 AEB 系统最终达到的最大减速度的值。

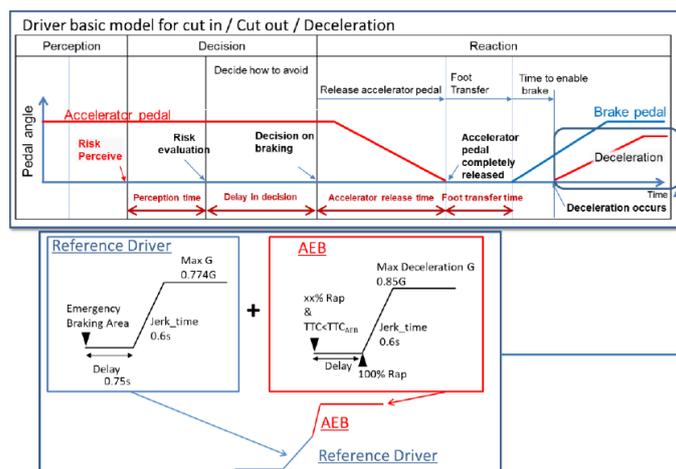


图 3.7-2. CC-driver 模型制动过程中加速踏板、制动踏板及减速度变化图

基于上述模型，依照日本驾驶员的行为数据统计了 CC-driver 模型的关键参数。参数具体统计值参见表 3.7。对于邻车切入及前车切出遇静止车场景，风险出现时间点为目标车横向偏移 0.375m；对于前车紧急制动场景，风险出现时间点为前车制动减速度达到 5m/s 以及 2s 的跟车时距。风险评估时间为 0.4s。评估完成至开始制动时间为 0.75s。制动至最大减速度时间为 0.6s。仅依靠人类驾驶员踩制动踏板最终达到的最大减速度取值为 0.774g；若结合车辆 AEB 系统，最终达到的最大减速度取值为 0.85g。

表 3.7 CC-driver 模型参数表

		Factors
Risk perception point	Lane change (cutting in, cutting out)	Deviation of the centre of a vehicle over 0.375m from the centre of the driving lane
	Deceleration	Deceleration ratio of preceding vehicle and following distance of ego vehicle
Risk evaluation time		0.4 seconds
Time duration from having finished perception until starting deceleration		0.75 seconds
Jerking time to full deceleration (road friction 1.0)		0.6 seconds to 0.774g
Jerking time to full deceleration (after full wrap of ego vehicle and cut-in vehicle, road friction 1.0)		0.6 seconds to 0.85g

3.7.2 CC-driver 模型碰撞可避免水平

以邻车切入场景为例，CC-driver 模型可以描述为以下内容，风险出现点为邻车偏离车道中心线 0.375m 的时刻，如果此时切入车辆与自车的纵向 TTC 小于 2s，人类驾驶员会有 0.4s 的风险评估时间和 0.75s 的制动时延。紧接着，人类驾驶员将以 0.6s 制动至 0.774g 的最大减速度，如图 3.7-3 所示。

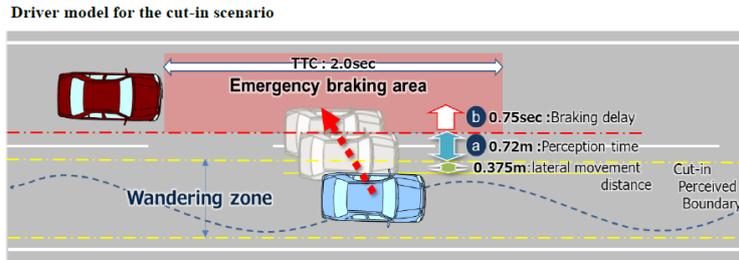


图 3.7-3 切入场景中 CC-driver 模型示意图

根据 CC-driver 模型，可以确定其在遇到紧急场景时可以避免碰撞的能力。如图 3.7-4 所示，该图中描述了自车与切入车在不同车速条件下，随着横向速度和切入距离的变化，CC-driver 模型能够避免碰撞的参数集合(绿色点集表示)，以及无法避免碰撞的参数集合(红色和橙色点集表示)。

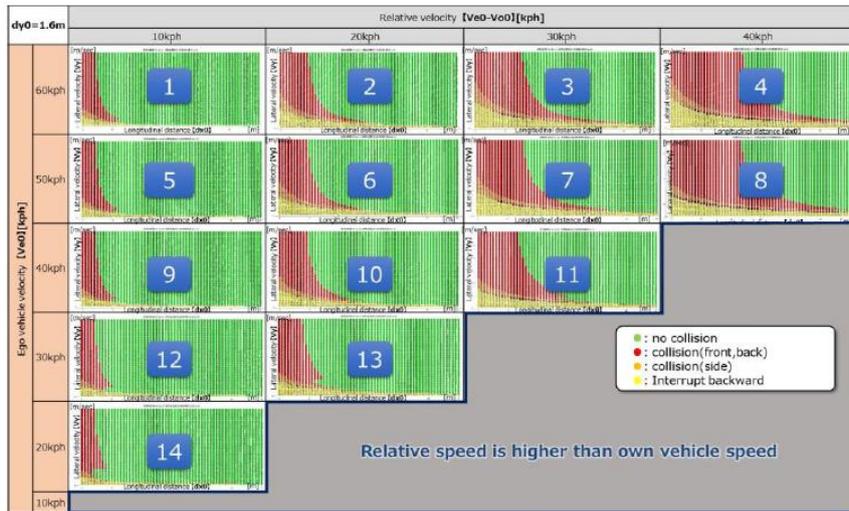


图 3.7-4 切入场景中 CC-driver 模型避免碰撞能力图

CC-driver 模型中的风险评估时间及评估完成至开始制动时间在统计上虽然较为精细，但如何定义风险评估的结束时间点并不容易，并且在这两部分时间内，车辆基本都处于相同的匀速状态，区分这两部分时间对确定模型避免碰撞能力的意义不明显。

3.8 中国成熟驾驶模型

全国汽车标准化技术委员会于 2022 年成立《面向智能网联汽车的成熟驾驶模型标准化需求研究项目》，并于 2023 年 11 月发布《面向智能网联汽车的成熟驾驶模型白皮书》^[12]。白皮书中定义了中国成熟驾驶员的紧急制动模型及紧急转向模型，并基于中国驾驶员行为对模型参数进行了标定。

3.8.1 中国成熟驾驶模型中的紧急制动模型

中国成熟驾驶员的紧急制动模型对 CC-driver 模型进行了简化，将制动模型分为三个区：自由行驶区、匀速区及制动生效区。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，进入匀速行驶区，驾驶员进行风险评估、决策反应、脚部迁移及开始踩踏板；在制动生效区，车辆产生明显的制动效果，制动效能快速提升后达到最大制动减速度。

同样的，在模型标定参数方面，中国成熟驾驶员的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。与 CC-driver 模型相比，将其风险评估时间及评估完成至开始制动时间合二为一，以决策响应时间统一度量，原因在该时间段内，车辆基本都处于相同的匀速状态，且从风险出现点到制动开始时间点的时间更容易精准测量。具体紧急制动模型如图 3.8-1 所示。

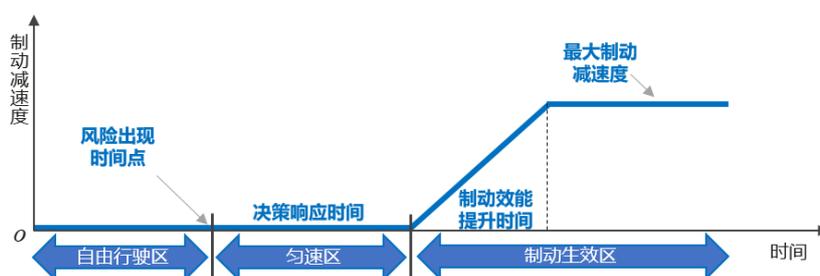


图 3.8-1 中国成熟驾驶员的紧急制动模型图

中国成熟驾驶员的紧急制动模型的决策响应时间由仿真试验标定，确保在驾驶员无心理预期的前提下获取真实的决策响应时间。模型的制动效能提升时间与最大制动减速度取值由实车试验标定，确保数据取值精确可靠。共有 53 名驾驶员参与实验，取其平均值作为最终结果。具体参数参见表 3.8。

表 3.8 中国成熟驾驶员的紧急制动模型参数表

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

3.8.2 中国成熟驾驶模型中的紧急转向模型

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。所以有必要对人类驾驶员在紧急场景下的转向模型进行研究。中国成熟驾驶员的紧急转向模型包括自由行驶区、直线行驶区及正弦转向区。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、手部开始握紧并开始转动方向盘；在正弦转向区，方向盘以正弦方式进行转动。

在模型标定参数方面，中国成熟驾驶员的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。具体紧急转向模型如图 3.8-2 所示。

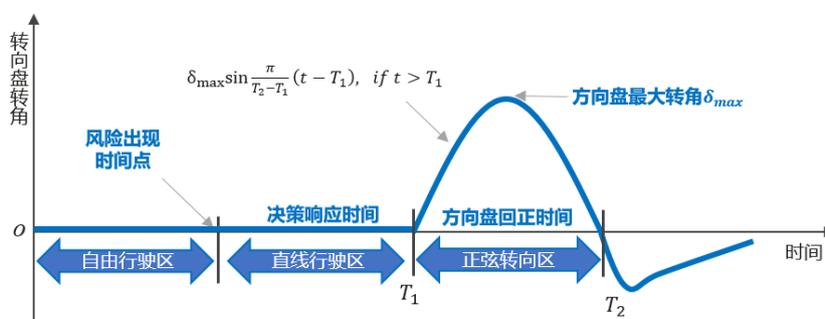


图 3.8-2 中国成熟驾驶员的紧急转向模型图

3.8.3 中国成熟驾驶员模型碰撞可避免水平

中国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。以中国成熟驾驶员的紧急制动模型为例，通过对邻车切入场景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，最终得到中国成熟驾驶员的紧急制动模型在上述场景下的碰撞可避免的参数取值范围，如图 3.8-3 所示。

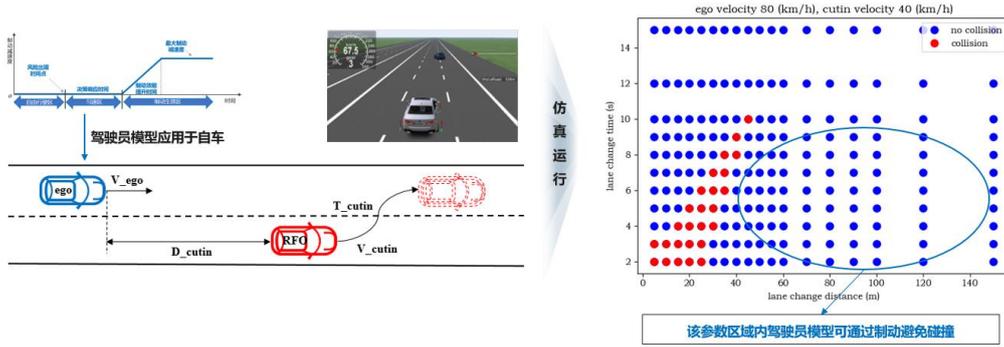


图 3.8-3 中国成熟驾驶员的紧急制动模型避撞可避免参数确定方法

在上述切入场景下，中国成熟驾驶员紧急制动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。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。遍历不同的自车速度及切入车辆车速，可确定不同车速下的中国成熟驾驶员紧急制动模型能够避免碰撞的参数取值范围，如图 3.8-4 所示。

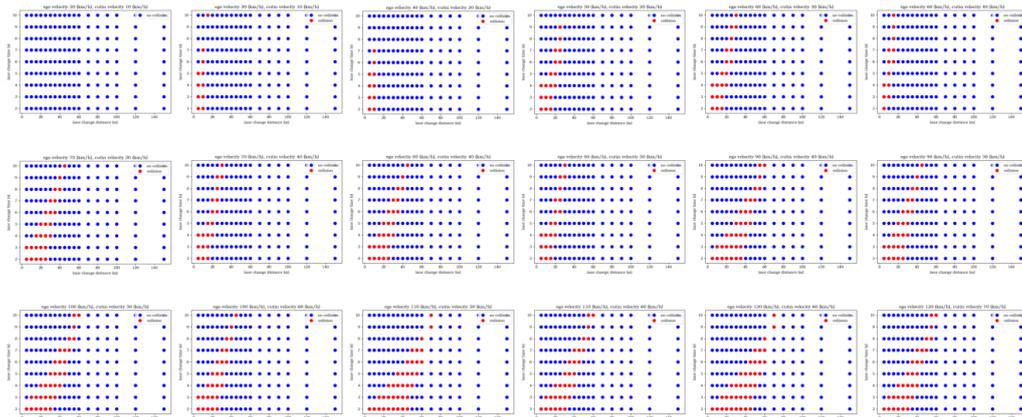


图 3.8-4 不同车速下中国成熟驾驶员的紧急制动模型避撞可避免参数范围

第四章 自动驾驶安全模型展望

随着自动驾驶技术的不断发展和相关法规标准的不断完善，L3 级及以上的自动驾驶汽车将逐渐出现在道路上。自动驾驶系统的安全性如何保障，安全性能如何证明是需要重点考虑的问题。自动驾驶安全模型在保障及证明自动驾驶系统安全性等方面都发挥着积极的作用。

自动驾驶安全模型可以作为自动驾驶系统安全性能证明的参考。通过上文对当前自动驾驶安全模型的分析发现，当前自动驾驶安全模型设计方法及逻辑不相同，模型参数及取值不统一，以此确定的自动驾驶系统安全性证明方法也将不同。因此有以下几点展望。

首先，继续深入研究自动驾驶安全模型及其应用场景，保证模型符合定义明确、指标定量、规则可解释等要求。充分论证安全模型的必要性，并考虑模型在不同场景下的适配性及参数的合理性。

其次，需要考虑及确定自动驾驶安全模型的应用方法。例如，可以标准化统一的安全模型；或者在保证安全模型的合理性被充分证明后，可以利用不同的安全模型，证明自动驾驶系统能力达到所选取的安全模型所对应的安全性。如何评估及证明安全模型的合理性也是需要进一步研究的内容。

最后，需要考虑自动驾驶安全模型的局限性。自动驾驶安全模型一般无法覆盖所有的自动驾驶安全场景，自动驾驶测试本身也无法穷举所有的场景进行测试。如何明确自动驾驶安全模型的适用范围，以及如何挑选关键场景进行测试也是需要进一步研究的内容。

参考文献

1. Navet, N., Simonot-Lion, F. Automotive embedded systems handbook. CRC press, 2017.
2. Chen S, Leng Y, Labi S. A deep learning algorithm for simulating autonomous driving considering prior knowledge and temporal information. Computer - Aided Civil and Infrastructure Engineering, 35(4): 305-321, 2020.
3. SAE J3016_201806, Taxonomy and definitions for terms related driving automation system for on-road motor vehicles, 2018.
https://www.sae.org/standards/content/j3016_201806/.
4. ECE/TRANS/WP.29, Framework document on automated/autonomous vehicles, 2019.
<https://unece.org/DAM/trans/doc/2019/wp29/WP29-177-19e.pdf>.
5. ECE/TRANS/FRAV, Approach to derive verifiable performance requirements for accident avoidance, 2023.
<https://wiki.unece.org/pages/worddav/preview.action?fileName=FRAV-42-04.pdf&pageId=215680066>
6. ECE/TRANS, UN Regulation No. 157 - automated lane keeping systems (ALKS), 2021.
<https://unece.org/transport/documents/2021/03/standards/un-regulation-no-157-automated-lane-keeping-systems-alks>.
7. Shalev-Shwartz S, Shammah S, Shashua A. On a formal model of safe and scalable self-driving cars. arXiv preprint arXiv:1708.06374, 2017.
8. Shashua A, Shalev-Shwartz S, Shammah S. Implementing the rss model on nhtsa pre-crash scenarios. tech. rep, 2018.
https://static.mobileye.com/website/corporate/rss/rss_on_nhtsa.pdf
9. Nist ́ D, Lee H L, Ng J, et al. An introduction to the safety force field. NVIDIA White Paper, 2019.
<https://www.nvidia.com/content/dam/en-zz/Solutions/self-driving-cars/safety-force-field/an-introduction-to-the-safety-force-field-v2.pdf>
10. Mattas K, Makridis M, Botzoris G, et al. Fuzzy surrogate safety metrics. 2019 6th International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems (MT-ITS), IEEE: 1-11, 2019.
11. Mattas K, Ciuffo B. Fuzzy-logic based performance model for motorway traffic scenarios. EC JRC, 2021.
<https://wiki.unece.org/pages/worddav/preview.action?fileName=FRAV-12-06.pdf&pageId=123668202>
12. 全国汽车标准化技术委员会, 面向智能网联汽车的成熟驾驶模型白皮书, 2023.
<http://www.catarc.org.cn/upload/202401/24/202401241352452746.pdf>