

面向智能网联汽车的成熟驾驶员转向 模型及标准化研究

一、研究背景及概述

智能网联汽车（ICV）是未来汽车产业发展的关键方向之一，已成为全球各国政府和汽车产业的重要战略重点。美国、欧洲、日本等国家和地区相继出台了一系列政策法规，支持汽车智能网联化的技术发展和应用。我国也将智能网联汽车列为战略性发展领域，计划到 2025 年，L2 级和 L3 级智能网联汽车的渗透率达到 50%。随着技术的不断进步和消费者需求的变化，L2 级辅助驾驶功能已经逐渐成为许多车辆的标配，标志着智能网联汽车逐步进入大众市场。

转向是车辆驾驶行为中的典型行为，具有较高的危险性和复杂度。转向行为是 L2 级及更高级别自动驾驶实现过程中的关键功能，对于加强道路安全、提升交通效率也有着十分重要的影响。为保证具备换道辅助或自主换道功能的车辆能够安全稳定的在真实道路环境下行驶，需要对该功能进行标准化研究，明确其基本安全相关功能与性能要求。根据正风险平衡的观念，对于智能网联汽车而言，无论是强制换道还是自主换道，人类成熟驾驶员换道模型都将是开发、测试、检验、评价等环节中的重要参考。

目前，国际上已有多个标准法规涉及智能网联汽车的转向模型（特别是换道行为），其中较为代表性的包括 ISO 34502、UN/ECE R79、UN/ECE R157 和 IEEE 2846 等。这些标准规定了针对熟练且谨慎的驾驶员所设计的操控模型，并要求智能网联汽车能够达到与人类驾驶员相当的避碰能力。然而，现有的标准法规在研究上存在一些局限性，特别是在成熟驾驶员转向模型的研究上。现有标准未能充分考虑成熟驾驶员在紧急情境下行为的差异，且所提出的场景类型较少，未能全面刻画驾驶员的换道行为。这些不足限制了现有标准的适用范围，特别是在我国道路交通环境下，国外基于不同交通情境和驾驶员行为数据所建立的模型与我国实际情况存在差异，无法为国内智能网联汽车的研发和标准制定提供切实有效的支持。

因此，针对以上问题，本项目利用虚拟仿真数据，对交通场景和转向行为进行准确刻画。通过对场景和行为数据的相关性分析，结合中国的实际情况，提取符合国内需求的换道模型及参数范围，为我国智能网联汽车技术的研发、测试和标准化提供理论依据和数据支持。

二、研究内容

3 转向模型建立方法

基于对国内外相关标准的现状分析，参考已有标准内容，根据国内法律法规要求以及厂商的需求建议，本章从场景制

定、数据采集与处理和参数标定等方面介绍驾驶员模型的构建过程。

3.1 典型场景

前车紧急制动场景：模拟在高速行驶状态下，遇到突发障碍物或紧急情况时的反应，要求在最短时间内完成制动。具体如下：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 60 km/h。自车与前车车速维持在约 60 km/h。自车稳定跟随前车行驶一段时间。当达前车到达预设地点时，前车以最大制动压力制动至静止。

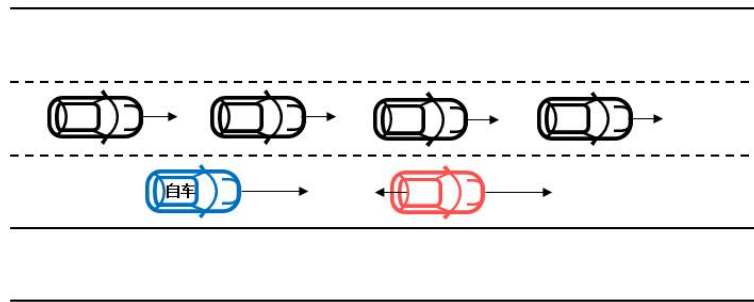


图 3.1 前车紧急制动场景示意图

邻车低速紧急切入场景：模拟其他车辆从旁边车道切入，驾驶员需要进行避让，保证不发生碰撞。具体如下：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 40 km/h。自车与前车车速维持在约 60 km/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。

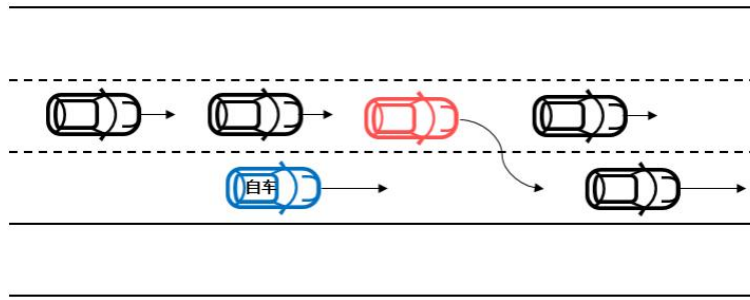


图 3.2 邻车低速紧急切入场景示意图

前车紧急切出后遇静止车场景：模拟车辆前方出现障碍物，驾驶员需要根据环境进行车道变换，避免障碍物。具体如下：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 40 km/h。自车与前车车速维持在约 60 km/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。

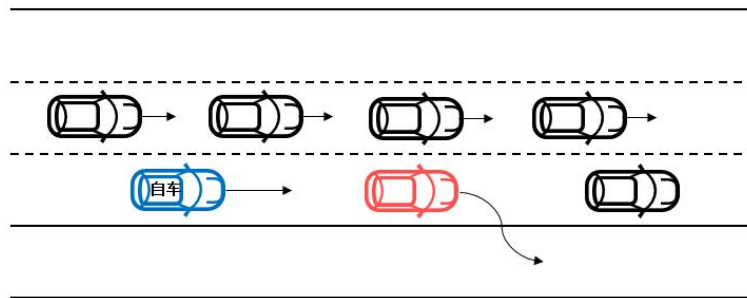


图 3.3 前车紧急切出后遇静止车场景示意图

3.2 数据采集以及硬件配置

数据采集硬件配置采用了 Prescan 与 MATLAB 联合仿真环境，并结合罗技方向盘模拟器进行实时数据采集与分析。此配置充分利用 Prescan 作为仿真平台，模拟车辆在不同驾

驶场景中的行为，MATLAB 作为数据处理与分析工具，能够高效地从仿真平台中提取并分析多维度的驾驶行为数据。同时，通过罗技方向盘模拟器，能够在驾驶员操作和车辆反应之间建立实时反馈机制，进一步提升数据的真实感与精确度。

通过多名驾驶员在仿真环境中进行不同工况下的驾驶测试，实时采集包含车辆速度、转向角、加速度、制动踏板、加速踏板等信号的数据。采集频率为 100Hz，数据以相对时间轴为基准进行存储。

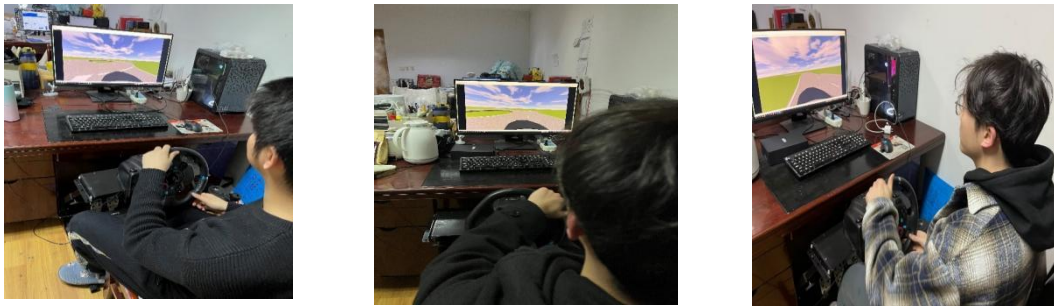


图 3.4 多名驾驶员进行驾驶测试

在整个数据采集过程中，所有硬件设备之间通过高速数据总线进行连接与同步。Prescan 和 Matlab 通过专用的接口实现数据的实时交互，而罗技方向盘模拟器则与 Prescan 仿真环境建立实时反馈机制。每个场景下的数据采集都包括多个参数的实时同步，确保所有数据反映的是驾驶员操作与车辆响应的准确时刻。

对于数据实验设置方面，与实验结果强相关的参数，如路面附着系数，最大制动减速度等参数设置如下。其余参数如车辆动力学模型、他车物理模型、方向盘力反馈、驾驶舱

力反馈等，均采用驾驶模拟平台默认设置。

(1) 环境条件设定：由于希望测试在良好路况下的紧急驾驶员模型，因此天气选择日间晴天无风。

(2) 路面附着系数设定：路面附着系数的设定参照日本、欧盟等实验以及法规规定设定，设置为 1.0。当前大多数城市路面情况良好，在非湿地、结冰等特殊天气情况下，均能够达到 1.0 的路面附着系数。

(3) 最大制动减速度设定：参考市面上现有车型在良好路面上的最大制动减速度测试结果。由于出色的轮胎性能，近年来推出的车型一般最大制动减速度均能达到至少 -10 m/s^2 ，部分运动型轿车甚至能够在瞬时达到 -12 m/s^2 。为保证本实验结果的普适性，选取普通车型的最大制动减速度为实验设置，即 -10 m/s^2 。经过实验校正，在单个轮胎最大制动力为 340 N 时，模拟器中最大制动减速度约为 -10 m/s^2 。

(4) 制动力曲线：各品牌车辆的制动力曲线趋势不尽相同，没有统一的参考标准。本实验中的踏板行程-制动力曲线设定参照 SCANeR 默认曲线，为三段直线拟合而成，踏板行程越高，制动力增加越慢，符合一般车辆制动力曲线的规律。

3.3 仿真数据采集过程

受试人员选取至少 15-20 人，均为驾龄 3 年以上，驾驶里程超过 30000 km，年龄、职业、婚否，驾驶风格为包含激

进、一般和柔和三种类型，判断力、反应力较佳的成熟驾驶员。

单个驾驶员被试实验时长总计约 15 分钟，包含问卷调研和实验过程，具体如下：

(1) 提前联系被试驾驶员，填写标准驾驶员驾驶习惯表。

(2) 介绍驾驶模拟仪操作使用流程，演示方向盘、制动踏板、加速踏板等装置的位置。

(3) 开启试用场景，让驾驶员自由在驾驶模拟仪中驾驶 2 分钟左右，直至其认为自己已经熟悉各类操作。

(4) 打开实验场景，顺序为：邻车切入场景（有限速）-转向避险、前车制动场景-转向避险、前车切出场景-转向避险。

(5) 开始正式实验，讲述驾驶场景要求，包括：初始时保持在当前车道行驶，车速不超过 70 km/h，不低于 50 km/h，该四个场景可以采用制动结合转向的方式避险等。

(6) 记录每位驾驶员在实验过程中的异常行为，分为以下几类：严重碰撞、轻微碰撞、侧翻。

(7) 导出相关数据，进行后续分析。

3.4 关键参数提取和标定

风险产生点前、后各 5 s 的数据作为有价值的切片数据分析。

相关试验数据按照以下要求进行滤波处理:

- (1) 位置和速度采用原始数据, 不进行滤波;
- (2) 加速度采用 6 阶巴特沃斯滤波器过滤, 截止频率为 10 Hz;
- (3) 横摆角采用 6 阶巴特沃斯滤波器过滤, 截止频率为 10 Hz;
- (4) 方向盘转角采用 6 阶巴特沃斯滤波器过滤, 截止频率为 10 Hz。

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 3.5 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、手部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。

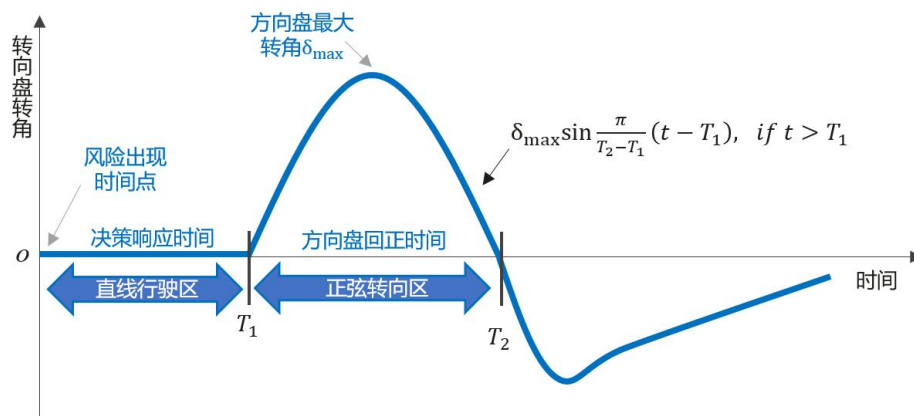


图 3.5 方向盘转角随时间变化曲线

转向行为是指驾驶员通过转向盘控制车辆的转向角度, 进而影响车辆的轨迹和行驶方向。转向行为的标定可以帮助优化自动驾驶系统的转向控制, 使其能够更精确地模拟和响

应驾驶员的行为。对于紧急转向避险场景，基于驾驶模拟器导出数据并分析三个主要参数：风险出现时间、方向盘最大转角、方向盘回正时间。

对驾驶员自车的方向盘转角数据进行平滑和过滤，剔除由于碰撞或系统偏移导致的异常数据点。选择风险产生点前后各 5 秒的数据作为有效数据片段。在该时间窗内，找出风险点发生后，方向盘转角最大的一段数据。选取切片数据中转角最大的 10 帧取平均值，作为方向盘最大转角 δ_{\max} 的估计。计算方式如下：

$$\delta_{\max} = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} \delta_i \quad (3.1)$$

其中， δ_i 为每帧数据中的转角。通过对前后各 5 秒的数据进行选择，能够最大限度排除干扰数据，确保计算得到的最大转角具有代表性。

为了消除实际行驶中方向盘产生的轻微扰动带来的误差，假设在转向开始与即将转向时转角提升速率相同，使用较高转角时的时刻反推，以实现鲁棒抗干扰的方向盘回正时间计算，具体如下：找到第一帧转角到达最大转角 20% 的时刻记为 t_{20} ，第一帧转角到达最大转角 15% 的时刻记为 t_{15} ，则近似的方向盘转向开始的时刻 t_1 计算如式：

$$t_1 = t_{15} - 3 \times (t_{20} - t_{15}) \quad (3.2)$$

其中， t_1 为方向盘转向开始时刻，单位为秒 (s)； t_{15} 为方向盘转角第一次达到方向盘最大转角 15% 时刻，单位为秒

(s); t_{20} 为方向盘转角第一次达到方向盘最大转角 20% 时刻, 单位为秒 (s)。

同理, 找到第一帧转向角回正至最大转向角 20% 的时刻记为 t_{20r} , 第一帧转向角回正至最大转向角 15% 的时刻记为 t_{15r} , 则近似的方向盘回正时刻 t_2 计算如式:

$$t_2 = t_{20r} + 4 \times (t_{15r} - t_{20r}) \quad (3.3)$$

其中, t_2 为方向盘回正时刻, 单位为秒 (s); t_{15r} 为方向盘转角回正至方向盘最大转角 15% 时刻, 单位为秒 (s); t_{20r} 为方向盘转角回正至方向盘最大转角 20% 时刻, 单位为秒 (s)。

方向盘回正时间 t 计算如式:

$$t = t_2 - t_1 \quad (3.4)$$

其中, t 为方向盘回正时间, 单位为秒 (s); t_1 为方向盘转向开始时刻, 单位为秒 (s); t_2 为方向盘回正时刻, 单位为秒 (s)。

仿真标定共计完成紧急制动工况、紧急切入工况、紧急切出后遇静止前车工况三类工况的参数标定, 每位驾驶员仅进行一次标定工况测试, 确保场景参数的随机性。

(1) 前车紧急制动场景

被测车辆在直道内跟随目标车辆匀速行驶, 速度稳定后目标车辆急减速停车, 试验场景如图 3.6 所示, 试验工况如表 3.1 所示。

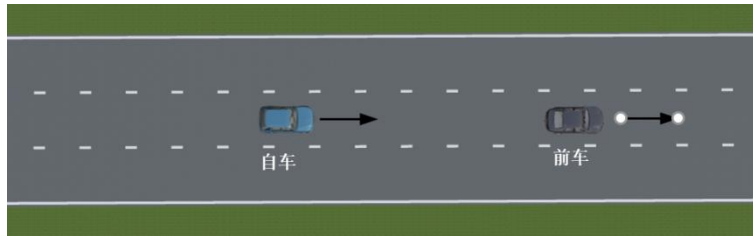


图 3.6 标定前车紧急制动场景图

表 3.1 前车紧急制动工况表

序号	自车初始车速 (km/h)	前车初始车速 (km/h)	第一次试验, 前车开始制动时, 后保险杠中心与自车前保险杠中心的纵向距离 d_{x0} (m)	前车制动减速度 (m/s^2)
1	40	40	10	-6
2	50	50	12	-6
3	60	60	15	-6

标定步骤如下:

1) 前车与自车按表 1 中速度匀速行驶, 速度偏差不大于 ± 2 km/h, 跟随距离为 d_{x0} ;

2) 自车稳定跟随前车至少 3 s 后, 前车择机以最大制动减速度进行制动, 应保证前车在 0.6 s 内达到要求的制动减速, 之后以要求的制动减速匀减速至停止;

3) 自车驾驶员依据实际情况, 仅可通过在本车道内操作车辆避免碰撞, 不可通过转向躲避, 但可以在制动过程中执行使车辆维持在本车道内的转向调整;

4) 逐步调整初始跟车距离, 确保自车与前车相对静止后, 纵向距离在 0m ~ 1m, 跟车距离调整方法如下:

令两车静止后, 纵向距离为 d_{x0} , 试验终止条件为前车与自车均静止时 $d_{x0} \leq 1m$; 当 $d_{x0} > 1m$ 时, 令前车开始制动时, 则以 d_{x0}

重新进行测试， $d_{x0'}$ 计算方式如下：

$$d_{x0'} = d_{x0_last} - d_{x0_olast} + 0.5 \quad (3.5)$$

其中， d_{x0_last} 为上一次测试过程中，自车开始制动时，自车与前车纵向距离； d_{x0_olast} 为上一次测试过程中，两车静止时，自车与前车纵向距离；

当自车与前车发生碰撞时，以 $d_{x0'}$ 重新进行测试， $d_{x0'}$ 计算方式如下：

$$d_{x0''} = d_{x0last} + v_{ep}^2 / (2 \times A_{ep}) + 0.5 \quad (3.6)$$

其中， v_{ep} 和 A_{ep} 分别为碰撞时的自车速度和自车减速度；直至满足 $d_{x0} \leq 1m$ ，记录此时的两车距离为 d_{x0_now} ；

5) 每位驾驶员均完成上述过程，采集自车速度、自车加速度、自车航向角、自车制动踏板状态、自车相对前车纵向距离，前车减速度，碰撞情况。

(2) 邻车低速紧急切入场景

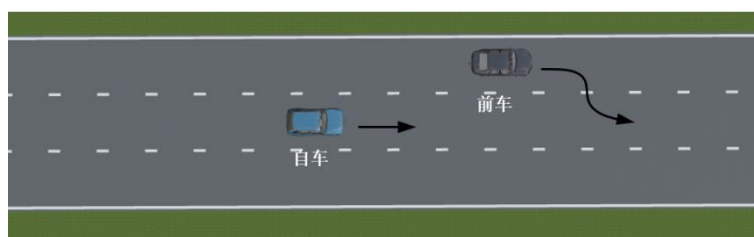


图 3.7 邻车低速紧急切入场景图

被测车辆在直道内匀速行驶，相邻车道行驶的目标车辆忽然并入至被测车辆自车前方行驶。试验场景如图 3.7 所示，试验工况见表 3.2。

表 3.2 邻车低速紧急切入工况表

自车初始车速 (km/h)	前车初始车速 (km/h)	前车在相邻车道内的位置	前车开始换道时与自车纵向距离 d_{x0} (m)	前车开始切入时, 车辆最左侧边缘与自车最右侧边缘横向距离 (m)	前车换道方向	前车横向速度 (m/s)
30	15	右侧	0 ~ 5	1.6	向右	2
40	5		0 ~ 20			2
50	30		0 ~ 10			2
70	45		0 ~ 15			2

标定步骤如下:

1) 前车以表中速度在本车右侧相邻车道内行驶, 速度偏差不大于 ± 2 km/h;

2) 自车后以表中速度在本车道内行驶, 速度偏差不大于 ± 2 km/h, 并位于前车后方;

3) 当自车与前车纵向距离达到表中要求时, 前车向右以表中规定的横向速度切入至本车正前方;

4) 自车驾驶员依据实际情况, 仅可通过在本车道内操作车辆避免碰撞, 不可通过转向躲避, 但可以在制动过程中执行使车辆维持在本车道内的转向调整;

5) 逐步调整切入时刻自车与前车的纵向距离, 确保本车紧急减速至速度与前车相等时, 两车纵向距离在 0m ~ 1m, 调整方法如下:

令两车速度相等时, 纵向距离为 d_{x0} , 试验终止条件为自车速度降低至与前车速度相等时, $d_{x0} \leq 1m$; 当 $d_{x0} > 1m$ 时, 令前车开始切入时, 后保中心与自车前保中心的纵向距离为 d_{x0} ,

则以 $d_{x0'}$ 重新进行测试， $d_{x0'}$ 按照式 (3.5) 计算：

当自车与前车发生碰撞时，以 $d_{x0''}$ 重新进行测试， $d_{x0''}$ 计算方式如下，令前车速度为 v_{op} ：

$$d_{x0''} = d_{x0_last} + (v_{ep}^2 - v_{op}^2) / 2 \times A_{ep} + 0.5 \quad (3.7)$$

其中， v_{op} 为前车速度；

直至满足 $d_{x0} \leq 1m$ ，记录此时的两车距离为 d_{x0_now} ；

每位驾驶员均完成上述过程，采集自车速度、自车加速度、自车航向角、自车制动踏板状态、自车相对前车纵向距离、自车相对前车横向距离、前车减速度、前车航向角、碰撞情况。

(3) 前车紧急切出后遇静止车场景

在直道内自车跟随前车 1 行驶，所在车道前方有静止前车 2，前车 1 驶离本车道，试验场景如图 3.8 所示，试验工况见表 3.3。

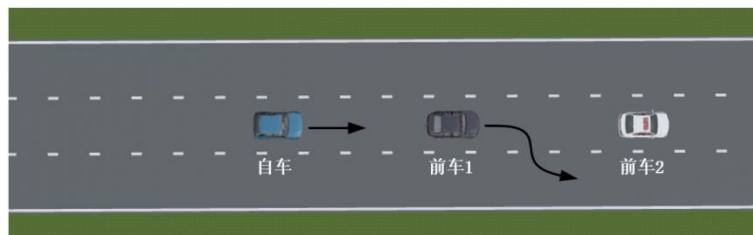


图 3.8 标定前车紧急切出后遇静止车场景图

表 3.3 前车紧急切出后遇静止车工况表

自车跟随前 车 1 距离	前车 1 行驶 速度 (km/h)	前车 1 开始换 道时与前车 2	前车 1 换 道方向	前车 1 速度 稳定时与前
-----------------	----------------------	---------------------	---------------	------------------

(m)		纵向距离 (m)		车 2 距离 (m)
8	30	≤ 3 或尽可能小	向右	> 30
10	40	≤ 3 或尽可能小	向右	> 50
12	50	≤ 3 或尽可能小	向右	> 80
15	60	≤ 3 或尽可能小	向右	> 80

标定步骤如下:

1) 前车 2 静止于本车道前方, 自车与前车相同速度匀速行驶, 速度偏差不大于 $\pm 2 \text{ km/h}$, 车速与相对距离见表;

2) 当前车 1 与前车 2 距离达到表中要求时, 前车 1 向右以 2 m/s 或更快的速度切出;

3) 自车驾驶员依据实际情况, 仅可通过在本车道内操作车辆避免碰撞, 不可绕行或者紧急转向躲避, 但可以在制动过程中执行使车辆维持在本车道内的转向调整;

4) 逐步调整自车与前车 1 初始跟车距离, 确保本车紧急减速至停车时, 与前车 2 纵向距离在 $0\text{m} \sim 1\text{m}$, 调整方法如下:

令自车静止后, 与前车 2 纵向距离为 d_{x0} , 试验终止条件为自车静止后, 与前车 2 纵向距离, $d_{x0} \leq 1\text{m}$; 当 $d_{x0} > 1\text{m}$ 时, 令前车 1 开始切出时, 前保中心与前车 2 后保中心的纵向距离为 d_{x1} , 则以 d_{x1} 重新进行测试。

当自车与前车 2 发生碰撞时, 以 d_{x1} 重新进行测试, 直至

满足 $d_{x0} \leq 1m$ ，记录此时的两车距离为 d_{x0_now} ；

每位驾驶员均完成上述过程，采集自车速度、自车加速度、自车航向角、自车制动踏板状态、自车相对前车 1 纵向距离、自车相对前车 1 横向距离、前车 1 减速度、前车 1 航向角、自车相对前车 2 纵向距离、自车相对前车 2 横向距离、前车 2 减速度、前车 2 航向角、碰撞情况。

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。对于转向盘回正时间与转向盘最大转角，剔除发生碰撞的样本后再按上述方法求平均，最终得到试验结果。

3.5 结果分析与总结

表 3.4 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	前车紧急切出后遇静止车	27	67
	邻车切入	20	
	前车制动	20	

本轮转向模型标定共采集 53 位驾驶员，仿真标定测试用例结果见表 3.4，右转向避撞标定结果见表 3.5。

表 3.5 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	前车切出后 遇静止车	0.99	1.60	-35
	邻车切入	0.56	1.61	-57
	前车制动	1.18	2.37	-45
汇总平均值		0.91	1.86	-46

综上，具有中国特色的成熟驾驶员的紧急转向模型中，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，最终确定的紧急转向模型结果见表 3.6。

表 3.6 中国成熟驾驶员紧急转向模型参数标定结果

	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)	转向盘回正时间 (s)	转向盘最大转角 (°)
前车切出后遇 静止车	0.99	1.58	-54
邻车切入	0.56	1.17	-94
前车制动	1.18	0.71	-140

本部分内容节选自该课题研究报告，非全部内容，仅供参考了解。

