

Impact of Insufficient Brake Assist Force on Vehicle Controllability in Dense Traffic Flow

Pengyong GUO¹, Zhihao SONG¹, Dejun XIE¹, Qiao WANG¹, Fengfan JI¹, Haidong CHEN¹

¹ Guangzhou Automobile Group Co., Ltd., Guang Zhou, China

Email: guopengyong@gacrnd.com, songzhihao@gacrnd.com, xiedejun@gacrnd.com, wangqiao@gacrnd.com, jifengfan@gacrnd.com, chenhaidong@gacrnd.com

Abstract: The existing controllability test methods for braking systems are mainly carried out on real vehicles in closed filed, which do not consider the driver's reaction to the dynamic driving environment, and there are high risks in highway scenes. This paper proposes a controllability evaluation method based on simulation testing and designs a driver-in-the-loop simulation system for functional safety testing. Through the verification, objective evaluation results of vehicle controllability after braking assistance decays to different degrees in dense traffic flow in highway and urban scenes are obtained. And it is also found that under the same degree of braking assistance attenuation, the higher the driving speed, the worse the controllability.

Keywords: Functional Safety; Controllability; Diver-in-the-Loop Simulator; Dense Traffic Flow; Braking System

密集交通流下制动助力衰减对车辆可控性的影响

郭鹏勇¹, 宋之豪¹, 谢德君¹, 王 乔¹, 籍奉凡¹, 陈海东¹

¹ 广州汽车集团股份有限公司, 广州, 中国, 510000

Email: guopengyong@gacrnd.com, songzhihao@gacrnd.com, xiedejun@gacrnd.com, wangqiao@gacrnd.com, jifengfan@gacrnd.com, chenhaidong@gacrnd.com

摘要:现有的制动系统可控性测试方法主要是封闭试验场实车测试, 忽略了驾驶员对动态驾驶环境的反应, 且高速场景测试存在较高危险性。本文提出一种基于仿真测试的可控性评价方法, 设计了一套用于功能安全测试的驾驶员在环仿真系统, 通过试验分别得到了城区和高速场景密集交通流下制动助力出现不同程度衰减后, 车辆可控性的客观评价结果。同时发现制动助力衰减相同的情况下, 行驶速度越高, 可控性越差。

关键词: 功能安全; 可控性; 驾驶员在环仿真系统; 密集交通流; 制动系统

1 引言

随着电气化、网联化和智能化的快速发展, 电子电气零部件在整车中所占比重不断提高, 随之而来的电子电气系统故障导致的风险也在日益增加。电子电气系统的快速发展及应用使得功能安全问题日益凸显, 传统领域如制动领域在功能安全方面受到的影响也不容忽视。

可控性 (Controllability, C) 是 ISO 26262^[1]功能安全标准中危害分析和风险评估 (Hazard analysis and risk assessment, HARA) 的关键概念, 是指在危害事件发生时, 通过所涉及人员的及时反应避免特定伤害或者损伤的能力, 是得出整车安全目标 ASIL (Automotive safety integrity level, ASIL) 的三个评价维度之一。在 ISO 21448^[2]预期功能安全标准中也将可控性作为关键评价指标。功能安全标准 ISO 26262^[1]中可控性从 C0 到 C3 分为 4 个等级, 如表 1 所示。

Table 1. Classes of controllability

表 1. 可控性分级

可控性等级	C0	C1	C2	C3
描述	可控	简单可控	一般可控	难以控制或不可控

同时 ISO 26262^[1]在附录 B 中给出了打分参考，部分如表 2 所示。

Table 2. Examples of possibly controllable hazardous events by the driver or by the persons potentially at risk

表 2. 驾驶员或者潜在涉险人员可能控制的危害事件示例

可控性等级	C0	C1	C2	C3
描述	可控	简单可控	一般可控	难以控制或不可控
驾驶因素和场景	常规可控	超过 99% 的普通驾驶员或交通参与者能够避免伤害	90% 到 99% 普通驾驶员或交通参与者能够避免伤害	不到 90% 普通驾驶员或交通参与者能够避免伤害
制动失效的示例	——	——	——	躲避行驶路径上的物体

虽然标准提供了分级和参考，但是较为简单和笼统，缺乏具体方法，在实际开发中往往很难清晰判断，相信不少的功能安全从业者在实际开发中对如何合理的评定可控性都存在一些的疑问。近些年，产品层级国标中引入功能安全已经是大势所趋，如正在修订中的制动国标 GB21670^[3]全面引入功能安全相关的要求。所以，研究制动助力衰减对车辆可控性的影响势在必行。

2 可控性测试环境

行业内对如何通过测试进行可控性的评级进行了很多探索。Maki Kawakoshi 等人在实车环境开展了制动可控性的研究^[4]，通过不同制动助力下的驾驶员实车表现，得出了可控性相关结论，试验环境为 3.5 米宽的试验场道路，并使用固定的障碍物代表前车。这种封闭试验场实车测试，其测试场地有限且单一，同时用固定障碍物来替代实际交通流，忽略了驾驶员对动态驾驶环境的反应。因此得到的可控性评级可用于可控性相对高低的比较，而无绝对值意义。德国联邦经济事务和能源部资助的 UR:BAN 项目的研究成果中^[5]，对比了四种测试环境的差异，认为动态驾驶模拟器测试和车辆在环测试比静态驾驶模拟器测试和封闭试验场实车测试产生的结果更具意义，对于可控性的研究，驾驶模拟器研究中产生的结果往往是更保守的。静态驾驶模拟器虽容易搭建和执行测试用例，但其在驾驶员感知速度和距离方面有天然的缺陷，其测试结果仅适合用于得出可控性评级高低的相对结论而无法使用其绝对值作为参考。此外，公开真实道路的测试虽然最为真实，但实验过程危险性高，一些操作不符合道路交通安全法律法规，不能作为制动可控性测试的主流方式开展。因此，选择动态驾驶模拟器应用于可控性研究，有利于得出具有参考价值和保守的结果。

研究动态驾驶环境下的可控性贴合实际交通环境，对于产品设计是最具指导意义的。随着汽车保有量的不断增加，尤其在一线城市，路面车辆密度越来越大，车辆行驶的跟车时距在变小，功能安全行业内普遍认为有必要研究密集交通流下的可控性评级。欧洲道路运输研究咨询委员会（CEDR）的调查表明^[6]，欧洲各国在法律法规中对跟车时距都做出了规定，荷兰和瑞典明确规定，当跟车时距小于 1 秒时将面临罚款，而更为严重的违规将会面临驾照吊销。考虑在实际中驾照吊销并非广泛事件，故参考该调查中面临罚款的临界时距，1 秒跟车时距被认为是符合真实驾驶环境的密集交通流。

综合考虑行业已有研究和当前迫切需求，本文基于专门为功能安全设计的动态驾驶模拟器，即驾驶员在环仿真系统，研究在密集交通流下制动助力衰减对车辆可控性的影响，较好的解决了目前的行业痛点。同时我们

在测试环境中加入贴近实际驾驶环境的密集交通流，以得出在实际驾驶交通流下的可控性结论。本研究方法可以拓展到整车所有动力学相关的可控性测试领域，为行业内开展可控性测试提供了非常好的思路和参考。

3 总体方案

3.1 驾驶员在环仿真系统

驾驶员在环仿真系统由硬件平台和软件工具链组成。硬件平台由多自由度的运动平台（含驾驶舱）、带力反馈的方向盘、加速踏板、制动踏板、图形工作站、可视化设备等组成。多自由度运动平台支持横、纵、垂向运动。软件工具链由 Carsim、Matlab、场景仿真软件和交通流仿真软件等组成。如图 1 所示。

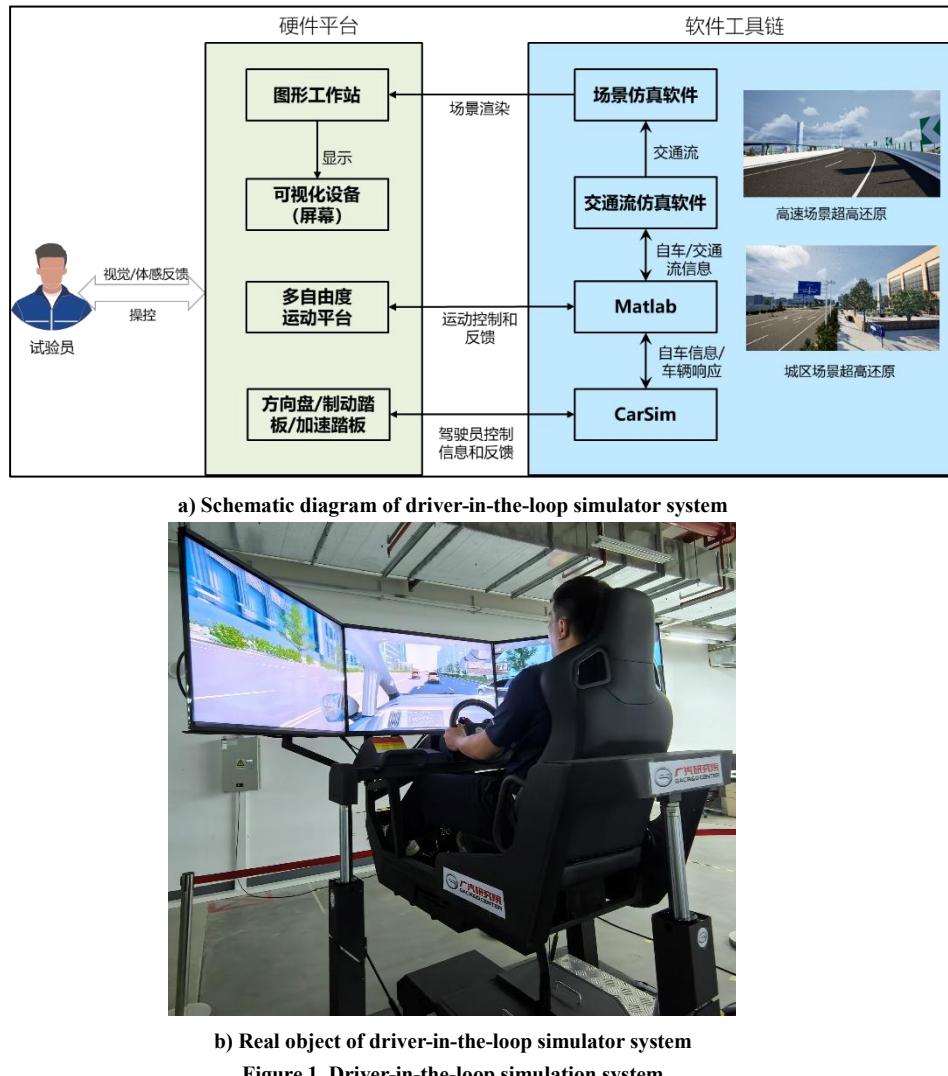


Figure 1. Driver-in-the-loop simulation system

图 1. 驾驶员在环仿真系统

3.2 仿真场景搭建

为使测试接近于实车的效果，从视觉、听觉、触觉 3 个驾驶员感受维度出发，在道路基础设施、交通流、车辆动力学模型、故障模型、故障触发方式等方面联合仿真，尽可能还原真实的场景。

在场景仿真软件中还原了广州某高速路段和上海某区域城市道路，同时还原道路中各类交通标识、视野范

围内建筑物、信号灯等。

基于交通流仿真软件设计了随机动态密集交通流^[7]，交通流中车辆可实现变道，按设定速度匀速行驶，按设定减速度制动，制动时可模拟制动灯正常点亮或制动灯失效无法点亮。

基于广汽传祺 E9 动力学参数，在 CarSim 中建立了动力学模型，经多项试验比对校准，其中制动试验的对比校准数据如图 2 所示。纵向加速度存在一定误差，是由于 ABS(Antilock Brake System, ABS)介入时车辆加速度会出现持续的波动，实车采集加速度的惯性传感器存在惯性误差，导致采集的数据振幅较大。经专家评定，驾驶员在环仿真系统精度可满足仿真试验要求，与实车误差在可接受范围内。

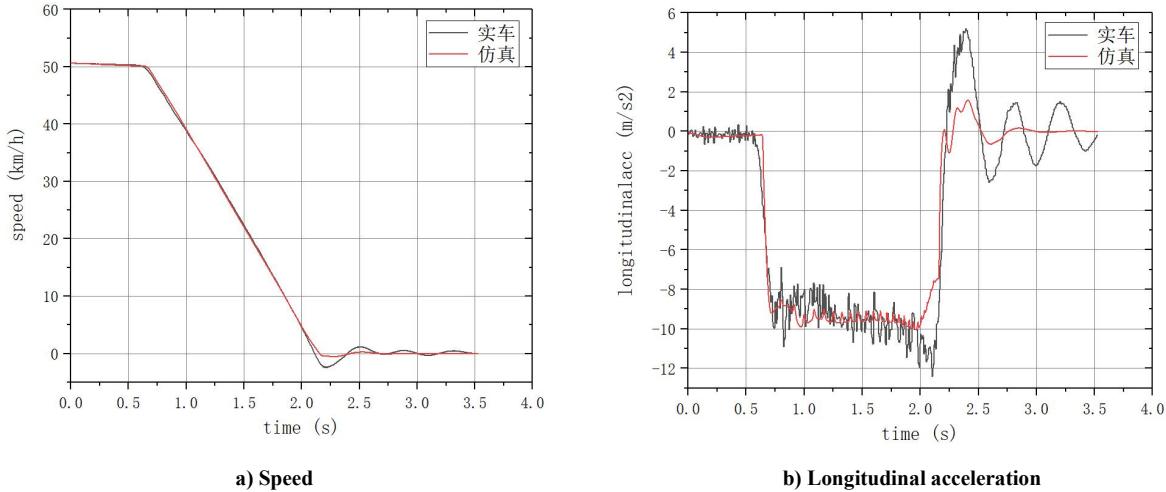


Figure 2. Contrast calibration data

图 2. 对比校准数据

基于 Matlab 建立了制动力衰减的故障模型，模拟实车上故障表现，经专业人员校准，确认对故障的主观感受与实车一致。

故障触发采取随机方式，车速和跟车时距满足要求时，可随机触发故障，模拟实际驾驶过程中故障产生的随机性。

另外，多自由度运动平台可以模拟车辆横摆、侧倾和俯仰姿态。系统可模拟自车胎噪、风噪、他车发出的噪声等。

参与试验人员普遍认为驾驶操控接近于实车感受，画面真实。但仿真环境仍存在一定局限性，比如前期研究中发现少数测试人员会感到眩晕^{[8][9]}，速度感较差^[10]。

3.3 制动可控性影响因素

前车车速 V_0 ，本车以同样速度跟随前车匀速行驶，跟车时距 t_0 ，前车以减速度 a 紧急刹车，本车驾驶员识别到风险后，通过踩下制动踏板来刹车以避免碰撞。

前车从初始速度 V_0 开始，以较大减速度 $a=6.43\text{m/s}^2$ 行驶直到停止行驶过的距离 S_f 为：

$$S_f = \frac{1}{2a} V_0^2 \#(1)$$

本车从前车开始减速起到本车停止的总行驶距离 S_{total} 为：

$$S_{total} = S_r + S_{bsr} + S_{brk} \#(2)$$

S_r 是从前车开始减速起到本车驾驶员踩下制动踏板之前，即驾驶员反应时间 t_r 内，本车匀速行驶过的距离为：

$$S_r = V_0 t_r \#(3)$$

S_{bsr} 是驾驶员踩下制动踏板，本车开始制动到制动减速度达到最大时行驶过的距离：

$$S_{bsr} = f(t_{bsr}, F, v_0) \#(4)$$

F 表示系统的制动特性。

t_{bsr} 表示从驾驶员踩下制动踏板到车辆开始全力制动的时间。

S_{brk} 是本车以最大减速度 a_{Max} 行驶直到停止行驶过的距离：

$$S_{brk} = \frac{1}{2a_{Max}} v_0^2 \#(5)$$

S_0 是跟车距离：

$$S_0 = v_0 t_0 \#(6)$$

当剩余安全距离 $S_0 + S_f - S_{total} > 0$ 时，即两车停止时相对纵向距离大于 0，表示不发生碰撞，判定驾驶员可控。反之则判定驾驶员不可控。

通过以上理论分析，车辆制动可控性的关键因素为：

1) 车速

本研究选取两类典型场景，高速跟车场景，车速范围 100-110km/h；以及城区跟车场景，车速范围 60-65 km/h。

2) 车辆制动助力性能 a_{Max}

制动助力衰减会对车辆减速性能产生非常显著的影响，使得驾驶员在踩制动踏板时，需施加更大的力以及更长的时间才能达到预期的制动效果。在密集交通流中，车间距较小，需要及时有效的减速来避免追尾等事故。然而，由于制动助力衰减，车辆的减速性能下降，制动距离大幅增加。驾驶员可能无法在预期的距离内使车辆停下来，极大地降低了车辆在密集交通流中的可控性。

3) 驾驶员反应与操作时间

驾驶员反应通常包括识别风险、决策和操作三个阶段^{[11][12]}。在识别风险阶段，驾驶员通过视觉、听觉等感官接收周围环境信息和交通流动变化，比如前车制动灯亮或与前车的车距在缩短；在决策阶段决定采取何种行动来避免或减轻风险，不断地对周围车辆的行为动态进行判断，以决定何时刹车、何时加速、何时变道等；在操作阶段，执行决策，如松油门、踩刹车、转向等。如果前车制动灯失效，不能及时察觉前车的制动行为，将进一步延长了驾驶员反应时间，增加碰撞风险，如图 3。影响驾驶员反应时间的因素还有车速等，如 Atif Mehmood 等研究^[13]认为驾驶员反应时间和车速相关。

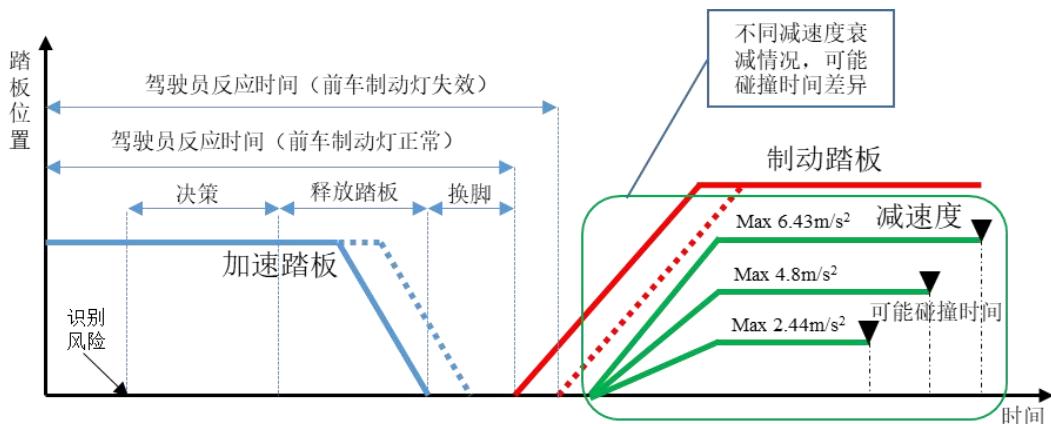


Figure 3. Driver response model

图 3. 驾驶员反应模型

4) 跟车时距

不同跟车时距，驾驶员在识别到风险后，采取的制动时机和踩制动踏板的速度和深度是不同的。本文选择在密集交通流下跟车时距为 1s。

综上所述，跟车时距、制动助力衰减程度、驾驶员反应时间、故障发生时的车速等，都将直接或间接影响制动的可控性。

3.4 测试用例

当车辆处于密集交通流行驶工况时，若出现前车紧急制动，本车无法转向变道，仅可以通过制动纵向减速的方式进行避障。根据上述场景，可确定与其关联的安全目标如表 3。

Table 3. Safety goal

表 3. 安全目标

序号	安全目标
SG01	行车制动应避免非预期减速
SG02	行车制动应避免减速丢失
SG03	行车制动应避免丢失制动灯点亮功能

基于 3.2 章节所定义的仿真场景，设定测试方案简述如下：测试人员驾驶车辆跟车行驶，在定义的跟车时距范围内，触发前车制动减速，迫使测试人员操纵本车制动进行减速，并确保车辆不与车道两侧车辆发生碰撞。Maki Kawakoshi 等人所开展的传统实车试验^[4]受试验安全性与可实施性限制，需要在封闭试验场环境开展，并且障碍物只能选择固定障碍物或气球车，无法充分体现真实道路环境及真实车辆交通流环境的差异，而驾驶员在环仿真系统可搭建虚拟现实环境，提供尽量贴近真实的道路环境与车辆交通流，有效解决了上述问题。本文道路场景设定为最常见的城市道路与高速公路，为尽量贴近现实道路场景要求，设定道路为广州某高速路段和上海某区域城市道路，并在本车周围，生成密集交通流环境。基于道路限速要求，城区与高速场景故障注入车速范围分别设定为 60-65km/h 与 100-110km/h，跟车时距按 3.3 章节所定义。定义车速与时距后，测试过程中可保证车辆相对速度维持在稳定可控的范围内，从而消除初始相对速度的变化对测试结果的影响。同时基于对制动灯点亮与否对于驾驶员反应速度影响的考虑，设定了制动灯点亮失效的故障场景。

正常状态的车辆在附着良好的路面情况下，其最大制动减速度一般可达到 9.5m/s^2 ，因此定义测试用例中未失效时正常制动减速度为 9.5m/s^2 。基于制动标准 GB 21670^[3]，车辆在正常状态下全力发出的制动减速度不得低于 6.43m/s^2 ，在任一单点失效状态下制动减速度不得低于 2.44m/s^2 。结合目前广泛使用的集成式线控液压制动控制器（Electric Hydraulic Brake, EHB）的结构特性，在其单回路泄露失效场景制动减速度达到 2.44m/s^2 的前提下，其电气失效时减速度一般可以达到 4.8m/s^2 以上。因此，最终定义制动力衰减程度分为四个层级，如表 4。

Table 4. Four levels of braking force attenuation

表 4. 制动力衰减程度的四个层级

层级	残余制动助力对应的减速度
0	9.5m/s^2
1	6.43m/s^2
2	4.8m/s^2
3	2.44m/s^2

综上，最终制定具体测试用例如表 5。

Table 5. Test case

表 5. 测试用例

序号	安全目标	场景	车速	制动失效类型		
Case1	SG01	城市路，前车非预期制动，减速度 6.43m/s^2	60-65km/h	无故障		
Case2	SG02			本车制动减速度剩余 2.44m/s^2		
Case3				本车制动减速度剩余 4.8m/s^2		

Case4				本车制动减速度剩余 6.43m/s^2
Case5	SG03			前车制动灯失效
Case6	SG01			无故障
Case7				本车制动减速度剩余 2.44m/s^2
Case8	SG02	高速公路, 前车非预期 制动, 减速度 6.43m/s^2	100-110km/h	本车制动减速度剩余 4.8m/s^2
Case9				本车制动减速度剩余 6.43m/s^2
Case10	SG03			前车制动灯失效

本课题选择 20 名测试人员, 都来自广州汽车集团股份有限公司, 年龄在 20-55 岁之间。其中女性 7 名(35%), 男性 13 名(65%), 测试人员分布参考中国公安部发布的 2021 年全国驾驶人数据, 具体信息如表 6。

Table 6. Distribution of tester

表 6. 测试人员分布

性别	年龄段				合计	总计
	18-25	26-35	36-50	≥ 51		
男	1	5	6	1	13	20
女	1	3	2	1	7	

在上述所选择的测试人员中, 绝大多数测试人员对模拟驾驶的特点不熟悉, 因此在模拟测试开始之前, 测试组织人员会做一些演示, 让测试人员熟悉测试设备及其操作。每位测试人员都会测试表 5 中所有的测试用例, 为了避免因测试人员熟悉测试用例后产生适应性影响测试结果, 测试采用随机触发的方法。

3.5 测试过程

测试过程如图 4 所示。

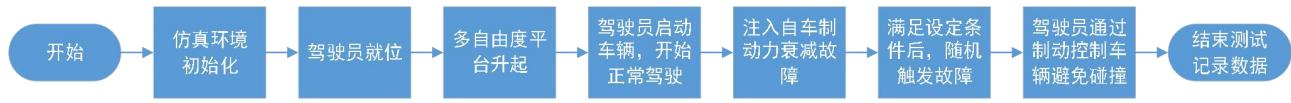


Figure 4. Driver response model

图 4. 驾驶员反应模型

4 测试结果

4.1 结果分析

1) 驾驶员反应时间 t_r

试验表明, 第一, 不同测试人员反应时间相差较大, 最大差别达 1s 以上, 这与测试人员的性别、驾驶习惯、驾驶经验等相关。驾驶经验丰富的测试人员在跟车时距较近时, 习惯于脚提前悬浮在制动踏板上, 反应时间小于 0.3s; 其他测试人员为满足跟车时距要求, 在前车紧急制动时, 脚仍踩在加速踏板上, 识别到风险才切换到踩制动踏板, 如图 3 所示驾驶员反应模型。第二, 高速场景驾驶员平均反应时间比城市场景长。测试人员普遍反馈, 因跟车时距比较短, 在高速场景和城市场景中驾驶注意力都是高度集中的, 在高速行驶时平均反应时间变长原因主要是信息处理负荷比城市场景中速行驶时大。第三, 当前车制动且制动灯失效的情况下, 平均反应时间比前车制动且制动灯正常的平均反应时间更长, 城市场景和高速场景分别长 0.49s 和 0.51s。驾驶员平均反应时间如表 7 所示。

Table 7. Driver average response time

表 7. 驾驶员平均反应时间

场景	前车制动灯正常时驾驶员平均 反应时间 t_{avg1}	前车制动灯失效时驾驶员平均 反应时间 t_{avg2}	时间差 ($t_{avg2} - t_{avg1}$)
城市场景	0.62s	1.11s	0.49s
高速场景	0.83s	1.34s	0.51s

反应时间分布如图 5 所示。

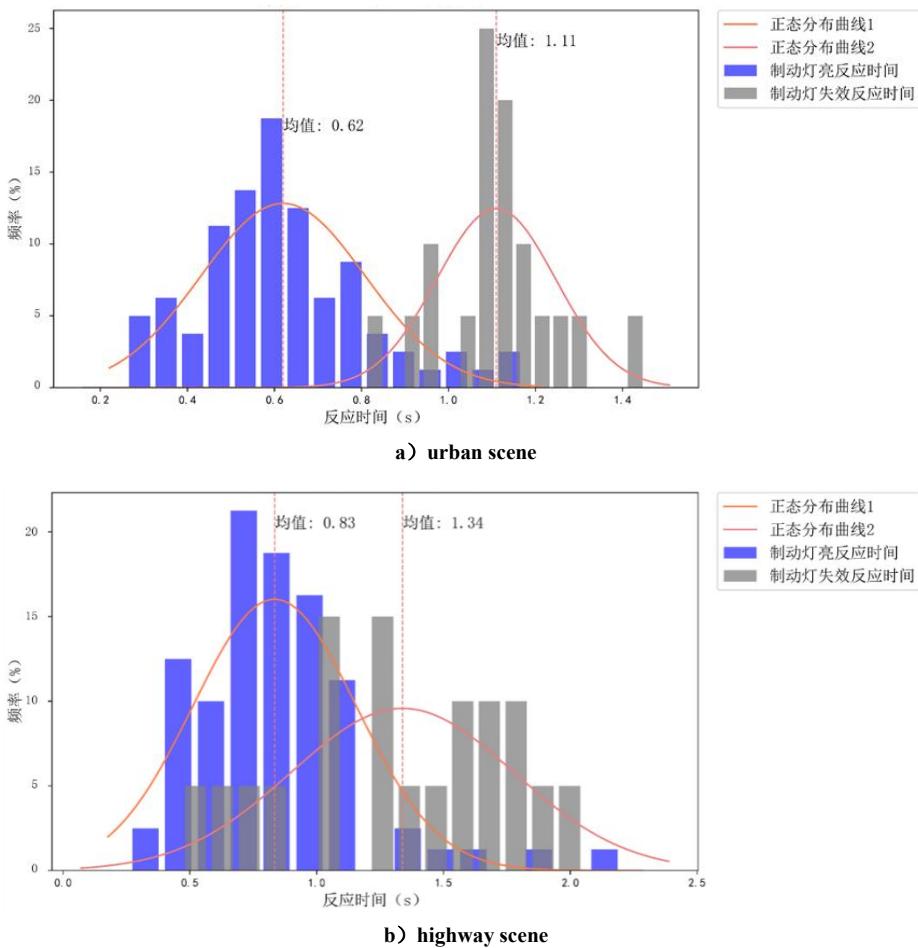


Figure 5. Driver response time histogram (urban scene and highway scene)

图 5. 驾驶员反应时间直方图（城市场景和高速场景）

从图 5 发现，驾驶员反应时间不完全服从正态分布，保留正态分布曲线仅用于作为参考。同济大学 Ronghuang Liu 等的研究^[14]中，分析得出反应时间服从对数正态分布。

2) 全力制动时间 t_{bsr}

全力制动时间分布如图 6 所示，驾驶员全力制动时间均值为 0.24s，主要集中在 0.15s 到 0.3s 之间，时间相对较短，分析原始数据无法得出时间与驾驶员的性别和年龄等因素有直接关系。

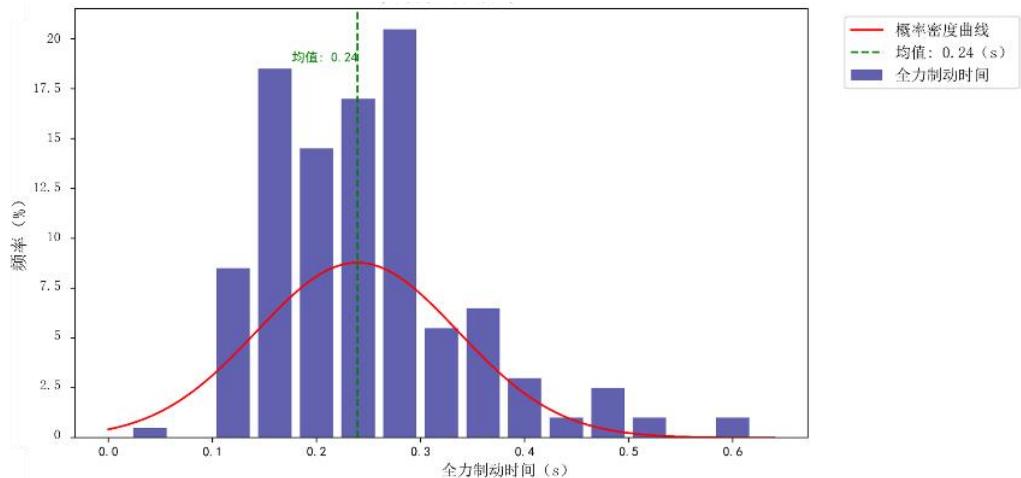


Figure 6. Distribution time of full braking

图 6. 全力制动分布时间

3) 剩余安全距离

由于 Case2、Case7 全部发生碰撞，Case3、Case8 碰撞比例很高，研究剩余安全距离的意义不大，故主要研究城市场景 Case4、Case1、Case5，以及高速场景 Case9、Case6、Case10 的剩余安全距离。场景剩余安全距离越大，表示后车刹停后离前车的距离越大，其可控性越高。如图 7 所示，Case4 城市道路场景和 Case9 高速道路场景，制动助力衰减到 $6.43m/s^2$ 后部分测试人员无法避免碰撞；制动助力不衰减的的场景中，即使前车制动灯失效，所有测试人员都能避免碰撞，100%可控。

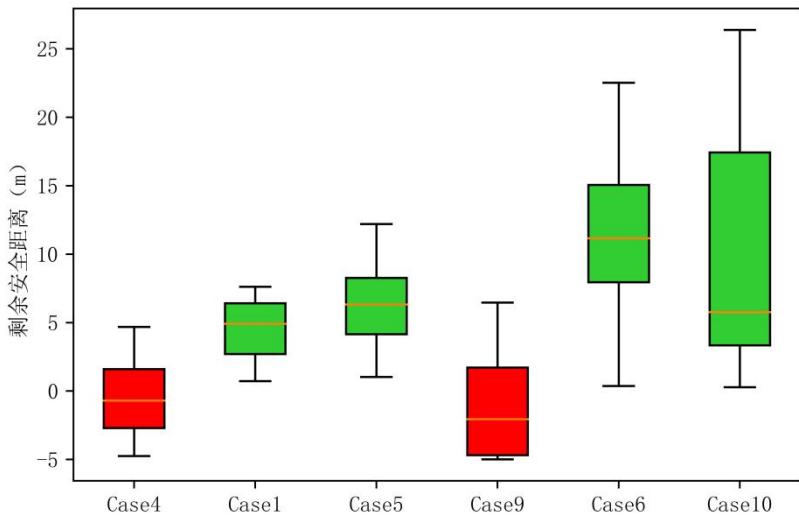


Figure 7. Remaining of safe distance

图 7. 剩余安全距离

4) 碰撞时刻相对速度

前后车在碰撞时的相对速度越大，侧面反应驾驶员避免车辆碰撞的难度越大，可控性越低。相对速度为0表示不会发生碰撞。如图8所示，碰撞时相对速度平均值从大到小依次为Case7, Case8, Case2, Case3, Case9, Case4，可以得出，制动力衰减后高速场景比城市场景更难控制车辆来避免碰撞，比如，制动助力衰减到 2.44m/s^2 后，高速场景比城市场景碰撞相对速度高，可控性差。

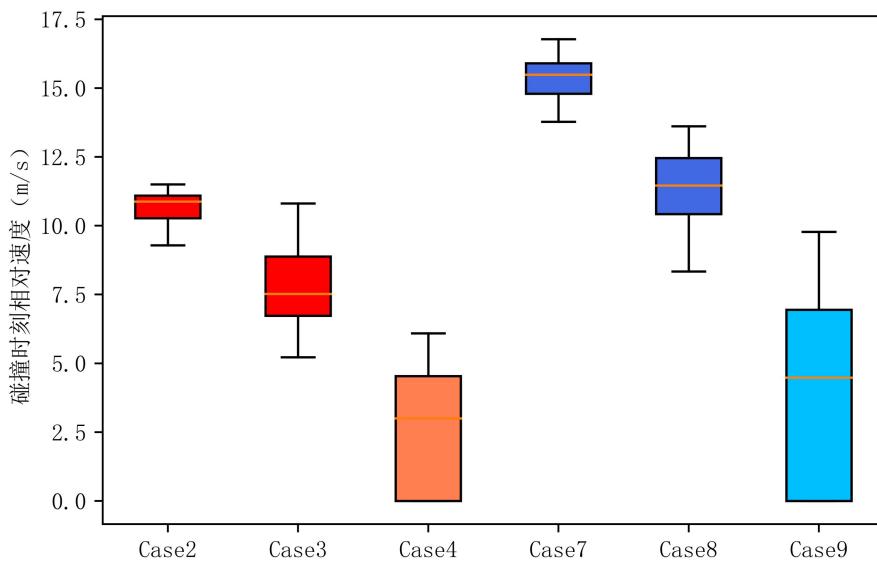


Figure 8. Relative speed at time of impact

图 8. 碰撞时刻相对速度

4.2 可控性客观评价

统计每个测试场景避免碰撞的概率，根据表2可以直接得出可控性客观评价结论，见表8。得出每个1s跟车时距场景中，制动减速度衰减到 6.43m/s^2 及以下车辆可控性均为C3。

Table 8. Results of test cases

表 8. 测试结果

测试用例	制动失效类型	样本总数	碰撞次数	避免碰撞概率	可控性
Case1	无制动失效	20	0	100.00%	C0
Case2	本车制动减速度剩余 2.44m/s^2	20	20	0.00%	C3
Case3	本车制动减速度剩余 4.8m/s^2	20	20	0.00%	C3
Case4	本车制动减速度剩余 6.43m/s^2	20	8	60.00%	C3
Case5	前车制动灯失效，本车制动减速度正常	20	0	100.00%	C0
Case6	无制动失效	20	0	100.00%	C0
Case7	本车制动减速度剩余 2.44m/s^2	20	20	0.00%	C3
Case8	本车制动减速度剩余 4.8m/s^2	20	20	0.00%	C3
Case9	本车制动减速度剩余 6.43m/s^2	20	7	65.00%	C3
Case10	前车制动灯失效，本车制动减速度正常	20	0	100.00%	C0

5 总结

本研究提出了一种基于驾驶员在环系统，采用随机触发故障的方法来验证密集交通流下制动助力衰减后的车辆可控性，可推广应用到制动助力不对称或过大、车辆非预期加速等研究中，为行业提供探索的经验和最佳实践的参考。

本研究针对制动助力衰减到 6.43m/s^2 、 4.8m/s^2 和 2.44m/s^2 进行了测试验证，得出跟车时距 1s 的密集交通流中本车制动助力衰减到 6.43m/s^2 及以下时车辆可控性为 C3，制动助力衰减相同的情况下，行驶速度越高，可控性越差。

驾驶员在车速为 $60\text{-}65\text{km/h}$ 时平均反应时间为 0.62s ， $100\text{-}110\text{km/h}$ 时平均反应时间为 0.83s ，当前车制动灯不亮时，城市场景和高速场景分别增加 0.49s 和 0.51s 。该驾驶员反应模型可作为典型值应用于制动系统危害分析和风险评估活动中。

本研究中因每个测试用例需要 20 名测试人员在驾驶员在环系统上测试，测试工作量较大，仅研究了 1s 跟车时距剩余制动力大小对可控性的影响。如果跟车时距变化，可控性还需要重新做大量测试，后续有必要在两个研究方向上进一步探索该问题。首先，为提升研究的普适性，进一步扩大测试人员样本量。通过社会招募驾驶员的途径，丰富测试人员的来源，从而使样本更具多样性与代表性。同时深入开展对驾驶员反应模型的研究工作，涵盖不同场景组合的，例如不同的天气状况（如晴天、雨天、雪天等）、不同的路面状况（如平坦路面、崎岖路面、湿滑路面等）以及不同的车速范围。通过对这些多元场景的细致研究，不断完善各种场景下的驾驶员反应数据，为后续分析提供更为详实的数据支撑。第二，基于已构建的驾驶员反应模型，探究选取少量典型驾驶员来进行可控性测试验证的可行性。此举旨在降低可控性仿真的测试工作量，同时确保在有限资源条件下，仍能获取具有一定代表性和有效性的测试结果。

致 谢 (Acknowledgement)

论文的研究工作得到了广州汽车集团股份有限公司多位同事的支持，他们在动力学模型搭建、驾驶员在环系统调试和可控性测试等方面鼎力协助，在此一并表示感谢。

参考文献 (References)

- [1] International Standard. ISO 26262:2018. *Road Vehicle-Functional safety (all part)*. 2018.
- [2] International Standard. ISO 21448:2022. *Road Vehicle-Safety of the intended functionality*. 2022.
- [3] China Standard. GB 21670:2008. *Technical requirements and testing methods for passenger car braking systems*. 2008.
- [4] Kawakoshi, M., Kaneko, T., and Nameki, T., *Estimation of Controllability Based on Driver Behavior - A Case of Insufficient Brake-Assist Force*. SAE Technical Paper 2014-01-0236, 2014, doi:10.4271/2014-01-0236.
- [5] Klaus bengler, Julia Drüke, Silja Hoffmann, Dietrich Manstetten, Alexandra Neukum. *UR:BAN Human Factors in Traffic*. 2018: p. 423-444.
- [6] CEDR Report. *Safe distance between vehicles*. 2009.
- [7] D. Guastella, Gianluca Bontempi, et al. *Traffic Modeling with SUMO: a Tutorial*. arXiv.2304.05982 March 2023.
- [8] Elizaveta Igoshina, Frank A. Russo, Robert Shewaga, et al. *The relationship between simulator sickness and driving performance in a high-fidelity simulator*. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour Volume 89 August 2022, Pages 478-487.
- [9] Xuesong Wang, Xinchen Ye, David Hurwitz, et al. *Effect of Motion Cues on Highway Driving Performance in Simulated Driving*. Transportation Research Record Volume 2677, Issue 6 January 2023, Pages 93-112.
- [10] Florent Colombet, Damien Paillet, Frédéric Mérienne, et al. *Visual Scale Factor for Speed Perception*. Journal of Computing and Information Science in Engineering 11, 4 (2011) 041010-1 to 041010-6.
- [11] Marc A. Green. *Roadway Human Factors: From Science to Application*. 2024.
- [12] Marc Green. "How Long Does It Take to Stop?" *Methodological Analysis of Driver Perception-Brake Times*. Transportation Human Factors, 2(3), 195–216 2000.
- [13] Atif Mahmood, Said M. Easa. *Modeling reaction time in car-following behaviour based on human factors*. International Journal of Engineering and Applied Sciences 2009.
- [14] Ronghuang Liu et al, *An Evaluation Method of Vehicle Functional Safety Controllability Based on Driver-in-the-Loop Platform*. SAE Technical 2022 J. Phys.: Conf. Ser. 2173 012054.