

DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20230115001

文章编号: 1672-9331(2023)02-0035-10

引用格式: 武和全, 刘瑾, 龚创业, 等. 自动驾驶汽车的碰撞安全性研究综述[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版) 2023, 20(2): 35-44.

Citation: WU Hequan, LIU Jin, GONG Chuangye, et al. A review of crash safety research on self-driving cars [J]. J Changsha Univ Sci Tech (Nat Sci), 2023, 20(2): 35-44.

# 自动驾驶汽车的碰撞安全性研究综述

武和全, 刘瑾, 龚创业, 王海涛

(长沙理工大学 工程车辆轻量化与可靠性技术湖南省高校重点实验室, 湖南 长沙 410114)

**摘要:**【目的】探讨自动驾驶汽车的安全性。【方法】首先, 通过分析国内外自动驾驶汽车安全研究的现状, 并对其进行梳理和总结; 然后, 归纳自动驾驶无法避免碰撞的原因以及分析错综复杂的车内外环境, 对自动驾驶汽车碰撞安全问题的应对策略进行讨论; 最后, 就自动驾驶汽车碰撞安全技术的提升做出展望。【结果】就目前而言, 智能化技术仍然存在许多不成熟的地方, 尤其是自动驾驶汽车的安全方面依旧有许多领域需要更多的研究与试验, 比如自动驾驶的障碍物识别、路径规划、控制策略以及自动驾驶汽车的内部空间布局等。【结论】自动驾驶技术在汽车上的使用让人们拥有了更安全、更舒适的乘坐体验, 研究人员应当牢牢围绕“以人为本”这个理念, 关注人的需求, 保护人的安全, 并围绕该理念设计与发展智能化技术。

**关键词:** 自动驾驶; 碰撞安全; 人体损伤; 座椅旋转; 交通事故; 乘员保护

**中图分类号:** U467.14

**文献标志码:** A

## 0 引言

目前, 汽车行业正朝着智能化、无人化的方向快速发展, 自动驾驶被认为是汽车行业现阶段面临的最具颠覆性的发展趋势之一。自动驾驶汽车通过搭载先进的传感器、控制器、执行器等装置, 融合现代通信与网络技术, 实现汽车与行人、其他车辆、道路、后台管理等系统的智能信息交换, 其最终目的为取代传统汽车, 实现汽车行驶的自动化、舒适、节能、高效和安全<sup>[1]</sup>。

美国汽车工程师学会将驾驶自动化技术分为6个级别<sup>[2-3]</sup>, 其中L0级为没有自动驾驶; L1级为部分驾驶辅助; L2级为组合驾驶辅助; L3级为有条件自动驾驶; L4级为高度自动驾驶; L5级为完全自动驾驶。对于高级自动驾驶汽车, 驾驶员不需要操控汽车方向盘, 可以以一种舒适休闲的姿态乘坐汽车<sup>[4]</sup>。早在20世纪20年代美国就提出

了“无人驾驶汽车”这个概念。1984年美国卡内基梅隆大学(Carnegie Mellon University, CMU)研发了世界上真正意义上的一辆无人驾驶汽车<sup>[5]</sup>。进入21世纪以来, 随着传感器等先进技术的发展, 自动驾驶汽车得到了快速发展<sup>[6]</sup>。2009年Google开始研究无人驾驶技术。2015年6月, 两辆谷歌自动驾驶汽车开始上路测试。到目前为止, 谷歌车辆已经积累了超过320万km的测试。谷歌在2016年将无人驾驶业务拆分为独立的实体公司Waymo。特斯拉在2019年就表示将要推出具有完全自动驾驶功能的汽车——特斯拉models系列, 其自动驾驶技术取得了重大突破。

我国无人驾驶技术起步较晚, 20世纪80年代以国防科技大学为首的一些机构开始了这方面的研究<sup>[7]</sup>。最近几年由于石油等不可再生资源的短缺, 我国以电动汽车为首的新能源汽车迅速发展, 同时也带动了自动驾驶技术的快速发展。蔚来汽车、小鹏汽车、理想汽车的相继面世预示着国内造

收稿日期: 2023-01-15; 修回日期: 2023-02-20; 接受日期: 2023-02-28

基金项目: 湖南省自然科学基金项目(2021JJ30723); 长沙理工大学学位与研究生教育教学改革项目

通信作者: 武和全(1982—)(ORCID: 0000-0003-1939-6474), 男, 副教授, 主要从事汽车安全方面的研究。

E-mail: csust\_vehicle@hotmail.com

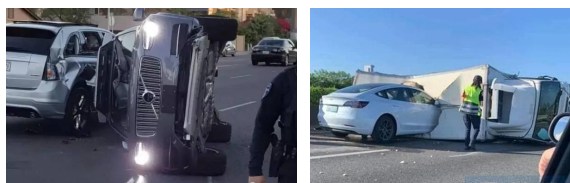
投稿网址: <http://csjgxbzk.csust.edu.cn/cslgdxxbzk/home>

车新势力的快速崛起,也推动了自动驾驶技术的发展<sup>[8-9]</sup>。2013年百度公司宣布开始进军无人驾驶领域,并陆续推出 CarLife、Mycar、CoDriver 等产品<sup>[10]</sup>,并于2015年成立无人驾驶事业部,与金龙汽车合作研发的首批量产车“阿波龙”巴士已经进入试运营,2018年华为与奥迪共同研发 L4 级自动驾驶汽车<sup>[11]</sup>。百度公司在2022年7月发布第六代量产无人车 Apollo RT6,该车深度融合人工智能(artificial intelligence, AI)技术和车辆工程方面的理论,可实现城市复杂道路的无人驾驶<sup>[12]</sup>。

然而,自动驾驶汽车仍然存在一些不可忽视的问题。这不仅包括传统汽车的安全问题,而且还涌现出新的关于高级自动化驾驶的专属问题。不解决这些问题,汽车安全问题就得不到有效解决,未来的交通安全就存在巨大隐患。

## 1 自动驾驶汽车的交通事故

近年来,关于自动驾驶汽车交通事故的报道屡见不鲜<sup>[12-15]</sup>。如图1<sup>[16-17]</sup>所示,2017年3月Uber自动驾驶汽车与普通汽车在十字路口发生碰撞,导致Uber自动驾驶汽车发生侧翻;2020年6月,在中国台湾某高速路上,一辆白色特斯拉 Model 3 在自动驾驶模式下撞上侧翻在高速路上的大货车。2022年7月,美国犹他州德雷珀一辆使用自动驾驶模式的特斯拉汽车撞上一辆摩托车,造成摩托车手当场死亡。同年8月10日下午,宁波一位车主在驾驶具有智能驾驶功能汽车时,与前方正在检测车辆故障的人员发生碰撞,造成人员死亡。



(a) 2017 Uber汽车侧翻<sup>[16]</sup>

(b) 2020台湾特斯拉事故<sup>[17]</sup>

图1 自动驾驶汽车交通事故

Fig. 1 Self-driving car traffic accidents

在自动驾驶汽车行驶时,即使有非常完备的技术支撑,也无法避开所有的意外。最新的研究表明,自动驾驶汽车仅能减少三分之一的事故,还有三分之二的交通事故无法避免<sup>[13-14]</sup>。

自动驾驶汽车只有在与周围环境安全互动的

情况下才能正常工作,尤其是与周围的交通环境,包括信号灯、行人、非机动车、其他车辆,未来还包括其他自动驾驶汽车和“智能街道”等。自动驾驶汽车可能无法对不可预见的危险做出适当的反应,或者其复杂的技术可能会失效,导致涉及损坏、受伤甚至人员死亡的事故<sup>[18]</sup>。自动驾驶汽车造成事故发生的原因主要有以下几个方面:①距离太近,没有足够的反应时间;②传感器识别精度不足,造成识别错误;③刹车、通信传输、转向等执行机构反应滞后;④自动驾驶系统各构成部分发生失效或退化;⑤其他如软件错误、黑客攻击、机械故障、道路缺陷、设计缺陷等问题。

## 2 自动驾驶汽车复杂的车内外环境

### 2.1 复杂的车外环境

自动驾驶汽车通常使用摄像机和深度感应的激光雷达装置来识别周围环境。在激光雷达扫描(光探测和测距)中,一个或多个激光器发出短脉冲,当它们碰到障碍物时就会反弹回来<sup>[19]</sup>。这些传感器不断地扫描周围区域,寻找信息,就像汽车的“眼睛”一样,如图2<sup>[20]</sup>所示。当这些设备提供深度信息时,如果没有与之实时连接的摄像机的帮助,它们的低分辨率使它们很难探测到较远的小物体。

自动驾驶汽车的复杂车外环境表现在三个方面。第一,车辆行驶过程中所在的道路类型众多,包括高速公路、国道、省道、县道、辅道、匝道、应急车道和桥梁等,不同路段的交通标识存在差异;第二,实际的交通状况复杂,车辆行驶过程中可能存在超车、紧急制动、变道、加塞、插队以及小型车辆视线被大型车辆遮挡等现象,同时还包括逆行、超速、闯红灯、随意变道和掉头、占用非机动车道、在人行道停车、酒驾等交通违法行为;第三,自然界的气候千变万化,自动驾驶汽车上的车载摄像头和雷达,在一些恶劣的自然条件下,比如雾天、雨天、雪天或夜晚,就可能出现传感器失灵或精度降低的问题。

当前的激光雷达、摄像机等传感器技术还难以实时准确地识别出所有的车外障碍物。这就会导致自动驾驶车辆的误判或者延迟决策,从而造成交通事故。

图2 自动驾驶汽车车外环境示意图<sup>[20]</sup>Fig. 2 Schematic of the outside environment of a self-driving car<sup>[20]</sup>

## 2.2 灵活多样的车内空间

自动驾驶作为未来的发展方向,最大的特点就是能够解放驾驶员的双手。为了便于乘员的交流,汽车座舱也应做出相应的改变。驾驶员不再需要坐在方向盘前操控汽车,因此,人们将有时间放松娱乐以及与其他乘客交流,这对车内空间布置提出了新的需求。自动驾驶汽车座椅和内饰的设计内容包括设置灵活的座椅定位和朝向,以及能够完全躺卧的座椅<sup>[4]</sup>。车内所有装置、物品需要达到车内人员的动态使用需求。CUSTÓDIO等<sup>[21]</sup>建议使用电容式触摸传感器来控制汽车功能、多媒体控制、座椅朝向、门窗等。该方法具有成本低、操作方便、兼容性强等优点。

当自动驾驶汽车实现完全自动控制时,已经不再需要方向盘、中央控制台、换挡杆、中央扶手等部件,汽车内部有了更大、更灵活的空间,座椅可以根据乘员需求进行自由旋转或移动,从而满足人们在自动驾驶中的舒适感。这就像智能手机时代不需要实体的键盘一样,未来自动驾驶汽车的座椅布局也可能是一场革命。如奔驰F015概念车,它的一大亮点是革命性的内饰概念<sup>[5,6,22]</sup>,如图3<sup>[23]</sup>所示。相对于传统车内部空间,其内部增加了乘客活动空间,而且能提供更多的服务项目。车内采用了2+2座椅布局,其核心理念是可变座椅系统。前排两把座椅可在自动驾驶模式时向后旋转180°,使前后排乘客可以舒适地面对面零障碍沟通。在车门打开时,智能电动座椅更可贴心地自动向外转动30°,使乘客的上下车动作更为便利和优雅。汽车零部件制造商麦格纳发布了全新的车内座舱构想,在不同的情景中设计不同的座椅布置方法,包括环绕型会议模式、面对面交流模式等,如图4<sup>[24]</sup>所示。

灵活多样的车内空间给乘员带来便利的同时

也对车辆安全约束系统的设计提出了更高的要求。比如能够随座椅一起旋转或者移动的安全带、能适应乘员躺卧的约束系统、安全气囊也能够根据乘员的实时状态合理展开等。

图3 奔驰F015概念车<sup>[23]</sup>Fig. 3 Mercedes-Benz F015 concept car<sup>[23]</sup>图4 麦格纳座椅布置方法<sup>[24]</sup>Fig. 4 Magna seating arrangement method<sup>[24]</sup>

## 3 自动驾驶汽车碰撞安全问题的应对策略

### 3.1 制定自动驾驶汽车安全准则

既然自动驾驶技术与人们期待的“零事故”还有很大差距,那就必须要有相应的应对措施。公安部交通管理科学研究所王长君表示,推动自动驾驶产业的健康发展,必须以“安全”为核心<sup>[25]</sup>。发展自动驾驶汽车产业,不能以牺牲道路交通安全为代价,要守住“以出行者安全为本”这个底线。2019年7月5日,戴姆勒、宝马、奥迪、大众、大陆、百度、安波福、菲亚特-克莱斯勒、HERE、英飞凌及英特尔等11家企业联合发布《自动驾驶安全第一》白皮书,为自动驾驶乘用车的开发、测试和验证提供了一套框架体系。未来将会有越来越多的自动驾驶企业参与到自动驾驶安全准则的制定之中。

### 3.2 配备安全员与技术员

为保护乘员,降低交通事故的发生率,很多自动驾驶汽车都配有安全员<sup>[26]</sup>。Waymo是世界上首家推出商业化自动驾驶出租车运营服务的企业,目前Waymo旗下的美国自动驾驶汽车的驾驶座上配有安全员<sup>[20]</sup>,以便在危急关头及时接管车辆,避免造成事故。2019年9月在长沙进行路试的百度Apollo自动驾驶汽车,每台车辆均配备安全员与技术员<sup>[11]</sup>,在必要时进行人工接管,确保行车安全。



可见当前自动驾驶汽车还需要人工的干预,远没有达到L5级的完全自动驾驶阶段。

### 3.3 自动驾驶汽车车外人员的安全保护

车外的行人、非机动车(包括自行车、电动车等)作为弱势交通参与者,在人车碰撞事故中的伤亡风险很高,因此,有必要从车辆前端采取措施对其进行防护。

自动驾驶汽车对行人和非机动车的防护首要原则是提前感知,及早避开。首先,车载传感器提前感知行人的位置,在可能产生碰撞风险时对行人运动轨迹进行预测。然后,通过控制车辆的速度和方向使车辆的时空运行轨迹与行人运动轨迹没有交叉。

当碰撞无法避免时<sup>[27]</sup>,自动驾驶汽车也要采取一系列措施来降低行人的伤亡风险。比如当预测行人会撞击到自动驾驶汽车的发动机罩或者汽车挡风玻璃时,可以提前调节前保险杠的高度、调整发动机罩的倾斜角度,并提前打开发动机罩安全气囊;当预测行人会撞击到自动驾驶汽车的侧面时,可提前打开车门外侧的安全气囊,如图5<sup>[28-29]</sup>所示。通过这些措施,可以最大限度地降低行人的伤亡。



图5 发动机罩安全气囊和侧面安全气囊示意图<sup>[28-29]</sup>

Fig. 5 Hood airbag and side airbag diagram<sup>[28-29]</sup>

### 3.4 自动驾驶汽车车内乘员的保护

自动驾驶汽车车内乘员的防护设施,包括乘员监控系统(occupant monitoring system, OMS)、座椅旋转和移动等。

车辆在正常行驶过程中,一方面,自动驾驶系统会对乘员的状态进行持续监测,包括乘员的坐姿、物理状态以及精神状态等,通过这些信息来判断车内乘员的实时状态。另一方面,自动驾驶系统也会实时监测车外的行驶环境和碰撞风险,根据所接收到的数据提前作出预判:是否会有碰撞风险,是否要提前介入干涉?

这些监控数据可以为车内乘员保护决策的可靠性提供支持<sup>[30]</sup>,特别是在发生碰撞事故前1 s内的信息是非常有用的。自动驾驶系统首先计算车

辆运行的时空轨迹,尽可能地避免发生碰撞,但当碰撞无法避免时,则利用这些监控数据对车内乘员进行智能防护。

通过采集发生碰撞时车辆的位置、速度,以及人员状况,系统可以判断什么情况下可能会发生碰撞,碰撞的部位在哪里,自动驾驶汽车系统便可以在最后1 s调整车辆及车内乘员的状态,包括约束系统、座椅、气囊等的参数,将其调整至一旦发生事故,车内乘员损伤降到最低的状态。比如在碰撞前最后1 s内将乘员移动到非碰撞位置、提前打开安全气囊等。

## 4 自动驾驶汽车碰撞安全的发展方向

高级别的自动驾驶汽车被要求能够按照人们的需求平稳导航到目的地并避开障碍物,同时能够准确理解场景和动态活动的高度复杂语义。为了实现这些目标,需要在环境传感技术、路径规划与通信技术、旋转座椅技术以及自动驾驶汽车交通事故责任划分与理赔等方面进一步发展。

### 4.1 环境传感技术的发展

环境感知系统作为无人驾驶车辆的眼睛与触觉,可实时感知道路环境的变化。环境感知系统利用环境的先验知识,通过获取周围环境信息,建立包括障碍物、道路结构、交通标志在内的环境模型。环境感知系统的主要功能是利用摄像头、激光雷达等硬件设备,实现车道检测、交通信号检测、障碍物检测等功能<sup>[31]</sup>。

在环境感知过程中,通过部署多个传感器(如激光传感器、雷达传感器)感知来自环境的综合信息,然后融合这些数据来感知环境<sup>[32]</sup>。其中,激光传感器用于连接现实世界和数据世界,雷达传感器用于距离感知,视觉传感器可识别交通标志。

当前,自动驾驶汽车在障碍物识别方面的技术瓶颈是其发生交通事故的一个重要原因<sup>[33-34]</sup>,特别是对一些不规则障碍物,自动驾驶汽车难以准确识别。以激光雷达为例,不规则障碍物形成的点云,在自动驾驶汽车的“眼里”看起来也有可能就是一团雾。究竟是雾还是实实在在的障碍物,模型需要去判断。判断就有保守和激进的区别,判断结果太过保守,就容易把噪点识别成障碍物,就会经常急刹,影响舒适性,容易造成后车追

尾;判断结果太过激进,就会撞上障碍物。通常自动驾驶汽车传感器的精度越高,对障碍物的识别越好,相应的成本就会越高。

#### 4.2 自动驾驶路径规划与通信技术

全局路径规划用于确定从起点到终点之间的最优行驶路径。自主决策系统的主要功能是为自动驾驶汽车做出一些决策,包括避障、路径规划、导航等<sup>[35]</sup>。例如,在路径规划中,自主决策系统首先根据当前位置和目标位置规划全局路径,然后结合全局路径和环境感知系统提供的局部环境信息,合理地自动驾驶汽车规划局部路径<sup>[36]</sup>。

汽车导航系统的结构及其数据处理模型如图6所示。在汽车导航系统时,卫星定位系统用来接收来自车辆的经度、纬度等位置信息,常用的有全球定位系统(global positioning system, GPS)和北斗等。这些信息与定位系统和地图数据库生成的道路信息一起作为输入地图匹配模型的源数据,然后,地图匹配模型利用智能路径规划算法(如Dijkstra算法、Bellman-Ford算法)进行路径规划。经过计算,自动驾驶汽车可以获得车辆的位置信息、目的地位置信息以及当前道路状况数据等,就可以通过路径规划模型对行车路线进行最优规划。

GPS和惯性测量单元(inertial measurement unit, IMU)是了解车辆具体位置和行驶方向的可靠工具。此外,IMU还提供了偏航速度和角速度的信息,这有助于计算交流定位和决策控制<sup>[37]</sup>。GPS的更新频率低(10 Hz),在车辆快速行驶时GPS很难给出精准的实时定位。IMU是测量物体三轴姿态角(或角速度)及加速度的装置,它被用来检测加速度和角速度以表示运动和运动强度,其定位误差会随着时间的推进而增加。GPS定位精准但更新频率低,IMU更新频率高但累积误差大。因此,对GPS与IMU两种定位传感器运用卡尔曼滤波的传感融合,可实现自动驾驶车辆实时精准的定位,以便于自动驾驶汽车的路径规划<sup>[38]</sup>。

目前的高清地图为Advanced Driver Assistance System (ADAS)地图,其定位水平高,更新频率高,精度和分辨率均达到了一定的要求,可应用于L2/L3级自动驾驶。未来,通过引入5G,结合车联网的数据处理设施,考虑计算机视觉的性质以及3D建模技术,发展基于深度学习环境感知

的云计算技术和端闭环实时更新技术,高清地图将会逐步具备高度自动化驾驶水平。预计随着5G标准的建立和人工智能的成熟,高清地图将逐渐成为支撑智能驾驶网络的关键技术之一<sup>[39]</sup>。

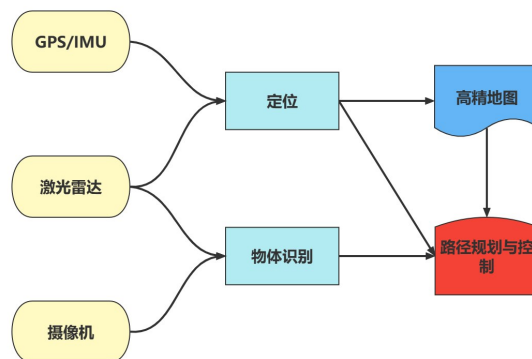


图6 无人驾驶车辆导航与定位示意图<sup>[31]</sup>

Fig. 6 Driverless vehicle navigation and positioning schematic<sup>[31]</sup>

#### 4.3 自动驾驶汽车安全的控制策略研究

在自动驾驶汽车行驶过程中,传感器将数据通过中间件传递到汽车计算平台,平台进行处理、分析后做出必要的决策,并将信号发送到执行器。控制系统借助软硬件设备实施相应的车辆运动控制,从而实现人机交互,提高自动驾驶的安全性<sup>[40]</sup>。该控制系统包括传统的反馈控制、模型预测控制两种方式。反馈控制是综合考虑车辆周边的环境和行驶路线,通过精准控制车辆的油门,转向机构,刹车等装置,使自动驾驶汽车能够按照预期的目标行驶。模型预测控制则是结合车辆的当前运行状态和周围的环境来预测下一阶段车辆的运行轨迹,并启动相关应急保护装置,通过该方式来避免或减少交通安全事故的发生。比如,当自动驾驶汽车系统通过传感器提前感知到可能会发生汽车碰撞时,通过综合分析和调配车辆的内部结构,充分调动安全带、安全气囊、座椅头枕、汽车座椅、腿部挡板、脚踏板等部件,进行最优组合,从而用最合适的方式把车内乘员保护起来,以达到降低人体损伤的目的。

座椅是汽车的重要部件,在汽车发生碰撞时座椅和安全带相互配合承担起吸能及保护乘员的角色。目前较多的自动驾驶汽车开发了旋转座椅装置,但大部分旋转座椅系统只采取了传统的安全约束系统,并没有考虑乘客在不同角度以及旋转过程中损伤情况的发生,以及旋转后碰撞带来



损伤风险的程度。武和全等<sup>[41-43]</sup>研究了正面碰撞过程中座椅朝向为 $0^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $135^\circ$ 和 $180^\circ$ 四种不同情况下的乘员损伤,发现在 $180^\circ$ 朝向时的乘员损伤风险最小,在此基础上,模拟了200 ms内将座椅旋转 $\pm 45^\circ$ 和 $\pm 90^\circ$ 的情景。研究结果表明:200 ms能够将乘员旋转 $\pm 45^\circ$ 和 $\pm 90^\circ$ 而不引起额外的人体损伤;在无时间延迟时,座椅旋转至背对碰撞方向的乘员损伤,比正面碰撞中座椅朝向为 $0^\circ$ 、 $90^\circ$ 和 $135^\circ$ 的乘员损伤更低(图7)。基于此,武和全等提出使用旋转座椅来改变人体朝向与碰撞方向相对位置的规避策略,其基本思路是在碰撞发生前通过主动改变座椅朝向来降低乘员损伤。典型的自动驾驶汽车安全系统可在碰撞发生前约0.10~0.35 s内将碰撞识别为不可避免的碰撞,这段时间可以有效地用于主动安全系统的乘员防护中,将座椅旋转或移动到合适的位置,从而降低乘员损伤,如图8所示。这些研究成果发表在 *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*、《机械工程学报》《中国公路学报》等学术期刊上。这为未来使用旋转座椅规避不可避免的碰撞伤害提供了可靠性依据。

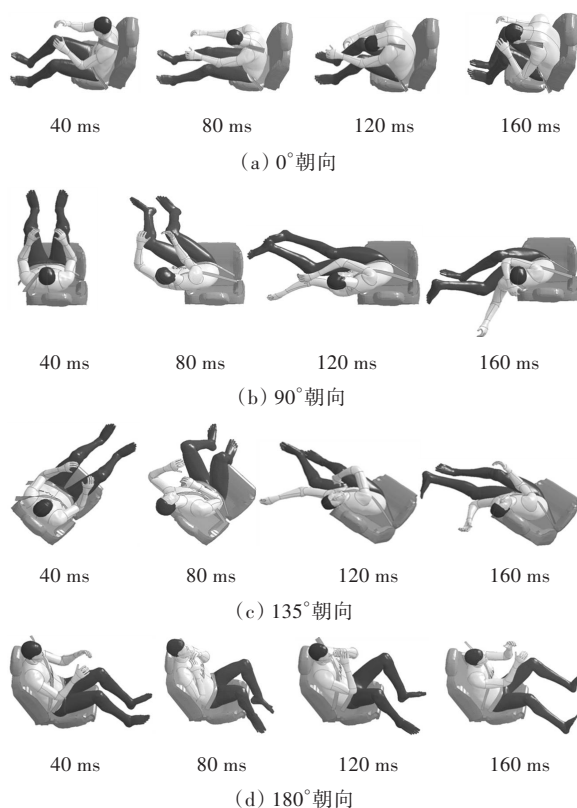


图7 正面碰撞中乘员在不同座椅朝向配置下的运动学响应<sup>[41-43]</sup>

Fig. 7 Kinematic response of occupants in frontal crashes with different seat orientation configurations<sup>[41-43]</sup>

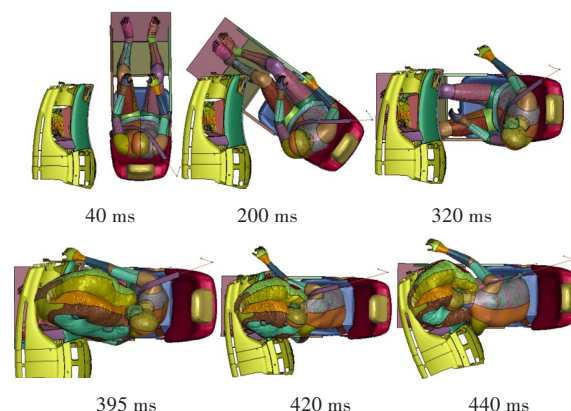


图8 先左旋转 $90^\circ$ 后碰撞试验乘员运动响应<sup>[41-43]</sup>

Fig. 8 Occupant motion response of crash test after left rotation  $90^\circ$ <sup>[41-43]</sup>

#### 4.4 自动驾驶汽车交通事故责任划分与理赔

当自动驾驶汽车与传统汽车或行人发生碰撞时,责任和赔偿等一系列事务的处理势必会触及人伦道德等方面的问题<sup>[44]</sup>。交通事故的主要责任应该是由汽车制造厂商承担还是由车辆使用者承担?由于自动驾驶系统各构成部分失效或退化而引起的交通事故该如何分责?在未来,自动驾驶汽车很可能成为正常的“互动伙伴”,一旦它们被视为街道交通的日常组成部分,路况将变得更为复杂,不稳定因素增多,人类的出行风险就有可能提高。在碰撞事故中,自动驾驶汽车的驾驶员将可能不需要为其通常可预见的故障承担刑事责任,而只需要为由可预防的结构、编程或操作错误造成的伤害负责<sup>[19]</sup>。现有的法律法规以及交通事故责任划分方法显然已经不能满足自动驾驶汽车的需求,因此未来有必要对自动驾驶汽车交通事故责任进行规范立法。保险公司也需要针对自动驾驶汽车制定相应的投保和理赔条款,以满足市场的需求。

## 5 总结

由于真实世界的复杂多样性以及所有道路的物理限制,在未来的几十年内,不管是多么智能的自动驾驶汽车,也有发生碰撞的风险。在汽车碰撞事故无法避免的情况下,我们应该尽可能减少事故造成的损失,尤其是人的生命安全。自动驾驶汽车未来的发展方向总结如下:

1) 针对自动驾驶汽车复杂的车外环境,对传感器技术、路径规划与通信技术、碰撞安全的控制

策略等方面的研究刻不容缓。此外,应将主动安全与被动安全有机结合,在做到尽量避免事故发生的同时,实施有效的乘员保护应对策略。

2) 根据自动驾驶汽车的结构特点,汽车厂商应当以人为中心,关注人的需求和安全,并围绕人来进行革新与改进,丰富其车内布局,打造舒适、安全的乘车环境。随着自动驾驶研究的深入,关于汽车安全性的验证方法与验证工具将可能迎来重大更新,当前汽车上广泛使用的汽车座椅、安全带、安全气囊等乘员保护系统在未来都有可能发生革命性的变化。

3) 自动驾驶汽车碰撞安全的伦理与法律研究。未来,自动驾驶汽车一旦出现交通事故,责任该如何划分?是由车辆使用者承担,还是由车辆制造厂商承担,抑或是由自动驾驶汽车的运营者、审批者负责,或者是都有责任?车辆保险公司又该如何理赔?针对这种情况,需要构建一套完整的法律体系。

自动驾驶汽车的发展除了需要自动驾驶技术的支撑,还与车辆成本、社会习惯、道德伦理、法律等因素息息相关,科研人员需要对这些错综复杂的问题进行更为深入的研究探讨。本文相信随着技术和社会的进步,自动驾驶汽车将会逐步走向成熟和普及,成为我们未来出行的一项重要选择,带来更加便利和舒适的出行体验,同时也能够对社会和环境做出积极贡献。

### [参考文献]

- [1] 丁页. 城市网联化背景下未来汽车协同性交通模式研究[D]. 南京: 南京艺术学院, 2015.  
DING Ye. Research on the future cooperative transportation mode of automobiles under the background of urban networking[D]. Nanjing: Nanjing University of the Arts, 2015.
- [2] SAE On-Road Automated Vehicle Standards Committee. Taxonomy and definitions for terms related to on-road motor vehicle automated driving systems: SAE J 3016—2014 [S]. USA: Society of Automotive Engineers [sae], 2014.
- [3] TEOH E R. What's in a name? Drivers' perceptions of the use of five SAE Level 2 driving automation systems [J]. Journal of Safety Research, 2020, 72: 145–151. DOI: 10.1016/j.jsr.2019.11.005.
- [4] JORLÖV S, BOHMAN K, LARSSON A. Seating positions and activities in highly automated cars: a qualitative study of future automated driving scenarios [C]//Proceedings of the 2017 International IRCOBI Conference on the Biomechanics of Injury. Antwerp: International Research Council on Biomechanics of Injury (IRCOBI), 2017: 13–22.
- [5] GOTO Y, STENTZ A. The CMU system for mobile robot navigation [C]//Proceedings of 1987 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Raleigh: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2003: 99–105. DOI: 10.1109/ROBOT.1987.1088022.
- [6] 吴盛豪, 郑素丽, 杨璐琦. 国外自动驾驶汽车标准化发展趋势及其对我国的启示[J]. 标准科学, 2021(11): 16–24. DOI: 10.3969/j.issn.1674-5698.2021.11.003.  
WU Shenghao, ZHENG Suli, YANG Luqi. Development trend of standardization of overseas autonomous vehicles and its enlightenment to China [J]. Standard Science, 2021(11): 16–24. DOI: 10.3969/j.issn.1674-5698.2021.11.003.
- [7] 潘福全, 亓荣杰, 张璇, 等. 无人驾驶汽车研究综述与发展展望[J]. 科技创新与应用, 2017(2): 27–28.  
PAN Fuquan, QI Rongjie, ZHANG Xuan, et al. Research summary and development prospect of driverless cars [J]. Technology Innovation A, 2017(2): 27–28.
- [8] 朱子明. 中国造车新势力的发展历程与前景展望[J]. 安徽科技, 2022(1): 38–41. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7855.2022.01.011.  
ZHU Ziming. The development course and prospect of China's new car-making forces [J]. Anhui Science & Technology, 2022(1): 38–41. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7855.2022.01.011.
- [9] 李永钧. 造车新势力: 在痛苦与希望中挣扎[J]. 重型汽车, 2019(5): 4–5.  
LI Yongjun. The new force of making cars: struggling in pain and hope [J]. Heavy Truck, 2019(5): 4–5.
- [10] TOSCHI A, SANIC M, LENG J W, et al. Characterizing perception module performance and robustness in production-scale autonomous driving system [C]//IFIP International Conference on Network and Parallel Computing. Cham: Springer, 2019: 235–247. DOI: 10.1007/978-3-030-30709-7\_19.
- [11] 赵禹程, 张永伟, 俞乔. 无人驾驶汽车发展史、技术现状与创新管理模式研究[J]. 新疆师范大学学报(哲学社会科学版), 2021, 42(4): 103–112. DOI: 10.14100/j.cnki.65-1039/g4.20201110.001.  
ZHAO Yucheng, ZHANG Yongwei, YU Qiao. Research on the development of autonomous vehicles, technology status and innovations in management mode [J]. Journal of Xinjiang Normal University (Edition of Philosophy and Social Sciences), 2021, 42(4): 103–112. DOI: 10.14100/j.cnki.65-1039/g4.20201110.001.

- [12] 张程. “无人”驾驶正在成真[J]. 检察风云, 2022(18): 72-73.  
ZHANG Cheng. “Unmanned” driving is coming true [J]. Prosecutorial View, 2022(18): 72-73.
- [13] 周继红, 蔡哈孜, 杨傲, 等. 自动驾驶与交通安全[J]. 伤害医学(电子版), 2019, 8(1): 41-46. DOI: 10.3868/j.issn.2095-1566.2019.01.008.  
ZHOU Jihong, CAI Hanzhi, YANG Ao, et al. Autonomous driving and traffic safety [J]. Injury Medicine (Electronic Edition), 2019, 8(1): 41-46. DOI: 10.3868/j.issn.2095-1566.2019.01.008.
- [14] 陈晓博. 发展自动驾驶汽车的挑战和前景展望[J]. 综合运输, 2016, 38(11): 9-13.  
CHEN Xiaobo. The study on the challenge and development prospect of automated vehicles [J]. China Transportation Review, 2016, 38(11): 9-13.
- [15] IT之家. 特斯拉自动辅助驾驶又出车祸: 摩托车手当场身亡[EB/OL]. (2022-07-28) [2022-12-31]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1739561214074481583&wfr=spider&for=pc>.  
IThome. Tesla autopilot was involved in another accident: the motorcyclist died instantly [EB/OL]. (2022-07-28) [2022-12-31]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1739561214074481583&wfr=spider&for=pc>.
- [16] 搜狐网. 全球自动驾驶产业链全景扫描: 这一次, 中国芯片企业赫然在榜! 我们能否实现弯道超车?[EB/OL]. (2018-05-02) [2022-12-31]. [https://www.sohu.com/a/230198075\\_117959](https://www.sohu.com/a/230198075_117959).  
SOHU. Global autonomous driving industry chain panoramic scan: this time, Chinese chip companies are on the list! Can we overtake in corners? [EB/OL]. (2018-05-02) [2022-12-31]. [https://www.sohu.com/a/230198075\\_117959](https://www.sohu.com/a/230198075_117959).
- [17] 搜狐网. 特斯拉又出事故? 传一辆特斯拉 Model 3 撞上侧翻的卡车[EB/OL]. (2020-06-02) [2022-12-31]. [https://www.sohu.com/a/399236731\\_120044814](https://www.sohu.com/a/399236731_120044814).  
SOHU. Tesla had another accident? A Tesla Model 3 was rumored to hit a rollover truck [EB/OL]. (2020-06-02) [2022-12-31]. [https://www.sohu.com/a/399236731\\_120044814](https://www.sohu.com/a/399236731_120044814).
- [18] GLESS S, SILVERMAN E, WEIGEND T. If robots cause harm, who is to blame? Self-driving cars and criminal liability [J]. New Criminal Law Review, 2016, 19 (3): 412-436. DOI: 10.1525/nclr.2016.19.3.412.
- [19] 搜狐网. 又是无人驾驶! 宝马发布新型摩托车视频还能自动停车 但不是为了卖钱[EB/OL]. (2018-09-14) [2022-12-31]. [https://www.sohu.com/a/253848847\\_114835](https://www.sohu.com/a/253848847_114835).  
SOHU. Driverless again! BMW released a video of the new motorcycle which can park itself, but not to sell money [EB/OL]. (2018-09-14) [2022-12-31]. [https://www.sohu.com/a/253848847\\_114835](https://www.sohu.com/a/253848847_114835).
- [20] 知乎网. Alphabet 旗下 Waymo 自动驾驶汽车遭遇严重车祸, 不过责任有可能完全不在它[EB/OL]. (2018-05-05) [2022-12-31]. <https://zhuanlan.zhihu.com/p/36469418>.  
Zhihu. Alphabet's Waymo self-driving car suffered a serious crash, but it may not be fully responsible [EB/OL]. (2018-05-05) [2022-12-31]. <https://zhuanlan.zhihu.com/p/36469418>.
- [21] CUSTÓDIO T, ALVES C, SILVA P, et al. A change of paradigm for the design and reliability testing of touch-based cabin controls on the seats of self-driving cars [J]. Electronics, 2021, 11 (1): 21. DOI: 10.3390/electronics11010021.
- [22] 搜狐网. 深析梅赛德斯-奔驰 F015 Luxury in Motion [EB/OL]. (2015-01-12) [2022-12-31]. <http://foshan.auto.sohu.com/20150112/n407723451.shtml>.  
SOHU. In-depth analysis of Mercedes-Benz F015 Luxury in Motion [EB/OL]. (2015-01-12) [2022-12-31]. <http://foshan.auto.sohu.com/20150112/n407723451.shtml>.
- [23] 天极网. 英国还没准备好迎接无人驾驶汽车的到来[EB/OL]. (2015-02-11) [2022-12-31]. <http://news.yesky.com/446/48463946.shtml>.  
Yesky. The UK is not ready for driverless cars [EB/OL]. (2015-02-11) [2022-12-31]. <http://news.yesky.com/446/48463946.shtml>.
- [24] 知乎网. 智能座舱、台架设计发展[EB/OL]. (2019-12-17) [2022-12-31]. <https://zhuanlan.zhihu.com/p/97782721>.  
Zhihu. Intelligent cockpit and bench design and development [EB/OL]. (2019-12-17) [2022-12-31]. <https://zhuanlan.zhihu.com/p/97782721>.
- [25] 智驾网. 谁来为自动驾驶安全兜底?[EB/OL]. (2022-09-04) [2022-12-31]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1743013902434274445&wfr=spider&for=pc>.  
AUTOR. Who will cover the autonomous driving safety [EB/OL]. (2022-09-04) [2022-12-31]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1743013902434274445&wfr=spider&for=pc>.
- [26] 汽车之家网. Waymo 自动驾驶出租车服务将取消安全员[EB/OL]. (2019-10-10) [2022-12-31]. <https://www.autohome.com.cn/news/201910/947569.html>.  
Autohome. Waymo's self-driving taxi service will eliminate safety officers [EB/OL]. (2019-10-10) [2022-12-31]. <https://www.autohome.com.cn/news/201910/947569.html>.
- [27] FILATOV A, SCANLON J M, BRUNO A, et al. Effects of innovation in automated vehicles on occupant compartment designs, evaluation, and safety: a review



- of public marketing, literature, and standards [C]// SAE Technical Paper Series. Warrendale: SAE International, 2019. DOI: 10.4271/2019-01-1223.
- [28] 搜狐网.【涨姿势】汽车安全气囊的前世今生[EB/OL]. (2016-03-05) [2022-12-31]. [https://www.sohu.com/a/62001970\\_180520](https://www.sohu.com/a/62001970_180520).
- SOHU. Expand knowledge, the past and present life of car airbags [EB/OL]. (2016-03-05) [2022-12-31]. [https://www.sohu.com/a/62001970\\_180520](https://www.sohu.com/a/62001970_180520).
- [29] 搜狐网.安全气囊一定是从车里弹出?你OUT啦[EB/OL]. (2016-03-18) [2022-12-31]. [https://www.sohu.com/a/64111610\\_115704](https://www.sohu.com/a/64111610_115704).
- SOHU. The airbag must have been ejected from the car? You're out [EB/OL]. (2016-03-18) [2022-12-31]. [https://www.sohu.com/a/64111610\\_115704](https://www.sohu.com/a/64111610_115704).
- [30] REED M P, EBERT S M, JONES M L H, et al. Prevalence of non-nominal seat positions and postures among front-seat passengers [J]. Traffic Injury Prevention, 2020, 21: S7-S12. DOI: 10.1080/15389588.2020.1793971.
- [31] 蒋孙权.无人驾驶汽车关键技术研究[J].时代汽车, 2020 (3): 25-27. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9668.2020.03.011.
- JIANG Sunquan. Research on key technologies of driverless vehicles [J]. Auto Time, 2020 (3): 25-27. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9668.2020.03.011.
- [32] PARSEH M, ASPLUND F. New needs to consider during accident analysis: implications of autonomous vehicles with collision reconfiguration systems [J]. Accident Analysis & Prevention, 2022, 173: 106704. DOI: 10.1016/j.aap.2022.106704.
- [33] CHEON S. An overview of automated highway systems (AHS) and the social and institutional challenges they face [J]. University of California Transportation Center (UCTC), 2003 (624): 3-4.
- [34] GIESBRECHT J. Global path planning for unmanned ground vehicles [R]. Defence Research and Development Suffield (ALBERTA), Suffield: Defence R&D Canada, 2004.
- [35] JO K, KIM J, KIM D, et al. Development of autonomous car, part II: a case study on the implementation of an autonomous driving system based on distributed architecture [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62 (8): 5119-5132. DOI: 10.1109/TIE.2015.2410258.
- [36] 人民交通网.车路协同构建下一代智慧交通[EB/OL]. (2018-09-29) [2022-12-31]. <http://www.rmjtxw.com/news/dck/53597.html>.
- rmjtxw. Vehicle-road collaboration builds the next generation of intelligent transportation [EB/OL]. (2018-09-29) [2022-12-31]. <http://www.rmjtxw.com/news/dck/53597.html>.
- [37] CHEN Z Y, LIU S G. China's self-driving car legislation study [J]. Computer Law & Security Review, 2021, 41: 105555. DOI: 10.1016/j.clsr.2021.105555.
- [38] SAADEDDIN K, ABDEL-HAFEZ M F, JARRAH M A. Estimating vehicle state by GPS/IMU fusion with vehicle dynamics [J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2014, 74(1): 147-172. DOI: 10.1007/s10846-013-9960-1.
- [39] ZHAO J F, LIANG B D, CHEN Q X. The key technology toward the self-driving car [J]. International Journal of Intelligent Unmanned Systems, 2018, 6 (1): 2-20.
- [40] XU W. From automation to autonomy and autonomous vehicles [J]. Interactions, 2021, 28(1): 48-53. DOI: 10.1145/3434580.
- [41] 武和全, 旷世杰, 胡林.老年乘员在自动驾驶车辆中的碰撞响应研究[J].机械工程学报, 2020, 56(12): 144-154. DOI: 10.3901/JME.2020.12.144.
- WU Hequan, KUANG Shijie, HU Lin. Research on collision response of elderly occupant in autonomous vehicles [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(12): 144-154. DOI: 10.3901/JME.2020.12.144.
- [42] 武和全, 侯海彬, 胡林, 等.自动驾驶汽车中乘员在不同座椅朝向下的损伤风险及规避策略[J].中国公路学报, 2019, 32 (6): 206-215, 225. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2019.06.021.
- WU Hequan, HOU Haibin, HU Lin, et al. Injury risk and evasion strategy of occupants in different seating orientations in autonomous vehicles [J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32 (6): 206-215, 225. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2019.06.021.
- [43] WU H Q, HOU H B, SHEN M, et al. Occupant kinematics and biomechanics during frontal collision in autonomous vehicles: can rotatable seat provides additional protection? [J]. Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering, 2020, 23 (5): 191-200. DOI: 10.1080/10255842.2019.1710496.
- [44] YUAN Q, PENG Y, XU X D, et al. Key points of investigation and analysis on traffic accidents involving intelligent vehicles [J]. Transportation Safety and Environment, 2021, 3 (4): tdab020. DOI: 10.1093/tse/tdab020.

## A review of crash safety research on self-driving cars

WU Hequan, LIU Jin, GONG Chuangye, WANG Haitao

(Key Laboratory of Lightweight and Reliability Technology for Engineering Vehicle, Education Department of Hunan Province, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

**Abstract:** [Purposes] Explore the safety of autonomous vehicles. [Methods] Firstly, this paper analyzes the current situation of self-driving car safety research at home and abroad and summarizes it. Then, this paper summarizes the reasons why self-driving vehicles cannot avoid collision and analyze the complex environment inside and outside the car, and discusses the coping strategies of self-driving car collision safety problems. Finally, this paper makes an outlook on the improvement of self-driving car collision safety. [Findings] At present, there are still many immature aspects of intelligent technology, especially the safety aspects of self-driving cars still need more research and experiments, such as obstacle recognition, intelligent decision-making and the interior space and layout of self-driving cars. [Conclusions] The use of self-driving technology in cars makes drivers have a safer and more comfortable driving experience, researchers should focus on the "human-centered" point of view, pay attention to human needs, protect human safety, design and develop intelligent technologies around "human-centered".

**Key words:** autonomous driving; collision safety; human injury; seat rotation; traffic accident; passenger protection

---

**Manuscript received:** 2023-01-15 ; **revised:** 2023-02-20 ; **accepted:** 2023-02-28

**Foundation item:** Project (2021JJ30723) supported by Natural Science Foundation of Hunan Province; Project supported by Degree and postgraduate Education Reform in Changsha University of Science & Technology

**Corresponding author:** WU Hequan (1982—)(ORCID:0000-0003-1939-6474), male, associate professor, research interest: automobile safety. E-mail: csust\_vehicle@hotmail.com

(责任编辑:刘平;校对:石月珍;英文编辑:刘至真)