

自动紧急制动 (AEB) 技术的研究与进展

何 仁, 冯海鹏

(江苏大学 汽车与交通工程学院, 镇江 212013, 中国)

摘 要: 为了促进汽车自动紧急制动 (AEB) 技术朝着更加安全与高效的方向发展, 该文从 AEB 系统的工作原理、发展历程、应用现状、法规标准等方面, 综述了 AEB 技术的研究进展, 总结了与 AEB 系统综合性能密切相关的关键技术, 包括 AEB 系统避撞策略、制动执行机构和环境感知机构。研究表明: 自动紧急制动系统能够有效避免或者缓解追尾碰撞, 可提高车辆主动安全性能; 受制于目前制动执行技术和前端感知技术水平, AEB 系统无法实现汽车在更高车速范围以及更复杂多交通场景下的完全避撞。自动紧急制动系统未来研究的重点在于: 复杂多交通场景下避撞策略综合性能优化; 基于更快响应时间目标的制动执行机构研发; 危险行驶工况下与多种主动安全技术的深度融合及协调控制。

关键词: 汽车工程; 主动安全; 自动紧急制动 (AEB); 制动执行机构; 前端感知技术

中图分类号: U 461.91 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1674-8484.2019.01.001

Research and development of autonomous emergency brake (AEB) technology

HE Ren, FENG Haipeng

(School of Automotive and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: A research progresses on the working principle, development path, application status and regulation of the autonomous emergency braking (AEB) technology were introduced to promote the car's autonomous emergency braking technology to be safer and more efficient. The key technologies related to the comprehensive performance of AEB system were summarized, including collision avoidance strategy, braking execution technology and front-end perception technology. The results show that AEB system can effectively avoid or mitigate collision, which can greatly improve the vehicle's active safety performance. However, AEB system can't avoid any collision at higher vehicle speed and more complex traffic scenarios on account of low-level braking execution technology and front-end perception technology. The technology focus for AEB will be comprehensive performance optimization of collision avoidance strategy in more complex traffic scenarios, the development of brake actuators based on shorter response time objectives, and the deep integration and the coordinated control of multiple active safety technologies under dangerous driving conditions.

Key words: automotive engineering; active safety; autonomous emergency brake (AEB); braking execution technology; front-end perception technology

收稿日期 / Received : 2018-08-17。

基金项目 / Supported by : 国家自然科学基金资助项目 (51875258)。

第一作者 / First author : 何仁 (1962—), 男 (汉), 江苏, 教授。E-mail: heren@mail.ujs.edu.cn。

近年来中国大陆国民经济和汽车产业飞速发展,汽车保有量逐年上升,截至2018年底已达2.4亿辆,同时汽车运行速度随着道路运输效率的提升也不断提高。但是,汽车的出现改变人们的出行习惯以及生活方式的同时也随之带来了种种问题,汽车保有量猛增、交通拥堵加剧、交通事故频发等问题所造成的人员伤亡和经济损失越来越大。2016全年共发生212 846起交通事故,共死亡63 093人,直接造成损失120 760万元^[1]。世界卫生组织和相关研究机构发布的“1990年与2020年全球疾病负担(DALYs)前十大原因排序”指出,到2020年道路交通伤害会从1990年的第9位上升至继心脏病、抑郁症的第3位人类杀手^[2]。

近年来欧盟新车安全评鉴协会(The European New Car Assessment Program, Euro NCAP)、美国高速公路安全管理局(National Highway Traffic Safety Administration, NHTSA)、日本新车安全评价协会(Japan New Car Assessment Program, J-NCAP)、中国新车安全评价协会(China-New Car Assessment Program, C-NCAP)等汽车测评机构开始关注自动紧急制动(autonomous emergency braking, AEB)系统在汽车上的应用,并相继将AEB系统纳入新车主动安全评价规程。Euro NCAP研究表明,AEB可以避免27%的碰撞事故^[3]。AEB能够很大程度上避免或缓解追尾事故的发生,保护驾乘人员安全,因此,AEB已经成为主动安全领域研究的热点。

本文概述自动紧急制动(AEB)系统的工作原理及其分类,介绍AEB技术发展历程、应用现状和法规标准;对AEB系统关键技术中的避撞策略、制动执行机构和环境感知机构进行详细综述,以期自动紧急制动技术进一步研究和应用提供技术和理论参考。

1 自动紧急制动(AEB)系统

美国高速公路安全管理局NHTSA调查结果指出,驾驶员操作失误导致的道路交通事故约占总数的90%,车辆故障导致的仅占3%。这种情况在追尾碰撞中尤为明显,追尾碰撞中驾驶员没有采取制动的情况约占31%,驾驶员采取制动但制动力不足的情况约占49%,驾驶员全力制动但是制动过晚约占20%。这些情况的发生是由于驾驶员没有意识到存在碰撞危险或者发生碰撞时间过短导致驾驶员来不及对碰撞进行正确的处理^[4-5]。如图1所示,奔驰汽车公司和美国Eaton公司通过对各类交通事故进行研究后表明,如果驾驶员相比发生事故时提前响应时间可以缩短0.5 s意识到碰撞危险并且采取避撞措施,就可以避免60%的追尾事故、

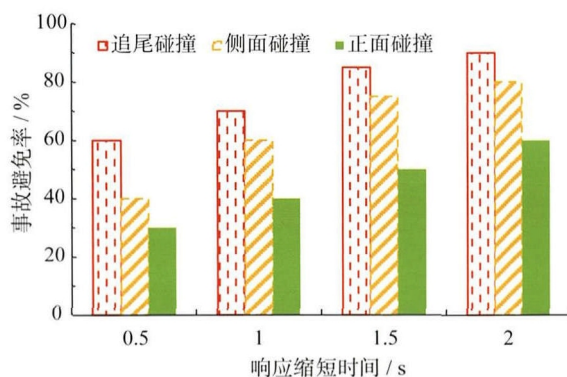


图1 不同碰撞工况下提前响应时间的事故避免率

40%的侧面碰撞事故以及30%的正面碰撞事故;如果驾驶员相比发生事故时可以提前1~2 s意识到碰撞危险并采取避撞措施,则可以避免绝大部分交通事故^[6-7]。

AEB系统是通过自动制动来避免或者缓解碰撞的一种主动安全技术,属于先进驾驶辅助系统(advanced driver assistance system, ADAS)的范畴。AEB通过毫米波雷达、激光雷达、单目/双目摄像头等传感器来探测前方目标信息,并根据前方目标信息(如目标车速、相对距离等)实时计算碰撞危险程度。当系统计算的碰撞危险程度达到临界报警点时,表明存在与前方目标碰撞的可能性,系统首先会通过声音、图像等方式向驾驶员发出预警,提醒驾驶员做出避撞操作,同时预先填充制动油路油压以在有制动需要时获得更快更高的制动水平;如果驾驶员没有对预警做出正确反应时,系统会进行部分制动,同时通过轻微振动制动踏板或方向盘等方式向驾驶员发出警告。当系统计算的碰撞危险程度达到临界制动点时,表明与前方目标碰撞几乎无法避免,系统会进行自动全力制动来缓解碰撞,其工作过程如图2所示。

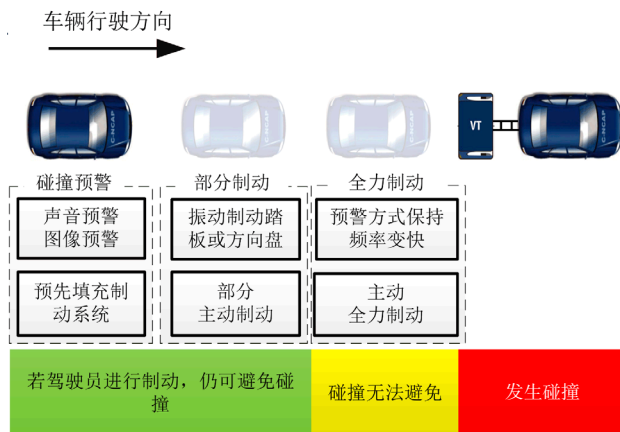


图2 自动紧急制动系统工作过程

AEB 系统主要适用于两车追尾工况, 弥补紧急情况下驾驶员制动过慢或者制动力不足的缺陷。主要通过 2 种方式来提高安全: 1) 通过提前辨别危险情况并警告驾驶员来避免事故; 2) 通过主动制动车辆, 降低不可避免事故的严重程度^[8]。

根据不同的路况, AEB 可分为用于城市路况的城市 AEB、用于高速公路路况的城际 AEB 以及用于保护行人的行人 AEB。城市 AEB 主要利用激光雷达来探测前方 10 m 内的目标车辆, 在车速不超过 20 km/h 情况下工作; 城际 AEB 主要利用毫米波雷达等远距离雷达来探测前方 100 m 内的目标车辆, 在车速介于 50 到 80 km/h 情况下工作; 行人 AEB 主要利用摄像头、红外装置等来探测目标行人。

2 自动紧急制动系统(AEB)发展历程

2.1 AEB 系统在 20 世纪的发展

1938 年, Gibson 首次对汽车行驶安全进行讨论, 并将碰撞、障碍物、汽车安全等概念运用到汽车驾驶理论中, 他指出影响汽车行驶安全的主要因素是自然边界、高车速下的惯性、障碍物、移动的障碍物、潜在障碍以及法规限制等^[9]。1960 年, 以德国、日本、美国为代表的发达国家开始进行主动防撞系统的研究, 但由于当时微波技术水平较低、硬件成本过高, 导致主动防撞系统没有产生技术突破^[10]。直到 1980 年, 雷达技术以及微机技术的迅速发展促进了主动防撞技术产生决定性的突破, 主动防撞系统才正式开始快速发展。

1986 年, 德国奔驰公司和其他 10 家欧洲主要汽车制造商开始进行 PROMETHEUS 计划, 其主要目的是通过研究先进电子计算技术来提高道路安全和交通效率。PROMETHEUS 计划意图推进一款具有更高应用性和极强推广价值的智能化汽车主动防撞系统^[11-12]。1999 年, 梅赛德斯一奔驰推出 Distrnic 主动防撞系统并将其用在 220 型系列 S 级轿车上, 该系统能够保持所选车速(巡航控制功能)并且能够控制与前车的车距^[13]。梅赛德斯一奔驰也成为当时世界上第一个能够提供这类技术的汽车制造商^[14]。

1991 年, 由日本交通运输部倡导的第 1 个先进安全汽车(advanced safe vehicle, ASV)计划开始实施, 其主要目的是通过开发智能车和安全驾驶系统作为 21 世纪交通安全关键技术之一^[15]。在 2000 年获得了产业化的产品生产^[16-17]。2000 年, 日本丰田汽车公司自主研发设计了主动预防安全系统, 该系统能够探测到前方物体与自车之间的相对距离以及检测到驾驶员和乘客的安全带信息, 并在这些信息基础上通过厂家设定的

控制算法进行计算, 自动执行辅助制动功能。

相较于日本和欧洲, 美国对主动防撞系统的研究起步较晚。1990 年, 美国交通部 USDOT 在华盛顿成立美国智能车辆公路协会(Intelligent Vehicle Highway Society of America, IVHS America)。1995 年, 福特和通用汽车公司成立了防碰撞联盟 CAMP 并开始研制主动防撞系统。1998 年, 美国交通部(U.S. Department of Transportation, USDOT) 开始进行以主动防撞系统(collision avoidance system, CAS)为中心的主动智能汽车 IVI 项目, 并取得阶段成果^[18]。

2.2 AEB 系统在 21 世纪的发展

21 世纪初, 随着各大汽车厂商和研究机构对主动防撞系统的进一步研究, 主动防撞系统的研究方向逐渐分化为主要关注驾驶舒适性的自适应巡航系统(adaptive cruise control, ACC)以及主要关注行驶安全性的自动紧急制动系统。

全球主要的汽车厂商相继开发了各自的 AEB 产品, 如沃尔沃的 City Safety 系统^[19]、福特的 Active City Stop^[20]、菲亚特的 City Brake Control 系统^[21]、奥迪的 Pre Sense Front 系统^[22]、大众的 Front Assist 系统^[23]、斯柯达推出的 Front Assistant 系统^[24]、本田的 Collision Mitigation Brake System 系统^[25]、三菱的 Forward Collision Mitigation 系统^[26]、梅赛德斯奔驰的 PRE-SAFE Brake 系统^[27]、宝马的 Pedestrian Warning with City Brake Activation 系统^[28]等。尽管各个汽车厂商对自己 AEB 产品命名并不一致, 每个产品的功能又不尽相同, 但是它们都是通过在紧急情况下使用主动的全力制动来避免碰撞, 这同样也是自动紧急制动系统一个最明显的特征。

随着主要的汽车厂商开发各自的 AEB 产品, 为了进一步促进自动紧急制动系统的应用, 降低碰撞事故率, 增加道路安全, 欧洲、美国、中国、日本^[29]等国家发布了 AEB 相关法规并开始将 AEB 纳入新车主动安全评价规程。

2009-07-13, 欧洲委员会发布新的一般安全法规(EC) 661/2009, 首次给出 AEB 在安装以及型式批准方面的基本要求, 该法规第 10 章规定了 M2、M3、N2、N3 类车辆必须配备有 AEB^[30]。2012-04-16, 欧盟发布法规(EU) 347/2012, 进一步给出 M2、M3、N2、N3 类车辆上 AEB 技术要求、测试项目以及测试程序等^[31]。2013-08-07, 欧盟经济委员会(United Nations Economic Commission for Europe, UNECE) 发布自动紧急制动系统安全法规 ECE R131, 如表 1 所示, 该法

表 1 欧洲 ECE R131 自动紧急制动系统安全法规

自车类型	静止目标			运动目标			
	预警模式及启动时间点		避撞要求	预警模式及启动时间点		避撞要求	目标速度 (km·h ⁻¹)
	至少 1 种 警告方式	至少 2 种 警告方式		至少 1 种 警告方式	至少 2 种 警告方式		
M ₃ , N ₂ > 8 t 以及 N ₃	不迟于紧急制动 阶段前 1.4 s。	不迟于紧急制动 阶段前 0.8 s。	碰撞时的速度减少量 不少于 20 km/h。	不迟于紧急制动 阶段前 1.4 s。	不迟于紧急制动 阶段前 0.8 s。	不得发生 碰撞。	12±2
N ₂ ≤ 8 t 以 及 M ₂	不迟于紧急制动 阶段前 0.8 s。	紧急制动阶段开 始前。	碰撞时的速度减少量 不少于 10 km/h。	不迟于紧急制动 阶段前 0.8 s。	紧急制动阶段开 始前。	不得发生 碰撞。	67±2

规在(EU) 347/2012 法规基础上统一规范了 M2、M3、N2、N3 类车辆上 AEB 技术标准, 进一步指出 AEB 需要配备有相应的失效防护装置以及更加先进车辆电子控制系统^[32]。2014 年, 欧洲新车安全评鉴协会 (Euro NCAP) 开始将 AEB 纳入新车主动安全评价规程, 没有配备有 AEB 的新车不会从 Euro NCAP 获得五星级的安全认证^[33]。

2007 年 9 月, 大陆集团、德尔福公司、福特汽车公司、通用汽车公司和梅赛德斯奔驰共同参与的碰撞缓解制动 (crash imminent braking, CIB) 项目正式启动, 主要目的是为了确定自动紧急制动系统的最低性能要求和建立评估该系统性能的测试方法从而降低车辆发生碰撞的可能性^[34]。2012 年 6 月, 美国高速公路安全管理局 (NHTSA) 在碰撞缓解制动项目的基础上发布了具有前瞻性的先进制动技术研究报告, 报告指出了碰撞缓解制动系统的测试场景和性能要求^[35]。2014 年 8 月, NHTSA 发布了关于 AEB 系统的研究报告, 沿用了欧洲 AEB 系统的命名方式, 将前方碰撞预警系统、动态制动辅助系统和碰撞缓解制动系统统称为自动紧急制动 (AEB) 系统, 同时增加前方目标制动的 AEB 测试场景。2016-03-17, NHTSA、美国公路安全保险协会 (Insurance Institute for Highway Safety, IIHS) 和 20 家汽车厂商共同签订了 1 份协议: 在 2022 年之前 AEB 系统要成为几乎所有乘用车标准配置^[36]。

中国大陆对 AEB 测评方法的建立起步较晚, 自欧美发布 AEB 相关法规和测评方法后, 中国汽车技术研究中心以及同济大学的刘颖、朱西产、李霖、江丽君等开始建立适用于中国大陆交通状况的 AEB 测试场景并做出了重要的贡献^[37-38]。2017-04-20, 中国汽车技术研究中心发布了中国新车评价规程 (C-NCAP) 管理规则 (2018 年版), 该管理规则新增加车辆 AEB 系统的试验和评价方法。试验项目主要包括 AEB 功能、前方碰撞预警功能和人机交互功能, 而试验场景主要分为前车静止、前车匀速运动和前车制动 3 种, 试验车辆在不同车速要求的试验场景下完成避撞要求则会获得较高

的评价分数。该管理规则于 2018-07-01 起开始实施, 同时自动紧急制动被正式纳入新车主动安全评价规程^[39]。

3 自动紧急制动系统 (AEB) 避撞策略

目前国内外汽车厂商及研究机构针对 AEB 避撞策略的制定主要以提高 AEB 系统的综合性能为目标, 围绕基于行车间距的安全距离避撞策略和基于驾驶员反应特性的碰撞发生时间避撞策略展开研究。

3.1 基于行车间距的安全距离避撞策略

基于行车间距的安全距离避撞策略是指尽可能避免与前方车辆发生碰撞所要保持的安全距离, 从距离尺度将自车与前车的实时车间距作为衡量行车危险状态的指标, 并与策略中预警安全距离与紧急制动安全距离进行比较判断, 从而指导 AEB 系统做出预警和主动制动的避撞操作。而策略中预警安全距离与紧急制动安全距离主要由自车车速、与目标车的相对车速、自车最大制动减速度、目标车最大制动减速度、系统延迟时间、驾驶员反应时间、车辆停止后需要保持的车间距等参数实时确定。

20 世纪末, 马自达公司、本田公司、美国高速公路安全管理局为尽早开发出 AEB 系统, 分别提出了 Mazda^[40]、Honda^[41]、NHTSA^[42] 等经典安全距离避撞策略。

日本马自达公司在 20 世纪提出了 Mazda 安全距离避撞策略, Doi 等依此开发了车辆前方碰撞预警系统。以式 (1) 计算制动安全车间距:

$$d_{br} = f(v, v_{rel}) = \frac{1}{2} \left[\frac{v^2}{a_1} - \frac{(v - v_{rel})^2}{a_2} \right] + vt_1 + v_{rel}t_2 + d_0. \quad (1)$$

其中: d_{br} 为制动安全车间距; v 、 v_{rel} 分别为自车车速和相对车速; a_1 、 a_2 分别为自车最大制动减速度和目标车最大制动减速度; t_1 、 t_2 分别为系统延迟时间和驾驶员反应时间; d_0 为车辆停止后需要保持的车间距。

本田公司的 Fujita 等提出了 Honda 安全距离避撞

策略并设计出主动防撞系统, 该系统采用两级预警算法, 这同样也是当时应用最为广泛的预警安全距离防撞策略。预警安全车间距 d_w 和制动安全车间距 d_{br} 分别表示为:

$$d_w = t_{\text{Honda}} v_{\text{rel}} + d_{\text{Honda}} \quad (2)$$

其中 t_{Honda} 为策略中的时间系数, 取值 2.2 s; d_{Honda} 为策略中的距离系数, 取值 6.2 m。

$$d_{br} = \begin{cases} t_2 v_{\text{rel}} + t_1 t_2 a_1 - 0.5 a_1 t_1^2, & \frac{v_2}{a_2} \geq t_2; \\ t_2 v - 0.5 a_1 (t_2 - t_1)^2 - \frac{v_2^2}{2 a_2}, & \frac{v_2}{a_2} < t_2. \end{cases} \quad (3)$$

其中, v_2 为目标车车速。

美国高速公路安全管理局 NHTSA 的 Burgett 等提出 NHTSA 安全距离防撞策略, 将碰撞情形分为 3 种, 并分别考虑每种情况的临界制动距离和预警距离, 该策略也被用于当时通用汽车开发的碰撞预警系统中^[43]。

$$D_{\text{miss}} = S_{\text{real}} + 0.5(a_H - a_{H\max})t_R^2 - 0.5a_L t_{LS}^2 - (a_H - a_{H\max})t_R t_{HS} + S_{\text{rel}} t_{LS} + a_L t_{LS} t_{HS} - 0.5a_{H\max} t_{HS}^2, \quad t_{LS} \geq t_R. \quad (4)$$

$$D_{\text{miss}} = S_{\text{real}} + S_{\text{rel}} t_M + 0.5(a_L - a_{H\max})t_M^2 - (a_H - a_{H\max})t_R t_M + 0.5(a_H - a_{H\max})t_R^2, \quad t_{LS} < t_R. \quad (5)$$

其中: D_{miss} 、 S_{real} 、 S_{rel} 分别为制动安全车间距、雷达探测到的实际车间距、相对速度; v_H 、 v_L 分别为自车车速、目标车车速; a_H 、 $a_{H\max}$ 、 a_L 分别为自车制动减速度、自车最大制动减速度、目标车制动减速度; t_R 、 t_{LS} 、 t_{HS} 、 t_M 分别为驾驶员反应时间与系统延迟时间总和、目标车减速时间、自车减速时间、相对速度降为零的时间。

Mazda、Honda、NHTSA 等经典安全距离防撞策略中, 自车车速、与目标车的相对车速和实际车间距可以分别通过车速传感器和车载雷达获得, 但自车最大制动减速度、目标车最大制动减速度和驾驶员反应时间等参数在当时实时获取困难, 汽车厂商和研究机构通过大量试验获得的参数简化的安全距离防撞策略, 安全车间距本质上就变为仅仅与自车车速和相对车速相关的函数。

$$d_{br} = f(v, v_{\text{rel}}, \dot{v}, \dot{v}_{\text{rel}}). \quad (6)$$

其中: \dot{v} 为自车减速度; \dot{v}_{rel} 为相对减速度。

由于自车最大制动减速度受制于真实路面附着条件, Mazda、Honda、NHTSA 等经典安全距离防撞策略的执行主要依赖于雷达获取到的前车行车信息, 对路面附着条件的变化并不敏感, 这意味着在沥青等高

附着路面上, 经典安全距离防撞策略指导车辆进行主动制动的时刻与冰雪等低附着路面近乎相同, 从而导致原本能够在高附着路面能够完全防撞的安全距离策略到了低附着系数路面往往很容易发生碰撞。换言之, 如果制定的防撞策略忽视真实路面所能提供的附着能力, 容易造成自动紧急制动系统在低附着系数路面防撞能力不足、防撞效率低等问题^[44]。

为解决上述问题, 加利福尼亚伯克利大学和韩国首尔大学等研究人员基于路面识别模型分别提出了 Berkeley 安全距离防撞策略^[45] 和 SeungwukMoon 安全距离防撞策略^[46]。

加利福尼亚伯克利大学的 Seiler 等提出 Berkeley 安全距离防撞策略, 利用韩国汉阳大学 Kyongsu^[47] 等提出的轮胎路面附着系数估计模型对路面附着系数进行估计, 并对 Mazda 和 Honda 安全距离防撞策略进行了优化与改进。Berkeley 安全距离防撞策略能够适应不同的路面, 可以有效解决由于所留安全距离过大所造成误报警率过高的问题, 也可以解决由于所留安全距离过小所造成的报警不及时的问题^[48]。提出预警安全车间距 d_w 、制动安全车间距 d_{br} 、路面附着系数标定函数 $f(\mu)$ 为:

$$d_w = \frac{1}{2} \left[\frac{v^2}{a} - \frac{(v - v_{\text{rel}})^2}{a} \right] + vt + d. \quad (7)$$

$$d_{br} = v_{\text{rel}}(t_1 + t_2) + 0.5a_2(t_1 + t_2)^2. \quad (8)$$

$$f(\mu) = \begin{cases} f(\mu_{\min}), & \mu \leq \mu_{\min}; \\ f(\mu_{\min}) + \frac{f(\mu_{\text{norm}}) - f(\mu_{\min})}{\mu_{\text{norm}} - \mu_{\min}} (\mu - \mu_{\min}), & \mu_{\min} < \mu < \mu_{\text{norm}}; \\ f(\mu_{\text{norm}}), & \mu_{\text{norm}} \leq \mu. \end{cases} \quad (9)$$

其中: a 为两车相比后的较大的制动减速度; t 为减速时间; d_0 为车辆停止后需要保持的车间距; μ 、 μ_{\min} 、 μ_{norm} 分别为路面附着因数估计值、需要考虑的最小路面附着因数、正常路面附着因数。

韩国首尔大学的 SeungwukMoon 等同样利用韩国汉阳大学 Kyongsu 等提出的轮胎路面附着因数估计模型对路面附着系数进行估计, 并依此提出 SeungwukMoon 安全距离防撞策略。预警安全车间距 d_w 、制动安全车间距 d_{br} 、路面附着系数标定函数 $f(\mu)$ 为:

$$d_{br} = v_{\text{rel}} t_1 + f(\mu) \frac{(2v - v_{\text{rel}})v_{\text{rel}}}{2a}. \quad (10)$$

$$d_w = v_{\text{rel}} t_1 + f(\mu) \frac{(2v - v_{\text{rel}})v_{\text{rel}}}{2a} + vt_2. \quad (11)$$

$$f(\mu) = \begin{cases} f(\mu_{\min}), & \mu \leq \mu_{\min}; \\ f(\mu_{\min}) + \frac{f(\mu_{\text{nom}}) - f(\mu_{\min})}{\mu_{\text{nom}} - \mu_{\min}}(\mu - \mu_{\min}), & \mu_{\min} < \mu < \mu_{\text{nom}}; \\ f(\mu_{\text{nom}}), & \mu_{\text{nom}} \leq \mu. \end{cases} \quad (12)$$

3.2 基于驾驶员反应特性的碰撞发生时间避让策略

基于驾驶员反应特性的碰撞发生时间避让策略是指在符合驾驶员对行车危险情况下的认知和判断条件下,从时间尺度将自车当前运动状态到与前车发生碰撞所剩余的碰撞发生时间(time to collision, TTC)作为衡量行车危险状态的指标。策略将前端雷达获取到的实际车间距与相对车速相除得到实时 TTC 值,并与系统中所设定的碰撞预警的 TTC 值和紧急制动的 TTC 值进行比较判断,从而指导 AEB 系统做出预警和主动制动的避让操作。国内外汽车厂商及高校针对碰撞发生时间避让策略展开了大量的理论和实践研究,并应用到 AEB 系统避让策略中。

美国宾夕法尼亚运输和交通安全中心的 Hayward 指出驾驶员在行驶过程中尽管不能准确了解前方车辆运动状态,但是却能够对自车危险状态做出准确预测和判断,从而依此提出了早期的驾驶员危险认知行为模型并首次介绍了碰撞发生时间的概念^[49]。

英国爱丁堡大学的 Lee 指出驾驶员在发生紧急情况时视觉直观上最易获取的是碰撞发生时间而不是车距、车速和加速度等信息,并通过对碰撞发生时间 TTC 的预测和判断来确定何时开始制动,将碰撞发生时间 TTC 用于碰撞预警策略更易体现驾驶员对危险行车状态的认知和判断^[50]。

美国密歇根大学的 Lee 基于真实驾驶数据对 Mazda、Honda、NHTSA 等安全距离避让策略以及碰撞发生时间避让策略从安全性和舒适性 2 个方面进行评估,指出相比于其他安全距离模型,基于碰撞发生时间 TTC 的安全距离模型安全性和舒适性都具有不错的表现^[51]。

英国拉夫堡大学的 Hirst 指出自车速度和相对车速是 AEB 系统对驾驶员正常制动操作造成干扰的主要影响因素,并提出了速度补偿的 TTC 算法^[52]。

福特汽车研究中心的 Miller 等为开发出适应不同偏好驾驶员的具有个性化的 AEB 系统,提出参数可调的带扩展项 TTC 算法,扩展项中主要包括驾驶员的反应时间、制动减速度和估计的路面附着系数等参数^[53]。

美国密歇根大学的 Fancher 指出驾驶员对前方目标车辆的感知普遍存在“looming”效应,即驾驶员视野中前方目标车辆的大小主要取决于两车之间的相对距离,

继而提出了碰撞时间的倒数 TTC^{-1} 算法以表征“looming”效应,从而更好地反映驾驶员的避让特性^[54]。

北京理工大学的裴晓飞以碰撞时间倒数 TTC^{-1} 作为适应驾驶员特性的评价指标,结合国外驾驶员模型的统计数据,建立了基于危险系数 ε 的分级安全距离模型^[55]。

同济大学的李霖等以碰撞时间的倒数 TTC^{-1} 建立行车危险估计算法,并根据我国实际交通工况中提取的驾驶员紧急制动行为特征参数确定阈值,对于设计针对中国用户的 AEB 系统具有重要的意义^[56]。

Hua-chung 汽车研究中心的 Han 等使用包括纵向和横向动力学车辆模型的 combined-slip 轮胎模型来估计峰值路面附着系数,从而计算出与路面附着系数相关的自适应 TTC 阈值以作为判定车辆自动制动的依据,大大提升了 AEB 系统在不同路面的性能^[57]。

3.3 制动转向协同避让策略

制动转向协同避让策略通过纵向的 AEB 系统以及横向的主动转向系统协同工作来实现对前方目标的完全避让,主要用于应对 AEB 系统无法通过纯粹纵向制动对前方目标实现高车速和低车距的完全避让,例如车辆前方突然出现行人横穿马路而导致实时 TTC 瞬间变化并小于紧急制动 TTC,此时即使 AEB 充分发挥作用,车辆仍然会以较高的车速与行人发生碰撞^[58]。协同避让策略中 AEB 系统仍需要为整个避让阶段的主动制动以及主动转向过程制动控制提供支持,对 AEB 系统避让策略提出了更高的要求。

为此,国内外汽车厂商和高校对自动紧急制动过程中驾驶员避让行为进行了分析,发现当碰撞发生时间 TTC 较大(约 2.5 s)时,驾驶员更多倾向于采用制动来进行避让,而当碰撞发生时间 TTC 较小(约 1.5 s)时,驾驶员更多地倾向于采用转向或者转向同时制动来进行避让,且采用转向避让的比例随着 TTC 的减小而有所增加^[59-60];同时,基于驾驶员避让行为的分析对 AEB 系统避让策略做出了进一步地丰富与优化,提出了依据最小舒适安全转向防撞距离的 AEB 控制策略^[61]、集成制动控制和转向控制的自动紧急控制(autonomous emergency control, AEC)策略^[62-63]、基于功能分配与多目标模糊决策的转向与制动协同避让控制策略^[64],显著提高了车辆的避让性能。

3.4 AEB 系统避让策略总结

通过对国内外研究现状分析,可知 AEB 避让策略综合性能可以从安全性、舒适性和智能性 3 个方面进行评价,其中安全性是指从同样测试条件下避让策略

能够通过实现避免碰撞的车速范围来体现;舒适性主要通过避撞策略干预驾驶员正常避撞操作程度来体现;智能性主要通过避撞策略能够实现对多种复杂交通场景的支持来体现。在 AEB 系统发展初期,汽车厂商为实现较高车速范围下的避撞效果,重点关注 AEB 避撞策略的安全性,从而采用较为保守的安全距离避撞策略,会出现相较于驾驶员正常避撞操作更早地进行主动制动的情况;由于安全距离避撞策略会干预驾驶员正常判断从而影响驾乘体验,汽车厂商逐渐开始关注 AEB 避撞策略的舒适性,采用符合驾驶员避撞特性的碰撞发生时间避撞策略,一般会相较于驾驶员正常避撞操作稍晚时进行主动制动;在 AEB 系统整体响应时间一定的前提下, AEB 避撞策略的安全性和舒适性存在矛盾,从而导致目前 AEB 只能够在低车速范围下实现完全避撞。因此,汽车厂商为实现更高车速范围下的完全避撞并提高安全性,开始研究制动转向协同避撞策略来实现纯粹纵向制动避撞策略不能够实现的高车速范围下的完全避撞。

目前 AEB 避撞策略主要围绕安全性和舒适性,应用的交通场景较为简单,导致避撞策略智能性较低。随着毫米波雷达、激光雷达、单目/双目摄像头等前端感知技术发展, AEB 获取到的周围交通场景信息及细节更加丰富,单一交通场景的避撞策略将不能够适应不同复杂的交通场景,为此,汽车厂商将会依据更多复杂交通场景来制定对应的避撞策略,不断丰富和完善 AEB 避撞策略;此外,由于纯粹纵向制动避撞策略不能够适应复杂交通场景,汽车厂商也会选择制定预警、制动、转向、加速融合避撞策略来进一步补充和完善 AEB 避撞策略,这些将会成为目前及未来一段时期内 AEB 避撞策略选择的一个重要方向。

4 自动紧急制动(AEB)系统制动执行机构

AEB 系统主动制动功能的实现离不开 AEB 执行机构,目前国内外汽车厂商及研究机构针对 AEB 执行机构的研发,主要以缩短主动制动响应时间和提高主动制动控制精度为目标,围绕实现制动管路主动建压的压力供给单元以及实现制动轮缸压力精确控制的压力调节单元 2 个核心部件展开研究。BOSCH、Continental、TRW、DELPHI、HITACHI、AISIN 等汽车制动系统零部件供应商给出了 AEB 制动执行机构的解决方案,主要包括以汽车电子稳定控制系统为基础的电液助力制动系统、以汽车电子液压制动系统为基础的高压蓄能器主动建压制动系统、以汽车电子助力制动系统为基础的主缸助力电机主动建压制动系统解决方案,其系统结构示意图如图 3—图 5 所示。

以新型汽车电子助力制动系统为基础的主缸助力电机主动建压制动系统解决方案,其系统结构示意图如图 3—图 5 所示。

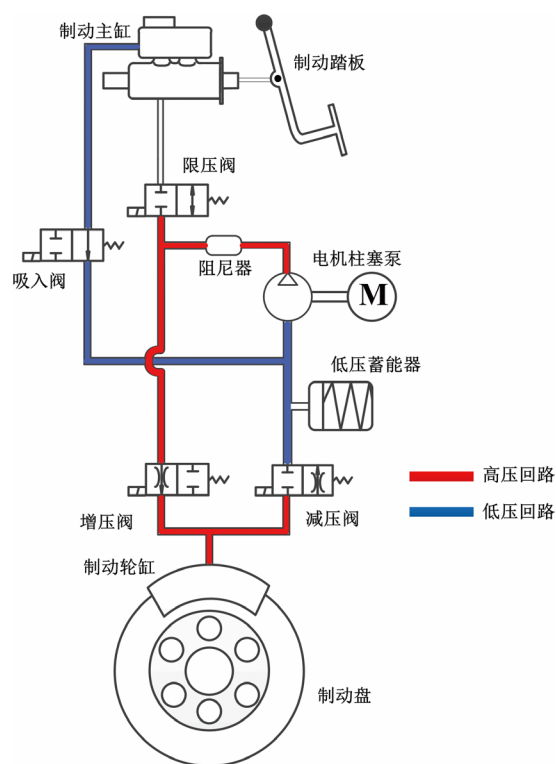


图 3 电机柱塞泵主动建压制动系统

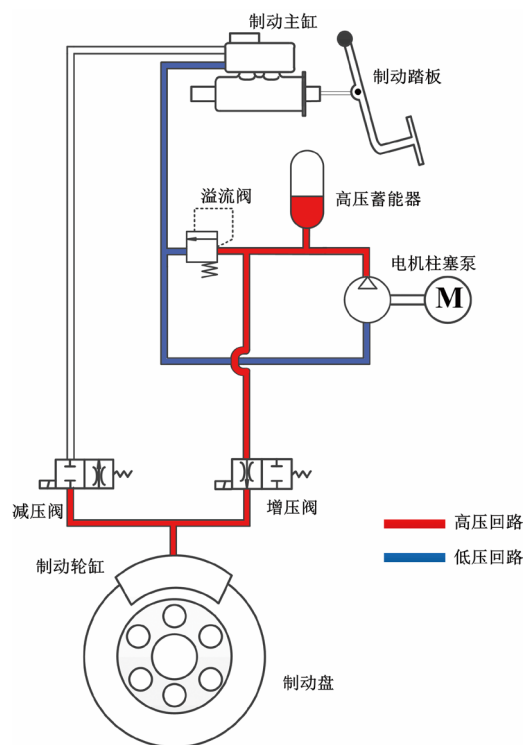


图 4 高压蓄能器主动建压制动系统

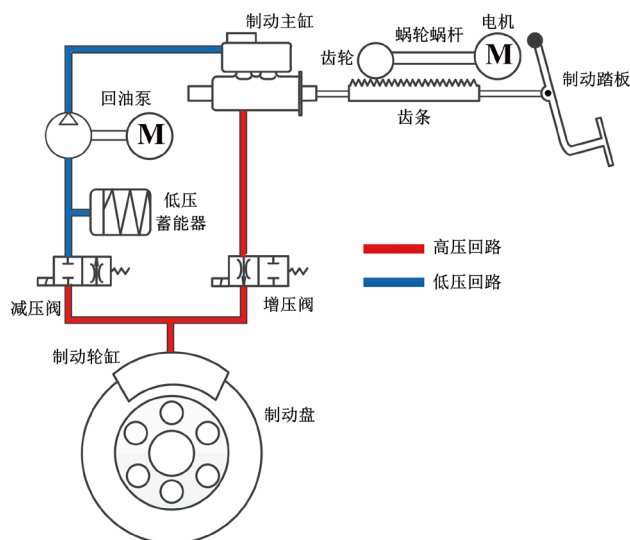


图 5 主缸助力电机主动建压制动系统

4.1 电机柱塞泵主动建压制动系统解决方案

电机柱塞泵主动建压制动系统解决方案是在已经成熟的汽车电子稳定控制系统基础上兼容 AEB 功能,通过增加原有电机柱塞泵的电机额定转速以及排量,在不用改变制动系统整体结构布置的基础上就能够满足自动紧急制动所需的高制动减速度要求,实现成本较低;主机厂为了在短期内尽快推广 AEB 系统,占取市场份额,更加倾向于采用这类方案。目前博世的 ESP 9.3、大陆的 MK100、天合的 EBC460 以及德尔福、日立、爱德克斯的汽车电子稳定控制 (electronic stability control, ESC) 系统都已经兼容 AEB 功能,并应用到沃尔沃、福特、丰田等汽车上。清华大学、吉林大学、重庆大学、武汉理工大学等高校针对电机柱塞泵主动建压制动系统的模型建立、主动制动系统关键参数影响分析、轮缸压力精确控制开展了一些理论和试验研究。基于 AMESim 软件及 Simulink 软件建立了精确的电机柱塞泵主动建压制动系统的联合仿真模型^[65-66],分析了液压控制阀结构参数、回油泵排量、低压蓄能器、预压单元及液压介质和制动轮缸等关键特征参数对主动制动系统的轮缸响应速度等动态特性的影响^[67-71],基于主动制动系统中不同关键部件物理特性对主动建压过程中轮缸压力控制进行了优化^[72-74],并取得了大量的理论和试验研究成果。

4.2 高压蓄能器主动建压制动系统解决方案

在汽车电子稳定控制系统产品化基础上高压蓄能器主动建压制动系统解决方案发展起来。在电机技术不够成熟的 20 世纪 90 年代至 21 世纪初,汽车制动系

统零部件供应商为了解决 AEB 系统所需的高制动压力与流量要求,没有直接采用电机柱塞泵作为供能装置,而是折中采用高压蓄能器作为蓄能和供能装置,利用电机柱塞泵建立高压制动液并预先存储在高压蓄能器中,在需要主动紧急制动时释放,能够以更快的速度提供制动所需的制动液并减少制动响应时间^[75]。在这一时期,博世的 SBC 和 HAS Hev、德尔福的 DBC9、天合的 SCB 以及大陆、韩国万都的电子液压制动 (electronic hydraulic brake, EHB) 系统都已经能够实现自动紧急制动,并开始为奔驰、通用、福特、丰田等汽车厂家供货。在中国大陆,如吉林大学、南京航空航天大学等高校对高压蓄能器主动建压制动系统的研究才刚刚起步,大多数仅构建了高压蓄能器主动建压制动系统的总体方案^[76],分析了高压蓄能器压力、脉宽调制占空比、轮缸工作点压力及液压管路等主动制动系统关键特征参数对系统动态性能的影响^[77-78],并对系统中的液压控制单元 (hydraulic control unit, HCU) 及其控制逻辑进行了初步探索性研究^[79],但目前高压蓄能器主动建压制动系统中压力控制方法的研究大部分停留在仿真阶段或台架试验阶段,极少进行实车测试^[80]。

4.3 主缸助力电机主动建压制动系统解决方案

主缸助力电机主动建压制动系统解决方案最早出现于纯电动车上,主要为解决纯电动车没有发动机无法通过进气歧管实现真空助力的问题。21 世纪初随着电机技术逐渐成熟,汽车制动系统零部件供应商已经能够在制动助力基础上实现自动紧急制动功能。通过取消传统的真空助力器,并准确控制电机和减速机构来驱动主缸活塞,从而实现 AEB 系统所需的高制动减速度需求,由于主缸助力电机主动建压具有制动响应速度快、安全可靠、对原有系统布置更改少的优点,已经成为汽车制动系统零部件供应商及国内外高校研究机构的研究热点。目前博世的 iBooster、大陆的 MKC1、天合的 IBC、日立的 e-ACT、LSP 的 IBS 都已经能够实现自动紧急制动功能,并应用到大众、通用、特斯拉等汽车上。吉林大学、同济大学等高校针对主缸助力电机主动建压制动系统中制动系统样机设计^[81]及台架试验^[82]、主缸压力精确控制等开展了大量的理论及试验研究。针对摩擦对主缸助力电机主动建压制动系统中主缸压力控制的影响,提出了基于 LuGre 摩擦模型的摩擦补偿控制方法^[83]、基于田口方法的非线性时变系统鲁棒性液压力控制方法^[84]、前馈—摩擦补偿和反馈控制的控制方法^[85]、颤振补偿控制方法^[86]、电机跟随控制方法^[87],能够显著提高系统控制精度和液压力控

制品质。

4.4 AEB 系统制动执行机构总结

通过对国内外研究现状分析可知, 目前 AEB 制动执行机构几种解决方案的研制主要集中在国外博世、大陆、天合等汽车制动系统零部件供应商, 并开发出如 ESP 9.3、MK 100、iBooster、e-ACT、HAS Hev 等成熟产品, 在目前和未来一段时期内都将占据 AEB 制动系统的绝大部分市场份额。吉林大学、同济大学、清华大学等高校为打破国外技术壁垒, 针对这几种解决方案展开了初步的方案设计、理论分析以及台架试验研究, 但所建立的控制策略对复杂工况的鲁棒性和适应性缺乏足够的试验验证, 在工程实践方面的可靠性和实用性缺乏考虑, 距真正意义上的国产 AEB 系统

的产品化、规模化和市场化还有一定的距离。

如表 2 所示, 高压蓄能器主动建压解决方案是在电机技术不够成熟时期, 汽车制动零部件厂商为实现自动紧急制动所选择的妥协方案, 且高压蓄能器具有对振动敏感、安全可靠性低、体积大、成本高等缺点。目前汽车零部件厂商为减少对原有制动系统改动, 会相对倾向于选择电机柱塞泵、主缸助力电机和“电机柱塞泵 + 主缸助力电机”作为 AEB 系统主动建压解决方案, 这些也会成为目前及未来一段时期内 AEB 制动系统方案选择的一个重要方向; 汽车制动零部件厂商及研究机构为了进一步减少主动制动响应时间、缩短紧急制动距离、简化制动系统, 也开始了电子机械制动^[88]和电磁制动^[89-90]等新一代制动系统的研发, 未来也会成为 AEB 系统方案选择的一个重要方向。

表 2 3 种 AEB 主动制动解决方案对比

	电机柱塞泵主动建压	高压蓄能器主动建压	主缸助力电机主动建压
压力供给单元	电机柱塞泵	电机柱塞泵 + 高压蓄能器	电机 + 减速装置
制动系统改动程度	小	大	较大
主动建压实现难度	较难	易	难
主动建压动态响应	较慢	较快	快
主要供应商	博世、大陆、天合、德尔福、日立、爱德克斯	博世、大陆、天合、德尔福、爱德克斯、万都	博世、大陆、天合、日立、LSP
主要产品	ESP 9.3、MK 100、EBC460	HAS Hev、DBC9、SCB	iBooster 2.0、MK C1、e-ACT、IBC、IBS

5 自动紧急制动系统(AEB)环境感知机构

AEB 系统对前方目标车辆有效地探测并快速获得目标车辆行车信息功能的实现离不开 AEB 环境感知机构, 目前汽车厂商及研究机构针对 AEB 环境感知机构的研发, 主要以提高前方目标探测准确性、丰富前方目标识别多样性、缩短探测及识别所需时间为核心目标。BOSCH、Continental、TRW、DELPHI、DENSO、HITACHI、Velodyne、Quanergy、Ibeo 等汽车零部件供应商也给出了 AEB 环境感知机构的解决方案, 主要包括毫米波雷达、单目/双目摄像头、激光雷达, 其外形如图 6 所示, 3 种传感器各有优缺点, 汽车厂商往往通过采用多传感器组合方式来发挥各传感器优势, 从而将 AEB 系统应用到更多复杂交通场景中^[91]。

5.1 毫米波雷达

毫米波雷达使用 30~300 GHz 频域的毫米波, 工作频率介于无线电和可见光之间, 兼具微波制导和光电制导特点。其工作原理主要通过振荡器发射频率随时间逐渐增加的电磁波, 并根据返回波形和发出波形



(a) Bosch MRR 毫米波雷达



(b) Velodyne 64 线激光雷达



(c) Bosch 双目摄像头

图 6 3 种 AEB 环境感知机构

的频率差计算前方目标的相对距离和相对车速等。雷达探测分辨精度的衡量指标主要包括距离探测精度、角分辨率、速度分辨率; 毫米波雷达的工作频率越

高,探测分辨精度也就越高。按照工作频率毫米波雷达可以分为短程毫米波雷达(4 GHz 频段)、中程毫米波雷达(76~77 GHz 频段)、长程毫米波雷达(77 GHz 频段)。毫米波雷达具有探测距离远、不受天气状况影响以及成本低的优势,且其测速、测距的精度要远高于摄像头和激光雷达,能够适用于追尾碰撞等相对简单场景,在自动紧急制动系统发展初期被汽车厂商广泛用于低速城市 AEB 系统和高速城际 AEB 系统的开发^[92]。目前,AEB 系统中的毫米波雷达的生产厂商主要集中在德国、美国和日本,主要包括 BOSCH、Continental、DELPHI、TRW、DENSO、HITACHI 等。BOSCH、Continental 等现已掌握 77GHz 毫米波雷达技术,中国大陆企业的产品主要是中短程毫米波雷达,如杭州智波、芜湖森思、深圳卓泰、沈阳承泰、南京隼眼电子等,产品主要以 24 GHz 毫米波雷达为主,对 77 GHz 产品研发刚起步,但发展很快。

5.2 单目、双目摄像头

由于毫米波雷达在自动紧急制动过程中仅能够实现对方目标的探测而无法实现对方目标的有效识别,从而使得 AEB 系统无法支持更多复杂交通场景,为此汽车厂商逐渐倾向于将摄像头纳入 AEB 环境感知机构的解决方案。单目、双目摄像头作为 AEB 环境感知机构的解决方案,其分辨率要远远高于毫米波雷达和激光雷达,且能够获取足够多的环境细节,帮助车辆识别行人、小孩、动物等多种目标,是行人 AEB 系统的重要组成部分。其工作原理主要是将景物通过镜片组生成光学图像并投射到互补金属氧化物半导体(complementary metal-oxide-semiconductor, CMOS)光电传感器,再由图像处理器转化成数字图像信号,最后通过采集图像并利用计算机识别算法来识别数字图像中的目标对象,从而指导 AEB 执行不同的避撞策略^[93],例如,当车辆前方存在相同运动状态的行人和车辆时,一旦 AEB 系统通过摄像头探测并识别出前方存在行人时,会相较于前方存在车辆的情况施加更大的主动制动减速度,从而能够更加有效地保护行人等道路弱势群体。目前 AEB 系统中单目、双目摄像头的主要供应商包括能够提供 AEB 系统制动解决方案的 BOSCH、Continental、DENSO 等,并与各自的 AEB 制动执行器一并作为 AEB 解决方案提供给主机厂;同时主要供应商包括从摄像头领域切入高级驾驶辅助系统(advanced driving assistant system, ADAS)市场的供应商,如国外的 DELPHI、Mobileye、LG 等以及中国大陆的中科慧眼、智华汽车电子、Maxi Eye、纵目科技、

创来科技、前向启创、极目智能等。

5.3 激光雷达

由于摄像头在自动紧急制动过程仅能够支持良好光照条件下前方目标的有效识别,一旦光照条件变差或者到了夜间,摄像头的目标识别功能会变得极差,为此汽车厂商开始研发激光雷达并将其纳入 AEB 环境感知机构的解决方案。其工作原理主要是通过激光发射器发射脉冲调制光线并测量反射光线与发射光线间的时间差,而后通过飞行时间法计算目标与自身的相对距离,同时通过扫描或多股光线同步测量来获取角度信息,从而实现准确测量视场中物体轮廓边沿与设备间的相对距离与相对角度,进而通过测量的轮廓信息组成点云并绘制 3 维环境地图,测量精度能够达到厘米级别,是目前已知测量精度最高的 AEB 环境感知机构的解决方案。相比于毫米波雷达和摄像头,在低速城市复杂交通场景中激光雷达能够获取更多的周围环境信息并表现出良好的适应性,从而为低速城市 AEB 及行人 AEB 提供更加有效的支持。激光雷达发射器包含了一系列高质量光学元器件,其线束越多激光雷达的造价愈加昂贵。如果仅仅为了实现一些简单场景的 AEB 功能,使用 64 线的激光雷达会显得“大材小用”,为此目前阶段很少有汽车厂商会单独选用激光雷达来实现 AEB 的环境感知,从而导致激光雷达尚未大规模普及。目前高精度车载激光雷达产品的生产厂商主要集中在国外,主要包括 Velodyne、Quanergy、Ibeo 等,中国大陆的生产厂商主要包括速腾聚创、北科天绘、禾赛科技等^[94]

5.4 AEB 系统环境感知机构小结

目前 AEB 环境感知机构几种解决方案的研制主要集中在国外博世、大陆、德尔福等汽车零部件供应商,并在 AEB 发展的不同阶段根据各自 AEB 制动执行机构开发了配套的毫米波雷达、单目/双目摄像头、激光雷达产品,在目前和未来一段时期内都将占据 AEB 环境感知机构的绝大部分市场份额;中国大陆的中科慧眼、智华汽车电子、速腾聚创、北科天绘、禾赛科技等公司在摄像头和激光雷达领域从软件算法切入 ADAS 市场,也同样占据了 AEB 环境感知机构的一部分市场份额。

如表 3 所示,在先进驾驶辅助系统 ADAS 领域中,随着市场对 AEB 功能的需求越来越高、技术的要求越来越严格,毫米波雷达、单双目摄像头、激光雷达作为 AEB 发展不同时期孕育出的环境感知机构,也存在

表 3 3 种 AEB 环境感知机构对比

参数 / 性能	毫米波雷达	单目 / 双目摄像头	激光雷达
最远探测距离 / m	250	50	200
探测角度 / (°)	10 ~ 70	30	15 ~ 360
夜间环境探测能力	好	差	好
不良天气探测能力	好	差	差
目标识别能力	差	好	较好
周围环境信息获取能力	差	较好	好
适用 AEB 功能	城市 AEB、城际 AEB	城市 AEB、行人 AEB	城市 AEB、行人 AEB
成本	低	较低	高
主要供应商	BOSCH、Continental、DELPHI、 TRW、DENSO、HITACHI	BOSCH、Continental、DENSO、 DELPHI、Mobileye、LG	Velodyne、Quanergy、Ibeo

各自不同的定位及优缺点。为了弥补各个传感器功能上的缺点、充分发挥传感器各自的优势并进一步降低 AEB 系统成本, 目前汽车零部件厂商及研究机构重点关注多环境感知机构融合技术, 倾向于采用成本较低“摄像头 + 毫米波雷达”的传感器融合技术作为目前及未来一段时期的 AEB 环境感知解决方案。随着激光雷达技术的发展、激光雷达成本的下降, AEB 系统所需支持的交通场景愈加复杂, “激光雷达 + 摄像头 + 毫米波雷达”的多传感器融合技术在未来也会成为 AEB 系统环境感知的解决方案。

6 自动紧急制动(AEB)系统发展趋势

汽车厂商和研究机构对系统尤为重视, 发展前景广阔, 具体主要向以下几个方向发展。

1) 复杂多交通场景下 AEB 避撞策略综合性能优化。目前 AEB 避撞策略的研究主要围绕安全性与舒适性展开, 针对的交通场景较为简单, 在侧方突然插入车辆、行人突然横穿马路等复杂场景避撞效果较差。随着毫米波雷达、激光雷达、单目、双目摄像头等前端感知技术发展以及车联网技术的兴起, AEB 获取到的周围交通场景信息及细节更加丰富, 单一交通场景的避撞策略将不能够适应复杂的交通场景, 汽车厂商将会根据更多复杂交通场景来丰富和完善 AEB 避撞策略, 使 AEB 能够支持越来越复杂的多交通场景并提升其安全性、舒适性与智能性。

2) 基于更快响应时间目标的 AEB 执行机构研发。目前 AEB 执行机构的研究主要以缩短主动制动响应时间和提高主动制动控制精度为目标, 围绕实现制动管路主动建压的压力供给单元以及实现制动轮缸压力精确控制的压力调节单元两大核心部件展开。国外汽车制动

系统零部件供应商已经开发了 AEB 执行机构相关产品, 但它们本质上仍然是通过液体或气体介质来传递动力, 不可避免存在一定响应时间。为了进一步减少主动制动响应时间、缩短紧急制动距离、简化制动系统, 汽车厂商将会开发出更加快速、成熟的线控制动系统, 并替代目前的 AEB 执行机构。

3) 危险行驶工况下与多种主动安全技术的深度融合及协调控制。AEB 系统本质上是辅助驾驶员在车辆处于紧急工况下通过主动制动方式来缓解碰撞的主动安全技术, 仍然属于先进驾驶辅助系统 ADAS 中的一部分功能。在 ADAS 到人机共驾和完全无人驾驶过渡过程中, 汽车厂商对车辆安全性能要求将越来越高。但 AEB 作为应对车辆紧急工况的解决方案, 纯粹通过纵向主动制动并不能实现在危险工况下的完全避撞。因此, 为进一步提升车辆主动安全性能, AEB 将会和主动转向、主动加速等主动安全技术深度融合与集成, 逐渐转变成未来无人驾驶技术中专门应对车辆紧急工况的车辆自动紧急控制系统。

7 结 语

自动紧急制动(AEB)系统本质上是辅助驾驶员在车辆处于紧急工况下通过主动制动方式来缓解或者避免碰撞的主动安全技术, 属于先进驾驶辅助系统(ADAS)中的一部分功能, 安全性、舒适性和智能性是评价其综合性能的基本指标。近年来, 汽车厂商及研究机构针对 AEB 避撞策略及制动执行机构等关键技术开展了广泛而深入的研究工作, 并取得了大量研究成果。

为了进一步提升 AEB 系统综合性能, 应继续深入探索以下问题:

1) 复杂多交通场景下 AEB 避撞策略综合性能

优化;

2) 基于更快响应时间目标的 AEB 执行机构研发;

3) 危险行驶工况下与多种主动安全技术的深度融合及协调控制。

参考文献 (References)

- [1] 公安部交通管理局. 中华人民共和国道路交通事故统计年报 (2016 年度) [R]. 北京: 公安部交通管理局, 2016. Traffic Management Bureau of Ministry of Public Security. Annual report on road traffic accidents of the People's Republic of China (2016) [R]. Beijing: Traffic Management Bureau of Ministry of Public Security, 2016. (in Chinese)
- [2] Khayesi M, Peden M M. World report on road traffic injury prevention [J]. *World Transport Policy and Practice*, 2004, **10**(4): 5-7.
- [3] EURO NCAP. Test Protocol - AEB systems Version 1.1 [EB/OL]. (2015-7-6), <https://www.euroncap.com/en/for-engineers/protocols/safety-assist/>
- [4] Yi K, Woo M, Kim S H, et al. An experimental investigation of a CW/CA system for automobile using hardware in the loop simulation [C] // *Proc America contr conf*. California: San Diego, 1999: 724-728.
- [5] 郑杰. 车辆自动紧急制动系统建模与仿真研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2015. ZHEN Jie. Modeling and Simulating Research on Vehicle [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2015. (in Chinese)
- [6] Meinel H H. Applications of microwaves and millimeter waves for vehicle communications and control in Europe [C] // *Int'l microwave symp*. New Mexico: Albuquerque, 1992: 609-612.
- [7] 徐豪. 汽车主动防撞预警系统规避控制研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2012. XU Hao. Research on active control of vehicle anti-collision warning system [D]. Changchun: Jilin University, 2012. (in Chinese)
- [8] 江丽君. 自动紧急制动系统测评方法研究 [D]. 上海: 同济大学, 2014. JIANG Lijun. Research on the test and evaluation method of autonomous emergency braking system [D]. Shanghai: Tongji University, 2014. (in Chinese)
- [9] Gibson J J, Crooks L E. A theoretical field-analysis of automobile-driving [J]. *American J psychology*, 1938, **51**(3): 453-471.
- [10] 马彬. 汽车后向防撞预警系统的研究 [D]. 西安: 长安大学, 2008. MA Bin. Research on the vehicle's backside anti-collision warning system [D]. Xi'an: Chang'an University, 2008. (in Chinese)
- [11] Gillan W J. Prometheus and drive: their implications for traffic managers [C] // *Vehi Navi Info Syst Conf*. Canada: Toronto, 1989: 237-243.
- [12] 王双超. 前方防碰撞预警系统决策算法开发与实验验证 [D]. 长春: 吉林大学, 2012. WANG Shuangchao. Decision algorithm development and test validation for forward collision warning system [D]. Changchun: Jilin University, 2012. (in Chinese)
- [13] 王景枯, 染任之. 奔驰轿车的 Distronic(DTR) 雷达控制系统 [J]. 世界汽车, 2000(6): 19-21. WANG Jingku, RAN Renzhi. Distronic (DTR) radar control system for Benz cars [J]. *World Auto*, 2000(6): 19-21. (in Chinese)
- [14] Josef W. Automotive radar - status and perspectives [C] // *IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symp*. California: Palm Springs, 2005: 21-24.
- [15] Scenic B H. Transportation and safety in Japan [J]. *Iatss Research*, 2008, **32**(1): 88-90.
- [16] Mimuro T. Mitsubishi advanced safety vehicle (ASV) [C] // *Mobility for Everyone. 4th World Congress on Intel Transport Syst*. Berlin, 1997.
- [17] 侯德藻. 汽车纵向主动避撞系统的研究 [D]. 北京: 清华大学, 2004. HOU Dezao. Study on vehicle forward collision avoidance system [D]. Beijing: Tsinghua University, 2004. (in Chinese)
- [18] Knippling R R. Assessment of IVHS countermeasures for collision avoidance: Rear-end crashes [R]. HS-807 995, 1993.
- [19] EURO NCAP. Reward 2010 - Volvo City Safety [EB/OL]. (2014-12-9). <https://www.euroncap.com/en/ratings-rewards/euro-ncap-advanced-rewards/2010-volvo-city-safety/>.
- [20] EURO NCAP. Reward 2011 - Ford Active City Stop [EB/OL]. (2014-12-9). <https://www.euroncap.com/en/ratings-rewards/euro-ncap-advanced-rewards/2011-ford-active-city-stop/>.
- [21] EURO NCAP. Reward 2013 - FIAT City Brake Control [EB/OL]. (2014-12-9). <https://www.euroncap.com/en/ratings-rewards/euro-ncap-advanced-rewards/2013-fiat-city-brake-control/>.
- [22] EURO NCAP. Reward 2012 - Audi Pre Sense Front [EB/OL]. (2014-12-9). <https://www.euroncap.com/en/ratings-rewards/euro-ncap-advanced-rewards/2012-audi-pre-sense-front/>.
- [23] EURO NCAP. Reward 2012 - Volkswagen Front Assist [EB/OL]. (2014-12-9). <https://www.euroncap.com/en/ratings-rewards/euro-ncap-advanced-rewards/2012-volkswagen-front-assist/>.
- [24] EURO NCAP. Reward 2013 - Skoda Front Assistant [EB/OL]. (2014-12-9). <https://www.euroncap.com/en/ratings-rewards/euro-ncap-advanced-rewards/2013-skoda-front-assistant/>.
- [25] EURO NCAP. Reward 2010 - Honda Collision Mitigation Brake System [EB/OL]. (2014-12-8). <https://www.euroncap.com/en/ratings-rewards/euro-ncap-advanced-rewards/2010-honda-collision-mitigation-brake-system/>.
- [26] EURO NCAP. Reward 2013 - Mitsubishi Forward Collision Mitigation (FCM) [EB/OL]. (2014-12-9). <https://www.euroncap.com/en/ratings-rewards/euro-ncap-advanced-rewards/2013-mitsubishi-forward-collision-mitigation-fcm/>.
- [27] EURO NCAP. Reward 2010 - Mercedes-Benz PRE-SAFE Brake [EB/OL]. (2014-12-9). <https://www.euroncap.com/>

- en/ratings-rewards/euro-ncap-advanced-rewards/2010-mercedes-benz-pre-safe-brake/.
- [28] EURO NCAP. Reward 2014 - BMW Pedestrian Warning with City Brake Activation [EB/OL]. (2014-12-11). <https://www.euroncap.com/en/ratings-rewards/euro-ncap-advanced-rewards/2014-bmw-pedestrian-warning-with-city-brake-activation/>.
- [29] J-NCAP. 衝突被害軽減制動制御装置 [对車両] 性能試験方法 [EB/OL]. (2016-7-19). <http://www.nasva.go.jp/mamoru/>.
- [30] Reg (EC) 661/2009, Regulation (EC) No 661/2009 of the European Parliament and of the Council of 13 July 2009 [S].
- [31] Reg (EU) 347/2012, Regulation (EC) No 661/2009 of the European Parliament and of the Council with respect to type-approval requirements for certain categories of motor vehicles with regard to advanced emergency braking systems [S].
- [32] UN ECE R131. Uniform provisions concerning the approval of motor vehicles with regard to the Advanced Emergency Braking Systems (AEBS) [S].
- [33] EURO NCAP. Test Protocol - AEB systems Version 1.0[EB/OL]. (2013-7-1). <https://www.euroncap.com/en/for-engineers/protocols/safety-assist/>.
- [34] NHTSA. Crash Imminent Braking (CIB) First Annual Report [R]. HS-811 340, 2010.
- [35] NHTSA. Crash Imminent Braking System Performance Evaluation [R]. HS-811 341, 2012.
- [36] NHTSA. NHTSA-IIHS Announcement on AEB [EB/OL]. (2017-12-21). <https://www.nhtsa.gov/press-releases/nhtsa-iihs-announcement-aeb>.
- [37] 刘颖, 贺锦鹏, 刘卫国, 等. 自动紧急制动系统行人测试场景的研究 [J]. 汽车技术, 2014 (3): 35-39.
LIU Ying, HE Jinpeng, LIU Weiguo, et al. Research on test scenarios for AEB pedestrian system [J]. *Automobile Technology*, 2014(3): 35-39. (in Chinese)
- [38] 江丽君, 贺锦鹏, 刘卫国, 等. 自动紧急制动系统测试场景研究 [J]. 汽车技术, 2014 (1): 39-43.
JIANG Lijun, HE Jinpeng, LIU Weiguo, et al. Research on test scenarios of automatic emergency braking System [J]. *Automobile Technology*, 2014(1): 39-43. (in Chinese)
- [39] 中国汽车技术研究中心. C-NCAP 管理规则 (2018 年版) [EB/OL].
China Automotive Technology and Research Center. C-NCAP Management Rules (2018 Edition) [EB/OL]. (2017-4-21), <http://www.c-ncap.org/cncap/pjgz>. (in Chinese)
- [40] Doi A, Butsuen T, Niibe T, et al. Development of a rear-end collision avoidance system with automatic brake control [J]. *JSAE Review*, 1994, **15**(4): 335-340.
- [41] Fujita Y, Akuzawa K, Sato M. Radar brake system [J]. *JSAE Review*, 1995, **16**(2): 219-219.
- [42] Burgett A, Carter A, Preziotti G. An algorithm for rear-end collision avoidance warning systems [C] // *Proc 17th Int'l Tech Conf Enhanced Safe Vehi (ESV)*. The Netherlands: Amsterdam, 2001.
- [43] National Highway Traffic Safety Administration. Alert algorithm development program NHTSA rear-end collision alert algorithm final report [R]. HS-809 526, 2002.
- [44] 林柏忠, 李振洋, 何磊, 等. 基于功能原理和模糊控制的路面附着系数估计 [J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2016, **44**(9): 131-136.
LIN Bozhong, LI Zhenyang, HE Lei, et al. Estimation of road adhesion coefficient based on work-energy principle and fuzzy logic control [J]. *J South China Univ Tech*, 2016, **44**(9): 131-136. (in Chinese)
- [45] Seiler P, Song B, Hedrick J K. Development of a Collision Avoidance System [J]. *Neurosurgery*, 1998, **46**(2): 492-492.
- [46] Seungwuk M, Kyongsu Y. Human driving data-based design of a vehicle adaptive cruise control algorithm [J]. *Vehi Syst Dyna*, 2008, **46**(8): 661-690.
- [47] Kyongsu Y. Estimation of tire-road friction using observer based identifiers [J]. *Vehi Syst Dyna*, 1999 (31): 233-261.
- [48] 张广祥. 基于驾驶行为的汽车主动防撞预警系统的安全车距研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2011.
ZHANG Guangxiang. Study on safe distance of the action collision system based on drivers [D]. Changchun: Jilin University, 2011. (in Chinese)
- [49] Hayward J C. Near-miss determination through use of a scale of danger [J]. *Highway Research Record*, 1972, **38**(4): 24-34.
- [50] Lee D N. A theory of visual control of braking based on information about time-to-collision [J]. *Perception*, 1976, **5**(4): 437-459.
- [51] Lee K, Peng H. Evaluation of automotive forward collision warning and collision avoidance algorithms [J]. *Vehi Syst Dyna*, 2005, **43**(10): 735-751.
- [52] Hirst S, Graham R. The format and presentation of collision warnings [J]. *Ergonomics and safety of intelligent driver interfaces*, 1997: 203-219.
- [53] Miller R, Huang Q. An adaptive peer-to-peer collision warning system [C] // *IEEE 55th Vehi Tech Conf*, Alabama: Birmingham, 2002: 317-321.
- [54] Fancher P S, Bareket Z, Ervin R D, et al. Human-centered design of an Acc-with-braking and forward-crash-warning system [J]. *Vehi Syst Dyna*, 2001: 203-223.
- [55] 裴晓飞, 刘昭度, 马国成, 等. 汽车主动避撞系统的安全距离模型和目标检测算法 [J]. 汽车安全与节能学报, 2012, **3**(1): 26-33.
PEI Xiaofei, LIU Zhaodu, MA Guocheng, et al. Research on test scenarios of automatic emergency braking system [J]. *J Autom Safe Energ*, 2012, **3**(1): 26-33. (in Chinese)
- [56] 李霖, 贺锦鹏, 刘卫国, 等. 基于驾驶员紧急制动行为特征的危险估计算法 [J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2014, **42**(1): 109-114.
LI Lin, HE Jinpeng, LIU Weiguo, et al. Threat assessment algorithm based on characteristic of driver emergency braking behavior [J]. *J Tongji Univ: Natu Sci*, 2014, **42**(1): 109-114. (in Chinese)
- [57] Han I C, Luan B C, Hsieh F C. Development of autonomous emergency braking control system based on road friction [C] // *IEEE Int'l Conf Autom Sci Engi*, Taiwan: Taipei, 2014: 933-937.
- [58] 朱西产, 刘智超, 李霖. 基于车辆与行人危险工况的转向

- 碰撞控制策略 [J]. 汽车安全与节能学报, 2015, 6(3): 217-223.
- ZHU Xichan, LIU Zhichao, LI Lin. Evasive maneuver for emergency steering based on typical vehicle-pedestrian use case [J]. *J Autom Safe Energ*, 2015, 6(3): 217-223. (in Chinese)
- [59] Eckert A, Hartmann B, Sevenich M, et al. Emergency steer & brake assist: A systematic approach for system integration of two complementary driver assistance systems [C] // *Proc 22nd Int'l Tech Conf Enhanc Safe Vehi*. Washington DC, 2011.
- [60] Seewald A, Haß C, Keller M. Emergency steering assist for collision avoidance [J]. *Automobiltechnische Zeitschrift Worldwide*, 2015, 117(1): 14-19.
- [61] 吴涛. 考虑驾驶员碰撞行为特性的汽车前方防碰撞系统研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2014.
- WU Tao. Study on forward collision avoidance system considering drivers' collision avoidance behavior characteristic [D]. Changchun: Jilin University, 2014. (in Chinese)
- [62] 李霖, 朱西产. 智能汽车自动紧急控制策略 [J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2015, 43(11): 1735-1742.
- LI Lin, ZHU Xichan. Autonomous emergency control algorithm for intelligent vehicles [J]. *J Tongji Univ: Natu Sci*, 2015, 43(11): 1735-1742. (in Chinese)
- [63] 刘志强, 张春雷, 张爱红, 等. 基于驾驶行为的追尾碰撞控制策略研究 [J]. 汽车工程, 2017, 39(9): 1068-1073.
- LIU Zhiqiang, ZHANG Chunlei, ZHANG Aihong, et al. A Study on the control strategy for rear-end collision avoidance based on drivers' behavior [J]. *Automotive Engineering*, 2017, 39(9): 1068-1073. (in Chinese)
- [64] 严明月, 魏民祥, 王可洲, 等. 基于功能分配与多目标模糊决策的转向与制动协同避撞控制 [J]. 重庆理工大学学报: 自然科学版, 2018, 32(2): 63-71.
- YAN Mingyue, WEI Minxiang, WANG Kezhou, et al. Cooperative collision avoidance control of steering and braking based on function allocation and multi-objective fuzzy decision [J]. *J Chongqing Univ Tech: Natu Sci*, 2018, 32(2): 63-71. (in Chinese)
- [65] 王伟伟. ESC 液压执行单元的动态特性分析与综合仿真平台的建立 [D]. 北京: 清华大学, 2011.
- WANG Weiwei. Dynamics analysis on electronic stability control system hydraulic control unit and establishing an integrated simulation platform [D]. Beijing: Tsinghua University, 2011. (in Chinese)
- [66] 鄯大伟. 汽车 ESP 液压调节器建模与轮缸压力估计算法的研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2009.
- GAO Dawei. Research on hydraulic modulator modeling and break pressure estimation for vehicle electronic stability program [D]. Changchun: Jilin University, 2009. (in Chinese)
- [67] 谢敏松. 汽车 ESP 液压系统动态特性研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2007.
- XIE Minsong. Research on dynamic characteristics of vehicle ESP hydraulic system [D]. Chongqing: Chongqing University, 2007. (in Chinese)
- [68] 宋杰. 汽车 ESP 液压系统动态特性研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011.
- SONG Jie. Research on Dynamic Characteristics of Vehicle ESP Hydraulic System [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2011.
- [69] 王占锐. 汽车 ESP 液压系统的建模仿真与动态特性研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2014.
- WANG Zhanrui. The research on dynamic characteristics and Simulation on hydraulic system of automobile ESP [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2014.
- [70] 孟爱红. ESC 液压执行机构压力精确控制研究 [D]. 北京: 清华大学, 2014.
- MENG Aihong. Research on the precise pressure control of hydraulic actuator of electronic stability control system [D]. Beijing: Tsinghua University, 2014. (in Chinese)
- [71] 姚优. 电子液压制动系统仿真与试验研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2014.
- YAO You. Simulation and experiment research on electro-hydraulic brake system [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2014. (in Chinese)
- [72] 孟爱红. ESC 液压执行机构压力精确控制研究 [D]. 北京: 清华大学, 2014.
- MENG Aihong. Research on the precise pressure control of hydraulic actuator of electronic stability control system [D]. Beijing: Tsinghua University, 2014.
- [73] 李亮, 宋健, 韩宗奇, 等. 用于电子稳定程序 (ESP) 在线控制的液压模型和反模型 [J]. 机械工程学报, 2008(2): 139-144.
- LI Liang, SONG Jian, HAN Zongqi, et al. Hydraulic model and inverse model for electronic stability program online control system [J]. *Chin J Mech Engi*, 2008(2): 139-144.
- [74] 常少鹏. 轿车电子稳定系统的压力控制方法研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2017.
- CHANG Shaopeng. Research on pressure control method of vehicle electronic stability system [D]. Changchun: Jilin University, 2017. (in Chinese)
- [75] 韩龙. 乘用车 EHB 液压特性建模及车辆稳定性控制算法研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2008.
- HAN Long. Hydraulic Character Modeling and Vehicle Stability Control Algorithm for EHB System of Passenger Car [D]. Changchun: Jilin University, 2018.
- [76] 赵海涛. 汽车电子液压制动系统跟随特性的实验研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2011.
- ZHAO Haitao. Research on the following characteristic test of electronic hydraulic brake system for automobile [D]. Changchun: Jilin University, 2011. (in Chinese)
- [77] 张鸿生. 汽车电控液压制动系统性能分析与控制 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
- ZHANG Hongsheng. Analyses and control of electro hydraulic baking system for vehicle [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013. (in Chinese)
- [78] 金智林, 郭立书, 施瑞康, 等. 汽车电控液压制动系统动态性能分析及试验研究 [J]. 机械工程学报, 2012, 48(12): 127-132.
- JIN Zhilin, GUO Lishu, SHI Ruikang, et al. Experimental study on dynamic characteristics of electro hydraulic bake

- system for vehicle [J]. *Chin J Mech Engi*, 2012, **48**(12): 127-132. (in Chinese)
- [79] 金晓光. 轻型汽车电子液压制动系统液压控制单元设计及基本控制逻辑研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2007.
JIN Xiaoguang. Design of hydraulic control unit on light vehicle of electronic hydraulic brake system & research on basic control logic [D]. Changchun: Jilin University, 2007. (in Chinese)
- [80] 余卓平, 韩伟, 徐松云, 等. 电子液压制动系统液压力控制发展现状综述 [J]. 机械工程学报, 2017, **53**(14): 1-15.
YU Zhuoping, HAN Wei, XU Songyun, et al. Review on hydraulic pressure control of electro-hydraulic brake system [J]. *Chin J Mech Engi*, 2017, **53**(14): 1-15. (in Chinese)
- [81] 张雪碧. 某轿车集成电控制动系统设计与试验研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2017.
ZHANG Xuebi. Research on design and experiment of integrated electronically-controlled brake system for a Sedan [D]. Changchun: Jilin University, 2017. (in Chinese)
- [82] 何祥坤. 汽车线控液压制动系统仿真分析与试验研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2015.
HE Xiangkun. Performance simulation and test of automobile electro-hydraulic braking system [D]. Changchun: Jilin University, 2015. (in Chinese)
- [83] 何睿, 吴坚, 高吉. 汽车电动助力制动系统摩擦建模与补偿控制 [J]. 汽车工程, 2017, **39**(6): 683-688.
HE Rui, WU Jian, GAO Ji. Modeling and compensation control for fiction in vehicle power assisted baking system [J]. *Automotive Engineering*, 2017, **39**(6): 83-688. (in Chinese)
- [84] 余卓平, 徐松云, 熊璐, 等. 集成式电子液压制动系统鲁棒性液压力控制 [J]. 机械工程学报, 2015, **51**(16): 22-28.
YU Zhuoping, XU Songyun, XIONG Lu, et al. Robustness hydraulic pressure control system of integrated-electro-hydraulic brake system [J]. *Chin J Mech Engi*, 2015, **51**(16): 22-28. (in Chinese)
- [85] 余卓平, 韩伟, 熊璐, 等. 基于 Byrnes-Isidori 标准型的集成式电子液压制动系统液压力控制 [J]. 机械工程学报, 2016, **52**(22): 92-100.
YU Zhuoping, HAN Wei, XIONG Lu, et al. Hydraulic Pressure Control System of Integrated- electro-hydraulic Brake System Based on Byrnes-Isidori Normalized Form [J]. *Chin J Mech Engi*, 2016, **52**(22):92-100.
- [86] 熊璐, 徐松云, 余卓平. 基于颤振补偿的电子液压制动系统液压力优化控制 [J]. 机械工程学报, 2016, **52**(12): 100-106.
XIONG Lu, YU Zhuoping, XU Songyun. Optimization of hydraulic pressure control system of integrated electro-hydraulic brake system based on chatter-compensation [J]. *Chin J Mech Engi*, 2016, **52**(12): 100-106. (in Chinese)
- [87] 潜磊. 电动助力制动系统研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2017.
QIAN Lei. Research on electric power braking system [D]. Changchun: Jilin University, 2017. (in Chinese)
- [88] 杨坤. 轻型汽车电子机械制动及稳定性控制系统研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2009.
YANG Kun. Research on electromechanical brake and vehicle stability control system for light vehicle [D]. Changchun: Jilin University, 2009. (in Chinese)
- [89] 刘学军. 电磁—液压复合制动系统防抱死控制技术研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2014.
LIU Xuejun. Research on anti-lock brake controlling technology of electromagnetic-hydraulic hybrid braking system [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2014. (in Chinese)
- [90] 何仁, 胡东海, 张端军. 汽车电磁制动技术的研究与进展 [J]. 汽车安全与节能学报, 2013, **4**(3): 202-214.
HE Ren, HU Donghai, ZHANG Rui-jun. Research and development of automobile electromagnetic brake technology for commercial vehicles [J]. *J Autom Safe Engerg*, 2013, **4**(3): 202-214. (in Chinese)
- [91] 王亚丽. 基于毫米波雷达与机器视觉融合的前方车辆检测研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2013.
WANG Yali. Study on detection of ahead vehicle based on millimeter wave radar-vision [D]. Changchun: Jilin University, 2013. (in Chinese)
- [92] 黄伟. 自动驾驶汽车传感器技术产业分析 [J]. 信息通信技术与政策, 2018(8): 40-44.
HUANG Wei. Auto-driving car sensor technology industry analysis [J]. *Info Commun Tech Policy*, 2018(8): 40-44. (in Chinese)
- [93] 郝俊. 自动驾驶环境感知系统研究 [J]. 时代汽车, 2018(9): 15-16.
HAO Jun. Research on environment perception system of automatic driving[J]. *Auto Time*, 2018(9): 15-16. (in Chinese)
- [94] 黄武陵. 激光雷达在无人驾驶环境感知中的应用 [J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2016, **16**(10): 3-7.
HUANG Wuling. Application of Lidar in Perception of Autonomous Driving Environment [J]. *Microcontroller Embedded Syst*, 2016, **16**(10): 3-7. (in Chinese)

何仁 博士

江苏大学汽车与交通工程学院教授、博士生导师, 国务院政府特殊津贴专家。主要研究方向为汽车综合节能与环境保护技术、汽车制动能量再生理论与方法。

Dr. HE REN

Dr. He Ren is a professor and a doctoral tutor of the School of Automotive and Traffic Engineering, Jiangsu University. He is a specialist of the central government of the People's Republic of China. His research interests focus on such areas as automobile comprehensive energy saving and environmental protection technology and theory and method of regenerative braking of automobile.