



DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.20230153

数字出版日期: 2024-04-17; 数字出版网址: <http://link.cnki.net/urlid/12.1355.N.20240416.1630.003>

客车侧面碰撞安全研究进展

贺丽娟, 王福洋, 李海岩, 崔世海, 吕文乐, 阮世捷

(现代汽车安全技术国际联合研究中心, 天津科技大学机械工程学院, 天津 300222)

摘要: 为了完善并制定具有中国特征的客车侧面碰撞安全法规, 首先, 阐述了欧洲及美国的汽车侧面碰撞安全法规, 并介绍了中国客车法规的现状, 从碰撞形式、假人类型、碰撞速度、假人位置及评价指标等方面对比了欧洲和美国汽车侧面碰撞法规的差异性; 其次, 从碰撞实验的角度, 在实车碰撞、台车实验及计算机模拟仿真实验等方面总结了目前国内外对大客车侧面碰撞安全的研究现状, 并对计算机模拟仿真实验从强度、结构、刚度等方面进行阐述; 最后, 基于当前国内外大客车的碰撞安全研究现状, 预测了提高客车被动安全的发展趋势, 即虚拟测评技术、主被动安全一体化、碰撞相容性等。研究结果可以为我国推出客车侧面碰撞法规提供理论参考。

关键词: 客车安全; 安全法规; 侧面碰撞实验; 虚拟测评技术

中图分类号: U461.91

文献标志码: A

文章编号: 1672-6510(2024)04-0001-08

Research Progress on Side Impact Safety of Passenger Bus

HE Lijuan, WANG Fuyang, LI Haiyan, CUI Shihai, LÜ Wenle, RUAN Shijie

(International Research Association on Emerging Automotive Safety Technology, College of Mechanical Engineering, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300222, China)

Abstract: In order to improve and formulate the side impact safety regulations of buses with Chinese characteristics, firstly, the side impact safety regulations of European and American vehicles are elaborated in the article, and the current status of Chinese bus regulations is introduced, and the differences between the side impact regulations of Europe and the United States are compared in terms of the collision form, the type of dummies, the collision speed, the position of the dummies and the evaluation indexes. Secondly, from the perspective of collision experiment, the current research status of side impact safety of buses at home and abroad is summarized in terms of real-vehicle collision, cart experiment and computer simulation experiment, and the computer simulation experiment is elaborated in terms of strength, structure and stiffness. Finally, based on the current domestic and international research status on the crash safety of buses, the development trend of improving the passive safety of buses is predicted, i.e., virtual measurement technology, active-passive integration, and crash compatibility. The research results can provide theoretical references for the introduction of side impact regulations for buses in China.

Key words: passenger bus safety; safety legislation; side impact test; virtual assessment technology

引文格式:

贺丽娟, 王福洋, 李海岩, 等. 客车侧面碰撞安全研究进展[J]. 天津科技大学学报, 2024, 39(4): 1-8.

HE L J, WANG F X, LI H Y, et al. Research progress on side impact safety of passenger bus[J]. Journal of Tianjin university of science and technology, 2024, 39(4): 1-8.

现阶段我国主要存在铁路运输、公路运输、水运、航空运输等交通运输方式。国家统计局数据显

示, 2021年、2022年公路运送旅客数量占全年运送旅客数量的61.3%、63.5%^[1-2]。公路运输以其机动灵

收稿日期: 2023-08-11; 修回日期: 2024-01-31

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2018YFC0807203-1)

作者简介: 贺丽娟(1979—), 女, 天津人, 副教授; 通信作者: 李海岩, 教授, lihaiyan@tust.edu.cn

活的特点,深受出行国民的青睐。大客车是公路运送旅客的主要载体之一,具有运容量大、机动灵活的特点。2010年,全国发生的道路交通事故形态主要包括正面碰撞、侧面碰撞、追尾碰撞和翻滚,占总事故数量的比例分别为24.82%、37.29%、10.15%、2.48%,致死数量占总致死数量的比例分别为26.88%、25.29%、13.73%、5.47%^[3]。大客车一旦发生交通事故将会是群体性的伤亡事件。在巨大伤亡的情况下,人们越来越关注大客车的被动安全性研究。中国交通事故形态数据表明,侧面碰撞发生的概率最大^[4],且发生侧面碰撞时,没有足够的安全设施给乘员提供保护,乘员易受到伤害。以下从安全法规和碰撞实验两个角度,分析各国侧面碰撞标准的异同以及目前国内外对大客车碰撞安全的研究现状,以期为我国大客车被动安全技术水平的提升提供参考。

1 各国汽车侧面碰撞安全法规

国际上实车碰撞实验法规主要有美国的联邦机动车安全标准(Federal Motor Vehicle Safety Standard, FMVSS)和欧盟的联合国欧洲经济委员会汽车法规(Economic Commission of Europe, ECE)两大体系,其他国家的相关法规大多参照这两大法规体系制定^[5]。

1.1 欧洲法规

1974年欧洲车辆安全委员会提出汽车侧面碰撞实验方法研究,1989年起草了侧面碰撞实验草案,并于1994年5月正式提出侧面碰撞法规ECE R95,于1995年开始实施^[6]。欧洲各国除了有自己国家的汽车法规外,ECE法规由各国任意自选,是非强制性的,ECE法规已被大多数国家所接受,并引入本国的法规体系中。

1.2 美国法规

FMVSS由美国运输部国家公路交通安全管理局发布,为汽车安全认证的法规依据^[7],该体系以保障乘用车与客车的基本安全为主,是其他车型进入美国市场的最低标准,美国客车的设计标准也基于该标准体系。现有FMVSS 100、FMVSS 200、FMVSS 300、FMVSS 400、FMVSS 500等系列法规,其中FMVSS 214属于汽车侧面碰撞实验法规。

1.3 中国法规

从1990年开始,我国对汽车标准进行全面而深入的清理、整顿工作,参照国际通行的惯例将有关汽

车安全、环境保护、节约能源方面的标准划归为汽车强制性标准。1997年起,我国国家标准化管理委员会推出了国家标准GB 13094—1997《客车结构安全要求》,并在此基础上于2007年、2017年相继推出了GB 13094—2007《客车结构安全要求》、GB 13094—2017《客车结构安全要求》。由于强制性标准作为准入门槛,要求较低,对高标准要求的客车缺乏全面定量评价方法,因此在充分研究并借鉴国际、国内乘用车新车评价规范先进经验的基础上,结合客车实际特点、标准要求、技术水平和行业现状,中国客车安全评价管理中心组织制定了《中国客车安全评价规程》实施细则,于2020年对其进行完善,并发布了2020版的《中国客车安全评价规程(C-SCAP)》。

2 各国汽车侧面碰撞法规的对比

在汽车安全领域,汽车碰撞安全法规中采用的乘员碰撞损伤准则,主要基于50百分位假人模型制定^[8]。在美国FMVSS和欧洲ECE系列法规中,关于侧面碰撞的法规有美国FMVSS 214和欧洲ECE R95。FMVSS 214实施的对象为轿车以及整备质量小于4536 kg的多功能乘用车、卡车、公共汽车。FMVSS 214包含静态的侧门抗侧向侵入强度实验规范与要求,动态的侧面碰撞实验规范及其乘员保护、车辆结构的要求,侧面柱碰撞的实验规范及其乘员保护、车辆结构的要求3个部分。ECE R95实施对象为最低座椅R点(汽车在总布置设计之初,先根据总布置要求确定一个座椅调至最后、最下位置时的胯点,称该点为R点)位置不低于地平面700 mm的M1和N1类车辆。ECE R95主要包含动态的侧面碰撞等内容。

在碰撞形式方面,以动态侧面碰撞实验规范及其乘员保护部分为例,欧洲ECE R95要求移动变形屏障(mobile deformable barrier, MDB)运动方向与车辆纵向中心线垂直,而美国的FMVSS 214要求MDB运动方向与实验车辆纵向中心线夹角为63°。在碰撞速度方面,美国FMVSS 214要求的速度为 (53.9 ± 1.0) km/h,高于ECE R95要求的 (50 ± 1) km/h。在评价指标方面,欧洲ECE R95对头部、胸部、骨盆、腹部等方面有要求,美国FMVSS 214对胸部和骨盆等有要求,具体信息见表1。

中国目前还没有针对大客车侧面碰撞的相关法

规。我国拥有庞大的人口和不同的用车需求,并且道路和交通环境与其他国家存在差异,有着独特的城市规划、交通流量和驾驶行为。制定符合中国特色的客

车侧面碰撞法规可以更好地适应中国道路和车辆特点,提高法规的实施效果和可操作性。

表 1 FMVSS 214与 ECE R95的对比

Tab. 1 Comparison between FMVSS 214 and ECE R95

法规	FMVSS 214	ECE R95
碰撞形式	MDB 运动方向与实验车辆纵向中心线夹角为 63°	MDB 运动方向与车辆纵向中心线垂直
假人类型	50 th ES-2re (美国侧面碰撞假人) 成年男性假人	50 th Euro SID (欧洲侧面碰撞假人)
碰撞速度	(53.9 ± 1) km/h	(50 ± 1) km/h
假人位置	撞击侧前后排座椅外侧	撞击侧的前排驾驶员和前排外侧位置,后排外侧位置
评价指标	胸部伤害指标 (thoracic trauma index, TTI) ≤ 85g (有 4 个侧门的乘用车,任何多功能乘用车、卡车和公共汽车) 骨盆最高的横向加速度不能超过 130g	头部性能指标 (head performance criterion, HPC) ≤ 1 000 胸部性能指标:肋骨变形指标 ≤ 42 mm,黏性指标 ≤ 1 m/s 骨盆性能指标:趾骨缝合力 ≤ 6 kN 腹部性能指标:腹部峰值力 ≤ 2.5 kN

3 侧面碰撞实验

目前国际上对汽车安全性的研究主要有实车碰撞实验、台车实验及实验台冲击实验、计算机模拟仿真实验 3 种方式。实车碰撞实验以其直观的实验效果成为综合评价车辆安全性能最基本、最有效的方法,但实车碰撞实验准备工作复杂、费用高昂、可重复性差、对设备的要求很高^[9]。台车实验及实验台冲击实验是一种专门用于评估车辆特定部件抗冲击能力的测试方法。该实验能够直观地展示碰撞过程中零部件发生的结构变形和能量吸收等特征。然而,这项实验的进行需要大量数据的收集以及复杂的准备工作。同时,在实验过程中无法完全复现乘员所承受的载荷以及车辆的结构和内饰件等因素之间的相互影响关系。计算机模拟仿真实验的计算结果需要进行实验验证,需与实车实验有机结合起来,可以在很大程度上降低在车身结构、车身性能等方面的研发成本^[10],还可以模拟更加全面的测试工况,具有周期短、节省实验成本等优点。

3.1 实车碰撞实验

20 世纪 60 年代末,欧洲及美国的汽车行业开始进行实车碰撞的研究。瑞典的斯堪尼亚汽车公司设计并进行质量为 1 818.4 kg 的乘用车以 40 km/h 的速度侧面撞击大客车的实车碰撞实验^[11],如图 1 所示。Turley^[12]设计了一个符合美国公路安全保险协会 (Insurance Institute for Highway Safety, IIHS) 规定的且总质量为 1 198 kg 的可变形屏障壁障车,将 Hybrid III (混合 III 型正面碰撞假人) 50 百分位假人放置在大客车的撞击区域,并使移动壁障车以 90°角碰撞静止大客车侧面,实验结果表明地板高度对侧面碰撞结果

有较大影响。白芳华等^[13]基于《电动客车安全技术条件》的规定,设计了移动壁障车以 (50 ± 1) km/h 的速度垂直撞击客车侧面最薄弱位置的实车侧碰实验,客车中搭载 ES- II 型侧面碰撞假人,并参考 GB 20071—2006《汽车侧面碰撞的乘员保护》中的损伤指标进行评判,结果显示假人头部、胸部、肋骨及腹部损伤值远低于标准值。上述实车碰撞实验为提高客车安全性进行了初步探索,为碰撞仿真实验提供了基础的对标数据。



图 1 乘用车侧面碰撞大客车

Fig. 1 Passenger car side-impact bus

3.2 台车实验及实验台冲击实验

Yeom 等^[14]使用结合了子系统精确模拟和整体碰撞实验模拟的计算机控制复合材料实验程序模拟了侧面整体碰撞实验,并与实车整体碰撞实验进行比较;结果表明,使用该实验程序模拟的各项指标与实车整体碰撞实验的各项指标基本吻合。朱西产等^[15]用滑车实验台搭载乘用车,对车身前纵梁和白车身进行动态碰撞实验,为建立整车、碰撞仿真模型提供了准备工作。Yoganandan 等^[16]在滑车上分别使用 SID 型侧面碰撞假人、ES- II 型侧面碰撞假人、WorldSID 型侧面碰撞假人和人体尸体进行侧面碰撞,对比分析侧面碰撞假人与人体尸体在胸腔损伤指数、胸部压力和黏性指标上的差异,结果表明侧面碰撞假人与人体

尸体的上述指标并不总是相似的,此研究有助于完善侧面碰撞假人的生物逼真度。McIntosh 等^[17]将 18 ~ 65 岁的人体尸体固定在台车上进行多次侧面碰撞实验,研究乘员遭受侧面碰撞时颈部受伤的原因,探讨了实验过程中乘员的损伤指标,如图 2 所示。

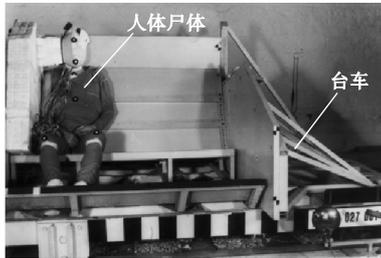


图 2 侧面碰撞台车实验
Fig. 2 Side impact cart test

台车实验与实车碰撞实验都可以为碰撞仿真实验提供基础数据,相较于实车碰撞实验,台车实验具有成本低、可重复等优势。

3.3 计算机模拟仿真实验

早期的有限元模型是针对乘用车开发的^[18],随着计算机技术的发展,有限元模型开始应用于提高大客车被动安全的研究。本文主要对 2010 年以后关于大客车碰撞安全的研究进行总结,并将这些研究从材料、结构、刚度、轻量化、碰撞角度等方面进行分析,为提高大客车的被动安全性设计提供借鉴。

针对客车侧面强度较低、易导致乘员受伤的问题,许多学者从改进客车侧面材料的方面进行研究。Tay 等^[19]利用 Hypermesh 软件建立侧面含有泡沫材料的乘用车有限元模型,参考 FMVSS 214 中的标准,使 MDB 侧面碰撞乘用车 A 柱,实验结果表明泡沫材料的使用可使侧面碰撞中乘员舱的侵入程度明显降低,有利于更好地保护乘客。李凌伊^[20]参考欧洲新车评价规程(Euro-New Car Assessment Program, Euro-NCAP)中相关法规,在 Hypermesh 软件中建立侧面柱碰撞有限元模型以及 0.98 t、1.81 t 两种质量的 MDB 壁障车碰撞有限元模型,碰撞速度 29 km/h;结果显示,由于乘员生存空间被严重侵入,碰撞侧乘员的生命安全受到极大影响,在车身采用 DP800、DP600、Q420、Q390 等高强度材料后,计算模拟结果显示乘员的安全性得到了明显改善。刘飞虎^[21]针对这一问题,也提出与李凌伊相似的建议,建议采用 Q345 材料增强客车的侧围强度。Yuksel 等^[22]为设计出具有更高冲击强度的防撞梁,没有采用传统材料设计防撞梁,而是以玻璃纤维增强聚合物为材料对侧面

防撞结构进行设计,并以应力、应变、能量吸收能力为指标,讨论了所用材料的有效性。

部分学者从改进侧面结构的方面进行研究。吴胜利^[23]采用 Hypermesh 软件建立大客车有限元模型,与 ECE R95 移动变形壁障组成碰撞模型,通过仿真计算,给出了在腰梁位置增加横向结构、合理增加加强板等建议,以减小侧碰时客车侧围的侵入量。Bojanowski 等^[24]建立公共汽车与符合 IIHS 标准的壁障车侧面碰撞的有限元模型,壁障车以 13.4 m/s 的速度垂直撞向公共汽车侧壁,以侵入量为指标,在乘员区设置 5 个检查点,如果撞击区域最大变形超过 150 mm,则该车不能通过侧面碰撞实验;在对车厢中 8 个标记点的厚度进行多目标优化后,得出了最重要的设计变量是侧壁管的厚度,通过质量再分配后提高了公共汽车对乘员的保护能力。毛英慧等^[25]也得出了相似的结论,即在发生碰撞时,蒙皮可以增强客车强度,有效保护乘员。Mohammad 等^[26]使用 Pro-E 软件建立客车几何模型,并使用 Hypermesh 软件对客车与刚性柱进行网格划分,大客车以 50 km/h 的速度侧面撞向刚性柱,针对碰撞后突出到客车内部的侧面金属板和框架会威胁乘员安全的问题,提出在座椅和车身框架之间安装一个导轨的解决措施。

也有学者从刚度方面对提高大客车被动安全性进行研究。刚度指大客车结构在受力后抵抗变形的能力,以刚度为切入点进行研究可以探究碰撞发生时客车结构刚度与稳定性、可靠性之间的关系,进而为开发稳定、可靠、安全的客车结构提供理论依据。郭敬文等^[27]使用 UG 软件及前处理软件建立大客车侧面碰撞有限元模型,参考美国 FMVSS 214 及欧洲 ECE R95 相关标准,设计撞击客车以 50 km/h 的速度撞向静止的被撞客车,为探究乘员胸部及骨盆的受伤情况,分别提取了驾驶员、撞击侧中门处、撞击侧最后排地板处的合成加速度;根据仿真结果,给出了增加中门立柱刚度、合理分配侧围与车架刚度的建议。王松等^[28]根据 FMVSS 214 中壁障车的标准,用 Hypermesh 软件建立如图 3 所示移动壁障侧面碰撞大客车有限元模型,使移动壁障车以 40 km/h 的速度垂直撞向大客车左右侧面;仿真结果显示,两测量点相对乘员 H 点(能够比较准确地确定驾驶员或乘员在座椅位置的参考点,是躯干与大腿相连的旋转点“跨点”)最大变形 37 mm,小于美国公共交通协会(American Public Transportation Association, APTA)规定的 76.2 mm,证明实验车型保护乘员安全的性能

符合 APTA 的要求;在此基础上,作者给出了加强舱门骨架结构强度的设计以提高客车被动安全能力的解决方案。Tay 等^[29]使用 LS-dyna 软件模拟货车、皮卡、多用途车分别侧面撞击四门乘用车,计算撞击车辆和被撞车辆的刚度比,分析刚度比对驾驶员死亡的影响,并与统计数据对应的驾驶员死亡率进行比较;结果表明,基于刚度比的方法在预测统计驾驶员死亡率方面是不可靠的。Quang^[30]使用 Ansys 软件搭建了两辆客车的碰撞过程,被撞击车辆分别采用低碳钢、高碳钢和复合板为材料,以车身结构中的位移、等效变形、应力为评价指标;结果表明,采用复合材料的车身结构变形最大,同时作者给出了提高车身中复合材料刚度的建议。

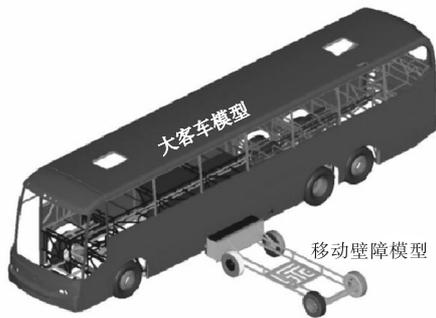


图3 纯电动客车侧面碰撞有限元模型

Fig. 3 Finite element model of side impact of pure electric bus

还有学者在保证客车侧面碰撞性能的情况下,对客车进行轻量化研究。谭喜峰^[31]在进行客车轻量化设计时,综合考虑了客车侧面碰撞结果,该设计方案涵盖了顶盖、左右侧围和车架结构的结构优化;用拓扑优化确定车架具体的优化区域,运用尺寸优化确定部件具体厚度;通过这一系列优化措施,整车质量减轻 109 kg,整车质量减轻率为 7.4%。崔亚辉等^[32]针对客车轻量化,提出改变客车侧壁斜撑厚度的优化措施,还提出改用 U 型钢斜撑的措施。Dai 等^[33]采用最小二乘回归、移动最小二乘和径向基函数神经网络的方法构建了大客车代理模型,选取客车总质量和侧面撞击侵入为优化目标,对客车车体进行优化,优化后的客车既实现了轻量化,也提高了侧面碰撞的耐撞性。邹康^[34]采用拓扑优化的方法对客车左右侧围及车顶结构进行轻量化处理,在保证侧面碰撞性能的情况下,客车质量减轻率可以达到 13%。王俊楠^[35]使用灵敏度分析法,以车身骨架质量最小为目标、以车身骨架厚度为设计变量进行客车轻量化设计。

Pravilonis 等^[36]也进行相似的研究,即在保证客车侧面碰撞性能的前提下,降低车身的质量。

客车轻量化研究对提高能源效率、增加运载能力、提升安全性能、推动创新技术应用以及降低成本和延长使用寿命具有重要的意义。这将有助于推动可持续交通的发展,提升出行体验,促进客车行业的可持续发展。

随着新能源汽车的发展,新能源客车也越来越多地运用到了日常生活中。有的学者从提高电动客车侧面碰撞时电池的安全性方面进行研究。新能源汽车使用的是高压、大容量的锂离子电池,当发生碰撞时,可能会导致电池短路、电池外壳破裂等危险情况。Wang 等^[37]从电损伤和腐蚀损伤两方面分析了电动客车侧面的安全性;在发生侧面碰撞时,重新设计的客车侧面结构使电池的安全性得到了提升。王震坡等^[38]使用 CAD、Hypermesh 软件建立纯电动客车侧面碰撞有限元模型并将模型导入 Ls-dyna 软件进行仿真;在对电池箱前面板的变形及电池模块的运动等指标进行分析后,指出在电动客车侧面碰撞过程中,存在电池箱门骨架刚度小、电池模块固定能力差等影响安全性的因素。针对上述问题,胡付超等^[39]搭建了纯电动客车侧面碰撞仿真模型,建议将电池仓附近下防撞梁下移 60 mm,防撞梁改为拱形结构,改进后的结构如图 4 所示。王星^[40]提出一种分析方法,该方法以电池箱体的变形以及安装点的加速度作为切入点,对电池箱体的碰撞安全性能进行评价和分析。Kim 等^[41]建立氢燃料大客车侧面碰撞仿真模型,并从侧面结构的加速度及变形量角度对模型进行验证。Chen 等^[42]提出电池单元交错布局的设计方案,如图 5 所示。经过对该方案的仿真分析,发现与传统电池组封装中使用的电池单元布局相比,交错式布局提供了不同的载荷传递路径,可以将冲击传递到电池组中更宽的范围;交错式单元布局不仅可多抵消电池组内 7.4% 的能量,还可以多抵消撞击附近区域 2.6% ~ 7.4% 的能量;交错式布局可以增加电池组的接触面积,提高电池整体的稳定性,同时也可以减轻电池表面的热负荷,有利于降低电池的热失控风险。

在真实碰撞案例中,客车被侧面撞击的角度是多样的。白芳华等^[43]通过建立有限元仿真模型,对客车与客车及货车与客车之间的侧面碰撞进行仿真分析,进行不同角度的侧面碰撞仿真实验;结果表明在 90° 碰撞角度下客车撞击客车的碰撞实验工况中,乘员损伤最为严重。周存文^[44]建立大客车整车侧面 30°、

60°、90°、120°、150°碰撞 5 种仿真工况,以假人头部合成加速度、肋骨变形量等为评价指标,也得出了乘员在大客车侧面 90°撞击大客车时乘员受伤最为严重的结论。

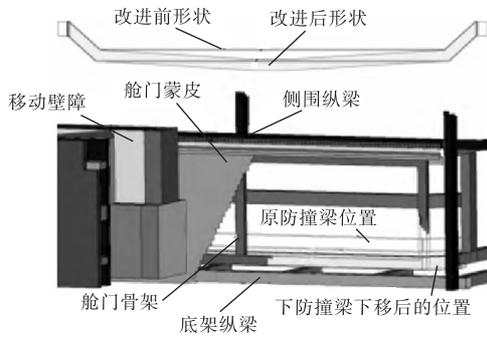


图 4 改进后的大客车侧面结构
Fig. 4 Improved side structure of bus

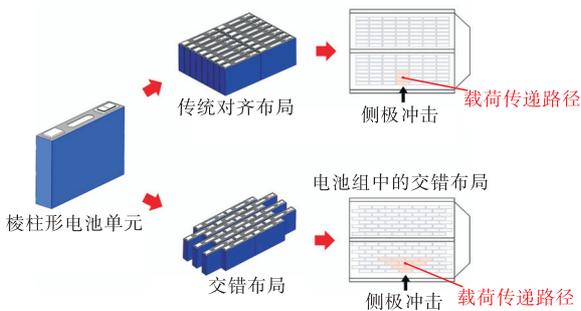


图 5 电池单元的交错布局与传统布局
Fig. 5 Staggered layout and traditional layout of battery cells

相较于传统客车,纯电动客车的电池组往往使用大容量锂离子电池,这些电池位于车辆底部或车身侧面。纯电动客车采用质量大、能量密度高、体积大的动力电池,需要较大放置空间。在碰撞工况下,电池容易产生短路、漏电,甚至起火,会对人员造成机械伤害、电伤害、化学伤害、燃烧爆炸伤害等。电池组周围的车身结构为能够吸收碰撞能量的形式,以确保在碰撞发生时最大程度地保护电池,并将碰撞能量分散到车身其他部位。在发生侧面碰撞时,电池组的位置可能导致其无法有效吸收和分散碰撞能量,致使碰撞力量直接传递给车辆内部,增加乘员受伤的风险。对新能源客车进行侧面碰撞研究可以确认其结构是否能够在发生侧面碰撞时吸收和分散碰撞能量,减少乘员受伤的风险,进而提高客车安全性能。

总体来看,国内外对大客车被动安全性的研究主要通过有限元仿真的方法。有限元仿真方法具有很多优点。一是节约成本和时间。通过实车碰撞实验研

究某个过程或系统,通常需要付出大量的时间和经济成本,甚至还可能涉及人员伤亡风险;而通过仿真分析,可以快速模拟出实验结果,大幅降低时间和经济成本,并且可以无风险地进行多次测试,不断优化和改进模型。二是可以对模型进行多维度分析。通过改变模型中的变量,可以得出各种关于系统行为、性能和优化的结论。三是可以评估决策的效果。在实际操作前,仿真分析可以帮助研究人员比较不同方案的效果,以选择最佳解决方案。

受实车碰撞实验和台车实验费用高、可重复性差、操作复杂性高、实验条件受限等因素的影响,针对这两项的研究较少;但实车碰撞实验及台车实验的开展可以为有限元仿真提供基础数据。鉴于客车事故的多发性,我国应开展不同工况下的实车侧面碰撞实验以提高客车被动安全性,为制定我国大客车碰撞安全标准或法规提供科学依据。

4 结语与展望

在侧面碰撞法规方面,与乘用车相关的侧面碰撞法规主要有 GB 20071—2006 《汽车侧面碰撞的乘员保护》及中国新车评价规程(China-New Car Assessment Program, C-NCAP),且法规中规定的碰撞形式多样;而与客车侧面碰撞相关的法规只有 GB 13094—2017 《客车结构安全要求》,且只对客车侧面的结构提出要求,并不涉及侧面碰撞的形式。相较于乘用车侧面碰撞相关法规和碰撞实验,目前国内外对大客车的侧面碰撞研究较少,从侧面碰撞法规角度来说,我国应尽快出台关于客车侧面碰撞法规,结合国内外客车侧面碰撞的发展现状,客车被动安全及碰撞法规研究将会朝着以下几个方向发展:

(1) 虚拟测评技术。计算机技术的发展,保障了虚拟测评仿真结果的精确性,虚拟测评仿真是利用计算机有限元求解软件计算模拟不同工况,可以弥补实车物理实验测试工况不足的问题。带有生物力学假人有限元模型的虚拟测评实验工况能够模拟出更精确的人体损伤数据。未来虚拟测评应主要从乘员体征的多样化、乘员的不同姿态及不同肌肉响应的乘员碰撞损伤方面进行研究。

(2) 主被动安全一体化研究。为了更好地保障乘员的人身安全,受益于科技的快速发展,国内外还从主动安全的角度对客车的安全性进行研究。例如,国外的车距监视系统、司机分神智能监视系统、防侧撞

预警系统等一些新的智能技术在客车上的应用越来越成熟。在国内,部分客车企业在主动安全方面也取得了明显的成效,如金龙客车研发的前向防撞报警系统、道路自动速度控制系统和车道偏离报警系统。在国外,客车主动安全系统也备受关注,例如高级驾驶辅助系统可以通过“检测客车附近行人—提醒驾驶员”这一流程避免客车与附近盲区行人发生碰撞^[45]。汽车主被动安全一体化技术提供了广泛的保护措施,可以预防交通事故并提高乘员的安全性。

(3) 碰撞相容性研究。相当长一段时间内,提高车辆被动安全性主要是从评价车辆自身的保护性能的角度进行的,并没有考虑与其碰撞车辆的被动安全性。近年来,国内外的学者也开展了对车辆-车辆碰撞相容性的研究。开展客车碰撞相容性的研究,不仅能保护本车乘员安全,而且也必须能保护对方车内乘员的安全,从而达到整个碰撞事故中人员和财产损失的最小化。

(4) 适应新能源与智能驾驶汽车的发展。随着新能源汽车和自动驾驶技术的快速发展,客车碰撞法规也需要适应这些新技术的需求,比如涉及对新能源车辆(如电池安全性)和自动驾驶车辆(如传感器准确性和响应性能)的特殊安全要求的制定。鉴于日益增长的新能源汽车保有量及在未来可能出现的连发交通事故,开展汽车被动安全性研究有利于相关标准及法规的起草。

参考文献:

- [1] 国家统计局. 中华人民共和国 2021 年国民经济和社会发展统计公报[J]. 中国统计, 2022(3): 9-26.
- [2] 国家统计局. 中华人民共和国 2022 年国民经济和社会发展统计公报[J]. 中国统计, 2023(3): 12-29.
- [3] 中华人民共和国公安部交通管理局. 中华人民共和国道路交通事故统计年报: 2010 年度[R]. 北京: 公安部交通管理科学研究所, 2011.
- [4] 贺志瑛. 大客车正面碰撞安全性技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2016.
- [5] 王仁广, 吴志新, 周荣. 欧美汽车碰撞乘员保护标准对比分析[J]. 天津工程师范学院学报, 2009, 19(2): 19-21.
- [6] 陈鑫. 我国自主品牌汽车应对欧洲被动安全法规的措施研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2015.
- [7] 裘志琦. 美国汽车安全认证要求及法规发展动态[J]. 标准科学, 2009(4): 84-89.
- [8] 崔世海, 段海彤, 李海岩, 等. 肥胖对乘员碰撞损伤影响机制的研究进展[J]. 医用生物力学, 2019, 34(5): 548-554.
- [9] MCKNIGHT J. The development of a low floor citybus: Volvo B10L[J]. Proceedings of the institution of mechanical engineers, part D: journal of automobile engineering, 1995, 209(2): 77-93.
- [10] 毛英慧. 营运客车侧面碰撞仿真研究及安全性评价[D]. 西安: 长安大学, 2011.
- [11] 高水德, 张绍理, 姚常青. 国外客车被动安全研究[J]. 客车技术与研究, 2006(3): 7-10.
- [12] TURLEY J. Side impact of a paratransit bus[D]. Tallahassee: The Florida State University, 2013.
- [13] 白芳华, 杨杭, 王若璜. 基于《电动客车安全技术条件》的客车侧碰试验研究[J]. 汽车实用技术, 2022, 47(1): 127-131.
- [14] YEOM C J, KIM S K, KIM J H, et al. A predicting and improvement of side impact using the CC-CTP[R]. Warrendale: SAE, 1993.
- [15] 朱西产, 刘玉光, 郑宏. 汽车车身结构碰撞性能的试验研究[J]. 汽车技术, 1999(4): 20-22.
- [16] YOGANANDAN N, PINTAR F A. Responses of side impact dummies in sled tests[J]. Accident analysis and prevention, 2005, 37(3): 495-503.
- [17] MCINTOSH A S, KALLIERIS D, FRECHEDE B. Neck injury tolerance under inertial loads in side impacts[J]. Accident analysis and prevention, 2007, 39(2): 326-333.
- [18] 李卓森. 汽车正面碰撞方程式及其应用: 上[J]. 汽车技术, 1989(8): 8-11.
- [19] TAY Y Y, LIM C S, LANKARANI H M. A finite element analysis of high-energy absorption cellular materials in enhancing passive safety of road vehicles in side-impact accidents[J]. International journal of crashworthiness, 2014, 19(3): 288-300.
- [20] 李凌伊. 城市电动客车侧面碰撞安全性研究[D]. 西安: 长安大学, 2018.
- [21] 刘飞虎. 低入口中型纯电动城市客车侧面碰撞安全性研究[D]. 西安: 长安大学, 2022.
- [22] YUKSEL C, AZELOGLU C O. Development and assessment of alternative designs for side impact beam[J]. International journal of crashworthiness, 2024, 29(1): 36-45.
- [23] 吴胜利. 公交大客车碰撞有限元分析与车身改进设计[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2010.
- [24] BOJANOWSKI C, KULAK R F. Multi-objective optimi-

- sation and sensitivity analysis of a paratransit bus structure for rollover and side impact tests[J]. *International journal of crashworthiness*, 2011, 16(6): 665–676.
- [25] 毛英慧,何新,酒军亮. 蒙皮对客车侧面碰撞仿真精度的影响[J]. *客车技术与研究*, 2011, 33(3): 9–11.
- [26] MOHAMMAD R, RAHUL R A J, CHITHRAKUMAR V K. Side impact crash test simulation and analysis of passenger bus[R]. Warrendale: SAE, 2013.
- [27] 郭敬文,姚成. 客车侧面碰撞仿真研究[J]. *海峡科学*, 2010(12): 116–117.
- [28] 王松,陈婉平,纪绪北. 基于美标的纯电动客车侧面碰撞仿真分析[J]. *客车技术与研究*, 2015, 37(4): 17–19.
- [29] TAY Y Y, PAPA A, KONERU L S, et al. A finite element approach in estimating driver fatality ratio of a fleet of LTVs striking a passenger car based on vehicle's intrusion, acceleration and stiffness ratios in side-impact accidents[J]. *Journal of mechanical science and technology*, 2015, 29: 1231–1242.
- [30] QUANG N T. Analysing two crashed vehicles to determine the right material for body panels[C]//LONG B T, KIM Y H, ISHIZAKI K, et al. Proceedings of the 2nd Annual International Conference on Material, Machines and Methods for Sustainable Development (MMMS2020). Cham: Springer, 2021.
- [31] 谭喜峰. 基于侧面碰撞安全性的客车车身轻量化研究[D]. 西安:西安理工大学, 2018.
- [32] 崔亚辉,谭喜峰,齐焕敏. 大客车侧面碰撞建模与仿真分析[J]. *机械设计与制造*, 2019(10): 222–225.
- [33] DAI R, YANG X, SHI S, et al. Electric bus frame optimization for side-impact safety and mass reduction based on the surrogate model method[R]. Warrendale: SAE, 2021.
- [34] 邹康. 基于力学特性的纯电动客车轻量化研究[D]. 镇江:江苏大学, 2022.
- [35] 王俊楠. 新能源客车车身的结构优化[D]. 沈阳:沈阳工业大学, 2022.
- [36] PRAVILONIS T, SOKOLOVSKIJ E. Side impact analysis of the bus frame structure[C]//PRENTKOVSKIS O, YATSKIV I, SKAČKAUSKAS P, et al. Proceedings of the 12th International Conference Transbaltica. Cham: Springer, 2019.
- [37] WANG Z P, SHI S J, WANG Y, et al. The simulation analysis on side collision safety of electric buses[J]. *Applied mechanics and materials*, 2012, 121: 1130–1137.
- [38] 王震坡,王越. 纯电动客车侧碰撞有限元建模及仿真分析[J]. *北京理工大学学报*, 2013, 33(3): 266–270.
- [39] 胡付超,王波,林伟,等. 纯电动城市客车动力电池安全防护碰撞仿真分析与改进[J]. *客车技术与研究*, 2017, 39(5): 26–28.
- [40] 王星. 电动客车动力电池箱碰撞安全性仿真分析[J]. *机电技术*, 2019(4): 84–86.
- [41] KIM K, SHIN J, HAN K, et al. Study on side impact test procedure of hydrogen bus[J]. *Journal of auto-vehicle safety association*, 2021, 13(4): 92–98.
- [42] CHEN P W, XIA Y, ZHOU Q, et al. Staggered layout of battery cells for mitigating damage in side pole collisions of electric vehicles[J]. *eTransportation*, 2023, 16: 100238.
- [43] 白芳华,杨杭,吕北京,等. 基于侧面碰撞的客车乘员约束系统要求及试验方法研究[R]. 重庆:重庆车辆检测研究院有限公司, 2019.
- [44] 周存文. 基于多角度车-车侧面碰撞的大客车乘员保护系统研究[D]. 长沙:湖南大学, 2020.
- [45] DOLS R J F, ARMESTO L, GIRBÉS V, et al. Safebus: a new active safety system for pedestrian detection in public passenger buses[C]//AYUSO M J L, YAGÜE B J L, CAPUZ-RIZO, S F. Project Management and Engineering Research. Cham: Springer, 2017.

责任编辑:周建军