

面向乘员安全保护的汽车内室设计新概念

左恒峰¹, 钟志华^{1,2}

(1.清华大学, 北京 100083; 2.中国工程院, 北京 100088)

摘要: **目的** 在汽车内室中, 作为传统乘员约束系统的安全带与安全气囊已经存在相当长的时间, 虽然对乘员的碰撞安全起到了积极的保护作用, 但存在若干弊端, 尤其在某些特殊工况下缺乏有效保护, 会产生潜在损伤。在不能充分满足未来自动驾驶汽车需求的情境下, 因乘员的各种姿态和多种活动, 以及对乘员保护的全面性和有效性的要求, 有必要在内室设计中对乘员保护方式进行完善和创新。**方法** 在对传统内室壁面和乘员约束系统进行文献综述和全面审视的基础上, 从内室结构原型创新的角度, 提出基于充气式壁面结构的内室设计新概念, 并对这一新概念进行了创新点的梳理, 以及初步的可行性分析论证, 并进一步进行了意向性的内室概念呈现及后续的研究规划。**结果** 初步仿真分析表明, 碰撞过程中充气式壁面结构对应的头部损伤指标满足国际通用标准, 对乘员安全保护的机制来说是可行的。基于充气式壁面结构的汽车内室还将从材料层面实现汽车内室绿色环保、助推汽车轻量化、营造汽车内室新的视觉景观。**结论** 基于充气式壁面结构的汽车内室新概念是对传统汽车内室壁面结构的变革性创新, 在部分保留传统约束系统的基础上, 形成开拓性的乘员安全保护机制, 是汽车内室工业设计在形态学上的突破性尝试。基于工程科学与设计艺术的结合, 这一探索将为未来汽车内室设计提供新的思路和参考。

关键词: 汽车内室; 乘员保护; 充气式结构; 设计创新

中图分类号: TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2023)08-0095-12

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.08.009

New Concept of Vehicle Interior Design for Occupant Collision Protection

ZUO Heng-feng¹, ZHONG Zhi-hua^{1,2}

(1. Tsinghua University, Beijing 100083, China; 2. Chinese Academy of Engineering, Beijing 100088, China)

ABSTRACT: As a traditional occupant restraint system within a vehicle, safety belts and airbags have been adopted for a long time. Although they have played a positive role in protecting the occupant's safety in crash accidents, there are some disadvantages, especially the lack of effective protection under some special working conditions, which will lead to potential damage. In case of that the demand for autonomous vehicles cannot be fully met in the future, it is necessary to improve and innovate in the occupant protection mode in the interior design because of the various postures and activities of the occupants and the requirements for the comprehensiveness and effectiveness of occupant protection. Based on a review of the traditional vehicle interior wall and the occupant restraint system, a new concept of vehicle interior design based on inflatable wall structure was proposed from the perspective of prototype innovation in interior structure. Then, the innovation of this new concept was sorted out, the preliminary feasibility analysis and demonstration were carried out, the intentional concept of interior was further presented and the follow-up research plan was made. The preliminary simulation analysis indicated that the Head Impact Criteria corresponding to the inflatable wall structure met the international common standards during the collision, which was feasible for the protection mechanism of occupant safety. The vehicle interior based on the inflatable wall structure also realized the environmental protection of vehicle interior from the material level, promoted the lightweight of the vehicle and created a new visual landscape of the vehicle interior. The

收稿日期: 2022-12-02

作者简介: 左恒峰 (1965—), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为交通工具内外饰造型设计, 色彩、材料、表面处理 (CMF), 产品设计等。

通信作者: 钟志华 (1962—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为汽车动力学、汽车安全、整车设计与制造及产业化等。

new concept of vehicle interior based on inflatable wall structure is a revolutionary innovation of traditional vehicle interior wall structure. On the basis of partially retaining the traditional restraint system, a pioneering occupant safety protection mechanism is formed, which is a morphological breakthrough attempt of industrial design of vehicle interior. Combining engineering science and design arts, this exploration will hopefully provide valuable ideas and references for future vehicle interior design.

KEY WORDS: vehicle interior; occupant protection; inflatable structure; design innovation

长期以来汽车内室的被动安全措施常采用安全带和安全气囊的方式,虽然对乘员碰撞安全保护起到很大的作用,其本身也历经不断的渐进式改进,但仍然不能覆盖所有碰撞工况下对乘员在各个方向的保护,也存在若干力学和热学损伤,尤其不足以适应未来自动驾驶汽车乘员的多种活动形式和多种乘坐姿态的复杂要求。传统的安全措施与工业设计是分离的。有必要通过内室工业造型设计和结构工程设计的深度融合进行整合安全保护与功能形式的全面创新。

1 基于安全保护的汽车内室设计综述

随着智能化和自动驾驶技术的深入发展,汽车功能属性发生了重大变化。汽车不再仅仅是运输和迁移的交通工具,更是满足人们生活、工作、娱乐、休闲等多种需求的延伸平台。汽车造型设计正在进入一个全面升级和突破性创新的阶段,但同时也面临一系列更复杂的挑战和更高的要求。这在汽车内室设计方面尤为明显。以往作为设计重心的车身外饰设计,正逐渐向更多关注内室设计方向转变(郝瑞敏^[1])。以自动驾驶汽车为例,车内乘员将比以往享有更大的自由度,乘员将以各种状态和各种姿势从事多种不同于传统内室中的活动(Sibashis 等^[2]),因而针对汽车内室需要进行前瞻性的研究和设计创新。

汽车内室设计是一项复杂的系统工程,对应着不同的知识体系和技术支撑。传统的汽车内室具有不同的系统,包括照明系统、座椅系统、约束系统、门饰板系统等(邱国华等^[3]),而自动驾驶汽车又置入了更多的内容,包括先进的信息系统和人车交互系统等。传统内室相关的知识体系和认知模式将发生改变,有必要对汽车内室的功能模块(包括安全)、信息模块、结构模块、空间与形态模块进行解构和重组。其中,乘员安全保护是首要问题,也是设计创新的基本前提。在对传统内室和被动安全保护方式进行开拓性研究时,需要通过内室工业造型设计与碰撞安全、工程结构的研究进行深度融合和协同创新。

从工业设计的角度来看,目前汽车内室造型设计理论和方法主要集中在空间布局、造型语言、交互界面、感觉体验、材料色彩工艺(CMF)等方面(孙彪等^[4], Lee 等^[5], 陈俊洁^[6], Zhang 等^[7])。在内室设计上,可以看到更炫酷的视觉或光影效果,更直观的信息显示界面,更丰富多变的空间布局、更新颖的内

室造型形态等。然而,这些场景下乘员安全保护方式的解决方案和设计却出现滞后现象。虽然汽车内室中有关主动安全功能的实现和完善发展较快,如基于多重感觉通道的信息提示和预警,自动刹车系统、汽车避撞系统等,但在被动安全方面,一直沿用以安全带和安全气囊为主要保护方式的传统乘员约束系统。尽管传统约束系统也在不断发展,在很大程度上为乘员提供了积极保护,但其安装位置的局部性和作用方向的有限性,以及各种潜在的力学损伤或热损伤,不能完全覆盖所有工况下对内室乘员全面有效的保护,不足以满足未来自动驾驶情境下针对乘员的多种姿态和多种行为特征的新的保护需求。

安全气囊是一个由多个部件构成的引爆装置,只有当碰撞条件达到设计条件时(如一定的速度撞击硬物),才会通过引爆而被打开,在其他危险情况下,如后碰、翻转、或低速碰撞等,都不一定导致安全气囊起爆。同时,安全气囊和安全带都安装在车内某些固定的位置,在气囊未覆盖的区域,人体有可能直接撞向内室硬壁面,因而其保护效果在方向上有一定的限制(Williams 等^[8])。气囊的展开过程是一个动态过程,伴随着较高的瞬间压力和温度(Mohammad^[9]),由此可能对乘员造成不必要的损伤,其中力学损伤比较常见,如腹部和胸部的损伤(Julie 等^[10])。此外,还可能对乘员造成直接或间接的灼伤等热损伤,多见于手臂、脸部、眼睛等部位(Erpenbeck 等^[11])。在下列情形下,普通气囊的伤害概率会升高:与标配气囊基于的标准人体尺寸有很大差异的过小尺度的乘员(Huber 等^[12]);在不佩戴安全带、单独使用气囊的情况下,对乘员造成伤害的概率会更高(Monkhouse 等^[13])。

国内外学者在改善乘员安全保护方式和效果方面进行了积极有益的探讨。如 Susana 等^[14]专门探讨了一些特定人群如老人、儿童、孕妇等不同人群或异型尺度人群的安全保护问题,并研发了相应的专用安全带。如图 1 所示。Klinich 等^[15]也进行了类似的研究。在此基础上,Huang 等^[16]的研究指出,需要建立传统约束系统的参数动态可调机制,包括气囊刚度、安全带和座椅的位置等。不过,在操控上难度不小,且仍然难以适应各种碰撞工况。

也有不少研究深入探讨了气囊和安全带在车内不同位置上的保护作用和效果,并开发了多种形式的气囊,如 Wang 等^[17]、葛如海等^[18]的研究,涉及侧面



图 1 异型尺度人群专用安全带
Fig.1 Special seat belt for occupants in abnormal sizes

气囊 (Side Air Bag)、气帘 (Air Curtain) 以及多腔室气囊的采用,在一定程度上增强了保护效果。但是,大部分安全带的舒适度不高,很多乘员不愿意系安全带,造成损伤率提高。有研究将充气概念引入安全带,比如,2012 年,福特公司采用了后排乘客充气式安全带^[19](充气是在一个动态的过程中完成的)。其对小孩或小尺寸乘员的保护就比非充气式安全带的保护效果更为有效,造成的损伤也小 (Stephen 等^[20]),同时提高了安全带的舒适度。

以上这些尝试和努力都提升了对乘员的安全保护性。然而,乘员约束系统,特别是安全气囊经历了四代产品的发展和更新,但这种发展和更新都是渐进性的 (Incremental),而不是根本性的 (Radical) 或跃迁式的改变,其造成的保护局限性和碰撞损伤情况仍然问题较大 (Khouzam^[21])。不能保证在各种不同碰撞工况下将乘员的损伤降到最低。比如,在车辆翻滚、侧碰以及小偏置碰撞三种工况下 (见图 2),传统约束系统存在不可忽视的保护缺陷。在这些工况下,乘员可能越过传统安全气囊未能覆盖的边界区域,进而滑过、偏离安全气囊,直接撞向内室顶棚、门内板、立柱等刚性壁面,造成重大伤亡。

统计数据显示,翻滚事故每年导致的死亡人数在欧洲、澳大利亚和中国分别达到 20%、27% (Han 等^[22]) 和 35% (王玮楠^[23])。每年全球因道路翻滚安全事故造成的经济损失可达 500 亿美元 (Liu 等^[24])。

侧碰造成的人员伤亡率约占 35% (丁海建等^[25]), 25% 小偏置碰撞事故案例占全部正面碰撞事故的比例在中国和欧洲分别为 24% 和 27% (贾宏椿^[26], Sherwood 等^[27])。翻滚事故中受伤最严重的部位主要是头部、颈部和胸部,累计占比超过了 80% (王玮楠^[23])。在侧碰事故中,遭受严重损伤的区域主要是胸部、腹部以及骨盆等 (Jiang 等^[28])。小偏置碰撞事故中乘员损伤则集中在头部和胸部,占比分别为 46% 和 24% (张俊南^[29])。图 3 模拟了在翻滚工况下假人的运动状况。

张埔^[30]基于仿真研究发现,在车辆发生翻滚时,车顶的变形会导致车身侵入量的增加,影响到乘员的生存空间进而导致伤亡。虽然车辆翻滚仅占交通事故的 8%,但重伤和死亡人数却高达 21%~31% (Zhang 等^[31])。安全带虽然可以防止乘员脱离座椅 (Andrew 等^[32]),但只有当安全带和安全气囊共同使用时,乘员的受伤程度才能有效降低,而即便如此,传统约束系统仍然存在以下缺陷:三点式安全带对乘员头部和肩部的侧向约束效果不理想,无法在翻滚碰撞中对人的头部进行有效保护;车顶是传统安全气囊保护薄弱的地方;虽然有研究尝试采用专门的翻滚安全气囊 (陈慧^[33]),但安全气囊在低碰撞强度的事故中,以高强度方式展开或以较低的展开阈值展开时,易对乘员造成损伤;安全气囊在翻滚过程中由于某些原因导致延时展开,无法发挥其防护功能 (黄硕^[34])。总之,



图 2 几种特殊工况下传统乘员约束系统保护薄弱的情形
Fig.2 Insufficient protection of traditional occupant restraint system under special situations



图 3 车辆翻滚时车内人员的运动状态
Fig.3 Illustration of occupant posture during the accident of rolling

在翻滚发生时,乘员的头部与内室立柱、顶棚之间的二次碰撞损伤仅靠安全带和安全气囊还不能完全达到有效防护。

Zhang 等^[35]的研究发现,在车辆发生侧碰时,因侧面结构部件简单,变形和吸能的缓冲空间不够充分。发生 25%小偏置碰撞时,重叠吸能区小,避开了纵梁碰撞缓冲区,乘员舱和机舱都在事故中溃缩(周英杰等^[36]),车身侵入量大。这都使传统约束系统作用的空间变小。在侧碰时,即使有侧面气囊,但较远的乘员受安全气囊的保护较弱(Umale 等^[37]),并且躯干易从安全带中滑出(Shaimaa 等^[38])。在某些特定条件下,比如某一特定的角度,乘员可能会滑过安全气囊撞向内室壁面或入侵车体。Dejun 等^[39]的研究发现,在小偏置碰撞时,当车体旋转角度过大时,座椅和安全带所提供的侧向约束力十分有限。在这些情形下,头部、颈部损伤的概率都非常高。此外,在侧碰和小偏置碰撞过程中,车身侵入量的增加可能导致车门变形,增加了安全系统的设计难度(张前斌等^[40]),且气囊起爆机构的可靠性将受到不同程度的影响,使气囊可能无法正常展开(何蓉^[41])。侧碰发生过程中乘员的状态如图 4 所示。即使在有安全带的情形下,对乘员头部的保护依然是有限的。

总体来说,在车辆碰撞过程中,乘员的能量耗散方式对乘员伤害有重要影响。乘员保护方式和效果通常基于两部分能量的合理分配:约束系统和车身内饰变形耗散的约束能(Restraint Energy),以及车体变形耗散的压溃能量(Ride-down)(张君媛^[42])。在侧碰、翻滚以及小偏置碰撞事故中,车体变形受限,压溃能量变小,约束系统的负担变重,其结果要么因约束系统刚度的强制增加导致乘员胸部、头部受损,要么约束系统刚度不增加,但乘员直接撞上内室壁面产生“硬接触”,同样造成胸部、头部因二次碰撞而受损。

特别需要注意的是,当前汽车内室中与乘员接触的表面如顶棚、门内饰板等均为“硬壁面”,基本上都是塑料、复合材料等刚性材料与结构,虽然表面包覆有织物、皮革(含麂皮)、橡胶等柔性材料,但这些都包覆材料很薄,缓冲吸能的程度极为有限。同时,安全气囊存在延迟打开或未能展开的情形,或者即使展开了也带来各种潜在的力学损伤或热损伤。总之,基于传统材料与结构的汽车内室壁面和传统的乘员约束系统存在对乘员的保护不全面和易产生损伤的弊端。

未来智能交通环境(如无人驾驶汽车)将带来新的乘员保护问题,需要有新的思路和解决方案。在无人驾驶汽车内室中,乘员不再执行驾驶任务,人们有机会进行更多不同于传统内室中的活动。

一方面,乘坐姿态和车内环境、设施及形态将更加多样化(周青等^[43]),如图 5 所示。当发生车辆碰撞时,复杂多样的乘坐环境和乘员姿态将会引起更高的碰撞伤害风险,比如发生不同朝向的、不同坐姿的、未约束的乘员之间的接触碰撞,对半躺乘员的脊椎形成轴向冲击,而座椅安全带或气囊对非标准坐姿的乘员难以提供有效保护(Ji 等^[44])。Timothy 等^[45]也指出,在多种坐姿和多方向的座椅布局的情形下,仅通过在有限位置与方向上起作用的传统安全带和安全气囊,将不足以达到有效的保护。

另一方面,一旦人从操控汽车与观察路面等一系列紧张任务中解放出来后,去从事其他日常生活、工作及娱乐活动时,其预警意识和应急反应水平会明显降低(当然,在完全无人驾驶的情境下,事实上我们也需要享受放松而不是紧张的状态)。在通常的情形下,一定的心理预警对碰撞损伤的预防或减弱是必要和有利的。而在完全自动驾驶状态,乘员完全沉浸于车内活动时,一旦发生紧急事件,“人-车-路”系统在

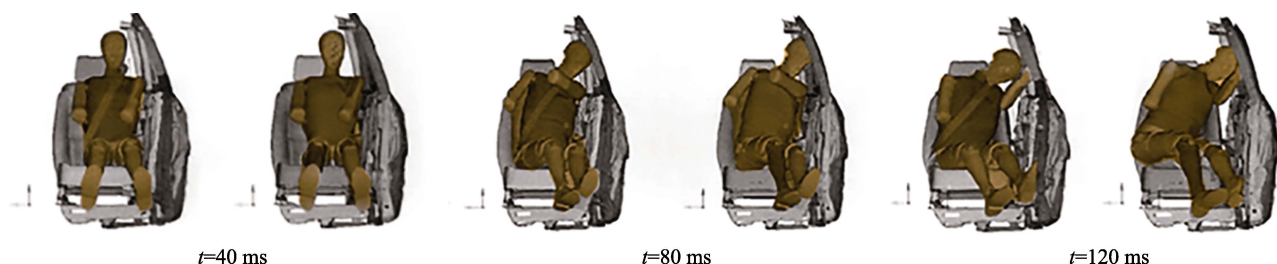


图 4 车辆发生侧面碰撞时乘员的状态

Fig.4 Illustration of occupant posture during the accident of side collision



图 5 未来智能交通环境下的概念内室呈现复杂多样的布局和乘客姿态
Fig.5 Various layouts and occupant postures in concept vehicle interiors under future intelligent transportation circumstance

运动感方面的心理协同度会降低,这种在缺乏预警的无意识状态下的碰撞伤害比有意识状态下的伤害可能会更严重。Nakayama等^[46]指出,放松状态下颈部的损伤比警觉状态的损伤大。传统的乘员约束系统等被动安全保护措施已经不适应或不能充分满足这一新的变革(Smith^[47])。

由此可见,对自动驾驶环境下汽车新的乘员安全保护问题的研究必要且迫切。Farooq等^[48]的研究探讨了在增加内室设施(如添加桌子)时如何对人员进行碰撞保护,其方法为采用弹出的临时充气气囊,覆盖桌子的硬材表面。这对传统的安全气囊来说是一个改善,但仍然未跳出与传统气囊相似的“弹出”和“动态充气”的概念。另据报道,麻省理工(MIT)自组装实验室(Self-Assembly Lab)与宝马公司(BMW),基于“液体打印气体动力学”的新工艺研发了一种3D打印的硅胶弹性充气材料。打印时将液化材料挤入凝胶槽,然后固化成型,从而实现可充气或放气的功能^[49]。这一研究主要集中在材料和工艺上,关于这一概念在未来汽车内室中的应用,目前只提及了在安全气囊或座椅等方面的局部应用,并未面向汽车整体内室的壁面结构进行创新。当然,这从一个侧面说明了汽车内室与人体直接接触的界面从刚性到柔性转变的合理性。

Subit等^[50]指出,自动驾驶系统的引入在保护效果方面对传统乘员约束系统提出了质疑。尽管未来的自动驾驶汽车通过对环境信息的快速感知、监测和控制反馈,可提升安全性,但即使是先进的避撞系统也不能在所有的情况下都可以立即将车辆停下来,而是将车辆减速以规避传统情形下因驾驶员的迟钝反应可能产生的严重后果(Josef等^[51])。

综上所述,目前的内室乘员约束系统仍处在渐进式改进的阶段,虽对乘员保护起到很大作用,但不能覆盖所有碰撞工况下的乘员保护,也存在若干力学或热学损伤,更不能适应未来自动驾驶车辆复杂多变的内室场景。

本文依照原型设计创新的理念,提出将充气结构引入汽车内室,建立基于充气式壁面结构的汽车内室新概念,开拓乘员保护的新途径,在传统被动安全措施的基础上,将为乘员二次碰撞提供更全面、更有效的保护。为汽车内室设计(尤其是无人驾驶汽车内室设计)提供新的思路。充气式壁面结构应用于汽车内室的研究,国内外均未见同类报道,属于原创性概念,在工程科学与设计艺术相融合的创新设计理论和方法上,具有明显的理论意义和实践价值。

2 基于充气式壁面结构汽车内室设计的创新点

2.1 乘员安全保护的变革性机制和效果

充气式壁面结构作为内室的空间界面。其不同于

传统气囊主要体现在以下几个方面:常态下即为充气状态,而不是碰撞发生后再引爆弹出;由多气胞形成的充气式气胞壁面结构遍布整个内室,而不是在固定的某个位置;具有冗余特性,即多气胞壁面的气胞(群)之间具有不连通性,一个气胞(群)破坏不影响其他气胞(群)的保护作用。这种多气胞形成的内室软体表面,可以达到全方位“软碰撞”效果,在各个方向上建立起更有效的“二次碰撞”的缓冲和阻尼,改变人与内室环境的接触和碰撞方式,形成新的内室乘员安全保护机制。基于这种内室界面,乘员在不同的姿态(如坐、卧、躺、倚等)下,也有望进行有效的保护,从而实现全方位、全时段的乘员保护。

2.2 从材料层面实现汽车内室绿色环保并改善空气质量

影响汽车内室空气质量的主要因素是挥发性有机化合物(Volatile Organic Compounds, VOC)的释放。车内VOC主要来源于塑料、橡胶部件、织物、油漆材料、保温材料、黏合剂等。从材料的角度来看,采用VOC含量很低的环保材料或降低/抑制材料的VOC释放量是从源头上改善内室空气质量的根本途径。本文提出的充气式壁面结构将使用天然纤维增强树脂基生态复合材料。同时,由于内室大面积采用充气结构,降低了材料的种类和黏结剂的使用,可明显减少VOC的释放量,有助于从根本上增加汽车内室的绿色环保性,对改善车内空气质量具有重要意义。

2.3 通过材料、形态与结构的创新助推汽车轻量化的实现

从目前的文献资料来看,车身的轻量化研究较为活跃,而内室轻量化的研究还不太多。本文提出将充气式壁面结构这一新的形态与结构样式应用于汽车内室,部分替换一些比重大的刚性和实体材料,可以达到汽车整车的减重效果,采用充气式壁面结构实现轻量化的探索也尚未发现有类似报道,因此,这一思路在汽车轻量化方面,也是一个创新的举措。经初步计算,通过引入充气式壁面结构,汽车内室可以减重5%左右。

2.4 营造汽车内室全新的视觉景观和用户体验

随着自动驾驶和无人驾驶的兴起,乘员在内室的活动将变得更加丰富多彩。传统的内室视觉景观、环境界面以及整车用户体验都有可能也有必要进行新的设计探索。将充气式壁面结构引入内室设计将改变内室空间的视觉景观,并具有新功能的拓展潜力(可考虑在气囊结构的最外层界面植入新的信息化功能,如显示和交互,或增加氛围式照明),带来整个汽车内室的全新用户体验。

2.5 造型设计创新思维和方法上的新探索

本文提出的充气式壁面汽车内室从功能需求入

手,打破一些既定的“功能与形式”的传统模式,从原型上进行设计思维和方法的创新。着重体现在几个方面:突破传统的媒介,从硬质材料到软性材料的转变,赋予新的功能和美学的融合方式、新的人机交互体验模式。从材料的角度实现功能与美学的高度和谐;突破传统的形态,基于“保护乘员安全”并提供“乘员休息和从事各种活动”的内室功能,从功能原型的角度来对传统的形态进行根本性的改变。比如内室的壁面突破传统的“窗户”形式和形态;突破传统的结构,多气胞充气式软体壁面结构与外部刚性框架材料之间的结构连接改变了传统的结构形式。同时,该充气式壁面结构还具有“冗余”特征,一个甚至几个气室破坏或失效仍然可以保证整个充气系统对人体的足够保护;突破传统的人机界面模式,在感觉层次和功能层次上为车内的人机界面交互模式带来新的可能性,软性材料/结构用于汽车内室将改善人体工程的感觉交互方式。

3 充气式壁面结构内饰设计的可行性论证与初步推导

在车辆碰撞过程中,乘员能量耗散方式对乘员伤害有重要影响。乘员保护方式和效果通常基于约束系统及车身内室变形的约束能量和车体变形的压溃能量的合理分配。采用整体环绕的充气式壁面结构,理论上将有效增加用于约束系统和内室变形的约束能量,产生全方位的吸能和阻尼,有助于提升对乘员的保护效果,尤其适用于车辆侧碰、翻滚、小偏置碰撞等传统约束系统保护比较薄弱的环节,以及未来无人驾驶汽车更复杂多样的内室场景。因此,充气式壁面结构用于汽车内室,带来的乘员碰撞安全保护机制在逻辑上具有可行性,特别是在对乘员头部的保护方

面。为进一步阐述这一观点,对充气式壁面结构的保护效果进行了初步的模拟和推演。

充气式壁面结构由大量单元气胞连接而成。推演以头部保护为例,模拟计算单元气胞在碰撞发生时的 *HIC* 值。*HIC* 是国际通用的头部损伤指标(Head Injury Criterion)。它是对车辆发生碰撞时乘员头部损伤严重性的度量。在生活中人们都有体会,当身体突然加速(或减速)的时候,因为惯性,内脏和血液会向反方向牵拉,导致生理和心理上产生严重不适的感觉。*HIC* 值的大小主要取决于两方面的因素,碰撞时人体头部获得的瞬间加速度和其所持续的时间。通常定义为某个时间段内头部平均加速度与时间的乘积。这个时间段一般设为 36 ms 或 15 ms。如图 6 所示。36 ms、15 ms 的 *HIC* 经验值分别为 1 000 和 700。高于这个值时,将发生明显的头部损伤(如颅骨线性骨折)。

当碰撞发生时,单元气胞受头部挤压会产生变形。将头部与单元气胞碰撞的过程简化为一个气胞分阶段压缩的场景模型,如图 7 所示。当头部撞击单元气胞时,单元气胞腔体瞬时气压增大,腔体材料对抗

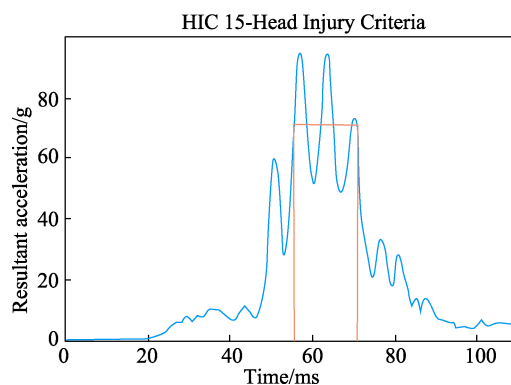


图 6 头部损伤指标 *HIC* 的示意
Fig.6 Illustration of Head Impact Criteria (*HIC*)

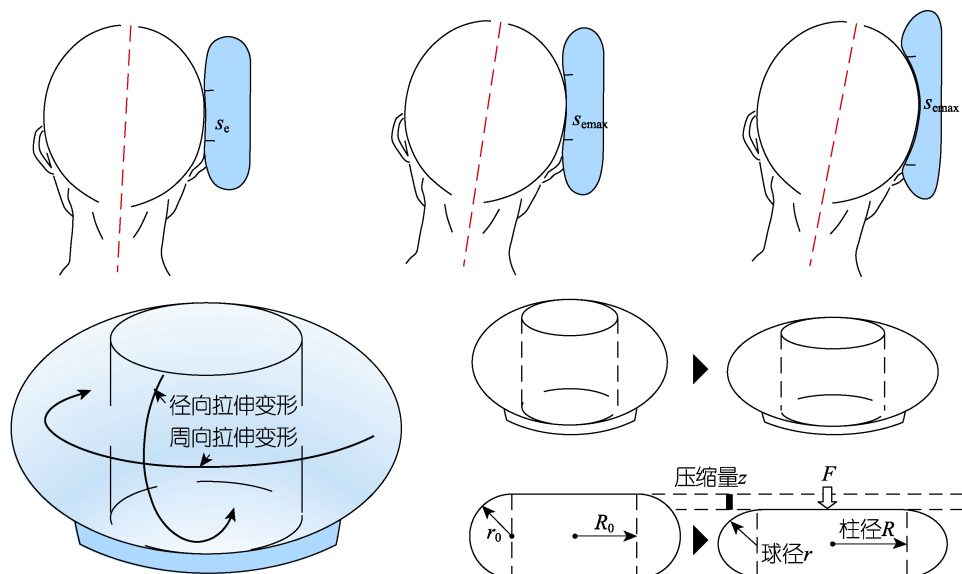


图 7 单元气胞径向与周向变形模型
Fig.7 Deformation model of inflatable air-cell in radial and circumferential directions

气压增大会发生相应的拉伸变形, 并达到表面应力平衡状态。其变形可以简化为腔体材料沿径向和周向两个方向的拉伸变形。根据这样的受力状态和气胞单元形状, 以 15 ms 的 *HIC* 作为碰撞安全保护效果的参考指标, 验证其碰撞保护效能。

常态充气式气胞, 不同于传统膨胀式气囊的工作形式, 其碰撞力学行为更加接近橡胶空气弹簧。根据实际碰撞事故数据和相关的仿真计算研究结果, 气囊的作用时间多为 30~60 ms。假设所有碰撞沿垂直气胞表面方向进行。

当头部以一定初始速度接触气胞单元时, 头部质量块受到气胞单元的反作用力将产生加速度。同时, 头部的位移使气胞又产生压缩, 反过来又影响了内部气体的压力, 从而影响了加速度的大小。两个过程相互耦合。此外碰撞场景中还有单元体材料的径向拉伸以及模拟的黏滞阻力影响, 仿真分析基于这一逻辑进行。因为篇幅的关系, 仿真分析的详细过程不在此赘述, 只介绍分析的结果。

根据仿真计算结果, 速度、加速度和气胞压缩量的变化曲线如图 8 所示。结果显示, 在 0.004 3 s 与 0.019 3 s 之间的 15 ms, *HIC* 指标取到了最大值 477.54, 小于标准值 700, 且具有一定的设计余量。考虑实际单元气胞的形态可能呈现多样化的特征, 本文依据设计需要又核算了六边形气胞单元 15 ms 的 *HIC* 结果, 在同样的半径与最大有效接触面积的假设下, 最终数值结果为 503.62, 略大于圆饼状气胞单元, 但同样符合要求。

以上推演为充气式壁面的保护效果提供了支持。在实际的碰撞环境下, 头部与气囊的接触速度会低于碰撞车速。此外, 人与气胞单元的碰撞并不一定是完全垂向的, 应存在一个法向角。此时垂向的相对初速度相比实际运动速度会更低。因此在实际环境下可以期待有更好的保护效果, 相应的充气式壁面结构也就有了更大的设计余量。随着研究的开展, 后续还将通过计算机仿真, 针对充气单元可能的不同造型形态, 进一步深入分析碰撞场景的模拟和推导。

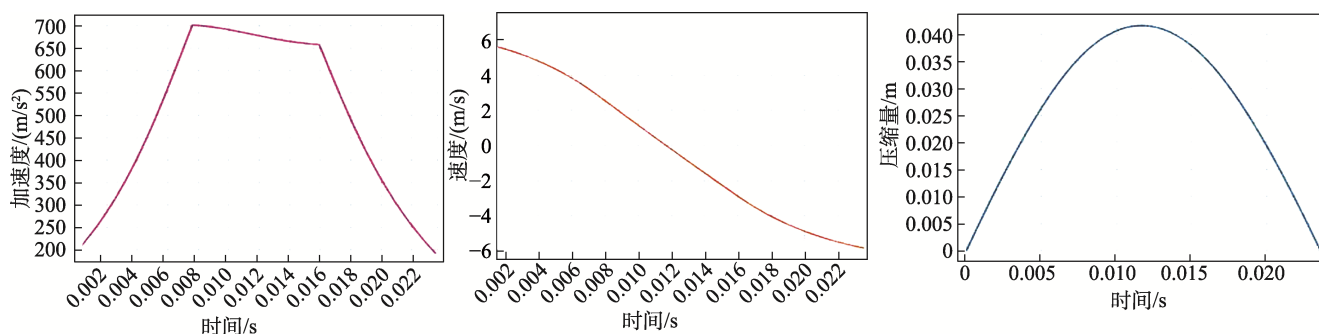


图 8 碰撞过程头部速度加速度和气胞压缩量的仿真结果

Fig.8 Results of simulation analysis of head acceleration velocity and air-cell compression amount during collision

4 充气式壁面汽车内饰设计的概念意象模型

根据前面的阐述和理论推导, 针对自动驾驶汽车 L4-L5 级的情境, 在汽车内室中呈现气胞式壁面结构的设计概念, 并对新型内室概念的视觉效果和相应的乘员保护机制进行评估。单元气胞的形态可以是规则形态或有机任意形态, 规则形态包括三角形、四边形、六边形等。气胞的连接方式可以在气胞背面通过磁性、负压吸盘、尼龙粘贴等方式与基体织物相连。可以保留若干单元镂空赋予类似窗户的功能, 也可以不改变气胞的形式, 采用透明材料, 同时赋予充气保护

和透明窗户的功能。气胞内室概念设计见图 9, 单元气胞的可能连接方式见图 10。



图 9 气胞内室概念设计

Fig.9 Concept interior design based on inflatable air-cell



单元气胞形态举例

磁扣

吸盘

尼龙粘贴

图 10 单元气胞的可能连接方式

Fig.10 Possible connection method among inflatable air-cells

除了规则形态的单元气胞以外,任意有机形态的单元气胞同样可以构成充气式壁面,如管式形态和多边形形态,大小不一,并且在视觉上显得更加生动,在边界的过渡处理上更具灵活性。两组有机形态充气式壁面内饰的意向性概念图,见图 11—12。

充气式壁面除了作为内饰的侧壁和部分顶棚以

外,还可进一步考虑拓展到座椅和地面,内部的气体压力实行动态可变可控,并可以增加收纳和折叠功能,如图 13 所示。针对未来完全的无人驾驶汽车,再做一个大胆的头脑风暴,整个内饰完全摒弃传统的功能性零部件和操控界面,采用立体的充气式空间,形成“洞穴式”软体内室。当然这个目前只是一种设想。

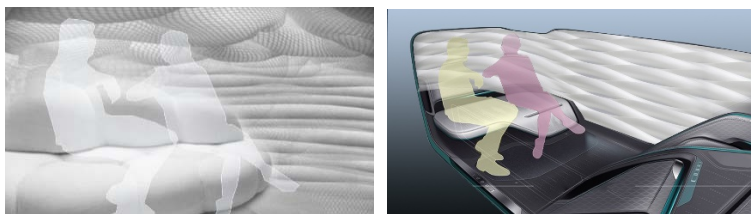


图 11 气胞式壁面结构无人驾驶汽车内室概念意象模型 1

Fig.11 Concept model 1 of autonomous vehicle interior based on inflatable air-cells

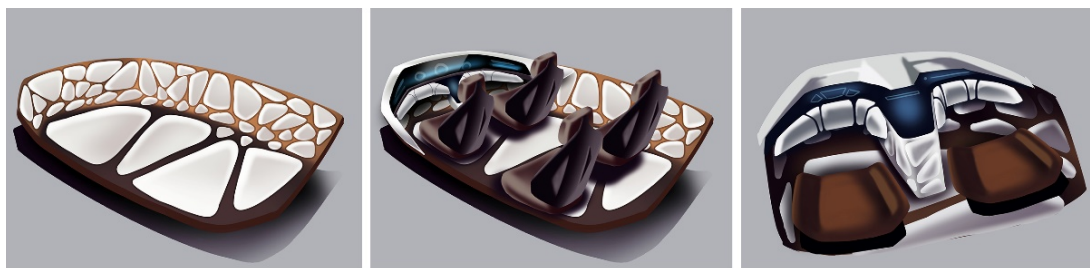


图 12 气胞式壁面结构无人驾驶汽车内室概念意象模型 2

Fig.12 Concept model 2 of autonomous vehicle interior based on inflatable air-cells

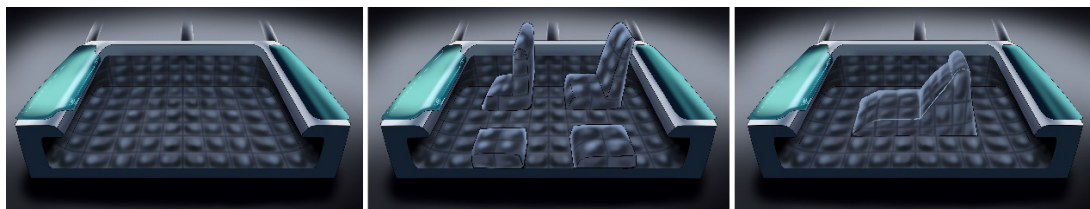


图 13 整体式充气内室概念

Fig.13 Holistic interior concept based on inflatable air-cells

此外,在实现充气式壁面内室对乘员碰撞安全保护的基础上,在充气式壁面结构系统中,通过材料和表面的研究置入其他功能,如信息显示、氛围照明等,这些都会成为未来可持续的研究内容。

5 后续研究

后续将针对充气式壁面汽车内室从工程、材料、人机和造型设计几个方面的内容展开深入研究,具体包括以下几个方面的内容。

1) 充气式壁面结构碰撞响应模型的构建。主要采用理论建模、仿真分析、参数分析与优化设计的方法,将气胞式壁面结构与乘员接触过程抽象为数学模型,探讨相应的结构关键参数与乘员损伤之间的对应关系,探寻乘员损伤规律,揭示详细的基于气胞式壁面结构的乘员保护机制。

2) 充气式壁面结构单元气胞的特征形态及形态

推衍的方法与模式研究。主要通过理论推算、数字建模和视觉评估的方法,将功能法则、几何法则和美学法则进行整合,探讨单元气胞的最佳特征形态,以及形态在二维与三维推演的方法与模式,并采用相关专业软件进行推演效果的数字模拟。二维和三维的形态推衍情形,见图 14—15。

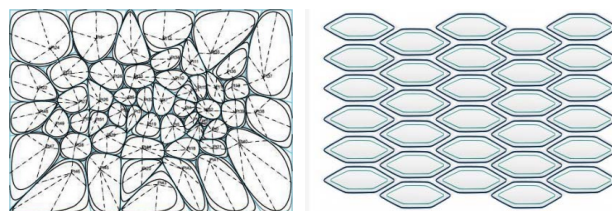


图 14 气胞式壁面结构单元气胞可能的二维形态及平面推演示意图

Fig.14 Illustration of possible 2D form and construction of air-cell in air-cell wall structure

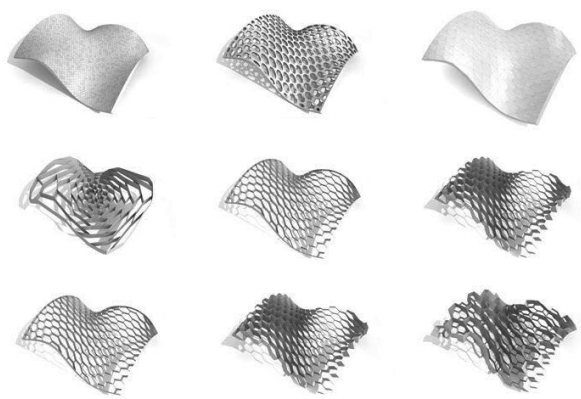


图 15 气囊式壁面结构单元气囊形态的三维曲面推演示意图

Fig.15 Illustration of possible 3D form and construction of air-cell in air-cell wall structure

3) 建立充气式壁面结构汽车内室造型设计和工程设计迭代优化的设计方法。从国内外汽车企业目前流行的内室开发流程来看, 虽然大多都建立了工程与艺术良好的合作模式。但主要按照“分离式”和“串联式”的方式进行, 即艺术造型与工程设计彼此各自开展工作, 只在开发的若干节点进行对接与沟通。笔者

提出建立内室设计中工程与艺术“并联式”“渗透式”的合作机制, 即在内室设计全开发周期, 将工程与艺术有机结合起来, 综合考虑结构、形态、功能的协调性, 实现工程设计和艺术造型的渗透性对接和迭代优化。

4) 对单元气囊的材料、成型方法以及结构工艺进行研究。单元气囊将采用天然纤维增强柔性树脂基复合材料, 笔者协同相关合作单位已进行了这一方面的前期研究。适应单元气囊功能性要求的材料特性首先应满足基本的力学性能, 以及气密性、无毒性等理化性能, 此外还需要符合易于成型的工艺特性。从造型和未来发展的角度看, 增加视觉触觉方面的感官性能和动态显示等特殊交互性能, 可极大提升附加价值。性能归纳如图 16 所示。还将解决单元气囊的气密性以及单元气囊连接方式等工程技术研究问题。对于气密性, 主要通过涂层来解决。对于气囊的连接方式, 鉴于各单元气囊具有独立充气的特点, 无须实现气囊之间的内部连通, 而主要探讨气囊的聚集和它们与背景之间的外部连接方式。将考虑磁性、卡扣、热压(熔)、魔术贴等不同形式, 以及在关键节点部位增加螺栓连接等方式(远离乘员位置)。具体将在项目实施中通过实验进一步比对、完善和优化。

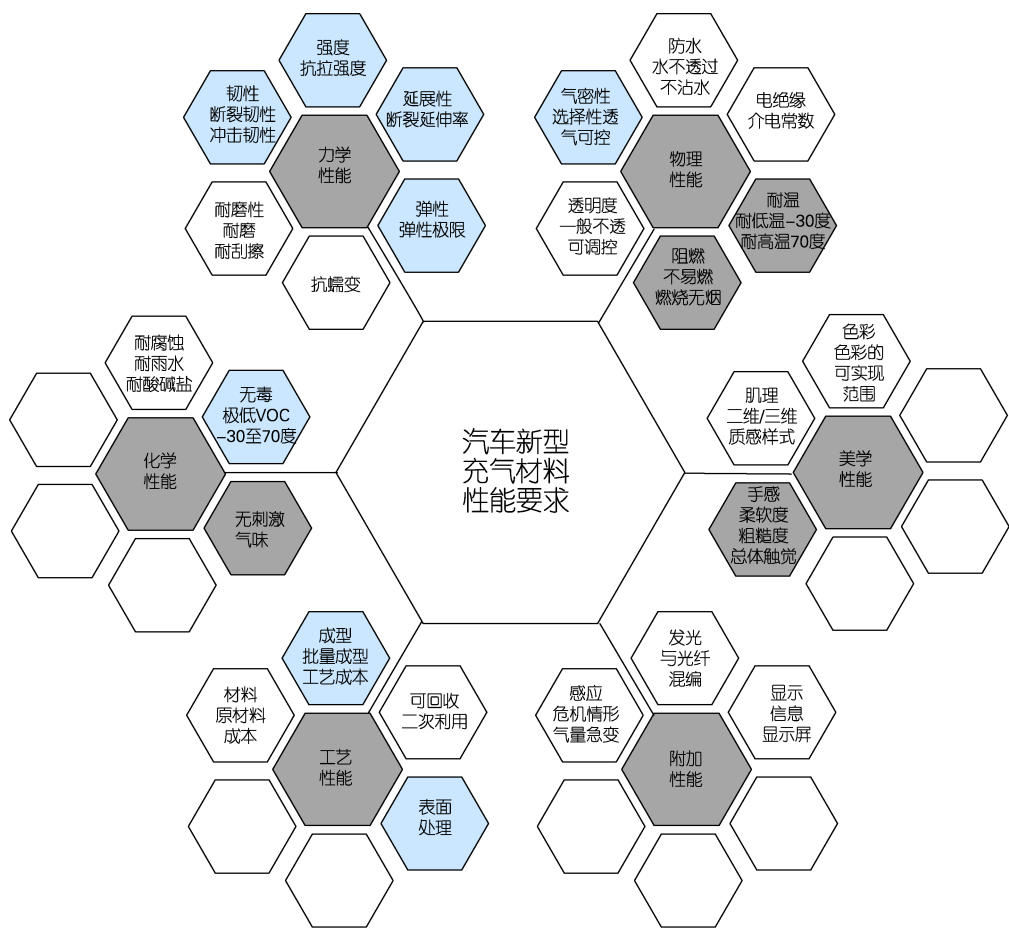


图 16 单元气囊材料需要满足的性能要求

Fig.16 Required properties of materials for air-cell

注: 蓝色标示的是最基本的硬性要求。

5) 以无人驾驶汽车内室设计为例对充气式壁面内室进行原型验证。将在自动驾驶汽车(L4级以上)的情境下,在内室设计中呈现气泡式壁面的实体内室概念,并对乘员保护机制效果和新型内室概念视觉效果进行验证和评估。通过设计视觉表达、数字渲染模型、实体模型呈现气泡式壁面结构内室的概念。采用工程模型通过碰撞实验评估气泡式壁面结构对乘员安全保护机制的有效性。

6 结语

本研究具有明显的造型艺术和工程科学交叉渗透的特点,一方面为乘员安全保护提供了新的思路和机制,另一方面也是汽车内室工业设计新概念的尝试。这一探索将为未来汽车内室设计提供新的思路 and 参考。后续将继续报道相关的研究进展。

参考文献:

- [1] 郝瑞敏. 自动驾驶技术驱动的汽车内饰设计研究[J]. 装饰, 2018(7): 102-105.
HAO Rui-min. Study on Interior Design under the Influence of Automated Driving[J]. Art & Design, 2018(7): 102-105.
- [2] PARIDA S, MALLAVARAPU S, ABANTERIBA S, et al. Seating Postures for Autonomous Driving Secondary Activities[C]//Chen YW, Zimmermann A, Howlett R, et al. Innovation in Medicine and Healthcare Systems, and Multimedia. Singapore: Springer, 2019: 423-434.
- [3] 邱国华, 俞梅. 汽车内外饰设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2019.
QIU Guo-hua, YU Mei. Automotive Interior and Exterior Design. Beijing: China Machine Press. 2019.
- [4] 孙彪, 郑佳琪. 探究智能化背景下汽车内饰设计语言的变革[J]. 艺术与设计(理论), 2019, 2(7): 107-109.
SUN Biao, ZHENG Jia-qi. Exploring the Change of Car Interior Design Language under the Background of Intelligence[J]. Art and Design, 2019, 2(7): 107-109.
- [5] LEE Y H, LIANG C C, CHEN K H. The Influences of Sensory Effects on Car Interior Designs[C]//2019 IEEE Eurasia Conference on IOT, Communication and Engineering (ECICE). Yunlin, Taiwan, China. IEEE, 2019: 47-50.
- [6] 陈俊洁. 基于感性工学的汽车内饰 CMF 设计意象评价研究[J]. 工业设计, 2020(2): 62-63.
CHEN Jun-jie. Research on Sensory Perception of Automotive Interior CMF Design Based on Kansei Engineering. [J]. Industrial Design., 2020(2): 62-63.
- [7] ZHANG Yin-shuai, YU Chun, SHI Yuan-chu. Designing Autonomous Driving HMI System: Interaction Need Insight and Design Tool Study[C]//International Conference on Human-Computer Interaction. Cham: Springer, 2018: 426-433.
- [8] WILLIAMS R F, CROCE M A. Are Airbags Effective in Decreasing Trauma in Auto Accidents?[J]. Advances in Surgery, 2009, 43: 139-145.
- [9] ROKAN M. Effect of Heat on the Properties of Automotive Airbag Materials[D]. Manchester, North West England, UK: The University of Manchester, 2013.
- [10] GLOVER J M, WAYCHOFF M F, CASMAER M, et al. Association between Seatbelt Sign and Internal Injuries in the Contemporary Airbag Era: A Retrospective Cohort Study[J]. The American Journal of Emergency Medicine, 2018, 36(4): 545-550.
- [11] ERPENBECK S P, ROY E, ZIEMBICKI J A et al. A Systematic Review on Airbag-Induced Burns[J]. Journal of Burn Care & Research, 2021, 42(3): 481-487.
- [12] HUBER C D, LEE J B, YANG K H, et al. Head Injuries in Airbag-Equipped Motor Vehicles with Special Emphasis on AIS 1 and 2 Facial and Loss of Consciousness Injuries[J]. Traffic Injury Prevention, 2005, 6(2): 170-174.
- [13] MONKHOUSE S J, KELLY M D. Airbag-Related Chest Wall Burn as a Marker of Underlying Injury: A Case Report[J]. Journal of Medical Case Reports, 2008, 2: 91.
- [14] FERNANDES S C F, ESTEVES J L, SIMOES R. Characteristics and Human Factors of Older Drivers: Improvement Opportunities in Automotive Interior Design[J]. International Journal of Vehicle Design, 2017, 74(3): 167.
- [15] KLINICH K D, MANARY M A. Best Practice Recommendations for Protecting Child Occupants. In: Yogananadan, N., Nahum, A., Melvin, J. (eds) Accidental Injury. Springer, New York, NY. [EB/OL] (2014-11-01) [2022-11-30] https://doi.org/10.1007/978-1-4939-1732-7_23.
- [16] HUANG Yi, ZHOU Qing, ZHANG Xiao-wei, et al. Optimisation Study of Occupant Restraint System Concerning Variations in Occupant Size and Crash Severity in Frontal Collisions[J]. International Journal of Vehicle Safety, 2015, 8(4): 299.
- [17] WANG Xi-jun, ZONG Zhi, ZHAO Yong, et al. A Numerical Study of Passenger Side Airbag Deployment Based on Arbitrary Lagrangian-Eulerian Method[J]. Science China Technological Sciences, 2015, 58(3): 397-404.
- [18] 葛如海, 陈宇航, 洪亮, 等. 侧面多腔室气囊的设计与优化研究[J]. 汽车工程, 2019, 41(11): 1313-1319.
GE Ru-hai, CHEN Yu-hang, HONG Liang, et al. A Research on the Design and Optimization of Multi-Chamber Side Airbag[J]. Automotive Engineering, 2019, 41(11): 1313-1319.
- [19] Ford Motor Company. Ford to License Patented Inflatable Safety Belt Technology to Encourage Expanded Adoption[EB/OL]. (2014-05-28) [2022-11-30]. ford_seatbelt_tech.pdf (autoharvest.org).
- [20] ROUHANA S W, SUNDARARAJAN S, BOARD D, et al. Biomechanical Considerations for Assessing Interac-

- tions of Children and Small Occupants with Inflatable Seat Belts[J]. Stapp Car Crash Journal, 2013, 57: 89-137.
- [21] KHOUZAM R N, AL-MAWED S, FARAH V, et al. Next-Generation Airbags and the Possibility of Negative Outcomes Due to Thoracic Injury[J]. Canadian Journal of Cardiology, 2014, 30(4): 396-404.
- [22] HAN B, SEO J H. Analysis of Vehicle Rollover Using Multibody Dynamics[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2016, 30(2): 797-802.
- [23] 王玮楠. 中国汽车翻滚安全性测试研究及影响分析[J]. 汽车与安全, 2018(4): 96-101.
WANG Wei-nan. Research on the Car's Rollover Test and Impact Analysis[J]. Auto & Safety, 2018(4): 96-101.
- [24] LIU Chang-ye, LIN Zhi-gui, LV Jun-cheng, et al. Multi-Body Modeling Method for Rollover Using MADYMO[C]//AIP Conference Proceedings. Busan, South Korea. Author(s), 2017.
- [25] 丁海建, 季钰荣, 周会锋. 基于整车试验的前排双假人侧面碰撞工况预研[J]. 上海汽车, 2017(9): 59-62.
DING Hai-jian, JI Yu-rong, ZHOU Hui-feng. Side Impact Pre-Research of Double Dummies in Front-Row Seats Based on Vehicle Test[J]. Shanghai Auto, 2017(9): 59-62.
- [26] 贾宏椿. 基于小偏置碰撞的微型面包车驾驶员损伤分析[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2019.
JIA Hong-chun. Injury Analysis of Minivan Driver Based on Small Frontal Overlap Crash[D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2019.
- [27] SHERWOOD C P, NOLAN J M, ZUBY D S. Characteristics of Small Overlap Crashes[C]. Proceedings of the 21th International Tech Conf on the Enhanced Safety of Vehicles. Germany: 2009(4): 598-604.
- [28] JIANG Cheng-yue, WANG Ke, CUI Dong, et al. Study on the Relationship between Intrusion Velocity and Occupant Injury of Side Impact[C]//2017 9th International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA). Changsha, China. IEEE, 2017: 324-326.
- [29] 张俊南. 小偏置碰撞中膝盖-大腿-髋部伤害风险解析[J]. 北京汽车, 2020(5): 1-7, 27.
ZHANG Jun-nan. Analysis of Knee-Thigh-Hip Injury Criteria in Small Overlap Frontal Impact[J]. Beijing Automotive Engineering, 2020(5): 1-7, 27.
- [30] 张埔. 基于汽车翻滚安全的多刚体仿真方法研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2018.
ZHANG Bu. Research on Multi-body Simulation Method for Vehicle Rollover Safety[D]. Changsha: Hunan University, 2018.
- [31] ZHANG Song-fei, BEI Shao-yi, LI Bo, et al. Overview of Car Rollover System Development[C]//Proceedings of the 2018 International Conference on Mechanical, Electrical, Electronic Engineering & Science (MEEES 2018). Chongqing, China. Paris, France: Atlantis Press, 2018.
- [32] TARKO A, HALL T, ROMERO M, et al. Evaluating the Rollover Propensity of Trucks—A Roundabout Example[J]. Accident Analysis & Prevention, 2016, 91: 127-134.
- [33] 陈慧. 重大伤亡事故人车物理行为的影响机理研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
CHEN Hui. Research on the Influence Mechanism of Human and Vehicle Physical Behavior of Major Casualties[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
- [34] 黄硕. 车辆翻滚姿态预测及乘员约束系统开发的研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2017.
HUANG Shuo. Prediction on Vehicle Rollover Kinematics Posture and Research on Occupant Restraint System Development[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2017.
- [35] ZHANG Yan, QIAN Yu-bin, SONG Jiu-zhi, et al. Simulation and Optimization of Vehicle Side Airbag[C]//2017 International Conference on Computer Technology, Electronics and Communication (ICCTEC). Dalian, China. IEEE, 2019: 136-139.
- [36] 周英杰, 李华香, 黄耀东, 等. 国内市场乘用车 25% 偏置碰撞性能现状及提升策略研究[C]//2020 中国汽车工程学会年会论文集(4). 上海, 2020: 513-519.
ZHOU Ying-jie, LI Hua-xiang, HUANG Yao-dong, et al. Current Situation of 25% Offset Collision Performance of Domestic Passenger Vehicles and Its Improvement Strategies[C]//2020 Collected Papers of Annual Conference of China Society of Automotive Engineers(4). Shanghai, 2020: 513-519.
- [37] UMALE S, HAUSCHILD H, HUMM J, et al. Effectiveness of Center-Mounted Airbag in Far-Side Impacts Based on THOR Sled Tests[J]. Traffic Injury Prevention, 2019, 20(7): 726-731.
- [38] FADL S A, SANDSTROM C K. Pattern Recognition: A Mechanism-Based Approach to Injury Detection after Motor Vehicle Collisions[J]. Radiographics: A Review Publication of the Radiological Society of North America, Inc, 2019, 39(3): 857-876.
- [39] BU De-jun, HU Xiao, WANG Chen. Analysis and Study on Accident Characteristics in Small-overlap Frontal Impacts[C]. Changsha: Proceedings of International Conference on Automotive and Transportation Safety. 2019.
- [40] 张前斌, 邵凡军, 周澄靖. 小偏置碰撞车体设计策略研究[C]//2020 中国汽车工程学会年会论文集(4). 上海, 2020: 504-508.
ZHANG Qian-bin, TAI Fan-jun, ZHOU Cheng-jing. Design Strategies for Vehicle Body Subject to Small Offset Collision[C]//2020 Collected Papers of Annual Conference of China Society of Automotive Engineers (4). Shanghai, 2020: 504-508.
- [41] 何蓉. 汽车侧面帘式气囊的研究[D]. 成都: 西华大学, 2014.
HE Rong. Research on Automotive Side Curtain Airbag[D]. Chengdu: Xihua University, 2014.
- [42] 张君媛. 汽车碰撞车体与乘员约束系统的参数设计方法[M]. 北京: 科学出版社, 2018.

- ZHANG Jun-yuan. Parametric Design Method for Structure and Occupant Restraint System in Vehicle Crash. [M]. Beijing: Science Press, 2018.
- [43] 周青, 姬佩君, 黄毅, 等. 未来交通事故场景中乘员智能保护的挑战与机遇[J]. 汽车安全与节能学报, 2017, 8(4): 333-350.
- ZHOU Qing, JI Pei-jun, HUANG Yi, et al. Challenges and Opportunities of Smart Occupant Protection Against Motor Vehicle Collision Accidents in Future Traffic Environment[J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2017, 8(4): 333-350.
- [44] JI Pei-jun, HUANG Yi, ZHOU Qing. Mechanisms of Using Knee Bolster to Control Kinematical Motion of Occupant in Reclined Posture for Lowering Injury Risk[J]. International Journal of Crashworthiness, 2017, 22(4): 415-424.
- [45] MCMURRY T L, POPLIN G S, SHAW G, et al. Crash Safety Concerns for Out-of-Position Occupant Postures: A Look Toward Safety in Highly Automated Vehicles[J]. Traffic Injury Prevention, 2018, 19(6): 582-587.
- [46] NAKAYAMA K, SAKANE M, EJIMA S, et al. Simultaneous Three-Dimensional Analysis of Cervical Spine Kinematics in the Axial and Sagittal Views during a Simulated Frontal Impact: Differences between Tensed and Relaxed States[J]. Asian Spine Journal, 2015, 9(6): 876-883.
- [47] SMITH D. Life Support: Passive Safety Equipment Will Need to be Redesigned if the more Flexible and Leisure-Focused Interiors Envisaged for Autonomous Vehicles are to Become Reality[EB/OL]. (2016-06) [2022-11-20]. <http://viewer.zmags.com/publication/9c0fa42e#/9c0fa42e/36>.
- [48] FAROOQ I S M, JARADI D M, FARUQUE M O. Vehicle Table with Deployable Airbag: US20170259772[P]. 2017-09-14.
- [49] MIT and BMW Co-operated in Research and Development of 3D Printed Elastic Inflatable Materials[EB/OL]. (2018-05-30) [2022-11-25]. https://www.sohu.com/a/233492097_274912.
- [50] SUBIT D, VÉZIN P, LAPORTE S, et al. Will Automated Driving Technologies Make Today's Effective Restraint Systems Obsolete?[J]. American Journal of Public Health, 2017, 107(10): 1590-1592.
- [51] JOSEF MÍK A, BOUCHNER B P. Safety of Crews of Autonomous Cars[C]//2020 Smart City Symposium Prague (SCSP). Prague, Czech Republic. IEEE, 2020: 1-5.

责任编辑: 马梦遥

(上接第 94 页)

- [126] TIJOU A, RICHARD E, RICHARD P. Using Olfactive Virtual Environments for Learning Organic Molecules[C]//PAN Z, AYLETT R, DIENER H, et al. Technologies for E-Learning and Digital Entertainment. Berlin, Heidelberg: Springer, 2006.
- [127] ULLRICH S, KUHLEN T. Haptic Palpation for Medical Simulation in Virtual Environments[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2012, 18(4): 617-625.
- [128] SCHÖNBORN K J, BIVALL P, TIBELL L A E. Exploring Relationships Between Students' Interaction and Learning with a Haptic Virtual Biomolecular Model[J]. Computers & Education, 2011, 57(3): 2095-2105.
- [129] EID M A, MANSOUR M, EL SADDIK A H, et al. A Haptic Multimedia Handwriting Learning System[C]//Proceedings of the international workshop on Educational multimedia and multimedia education. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2007.
- [130] VI C T, ABLART D, GATTI E, et al. Not Just Seeing, But Also Feeling Art: Mid-Air Haptic Experiences Integrated in A Multisensory Art Exhibition[J]. International Journal of Human-Computer Studies, 2017, 108: 1-14.
- [131] KWOK R C W, CHENG S H, IP H HS, et al. Design of Affectively Evocative Smart Ambient Media for Learning[C]//Proceedings of the 2009 workshop on Ambient media computing. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2009.
- [132] SMITH D G, STANDING L, DE MAN A. Verbal Memory Elicited by Ambient Odor[J]. Perceptual and Motor Skills, 1992, 74(2): 339-343.
- [133] BAIENSON J N, BEALL A C, LOOMIS J, et al. Transformed Social Interaction: Decoupling Representation from Behavior and Form in Collaborative Virtual Environments[J]. Presence: Teleoperators and Virtual Environments, 2004, 13(4): 428-441.
- [134] LIU P, STEPANOVA E R, KITSON A, et al. Virtual Transcendent Dream: Empowering People Through Embodied Flying in Virtual Reality[C]//Proceedings of the 2022 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2022.

责任编辑: 马梦遥