doi:10.11918/j.issn.0367-6234.2016.03.022

客车侧翻乘员防护座椅系统

陈吉清[1,2], 黄成杰[1,2], 兰凤崇[1,2]

(1.华南理工大学 机械与汽车工程学院,510640 广州; 2. 广东省汽车工程重点实验室(华南理工大学), 510640 广州)

摘 要: 为提高客车侧翻事故中对乘员的保护能力,减少或避免乘员损伤,根据客车侧翻中乘员的运动状态、损伤机理和损伤程度评价,提出了具有主动倾斜约束的 ARS(active-tilting restraint system)安全座椅系统. 结合 ECE R66 法规,建立了车身段结构-约束系统-乘员组合有限元模型,计算分析了客车侧翻时座椅约束系统对乘员不同运动行为状态下的乘员损伤和防护作用. 与原座椅系统的对比分析可知,ARS 座椅在客车侧翻时有效地约束了乘员的运动轨迹确保其在生存空间内,避免了被撞击侧乘员超出生存空间而受到损伤,且乘员的头部和胸部等损伤指标 HIC(head injury criteria)和 TTI(thoracic trauma index)均得到有效改善. 研究结果表明:ARS 座椅在客车侧翻中施加相对于翻转运动的回正作用能有效保证乘员的生存空间,同时经约束客车乘员的运动状态提高了其损伤防护能力.

关键词: 客车结构; 侧翻; 人体损伤; 生存空间; 约束系统; ARS 座椅

中图分类号: U463.82 **文献标志码**: A **文章编号**: 0367-6234(2016)03-131-07

Occupant protection seat system of coach rollover

CHEN Jiqing[1,2], HUANG Chengjie[1,2], LAN Fengchong[1,2]

(1.School of Mechanical & Automotive Engineering, South China University of Technology, 510640 Guangzhou, China;
2.Guangdong Provincial Key Laboratory of Automotive Engineering(South China University of Technology),510640 Guangzhou, China)

Abstract: In order to improve the occupant protection in coach rollover accident to reduce or avoid injury of occupants, according to the occupant's body motion behaviors, injury mechanism and injury level, an ARS (active-tilting restraint system) safty seat is originally proposed. A compound finite element model (FEM) combining coach body segmental structure, restraint system and occupant is developed via the items of ECE R66 to analyze and realize different occupant injury protection capability of the two kinds of seat restraint systems, with and without the ARS. The comparative calculation and analysis results express that during coach rollover the ARS seat effectively guarantees occupant motion within residual space, avoiding occupant body impact side going beyond it to be injured; and making HIC (head injury criteria) and TTI(thoracic trauma index) improved. The research concludes that the ARS seat can keep the occupants within the residual space preventing from impacting coach body by initiative pulling back against rollover to restrain the body's motion, and enhance occupant protection of coach body.

Keywords: coach body structure; rollover; occupant injury; residual space; restraint system; ARS seat

2010—2013 年期间,客车侧翻事故每年造成的人员死亡人数分别约占客车事故死亡人数的 31%、35%、32%和 39%,而侧翻事故造成的人员受伤人数分别约占客车事故受伤人数的 48%、47%、42%和 46%. 客车侧翻是速度快、持续时间短的碰撞事故,乘员在事故中没有自主防护能力. 即使在使用安全带的条件下,大变形的车身依然会挤压到部分乘员的头部和躯干,对其安全造成危害[1]. 可见客车在侧翻情况下对乘客的保护作用有限,提高乘员保护能力是当下客车安全的研究重点. 近年来,客车侧翻碰撞问题在国内外受到较大关注,欧洲和美国分别颁发法规用于评价客车的质量. 众多专家学者和研究机构根据法规对客车的侧翻安全性进行实验研究与仿真分析,探索碰撞过程中车身的力学行为与变形机理. 欧洲"提升客车乘员安全性"项目[2]在这些方面做得最为全面和深入. 为了减少侧翻时车身的变形,通过在车身上应用复合材料、改进客车局部结构等途径提高了车身的侧翻耐撞性. 其中 Ko

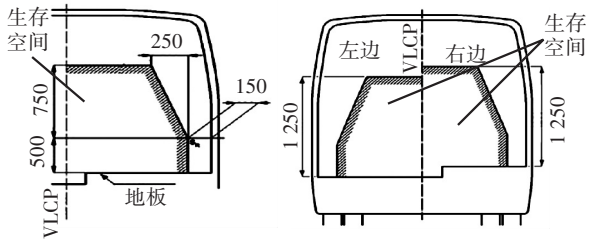
收稿日期: 2014-07-01.
基金项目: 国家自然科学基金(51375170); 广东省科技计划项目(2014B010106002;2015A030313213).
作者简介: 陈吉清(1966—),女,教授,博士生导师;
兰凤崇(1959—),男,教授,博士生导师.
通信作者: 兰凤崇,fclan@scut.edu.cn.

等[3]为了研究新型材料车身结构的耐撞性,将蜂窝铝和玻璃纤维组成的三明治结构应用到了低地板客车上,减少了碰撞时的车身整体变形;郜永刚等[4]为了研究客车的耐撞性,通过仿真计算分析出车身结构变形过大的局部区域,并针对该区域提出了车身结构优化方案;李毅[5]为了改善某型客车的侧翻安全性,通过仿真分析和试验验证研究了不同客车上部结构形式对侧翻耐撞性的影响;Guler 等[6]研究了不同的安全带使用条件下不同位置乘客在侧翻时受伤的风险程度,发现乘员约束系统对乘客的保护作用很显著. 但是与乘用车相比,客车的车体大、质量大且重心高,侧翻事故频发,没有充足的吸能变形区. 这些因素对客车的乘员防护能力提出了要求. 为此欧盟 ECE R66 法规[7]提出了生存空间概念,在侧翻的过程中生存空间不受侵入是客车侧翻安全性的重要指标. 然而,在事故过程中乘员的运动轨迹不可避免地超出了生存空间,原因是乘员有向侧围运动的惯性,并且两点式安全带对乘员头部和躯干的约束效果有限[1]. 因此,研究在现有客车车身设计水平和制造工艺条件下,通过改善乘员约束系统的性能与功能,减低乘员在侧翻过程中的受伤风险,具有重要意义. 本文针对客车座椅的功能结构和侧翻防护能力不足的问题,提出了结构可靠、便于安装的新型安全座椅——ARS 座椅. 与传统客车座椅相比 ARS 座椅可以在客车侧翻时主动向过道侧倾倒,保护乘员远离撞击区域.

1 客车侧翻乘员损伤机理

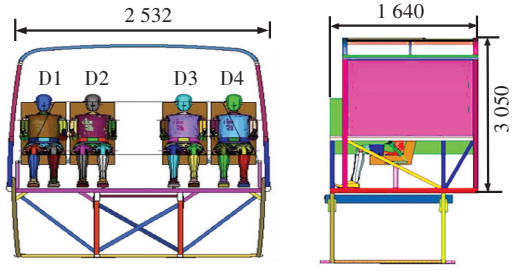
1.1 车身-约束系统-乘员组合有限元模型

客车车身段能有效反映侧翻过程中车身的力学行为与乘员保护能力. 欧盟 ECE R66 法规规定,在客车侧翻安全性研究中,车身段与整车的研究效果是等价的,法规提出的生存空间,如图 1 所示. 本文以客车车身段为研究对象,建立车身段有限元模型并构建生存空间,如图 2 所示. 车身段截取于整车中部,由两个环形结构组成,当中包含有 4 个座椅,车身段结构可分为顶盖、地板、底架和侧围,长宽高分别为 1 640、2 532、3 050 mm,有限元模型的形状、几何尺寸、材料和连接方式均与实车保持一致. 采用壳单元进行网格划分,模型主要由四边形单元和少量的三角形单元组成,其中四边形单元 47 836 个,三角形单元 120 个,刚性单元 354 个,所有的焊接关系通过共节点和刚性连接来模拟,不考虑焊点失效. 此车身段结构的模型已在试验中得到验证[1],通过车身段制造和试验考察车身段在侧翻过程中生存空间的相对侵入量和车身上部结构截面对角线的相对变形量(见图 3). 仿真分析运用 Ls-Dyna 求解器,分析结果与侧翻试验结果的数据曲线如图 4、5 所示,曲线的形状、趋势和峰值等方面均有良好的相符性,验证了有限元模型的仿真精度. 生存空间侵入量的初始值为 231.06 mm,试验和仿真分析均表明生存空间没有被侵入.



(a)生存空间尺寸 (b) 左右不对称结构生存空间

图 1 ECE R66 规定的生存空间(mm)



(a)前方视图 (b) 侧方视图

图 2 车身-约束系统-乘员组合有限元模型(mm)

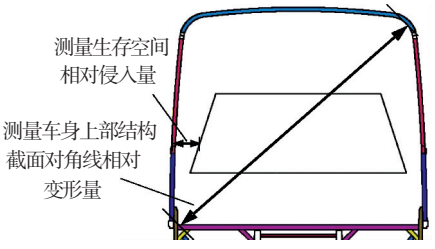


图 3 数据测量位置

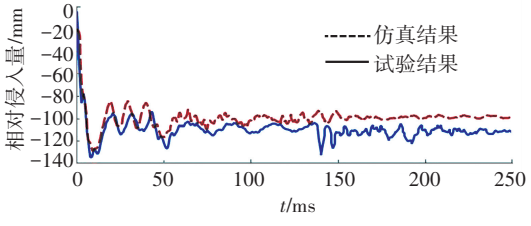


图 4 车身段侧翻过程生存空间相对侵入量

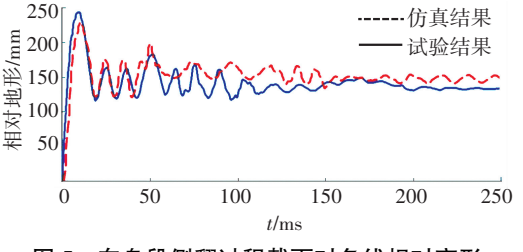


图 5 车身段侧翻过程截面对角线相对变形

为了研究侧翻时人体损伤机理,在车身段模型中加入 4 个假人模型和侧窗玻璃模型以构建成车身-约

束系统-乘员组合模型，如图 2 所示. 假人模型选用 LSTC Hybrid Ⅲ 50th 男性假人，由 4 376 个单元和 7 402 个节点组成，质量 97.13 kg，其中头部6.27 kg，躯干 50.36 kg，腿部 26.56 kg，手部 13.94 kg，对假人进行从左到右编号，分别为 D1、D2、D3 和 D4. 以两点式安全带作为乘员约束系统，安全带由织物构成，单位长度的质量为 0.6 kg，模拟仿真时每条安全带由 516 个三角形壳单元和 327 个节点组成，受拉的应力-应变曲线可以在“MAT-SEATBELT”卡片中设置，如图 6 所示. 侧窗玻璃使用四边形壳单元模拟，密度为 2.5 × 10^3 kg/m^3，弹性模量 72 GPa，泊松比 0.23，厚度为 10 mm. 每面玻璃由 600 个四边形单元和 756 个节点组成，玻璃与侧窗立柱和顶边纵梁之间采用共节点连接.

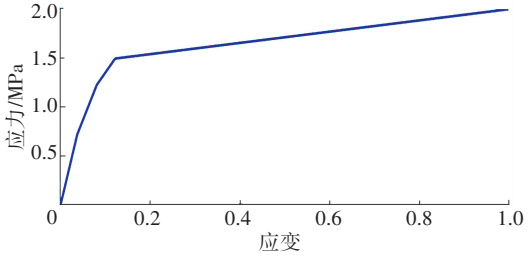


图 6　安全带受拉应力-应变曲线

1.2　乘员损伤过程分析

运用 Ls-Dyna 求解器对车身段有限元模型进行仿真计算. 整个撞击过程持续 500 ms，车身上部结构变形主要集中在首次撞击发生时，位于侧窗立柱与舱门立柱接头处，侧翻过程生存空间没有被侵入，车身结构满足 ECE R66 要求. 然而，靠近撞击侧的 D1 虽然得到约束保护，但头部和躯干右半部分仍暴露在生存空间以外；车身上部结构与地面撞击时发生了大变形，生存空间未受到侵入时乘客已经受到比较严重的损伤，如图 7 所示，乘客 D1 在 t = 145 ms 时刻与车窗发生了撞击，其头部和躯干位于侧窗与生存空间之间.

乘客 D1 与车身撞击的撞击力曲线如图 8 所示. 撞击峰值出现在 145 ms 时刻，峰值为 12 338 N，撞击部位是乘客 D1 的头部和肩部. 此次仿真分析中车窗没有碎裂，但侧翻事故多伴随车身有较大的纵向速度，且车身常与道路的基础设施发生二次撞击，车窗碎裂而乘客被抛出车外或者遭受来自车体外部物体撞击而伤亡的案例多不胜数[8]. 综上所述，乘客在侧翻事故中极易超出生存空间并遭受损伤. 为此，本研究提出一种可以在侧翻事故中主动倾斜的新型安全座椅系统，减少侧翻事故中的乘客损伤.

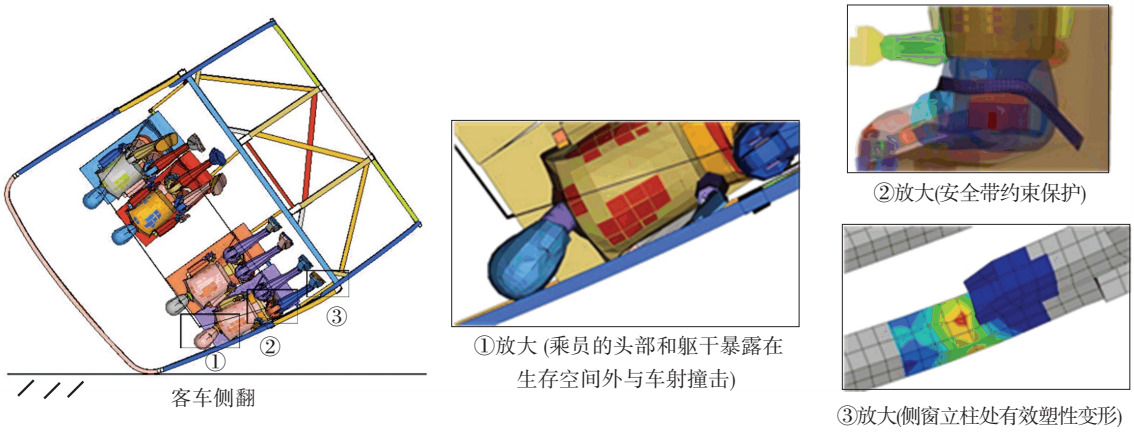
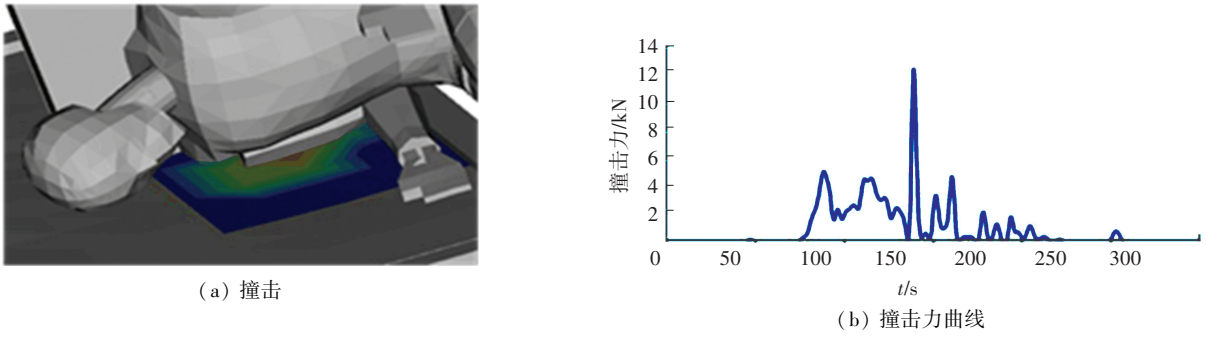


图 7　145 ms 时刻侧翻仿真分析



(a) 撞击　　(b) 撞击力曲线

图 8　乘客 D1 与车身撞击图示

2 安全座椅系统

2.1 系统组成

ARS 座椅由传感器(陀螺仪和加速度计)、电子控制单元以及执行机构组成,工作流程如图 9 所示.

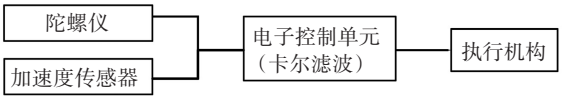
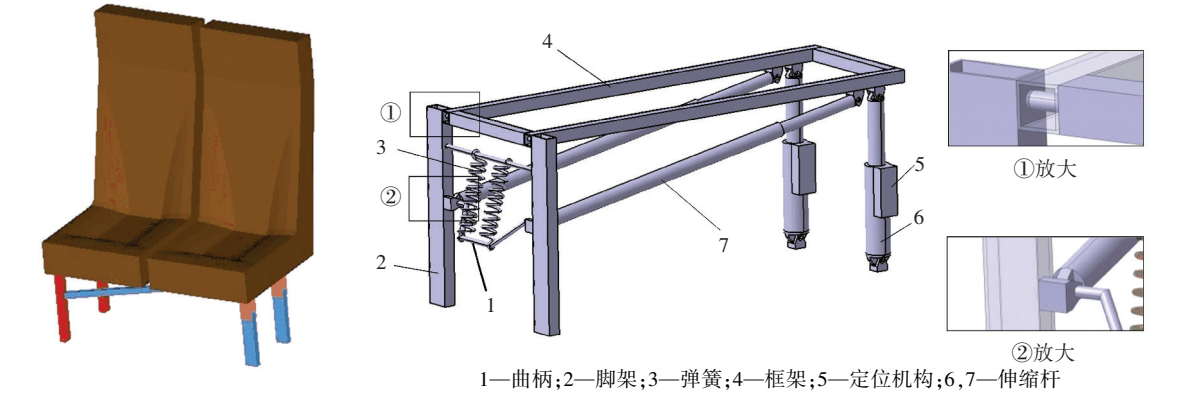


图 9 安全座椅系统组成

陀螺仪和加速度传感器位于客车车身的乘员舱地板处,其中陀螺仪负责测量车身的侧倾角速度,加速度传感器负责测量车身的侧倾角加速度,经过卡尔曼滤波[9]后可以准确计算出实时的车身侧倾角度. 车身侧倾角度达到 45°被视为具有侧倾危险,达到此角度时电子控制单元会发出信号到执行机构,ARS 座椅随即激活.

ARS 座椅系统由座椅和座椅架组成,其中可以倾斜的座椅架是系统的关键部分. 如图 10(b)所示,座椅架由框架、脚架、弹簧、曲柄、伸缩杆、定位机构组成. 其中框架 4 与脚架 2、伸缩杆 6、伸缩杆 7 之间采用铰接;伸缩杆 7 与曲柄 1 焊接,焊接后两者与脚架 2 铰接;定位机构 5 由伺服电机和定位销组成,用于锁止伸缩杆 6 的上杆与下杆;脚架 2 固定于车身地板上,伸缩杆 6 与地板铰接;弹簧 3 连接曲柄和脚架上端的横杆,处于拉伸状态的弹簧为座椅的倾倒提供动力.



1—曲柄;2—脚架;3—弹簧;4—框架;5—定位机构;6,7—伸缩杆

(a)座椅 (b) 座椅架结构

图 10 座椅及座椅架结构

2.2 系统工作原理

座椅架的动力来源于处在拉伸状态的弹簧,弹簧刚度 100 N/mm,预拉伸行程为 50 mm. 定位机构通过定位销锁住伸缩杆,当车身侧倾达到 45°时电控单元控制定位机构中的伺服电机解除伸缩杆上的定位销,处于拉伸状态的弹簧能量得到释放,弹簧的收缩带动曲柄旋转,座椅架在 500 ms 之内倾斜 25°然后停止,因而乘员在客车侧翻时可以远离撞击侧.

用 Adams 动力学仿真软件对座椅架的运动情况进行仿真,仿真结果如图 11 所示. 图中当 t = 0 ms 时即车身侧倾角达到 45°的状态,定位销解除定位,座椅架在弹簧拉力的作用下开始倾斜;当 t = 250 ms 时座椅架倾斜角度为 10 度,图中可以看出伸缩杆有缩短,座椅框架明显倾斜;直到 t = 500 ms 时座椅架的倾斜达到设计角度 25°,倾斜结束. 座椅架的倾斜过程中机械机构未发生干涉,弹簧拉力使框架在 500 ms 内实现 25°的倾斜,仿真结果表明设计满足防护要求.



(a) 0 ms (b) 250 ms (c) 500 ms

图 11 座椅架运动状况

3 安全座椅系统有效性评价

3.1 侧翻仿真分析

使用安全座椅后的侧翻历程如图 12 所示. 碰撞过程仍约持续 500 ms,车身上部结构发生了较大变形,但生存空间并没有被侵入,车身安全性符合 ECE R66 法规要求. 侧翻撞击过程可以分为以下 4 个阶段:1)预备触地阶段. 由于 ARS 座椅系统的作用使得座椅向过道侧倾斜,位置靠近车身侧围的假人 D1 和 D4 的上半身只有一个手臂位于生存空间以外,靠近过道侧的 D2 和 D3 假人没有因为座椅的倾斜而发生接触,ECE R66 法规的保护机制能对乘员安全起到防

护作用. 2)触地阶段. 车身上部结构在短时间内发生了较大的变形,其中撞击侧的侧窗立柱变形最为严重,造成立柱与生存空间的距离急剧减小,但车身刚度足够抵御撞击能量,生存空间没有被侵入. 假人姿态与触地前相比变化不大,但由于惯性作用具有离开座椅并向撞击侧移动的倾向. 3)反弹阶段. 车身触地后出现反弹,材料的弹性恢复使车身上部结构的变形也相应有所减小. 假人由于惯性作用离开座椅向撞击侧运动,不过安全带把它们约束在座椅上. 其中 D1 假人的头部和躯干均有小部分运动到生存空间以外,但 ARS 座椅系统将 D1 的姿态很好地控制住使其未与车身接触. 得益于安全带的作用,其余 3 个假人始终在生存空间内运动,并且头部和躯干等重要部位之间没有发生相互撞击. 4)再次下降阶段. 首次触地大变形后,车身开始再次下降并与地面撞击,直到撞击结束,乘员安全在此阶段并未受到威胁.

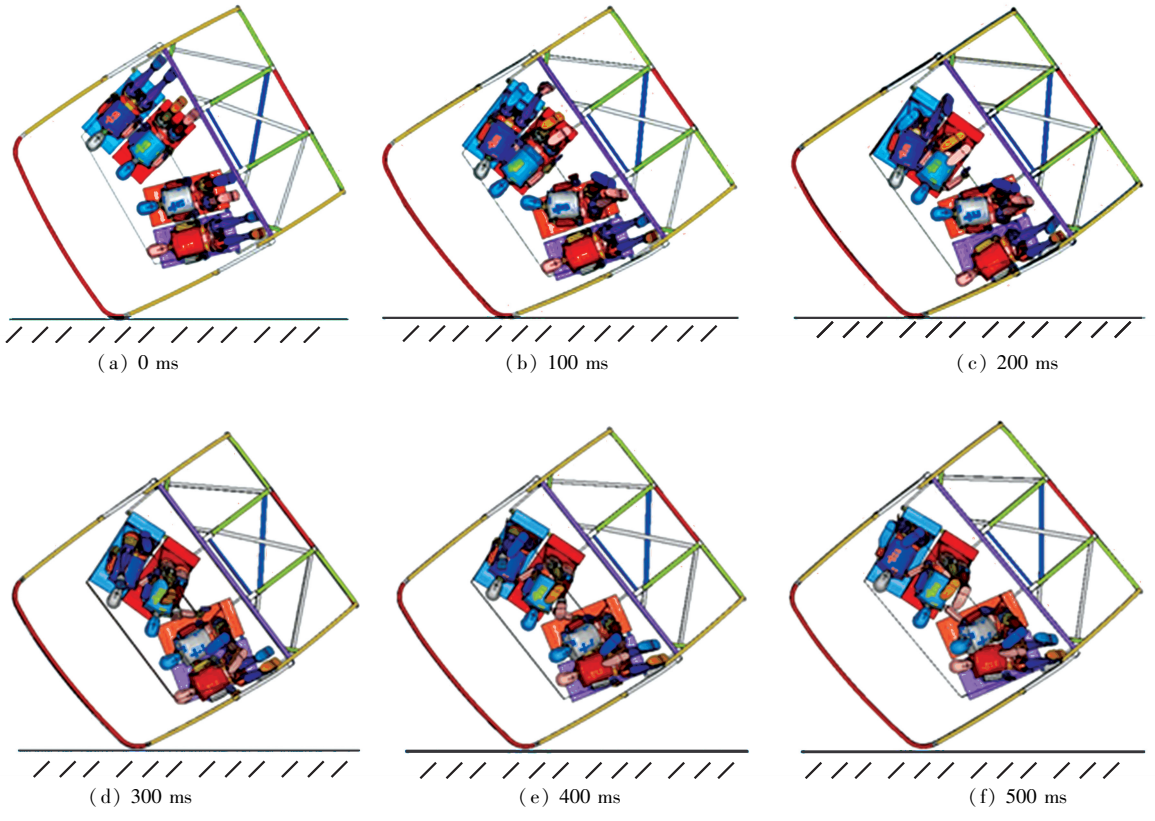


图 12　侧翻历程

在侧翻过程中,4 个假人都有离开座椅向撞击侧移动的趋势,其中 D1 假人在车身大变形时更是有小部分运动到生存空间以外,但总体上 ARS 座椅系统很好地控制住假人的运动姿态,在保证非撞击侧乘员安全的同时,避免了使用原座椅时撞击侧假人与车身的直接接触,与使用原座椅的图 7 相比侧翻安全性得到提升. 需要指出,采用 ARS 座椅后位于过道侧的假人 D2 和 D3 的相对距离与原座椅相比有所减小,但是合理的座椅倾角保证了 D2 和 D3 在整个侧翻过程中都保持着安全距离,其头部和躯干等重要部位并没有因为相对距离的减小而发生接触. 从整个侧翻历程的分析可以得知,ECE R66 法规所规定的生存空间因为 ARS 座椅系统的应用而更加符合乘客防护的规律要求,ARS 座椅系统对乘客保护具有显著作用.

3.2　人体损伤评价

客车侧翻的人体损伤基本上发生在车身与地面碰撞后,人体再与车身撞击的二次碰撞阶段,与人体组织相比车身结构的刚强度很大,人体与车身冲击接触瞬间的机械冲击载荷致使人体损伤. 侧翻时的人体损伤部位主要集中在靠近车身外侧座椅的乘客的头部和胸部,本文将针对不同的安全座椅系统使用情况,对乘客的头部以及胸部损伤进行深入的分析评价,以此评判安全座椅系统的有效性.

1)头部伤害指数(HIC)广泛用于评价人体在事故中的头部损伤程度,计算公式[10]为

$$\mathrm{HIC}=\max(t_2-t_1)\left(\frac{1}{t_2-t_1}\int_{t_1}^{t_2}a(t)\,\mathrm{d}t\right)^{2.5}. \quad (1)$$

式中:t_1,t_2 为使得 HIC 达到最大值的脉冲初始和终止时刻,其间隔不大于 36 ms;$a(t)$ 为合成加速度.

HIC 值达到 1 000 被认为发生 AIS3 级以上的头部损伤风险为 24.4%;HIC 值达到 2 000 被认为发生 AIS3 级以上的头部损伤风险为 93.9%[11]. 因此通常将 HIC=1 000 作为头部损伤的安全界线,在设

计阶段认为 HIC≤700 是安全范围. Hybrid Ⅲ 假人的头部有加速度传感器,通过在仿真分析中获得的头部合成加速度历程曲线,并结合式(3)可以有效计算假人的 HIC 值,其中使用安全座椅和原座椅的假人头部 100~200 ms 时间段的合成加速度历程曲线如图 13~16 所示. 头部合成加速度历程曲线可以很直观地展现出乘员头部的受冲击状况. 在图 13 的 D1 头部合成加速度历程曲线中,未使用安全座椅时合成加速度约在 146 ms 时出现明显的曲线峰值,峰值为 80.63g. 原因是未使用安全座椅系统时乘员 D1 在侧翻事故时头部大部分暴露在生存空间以外,并且在车身上部结构变形时头部与车窗发生碰撞所致,运用式(1)可以计算出原座椅结构情况下乘客 D1 的 HIC 值为 530.47. 而使用了安全座椅以后,避免了乘员与车身之间的二次碰撞,乘员头部绝大部分时间能控制在生存空间以内,因此其头部合成加速度历程曲线没有明显的曲线峰值,最大值为 45.03g, 下降了 44.15%, HIC 值为 206.97, 下降了 60.98%. 可见使用安全座椅系统后,处于靠近撞击侧的乘员 HIC 值下降较为明显. 图 14 所示的 D2 头部合成加速度历程曲线中,两种方案的曲线均未出现明显的峰值,曲线总体呈震荡波动状态,使用原座椅的曲线振幅和频率比使用 ASR 座椅时要大. 原座椅方案的曲线峰值和 HIC 值分别为 31.35g 和 163.51, ARS 座椅方案的曲线峰值和 HIC 值分别为 37.24g 和170.21,两种方案的数据差异不大,可以从一定程度上反映出 D2 位置在客车侧翻相对安全.

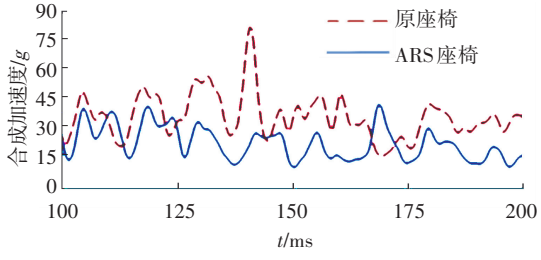


图 13 乘客 D1 头部合成加速度历程曲线

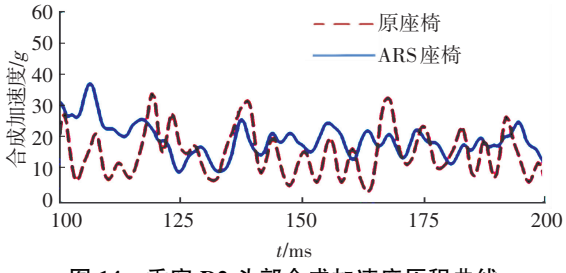


图 14 乘客 D2 头部合成加速度历程曲线

图 15 为 D3 的头部合成加速度历程曲线,两种方案中原座椅在 149 ms 时刻出现了较为明显的波峰,峰值为 53.75g, 而 ARS 座椅方案的合成加速度曲线并未出现较为明显的波峰,峰值出现在 168 ms 处,值为 38.52g, 两种方案的 HIC 值分别为 230.21、172.34. 观察侧翻的仿真历程得知,D3 假人使用原座椅方案在149 ms时刻出现了较为明显的“回拉”现象,即乘员有被抛出的趋势,而安全带及时将其约束在座椅上防止乘员抛出,而使用 ARS 座椅方案时座椅倾角发生了变化,向通道侧倾倒的 D3 假人的在 146 ms 时刻速度方向发生了改变,从而避免了“回拉”. 图 16 为 D4 头部合成加速度历程曲线,两种方案的曲线在146 ms 时均出现了明显的峰值,这是由于乘员位置远离车辆翻转中心,运动的线速度较大,乘员在此时有被抛出的趋势而安全带系统把乘员约束在座椅上所导致的,峰值并排撞击造成的,因而头部合成加速度峰值分别为 51.23g 和 53.68g, HIC 值分别为260.38、265.47. 分析后可以知道,ARS 座椅系统的防护作用对撞击侧位置的乘员有较为明显的保护作用,而远离撞击侧的乘员安全同样也得到保障.

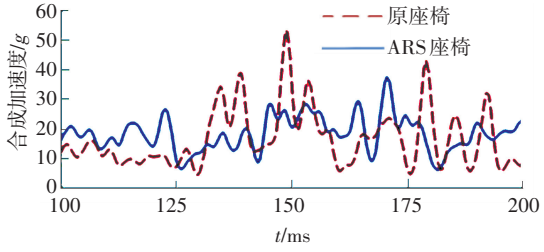


图 15 D3 头部合成加速度历程曲线

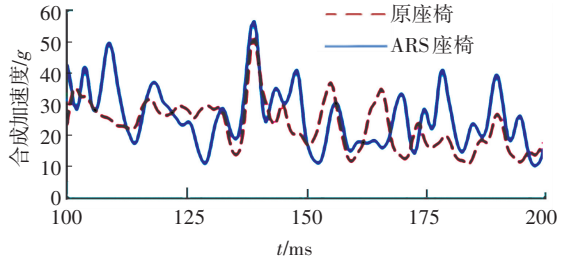


图 16 D4 头部合成加速度历程曲线

2)侧面撞击胸部伤害指数(TTI)是美国联邦汽车安全标准采用的评判乘员侧面撞击损伤的评价标准,是综合考虑了乘员年龄以及体重因素所提出的胸部伤害指标[12-13]. 对于 50 百分位的男性假人,侧面撞击胸部伤害指数通常用 TTI_d 表示,其计算公式[14]为

$$TTI_d = 0.5(G_r + G_{ls}). \tag{2}$$

式中: G_r 为上肋骨或者下肋骨加速度中的较大者; G_{ls} 为下脊骨峰值加速度.

与 HIC 值相似,TTI_d 值与乘员胸部损伤之间有着密切的联系. 美国联邦汽车安全标准 FMVSS214[15] 中规定 TTI_d 值超过 85g 时可以认为乘客较大可能有生命危险. 图 17、18 中的曲线是靠近撞击侧的乘客 D1 的上肋骨加速度和下脊骨加速度在时间 100~200 ms之间的加速度历程曲线,由于远离撞击侧的其

他 3 位乘客的胸部始终没有遭受撞击，因此乘客 D1 是座椅系统乘员分析的关键. 在曲线中读取加速度峰值，并通过式(2)可以计算得出假人在使用安全座椅系统条件下和原座椅条件下的 TTI_d 值. 从曲线可以得知，红色曲线代表的原座椅情况下的加速度峰值明显大于蓝色曲线所代表的使用 ARS 座椅情况，计算结果如表 1 所列.

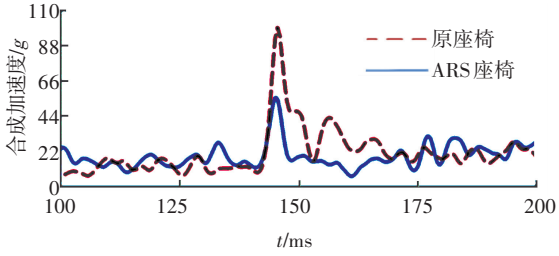


图 17　D1 的 G_r 加速度历程曲线

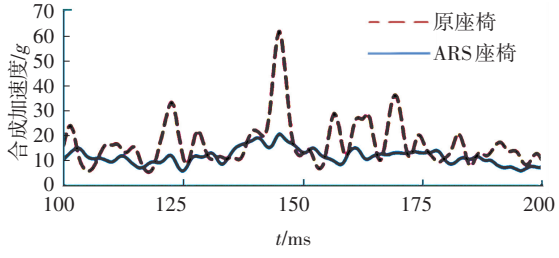


图 18　D1 的 G_{ls} 加速度历程曲线

表 1　假人 D1 侧面撞击胸部伤害指数(TTI_d)

使用条件	G_r/g	G_{ls}/g	TTI_d/g
原座椅	97.27	60.47	78.87
ASR 座椅系统	58.41	23.15	40.78

使用安全座椅后侧面撞击胸部伤害指数(TTI)有明显的下降，下降幅度达到了 48.29%. 虽然车身与座椅原结构和乘员约束系统的配合可以把 TTI_d 值控制在 80g 左右，就是说在侧翻事故中乘员不会有生命危险；但 ASR 座椅系统的介入使 TTI_d 值控制在 40g 左右，TTI_d 值下降幅度较大，可见其可以避免侧翻事故中乘客与客车车身的碰撞，提高了车身安全性和乘客保护能力.

4　结　论

1)在客车车身段结构模型得到实验验证的基础上，按照客车乘员的乘坐状态，建立了车身段结构-约束系统-乘员联合有限元分析模型，实现了对不同工况下及侧翻中客车车身结构的力学响应、生存空间、乘员运动状态与损伤的综合分析和评价.

2)针对现有的客车结构在乘员保护方面存在不足，座椅系统对乘员运动轨迹的限制不足，在侧翻事故中乘员容易超出生存空间，并且尽管在生存空间没被侵入的情况下乘员依然受到损伤，提出了具有主动倾斜约束的 ARS(active-tilting restraint system)安全座椅系统，实现客车侧翻时主动向过道侧倾斜，以保护乘员远离撞击区域，提高客车对乘员的保护能力，减少或避免乘员损伤.

3) 对有无使用 ARS 的座椅系统的对比分析表明，ARS 座椅在侧翻事故分析中，确保不同座位的乘员的生存空间，以头部和胸部损伤指标 HIC 和 TTI 评价的损伤程度得到有效控制，特别地，撞击侧乘员的 HIC 值比无 ARS 的座椅下降了 60.98%，TTI 值比原座椅下降了 48.29%.

参考文献

[1] 陈吉清，黄成杰，师唯佳，等.考虑乘员损伤的客车车身侧翻安全性研究[J]. 汽车工程，2013，35(11)：978-985.

[2] European Commission. ECBOS-enhanced coach and bus occupant safety final report [R]. Graz：Technical University Graz，2006.

[3] KO H，SHIN K，JEON K. Astudy on the crashworthiness and rollover characteristics of low-floor bus made of sandwich composites[J]. Journal of Mechanical Science and Technology，2009，23(10)：2686-2693.

[4] 郜永刚，孙玲玉，周喆.大客车翻滚碰撞性能研究与改进设计[J].机械科学与技术，2005，24(12)：1420-1422.

[5] 李毅.大客车侧翻碰撞安全性设计与优化关键技术研究[D].广州：华南理工大学，2012.

[6] MEHMET A，ALI O，BAYRAM B. Crashworthiness evaluation of an intercity coach against rollover accidents [J]. Int J Heavy Vehicle Systems，2011，18(1)：64-82.

[7] Uniformtechnical prescriptions concerning the approval of large passenger vehicles with regard to the strength of their superstructure：UNECE. 66 [S]. Geneva：Economic Commission of Europe，2006.

[8] PONTUS A，TORBJOM F，ALAN K，et al. Case study：128 injured in rollover coach crashes in Sweden—injury outcome，mechanisms and possible effects of seat belts[J]. Safety Science，2006，44：87-109.

[9] 张杰. 基于 MEMS 陀螺仪和加速度计的动态倾角传感器[J].机械设计与制造，2012，9：141-143.

[10] VERSACE J. A review of the severity index[C]//SAE International 1971. New York：SAE，1971.

[11] GOTZEN L. The abbreviated injury scale—1990 revision [S]. Chicago：Association for the Advancement of Automotive Medicine，1990.

[12] EPPINGER R. Development of dummy and injury index for NHTSA's thoracic side impact protection research program [C]//SAE International 1984. New York：SAE，1984.

[13] MORGAN R. Side impact：the biofidelity of NHTSA's proposed ATD and efficacy of TTI[C]//SAE International 1986. New York：SAE，1986.

[14] 孙凌玉. 车身结构轻量化设计理论、方法与工程实例[M].北京：国防工业出版社，2011.

[15] Sideimpact protection federal register：FMVSS214 [S]. Washington DC：National Highway Traffic Safety Administration，1990.

(编辑　魏希柱)