

Injury Characteristics and Countermeasure of Occupant Protection in Large Angle Sitting Positions

Dayong ZHOU^{1,2}, Weidong LI², Pengxiang WANG², Enyi SHANG², Kun LI², Xiaojiang LV^{1,2*}

¹ Hunan University, State key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body, Changsha, China, 410082

² Geely Automobile Research Institute (Ningbo) Co., Ltd., Zhejiang Key Laboratory of Intelligent Vehicle Comprehensive Defense System, Ningbo, China, 315336
Email: lvxiaojiang@geely.com

Abstract: In order to guide the development of occupant restraint systems in large angle sitting positions, this paper is based on the frontal 100% overlapping rigid barrier collision curve. The injury mechanism of passengers in large angle sitting positions is studied through sliding table tests. The test results show that the main cause of passenger injury in large angle sitting positions is diving, and the main areas of injury are the chest and lower extremity. Subsequently, the impact of knee airbags on large angle seated passengers was analyzed through simulation. The analysis results showed that the energy absorption effect of knee airbags helps to slow down the diving speed of large angle seated passengers and reduce the strength of upper torso flipping. In summary, the countermeasure of the passenger restraint system in a large angle sitting posture need to simultaneously consider the control of passenger motion posture and the absorption of passenger kinetic energy.

Keywords: Automobile safety; Occupant protection; Frontal impact; Zero gravity seat; Large angle sitting posture; THOR-AV-50M Dummy

大角度坐姿乘员损伤特点及应对措施

周大永^{1,2}, 李卫冬², 王鹏翔², 商恩义², 李琨², 吕晓江^{1,2*}

¹ 湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 长沙, 中国, 410082

² 吉利汽车研究院(宁波)有限公司全省智能汽车全域安全重点实验室, 宁波, 中国, 315336
Email: lvxiaojiang@geely.com

摘要: 为了指导大角度坐姿下乘员约束系统开发, 本文基于正面 100% 重叠刚性壁障碰撞波形, 通过滑台试验研究了大角度坐姿下乘员的伤害机理, 试验结果表明大角度坐姿下乘员伤害主要因乘员发生下潜造成, 乘员损伤部位主要是胸部和小腿。随后通过仿真分析了膝部气囊对大角度坐姿乘员的影响, 分析结果表明膝部气囊的吸能效果有助于减缓大角度坐姿乘员下潜速度, 降低上躯干翻转强度。综上所述, 大角度坐姿下乘员约束系统应对措施需要同步考虑乘员运动姿态控制及乘员动能吸收。

关键词: 汽车安全; 乘员保护; 正面碰撞; 零重力座椅; 大角度坐姿; THOR-AV-50M 假人

1 引言

当前, 随着汽车向智能化的快速转型, 配置零重力座椅车型越来越多。零重力座椅可使乘员处于 45°- 65°等大角度坐姿, 提升了智能汽车乘员的舒适性, 但相对于 25°左右标准坐姿, 事故中乘员伤害机理将发生改变, 给乘员约束系统开发带来了新的挑战^[1-8]。目前, 针对大角度坐姿下乘员损伤行业已有部分研究, 如张珺等人研究了水平负向加速度对不同座椅靠背角假人模型颈部损伤的差异^[9]。李琨等人研究了不同坐姿下乘员正面碰撞损伤趋势, 研究发现座椅靠背角度越大, 头部伤害风险越大, 颈部剪切力及轴向拉力随靠背角度增大而逐步增大, 结果表明大角度靠背座椅状态下, 现有乘员约束系统不能有效保护乘员^[10]。

然而目前对于大角度坐姿乘员损伤研究大多集中在仿真, 试验研究较少。THOR-AV-50M (Test device for Human Occupant Restraint-Autonomous Vehicle-50th percentile adult Male, THOR-AV-50M) 假人由 Humanetics 公司在 THOR-50M 假人基础上开发, 可以满足大角度坐姿的乘员损伤评价要求^[1]。本文开展 50 km/h 正面碰撞试验, 基于 THOR-AV-50M 假人研究了大角度坐姿下乘员伤害特点。基于试验研究结果通过仿真进一步研究了膝部气囊对乘员损伤影响, 提出了大角度坐姿乘员保护应对策略。

2 大角度坐姿乘员保护试验研究

某 B 级车进行了 50 km/h 正面碰撞试验, 采用相同减速度并利用 THOR-AV-50M 假人进行座椅滑台和白车身滑台试验。结合大角度坐姿的舒适性、座垫通常角度、座垫气囊和当前安全气囊点火延时而对乘员起到的保护作用, 建立试验矩阵如表 1 所示。通过 Test1~Test3, 研究后排乘员伤害机理; 参考 Test1~Test3 试验中假人的运动姿态, 调整前排正面气囊的点火时间进行试验 Test4 和 Test5, 研究前排乘员侧乘员伤害机理。

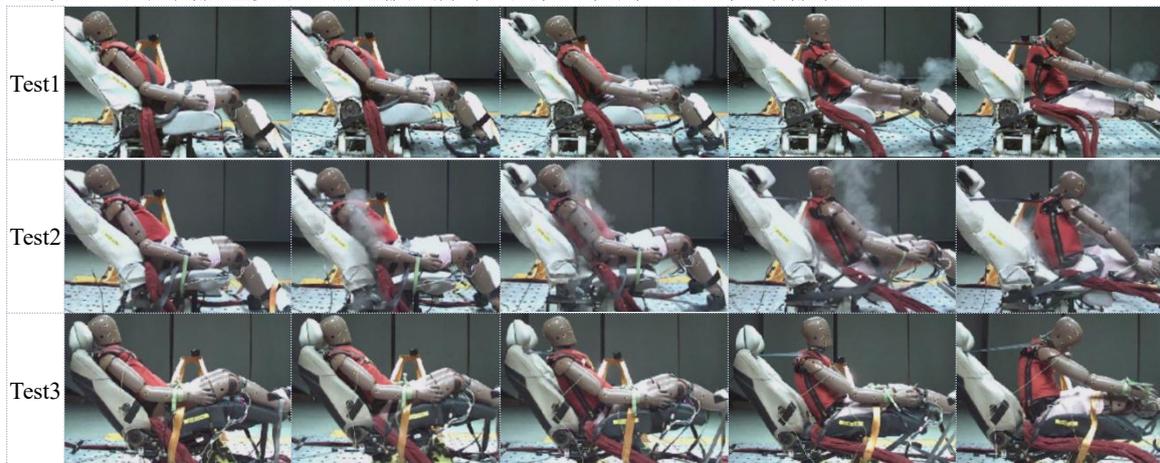
表 1 大角度坐姿滑台试验矩阵

试验类型及编号	座垫角度	靠背角度	点火时刻				
			安全气囊	座垫气囊	安全带	带扣	
座椅滑台	Test1	10°	45°	-	-	第 14ms	第 22ms
	Test2	10°	45°	-	第14ms	第14ms	第22ms
	Test3	27°	45°	-	第14ms	第14ms	第22ms
白车身滑台	Test4	27°	45°	第 30ms	-	第 14ms	-
	Test5	27°	65°	第50ms	-	第14ms	-

试验中, 建立坐标系^[2]: x 向为前后方向, y 向为左右 方向, z 向为上下方向。对于加速度, x 向前为正; y 向右为正; z 向下为正。对于假人颈部载荷, Fx 为头向后胸向前为正, Fy 为头向左胸向右为正, Fz 为受拉为正, My 为头向前胸向后为正, 正向称为弯曲弯矩, 负向称为伸张弯矩。对于胸椎载荷, 胸椎 T12-Fz 为受拉为正, 胸椎 T12-My 为骨盆不动胸向下为正。对于胸部变形量, 受压为负。胸部变形量的 4 个测量点中, 研究只针对最大变形量所在位置的采集结果进行。对于大腿和小腿轴向力 Fz, 受拉为正。

2.1 滑台试验结果分析

试验录像截屏如图 1 所示: 在座椅滑台试验中, 在约 60 ms 前, 假人发生前移, Test1 和 Test2 中前移量大于 Test3。在 80 ms 左右, 假人上半身已向前翻转, 小腿均有抬起。在白车身滑台试验中, 以 B 柱为参照, 在约 60 ms 前, 假人发生前移。在 80 ms 左右, 假人上半身有明显向前翻转。在 100 ms 前后, 气囊气体已充满, 假人头部与气囊发生接触。在大角度坐姿下, 前排假人脚部抬起依然偏高, 小腿水平角度更小。



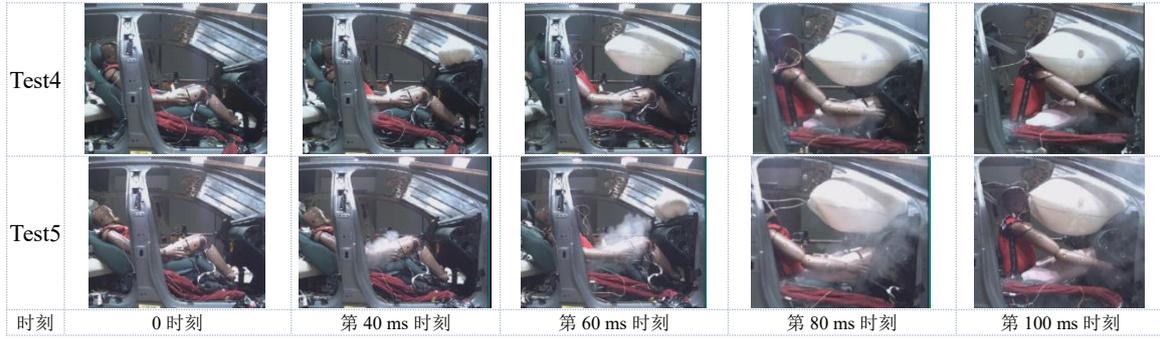


图1 Test1~Test5 录像截屏

结合试验中各数据的有效性、关键程度、相关部位易损伤程度，将 THOR AV 假人一些测量结果汇总见表 2。其中，座椅滑台试验中假人小腿存在着上扬折断风险，故做了适当防护，其数据不关注。所有试验过程中，假人均表现有下潜过程，故增加了胸椎 T12-Fz 数据。

表 2 假人主要测量结果

指标	单位	高性能限值	低性能限值	试验结果					
				Test1	Test2	Test3	Test4	Test5	
头部	HIC(15)	[1]	500	700	338	271	161	304	388
	A3ms head (cum.)	[g]	72	80	58.8	53.0	41.4	55	62
颈部	Upper Neck Shear Force Fx (abs)	[kN]	1.9	3.1	0.71	0.77	0.67	0.43	0.43
	Upper Neck Tension Force Fz+ (abs)	[kN]	2.7	3.3	2.56	2.54	1.94	1.47	1.70
	Upper Neck Extension My- (pure)	[N·m]	42	57	4.0	5.8	6.7	10.4	6.3
胸腰部	Res Chest Deflection MAX of 4	[mm]	35	60	35	38.5	40.9	50.2	44.0
	Thorax Spine T12-Fz	[kN]			8.23	7.87	4.80	2.36	3.73
	L:upper TI				-	-	-	0.23	0.20
	L:lower TI				-	-	-	0.37	0.46
	R:upper TI	[1]	0.4	1.3	-	-	-	0.65	0.90
小腿	R:lower TI				-	-	-	0.58	0.94
	L:Tibia Compression Force LEUP				-	-	-	2.88	2.23
	L:Tibia Compression Force LELO	[kN]	2	8	-	-	-	3.90	3.31
	R:Tibia Compression Force RIUP				-	-	-	1.77	2.19
	R:Tibia Compression Force RILO				-	-	-	2.89	3.24

表 2 中，假人头部性能指标均低于高性能限值的 80%；乘员颈部剪切力、弯矩均低于高性能限值的 25%。因乘员上半身翻起过程中对颈部产生了前向挥鞭现象，颈部张力略偏大，但在正面气囊的作用下，挥鞭损伤将下降 25% 以上；乘员胸部压缩变形量均不低于高性能限值，且表现为假人下潜趋势越明显胸部压缩变形相对越小；前排乘员小腿 TI 值和轴向力均超过高性能限值，Test5 中小腿 TI 值的最大值甚至接近低性能限值，该伤害严重应与小腿抬起后撞向防火墙偏上位置有关；5 次试验中，乘员胸椎 T12-Fz 均超过 2.3 kN，且后排假人可达到 8 kN。目前还没有针对胸椎 T12-Fz 的相关评价，但胸椎受挤压断裂的损伤容限应低于小腿受挤压骨折的损伤容限，故参考小腿轴向力的评价指标，胸椎 T12-Fz 达到 2 kN 以上甚至达到 8 kN 将不会被接受。

5 次试验的结果表明，在大角度坐姿下，乘员的主要伤害集中于胸椎 T12 位置、胸部受压变形，以及小腿损伤，针对零重力座椅开发的约束系统应集中解决该 3 方面的问题。

2.2 乘员损伤机理

2.2.1 后排乘员胸椎 T12-Fz 与胸部变形量之间的关联性研究

后排乘员胸椎 T12-Fz 曲线如图 2 所示，3 次试验中 4 条胸部变形量曲线中最大值所在曲线如图 3 所示，乘员第 60 ms 时刻录像截屏如图 4 所示。3 次试验中，乘员胸椎 T12-Fz 幅值分别为 8.23 kN、7.87 kN 和 4.8 kN，依次递减，但 Test1 和 Test2 曲线和幅值接近，Test3 作用较早，幅值相对 Test1 和 Test2 下降约 40%；最大胸部压缩变形量，Test1 和 Test2 产生在带扣侧胸部上方，Test3 产生在带扣侧胸部下方，且产生在碰撞后期上躯干向前翻转过程

中，结果分别为 35 mm、38.5 mm 和 40.9 mm，依次递增。该结果表明：乘员发生下潜，座垫气囊没有缓解作用，安全带主要用于乘员胸部上方；座垫角度由 10° 提升至 27°，座垫对乘员下潜的阻止作用增强，乘员上躯干翻转早，翻转强度降低。因座垫阻止作用增强，安全带腰带作用缓解，上躯干向前翻转过程中，腰带瞬间上拉对胸部下方产生冲击，造成胸部所受挤压后期加重^[13-16]。

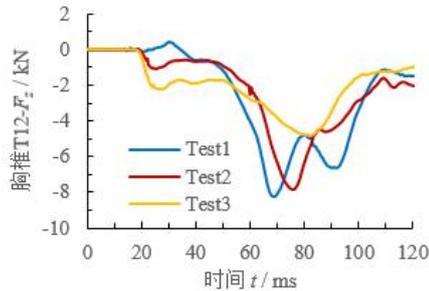


图 2 Test1~Test3 乘员胸椎 T12-Fz

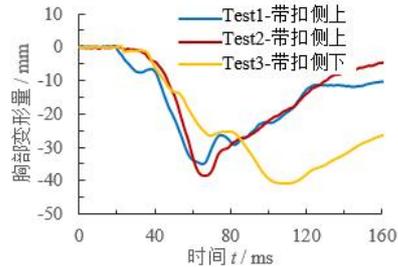


图 3 Test1~Test3 乘员胸部变形量 (MAX)

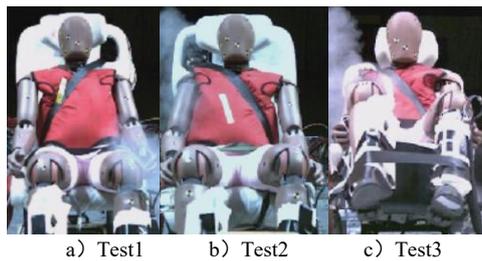


图 4 后排乘员滑台试验 60 ms 时刻录像截屏

2.2.2 前排乘员胸椎 T12-Fz 与胸部变形量之间的关联性研究

前排乘员胸椎 T12-Fz 曲线如图 5 所示，胸部变形量最大值所在曲线如图 6 所示。图 5 中，胸椎 T12-Fz 在产生幅值阶段出现平台化，幅值分别为 2.36 kN 和 3.73 kN，相对后排乘员较低，且随着座椅靠背角度增大而递增。图 6 中，最大压缩变形量均发生在带扣侧胸部下方，分别为 50.2 mm 和 44 mm，相对后排乘员偏高，且随着座椅靠背角度增大而递减。

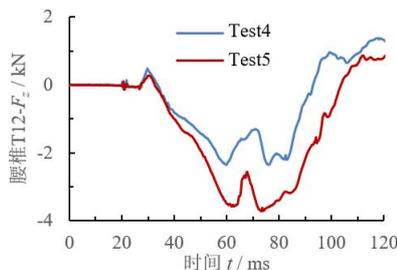


图 5 前排乘员胸椎 T12-Fz

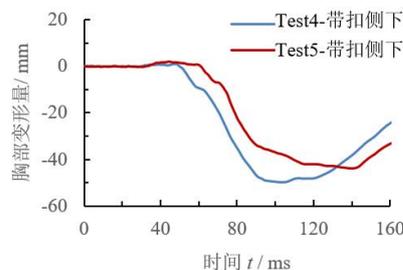


图 6 前排乘员胸部变形量 (MAX)

Test4 和 Test5 中，乘员胸椎 T12-Fz 与大腿轴向力分别如图 7 和图 8 所示。两图中，胸椎 T12-Fz 幅值阶段出现平台化与大腿轴向力波动、受拉转向受压密切相关，即膝部与仪表板接触后上躯干翻转加快，胸椎 T12-Fz 得到缓解，但胸部下方受安全带挤压加重。另外，座垫角度相同，上躯干翻转难度随着靠背角度增大而增加。

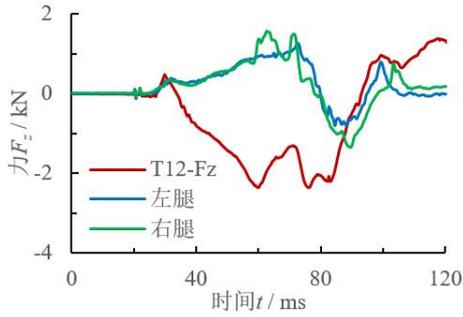


图 7 Test4 乘员胸椎 T12-Fz 与大腿轴向力对比

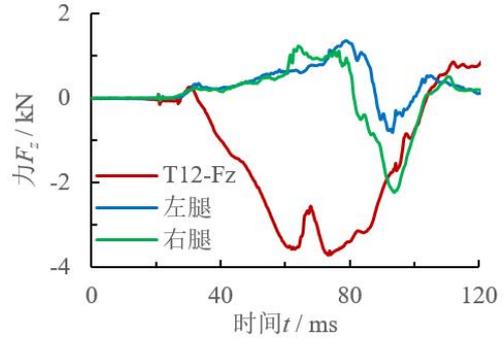


图 8 Test5 中乘员胸椎 T12-Fz 与大腿轴向力对比

3 大角度坐姿乘员保护应对措施

滑台试验表明,大角度坐姿下乘员伤害主要因乘员发生下潜造成,包括胸椎 T12 位置的轴向压缩损伤、小腿抬起与前方严重碰撞损伤、碰撞后期上躯干翻转过程中造成的安全带对胸部挤压损伤。另外,在安全带约束乘员下潜的过程中也会对腹部内器官造成损伤及臀部急停造成的心脏主动脉拉断风险等。通过调节座垫角度、安全带腰带类型、靠背角度等限制乘员下潜时,乘员上躯干翻转提前胸椎 T12-Fz 会相对降低,但胸部压缩变形量会上升,原因是座垫角度等的改变只是调整了乘员运动姿态而未能有效吸收乘员动能,因此,优化大角度坐姿下乘员伤害,在改变乘员运动姿态的同时也应考虑对乘员动能的吸收。

3.1 正面碰撞过程中膝部气囊作用探讨

为了保护正面碰撞事故中正常坐姿乘员的膝部,乘用车上通常配置有膝部气囊(KAB),但事实上,膝部气囊除了可以缓解膝部与仪表板的碰撞强度,同时,也可以提前阻止大腿前移,提前乘员上躯干翻转时间,缓解腰带作用强度,在乘员上躯干向前翻转过程中减轻安全带对乘员胸部的挤压。基于某车型研究膝部气囊的作用,进行了无膝部气囊和带有膝部气囊的滑台对比试验。试验 40 ms 时刻录像截屏如图 9 所示,两次试验的大腿轴向力曲线如图 10 所示。图 9 中,乘员膝部的前移受到了膝部气囊有效限制。图 10 中,在膝部气囊的作用下,乘员的左右大腿在碰撞过程中均表现为受压,该结果将有助于乘员上躯干向前翻转。



图 9 膝部气囊对比试验 40 ms 时刻录像截屏

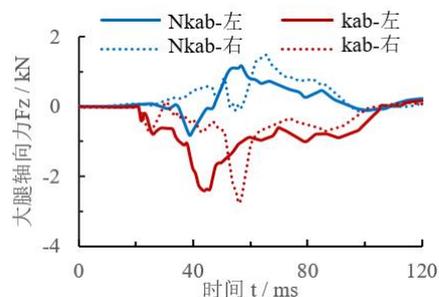


图 10 有无膝部气囊试验大腿轴向力对比

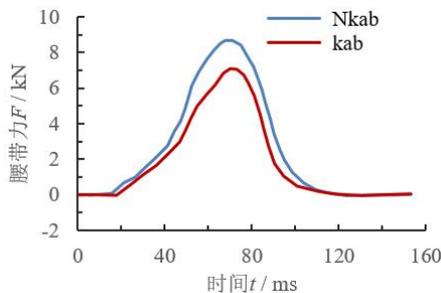


图 11 安全带腰带力对比

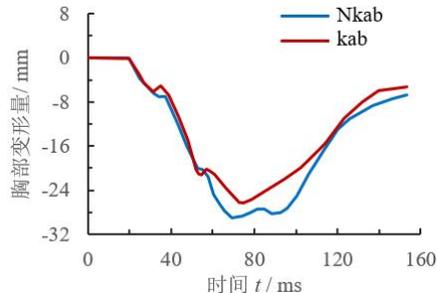


图 12 乘员胸部变形量对比

对比试验中安全带腰带力曲线和胸部变形量曲线分别如图 11 和图 12 所示。两图中，增加膝部气囊后，安全带腰带的作用得到缓解，胸部压缩变形量减小。

在正常坐姿下的正面碰撞中，对于前排乘员，膝部气囊可以约束乘员前移，限制小腿抬起，同时也能够缓解腰带的约束作用，则对大角度坐姿下的前排乘员而言，如果膝部气囊能够适时展开，则应能够缓解对乘员下潜，另外，膝部气囊可以吸收乘员部分动能，缓解上躯干翻转强度，进而减轻胸部所受挤压。

3.2 膝部气囊对大角度坐姿乘员保护仿真

针对前排乘员，进行有膝部气囊和无膝部气囊的 2 次大角度坐姿下的 50 km/h 碰撞的仿真，其中，膝部气囊的包形及展开时间相对正常工况进行了适当调整。仿真动画截屏如图 13 所示，膝部气囊明显地阻止了小腿的前移，并提前了膝部与内饰的接触时刻；上躯干翻转过程发生在 80 ms 前后。

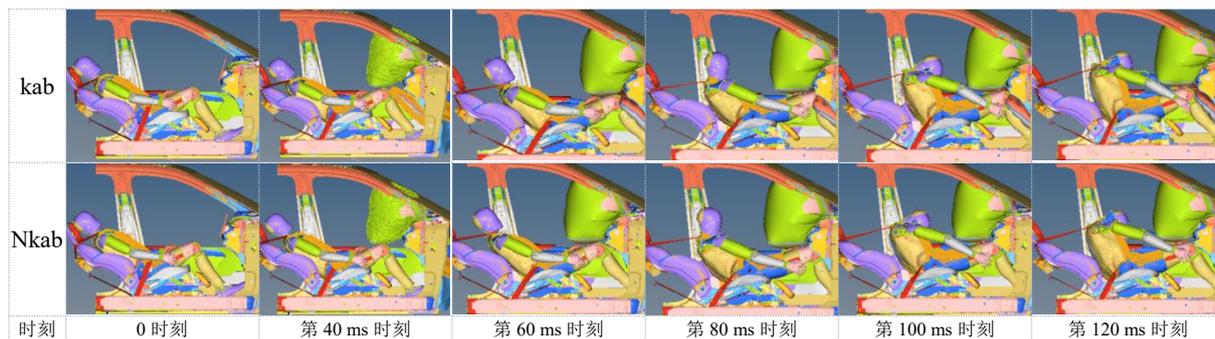
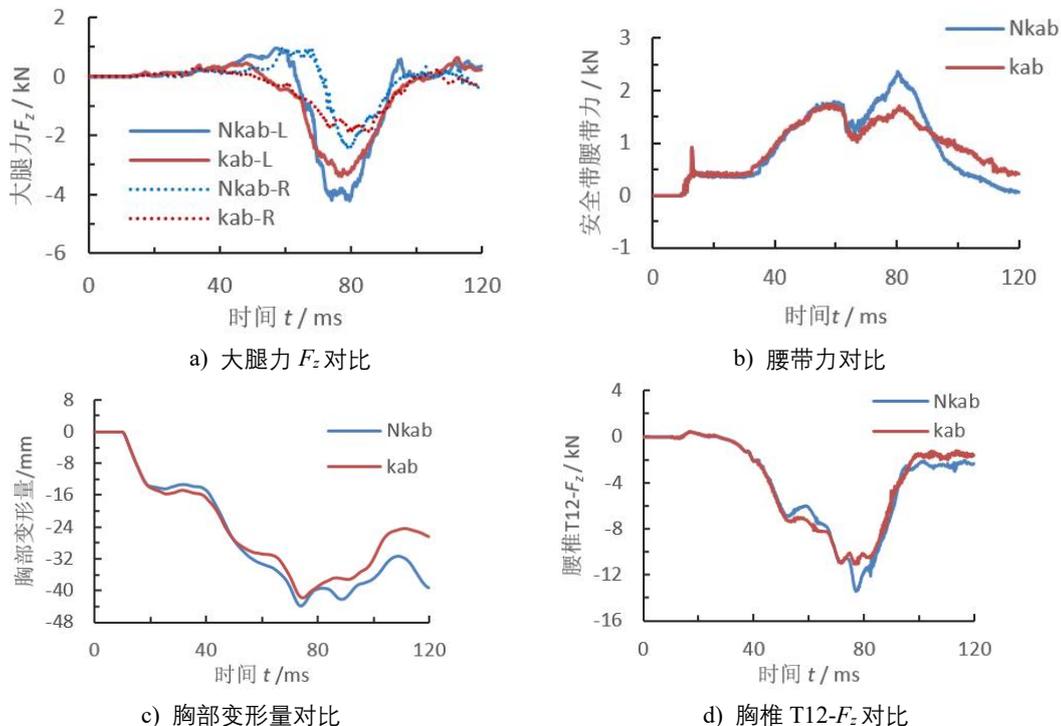
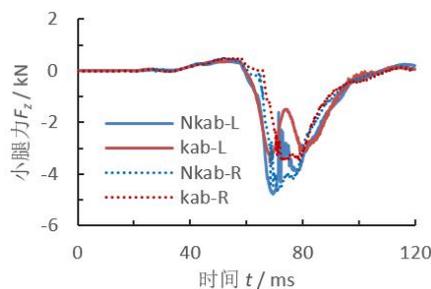


图 13 仿真动画截屏

2 次仿真中胸椎 T12-Fz 等结果对比分别如图 14 所示，在膝部气囊的作用下，大腿受挤压提前了约 20 ms，在上躯干翻起过程中，腰带最大力下降了 33%，胸部变形量下降了 5%，胸椎 T12-Fz 下降了 19%，左右小腿力 Fz 也有小幅下降。两次仿真的结果对比，相对没有膝部气囊的碰撞，配置膝部气囊后乘员的整体伤害均有所下降。





e) 小腿力 F_z 对比

图 14 无/有膝部气囊 2 次仿真结果对比

4 结论

滑台试验表明大角度坐姿下乘员伤害主要因乘员发生下潜造成,包括胸椎 T12 位置的轴向压缩损伤、小腿抬起与前方严重碰撞损伤、碰撞后期上躯干翻转过程中造成的安全带对胸部挤压损伤。通过调节座垫角度、坐垫气囊、靠背角度等限制乘员下潜时,乘员上躯干翻转提前胸椎 T12- F_z 会相对降低,但胸部压缩变形量会上升,原因是座垫角度等的改变只是调整了乘员运动姿态而未能有效吸收乘员动能。通过仿真分析了膝部气囊的作用,结果表明膝部气囊的吸能效果有助于减缓大角度坐姿乘员下潜速度,降低上躯干翻转强度。因此,优化大角度坐姿下乘员伤害,在改变乘员运动姿态的同时也应考虑通过增加膝部气囊等方式吸收乘员动能。

致谢 (Acknowledgement)

浙江省“全省智能汽车全域安全重点实验室”开放基金资助。

参考文献 (References)

- [1] 仲昭浩, 叶万宝, 李丽萍, 道路交通安全视角下自动驾驶的潜在风险与受益, 伤害医学(电子版) 10(02) (2021) 48-53.
- [2] 郁淑聪, 孟健, 郝斌, 基于驾驶员的智能座舱人机工效测评研究, 汽车工程 44(01) (2022) 36-43.
- [3] 周青, 姬佩君, 黄毅, 聂冰冰, 黄媛, 未来交通事故场景中乘员智能保护的挑战与机遇, 汽车安全与节能学报 8(04) (2017) 333-350.
- [4] 何丽, 吴春颖, 彭伟强, 祁志楠, 智能汽车场景下乘员保护虚拟仿真研究, 中国汽车 No.374(05) (2023) 21-27.
- [5] 姬佩君, 均衡约束概念的乘员碰撞保护研究, 清华大学, 2016.
- [6] P. Ji, Y. Huang, Q. Zhou, Mechanisms of using knee bolster to control kinematical motion of occupant in reclined posture for lowering injury risk, International Journal of Crashworthiness 22(4) (2017) 415-424.
- [7] P. Ji, Q. Zhou, Preliminary study of uniform restraint concept for protection of rear-seat occupant under mid and high crash severities, SAE 2016 World Congress and Exhibition, April 12, 2016 - April 14, 2016, SAE International, Detroit, MI, United states, 2016.
- [8] 张程, 乘用车零重力座椅布置及优化设计, 汽车文摘 No.567(04) (2023) 35-39.
- [9] 张琨, 李鸣皋, 水平负向加速度对不同座椅靠背角假人模型颈部损伤的差异, 医用生物力学 38(01) (2023) 71-76.
- [10] 李琨, 刘玉涛, 周大永, 王鹏翔, 祝贺, 吕晓江, 基于 Thor-AV 假人有限元模型的不同坐姿乘员损伤分析, 汽车工程师 No.302(06) (2023) 39-44.
- [11] Z.J. Wang, Biomechanical Responses of the THOR-AV ATD in Rear Facing Test Conditions, SAE International, 2022, pp. 2089-2105.
- [12] USA Society of Automotive Engineers (USA SAE). SAE J211-1: Instrumentation for Impact Test-Part1-Electronic Instrumentation, REV.MAR95[S].USA SAE, 2014.
- [13] 商恩义, E-NCAP 正碰试验中假人头部伤害主观评价方法的改进, 汽车安全与节能学报 5(01) (2014) 47-51.
- [14] 商恩义, 李月明, 习波波, 崔新康, 张毅, C-NCAP 中 THOR 50th 假人头部气囊触底评价方法探讨, 汽车安全与节能学报 12(02) (2021) 180-185.
- [15] 商恩义, 张君媛, 杨斌, 张慧云, 正面碰撞试验中假人头部及胸部受力分析方法的研究与应用, 汽车技术 No.421(10) (2010) 18-21.
- [16] 商恩义, 李成祥, 正面全宽碰撞中假人及安全带关系的研究与应用, 汽车技术 No.434(11) (2011) 23-27.