

A Numerical Study of Driver Kinematic Responses of the Hybrid III and Active Human Model in Autonomous Emergency Braking

Lihai REN^{1*}, Dangdang WANG¹, Chen LI¹, Chengyue JIANG¹, Yuanzhi HU¹

¹ Chongqing University of Technology, Key Laboratory of Advanced Manufacture Technology for Automobile Parts, Ministry of Education, Chongqing, China

* Email: lihai.ren@cqut.edu.cn

Abstract: In this study, two occupant models, the H-III dummy model and Active Human Model (AHM), were used to investigate the driver's kinematic response with or without active pretension seatbelt under autonomous emergency braking (AEB). Firstly, a driver-restraint system model which was modified from a previous developed and validated multi-body model was employed in this study. Then, four braking simulations with an acceleration pulse extracted from the referred volunteer AEB tests were conducted. The predicted displacements of the head, shoulder, chest, pelvis and knee were selected as the interest parameters, and applied for further comparison of the kinematic predict performance of the two occupant models. Compared with the referred experiments, the simulations illustrated that the bio-fidelity of the AHM is higher than the Hybrid III model in AEB, while the driver's excursions could be reduced after the application of the active pretension seatbelt significantly.

Key words: AEB; Hybrid III; active human model; active pretension seatbelt

基于 Hybrid III 和 AHM 模型的自动紧急制动下驾驶员离位仿真研究

任立海^{1*}, 王荡荡¹, 李晨¹, 蒋成约¹, 胡远志¹

¹ 重庆理工大学, 汽车零部件先进制造技术教育部重点实验室, 重庆, 中国, 400054

* Email: lihai.ren@cqut.edu.cn

摘要: 本研究基于 Hybrid III 假人和 AHM (Active Human Model) 人体坐姿模型, 对比分析汽车在自动紧急制动 (AEB) 时是否有主动预紧安全带对驾驶员的离位响应。基于已有的驾驶员约束系统碰撞模型, 依据试验数据构建当前 AEB 仿真用约束系统模型并开展驾驶员 AEB 工况仿真分析。提取人体 (假人) 模型头部、肩部、胸部、骨盆以及膝部的时间-位移历程曲线, 并开展 H-III 模型与 AHM 模型仿真预测差异性分析及主动安全带对驾驶员的约束情况。参考志愿者实验数据, AHM 在自动紧急制动阶段的仿真逼真度高于 Hybrid III。主动预紧安全带能够显著降低驾驶员在 AEB 工况下离位响应。

关键词: AEB; Hybrid III; 主动人体模型; 主动预紧安全带

1 引言

根据中国公安部公布的道路交通事故统计数据显示, 2017 年中国共发生道路交通事故 203049 起, 受伤人数 209654 人, 死亡 63772 人^[1]。为避免或减少汽车碰撞对事故参与人员带来的伤害, 汽车主动安全技术越来越多的应用到汽车上, 比如自动紧急制动系统 (Autonomous Emergency Braking, AEB)^[2]。

随着 AEB 在汽车上的应用, 其弊端也随之凸现。紧急制动下的离位使乘员不再满足约束系统设计时的标准坐姿, 身体前倾将会降低安全气囊的保护效能, 在汽车发生碰撞后可能会给乘员带来更严重的伤害^[3-5]。根据

基金项目: 重庆市技术创新与应用发展项目资助 (cstc2019jcsx-msxmX0412)

Bastien C 等^[6]滑车实验研究表明, 在 8m/s^2 紧急制动时没有系安全带的志愿者发生了严重的离位。Östh Jona^[7]通过实车 AEB 实验研究了在紧急制动下驾驶员的离位情况, 在全力制动强度下驾驶员的离位明显。然而, 志愿者实验成本高且存在一定危险性。随着计算机的发展, 越来越多的数字模型应用于汽车主被动安全仿真研究领域, 比如 H-III (Hybrid III) 假人模型^[8]以及具有主动肌肉模型的人体模型 Active Human Model (AHM)^[9,10]。然而, 不同模型对于仿真工况的适用性可能存在着差异。

为验证假人和主动人体模型在工程仿真中的应用, 本文将基于 YARIS 基础车体模型, 使用 H-III 和 AHM 构建驾驶员-约束系统仿真模型。研究汽车 AEB 作用下驾驶员离位响应及主动预紧安全带对离位的改善分析。

2 方法

2.1 Hybrid III 和 AHM 模型

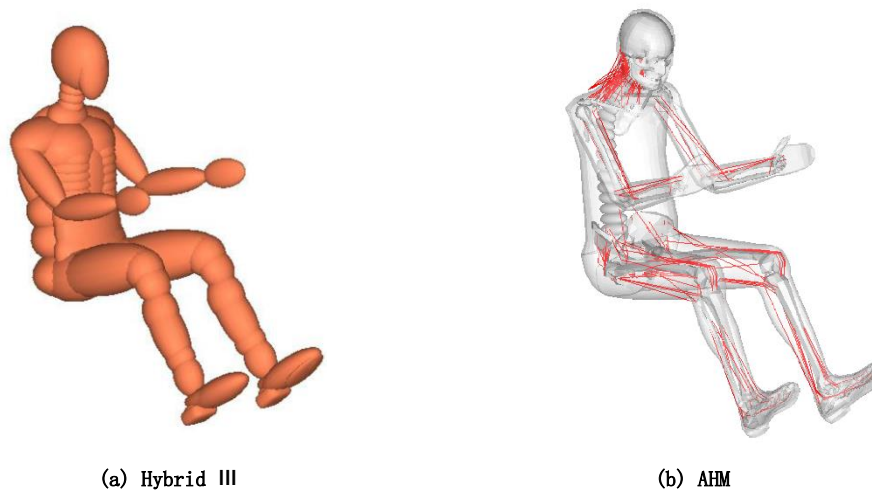


Figure 1 Hybrid III dummy (a) and active human model (b)

图 1 Hybrid III 假人 (a) 和主动人体模型 (b)

本研究使用第 50 百分位男性 Hybrid III 假人和 AHM3.0 (Active Human Model) 人体模型 (图 1)。与多刚体 Hybrid III 假人模型相比, AHM 由 178 个刚体和 8 个柔性体构建脊柱、骨骼以及皮肤等^[11]。使用 1D 单元构建主动肌肉模型 (图 1b 红色), 同时利用 PID (Proportional-Integral-Derivative) 肌肉控制器调整肌肉活性水平, 具有较高的生物逼真度^[11,12]。

2.2 约束系统模型

本论文在前期已建立并验证的某车型驾驶员 50km/h 正面刚性碰撞多体系统模型^[13]的基础上, 依据志愿者实验用车型的约束系统性能试验测试数据^[7], 建立驾驶员制动工况仿真模型, 并对模型的有效性进行验证。

2.2.1 多刚体座椅模型

参考志愿者试验数据^[7], 调整多刚体座椅模型的坐垫角与靠背角分别为 14 度和 23 度 (图 2)。使用 MADYMO 软件中 *CHARACTERISTIC.CONTACT_LOAD_FUNC 关键字定义多刚体座椅的坐垫支撑刚度 (如图 3)。

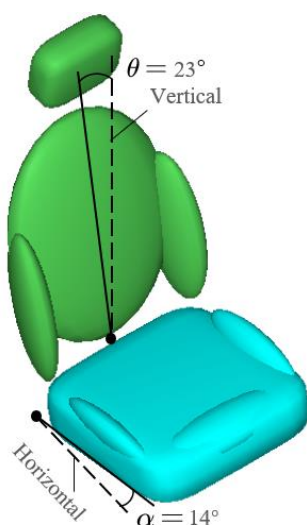


Figure 2 Multi-rigid body seat
图 2 MADYMO 多刚体座椅

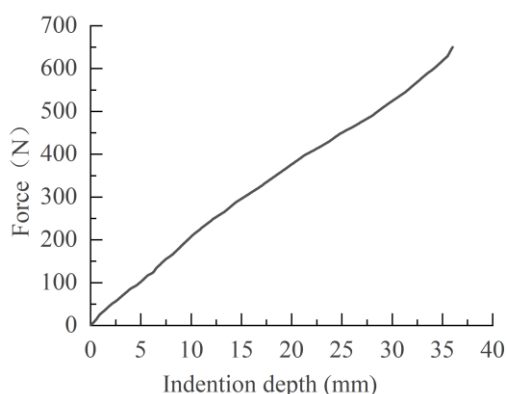


Figure 3 Stiffness of the multi-rigid body seat
3 MADYMO 多刚体座椅刚度

2.2.2 安全带模型

基于 MADYMO 构建三点式普通有限元安全带，由 1D 和 2D 单元组成。1D 单元模拟通过滑环与卷收器的安全带部分，2D 单元模拟与身体接触的肩带与腰带部分。分别设置滑环、锁扣与 1D 单元的摩擦系数为 0.1 和 0.35。

在普通安全带模型基础之上，构建主动预紧安全带模型^[14]，主要包括卷收器、火药预紧器、主动预紧器（Active Control Retractor, ACR）、锁止机构、滑环、以及织带等。主动预紧器预紧力峰值为 170N（图 4），作用时刻为制动减速度初始前 200ms^[10]。

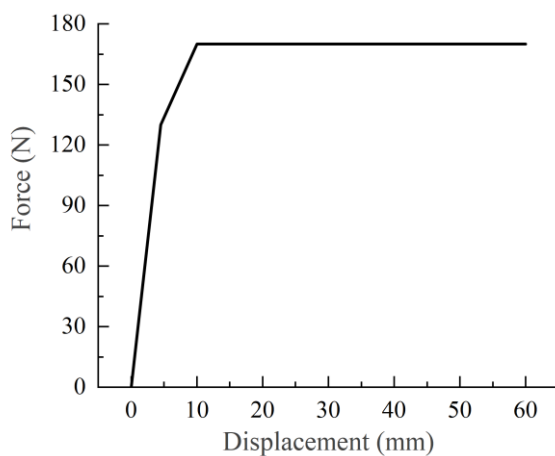


Figure 4 Force-displacement load curve of the ACR
图 4. ACR 力-位移曲线

2.2.3 驾驶侧车体仿真模型搭建及验证

基于前期已验证的驾驶员 50km/h 正面刚性碰撞约束系统模型，使用以上构建的座椅和安全带模型，建立制动工况驾驶员约束系统模型。如图 5 所示，构建了 H-III 和 AHM 两种驾驶员约束系统仿真模型。两种人体（假

人)模型在 YARIS 约束系统中的空间位置基本保持一致,空间位置平均误差在 7%以内(如表 1)。由于人体和假人模型各部位之间的尺寸存在差异,因此产生的误差是可以接受的。

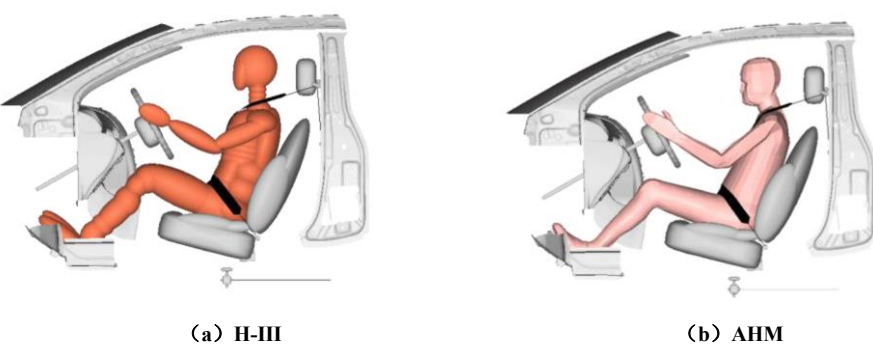


Figure5 Driver-restraint conditions
图 5 驾驶员-约束系统模型

Table 1 Comparison of the space position between the H-III and AHM
表 1 H-III和 AHM 空间位置对比

相对位置	距离 (mm)		误差 (%)
	H-III	AHM	
head to headrest	156	163	-4.3
head to B-pillar	265	248	6.9
neck to seatback	123	119	3.4
chest to dash	736	767	-4.0
chest to steerwheel	285	286	-0.3
hip to floor	320	316	1.3
knee to dash	92	89	3.4
arm to floor	516	513	0.6

为验证所建驾驶员-约束系统模型的有效性,参考现有实车 AEB 实验领域研究成果,使用 AHM 驾驶员-约束系统模型重建实验工况,详细试验数据请参看文献[7]。

如图 6 所示,所建 AHM 驾驶员-约束系统模型预测的观测值均在参考实验数据的通道内,且基本处于通道平均水平。该约束系统模型得到了有效性验证,可用于下一步的仿真研究。

2.3 制动工况仿真及结果分析

本研究引用文献[7]中的实车紧急制动减速度时间历程曲线作为仿真车辆全力制动下的紧急制动输入(其中,稳定阶段的最大制动减速度约为 10m/s²)。基于验证过的约束系统模型,使用 MADYMO 软件搭建的 H-III和 AHM 驾驶员-约束系统模型,共进行有无主动预紧安全带两种约束系统模型下 4 种工况仿真。

将驾驶员头部、左右肩部、胸部、骨盆以及左右膝部的位移等作为分析驾驶员离位主要参数^[8,14,15]，对所选参数作定量对比。并使用单因素方差分析（Office Excel 2016），通过 F 检验判断离位改善的显著性：当 $p \leq 0.05$ 时，认为主动预紧安全带对驾驶员的离位改善有显著效果。

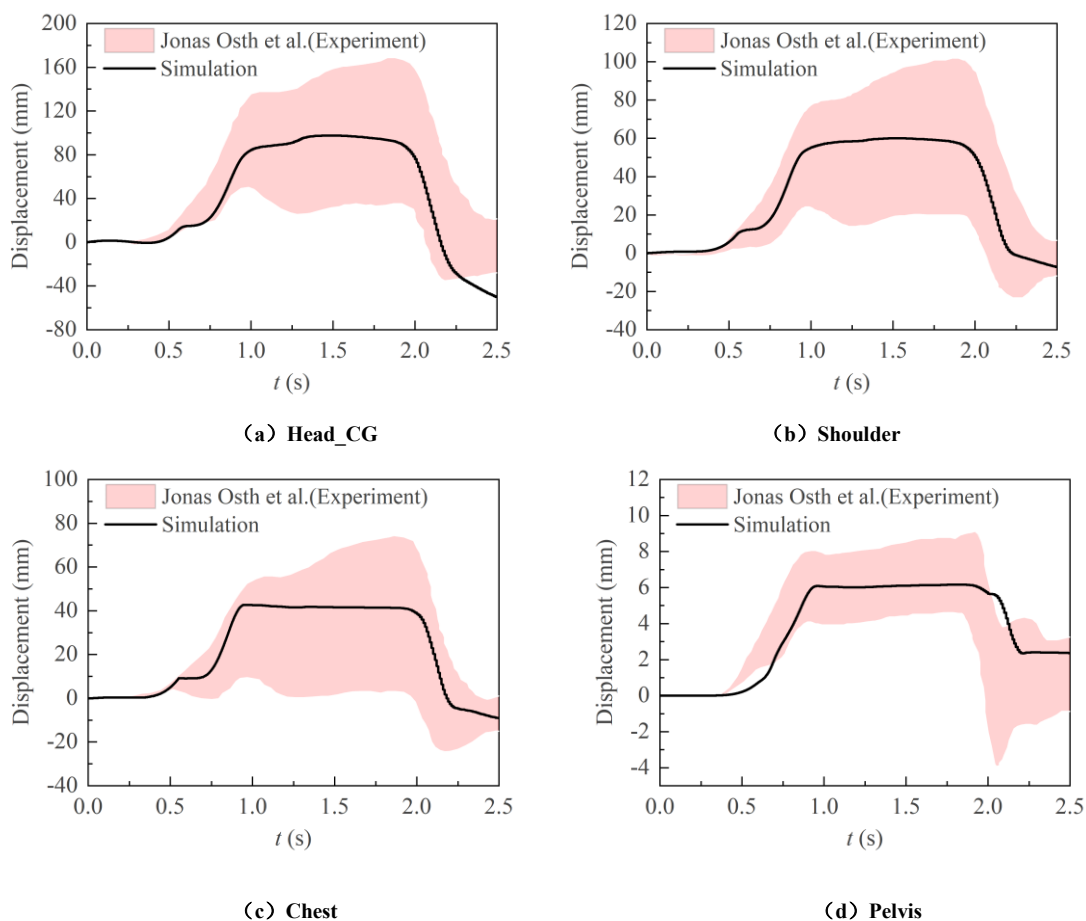


Figure6 Comparison of the X-direction displacements between the AHM simulation and experiment

图 6 AHM 仿真 X 向位移与实验区间对比

3 结果

3.1 普通安全带约束下驾驶员的离位响应

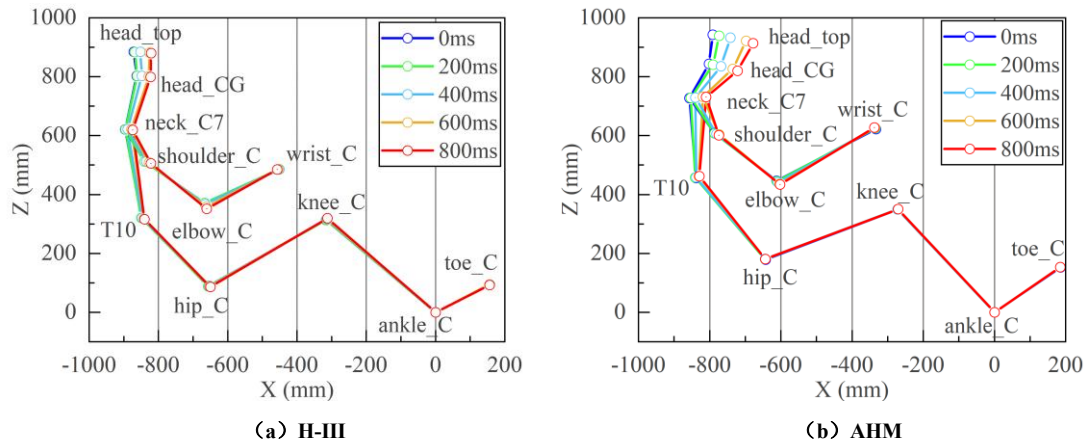


Figure7 Out-of-position responses of the H-III and AHM for the standard seatbelt under AEB

图 7 紧急制动时普通安全带约束下的 H-III和 AHM 模型离位响应

如图 7 所示，显示了普通安全带约束下 H-III 和 AHM 在 10m/s^2 紧急制动强度下的离位姿态变化响应。H-III 和 AHM 模型的下肢离位小于上躯干，头部发生最大离位为 82.6mm ，骨盆发生最大离位为 17.5mm （如表 2）。

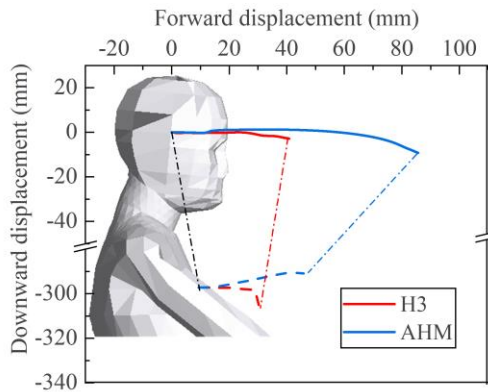


Figure8 Comparison of the head and chest displacements between H-III and AHM for the standard seatbelt under emergency braking

图 8 紧急制动时普通安全带约束下的 H-III和 AHM 头和胸部离位对比

如图 8 所示，对比了普通安全带约束下 H-III 和 AHM 在 10m/s^2 紧急制动强度下的头、胸部离位。AHM 头部质心位移量（ 82.6 ）明显大于 H-III 模型的预测值量。表 2 所示为 H-III 和 AHM 两个模型预测的身体各部位在紧急制动下的离位量及差异。其中，相对于 H-III 模型，AHM 预测的头部位移差异最大为 91.6% ，其次是骨盆位移为 88.6% 。两种模型上躯干（包含头颈）位移平均差异为 45.9% ，下肢（包含骨盆）位移平均差异为 82.5% 。

Table 2 Comparison of the displacements between the H-III and AHM for the standard seatbelt under emergency braking

表 2 紧急制动时普通安全带约束下的 H-III 和 AHM 离位对比

部位区域	模型		增量 (mm)	增比 (%)
	H-III	AHM		
头部_质心	43.1	82.6	39.5	91.6
C7_中部	28.4	41.8	13.4	47.2
肩膀_右侧	25.7	34.9	9.2	35.8
肩膀_左侧	27.7	25.8	-1.9	-6.9
胸部_中部	22.0	32.6	10.6	48.2
骨盆_中部	17.5	2.0	-15.5	-88.6
膝部_右侧	19.0	3.0	-16.0	-84.2
膝部_左侧	15.8	4.0	-11.8	-74.7

3.2 主动预紧安全带约束下驾驶员的离位改善

表 3 和表 4 所示, 分别为紧急制动时在普通安全带和主动预紧安全带约束下 H-III 和 AHM 模型离位量及差异。主动预紧安全带约束下明显降低了驾驶员的离位量。相对于普通安全带, 主动预紧安全带约束下 H-III 和 AHM 模型上躯干离位量分别平均降低了 76.5% 和 37.9%; 下肢离位量分别平均降低了 35.2% 和 62.5%。

如表 5 所示, 普通安全带和主动预紧安全带约束下 H-III 和 AHM 的上躯干和下肢平均离位量。相对于普通安全带, H-III 和 AHM 的上躯干和下肢在主动预紧安全带的约束下分别平均下降 18.7mm 和 3.7mm。主动预紧安全带对驾驶员上躯干离位改善有显著效果 ($p=0.028$), 对下肢离位改善无显著性 ($p=0.363$)。总体上, 主动预紧安全带显著改善了驾驶员离位 ($p=0.042$)。

Table 3 Comparison of the H-III displacements between the standard seatbelt (SB) and active pretension seatbelt (PT) under emergency braking

表 3. 紧急制动下普通安全带 (SB) 和主动预紧安全带 (PT) H-III 模型离位对比

制动	区域	SB	PT	差异/mm	差异/%
10m/s ²	头部_质心	43.1	13.5	29.6	68.7
	C7_中间	28.4	3.4	25	88
	肩膀_右侧	25.7	5.8	19.9	77.4
	肩膀_左侧	27.7	7.8	19.9	71.8
	胸部_中间	22.0	5.2	16.8	76.4
	骨盆_中间	17.5	11.1	6.4	36.6
	膝部_右侧	19.0	12.0	7	36.8
	膝部_左侧	15.8	10.7	5.1	32.3

Table 4 Comparison of the AHM displacements between the standard seatbelt (SB) and pretension seatbelt (PT) under emergency braking

表 4. 紧急制动下普通安全带 (SB) 和主动预紧安全带 (PT) AHM 模型离位对比

制动	区域	SB	PT	差异/mm	差异/%
10m/s ²	头部_质心	82.6	61.3	21.3	25.8
	C7_中间	41.8	25.6	16.2	38.8
	肩膀_右侧	34.9	26.7	8.2	23.5
	肩膀_左侧	25.8	11.6	14.2	55.0
	胸部_中间	32.6	17.5	15.1	46.3
	骨盆_中间	2.0	1.0	1.0	50.0
	膝部_右侧	3.0	2.7	0.3	10.0
	膝部_左侧	4.0	1.4	2.6	65.0

Table 5 Comparison of the average displacements between the H-III and AHM

表 5. H-III和 AHM 的平均离位对比

区域	SB/mm	PT/mm	差异/mm	p-value
上躯干	36.5	17.8	18.7	0.028
下肢	10.2	6.5	3.7	0.363
总体	26.6	13.6	13	0.042

注：离位为观测部位离位量平均值；加粗值显示了统计显著性， $p < 0.05$ 。

4 讨论

基于 YARIS 基础车体模型，构建了 H-III 和 AHM 驾驶员-约束系统仿真模型，共进行了 10m/s^2 紧急制动强度工况下 4 种仿真。参考实车 AEB 实验对驾驶员离位已有的研究成果，选取了头部质心、C7、左右侧肩部、胸部、骨盆以及左右侧膝盖作为离位的观测参数，开展了假人和人体模型在自动紧急制动下驾驶员离位对比以及主动预紧安全带对驾驶员离位改善研究。

结果显示，紧急制动下 H-III 假人模型和 AHM 人体模型之间的离位存在较明显的差异，主动预紧安全带对驾驶员离位有较好改善效果^{1]}。对于 H-III 假人模型，与 AHM 相比其上躯干离位量总体偏小。如图 8 所示，H-III 的头胸部均小于 AHM 的离位量。通过最大位移出的头胸部的倾斜率可以看出，H-III 的头胸向前倾斜较小，这表明 H-III 假人模型脊椎刚度较大，制动下其发生弯曲变形的能力较弱，不能很好的模拟真实人体颈部弯曲运动，生物逼真度较低^[8]。对于 AHM 人体模型，仿真观测值均处于实车 AEB 实验的驾驶员离位量区间^[7]。AHM 的颈部具有主动肌肉控制，能较真实的模拟人体颈部弯曲运动响应^[11]。与 AHM 相比，H-III 假人模型下肢产生的离位量较大。Beeman S M 等^[16]通过对志愿者和第 50 百分位男性假人（ATD）滑车实验姿态响应对比，结果显示紧张状态下的志愿者骨盆离位量小于 ATD。由于人体模型下肢具有主动肌肉，离位时人体模型下肢能起到良好的支撑，因此假人模型比人体下肢发生的离位较大。

AEB 作用下，普通安全带约束的驾驶员发生较明显的离位。本研究构建的主动预紧安全带显著降低了驾驶员离位（ $p = 0.042$ ），这与胡远志等^[14]和 Jonas Östh 等^[17]研究是一致的。本文仅研究了主动预紧安全带对驾驶员的离位改善，对于乘员的离位及其改善研究还需进一步开展。

5 结论与展望

本研究表明，H-III 和 AHM 驾驶员-约束系统仿真模型在紧急制动强度下的驾驶员离位响应不同，其模型生物逼真度存在差异性。由于 H-III 假人模型脊椎刚度较大，且不具有主动肌肉模型，不能较真实地反映制动工况下人体离位响应。AHM 人体模型生物逼真度较高，仿真结果与志愿者试验相比，具有较高的仿真精度，能较好地模拟 AEB 作用下人体姿态响应。配备主动预紧安全带后，驾驶员的离位显著改善。

AEB 作用下发生碰撞，预碰撞阶段发生的乘员离位，增高了乘员损伤风险，配备主动预紧安全带在预碰撞阶段使乘员离位减小或牢牢约束住乘员在座椅上。不同的质量的乘员在汽车不同制动强度制动时，其上躯干在 AEB 作用下产生的等效力不同，因此需要的安全带预紧程度不同。可以通过传感器等设备设计一款自适应主动预紧力约束系统，且通过采集车速、制动强度以及人体质量等参数设计相关算法改变主动预紧安全带相关参数（预紧时刻、预紧力）。对预碰撞乘员自适应的改变主动预紧参数，使乘员获得最优的保护效果。

参考文献 (References)

- [1] Ministry of Public Security Traffic Management. Annual Report on Road Traffic Accidents of the People's Republic of China (2017) [R]. 2018. 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（2017 年度）[R]. 2018.
- [2] LIN M, YOON J, KIM B. A study and analysis for calculating the brake application time of AEB systems considering the gradient[J]. International Journal of Control & Automation, 2015, 8(6): 283-292.
- [3] Infantes E, Schaub S, Kramer S, et al. Evaluation of occupant protection during the crash phase considering pre-crash safety systems-results from the ec-funded project assess. In: 2013 ESV Conference.2013.

- [4] Mages M, Seyffert M, Class U. Analysis of the pre-crash benefit of reversible belt pre-pretensioning in different accident scenarios. In: *Proceedings of the 22th ESV-Conference*. 2011, **11**-0442.
- [5] Woitsch G, Sinz W. Influences of pre-crash braking induced dummy – Forward displacements on dummy behaviour during Euro-NCAP frontal crashtest. *Accident Analysis & Prevention*, 2014, **62**: 268-275.
- [6] Bastien C, Blundell M V, Neal-Sturgess C. A study into the kinematic response for unbelted human occupants during emergency braking[J]. *International Journal of Crashworthiness*, 2017:1-15.
- [7] Öst J, Olafsdóttir JM, Davidsson J, et al. Driver kinematic and muscle responses in braking events with standard and reversible pre-tensioned restraints: validation data for human models[J]. *Stapp Car Crash J*, 2013, **57**:1-41.
- [8] Albert D L, Beeman S M, Kemper A R. Occupant kinematics of the Hybrid III, THOR-M, and postmortem human surrogates under various restraint conditions in full-scale frontal sled tests[J]. *Journal of Crash Prevention and Injury Control*, 2018, **19**(sup1):S50-S58.
- [9] Östmann, Merete, Jakobsson, et al. An examination of pre - crash braking influence on occupant crash response using an active human body model. In: *2016 IRCOBI Conference*, 2016.
- [10] Jonas Öst, Brolin K, Dan Bråse. A Human Body Model With Active Muscles for Simulation of Pretensioned Restraints in Autonomous Braking Interventions[J]. *Journal of Crash Prevention and Injury Control*, 2015, **16**(3):304-313.
- [11] Riske M, Edwin van H, Jeroen B, et al. Development of a Multi-Body Human that Predicts Active and Passive Human Behaviour. In: *2012 IRCOBI Conference*, 2012.
- [12] Riske M, Jeroen B, Hala E, et al. Modelling of Bracing in a Multi-body Active Human Model. In: *2013 IRCOBI Conference*, 2013.
- [13] Yuanzhi Hu, Guoqing Zhang, Xi Li, et al. Integrated Simulation Analysis of Automatic Emergency Steering Leading to Oblique Collision[J]. *China Journal of Highway and Transport*. 2019.
胡远志, 张国庆, 刘西, et al. 自动紧急转向导致斜角碰撞的一体化仿真分析[J]. *中国公路学报*, 2019. [已录用]
- [14] Hu Yuanzhi, Zhu hongxu, Zeng Xianyu, et al. Analysis of the effect of active retractor parameters on occupant kinematic under braking condition[J]. *Automotive Engineering*. 2019.
胡远志, 朱红旭, 曾宪菁, et al. 制动工况下主动卷收器预紧参数对乘员离位影响分析[J]. *汽车工程*, 2019.[已录用]
- [15] Beeman S M, Kemper A R, Madigan M L, et al. Kinetic and kinematic responses of post mortem human surrogates and the Hybrid III ATD in high-speed frontal sled tests[J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2013, **55**:34-47.
- [16] Beeman S M, Kemper A R, Madigan M L, et al. Occupant kinematics in low-speed frontal sled tests: Human volunteers, Hybrid III ATD, and PMHS[J]. *Accident; analysis and prevention*, 2012, **47**:128-139.
- [17] Kerry A, Adam J, Andrew R, et al. Finite element comparison of human and Hybrid III responses in a frontal impact[J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2015, **85**:125-156.