

倾斜坐姿对男性驾驶员正碰约束系统影响分析

郑杰

同济大学 汽车学院 奥托立夫(上海)汽车安全系统研发有限公司

DOI:10.12238/etd.v6i1.11726

[摘要] 随着自动驾驶技术的成熟,大角度座椅被乘员在驾驶过程中使用定将成为必然。本文搭建HIII-50M驾驶员45°靠背角坐姿下正面100%重叠刚性壁障碰撞仿真模型,并与物理试验对标。在此基础上应用Plackett-Burman试验设计方法评估不同参数变化下假人的安全响应。结果表明,参数的变化会导致假人极易出现下潜,大假人在大靠背角下也需要防下潜措施,这些发现有助于自动车辆中倾斜乘客的保护研究需求。

[关键词] HIII-50M假人; 倾斜坐姿; 约束系统; Plackett-Burman试验设计

中图分类号: TD211 **文献标识码:** A

Analysis of the Impact of Reclined Posture on the Frontal Collision Restraint System for Male Drivers

Jie Zheng

School of Automotive Engineering, Tongji University

Autoliv (Shanghai) Automotive Safety System Research and Development Co., LTD.

[Abstract] As autonomous driving technology matures, the use of large-angle seats by occupants during driving will inevitably become a reality. This paper establishes a simulation model of a frontal 100% overlap rigid wall collision with an HIII-50M driver at a 45° recline angle and compares it with physical tests. On this basis, the Plackett-Burman experimental design method is applied to evaluate the safety response of the dummy under different parameter changes. The results show that changes in parameters can easily lead to dummy submarining, and large dummies also require anti-submarining measures at large recline angles. These findings contribute to the research needs for the protection of reclined passengers in autonomous vehicles.

[Key words] HIII-50M dummy; reclined posture; restraint system; Plackett-Burman experimental design

高度自动化车辆能够实时感知周围环境、预测其他车辆的行为,与人类行为相关(如疲劳驾驶、分心驾驶、醉酒驾驶等)的碰撞事故数量可能会减少。对于L3及其以上的高级自动驾驶汽车,驾驶员更加不需要操控汽车方向盘,可以自主选择乘坐姿态^[1],可能出现玩手机、斜躺等各种姿态,其中倾斜的座椅位置可能是自动驾驶车辆乘员中最受欢迎的^[2]。然而,高级别的自动驾驶车辆仍然可能发生碰撞^[3]。目前在现有的碰撞安全性法规中,都只考察座椅在设计靠背角度下的安全性能,无法反映出大靠背角倾斜坐姿下的碰撞情况。

通过研究乘员处于大角度倾斜座椅姿态下,在正面碰撞工况中的传统约束系统是否还能有效保护驾驶员位乘员,并优化约束系统参数提高性能保护效果,这将有助于自动驾驶汽车的约束系统保护进一步发展和实际应用。

1 正常坐姿仿真模型的建立和验证

1.1 仿真模型的建立。正面碰撞仿真模型主要包含座椅、方向盘、安全气囊、膝垫、安全带等模块,对乘员起保护作用的主要为

安全带和安全气囊。按照C-NCAP(China-New Car Assessment Program, 中国新车评价规程)^[4]2021试验程序进行,在前排驾驶员位置放置一个HybridIII 50th男性假人,用以测量前排人员受伤害情况,将座椅靠背角调节到设计角度25°,并对方向盘上的主驾安全气囊和安全带进行建模集成。所用到的安全气囊模型已做过单模块的仿真试验对标,采用的气囊展开方法是粒子法(CPM, Corpuscular Particle Method)。安全带采用三点式安全带,其由安全带织带、锁扣(Buckle)、滑环及卷收器构成。卷收器位置安装在车身B柱上,如图1所示。



图1 驾驶员约束系统模型

仿真定义重力和相应的接触、连接和控制参数,定义安全带卷收器点爆时间为15ms,腰带预紧器点爆时间为23ms,主驾安全气囊点爆时间为15ms,采用碰撞软件LS-DYNA求解器求解计算。

1.2仿真模型有效性验证。同步安排相同约束系统参数的滑台试验进行对比,通过调整仿真模型参数设置,最终的运动响应对比如图2所示。从对比图可以看出,假人运动姿态相近。安全带预紧起作用时间一致;安全气囊到位时间接近,假人头部接触气囊时间和位置基本一致。

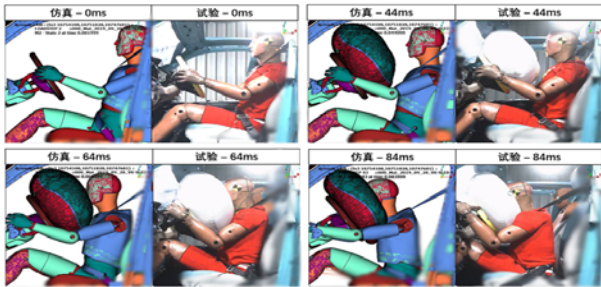


图2 HIII-50M假人仿真和试验动画对比图

CNCAP HIII-50M假人评分部位为假人的头部、颈部、胸部、大腿部和小腿部。基本的评分原则是设定高性能指标限值、低性能指标限值和极限值。假人头部评价指标包括头部伤害指数(HIC15,Head Injury Criterion)和累积3ms合成加速度值;颈部评价指标包括剪切力Fx、张力Fz和伸张弯矩My;假人胸部评价指标包括压缩变形量和粘性指数(VC,Viscous Criterion)。CNCAP法规中也考察假人腿部和脚部的伤害值,滑台无法模拟车身变形侵入,因此暂不关注此部位。

仿真和试验中的假人损伤值很接近,如表1所示:

表1 CNCAP仿真和试验假人损伤峰值对比

	Head 头部		Neck 颈部			Thorax 胸部	
	HIC15 15ms头部损伤指标	Head a3ms 合成加速度3ms过 载量 (g)	Neck Fx 颈部x向剪切力 (N)	Neck Fz 颈部z向张力 (N)	Neck Mxy 颈部x向弯矩 (Nm)	Chest Deflect 胸部变形量 (mm)	Viscous Criteria 粘性指数 (m/s)
试验	84	33	364.7	1000.9	13.0	23.7	0.18
仿真	86	34	467.7	943.9	10.3	23.1	0.11

应用CORApplus软件从四个度量评级(通道、相位、幅度和斜率)的组合对试验和仿真假人损伤曲线进行相关性分析,对模型的有效性和预测能力进行定量评估。对每个伤害值曲线进行相关性等级评分,如下表2所示:

表2 CNCAP仿真和试验结果相关性分析

No.	Signal 损伤信号	Rating 等级评分	Weight 权重
1	头部合成加速度	0.7056	0.30
2	骨盆 x 向加速度	0.8369	0.10
3	颈部 x 向剪切力	0.6070	0.05
4	颈部 z 向伸张力	0.7548	0.05
5	颈部伸张弯矩	0.6893	0.10
6	胸部变形量	0.9045	0.30
7	安全带肩带力 B3 力	0.8845	0.05
8	安全带腰带力 B6 力	0.7051	0.05
Total rating 总评分		0.7832	1.0

相关性整体总评分接近0.8,且每个信号均大于0.58,根据ISO/TS 18571:2024总体评级的定义,说明仿真可以捕获试验差不多好的特性。运动响应基本一致,曲线吻合很好,可以认为仿真模型具有较好可靠性和有效性,可以基于该仿真模型进行后续的研究工作。

2 倾斜坐姿 45° 靠背角仿真分析

基于常规坐姿下的模型基础上,将座椅靠背往后旋转至45°座椅靠背角,相应调节HIII-50M假人到合理坐姿位置,完成安全带路径更新和模型其他仿真设置。假人摆放对比如下图3所示:

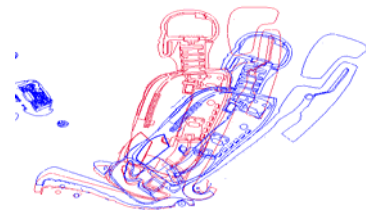
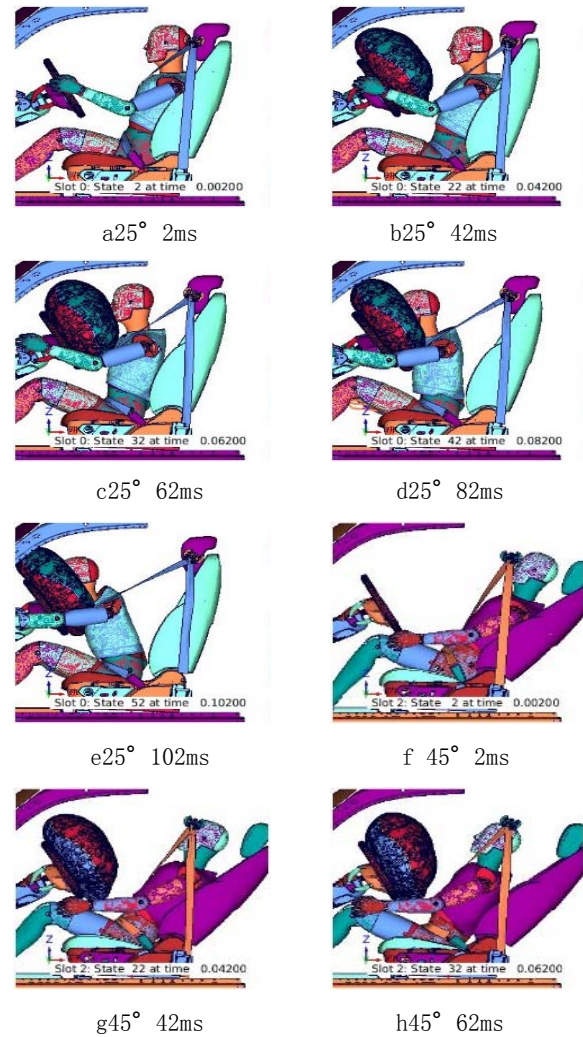


图3 假人在座椅靠背角25° 和45° 位置对比图

提交仿真计算,45°靠背角与25°靠背角下的假人运动响应对比如下图4所示:



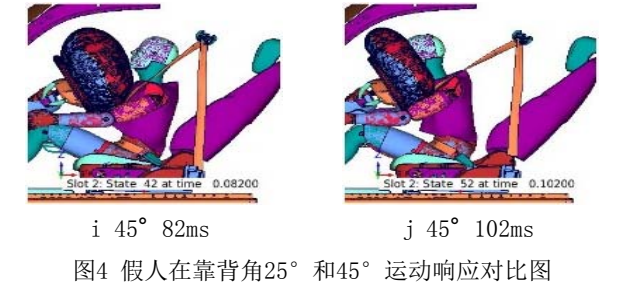


图4 假人在靠背角25° 和45° 运动响应对比图

从动画对比中可以看出, 靠背角度越大, 假人上半身运动行程越大, 假人下巴先接触气囊的表现越明显。假人骨盆向前位移量大, 虽然没有出现“下潜”, 但动画可以看出假人骨盆角度较大, 有“下潜”趋势。

假人损伤值对比结果如下表3所示:

表3 假人在靠背角25° 和45° 伤害值对比图

	Head 头部		Neck 颈部			Thorax 胸部	
	HIC15 15ms头部损伤指标	Head a3ms 合成加速度 3ms过峰值 (g)	Neck Fx 颈部x向剪切力 (N)	Neck Fz+ 颈部z向伸张力 (N)	Neck Mocry 颈部伸张弯矩 (Nm)	Chest Deflect 胸部变形量 (mm)	Viscous Criteria 粘性指数 (m/s)
25deg	86	34	467.7	943.9	10.3	23.1	0.11
45deg	317	60	452.4	2142.7	28.1	22.3	0.08
偏差	268.60%	76.47%	-3.27%	127.00%	172.82%	-3.46%	-27.27%

假人各部位伤害曲线对比如下图5所示:

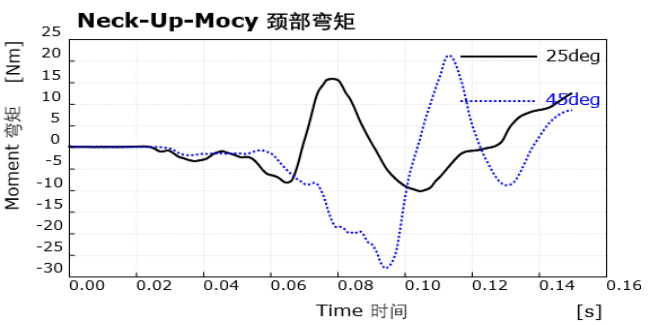
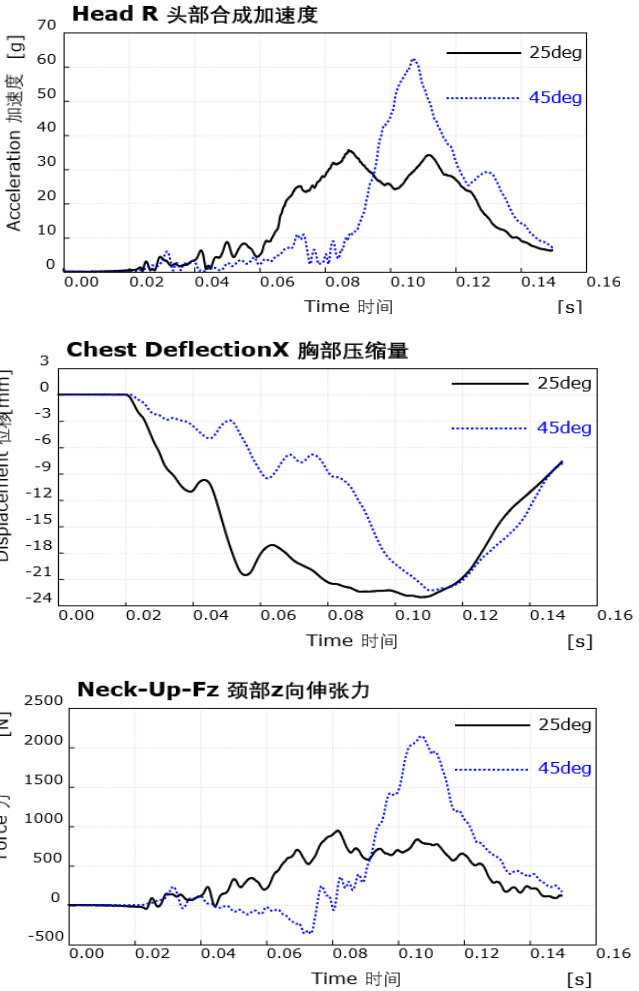


图5 假人在靠背角25° 和45° 伤害值曲线对比图

结合损伤值和动画对比可以看出, 随着靠背角增大, 假人头部惯性增大, 头部接触气囊后加速度增大很多; 动画中没有发现安全带勒脖子, 但由于颈部受惯性甩出去的影响, 且假人没有下潜, 因此靠背角越大, 伸张力越大; 且下巴先接触到气囊的表现越明显, 颈部弯矩变大。45° 靠背角下, 假人胸部前期都是受安全带的作用, 78ms之后才接触主驾气囊, 受气囊挤压而急剧增大, 因此胸压曲线表现前期变小而后期急速增大。

3 P-B试验设计分析

模块	Variable Name 变量名称	基准值	Low Level 低水平值	High Level 高水平值	Comment 备注
Seat belt assembly 安全带集成	SBDX_X	273	249	430	X distance from effective D-Ring to H-Point (mm) D 环到 H 点的 X 向有效距离
	SBDX_Z	655	583	683	Z distance from effective D-Ring to H-Point (mm) D 环到 H 点的 Z 向有效距离
	Buckle_D	95.05	47.32	117.74	Buckle Distance relative from H-point on XZ plane (mm) 插锁到 H 点在 XZ 平面上的有效距离
	STAN_X	89	68	275	X distance from effective anchorage to H-Point (mm) 安装点到 H 点的 X 向有效距离
	STAN_Y	271	271	350	Y distance from effective anchorage to H-Point (mm) 安装点到 H 点的 Y 向有效距离
Seat belt assembly 安全带集成	PLPTTF	23	12	25	PLP TTF(ms) 腰带预紧器点爆时间
	RETTTF	15	12	999	Retractor TTF 卷收器点爆时间, 999 代表没有预紧
	RETTYPE	R200.1	R200.1	R230.2	Retractor type 卷收器类型
	RETL	42Nm	32Nm	49Nm	Retractor load limiter level 卷收器限力等级
Body test conditions 车身试验环境	Stif_Cu	1	0.2	5	scalar of seat cushion stiffness based on standard stiffness curve 坐垫刚度缩放系数
	Friction	0.2	0.2	0.6	Friction between seat foam and dummy 坐垫发泡和假人的摩擦系数
DAB assembly 主驾气囊集成	Vent	32	15	40	DAB vent hole size (mm^2) 主驾气囊泄气孔直径
	DABTTF	15	8	26	DAB TTF(ms) 主驾气囊点火时间
	Tet_L	275	240	320	The length of long tether (mm) 长拉带长度
	Tet_S	150	150	240	The length of Short tether (mm) 短拉带长度

汽车驾驶员正面碰撞约束系统由主驾气囊、方向盘、安全带等组成,再考虑车身结构环境,各部分包含多个参数,整体参数较多,在汽车开发的过程中,需要寻求最优组合以降低乘员伤害。由于约束系统涉及的参数较多,因此采用灵敏度分析,应用 Plackett-Burman DOE方法筛选参数,其可以从众多考察因子中快速有效地筛选出影响显著的几个因子。

如表4表5所示,从约束系统成分中初步筛选并细化出15个因子,考虑后续操作的便捷性,分别对各变量取对应的缩写名称。结合工作中多个项目的经验值,确定各因子的最终取值范围,确定各因子和其基准值以及高低水平取值。

通过Minitab生成以下矩阵,如图6所示。

运行序	SBDR_X	SBDR_Z	Buckle_D	STAN_X	STAN_Y	PLPTTF	RETTTF	RETTYE	RETL	Vent	DABTTF	Tet_L	Tet_S	Self_Cu	Friction
1	249	683	47.32	275	271	25	999 R230	49Nm	15	8	320	240	150	5.0	0.2
2	249	583	47.32	275	271	25	12 R230	49Nm	40	26	240	150	150	5.0	0.2
3	249	583	117.74	275	271	25	999 R200	32Nm	15	8	320	150	150	5.0	0.2
4	249	683	117.74	68	271	12	12 R230	32Nm	40	8	320	240	150	5.0	0.2
5	430	683	47.32	275	350	12	12 R200	32Nm	40	8	320	150	150	5.0	0.2
6	430	583	47.32	68	271	25	12 R230	32Nm	40	26	320	240	150	5.0	0.2
7	430	683	47.32	68	271	12	999 R200	49Nm	15	26	320	240	150	5.0	0.2
8	249	683	117.74	68	350	25	12 R200	32Nm	15	26	240	240	150	5.0	0.2
9	249	683	117.74	275	350	12	12 R230	49Nm	15	26	320	150	150	5.0	0.2
10	430	583	47.32	275	350	12	999 R230	32Nm	15	8	240	240	150	5.0	0.2
11	430	683	117.74	275	271	12	999 R230	32Nm	40	26	240	150	150	5.0	0.2
12	249	683	47.32	275	350	25	999 R200	32Nm	40	26	240	240	150	5.0	0.2
13	430	583	117.74	275	271	12	12 R200	49Nm	15	26	240	240	150	5.0	0.2
14	430	683	47.32	68	350	25	12 R230	49Nm	15	8	240	150	150	5.0	0.2
15	249	583	47.32	68	350	12	999 R200	49Nm	40	26	320	150	150	5.0	0.2
16	249	583	47.32	68	271	12	12 R200	32Nm	15	8	240	150	150	5.0	0.2
17	430	583	117.74	68	350	25	999 R230	32Nm	15	26	320	150	150	5.0	0.2
18	249	583	117.74	68	350	12	999 R230	49Nm	40	8	240	240	150	5.0	0.2
19	430	683	117.74	68	271	25	999 R200	49Nm	40	8	340	150	150	5.0	0.2
20	430	583	117.74	275	350	25	12 R200	49Nm	40	8	320	240	150	5.0	0.2

图6 Plackett-Burman试验矩阵图

分别按以上矩阵,通过CAE软件LS-DYNA求解器提交各组合的计算。

整理汇总计算结果,从结果动画中发现有11个组合中HIII-50M假人左右侧安全带滑进腹部,即出现“下潜”,动画表现如下图7所示:



图7 HIII-50M假人安全带位置对比图

女性假人的“下潜”现象可以通过测量髌骨力和结合录像直接判断出来,而HIII-50M男性假人没有髌骨力,只能通过录像动画来判断。HIII-50M男性假人的骨盆初始倾角随着座椅靠背角的增大而增大,以上矩阵中其他组合结果虽然没有发生下潜,但下潜的趋势可以看出来比设计靠背角下常规坐姿是明显变大的。因此为了衡量下潜的可能性和趋势,参考唐亮等人^[5]提出的BOP(belt position on pelvis)准则,其根据安全带腹带在骨盆上的相对位置来确定下潜趋势的大小。通过测量安全带腹带相对于骨盆的滑移距离 ΔL (如图8所示),来表征下潜趋势的大小,即 ΔL 越大,下潜趋势越大。

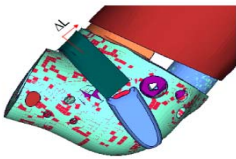


图8 安全带腹带相对于骨盆滑移距离 ΔL 的定义

测量20个组合中的安全带腹带在骨盆上的滑移距离 ΔL ,测量结果如下表6所示:

表6 HIII-50M腰部安全带滑移距离

	001	002	003	004	005	006	007	008	009	010
ΔL	70.4	75.05	70.14	35.78	49.68	84.86	73.26	34.09	69.2	58.94
	011	012	013	014	015	016	017	018	019	020
ΔL	72.38	60.51	45.05	78.72	40.16	99.83	37.51	84.29	46.45	68.18

应用Minitab对 ΔL 进行回归分析,如图9~13:



图9 腰部安全带滑移距离回归分析模型汇总

以未编码单位表示的回归方程

$$\text{Submerging-CTR} = 104.59 - 0.1822 \text{ Buckle_D} - 67.1 \text{ Friction}$$

图10 腰部安全带滑移距离回归方程

方差分析

来源	自由度	Adj SS	Adj MS	F 值	P 值
模型	2	4421.7	2210.9	17.36	0.000
线性	2	4421.7	2210.9	17.36	0.000
Buckle_D	1	823.6	823.6	6.47	0.021
Friction	1	3598.2	3598.2	28.25	0.000
误差	17	2165.2	127.4		
合计	19	6587.0			

图11 腰部安全带滑移距离方差分析图

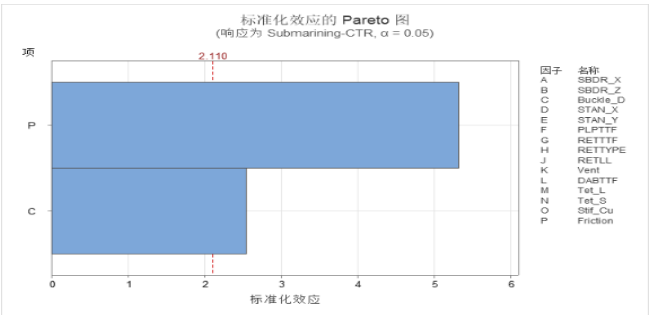


图12 腰部安全带滑移距离回归分析Pareto图

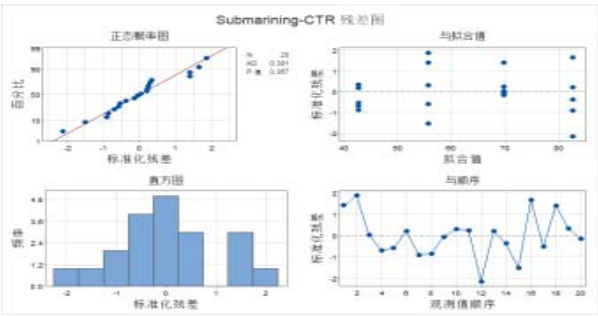


图13 腰部安全带滑移距离回归分析残差图

根据以上图示分析,模型拟合优度R-sq均不高,小于通常所要求达到的70%,统计预测结果精度不高,其可能原因是受假人模型结构影响,安全带滑入腹部后被假人内部结构约束住,导致滑入腹部的数值会有上限,即安全带已经滑入腹部的9个统计值不够精确。方差分析中模型 $P=0.000$ 小于 0.05 ,说明15个因子中至少有一个对假人下潜有影响,有统计意义;观察残差图,发现残差符合正太分布,没有喇叭口,数据随机分布,数据无异常。且因子中,Friction、Buckle_D对应的P值小于 0.05 ,因此说明这2个因子有统计意义,对试验结果有显著影响。

从Pareto图可以看出,Friction(假人和坐垫发泡摩擦系数)影响HIII-50M男性假人的下潜最明显,其次是Buckle_D(Buckle相对H点位置)。合理选择这两个参数的数值,可以改善假人下潜。

结合Katarzyna^[6]和Boyle^[7]等人的研究,减小Buckle的长度、合理布置安全带下固定点位置,能够有效防止假人下潜。针对女性小假人还可以增加骨盆约束气囊来防止假人下潜。因此,综上所述,男性假人在 45° 大靠背角下出现下潜,可以通过优化参数来有效防止假人下潜。

4 结论

随着自动驾驶的普及,约束系统需要应对乘员在倾斜坐姿下的碰撞事件。通过分析对比男性假人在常规坐姿和大角度倾斜座椅姿态下的假人运动和伤害值情况,靠背角增大,假人“下潜”趋势变大,头部伤害值和颈部受力变化明显。在 45° 靠背角下不同约束系统参数的变化,极易导致假人下潜,因此男性乘员也需要考虑防下潜措施,减小Buckle的长度、合理布置安全带下固定点的位置,可以有效改善假人“下潜”。

文中目前只聚焦了男性假人在 45° 靠背角的正面工况的安全性能保护,未考虑女性假人和其他工况,后续将对此种情况进行研究讨论。

[参考文献]

[1]Jorlov S, Bohman K, Larsson A. Seating positions and activities in highly automated cars – a qualitative study of

future automated driving scenarios[C].//2017 IRCOBI Conference Proceedings. Antwerp, Belgium: International Research Council on Biomechanics of Injury,2017:13–22.

[2]Lopez-Valdes FJ, Jimenez-Octavio JR, Bohman K, Logan DB, Raphael R, Augusto Quintana Jimenez, L, Koppel S. Seating preferences in highly automated vehicles are dependent on yearly exposure to traffic and previous crash experiences[C].//2019 IRCOBI Conference Proceedings. Florence, Italy: International Research Council on Biomechanics of Injury,2019:82–83.

[3]Liers,H.and Unger,T.Prediction of the expected accident scenario of future Level 2 and Level 3 cars on German motorways[C]. //2019 IRCOBI Conference Proceedings. Florence, Italy:International Research Council on Biomechanics of Injury,2019:47–57.

[4]C-NCAP管理规则(2021年版)[EB/OL].天津:中国汽车技术研究中心有限公司,2021.10.<https://www.c-ncap.org.cn/>.

[5]唐亮,刘晋浩,程朋乐.乘员下潜倾向判断准则的研究[J].汽车工程,2014,36(06):694–698,693.

[6]KatarzynaRawska,Bronislaw Gepner & Jason R. Kerrigan. Effect of various restraint configurations on submarining occurrence across varied seat configurations in autonomous driving system environment[J].Traffic Injury Prevention. 2021,22(sup1):S128–S133.

[7]Boyle KJ, Reed, MP, Zaseck LW, Hu J. A human modelling study on occupant kinematics in highly reclined seats during frontal crashes[C].//2019 IRCOBI Conference Proceedings. Florence, Italy: International Research Council on Biomechanics of Injury,2019:282–292.

作者简介:

郑杰(1993—),男,汉族,福建省莆田市人,非全日制在读研究生,研究方向:乘员约束系统。