

大倾角坐姿乘员在汽车正面碰撞中的损伤

武和全^{1,2*} 龚创业^{1,2} 李羿辉^{1,2} 胡林^{1,2}

1.长沙理工大学机械与运载工程学院,长沙,410114

2.长沙理工大学工程车辆安全性设计与可靠性技术湖南省重点实验室,长沙,410114

摘要:自动驾驶将乘员从驾驶任务中解放出来,乘员能选择更舒适的坐姿。研究了乘员在 3 种倾角坐姿下正面碰撞的运动响应与损伤,结果表明,大倾角坐姿下的乘员会发生下潜,增大损伤风险。针对这一现象,提出了座垫翻转的防护策略,该策略能大幅度降低乘员的损伤风险,座椅安全带约束下,120° 坐姿乘员的肝脏应变降低至 42.1%,150° 坐姿乘员的心脏应变降低至 24.3%。

关键词:大倾角坐姿;自动驾驶;正面碰撞;乘员损伤

中图分类号:U471.3

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2025.07.012

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Injuries of Occupants in a High-dimension Seated During a Frontal Vehicle Collisions

WU Hequan^{1,2*} GONG Chuangye^{1,2} LI Yihui^{1,2} HU Lin^{1,2}

1.School of Automotive and Mechanical Engineering,Changsha University of Science and Technology,Changsha,410114

2.Hunan Province Key Laboratory of Safety Design and Reliability Technology for Engineering Vehicle,Changsha University of Science and Technology,Changsha,410114

Abstract: Autonomous driving liberates passengers from driving tasks, and allows them to choose more comfortable sitting postures. The motion responses and injuries of occupants in collisions were studied under three different sitting angles. The results show that the passengers will dive in a sitting position with a large inclination angle, resulting in an increased risk of injury. In response to this phenomenon, a protective strategy of seat cushion flipping was proposed. This strategy significantly reduces the injury risk of the occupants. Under the restraint of seat belts, the liver strain of occupants in 120° sitting position is reduced to 42.1%, and the heart strain of occupants in 150° sitting position is reduced to 24.3%.

Key words: high angle sitting position; automatic drive; front impact; passenger injury

0 引言

人工智能和物联网技术的发展将自动驾驶技术推向了新的高度^[1-2]。目前,汽车工业大国均在积极推进自动驾驶技术^[3],自动驾驶汽车的乘员拥有更大的活动空间。短途出行中,乘员倾向于将座椅倾斜到更放松的角度^[4]。自动驾驶意味着乘员不需要局限在转向盘前,可将座椅靠背倾斜到舒适的角度^[5-6]。因此自动驾驶汽车乘员的舒适性和安全问题成为不可忽视的问题^[7-8]。

目前,座椅靠背大倾角的相关研究相对较少,对汽车碰撞安全性能的评估针对的是标准坐姿乘客^[9]。DISSANAIKE 等^[10]发现驾驶员与乘员都喜欢倾斜座椅,以获得更舒适的坐姿,但座椅倾斜会增大碰撞中的死亡率。THORBOLE^[11]发现

座椅靠背倾斜角度越大,安全带的贴合度越差;大倾角靠背会导致乘员下潜,造成乘员腹部损伤。STANGLMEIER 等^[12]研究了座垫与靠背的多种角度组合的乘员损伤,发现座垫角度为 40° 和靠背角度为 155° 的组合为座垫与靠背角度的最佳组合。FORMAN 等^[13]对比了有限元人体模型 NHTSA THOR FE 和 GHBMC 在倾斜坐姿下的正面碰撞响应,发现 GHBMC 更容易发生下潜。BOSE 等^[14]研究了乘员的体重、身高、姿态和支撑水平在正面碰撞中对乘员损伤风险的影响,发现姿势是影响乘员整体损伤最重要的参数。传统的安全约束并不能对非标准坐姿下的乘员起到很好的保护作用,所以研究非标准坐姿下的乘员损伤具有重要的意义。

本文使用 THUMS(total human model for safety)50 百分位成年男性有限元模型(THUMS AM50 人体模型),搭建台车试验平台进行对比试验,研究 56 km/h 正面碰撞下,乘员在标准姿势

收稿日期:2024-05-08

基金项目:国家杰出青年科学基金(52325211);湖南省普通高等学校科技创新团队项目(2024RC1029);湖南省创新研究群体项目(2025JJ10006)

(100°)、娱乐姿势(120°)、休息姿势(150°),以及不同约束系统下的运动学响应与损伤。

1 研究方法

1.1 THUMS 乘员约束系统搭建

将正面碰撞试验^[15]的加速度曲线用于台车模型,通过对比台车模型与试验的运动学响应、头部质心轨迹,对搭建的乘员约束系统进行有效性验证。试验使用三点式安全带将约束在座椅,使用腿部挡板和脚踏板限制乘员骨盆和下肢的运动。参考试验建立的试验台车模型包括汽车座椅、乘员、挡板、三点式安全带等。试验设置与搭建的台车仿真模型如图 1 所示,加速度曲线见图 2。



(a) 试验 (b) THUMS AM50 人体模型

图 1 试验和 THUMS AM50 人体模型

Fig.1 Cadaver trials and THUMS AM50 mannequins

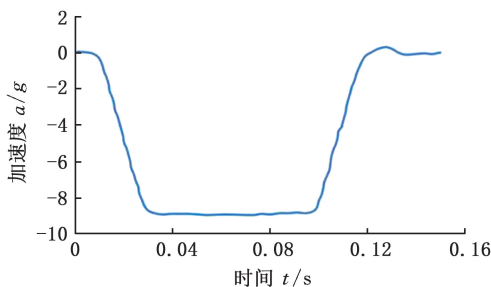


图 2 台车冲击加速度曲线

Fig.2 Vehicle impact acceleration curve

1.2 不同座椅靠背角度的正面碰撞模型

建立的正面碰撞有限元模型由 THUMS AM50 人体模型、靠背多角度安全座椅、安全带、安全气囊等组成。座椅模型为丰田 YARiS 车辆座椅模型,选择座椅右侧平面测量座椅靠背与座椅底架横梁夹角(初始值为 100°)。以座椅靠背铰链连接处为旋转中心,将座椅靠背角调整为 120°、150°,参考《美国高速公路安全管理局 100% 正面碰撞试验设置规范》设置一组标准坐姿乘员作为对照组。通过设置人体与座椅的接触并对模型系统施加重力场,提取人体模型与座椅达到平衡状态的模型。此时,人体与座椅接触,座椅坐垫和靠背受压变形。座椅不同靠背角度的台车模型如图 3 所示。

基于建立的 3 种台车模型,建立肩带 D 环固定在 B 柱(以下简称 B 柱安全带)与肩带 D 环固

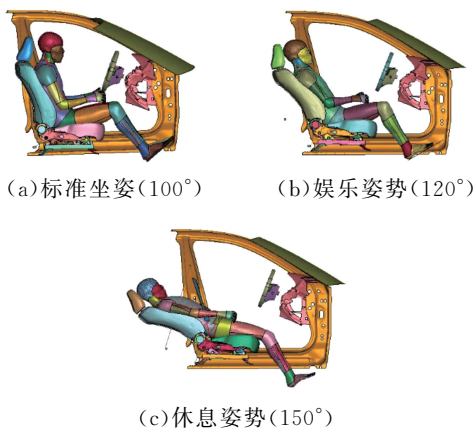


图 3 不同角度正面碰撞模型

Fig.3 Frontal collision model with different angles

定在座椅靠背(以下简称座椅安全带)的安全带模型,如图 4 所示。安全带卷收器限力 4 kN,预紧器限力 2 kN^[16]。对 3 个座椅靠背角度、2 种形式安全带的 6 组模型施加图 5 所示的 56 km/h 碰撞加速度曲线^[17]。



(a) B 柱安全带 (b) 座椅安全带

图 4 安全带不同固定形式

Fig.4 Seat belts are fastened in different ways

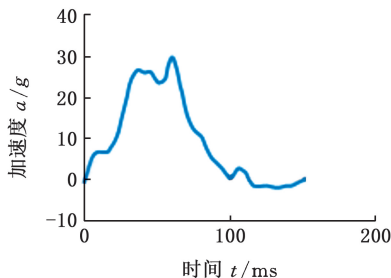


图 5 正面碰撞实验加速度波形

Fig.5 Frontal impact experimental acceleration waveform

1.3 防护策略下的正面碰撞模型

针对大倾角姿势下乘员的严重下潜(增大乘员整体损伤的风险),提出座垫抬起的防护措施,即在娱乐姿势(120°)、休息姿势(150°)时抬起座椅座垫,以减少乘员的下潜、增强约束系统的约束效果。

以座椅的右侧面为测量平面,以座椅靠背与座垫铰链的转动轴为中心,测量座椅座垫横梁的转动角度。使用前处理工具 LS-PrePost(V4.8.13)将娱乐姿势(120°)、休息姿势(150°)下的座椅座垫

分别绕转动轴逆时针旋转 20°和 30°(图 6),得到座垫抬起后的座椅模型。

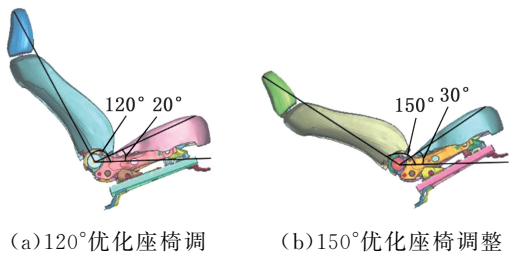


图 6 防护策略座椅调整示意图

Fig.6 Protective strategy seat adjustment diagram

1.4 乘员损伤评价

时间间隔 15 ms 的头部损伤指标计算公式为

$$A = \max\left(\frac{1}{(t_2 - t_1)^{1.5}} \left(\frac{1}{g} \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt\right)^{2.5}\right) \quad (1)$$

式中: $a(t)$ 为测试人体头部质心的合成加速度; t_1 、 t_2 分别为头部损伤指标达到最大值的开始时间和结束时间, 美国联邦机动车安全标准规定 A 的允许值为 700。

头部旋转损伤指标为

$$B = \sqrt{\left(\frac{\omega_x}{\omega_{xc}}\right)^2 + \left(\frac{\omega_y}{\omega_{yc}}\right)^2 + \left(\frac{\omega_z}{\omega_{zc}}\right)^2} \quad (2)$$

式中: ω_x 、 ω_y 、 ω_z 分别为头部重绕在 X、Y、Z 轴的最大角速度; ω_{xc} 、 ω_{yc} 、 ω_{zc} 分别为 ω_x 、 ω_y 、 ω_z 的临界值, $\omega_{xc} = 66.3$ rad/s, $\omega_{yc} = 53.8$ rad/s, $\omega_{zc} = 41.5$ rad/s。

损伤概率为

$$P = 1 - \exp\left(-\left(\frac{B}{1.204}\right)^{2.84}\right) \quad (3)$$

根据 YOGANANDAN 等^[18]的研究,可以通过测量人体模型颈部各类韧带的最大主应变来确定颈部损伤,其中,前纵向韧带的损伤阈值为 0.35,后纵向韧带的损伤阈值为 0.34,关节囊韧带的损伤阈值为 1.48,黄韧带的损伤阈值为 0.88,棘突间韧带损伤阈值为 0.68。

肺部应变达到 35% 时发生损伤^[19],心脏损伤的应变阈值为 30%^[20],肝脏、肾脏和脾脏的应变耐受值为 30%^[21]。

2 研究结果

2.1 THUMS 乘员约束系统验证试验

对建立好的 THUMS 乘员约束系统施加与试验相同的正面碰撞边界条件,通过对比动画及运动轨迹来验证模型的有效性。0~20 ms 时,碰撞处于初始阶段,乘员姿态变化不明显; 20~100 ms 时,碰撞冲击速度变大,乘员与座椅之间出现相对位移,乘员身体前倾,胸腹部在安全带的作用下发生变形; 100~150 ms 时,乘员头颈部发生明显屈曲,手臂伸展到水平位置,下肢离开脚踏板。如图 7 所示,正面碰撞仿真中,THUMS 乘员模型的运动响应与实车撞击试验(post Mor-

tem human subjects, PMHS) 的运动学响应高度一致。仿真中,乘员模型的头部(Head)、第一胸椎(T1)、第八胸椎(T8)、第二腰椎(L2)、骨盆(Pelvis)的运动轨迹与试验的轨迹相似,展现出很好的相关性,证明两者具有较高的相似度(见图 8)。

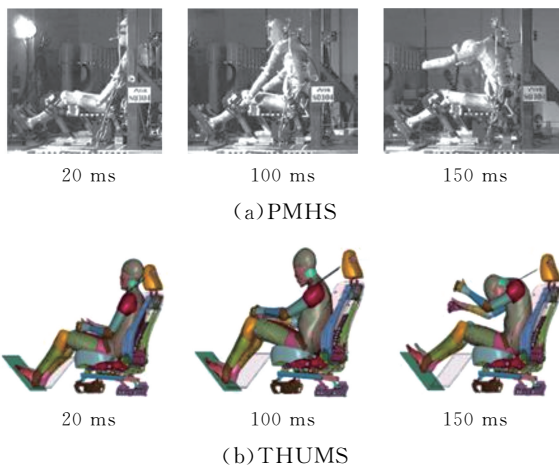


图 7 THUMS 与 PMHS 的运动学响应

Fig.7 Kinematic responses of THUMS and PMHS

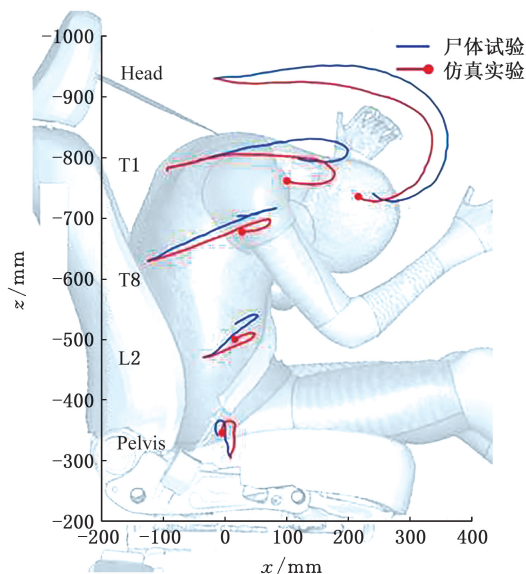


图 8 矢状面下 PMHS 与 THUMS 的头部、T1、T8、L2 和骨盆的运动轨迹

Fig.8 Motion trajectories of head, T1, T8, L2 and pelvis for THUMS and PMHS in sagittal plane

2.2 正面碰撞仿真试验

表 1 所示为乘员在正面碰撞仿真实验中的运动学响应。0~60 ms,座椅加速向后运动。35 ms 时,安全气囊完全展开,人体由于惯性向前运动,安全带预紧器、卷收器拉紧安全带,使胸带、腰带与人体贴合。标准坐姿下,2 种安全带约束的乘员运动学响应基本一致。娱乐坐姿下,座椅安全带约束的人体出现下潜的趋势,B 柱安全带约束的乘员没有出现明显的下潜趋势。休息姿势下,2 种安全带约束的乘员均出现明显的下潜的

趋势。80 ms 时, B 柱安全带约束的乘员面部与胸带接触,但乘员的下滑趋势明显小于座椅安全带;2 种安全带约束的乘员面部在整个碰撞过程中均未与安全气囊接触。

表 1 正面碰撞乘员的运动学响应

Tab.1 Kinematic response of frontal collision occupant

姿态	安全带约束	时间			
		0 ms	80 ms	110 ms	150 ms
标准坐姿	座椅安全带约束				
	B 柱安全带约束				
娱乐姿势	座椅安全带约束				
	B 柱安全带约束				
休息姿势	座椅安全带约束				
	B 柱安全带约束				

3 种坐姿下的乘员头部质心运动轨迹如图 9 所示。标准姿势下, 2 种安全带约束的乘员头部质心轨迹无显著差异。娱乐姿势下, 座椅安全带约束的乘员头部质心的 Y 向位移显著大于 B 柱安全带, 座椅安全带不能很好约束乘员, 导致乘员

出现下潜趋势。休息姿势下, B 柱安全带约束的乘员头部质心的 Y 向运动幅度很小(最大位移为 44 mm), 座椅安全带不能很好约束乘员, 导致乘员出现下潜趋势。

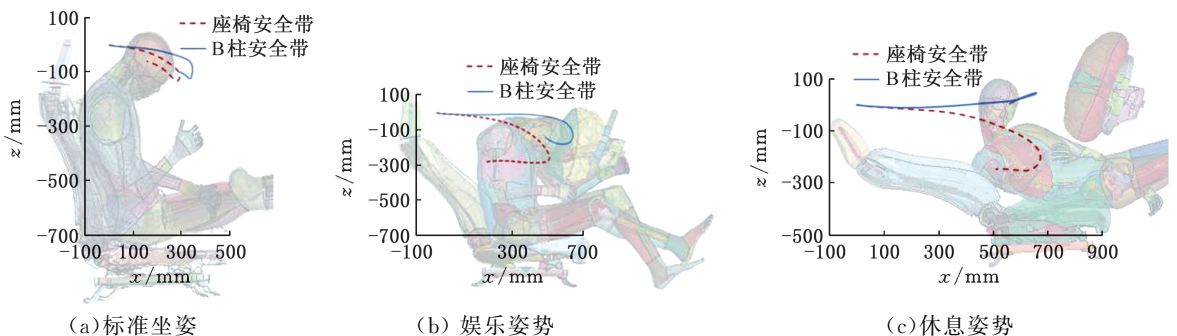


图 9 不同坐姿的头部质心运动轨迹

Fig.9 High tilt sitting head centroid motion trajectory diagram

由表 2 可以看出后纵向韧带、棘突间韧带为主要的损伤位置。随着座椅靠背倾角的增大,颈部韧带的损伤数量增大。座椅安全带约束下,150°倾角的乘员颈部韧带 有 5 处损伤,120°倾角的乘员颈部韧带 有 4 处损伤,100°倾角的乘员颈部韧带 有 2 处损伤。B 柱安全带约束下,120°倾角的颈部韧带 有 3 处损伤,150°倾角的颈部韧带 有 4 处损伤。

表 2 正面碰撞中颈部韧带损伤结果

Tab.2 Results of neck ligament injury in head-on collision

颈部韧带	损伤阈值	标准坐姿(100°)		娱乐姿势(120°)		休息姿势(150°)	
		座椅安全带	B 柱安全带	座椅安全带	B 柱安全带	座椅安全带	B 柱安全带
前纵向韧带	0.35	0.035	0.138	0.116	0.165	0.591	0.727
后纵向韧带	0.34	2.166	0.848	1.144	0.455	1.993	1.075
关节囊韧带	1.48	1.439	1.457	3.203	1.804	4.682	2.296
黄韧带	0.88	0.505	0.652	1.133	0.722	1.059	0.523
棘突间韧带	0.68	2.491	2.298	4.373	3.104	2.554	1.234

由表 3 可知,随着倾斜角度的增大,乘员胸部的损伤风险增大;同种倾斜角度下,B 柱安全约束的乘员胸部损伤风险小于座椅安全带约束的乘员。标准坐姿下,B 柱安全带约束的乘员胸部器官未发生明显损伤;座椅安全带约束的肺部、脾脏应变小幅度超过阈值,可能发生损伤。娱乐姿势下,座椅安全带约束的肺部、肝脏、脾脏应变超过阈值,有损伤的风险;B 柱安全带约束的肝脏应变超过阈值,有损伤的风险。休息姿势下,座椅安全带约束的肝脏、肺部、脾脏、心脏应变超过阈值;B 柱安全带约束的肺部、肝脏、脾脏、肾脏应变均超过阈值。

表 3 正面碰撞胸腹部器官应变

Tab.3 The strain of the thoracic and abdominal organs in a frontal collision %

应变	极限应变	标准坐姿(100°)		娱乐姿势(120°)		休息姿势(150°)	
		座椅安全带	B 柱安全带	座椅安全带	B 柱安全带	座椅安全带	B 柱安全带
肺部应变	35	48.7	12.9	45.5	34.6	72.1	40.6
心脏应变	30	13.5	2.3	14.2	11.6	113.7	19.6
肝脏应变	30	28.6	1.8	161.8	56.3	31.1	69.9
脾脏应变	30	33.4	1.1	115.8	29.6	77.0	50.9
肾脏应变	30	7.4	1.5	26.8	7.4	14.2	44.0

由表 4 可知,120°与 150°的头部旋转损伤指标 B 均大于 100°的标准坐姿;B 柱安全带约束的

休息坐姿乘员头部损伤指标 A 超过阈值;B 柱安全带约束下,随着座椅倾斜角度的增大,乘员头部损伤的风险会增加。

表 4 正面碰撞中头部损伤结果

Tab.4 Result of head injury in head-on collision

损伤指标	标准坐姿(100°)		娱乐姿势(120°)		休息姿势(150°)	
	座椅安全带	B 柱安全带	座椅安全带	B 柱安全带	座椅安全带	B 柱安全带
A	386.4	312.8	423.1	498.6	311.6	775.9
B	0.778	0.868	1.423	1.160	1.403	1.176
P/%	25.1	32.6	80.0	59.3	78.6	60.8

2.3 防护策略下正面碰撞仿真实验

表 5 所示为乘员在正面碰撞仿真实验中的运动学响应。娱乐姿势下,座椅安全带约束的乘员头部仅与安全气囊边缘接触,B 柱安全带约束的乘员头部在 80 ms 时完全与安全气囊接触,且接触位置位于气囊中间。休息姿势下,座椅安全带约束的乘员胸带卡住乘员脖子,B 柱安全带约束的乘员安全带胸带与乘员面接触;座椅安全带约束的乘员下潜趋势小。

娱乐姿势与休息姿势防护策略下,乘员头部质心的运动轨迹如图 10 所示。座椅安全带约束的乘员头部质心 Z 向运动幅度更大,B 柱安全带约束的乘员 X 向运动幅度更大,但乘员均未出现明显的下潜。休息姿势防护策略下,B 柱安全带约束的乘员头部质心 Z 向运动幅度更大;座椅安全带约束的乘员头部质心 X 向运动幅度更大,乘员头部质心 Z 向的运动轨迹多次上升与下降(可能原因是安全带勒住乘员颈部)。

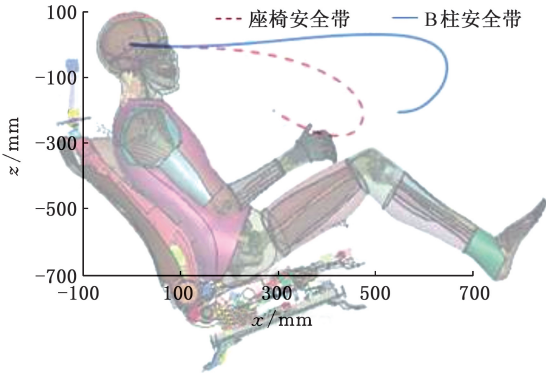
座垫翻转抬起策略下,娱乐姿势、休息姿势的乘员颈部韧带损伤如表 6 所示。同一坐姿的座垫翻转防护策略下,B 柱安全带约束的颈部韧带总体损伤更少。座垫翻转抬起策略并未显著减少颈部韧带的损伤,某些韧带的应变增大,如休息姿势的棘突间韧带与前纵向韧带、娱乐姿势的前纵向韧带的应变增大。

由表 7 可知,娱乐姿势下,座椅安全带约束的乘员肝脏、肺部、脾脏、心脏的应变均超过阈值,肾脏应变未超过阈值;B 柱安全带约束的乘员心脏、肺部、肾脏的应变均未超过阈值,肝脏、脾脏的应变超过阈值。休息姿势下,座椅安全带约束的乘员肝脏、肺部、脾脏的应变均超过阈值,肾脏、心脏的应变未超过阈值;B 柱安全带约束的乘员心脏、肺部、肾脏的应变均未超过阈值,肝脏、脾脏的应变超过阈值。B 柱安全带约束的乘员内脏应变幅度明显更小即乘员内脏损伤的风险小。

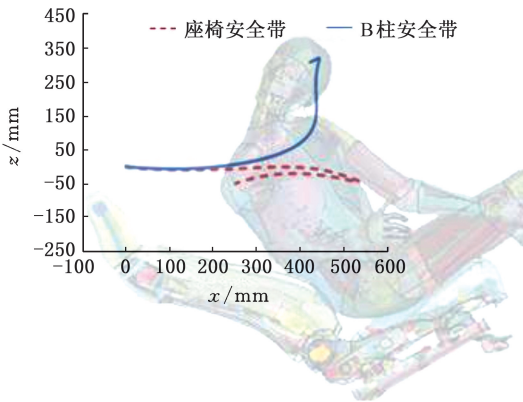
表 5 防护策略下正面碰撞乘员的运动学响应

Tab.5 Kinematic response of frontal collision occupant under protective strategy

姿态	安全带约束	时间			
		0 ms	50 ms	100 ms	150 ms
娱乐姿势	座椅安全带约束				
	B柱安全带约束				
休息姿势	座椅安全带约束				
	B柱安全带约束				



(a)娱乐姿势



(b)休息姿势

图 10 防护策略下头部质心运动轨迹图

Fig.10 Head centroid motion trajectory under protection strategy

座垫翻转抬起策略下,娱乐姿势、休息姿势的乘员头部损伤指标如表8所示,座垫翻转抬起策

表 6 正面碰撞中颈部韧带损伤结果

Tab.6 Results of neck ligament injury in head-on collision

颈部韧带	损伤阈值	娱乐姿势(120°)		休息姿势(150°)	
		使用座椅安全带	使用B柱安全带	使用座椅安全带	使用B柱安全带
前纵向韧带	0.35	0.539	0.844	0.622	0.920
后纵向韧带	0.34	1.231	0.923	1.610	0.760
关节囊韧带L	1.48	2.860	2.473	4.268	3.952
黄韧带	0.88	0.931	0.656	1.323	0.477
棘突间韧带	0.68	2.928	2.105	4.060	1.647

表 7 正面碰撞胸腹部损伤预测

Tab.7 Prediction of chest and abdomen injury in frontal collision

胸腹部应变	极限应变值	娱乐姿势(120°)		休息姿势(150°)	
		座椅安全带	B柱安全带	座椅安全带	B柱安全带
肺部应变	35	39.9	32.9	41.7	24.4
心脏应变	30	37.0	11.2	24.3	7.8
肝脏应变	30	42.1	31.8	85.4	70.1
脾脏应变	30	46.4	37.5	45.4	69.6
肾脏应变	30	9.4	9.1	9.0	8.7

表 8 正面碰撞中头部损伤结果

Tab.8 Result of head injury in head-on collision

损伤指标	娱乐姿势(120°)		休息姿势(150°)	
	使用座椅安全带	使用B柱安全带	使用座椅安全带	使用B柱安全带
A	348.3	423.6	747.5	536.3
B	0.983	1.064	0.897	1.469
P/%	43	50.5	35.2	82.8

略有效减小了娱乐姿势乘员的头部损伤指标、头部旋转损伤指标,将座椅安全带约束下娱乐姿势

乘员的损伤概率从 80% 降至 43%。头部旋转损伤指标与头部质心的旋转密切相关, 休息姿势下, B 柱安全带约束的乘员面部与安全带接触, 导致头部运动发生改变, 加大了头部旋转损伤指标。对比发现座垫翻转能有效降低乘员的头部损伤风险。

3 讨论

对比运动学响应发现, 不同座椅倾角和安全带的乘员运动学响应差异明显。座椅安全带约束下, 120°、150° 坐姿的乘员在碰撞中出现明显的下潜; B 柱安全带约束下的乘员下潜趋势小。座椅倾角的增大加大了肝脏、肺部、脾脏、心脏、肾脏的损伤风险。同种约束下, 座椅倾角越大, 乘员内脏的损伤风险越大; 同一座椅倾角下, B 柱安全带约束的乘员内脏损伤风险更低。大倾角坐姿下, 后纵向韧带、棘突间韧带为主要的损伤位置。随着座椅靠背倾角的增大, 颈部韧带的损伤增多。相同安全带约束下, 120° 与 150° 倾角下的头部旋转损伤指标均大于 100° 的标准坐姿; 150° 坐姿、B 柱安全带约束下的乘员头部损伤指标超过阈值。针对大倾角坐姿下, 乘员下潜导致严重损伤的现象, 提出座垫抬起的防护措施即通过座垫抬起来减少乘员的下潜。人体的运动学响应和损伤分析证明该保护策略具有可行性。

座垫翻转抬起策略大幅度降低了大倾角坐姿乘员胸腹部的损伤风险, 尤其是座椅安全带约束下的乘员的损伤风险。但座垫翻转抬起策略并未显著减少颈部韧带的损伤, 甚至 150° 坐姿下的棘突间韧带、120° 与 150° 坐姿下的前纵向韧带等的应变增大, 这可能是由于座垫翻转导致安全带滑动到乘员颈部, 对颈部造成伤害。座垫翻转抬起策略有效减少了 120° 乘员的头部损伤指标、头部旋转损伤指标, 将座椅安全带约束下 120° 的乘员的损伤概率从 80% 降至 43%。头部旋转损伤指标与头部质心的旋转密切相关, B 柱安全带约束下, 150° 坐姿的乘员由于安全带接触到了乘员面部, 加大了该乘员头部损伤。

4 结论

1) 在大倾角坐姿、B 柱安全带约束下的乘员损伤整体小于座椅安全带; 乘员在正面碰撞中发生下潜, 且下潜趋势随倾斜角度的增大而增大, 但乘员的下潜趋势小于座椅安全带约束乘员。

2) 倾角 150° 时, 随着座椅靠背倾角的增大, 乘员的整体损伤增大。对于座椅安全带约束的损

伤概率, 倾角 150° 比倾角 100° 增大 53.5%。座椅安全带约束下, 150° 倾角的乘员颈部韧带带有 5 处损伤, 120° 倾角有 4 处损伤, 100° 倾角有 2 处损伤。

3) 对比防护策略下乘员的运动学响应与人体损伤指标发现, 防护策略能有效减小身体在大倾角坐姿下损伤风险; 相同角度下, B 柱安全带约束的乘员损伤风险低于座椅安全带约束的乘员损伤风险。

随着自动驾驶技术的普及, 乘员可能采取多种坐姿, 这要求安全设备具有高度的适应性和有效性。未来研究可继续探索更多非标准坐姿下的乘员安全防护措施, 以及如何通过控制最大限度减小乘员在碰撞中的伤害, 为自动驾驶车辆的安全设计提供更全面的理论支持和实践指导。

参考文献:

- [1] 蔡云, 吴澳琪, 滕金润, 等. 智能网联汽车开放测试道路交通安全评价研究[J]. 公路与汽运, 2024(1): 17-24.
CAI Yun, WU Aoji, TENG Jinrun, et al. Research on Road Traffic Safety Evaluation of Intelligent Networked Vehicle Open Test[J]. Highways & Automotive Applications, 2024(1):17-24.
- [2] 武和全, 刘瑾, 龚创业, 等. 自动驾驶汽车的碰撞安全性研究综述[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2023, 20(2):35-44.
WU Hequan, LIU Jin, GONG Chuangye, et al. A Review of Crash Safety Research on Self-driving Cars[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2023, 20(2):35-44.
- [3] 武和全, 张凯, 胡林, 等. 自动驾驶汽车事故中主动旋转座椅规避儿童乘员的损伤风险研究[J]. 中国公路学报, 2023, 36(5):273-286.
WU Hequan, ZHANG Kai, HU Lin, et al. Active Rotating Seat to Improve Child Occupants Safety in Autonomous Vehicle Accidents[J]. China Journal of Highway and Transport, 2023, 36(5):273-286.
- [4] JORLÖV S, BOHMAN K, LARSSON A. Seating Positions and Activities in Highly Automated Cars—a Qualitative Study of Future Automated Driving Scenarios[C] // International Research Conference on the Biomechanics of Impact. Antwerp, 2017:13-22.
- [5] IVE H P, SIRKIN D, MILLER D, et al. “Don’t Make Me Turn This Seat Around!”: Driver and Passenger Activities and Positions in Autonomous Cars[C] // Adjunct Proceedings of the 7th International Conference on Automotive User Interfaces

- and Interactive Vehicular Applications. New York, 2015:50-55.
- [6] WALDROP M. Autonomous Vehicles; No Drivers Required[J]. Nature, 2015, 518(7537):20-23.
- [7] HU Lin, LU Tao, LI Gen, et al. Automatic Generation of Intelligent Vehicle Testing Scenarios at Intersections Based on Natural Driving Datasets[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2023, PP(99):1-11.[LinkOut]
- [8] 武和全, 李羿辉, 刘瑾, 等. 不同坐姿乘员在自动驾驶汽车碰撞中的损伤仿真实验[J]. 汽车安全与节能学报, 2024, 15(4):484-491.
- WU Hequan, LI Yihui, LIU Jin, et al. Simulation Experiments for the Passenger Injuries with Different Sitting Positions in Autonomous Vehicle Collisions[J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2024, 15(4):484-491.
- [9] BOYLE K J, REED M P, ZASECK L W, et al. A human Modelling Study on Occupant Kinematics in Highly Reclined Seats during Frontal Crashes[C]// Proceedings of the International Research Conference on the Biomechanics of Impact. Florence, 2019:IRC-19-23.
- [10] DISSANAIKE S, KAUFMAN R, MACK C D, et al. The Effect of Reclined Seats on Mortality in Motor Vehicle Collisions[J]. The Journal of Trauma, 2008, 64(3):614-619.
- [11] THORBOLE C K. Dangers of Seatback Recline in a Moving Vehicle; How Seatback Recline Increases the Injury Severity and Shifts Injury Pattern[C]// The ASME 2015 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Houston, 2015: V003T03A056.
- [12] STANGLMEIER M J, PATERNOSTER F K, PATERNOSTER S, et al. Automated Driving: a Biomechanical Approach for Sleeping Positions[J]. Applied Ergonomics, 2020, 86:103103.
- [13] FORMAN J, LIN Hongnan, GEPNER B, et al. Occupant Safety in Automated Vehicles[J]. International Journal of Automotive Engineering, 2019, 10(2):139-143.
- [14] BOSE D, CRANDALL J R, UNTAROIU C D, et al. Influence of Pre-collision Occupant Parameters on Injury Outcome in a Frontal Collision[J]. Accident Analysis & Prevention, 2010, 42(4):1398-1407.
- [15] ACOSTA S M, ASH J H, LESSLEY D J, et al. Comparison of Whole Body Response in Oblique and Full Frontal Sled Tests[C]// Proceedings of IRCOBI Conference. Malaga, 2016:740-754.
- [16] KITAGAWA Y, HAYASHI S, YAMADA K, et al. Occupant Kinematics in Simulated Autonomous Driving Vehicle Collisions; Influence of Seating Position, Direction and Angle[J]. Stapp Car Crash Journal, 2017, 61:101-155.
- [17] HAULT-DUBRULLE A, ROBACHE F, DRAZETIC P, et al. Determination of Pre-impact Occupant Postures and Analysis of Consequences on Injury Outcome: Part II: Biomechanical Study [J]. Accident Analysis & Prevention, 2011, 43(1):75-81.
- [18] YOGANANDAN N, KUMARESAN S, PINTAR F A. Geometric and Mechanical Properties of Human Cervical Spine Ligaments[J]. Journal of Biomechanical Engineering, 2000, 122(6):623-629.
- [19] STITZEL J D, GAYZIK F S, HOTH J J, et al. Development of a Finite Element-based Injury Metric for Pulmonary Contusion Part I: Model Development and Validation [J]. Stapp Car Crash Journal, 2005, 49:271-289.
- [20] Yamada H. Strength of Biological Materials[J]. Williams & Wilkins Company Baltimore, 1970(3): 585-589.
- [21] Melvin J W, Stalnaker R L, Roberts V L, et al. Impact Injury Mechanisms in Abdominal Organs [R]. SAE Technical Paper, 1973.

(编辑 张 洋)

作者简介:武和全*,男,1982年生,博士,副教授。研究方向为汽车碰撞安全。发表论文 50 余篇。E-mail:csust_vehicle@hotmail.com。

本文引用格式:

武和全,龚创业,李羿辉,等.大倾角坐姿乘员在汽车正面碰撞中的损伤[J].中国机械工程,2025,36(7):1497-1504.

WU Hequan, GONG Chuangye, LI Yihui, et al. Injuries of Occupants in a High-dimention Seated During a Frontal Vehicle Collisions[J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(7):1497-1504.