

座垫约束对大角度坐姿乘员的保护功能研究*

商恩义 李琨 习波波 李月明

(吉利汽车研究院(宁波)有限公司,浙江省全省智能汽车全域安全重点实验室,宁波 315336)

【摘要】为研究正面碰撞中座垫约束对大角度坐姿乘员的保护作用,针对后排座椅靠背倾角 45° 坐姿乘员,分别采用 10° 、 27° 座垫角度、带气囊座垫进行了滑台试验,结果表明:正面碰撞中,座垫气囊对大角度坐姿乘员没有保护作用;座垫角度由 10° 增大至 27° 时,处于大角度坐姿的后排乘员第十二胸椎(T12)的轴向力可下降约40%;最大胸部变形量位于带扣侧,随着座垫角度增大,最大胸部变形部位向下方移动且最大胸部变形量增大,当座垫角度达到 27° 时,最大变形量可超出高性能限值16.9%。因此,对于后排零重力座椅,座垫角度应在 $10^\circ\sim 27^\circ$ 范围内选择以平衡胸椎和胸部损伤,胸椎轴向力偏大时增大角度,胸部变形量偏大时减小角度。

关键词:大角度坐姿 座垫角度 座垫气囊 胸椎T12 胸部变形量

中图分类号:U467.1⁴ 文献标志码:A DOI: 10.20104/j.cnki.1674-6546.20240219

Research on the Protection Function of Seat Cushion Restraint to Occupant in Wide-Angle Sitting Posture

Shang Enyi, Li Kun, Xi Bobo, Li Yueming

(Geely Automobile Research Institute (Ningbo) Co., Ltd., Zhejiang Key Laboratory of Intelligent Vehicle Comprehensive Safety, Ningbo 315336)

【Abstract】In order to study the protective effect of seat cushion restraint for occupant in reclined sitting in front impact, the sled tests were carried out with 10° and 27° seat cushion, seat cushion with airbag respectively to. The results show that the cushion airbag has no protective effect on occupant in reclined sitting. When the seat cushion angle is increased from 10° to 27° , the thoracic axial force of the 12th thoracic vertebrae (T12) in the rear occupant in reclined sitting can decrease by about 40%. The maximum chest deflection is located on the buckle side, and it transfers to bottom and increases with the increase of the seat cushion angle. When the seat cushion angle reaches 27° , the maximum deflection can exceed the high performance limit by 16.9%. Therefore the seat cushion angle should be selected between 10° and 27° to balance the thoracic and chest injuries for the rear zero gravity seat. The angle should be increased when the T12 axial force is too large, and the angle should be reduced when the chest deflection is too large.

Key words: Reclined sitting, Seat cushion angle, Seat cushion airbag, Thoracic T12, Chest deflection

【引用格式】商恩义,李琨,习波波,等.座垫约束对大角度坐姿乘员的保护功能研究[J].汽车工程师,2025(3):20-26.

SHANG E Y, LI K, XI B B, et al. Research on the Protection Function of Seat Cushion Restraint to Occupant in Wide-Angle Sitting Posture[J]. Automotive Engineer, 2025(3): 20-26.

1 前言

伴随着汽车的智能化快速转型,可将座椅靠背调节至 45° 或 60° 等大角度,使乘员处于放松状态的零重力座椅开始陆续在部分乘用车上配置,但整车制造商仅建议乘员在停车休息的情况下采用大角

度坐姿,主要原因是大角度坐姿下乘员在碰撞过程中的损伤机理、保护方案等研究还不成熟,相关的法规还不完善^[1]。如正面碰撞过程中,相对于 25° 靠背倾角坐姿下的乘员主要表现为前扑,大角度坐姿下的乘员将发生严重下潜,而下潜造成的损伤及保护措施仍处在研究中。

*基金项目:浙江省全省智能汽车全域安全重点实验室开放基金项目(ZKLIVCS-202401)。

针对不同坐姿下乘员的乘坐舒适性及碰撞损伤,黄青阳^[2]等研究了自动驾驶等级提高条件下驾驶人驾驶姿势的变化规律,陈满^[3]等研究了座椅靠背倾角对人体振动的响应,指出适度增大靠背倾角可以降低座椅对振动的传递率和总加权吸收功率,但过多增大靠背倾角会导致座椅的振动传递率出现不规则上升而降低舒适性。陆剑雄^[4]等研究了坐姿理论与座椅设计原则,指出良好坐姿的必要条件是将最适当的压力分布于各脊椎骨之间的椎间盘上。Pankoke等^[5]通过仿真研究了与振动相关的脊柱载荷。李琨等^[6]通过THOR AV假人有限元模型研究了不同坐姿下乘员的损伤,指出大角度坐姿下第十二胸椎(胸椎T12)轴向压缩力对乘员安全产生较大威胁。

对于正面碰撞中乘员下潜问题,目前的解决方案之一是增大安全带腰带的作用强度,但同时将对腹部器官造成严重挤压损伤,且骨盆减速过快也将导致胸椎受躯干挤压加重。其他解决方案还包括采用座垫气囊或增大座垫角度来缓解或避免后排乘员下潜,故针对后排大角度坐姿乘员,本文通过座椅滑台试验,从乘员运动姿态和所受伤害两方面探讨座垫角度变化及座垫气囊对乘员的保护作用。

2 后排乘员大角度坐姿滑台试验

THOR AV假人是全球首款为自动驾驶汽车开发的大角度坐姿假人,虽然法规试验中尚未正式采用,但可参考THOR第50百分位假人应用。THOR AV假人头部、胸部、骨盆均安装有三向加速度传感

器,胸部变形量通过4只IR-TRACC (Infra-Red Telescoping Rod for the Assessment of Chest Compression)传感器进行测量,颈部和胸椎T12位置安装有载荷传感器。建立假人加速度和载荷坐标系^[7]: x 向为纵向, y 向为横向, z 向为垂向。对于加速度, x 向向前为正, y 向向右为正, z 向向下为正。受拉时假人颈部载荷 F 为正;头向前、胸向后时弯矩 M_x 为正,称为弯曲弯矩,反之称为伸张弯矩。对于胸部变形量,胸骨远离胸椎为正。对于胸椎T12载荷,受拉时 F_{zT12} 为正,骨盆不动胸部向前时弯矩 M_{yT12} 为正。

制定试验方案,以开发中的某款车型为研究平台,滑台加速度采用该车50 km/h正面碰撞试验中B柱下 x 向加速度,座椅采用该车后排座椅,安全带均采用预紧限力式安全带,型号为LL-59 N·m,安全带上固定点位于座椅靠背上,其他配置方案如表1所示。

表1 座椅滑台试验矩阵

试验序号	座垫角度/ $^{\circ}$	靠背倾角/ $^{\circ}$	点火时刻		
			座垫气囊	安全带	带扣
1	10	45		第14 ms	第22 ms
2	10	45	第14 ms	第14 ms	第22 ms
3	27	45	第14 ms	第14 ms	第22 ms

试验过程如图1和图2所示,座垫角度为 10° 时的试验1和试验2中,第60 ms前,头部与头枕相对位置关系表明假人下潜幅度大,第80 ms时安全带肩带已滑向带扣侧肩部,第120 ms时假人发生扭转。座垫角度为 27° 的试验3中假人胸部抬起幅度偏大。

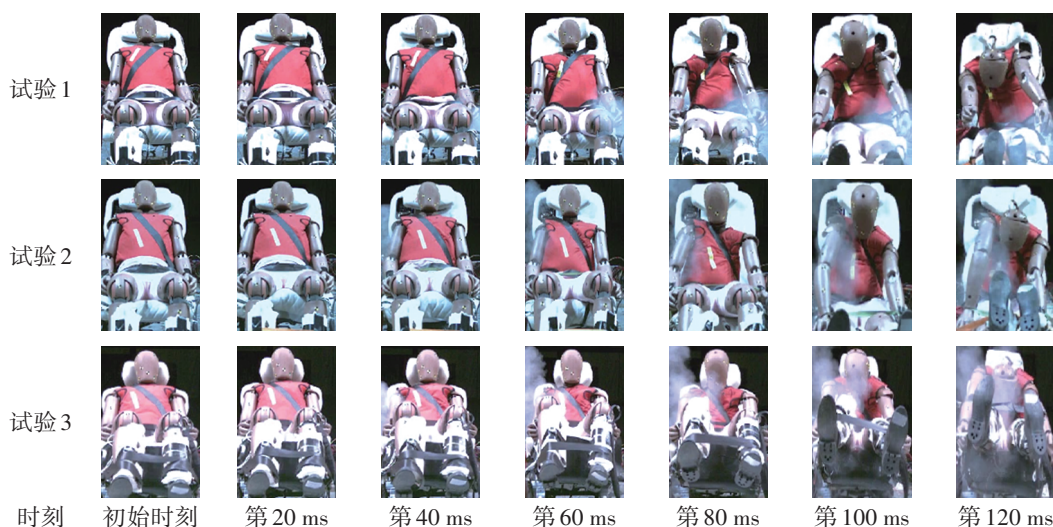


图1 滑台试验前方录像

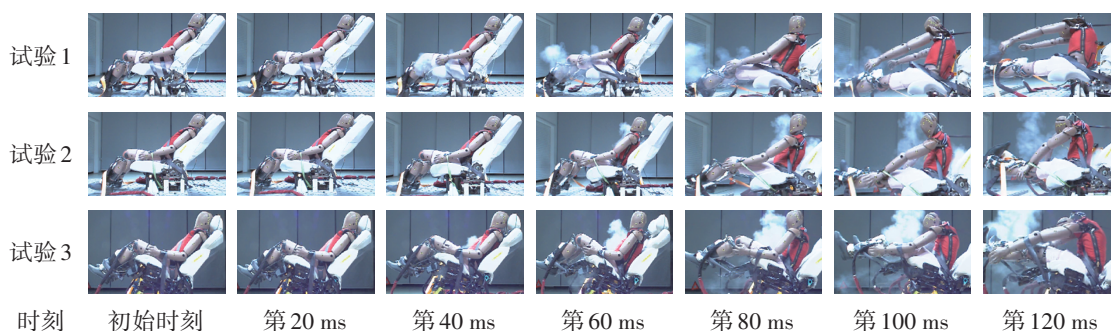


图2 滑台试验左侧录像

3 不同座垫角度下乘员运动姿态分析

THOR AV假人骨盆加速度的变化反映了骨盆减速过程, F_{zT12} 反映躯干与臀部间的拉伸与挤压, M_{yT12} 反映躯干相对臀部的翻转强度。因此,通过骨盆加速度和胸椎T12载荷可以研究座垫角度差异对乘员运动姿态的影响。

3.1 座垫角度对骨盆加速度的影响

试验过程假人骨盆加速度如图3所示,带有座垫气囊的试验2和试验3中,骨盆 x 向加速度 a_{xp} 在座垫气囊展开过程中均有正向加速过程,且两条曲线全程趋于平缓,试验3中 a_{xp} 强度相对更低。与 x 向相对应,试验2和试验3中骨盆 z 向加速度 a_{zp} 均大于试验1中的 a_{zp} 。试验结果表明,座垫气囊在展开过程存在明显的抬腿拉扯骨盆过程,且能缓解约束过程中骨盆受到的冲击,但对骨盆下潜的阻止作用偏弱。座垫角度抬升对假人下潜的限制作用较强,其作用下 a_{zp} 较大, a_{xp} 相对较小,假人躯干翻转时间较早。

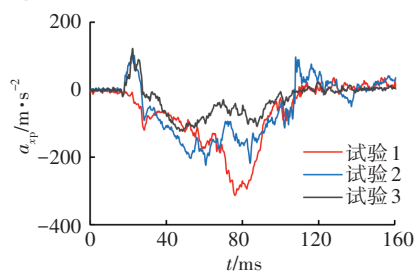
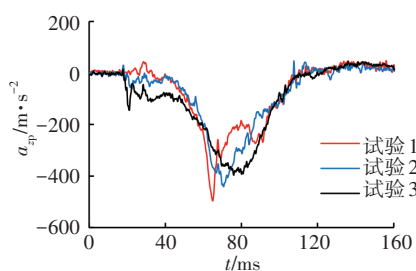
(a) x 向(b) z 向

图3 假人骨盆加速度

3.2 座垫角度对胸椎T12载荷的影响

如图4所示, F_{zT12} 基本全程为负,即T12位置全程受压,其中:试验1最大压力达到8.2 kN,且为双峰;试验2中增加座垫气囊后,最大压力为7.8 kN,略有缓解;试验3在试验2基础上将座垫角度调整为 27° 后,压力下降至4.8 kN,降低约40%。如图5所示,试验1和试验2中 M_{yT12} 接近,试验3中 M_{yT12} 全程高于试验1和试验2约 $50 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。试验结果表明,座垫气囊对臀部的约束不足以影响乘员躯干的翻转动作,而座垫角度越大,乘员躯干翻转越快,越有利于缓解大角度坐姿造成的下潜。

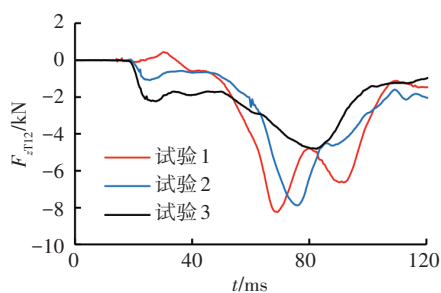


图4 假人胸椎T12载荷

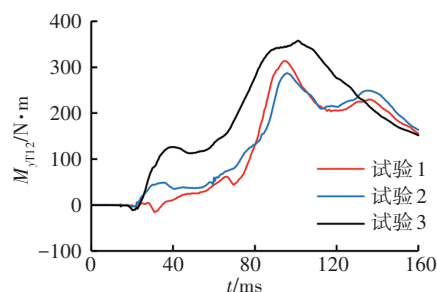


图5 假人胸椎T12弯矩

4 座垫约束的保护功能分析

后排乘员的主要损伤部位是头部、颈部和胸部,本文针对上述部位对乘员保护的影响进行探讨。

4.1 座垫约束对乘员头部损伤的影响

在《C-NCAP管理规则(2024年版)》^[8]的正面碰撞试验中,通过头部合成加速度计算头部伤害指数 HIC_{15} 。在头部发生二次碰撞的情况下,通过 HIC_{15} 对头部伤害进行评价,高性能限值为 500,低性能限值为 700。3次试验假人头部的 HIC_{15} 分别为 338(第 98.8~113.8 ms)、271(第 98.1~113.1 ms) 和 161(第 91.7~106.7 ms),伤害值均较小,且依次减小。

正面碰撞中假人头部横向加速度 a_y 较小,可忽略,纵向加速度 a_x 和垂向加速度 a_z 如图 6 所示, a_z 幅值相对较大,而试验 3 中 a_x 和 a_z 幅值均偏低。假人头部伤害来自内力和外力,外力由头部与安全气囊或其他内饰碰撞产生,内力由颈部施加^[9-11]。3次试验中假人头部与外部无任何接触,伤害均由头部在惯性作用下前向挥鞭作用产生的内力造成, HIC_{15} 依次递减表明座垫气囊及增大座垫角度缓解了乘员头部的前向挥鞭幅度,其中,增大座垫角度对挥鞭的缓解作用较大。

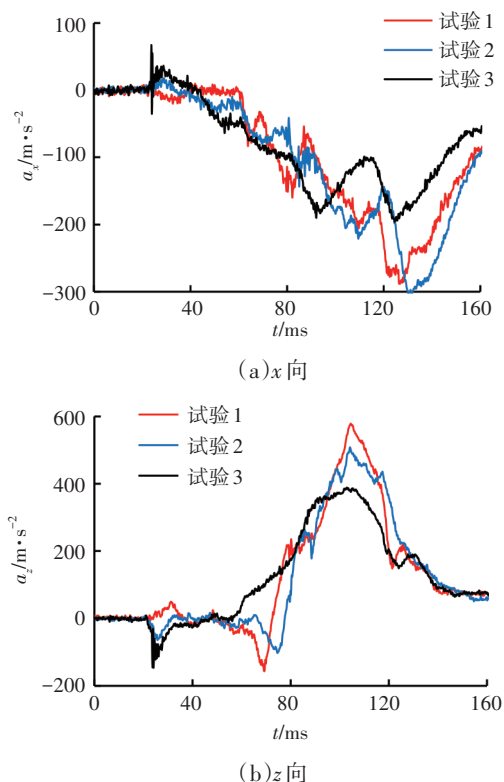


图6 假人头部加速度

4.2 座垫约束对乘员颈部损伤的影响

4.2.1 颈部上轴向力

《C-NCAP管理规则(2024年版)》中颈部载荷 F_z 高性能限值为 2.7 kN,3次试验中假人 F_z 如图 7

所示,最大值依次为 2.55 kN、2.54 kN 和 1.83 kN,均小于高性能限值,且座垫角度越大,颈部 F_z 越小,试验 3 颈部载荷相对试验 1 和试验 2 颈部载荷平均下降了 28%。座垫气囊对颈部轴向力没有影响。

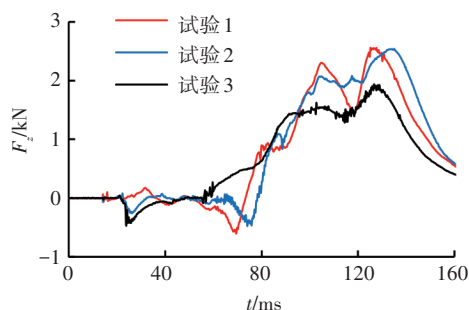


图7 假人颈部载荷

4.2.2 颈部上弯矩

在《C-NCAP管理规则(2024年版)》中,颈部弯矩只评价伸张弯矩。乘员在正常坐姿下,在正面碰撞初期,头部平动,胸部翻起前扑,颈部表现为伸张。滑台试验假人颈部弯矩 M_y 如图 8 所示,均较小,试验 3 最大伸张弯矩为 3.8 $N\cdot m$,高性能限值为 42 $N\cdot m$,仅为高性能限值的 9%。3次试验最大弯曲弯矩分别为 40.1 $N\cdot m$ 、31.8 $N\cdot m$ 和 32.8 $N\cdot m$ 。试验结果表明,后排乘员大角度坐姿下,相对于座椅靠背倾角为 25° 时的坐姿,碰撞初期乘员下潜缓解了胸部前扑强度,伸张弯矩较小,整个碰撞过程中,颈部弯矩主要表现为弯曲弯矩。

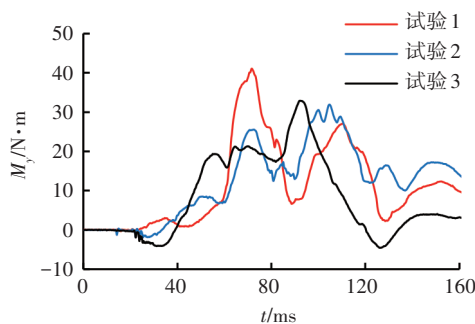


图8 假人颈部弯矩

4.3 乘员胸部损伤探讨

C-NCAP 正面碰撞试验胸部评价中,胸部压缩变形量为主要失分点,高性能限值为 35 mm,低性能限值为 60 mm。THOR AV 假人胸部 4 个变形量测量位置如图 9 所示,评价针对最大压缩变形量进行^[12]。

试验中假人胸部变形量如图 10 所示,试验 1 和试验 2 中最大压缩变形量分别为 34.8 mm 和

38.4 mm,位于带扣侧上方,试验2相对试验1增加了10.3%,但变形趋势一致。试验3最大压缩变形量为40.9 mm,位于带扣侧下方,相对试验1和试验2平均增加了11.7%,超出高性能限值16.9%。相对试验1和试验2,试验3中座垫角度由10°调整为27°后,乘员下潜幅度减小,前期胸部压缩变形量减小,而后在骨盆回撤、躯干加速前扑过程中,随着安全带腰带松弛上拉,在带扣侧下方胸部位置出现更强的压缩过程。

4.4 试验验证

考察试验结果稳定性及乘坐位置兼容性,按照试验3约束条件开展试验4,试验3中采用乘员侧后排座椅,试验4中采用驾驶员侧后排座椅。试验4录像截屏如图11所示,试验4与试验3对应时刻假人姿态基本一致。

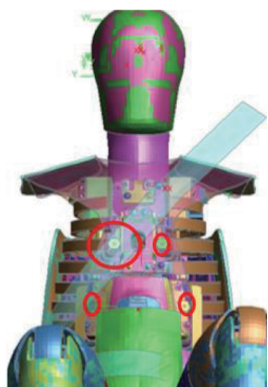
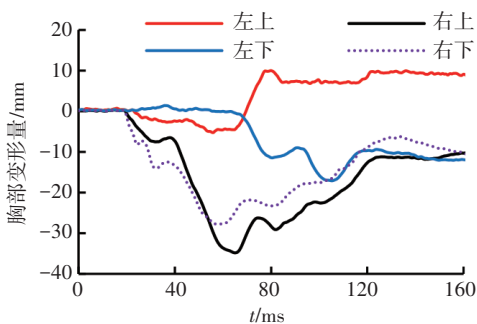
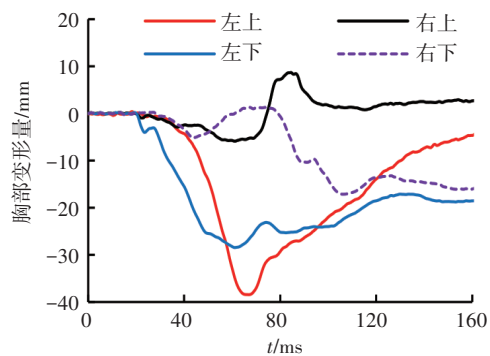


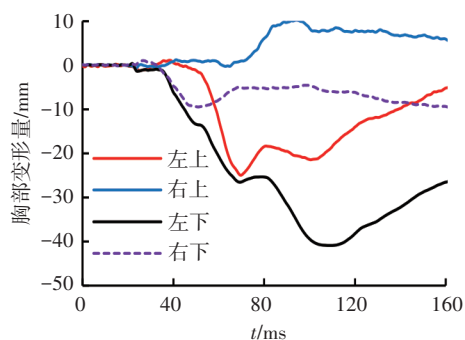
图9 THOR假人胸部变形量4点测量位置



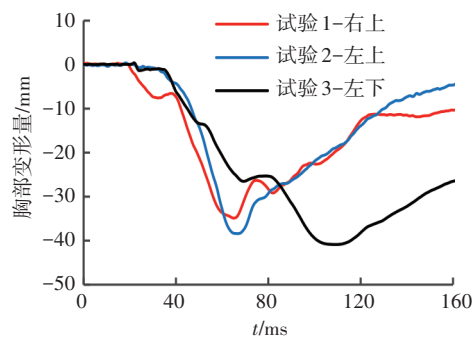
(a) 试验1



(b) 试验2



(c) 试验3



(d) 试验1~试验3最大胸部压缩变形量

图10 假人胸部变形量

试验4与试验3的数据对比如图12所示,所有曲线均基本吻合,即2次试验具有较好的一致性,滑台试验研究的结果真实反映了座垫角度变化对后排大角度坐姿乘员的保护功能。

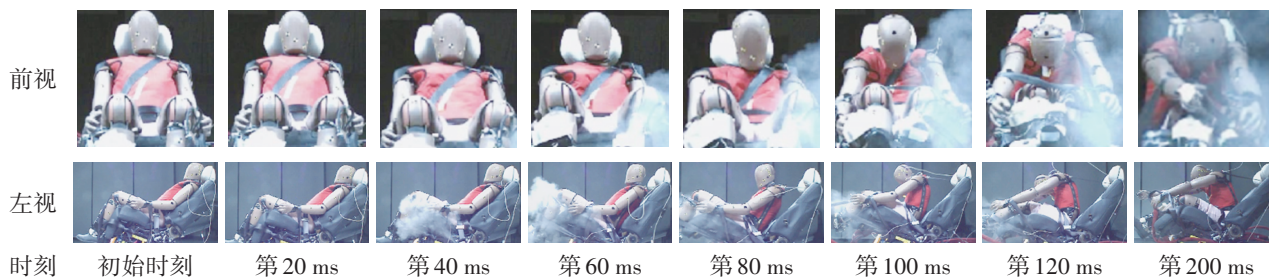
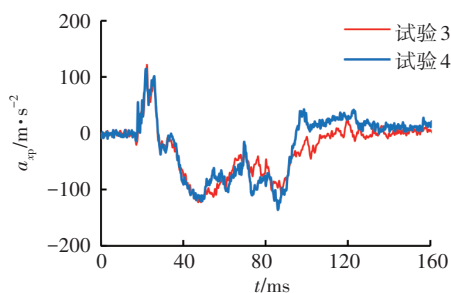
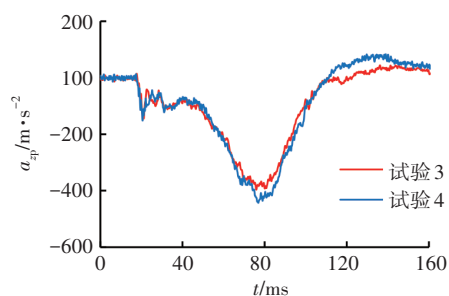
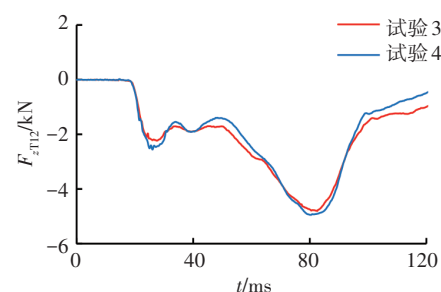
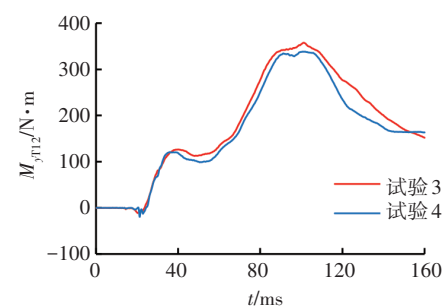


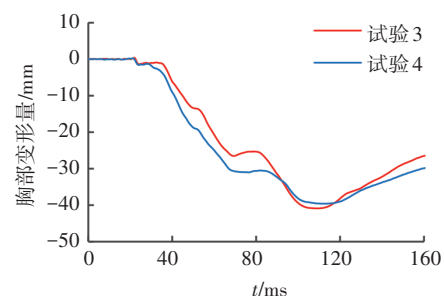
图11 试验4滑台试验录像

(a) 假人骨盆 x 向加速度(b) 假人骨盆 z 向加速度

(c) 假人胸椎T12载荷



(d) 假人胸椎T12弯矩



(e) 最大胸部压缩变形量

图12 试验3和试验4试验关键数据对比

5 结束语

本文通过分别对 10° 、 27° 座垫角度及带座垫气囊的大角度座椅进行滑台试验,对后排座椅靠背倾角 45° 下座垫对乘员的约束功能进行了研究,结果表明:后排乘员处于座椅靠背倾角 45° 的大角度坐姿时,头部和颈部伤害均较小;座垫气囊对乘员保护无改善作用;胸椎压力普遍较高,应关注;座垫角度由 10° 增大至 27° ,乘员胸椎T12最大压力由8 kN左右可下降约40%;随着座垫角度增大,胸部最大变形位置由带扣侧胸部上方转移至下方且胸部最大变形量增大,座垫角度由 10° 提升至 27° 时增大约11.7%,超出高性能限值16.9%。综上,座垫角度应根据可接受的胸椎及胸部变形损伤在 $10^\circ \sim 27^\circ$ 范围内选择。

参考文献

- [1] 唐洪斌,孙振东,丁晓东,等.智能汽车被动安全标准未来发展方向探究[J].汽车技术,2023(7):17-23.
TANG H B, SUN Z D, DING X D, et al. Exploration on the Future Development Direction of Passive Safety Standards for Intelligent Vehicles[J]. Automobile Technology, 2023 (7): 17-23.
- [2] 黄青阳,金晓萍,张怡康.自动驾驶等级提高条件下驾驶人驾驶姿势变化规律分析[J].汽车工程,2023,45(3):382-392.
HUANG Q Y, JIN X P, ZHANG Y K. Analysis of Driver Driving Posture Change under the Condition of Automatic Driving Level Improvement[J]. Automotive Engineering, 2023, 45(3): 382-392.
- [3] 陈满,赵清海,杨景周.考虑座椅靠背倾角对人体振动的响应研究[J].机械设计,2023,40(2):77-83.
CHEN M, ZHAO Q H, YANG J Z. Study on Response of Seat Back Tilt Angle to Human Body Vibration[J]. Journal of Mechanical Design, 2023, 40(2): 77-83.
- [4] 陆剑雄,张福昌,申利民.坐姿理论与座椅设计原则及其应用[J].江南大学学报(自然科学版),2005,4(6):620-625.
LU J X, ZHANG F C, SHEN L M. Theory of Sitting Posture and Principles of Chair Design and Their Application[J]. Journal of Jiangnan University (Natural Science Edition), 2005, 4(6): 620-625.
- [5] PANKOKE S, HOFMANN J, WLFEL H P. Determination of Vibration-Related Spinal Loads by Numerical Simulation [J]. Clinical Biomechanics, 2001, 16(S1): 45-56.
- [6] 李琨,刘玉涛,周大永,等.基于THOR-AV假人有限元模型的不同坐姿乘员损伤分析[J].汽车工程师,2023(6):

- 39-44.
- LI K, LIU Y T, ZHOU D Y, et al. Analysis of Occupant Injuries with Different Sitting Posture Based on THOR-AV Dummy Finite Element Model[J]. *Automotive Engineer*, 2023(6): 39-44.
- [7] SAE International. Instrumentation for Impact Test - Part1 - Electronic Instrumentation: SAE J211-1[S]. Warrendale, PA, USA: SAE International, 2022.
- [8] 中国汽车技术研究中心有限公司. C-NCAP管理规则(2024年版)[S/OL]. (2024-04-28)[2024-07-18]. <https://www.c-ncap.org.cn/guicheng/cncap?columnId=cb6014a591dd4b2fb7192367fec9012b&childindex=1>. China Automotive Technology and Research Center Co., Ltd.. C-NCAP Management Regulation (2024 Edition)[S/OL]. (2024-04-28)[2024-07-18]. <https://www.c-ncap.org.cn/guicheng/cncap?columnId=cb6014a591dd4b2fb7192367fec9012b&childindex=1>.
- [9] 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[J]. *汽车安全与节能学报*, 2014, 5(1): 47-51. SHANG E Y. Improving the Subjectivity Assessment Method of the Dummy Head Injury in the E-NCAP Frontal Impacting Tests[J]. *Journal of Automotive Safety and Energy*, 2014, 5(1): 47-51.
- [10] 商恩义, 李月明, 习波波, 等. C-NCAP中THOR 50th假人头部气囊触底评价方法探讨[J]. *汽车安全与节能学报*, 2021, 12(2): 180-185. SHANG E Y, LI Y M, XI B B, et al. Discuss on the Assessment Method of Airbag Bottoming-out by the THOR 50th Dummy Head in C-NCAP[J]. *Journal of Automotive Safety and Energy*, 2021, 12(2): 180-185.
- [11] 商恩义, 张君媛, 杨斌, 等. 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[J]. *汽车技术*, 2010(10): 18-21. SHANG E Y, ZHANG J Y, YANG B, et al. Research on the Analysis Method of the Dummy's Head and Thorax Stress in the Frontal Impact Test[J]. *Automobile Technology*, 2010(10): 18-21.
- [12] SHANG E Y, ZHOU D Y, YAN D D, et al. Study on Thorax Certification Evaluation Strategy of THOR-50M Dummy [C]// *Proceedings of China SAE Congress 2019: Selected Papers*. Singapore: Springer, 2019.

(责任编辑 斛 畔)

修改稿收到日期为2024年7月18日。